



Dicle Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

**mühendislikdersi**  
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
**mühendislikdersi**  
Cilt: 14, Sayı: 4, Aralık 2023 ISSN: 1309-8640

## **Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner**

Mehmet Sıraç ÖZERDEM

## **Baş Editör / Editor-in-Chief**

Mehmet Sıraç ÖZERDEM

## **Alan Editörleri / Field Editors**

Mehmet Sıraç ÖZERDEM

İdris BEDİRHANOĞLU

Mehmet Salih KESKİN

Atilla Gencer DEVECİOĞLU

Abdulkadir ALBAYRAK

Muhammet Ali ARSERİM

Hüseyin ACAR

Hasan POLAT

Mehmet NERGİZ

Abdurrahman SAYDUT

Erhan ÇETİN

Mehmet Emin ÖNCÜ

Senem YILMAZ ÇETİN

## **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](mailto: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.*

- Murat Örnek (İskenderun Teknik Üniversitesi)  
Zülküf Kaya (Erciyes Üniversitesi)  
Talha Burak Alakuş (Kırklareli Üniversitesi)  
Ali Güneş (İstanbul Aydın Üniversitesi)  
Hasan Oktay (Batman Üniversitesi)  
Ahmet Elbir (YTU)  
Nurullah Çalık (İstanbul Medeniyet Üniversitesi)  
Kemal Adem (Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)  
Alper Selver (Dokuz Eylül Üniversitesi)  
Mana Sezdi (İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa)  
Ferzat Anka (Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi)  
Emrullah Acar (Batman Üniversitesi)  
Abidin Çalışkan (Batman Üniversitesi)  
Barış Gürsu (TEİAŞ)  
Eyyüp Öksüztepe (Fırat Üniversitesi)  
Faruk Erken (Kastamonu Üniversitesi)  
Fatih Şevgin (Muş Alparslan Üniversitesi)  
Gökmen Öztürkmen (Gaziantep Üniversitesi)  
Ahmet Oturak (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi)  
Berna Kiraz (Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi)  
Uğur Özmen (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)  
Osman İyibilgin (Sakarya Üniversitesi)  
Metin Bağcı (Afyon Kocatepe Üniversitesi)  
Ebru Başpınar Tuncay (Süleyman Demirel Üniversitesi)  
Ömer Osman Dursun (Fırat Üniversitesi)  
Nilüfer Akci (Zirai Mücadele Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü)  
Kerim Karadağ (Harran Üniversitesi)  
Enes Koşar (Wyseye)  
Buket Kaya (Fırat Üniversitesi)  
Mehmet Kaya (Fırat Üniversitesi)  
Hakan Kekül (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi)  
Davut Emre Taşar (Dokuz Eylül Üniversitesi)  
Amine Gonca Toprak (AdresGezgini A.Ş.)

Didem Eren Sarıcı (İnönü Üniversitesi)  
Abdurrahman Dalgıç (Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi)  
Barış Sayın (İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa)  
Elif Ağcakoca (Sakarya Üniversitesi)  
Aydın Carus (Trakya Üniversitesi)  
İslam Mayda (Kadir Has Üniversitesi)  
Fevzi Sarıtaş (ITU)  
Yıldır Akkaya (ITU)  
Mehmet Karataş (Fırat Üniversitesi)  
Cenk Fenerli (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)  
Kadir Sarıkaya (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi)  
Kasım Şimşek (DU)  
Abdulnasır Yıldız (DU)  
Ömer Faruk Can (DU)  
Mehmet Uçan (DU)  
Muhammet Ali Arserim (DU)  
Gülay Yalçın Bayar (DU)  
Senem Çetin Yılmaz (DU)



# İçindekiler / *Table of Contents*

## Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- PPG ve ECG Sinyallerinden Arteriyel Kan Basıncı Tahmini (Araştırma Makalesi)  
*Arterial Blood Pressure Estimation From PPG, ECG Signal (Research Article)*  
**Hüseyin Alperen Dağdögen, İbrahim Türkoğlu** **527**
- Hepatit hastalığının tespitinde bulanık mantık ve makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırılması (Araştırma Makalesi)  
*Comparison of fuzzy logic and machine learning methods in detection of hepatitis disease (Research Article)*  
**Cengiz Coşkun, Emre Yüksek** **539**
- Anne Sağlığı Riski İçin Makine Öğrenmesi Modellerinin Performans Karşılaştırması (Araştırma Makalesi)  
*Performance Comparison Of Machine Learning Models For Maternal Health Risk (Research Article)*  
**Fatih Şahin, Şeyma Karaca, Gökalp Tulum** **547**
- Prediction of POMA-G Score from Spatiotemporal Gait Parameters (Research Article)  
**İrfan Kösesoy** **555**
- Göz Özelliklerinin UKSB - PSO Modeli kullanılarak Otizm Sınıflandırılması (Araştırma Makalesi)  
*Autism Classification of Eye Features using the LSTM-PSO Model (Research Article)*  
**Dilber Çetintaş, Taner Tuncer** **563**
- Tek Fazlı Yarı-Empedans Kaynaklı İnverterlerin Anahtarlama Kaybını Azaltmak İçin Yeni Taşıyıcı Temelli Kontrol Stratejisi (Araştırma Makalesi)  
*Novel Carrier-Based Control Strategy for Reduced Switching Losses in Single-Phase Quasi-Impedance Source Inverters (Research Article)*  
**Halil İbrahim Aytekin, Selim Börekçi** **571**
- Performance Evaluation of AVC and HEVC for E-Learning: Optimizing Quality and Reducing Bandwidth Usage (Research Article)  
**Oğuz Kırat, Tarık Yerlikaya, Emir Öztürk** **581**
- Workflow Scheduling for Cloud Computing Using Evolutionary Algorithm (Research Article)  
**Mehmet Kaya, Betül Boz** **593**
- From Pixels to Paragraphs: Exploring Enhanced Image-to-Text Generation using Inception v3 and Attention Mechanisms (Research Article)  
**Zeynep Karaca, Bihter Daş** **603**
- Thermal Image Processing for Automatic Detection of Fusarium Root and Crown Rot Disease In Tomato Plants (Research Article)  
**Ayşin Bilgili** **611**

Teknolojik Ürün İnceleme Veri Akışında Twitter Duyarlılık Analizi (Araştırma Makalesi) <i>Twitter Sentiment Analysis on a Technological Product Review Data Stream</i> (Research Article) <b>Sibel Tariyan Özyer</b>	<b>621</b>
Classifying Release Notes Explanations using BERT: An Initial Step to Automatic Versioning in Distributed Software Development (Research Article) <b>Abdulkadir Şeker</b>	<b>629</b>
COVID-19 Aşılıları için Türkçe Tweetlerle Duygu Analizi (Araştırma Makalesi) <i>Sentiment Analysis with Turkish Tweets for COVID-19 Vaccines</i> (Research Article) <b>Deniztan Ulutaş Karakol, Çetin Cömert</b>	<b>639</b>

## Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

Bir Güç Türbini Kanatçığında Akışkan Yapı Etkileşimi Analizi Kullanımı Metodolojisi (Araştırma Makalesi) <i>Methodology of Usage of Fluid Structure Interaction Analysis for a Power Turbine Blade</i> (Research Article) <b>Özge Altun, Görkem Madenoğlu</b>	<b>653</b>
A numerical and theoretical investigation into torsional buckling of composite driveshaft incorporating carbon nanotube (Research Article) <b>Mustafa Uyğun, M. Serhan Küçüka</b>	<b>661</b>
A numerical and theoretical investigation into torsional buckling of composite driveshaft incorporating carbon nanotube (Research Article) <b>Hamza Taş</b>	<b>671</b>
Logaritmik İşlem Süreleri Toplamı Tabanlı Öğrenme ve İş Bozulması Etkileri Altında Demontaj Hattı Problemi (Araştırma Makalesi) <i>Disassembly Line Balancing Problem Under The Effects of Sum-of-Logarithm-Processing- Time-Based Learning and Job Deterioration</i> (Research Article) <b>Halime Somtürk, Mehmet Duran Toksarı</b>	<b>683</b>

## Maden Mühendisliği / Mining Engineering

Güneyköy (Eşme, Uşak)'de Yeralan Altınlı Kuvars Damarlarındaki Arsenopiritlerin Skoroditleşmesi ve Mineralojik özellikleri (Araştırma Makalesi) <i>Mineralogical Features and Scoroditization of Arsenopyrites in Auriferous Quartz Veins Located Around Güneyköy (Eşme, Uşak)</i> (Research Article) <b>Asuman Kahya, Öznür Kanaat</b>	<b>697</b>
Bir mermer ocağında örtü tabakası kazı yönteminin zaman ve maliyet açısından değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi) <i>Evaluation of excavation method of overburden in a marble quarry in term of time and cost</i> (Research Article) <b>Deniz Aydın</b>	<b>707</b>

## İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Açısal Dönme Tabanlı Aktif ve Pasif Toprak İtkisi (Araştırma Makalesi) <i>Angular Rotation Based Active and Passive Earth Thrust (Research Article)</i> <b>Murat Hamderi</b>	<b>713</b>
Eruh Su Dağıtım Şebekesinin Metasezgisel Yöntemlerle Optimizasyonu (Araştırma Makalesi) <i>Optimization Of Eruh Water Distribution Networks Using Metaheuristic Methods (Research Article)</i> <b>Recep Demir, Fevzi Önen</b>	<b>721</b>
Experimental Investigation of CFRP-Reinforced Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Loadings and the Failure of Connections Between CFRP to Steel (Research Article) <b>Said Duşak, Cem Yalçın</b>	<b>731</b>
Hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansı ve izolasyon etkisi (Derleme Makalesi) <i>Seismic performance and isolation effect of air traffic control towers (Review Article)</i> <b>Alper Boztepe, Gültekin Aktaş</b>	<b>743</b>
Time Series Analysis Methodology for Damage Detection in Civil Structures (Research Article) <b>Burcu Güneş, Oğuz Güneş</b>	<b>753</b>
Variation of Dynamic Elasticity Modulus with Experimentally Determined Concrete Compressive Strength (Research Article) <b>Esra Tuğrul Tunç</b>	<b>761</b>

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.



## PPG ve ECG Sinyallerinden Arteriyel Kan Basıncı Tahmini

## Arterial Blood Pressure Estimation From PPG, ECG Signal

Hüseyin Alperen DAĞDÖGEN<sup>1\*</sup>, İbrahim TÜRKÖĞLU<sup>2</sup><sup>1</sup>Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, [huseyin.dagdogen@ozal.edu.tr](mailto:huseyin.dagdogen@ozal.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2862-8257><sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği, [iturkoglu@firat.edu.tr](mailto:iturkoglu@firat.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4938-4167>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 31 Mayıs 2023  
Revizyon 25 Ekim 2023  
Kabul 4 Kasım 2023  
Online 31 Aralık 2023

## Anahtar Kelimeler:

Temassız Tansiyon Ölçümü,  
Yapay Zeka,  
Derin Öğrenme,  
Elektrokardiyografi,  
Fotoplethysmogram.

## ÖZ

Yüksek kan basıncı; özellikle kritik hastalarda izlenmediği ve kontrol edilmediği takdirde daha fazla sağlık komplikasyonlarına sebep olmaktadır. Son zamanlarda dünyada sürekli tüketilen hazır gıda benzeri besinlerden dolayı kardiyovasküler hastalıklar artmaktadır. Bu hastalıklar dünyanın en yaygın ölüm sebepleri arasında yer almaktadır. Kalp ile ilgili hastalıkları tespit ve tedavi etmek için birçok parametreyle birlikte kan basıncında sürekli takip edilmelidir. Kan basıncı ölçümü için geliştirilen birçok girişimsel ve girişimsel olmayan yöntem geliştirilmiştir. Hastanelerde kullanılan çoğu yöntem girişimsel yöntemlerdir. Bu yöntemler, sürekli kan basıncı tahmini için kullanılmamaktadır. Ayrıca bir psikolojik rahatsızlık olan 'Beyaz Palto Sendromu' diye adlandırılan bir rahatsızlık vardır. Bu rahatsızlık özellikle halk arasında da 'Doktordan Korkmak' olarak bilinir. Ölçüm esnasında hastanın kan basıncının normal değerler dışında yüksek çıkmasında sebep olan bu hastalıktan kaçınmanın bir diğer yöntemi ise temassız tansiyon ölçümüdür. Bu çalışmada Photoplethysmogram (PPG) ve Electrocardiogram (ECG) gibi temassız bir şekilde toplanabilen sinyallerden Arteriyel Kan Basıncı (ABP) tahmini yapılmaktadır. Çalışmada birden fazla derin öğrenme modeli ve bu modeller farklı hiperparametreler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmada ölçüm metriği olarak ortalama hataların karesi (MAE) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre LSTM model için 0.0165, LSTM ve dense katmanlarından oluşan model için 0.0258, sadece dense katmanlı mimariden oluşan birinci model için 0.0141, sadece dense katmanlı mimariden oluşan ikinci model için 0.281 sonuçları elde edilmiştir. GAN için ise ölçüm metriği olarak ikili çapraz entropi kullanılmıştır. Burada elde edilen ikili çapraz entropi değeri ise 2900 adımda eğitilen model için 2.382, 10000 adımda eğitilen model için ise 1.014 olarak ölçülmüştür. Elde edilen ABP değerlerinden sistolik tansiyon ve diyastolik tansiyon tahmini yapılmış olup elde edilen MAE sonuçları ise sistolik tansiyon için 2.19, diyastolik tansiyon için ise 0.941 olarak ölçülmüştür.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 31 May 2023  
Received in revised form 25 October 2023  
Accepted 4 November 2023  
Available online 31 December 2023

## Keywords:

Cuffless Blood Pressure,  
Artificial Intelligence,  
Deep Learning,  
Electrocardiograph,  
Photoplethysmogram.

Doi: 10.24012/dumf.1307817

\* Sorumlu Yazar

## ABSTRACT

High blood pressure; It causes more health complexes, especially if the critical area is not monitored and controlled. Cardiovascular transmission is increased due to fast food-like foods consumed constantly in the world recently. It is among the most common causes of death in the world. Blood pressure, along with many parameters, must be constantly monitored for the diagnosis and treatment of heart-related diseases. Many invasive and noninvasive methods have been used for blood pressure details. Most methods used in hospitals are interventional procedures. These parameters are not used for continuous blood pressure estimation. There is also a disease called 'White Coat Syndrome', which is a psychological disorder. These disorders are known as 'Fear of the Doctor', especially among the public. Another method to avoid this disease, which is the cause of high bursts of blood pressure outside the normal values during the measurement periods, is non-contact pressure values. Arterial Blood Pressure (ABP) is estimated from signals that can be displayed at the highest level without contact, such as effective Photoplethysmogram (PPG) and Electrocardiogram (ECG). In the study, more than one deep learning model and these models were compared with different hyperparameters. Additionally, mean squared errors (MAE) was used as the measurement measurement metric. According to the obtained LSTM model, the result was 0.0165, 0.0258 for the model consisting of LSTM and dense layers, 0.0141 for the first model consisting only of dense embedded architecture, and 0.281 for the second model consisting of only dense embedded architecture. For GAN, binary cross entropy was used as the measurement metric. The binary cross entropy value obtained here was measured as 2.382 for the model that was kept until 2900, and 1.014 for the model that was kept until 10000. Systolic blood pressure and diastolic measurement were estimated from the ABP values obtained, and the MAE results obtained were measured as 2.19 for systolic blood pressure and 0.941 for diastolic blood pressure.

## Giriş

1733 yılında ilk kan basıncı ölçümleri ve nabız basıncı ölçümleri yapılmıştır. Ancak bu daha çok ham ölçümler ve yirminci yüzyılın tekniklerinden çok uzak tekniklerdir. Hales, 'Anatomik Diseksiyonların Uyumsuzluğu' nedeniyle kan basıncı deneyleriyle hemen devam edememiştir. Ancak daha sonra, ventriküllerin kapasitesini ve dolaşımın diğer birçok özelliğini inceleyerek sorgularına devam etmiştir. Ancak bir yüzyıl sonra, Poiseuille'nin cıva bir manometrenin 1828'de uygulamaya konmasıyla kan basıncı üzerinde doğru bir çalışma başlamıştır. Poiseuille 1828 yılında, arteriyel kan basıncının ölçümü için cıva manometre kullanımıyla doktora disserasyonu ile Kraliyet Tıp Akademisi'nin altın madalyasını kazanmıştır. Helmholtz tarafından 1850 yılında kas hareketlerini kaydetmek için geliştirilen miyograf ve yeni bir grafik yöntemiyle nabız ilk izleyen Tubingen Vierordt tarafından bir tansiyon aleti (sphygmograf) geliştirilmiştir. Kan basıncının ilk gerçek doğru tahmini 1856 yılında cerrah Faivre tarafından yapılmıştır; bir cıva manometresine bir arter bağlanmış ve böylece doğrudan ölçüm elde edilmiştir. Bahsi geçen cıva tansiyon aleti ile femoral arter kan basıncının 120 mm/hg ve brakial arter basıncının 115 ile 120 mm/hg olduğu tespit edilmiştir. Bunlar ve diğer doğrudan okumalar, kan basıncı için normal bir aralık oluşturmada çok değerlidir. Ancak, kanül ile arter arasında doğrudan bağlantı içeren hiçbir yöntem yaygın şekilde kullanılamayabileceği için bu yöntem rutin ölçümler için kesinlikle kullanışsız bir yöntemdir[1]. Kan basıncını ölçmeye yönelik birçok cihaz, ortak bir özelliğe bağlıdır; osilometrik kan basıncını ölçmek için şişirilebilir manşetle ekstremitelerin (kol, bilek, parmak veya bacak) arterisi tıkanmalıdır veya Korotkoff seslerinin algılanmasıyla bu işlem yapılmalıdır. Nabız dalga biçimi analizi gibi kol veya bacak tıkanmasına bağlı olmayan diğer teknikler de kullanılabilir ancak bunların klinik uygulamalarda çok az uygulaması vardır. Günümüzde mevcut olan teknikler, kökenlerini geleneksel oskültasyon kan basıncı ölçüm tekniğine borçludur ve bu yeni tekniklerin gerçekten de geleneksel cıvalı tansiyon aleti kadar doğru ölçümler sunduğu gösterilmelidir. Tansiyon aletinin tanıtılmasından bu yana, cıvalı ve aneroid tansiyon aleti kan basıncını ölçmek için en popüler cihazlar olmuştur[2].

Tansiyon, kan basıncını ifade eden bir tıbbi terim olarak kullanılmaktadır ve kanın arterler ve damarlar içindeki basıncını ifade etmektedir [3]. Tansiyon, genellikle iki bileşenle ifade edilmektedir: sistolik tansiyon, kalbin kasıldığı anki en yüksek kan basıncını temsil ederken, diyastolik tansiyon, kalp dinlendiği anki en düşük kan basıncını göstermektedir [4]. Tansiyonun normal aralıkta olması, vücudun sağlıklı bir şekilde çalışması için önemlidir. Tansiyon kanın dolaşımını düzenlemekte ve organlara oksijen ve besin taşımaktadır [5]. Tansiyonun yüksek (hipertansiyon) veya düşük (hipotansiyon) olması ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Özellikle yüksek tansiyon, kalp hastalıkları, felç, böbrek problemleri ve diğer sağlık sorunlarına yol açabilen bir risk faktörüdür [6]. Tansiyon, birçok faktörden etkilenebilir, bunlar yaş, cinsiyet, genetik yatkınlık, beslenme alışkanlıkları, fiziksel aktivite düzeyi, stres ve obezite gibi faktörleri içermektedir. Bu nedenle, tansiyonun düzenli olarak ölçülmesi ve gerektiğinde tedavi edilmesi önemlidir [7].

Tıp literatürü, tansiyonun tanı ve tedavisi konularında birçok araştırma ve klinik çalışma içermektedir. Bu çalışmalar, tansiyonun nedenleri, risk faktörleri ve tedavi yöntemleri üzerine derinlemesine bilgi sağlamaktadır. Sağlık profesyonelleri, hastaların tansiyon seviyelerini izlemelerini ve uygun önlemleri alarak sağlıklarını korumalarını teşvik etmek için bu bilgilere dayanmaktadır [8].

Literatürde de kan basıncı tahmini için kullanılan başlıca iki tip sinyal türü vardır. Bunlar Photoplethysmogram (PPG) ve Electrocardiograph (ECG) dediğimiz sinyal türleridir. Bu sinyal türlerinden başlıca yapay zekâ desteği ile sistolik kan basıncı, diyastolik kan basıncı ve arteriyel kan basıncı (ABP) diye adlandırılan tansiyon türleri tespit edilmektedir. Arteriyel kan basıncı izleme (ABPM), tıbbi bir ölçüm tekniğidir ve bir bireyin kan basıncını 24 saat boyunca sürekli olarak izlemek için kullanılır [9]. Bu yöntem, günlük yaşamın normal koşullarında kan basıncının değişimlerini incelemeyi amaçlar. Genellikle bir tansiyon manşeti ve taşınabilir bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilir [10]. ABPM, klinik ortamlar dışında kan basıncını ölçmek ve kaydetmek için kullanılır. Bu sayede beyaz önlük hipertansiyonu gibi olguların teşhis edilmesi, gece uykusu sırasında meydana gelen kan basıncı değişikliklerinin gözlemlenmesi ve gizli gece hipertansiyonunun belirlenmesi mümkün olur [11]. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen veriler, hipertansiyon teşhisi ve kardiyovasküler risk tahmini için daha kesin bilgiler sağlar.

Bahsedilen hastalıklar ve riskler nedeniyle, özellikle ileri yaşlardaki hastalar için sürekli tansiyon takibi büyük önem taşımaktadır. Ani yükselen tansiyonlar ve hipertansiyon gibi sürekli takip gerektiren sağlık sorunları, geleneksel manşet tabanlı tansiyon ölçüm teknikleri ile tedavi edildiğinde hem maliyetli hem de hastalar için rahatsızlık yaratan bir süreç oluşturabilmektedir. Bu nedenlerle, manşet kullanmadan ve sürekli bir şekilde tansiyon ölçümü yapabilen bir çözüm gerekliliği doğmuştur. Bu çözüm, basit bir cihazla PPG ve ECG sinyallerinden ABP sinyali tahmin ederek elde edilebilir. İlgili probleme yönelik mevcut literatürde çeşitli çözüm yöntemleri bulunsa da, bu çalışma, literatürdeki diğer çalışmaların eksikliklerini ve avantajlarını inceleyerek, daha iyi sonuçlar elde edebilmek için yeni bir yaklaşım ve yapay zekâ modeli önermektedir.

Bu çalışmanın amacı; sürekli ve temassız tansiyon ölçümü gerçekleştirmek için bir yapay zekâ modeli geliştirmektir. Bu kapsamda birden çok derin öğrenme modellerinin performansı incelenmiştir. İkinci bölümde; literatürde yer alan daha önce kabul görmüş çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Literatürde yer alan çalışmaların başarı oranları, kullanılan teknikler ve veri ön işleme aşamaları gibi aşamaları incelenmiştir. Çalışmaların metrikleri incelenmiş ve başarılı olan çalışmalar referans alınmıştır. Üçüncü bölümde; çalışmada kullanılan veri setinin içeriği, veri setinde ki sinyallerin özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca verilerin ön işleme aşamaları ve ön işleme aşamalarında kullanılan teknikler, taban kaldırma ve normalizasyon gibi işlemlere ve bu işlemlerin sonuçlarına değinilmiştir. Çalışmada kullanılan derin öğrenme teknikleri, modellerin mimari yapıları, modellerin hiperparametreleri ve modeller hakkında bilgiler verilmiştir. Son bölüm ise; bulunan

bulgular, sonuçların tartışılması ve literatürle karşılaştırılmasını kapsamaktadır.

## İlgili Çalışmalar

Bu kısımda temassız tansiyon tahmini üzerinde gerçekleştirilen klasik makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan derin öğrenme modelleri, klasik makine öğrenme modelleri ve özellik çıkarma aşamasında nasıl bir yol izlendiği konusunda araştırmalar yer almaktadır. [12] numaralı çalışmada manşet tabanlı ölçümden elde edilen fotopletismogram (PPG) sinyallerinden, klasik makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak tansiyon tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Daha optimize bir sınıflandırıcı seçmek, öznelik çıkarmak ve olası makine öğrenmesi hatalarının önüne geçebilmek için ağaç tabanlı pipeline optimizasyon ağacı adı verilen (TPOT) bir araç kullanılarak en iyi regresyon modeli seçilmiştir. Verilerin ön işleme aşamasında sinyaller içerisinde yer alan potansiyel gürültüler elimine edilebilmek için TPOT içerisinde yer alan notch filtresi, band-pass filtresi ve sıfır faz filtreleri gibi filtrelerle işleme tabi tutulmuştur. Ardından tansiyon tahmini yapabilmek için rastgele orman (RF) ve en yakın komşu (KNN) algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmada, 1000 konu için 32.061 milyon örnek içeren PhysioNet global veri kümesi kullanılmıştır. Çalışmada değerlendirme metriği olarak ortalama mutlak hata (MAE) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar sistolik tansiyon için 6.52, diyastolik tansiyon için ise 4.19 olarak bulunmuştur.

Ayrıca literatürde yer alan çalışmaların birçoğunda tansiyon tahmini için, PPG sinyallerine ek olarak elektrokardiyografi (ECG) sinyalleri de kullanılmaktadır. [13] numaralı çalışmada PPG ve ECG sinyallerinden tansiyon tahmini yapılması hedeflenmiştir. Araştırma da PhysioNet veri tabanında yer alan MIMIC-II veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümesi 942 hastanın 12.000 örneğini içeren 125 Hz frekanslı sinyallerden oluşmaktadır. Ayrıca çalışmada literatürden farklı olarak MIMIC-II veri setine ek olarak BCG veri seti de kullanılmıştır. Veri ön işleme işlemleri MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

Ön işlenmiş veri setinden özellik çıkarmak için U-Net tabanlı bir derin öğrenme mimarisi kullanılmıştır. Öz nitelikler çıkartıldıktan sonra, klasik makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin yapılmıştır. Bu algoritmalar içerisinde en iyi sonucu multi-layer perceptron (MLP) algoritması vermiştir. Elde edilen sonuçlar İngiliz Hipertansiyon Topluluğu (BHS) ve Tıbbi Cihazları Geliştirme Derneği (AAMI) standartlarına göre değerlendirilmiştir. Her iki standarda göre de elde edilen sonuçlar A sınıfında yer almıştır.

Literatürde sınıflandırmadan ziyade kümeleme algoritmaları da kullanılmıştır. [14] numaralı çalışmada PPG, ECG, ICG,BCG gibi sinyallerin bağımsız değişken olduğu ancak arter kan basıncı (ABP) sinyallerinin bağımlı değişken olduğu üzerinde durulmuştur. Bahsi geçen bu dört sinyallerden özellik çıkarılması ve çıkarılan bu özelliklerin makine öğrenmesi algoritmalarına verilerek tansiyon tahmini yapılması amaçlanmıştır. Daha önce bahsedilen çalışmalara ek olarak bu çalışmada doğruluğu arttırmak amacıyla kümeleme adımı içeren yeni bir yöntem sunulmaktadır. Önerilen bu yeni teknik her kümede gradyan artırma

regresyonu (GBR), rastgele orman (RF), rastgele orman regresyonu (RFR) ve multi-layer perceptron (MLP) gibi geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları uygulayarak modeller oluşturmuştur. Bu sayede PPG ve ECG sinyallerinden nabız geçiş süresi (PTT), PPG yoğunluk oranı (PIR) ve kalp atışı hızı (HR) gibi özellikleri girdi olarak verip, ABP sinyallerinden sistolik ve diyastolik kan basıncını bağımlı olarak tahmin etmektedir. Bu çalışmada da diğerlerinde olduğu gibi PhysioNet'in MIMIC-II veri seti kullanılmıştır. 5 küme ve GBR uygulandığında SBP için MAE 2.56, DBP için ise 2.23 değerleri elde edilmiştir. Fakat kümeleme işlemi uygulanmadan elde edilen en iyi sonuçlar SBP için 6.36, DBP için 6.27 olarak ölçülmüştür.

[15] numaralı çalışmada kesik bir SBP veya DBP tahmini yapmak yerine tüm kan basıncı dalga formunu tahmin edilmesi üzerine odaklanılmıştır. PPG verilerinden, arteriyel kan basıncını tahmin edebilmek için yeni bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. Burada ham bir şekilde verilen PPG sinyallerinden ABP sinyalini tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada MIMIC-II [16] veri seti kullanılmıştır. Çalışmada veri ön işleme aşamasında öncelikle verilerin gürültüden arındırılma işlemi gerçekleştirilmiş olup, ardından Z-Score normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından sinyallerin hizalandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğer çalışmalar gibi sinyallerin birinci ve ikinci türevlerinden özellik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada belirtilen ABP değerinin en yüksek noktası SBP, en düşük noktası ise DBP değerlerini vermektedir. Model olarak LSTM tabanlı bir kodlayıcı yapısı kullanılmıştır. Çalışmada LSTM modelde SBP için, mutlak hata değeri 4.05, DBP için 2.41 bulunmuştur. BHS standartlarında ise bu değerler Grade A gibi bir seviyeye ulaşmıştır.

[17] numaralı çalışmada diğer çalışmalar gibi amaç PPG ve ECG sinyallerinden SBP ve DBP tahminidir. MIMIC-II veri seti kullanılmıştır. Bu çalışmada ABPNet adı verilen bir yeni bir teknik uygulanmıştır. Bu ağ yapısı Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP) içeren bir yapıdadır. Çalışmada metrik olarak Root Mean Square Error (RMSE) metriği kullanılmıştır. Klasik bir MLP yapısından oluşan bu yapı için test sonuçları SBP için 3.6, DBP için ise 3.2 olmuştur. Son olarak eğitilen modeli, kendilerinin geliştirdiği ve VITAL-ECG diye adlandırılan cihaza bu modeli gömüp, giyilebilir bir cihaz halinde ölçüm yapacak şekilde düzenlemişlerdir.

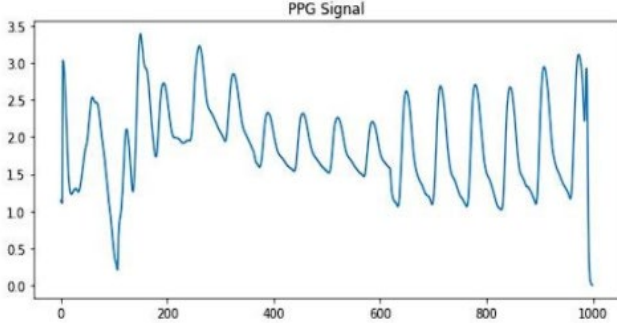
## Materyal ve Yöntemler

### PPG, ECG ve ABP Sinyalleri

Biyomedikal cihazların ölçümleri temassız bir şekilde yapması, bu cihazları kullanan kişilere büyük bir oranda fayda sağlamaktadır. Temassız ölçüm yöntemlerinde en çok kullanılan ve fotopletismografi (Photoplethysmography) olarak adlandırılan PPG, optiksel ölçüm teknikleri günümüzde en çok kullanılan yöntemler arasında bulunmaktadır [18]. Fotopletismografi (PPG), vücut üzerinden temassız olarak bazı fizyolojik parametrelerin elde edilme tekniği olarak da adlandırılabilir. Bu yöntem kullanılarak elde edilen PPG sinyalleri içerisinde birçok fizyolojik bilgi barındırması ve temassız bir şekilde sürekli olarak izlenebilmesi nedeniyle birçok avantaja sahiptir. PPG sinyal verilerinin kaydedilmesinin temelinde kalbin kan damarlarına kan pompalaması sonucunda meydana gelen

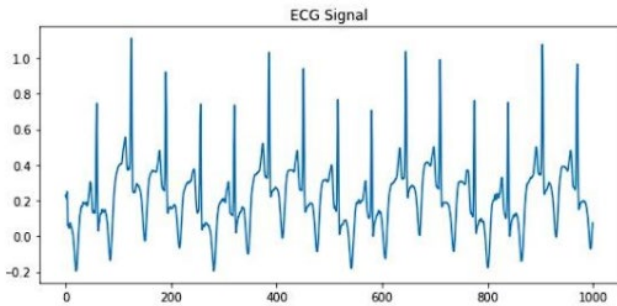


kan damarlarındaki hacimsel değişiklikler yer almaktadır. PPG ölçümü deri üzerinden, kulak memesi, parmak ucu gibi kılcal damarların yoğun olarak bulunduğu bölgelerden rahat bir şekilde elde edildiği gibi bilek üzerinden de yapılabilmektedir. Bu ölçüm esnasında sensör kısmında verici olarak belli bir dalga boyunda ışık yayan led ve alıcı olarak da kullanılan bu dalga boyuna duyarlı bir fotodiyot kullanılmaktadır [19]. Çalışmada kullanılan veri setinde yer alan 125 Hz frekansında PPG sinyalinden bir kesit Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. PPG sinyal örneği.

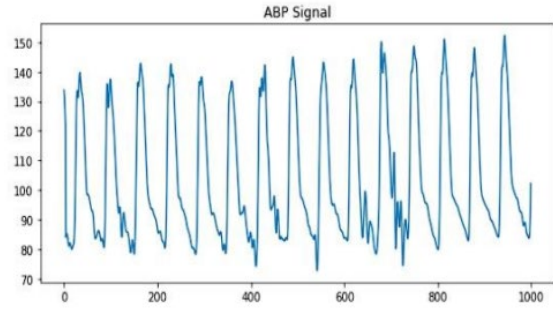
ECG; vücut üzerine yerleştirilen elektrotlar ile belirlenen süre boyunca kalbin hareketini ve elektriksel aktivitesini ölçülerek kaydeden bir cihazdır. Kayıt yapıldıktan sonra elde edilen grafiğe ise elektrokardiyogram grafiği denir. Literatürde elektrokardiyografi, kalp kasının ve sinirsel iletim sisteminin çalışmasını incelemek üzere kalpte meydana gelen elektriksel aktivitelerin kaydedilmesi olarak tanımlanır. Bu kayıt sonucunda elde edilen grafik ECG grafiği olarak adlandırılır. Bu ölçümü yapmak için kullanılan alete de elektrokardiyograf cihazı denir. Bu cihaz kalbin kasılması sırasında oluşan elektriksel aktivitenin grafiksel olarak kayıt edilmesini sağlamaktadır. Kalp atımı olarak da adlandırılan, atriyum ve ventriküllerinin kasılması ve gevşemesi sırasında bir elektriksel aktivite oluşmaktadır. Bu aktivite, kalp ritmi, frekansı ve yayılımı hakkında pek çok veri içermektedir [13]. Çalışmada kullanılan veri setinde yer alan 125 Hz frekansında ECG sinyallerinden bir kesit Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. ECG sinyal örneği.

Arter kan basıncı (Arterial Blood Pressure(ABP)), kanın arter duvarında oluşturduğu basınç olarak tanımlanır. Bu basınç sabit olmamakla birlikte kalbin pompalama işlevi sırasındaki devinimlere göre değişiklik gösterebilmektedir. Sistol döneminde kanın oluşturduğu basınç sistolik tansiyonu, diyastol döneminde oluşturduğu basınç ise diyastolik tansiyonu vermektedir. Çalışmada kullanılan veri

setinde yer alan 125 Hz frekansında ABP sinyalinden bir kesit Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. ABP sinyal örneği.

ABP sinyallerinden SBP ve DBP tahmini kolaylıkla yapılabilmektedir. Burada istenilen SBP değeri ve sinyal eğer 180 mmHg’den büyük veya 80 mmHg’den küçük ise, SBP değeri hesaplamak için Denklem 1’de ki formül kullanılmaktadır [15].

$$SBP = \max(ABP) \quad (1)$$

İstenilen DBP değeri ve sinyal eğer 130 mmHg’den büyük veya 60 mmHg’den küçük ise DBP değeri hesaplamak için ise Denklem 2’de ki formül kullanılmaktadır [15].

$$DBP = \min(ABP) \quad (2)$$

#### Verilerin Hazırlanması

Çalışmanın bu bölümünde kullanılan veri seti ve verilerin hazırlanması hakkında bilgiler verilecektir. Çalışmada kullanılan veri seti literatürde de çoğu çalışmada kullanılan PhysioNet’e ait olan MIMIC-II [16] veri setidir.

Yoğun bakım ünitesi (ICU) hastalarının kritik durumu, yakından izleme gerektirmekte ve bunun sonucunda çok parametrelili büyük miktarda veri sürekli olarak toplanmaktadır. Bu, klinik veri madenciliği ile ilgilenen araştırmacılar için benzersiz bir fırsat oluşturmaktadır. Genel kullanıma açık bir ICU veri tabanı (çok parametrelili Akıllı İzleme) oluşturarak yoğun bakımda (MIMIC-II) daha şeffaf ve verimli bir yoğun bakım araştırma topluluğu oluşturmaya çalışılmıştır. MIMIC-II’de sunulan veriler, 2001 ile 2008 yılları arasında Beth İsrail Deaconess Tıp Merkezi’nden toplanmış ve 26,870 yetişkin hastadan oluşmaktadır. MIMIC II iki ana bileşenden oluşmaktadır; bunlar klinik veriler ve fizyolojik dalga biçimleridir. Hasta demografik bilgileri, intravenöz ilaç damlama oranları ve laboratuvar test sonuçlarını içeren klinik veriler ilişkisel bir veri tabanı olarak düzenlenmiştir. Hasta başında kaydedilen 125 Hz sinyalleri ve ilgili vital bulguları da içeren fizyolojik dalga formları açık kaynak formatında kaydedilmiştir [20].

Çalışmada kullanılan veri seti üç kanaldan oluşmaktadır;

1. PPG sinyali, FS=125Hz; parmak ucundan gelen fotopletimograf
2. ABP sinyali, FS=125Hz; girişimsel arteriyel kan basıncı (mmHg)
3. ECG sinyali, FS=125Hz; kanal II'den elektrokardiyogram

Veri ön işleme aşamasında ilk olarak, sinyaller kolay işlenebilmesi açısından 1024 numuneye bölünmüştür. Veri setinden gelen sinyaller birçok durumda ciddi taban çizgisi kaymasından zarar görmektedir. Bu nedenle, sinyalleri normalleştirmeden önce taban çizgisi gezinmesi kaldırılmıştır. Taban çizgisi kaldırılırken, Butterworth filtresi kullanılmıştır. Taban çizgisi kaldırma işlemi genellikle biyomedikal sinyal işleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Örnek olarak ECG sinyallerinde kalp atışları arasındaki düşük frekanslı gürültüyü (taban çizgisi) kaldırmak için Butterworth filtresi kullanılabilir. Butterworth filtresinin transfer fonksiyonu Denklem 3'te gösterilmiştir.

$$H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\omega}{\omega_c})^{2n}}} \quad (3)$$

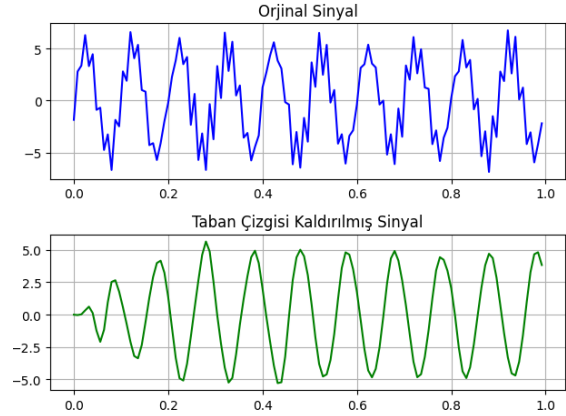
Taban çizgisi kaldırma işlemi için genellikle yüksek geçiren (high-pass) Butterworth filtresi kullanılmaktadır. Çalışmada taban çizgisi kaldırma işlemi aşağıdaki adımları içeren aşamalardan geçerek yapılmıştır

- **Sinyalin Fourier Dönüşümü Hesaplanması:** Fourier dönüşümü, bir sinyali zaman alanından frekans alanına dönüştürmektedir. Bu, sinyalin farklı frekanslardaki bileşenlerini analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.
- **Butterworth Filtresi Uygulanması:** Hesaplanan Fourier dönüşümüne Butterworth filtresi uygulanmıştır. Bu işlem, düşük frekanslı bileşenleri (taban çizgisi) bastırmakta ve yüksek frekanslı bileşenleri (örneğin, EKG'deki QRS kompleksleri)

geçirmektedir. Filtre, kesme frekansı ve derecesi gibi parametrelere bağlıdır.

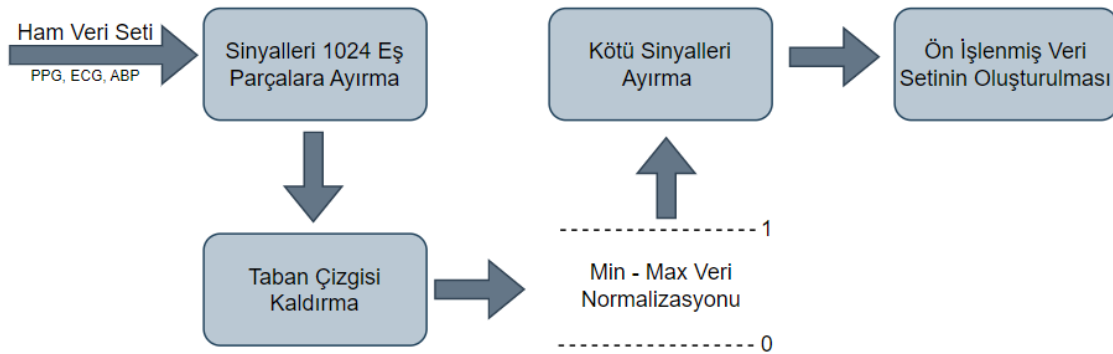
- **Ters Fourier Dönüşümü Hesaplanması:** Son aşamada ise filtrelenmiş sinyalin ters Fourier dönüşümünü hesaplanmıştır. Bu işlem, sinyali frekans alanından zaman alanına geri döndürmektedir.

Şekil 4'te taban çizgisi kaldırılmış bir sinyal örneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Butterworth filtresi ile taban çizgisi kaldırma.

Taban çizgisi kaldırma işlemlerinin ardından sinyaller maximum normalizasyon işleminden geçirilip 0-1 arasında indirgenmiştir. Veri setinin tamamını derlemeden önce son derece bozulan sinyaller kaldırılmıştır. Veri ön işleme yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Verilerin ön işleme aşamaları.

## Farklı Derin Öğrenme Modelleri İle Tahmin

Çalışmada birden fazla derin öğrenme modeli kullanılıp sonuçları karşılaştırılmıştır.

Uzun Kısa Süreli Hafıza (LSTM), özellikle makine öğrenimi ve yapay zekâ alanlarında sıkça kullanılan bir derin öğrenme modeli türüdür. Özellikle zaman serileri, dil işleme, konuşma tanıma ve daha pek çok uygulamada büyük başarı elde etmiştir. LSTM modelin öne çıkan özellikleri, diğer geleneksel sinir ağı modellerine göre uzun vadeli bağımlılıkları daha etkili bir şekilde yakalayabilmesi ve bu sayede daha karmaşık veri yapılarını işleyebilmesidir.

LSTM, 1997 yılında Sepp Hochreiter ve Jürgen Schmidhuber tarafından tanıtılmıştır. LSTM, özellikle "patlayan ve kaybolan gradyanlar" olarak adlandırılan sorunu aşmak için tasarlanmıştır. Bu sorun, geleneksel tekrarlı sinir ağları (RNN)'lerin uzun süreli bağımlılıkları etkili bir şekilde yakalayamamalarından kaynaklanır ve bu nedenle eğitimleri zorlaştırmaktadır. LSTM, bu sorunu hafıza hücreleri ve kapı mekanizmaları kullanarak çözmektedir. Bu hücreler, veriyi okuma, yazma ve unutmak için öğrenilen bilgilere dayalı olarak işlemektedir [21].

Bu çalışmada öncelikli olarak kullanılan derin öğrenme modeli Bölüm LSTM modelidir. LSTM birimi sayısı için farklı hiperparametre değerleri {128, 256, 512, 1024} test



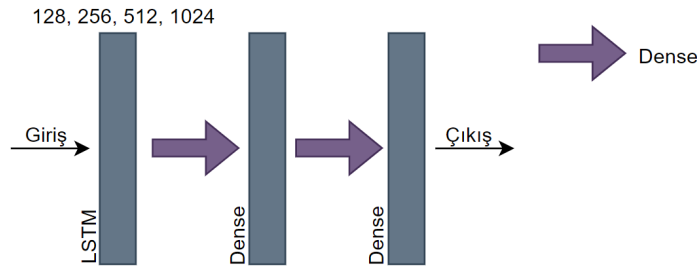
edilmiştir. LSTM modeli, geçici veri alma özelliği nedeniyle uygundur. PPG, ABP ve ECG sinyallerinin hepsi önemli geçici bileşenlere sahiptir. LSTM model mimarisi Şekil 6'da gösterilmiştir.

İkinci olarak LSTM ve dense katmanının birleşiminden oluşan bir model tercih edilmiştir. Mimarideki bu değişiklik, modelin değerleri çıkarmaya başlamadan önce tüm girişi görmesi durumunda daha iyi ABP sinyalleri tahmin edip etmeyeceğini değerlendirmek için eklenmiştir. Bu mimaride ise {128, 256, 512, 1024} LSTM birimi test edilmiştir. Mimarinin yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir.

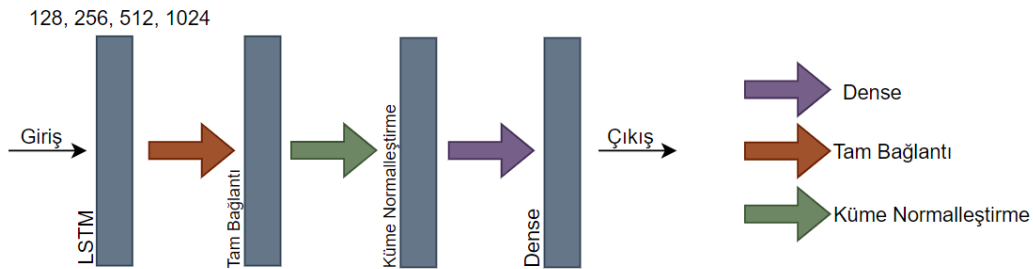
Üçüncü olarak kullanılan modeller de daha yüksek boyutlara sahip dense katmanları kullanılmıştır. Bu, modelin bir otomatik kodlayıcı olarak hareket etmesine ve giriş verilerini gürültüden arındırmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca Şekil 7'deki modelin kod çözücü/kodlayıcı yapısı, farklı biyomedikal sinyaller arasında bir kod çözücü görevi görecektir şekilde tasarlanmıştır.

Diğer kullanılan dense katmanlı mimariler ise Şekil 8'de ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Çalışmada ek olarak GAN mimarisi de kullanılmıştır.

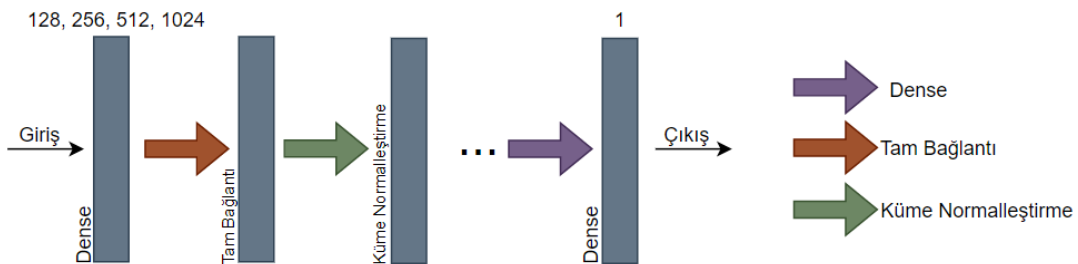
Generative Adversarial Networks (GAN) fikri 2014 yılında Ian Goodfellow'un arkadaşlarıyla yaptığı bir muhabbet sırasında ortaya atılmış ve ardından bilimsel bir makale olarak yayınlanmıştır. GAN modelinde bir veri üretmek istenilir ve o veriden yeterli sayıda örnek verilirse modele, yine aynı veri tipinde yeni örnekler ürettirebilmektedir. Sisteme binlerce kuş fotoğrafı verilirse sistem, bir kuşun nasıl görünmesi gerektiğini öğrenecek ve yeni kuş fotoğrafları üretecektir. GAN mimarisinde birbirleriyle çekişme halinde bulunan iki farklı yapay sinir ağı bulunmaktadır. Bu yapay sinir ağları Üretken (Generator) ve Ayırt Edici (Discriminator) ağlar olarak adlandırılır. Üretken ağ, gerçekte örtüşen veya gerçeğe benzeyen benzersiz veriler üretirken ayırt edici ağ ise sahte ve gerçek verileri birbirinden ayırt etmeye çalışmaktadır. Bu iki sinir ağı birbirleriyle çekişirken ayırt edici ağ giderek gerçek ve sahte resimleri daha iyi ayırt etmeye başlamaktadır. Üretken ağ ise daha gerçekçi sahte resimler üretimi yapmaktadır. Bu düzen çok güzel bir örnek olan hırsız ve polis ikilisine benzetilmektedir. Vakit ilerledikçe polis, hırsızları bulabilmek için sahte paraların tespitinde daha başarılı olmaktadır. Hırsız ise polisi yenebilmek için daha gerçekçi sahte paralar üretmeye başlar [22].



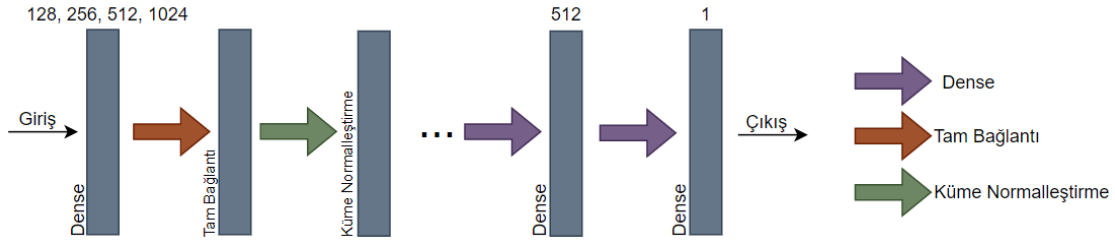
Şekil 6. LSTM tabanlı model.



Şekil 7. LSTM ve dense tabanlı model.



Şekil 8. Dense tabanlı model.



Şekil 9. Dense tabanlı model-2.

## Başarım Değerlendirmesi

Çalışmada birden çok derin öğrenme modeli kullanılmış ve bu modellerin başarımları karşılaştırılmıştır. Kullanılan modellerin mimarilerinden ve detaylarından bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Optimize edilmiş parametrelerle en iyi ağ mimarisini belirlemek için birkaç farklı çalışma yapılmıştır. Bu bölümde kullanılan farklı parametrelere göre sonuçlar karşılaştırılacaktır.

### LSTM Model

LSTM modellerde birim sayısına, adım sayısına, kullanılan aktivasyon fonksiyonuna ve küme büyüklüğüne göre çalışma gerçekleştirilmiştir. LSTM birimi sayısı için farklı hiperparametre değerleri sırası ile {128, 256, 512, 1024}, {10, 50, 100}, {Doğrusal, ReLU, ELU, SeLU, Sigmoid}, {32, 64, 128} test edilmiştir.

Tablo 1. LSTM model birim sayısına göre başarı performansı

Parametreler	Birim Sayısı	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM	128	0.0165
Adım Sayısı = 50	256	0.0191
Küme Büyüklüğü = 32	512	0.0287
Aktivasyon = Doğrusal	1024	0.0175

Birim sayısına göre karşılaştırma yapıldığında Tablo 1’de görülmektedir ve birim sayısı arttıkça modelin başarı oranı düşmektedir. Fakat sonuçlarda da görüldüğü üzere 1024 birimde başarı yükselişi söz konusudur. En düşük hata 128 birimde elde edilmiştir. Sonuçlara göre 128 birim için model en optimize sonucu vermektedir.

Tablo 2. LSTM model adım sayısına göre başarı performansı

Parametreler	Eğitim Tur Sayısı	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM	10	0.114
Birim Sayısı = 128	50	0.0165
Küme Büyüklüğü = 32	100	0.0287

Tablo 2’de LSTM modelin adım sayısına göre başarı performansı karşılaştırılmasında en optimal sonuç 50 adımda görülmektedir. Adım sayısı azaldıkça hata oranının daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Ancak adım sayısı yükselince ise hata oranı azalmaya rağmen yavaş bir şekilde artmaktadır.

Tablo 3. LSTM model küme büyüklüğüne göre başarı performansı

Parametreler	Küme Büyüklüğü	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM	32	0.0165
Birim Sayısı = 128	64	0.0168
Adım Sayısı = 50	128	0.0186

Küme büyüklüğü parametre güncellemesinin gerçekleştiği ağa verilen alt örneklerin sayısı olarak tanımlanmaktadır. Toplu boyut için iyi bir varsayılan değer 32 olabilir. Ayrıca 32, 64, 128, 256 ve benzeri değerler de kullanılmaktadır. Çalışma da Tablo 3’teki küme büyüklüğüne göre başarı performansı karşılaştırılmasında farklı değerlerde denenmiş en optimal sonuç 32 değerinde elde edilmiştir.

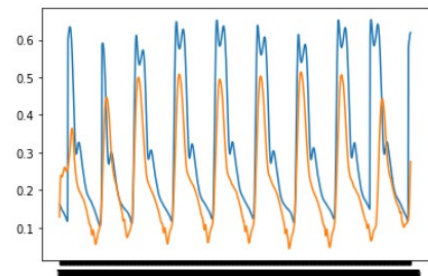
Tablo 4. LSTM model aktivasyon fonksiyonuna göre başarı performansı

Parametreler	Aktivasyon Fonksiyonu	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM	Doğrusal	0.0165
Birim Sayısı = 128	ReLU	0.0284
Adım Sayısı = 50	ELU	0.0170
Küme Büyüklüğü = 32	SeLU	0.0200
	Sigmoid	0.0240

Aktivasyon fonksiyonları nöronların toplam fonksiyonunda üretilen çıktılarının nasıl bir değişimden geçmesi gerektiğini belirlemede kullanılmaktadır. Tablo 4’te görüldüğü gibi “Doğrusal (Linear)” aktivasyon fonksiyonu en optimal sonucu vermiştir. Tüm deneyler sonucunda elde edilen en optimal sonucu veren hiperparametreler şöyledir;

- Birim sayısı = 128,
- Adım sayısı = 50,
- Küme büyüklüğü = 32,
- Aktivasyon fonksiyonu = Doğrusal.

Şekil 10’da eğitilen LSTM modelin tahmin grafiği verilmiştir.



Şekil 10. LSTM Modelin Tahmin Grafiği.

## LSTM + Dense Model

Çalışma da LSTM ve dense katmanlarından oluşan hibrit bir model de tercih edilmiştir. Birim sayısına, adım sayısına ve küme büyüklüğüne göre çalışma gerçekleştirilmiştir. LSTM birimi sayısı için farklı hiperparametre değerleri sırası ile {128, 256, 512,1024}, {10, 50, 100}, {32, 64, 128} test edilmiştir.

Geliştirilmiş olan hibrit model de LSTM model gibi 128 birim en iyi sonucu vermiştir. Tablo 5'te LSTM ve dense modelin birim sayısına göre başarı karşılaştırılması incelendiğinde birim sayısı arttıkça başarı oranı da doğrusal bir şekilde düşmektedir. En optimal sonuç en düşük birim sayısındadır.

Tablo 5. LSTM+Dense model birim sayısına göre başarı performansı

Parametreler	Birim Sayısı	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM+Dense	128	0.0258
Adım Sayısı = 50	256	0.0278
Küme Büyüklüğü = 32	512	0.0279
Aktivasyon = ReLU	1024	0.0302

Tablo 6'da verilen LSTM ve D modelin adım sayısına göre başarı karşılaştırılması sonuçlardan yola çıkarak, 50 adımlık eğitimin en iyi sonucu verdiğini söyleyebiliriz. Adım sayısı azaldıkça ve arttıkça hata oranının yükselmesi başarımın düştüğünü göstermektedir.

Tablo 6. LSTM+Dense model adım sayısına göre başarı performansı

Parametreler	Eğitim Tur Sayısı	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM+Dense	20	0.0398
Birim Sayısı = 128	50	0.0258
Küme Büyüklüğü = 32	100	0.0287
Aktivasyon = ReLU		

Ağa verilen alt örneklerin sayısında bir önceki modele benzer olarak 32 küme büyüklüğü en iyi sonucu vermektedir. Küme boyutu büyüdükçe hata oranının arttığı Tablo 7'de görülmektedir.

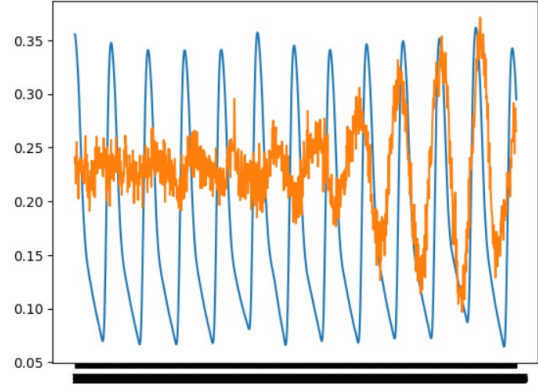
Tablo 7. LSTM+Dense model küme büyüklüğüne göre başarı performansı

Parametreler	Küme Büyüklüğü	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = LSTM+Dense	32	0.0258
Birim Sayısı = 128	64	0.0275
Adım Sayısı = 50	128	0.0283
Aktivasyon = ReLU		

Hata oranı ve küme büyüklüğü doğru orantılıdır. Elde edilen sonuçlara göre modelin en optimal sonuç veren hiperparametreleri şöyledir;

- Birim sayısı = 128,
- Adım sayısı = 50,
- Küme büyüklüğü =32,
- Aktivasyon fonksiyonu = ReLU.

Şekil 11'da eğitilen LSTM ve Dense katmanlarından oluşan modelin tahmin grafiği verilmiştir.



Şekil 11. LSTM + Dense Modelin Çıktı Grafiği.

## Dense Katmanlı Model

Yoğunluk (dense), çoğu durumda çalışan standart bir katman türüdür. Yoğun bir katmanda, önceki katmandaki tüm düğümler mevcut katmandaki düğümlere bağlanır. Çalışmada yoğunluk katmanından oluşan iki adet mimari bulunmaktadır. Farklı hiperparametrelere göre sonuçlar elde edilmiş ve en optimal sonuç sunulmuştur.

Çalışma sonuçları Tablo 8'de gösterildiği üzere dense modeli için küme büyüklüğüne göre başarı performansı incelendiğinde en optimal sonuç 128 küme büyüklüğünde alınmıştır. Küme boyutu büyüdükçe doğrusallıkta doğru orantılı bir şekilde büyümektedir.

Tablo 8. Dense modeli için küme büyüklüğüne göre başarı performansı

Parametreler	Küme Büyüklüğü	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = Dense	32	0.0176
Adım Sayısı = 50	64	0.0142
Aktivasyon = Sigmoid	128	0.0141

Sigmoid en yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından birisidir ve [0,1] aralığında çıktı üretmektedir. Çalışmada, Tablo 9'da dense modeli için aktivasyon fonksiyonuna göre başarı performansı karşılaştırılmasında en optimal sonuç "Sigmoid" aktivasyon fonksiyonu tarafından üretilmektedir.

Tablo 9. Dense modeli için aktivasyon fonksiyonuna göre başarı performansı

Parametreler	Aktivasyon Fonksiyonu	Ortalama Hataların Karesi
Kodlayıcı = Dense	Doğrusal	0.0176
Adım Sayısı = 50	ReLU	0.0167
Küme Büyüklüğü = 128	Sigmoid	0.0141

Önerilen birinci dense katmanlı mimari modelinin çıktısı Şekil 12'de gösterilmiştir

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 1000, 128)	384
dropout (Dropout)	(None, 1000, 128)	0
batch_normalization (Batch Normalization)	(None, 1000, 128)	512
dense_1 (Dense)	(None, 1000, 256)	33024
dropout_1 (Dropout)	(None, 1000, 256)	0
batch_normalization_1 (Batch Normalization)	(None, 1000, 256)	1024
dense_2 (Dense)	(None, 1000, 512)	131584
dropout_2 (Dropout)	(None, 1000, 512)	0
batch_normalization_2 (Batch Normalization)	(None, 1000, 512)	2048
dense_3 (Dense)	(None, 1000, 256)	131328
dropout_3 (Dropout)	(None, 1000, 256)	0
batch_normalization_3 (Batch Normalization)	(None, 1000, 256)	1024
dense_4 (Dense)	(None, 1000, 128)	32896
dropout_4 (Dropout)	(None, 1000, 128)	0
batch_normalization_4 (Batch Normalization)	(None, 1000, 128)	512
dense_5 (Dense)	(None, 1000, 1)	129

-----  
Total params: 334,465  
Trainable params: 331,905  
Non-trainable params: 2,560

Şekil 12. Birinci modelin mimarisi ve parametreleri.

İkinci dense katmanlı mimarisi ise ek olarak dense katmanlarından oluşmaktadır. Birinci model de olduğu gibi küme büyüklüğü ve aktivasyon fonksiyonu üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. En optimal sonuç seçilmiştir.

Tablo 10'da görüldüğü gibi dense modeli-2 için küme büyüklüğüne göre başarı performansı incelendiğinde en optimal sonuç 128 değerinde elde edilmiştir fakat bu model diğer önerilen modellere göre düşük sonuç vermiştir.

Tablo 10. Dense katmanlı model-2 için küme büyüklüğüne göre başarı performansı

Parametreler	Küme Büyüklüğü	Ortalama Hataların Karesi
	32	0.283
<b>Kodlayıcı = Dense</b>		
<b>Adım Sayısı = 50</b>	64	0.289
<b>Aktivasyon = Sigmoid</b>	128	0.281

Tablo 11'de sunulduğu üzere dense modeli-2 için aktivasyon fonksiyonuna göre başarı performansı karşılaştırılmasında en başarılı aktivasyon fonksiyonu "Sigmoid" olmuştur.

Tablo 11. Dense katmanlı model-2 için aktivasyon fonksiyonuna göre başarı performansı

Parametreler	Aktivasyon Fonksiyonu	Ortalama Hataların Karesi
	Doğrusal	0.318
<b>Kodlayıcı = Dense</b>		
<b>Adım Sayısı = 50</b>	ReLU	0.312
<b>Küme Büyüklüğü = 128</b>	Sigmoid	0.281

Modelin başarımında en optimal sonuçlar sunulmuştur. İkinci modelin mimarisi Şekil 13'de ki gibidir;

Model: "sequential\_1"

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_12 (Dense)	(None, 1000, 128)	384
dropout_7 (Dropout)	(None, 1000, 128)	0
batch_normalization_7 (Batch Normalization)	(None, 1000, 128)	512
dense_13 (Dense)	(None, 1000, 256)	33024
dropout_8 (Dropout)	(None, 1000, 256)	0
batch_normalization_8 (Batch Normalization)	(None, 1000, 256)	1024
dense_14 (Dense)	(None, 1000, 512)	131584
dense_15 (Dense)	(None, 1000, 1)	513

-----  
Total params: 167,041  
Trainable params: 166,273  
Non-trainable params: 768

Şekil 13. İkinci modelin mimarisi ve parametreleri.

Önerilen modellerin en iyi sonuçları veren hiperparametreleri şöyledir;

- Birinci model için;
  - Adım sayısı = 50,
  - Küme büyüklüğü = 128,
  - Aktivasyon fonksiyonu = Sigmoid.
- İkinci model için;
  - Adım sayısı = 50,
  - Küme büyüklüğü = 128,
  - Aktivasyon fonksiyonu = Sigmoid.

### GAN Model

Çalışmada kullanılan modelde farklı metrikler ve aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. 2900 ve 10000 adımda eğitilen iki model eğitilmiş ve bu eğitimlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Öncelikle karşılaştırma yapılan metrik şöyledir;

- İkili çapraz entropi: İkili çapraz entropi kayıp fonksiyonu bir örneği iki sınıftan birisine ait olarak sınıflandırılan problemlerde kullanılmaktadır. Örnek verilecek olursa bir görüntünün kedi veya köpek olduğu belirlenmek isteniyorsa devreye bu kayıp fonksiyonu girmektedir. Köpek ise 1, kedi ise 0 olarak işaretleyebilmektedir.
- Sızdıran ReLU: Sızdıran ReLU özellikle küçük ağlar için önem arz etmektedir. Küçük ağlarda normal ReLU kullanıldığında geri yayılım yapmak için gradyan elde etmek nerdeyse imkansızdır. Sızdıran ReLU ile ağ tüm değerlerin sıfır olduğu alanlarda bile gradyana sahip olabilir.

GAN mimarisine ait olan ayırt edici ağı yapısı Şekil 14'te, üretken ağı mimarisi ise şekil 15'te gösterilmiştir.

Model: "sequential\_9"

Layer (type)	Output Shape	Param #
flatten_5 (Flatten)	(None, 2000)	0
dense_25 (Dense)	(None, 512)	1024512
leaky_re_lu_17 (LeakyReLU)	(None, 512)	0
dense_26 (Dense)	(None, 256)	131328
leaky_re_lu_18 (LeakyReLU)	(None, 256)	0
dense_27 (Dense)	(None, 1)	257

-----  
Total params: 1,156,097  
Trainable params: 1,156,097  
Non-trainable params: 0

Şekil 14. GAN ayırt edici ağ mimarisi ve parametreleri.

Model: "sequential\_10"

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_28 (Dense)	(None, 256)	25856
leaky_re_lu_19 (LeakyReLU)	(None, 256)	0
batch_normalization_9 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dense_29 (Dense)	(None, 512)	131584
leaky_re_lu_20 (LeakyReLU)	(None, 512)	0
batch_normalization_10 (Batch Normalization)	(None, 512)	2048
dense_30 (Dense)	(None, 1024)	525312
leaky_re_lu_21 (LeakyReLU)	(None, 1024)	0
batch_normalization_11 (Batch Normalization)	(None, 1024)	4096
dense_31 (Dense)	(None, 2000)	2050000
reshape_3 (Reshape)	(None, 1000, 2)	0

-----  
Total params: 2,739,920  
Trainable params: 2,736,336  
Non-trainable params: 3,584

Şekil 15. GAN üretken edici ağ mimarisi ve parametreleri.

2900 adımla eğitilen GAN'dan elde edilen sonuçlar, [-0.8,1.0] yerine [0.02,0.52] arasında değişen, 10000 adımla eğitilen GAN'dan elde edilen sonuçlara göre çok daha yakındır. Elde edilen sonuçlar Tablo 12 ve Tablo 13'te gösterilmiştir.

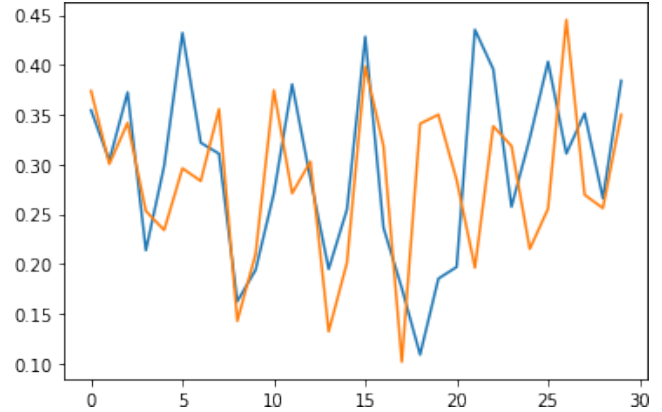
Tablo 12. GAN mimarisi 2900 adım eğitim sonuçları

Parametreler	İkili Çapraz Entropi
Kodlayıcı = GAN Adım Sayısı = 2900 Küme Büyüklüğü = 32 Aktivasyon = Tanh - Sigmoid Kayıp = İkili Çapraz Entropi	2.382

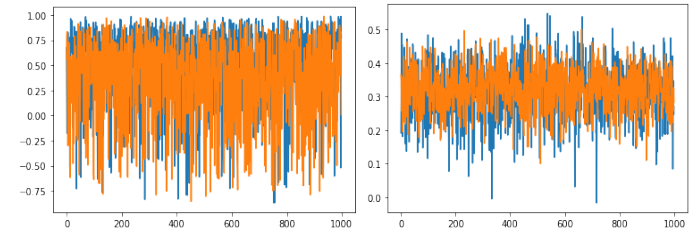
Tablo 13. GAN mimarisi 10000 adım eğitim sonuçları

Parametreler	İkili Çapraz Entropi
Kodlayıcı = GAN Adım Sayısı = 10000 Küme Büyüklüğü = 32 Aktivasyon = Tanh - Sigmoid Kayıp = İkili Çapraz Entropi	1.014

İlgili sonuçlara ait tahmin grafikleri de Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 16. GAN tahmin sonuçları.



Şekil 17. GAN adım sayısına göre tahmin karşılaştırması (Soldaki 10000, sağdaki 2900)

Tüm sonuçlar göz önüne alındığında ABP değerlerinden SBP ve DBP tahminleri yapılabilmektedir. Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen formüller ile SBP ve DBP tahmini yapıldığında elde edilen sonuçlarda en iyi sonuç veren model için MAE değeri SBP için 2.19, DBP için ise 0.941'tür.

### BHS (British Hypertension Society) Standardı

İngiliz Hipertansiyon Topluluğu (BHS), literatürde bir metrik olarak sıklıkla kullanılan BP ölçüm cihazlarını ve yöntemlerini değerlendirmek için bir standart olarak hareket etmek üzere yapılandırılmış bir protokol [4] tanıtmıştır. BHS standardı, sonuçları esas olarak üç kategoriye ayırırken, performansı mutlak hataya dayalı olarak değerlendirmektedir; Derece A, B ve C. Dereceler, tahmin mutlak hatalarının yüzde kaçının sırasıyla 5 mmHg, 10 mmHg ve 15 mmHg'nin altına (küçük veya eşit) düştüğü ölçülerek sağlanmaktadır. Bir algoritmanın veya boru hattının belirli bir derece elde etmesi için üç kategorinin de kriterlerini karşılaması gerektiğinden bahsetmek gerekmektedir. Ayrıca C Derecesi gereksinimlerini karşılayamayan çalışmalar için D Derecesi vardır[4].

BHS standardına göre ABP için ortalama hataların karesi hemen hemen tüm tahminler için A seviyesi eşiği olan 5



mmHg'nin altında veya ona eşit olduğu görülebilmektedir. BHS standardına göre ABP sınıflandırması sonuçları Tablo 14'te gösterilmiştir.

Tablo 14. BHS standardına göre ABP sınıflandırması

		Kümülatif Hata Oranı		
		≤5mmHg	≤10mmHg	≤15mmHg
Gerçekleştirilen Çalışma Sonuçları	ABP	91.35%	98.35%	98.85%
	A Seviye	60%	80%	95%
BHS Standartları	B Seviye	50%	75%	90%
	C Seviye	40%	65%	85%

### AAMI (Association for the Advancement of Medical Instrumentation) Standardı

Tıbbi Aletleri Geliştirme Derneği (AAMI), BP ölçüm cihazlarını ve algoritmalarını değerlendirmek için BHS ile benzer bir standart [4] önermiştir. Bu standarda göre, BP ölçüm sistemlerinin sırasıyla 5 mmHg ve 8 mmHg'den küçük veya eşit büyüklükte (mutlak değer) bir Ortalama Hatası (ME) ve Standart Sapması (STD) olmak zorundadır. Ayrıca değerlendirilecek denek sayısı 85 veya daha fazla olmalıdır.

Tablo 15'te sunulduğu gibi AAMI standardına göre ABP sınıflandırması, modelden gelen tahminler, AAMI standardının her iki kategorisini de karşılamaktadır ve kriterlerle büyük bir marj tutmaktadır.

Tablo 15. AAMI standardına göre ABP sınıflandırması

Sonuçlar	ABP	ME	SS	Örnek Sayısı
		≤5 mmHg	≤8 mmHg	≥85
AAMI Standart		0.09	0.94	26,870

### Bulgular ve Tartışma

Çalışmada elde edilen tahmin sonuçlarından ve elde edilen MSE kayıp değerlerinden, bu problem için en uygun model, 128 LSTM biriminden oluşan modeldir. LSTM modeli, ABP sinyalinin hem genliğini hem de periyodikliğini tahmin etmiştir. LSTM+Dense katmanlarından oluşan model, genliği daha sonraki zaman adımlarında tahmin etme konusunda sınırlı yetenek göstermiştir, ancak genel sinyal tahmininde bir takım gürültüler mevcuttur. Dense katmanlı modeller, yalnızca periyodiklik verilerini yakalayabilmiş ve ABP sinyalinin genliğini tahmin edememiştir.

GAN tarafından oluşturulan üretken modeli, ilk veri setine benzeyen modeller üretmeyi başarmıştır. Benzerlik, grafiklerdeki zirvelere ve bunların neredeyse eşit aralıklarla düzenli olarak meydana gelmesine dikkat edilerek fark edilebilmektedir. Gerçek verilerle karşılaştırıldığında, GAN, her bir yerel maksimum kümesi arasındaki eğrilerin düzgünlüğünden yoksundur. Ancak bu, eğitim verilerinin başlangıç boyutunun büyük olmadığını kabul ederek ve bu nedenle modelin özelliklerini geliştirmesine izin vermediği yönünde açıklanabilir.

Elde edilen sonuçlar incelenecek olursa modeller içerisinde en iyi sonuç veren model olan LSTM modelin en büyük

avantajı, temassız bir şekilde elde edilen verilerden ABP tahminini düşük bir hata oranı ile elde etmesidir. Her ne kadar model SBP ve DBP değerlerini tahmin edemiyor olsa da, bir ABP sinyal boyunu tahmin edebilmektedir. Tahmin edilen dalga formu doktorların tıbbi bir teşhis için başvurabilecekleri kadar özellik içermektedir.

Ayrıca önerilen model dünya standartlarında geçerli olan BHS ve AAMI standartlarını da A seviye düzeyinde karşılayacak tahminler üretmiş ve geçerli olduğunu ispatlamıştır. Mevcut yaklaşım, elde edilen sinyallerdeki hareket yapılarını ele alacak şekilde tasarlanmadığından, mevcut sistemi giyilebilir bir cihaz için doğrudan kullanmak zor olacaktır.

Çalışmada 26.870 yetişkin hastadan elde edilen PPG ve ECG sinyallerinden ABP sinyali tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelenecek olursa, karmaşık özellik mühendisliği yapılmadan kan basıncı tahmini gerçekleştirme işleminde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın literatürde ki diğer çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. Literatürde ki diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Çalışmalar	Veri Seti	Metot	MAE (SBP- DBP)
[12]	MIMIC-II	TPOT	6.52 – 4.19
[13]	MIMIC-II	U-Net	2.728 – 1.166
[14]	MIMIC-II	Kümeleme	2.561 – 2.231
[17]	MIMIC-II	LSTM	4.05 – 2.41
Gerçekleştirilen Çalışma	MIMIC-II	LSTM	2.19 – 0.941

Model çoğunlukla çok temiz sinyaller üzerinde eğitildiğinden, model performansını büyük ölçüde etkileyebilir. Ancak, hareket artefaktı birçok yolla düzeltiler. Sonuç olarak, önerilen model, gerçek zamanlı, invazif olmayan BP izleme uygulamaları için uzaktan izleme sunucularında ve mobil uygulamalarda dağıtım için uygun olabilir.

### Sonuçlar

Çalışmanın sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalardan önemli ölçüde daha iyi sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Bu başarının ardında, veri ön işleme aşamasından eğitim süresine ve test tekniklerine kadar bir dizi faktörün etkisi olduğu görülmektedir. Önerilen ve eğitim sonucunda kaydedilen derin öğrenme modeli, diğer çalışmalarda görülen örnekler gibi giyilebilir cihazlara entegre edilerek kritik hastalık durumlarında sürekli tansiyon takibi için kullanılabilir. Ancak, bu uygulamanın etkisini çeşitli faktörler etkileyebilir; hastanın uyku durumu, aktivite seviyesi, yaş ve kronik rahatsızlıklar gibi etkenler tansiyon sonuçlarını etkileyebilir. Bu nedenle sürekli tansiyon takibi için uygun bir ortam sağlanmalı ve hastanın özel durumları da dikkate alınmalıdır. Modelin tahmin ettiği arteriyel kan basıncı (ABP) sinyalleri, sistolik ve diyastolik tansiyon tahminlerinin temelini oluşturmaktadır. Arteriyel kan basıncı tahmini, eğitilen modeller aracılığıyla yüksek başarımlarına ulaşmış ve bu sayede tansiyon türlerinin doğru tahmin edilmesini sağlamıştır. Bu çalışma, sürekli tansiyon izlemesi için önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

## Teşekkür

Bu çalışmada, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF.23.29 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP birimine teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] J. Booth, "A short history of blood pressure measurement," *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, vol. 70, no. 11, pp. 793–799, 1977. doi:10.1177/003591577707001112.
- [2] G. Beevers, "ABC of hypertension: Blood pressure measurement," *BMJ*, vol. 322, no. 7292, pp. 981–985, 2001. doi:10.1136/bmj.322.7292.981.
- [3] "High blood pressure&nbsp;," [www.heart.org](https://www.heart.org/en/health-topics/high-blood-pressure), <https://www.heart.org/en/health-topics/high-blood-pressure> (accessed Oct. 16, 2023).
- [4] "High blood pressure in adults - hypertension: Medlineplus medical encyclopedia," *MedlinePlus*, <https://medlineplus.gov/ency/article/000468.htm> (accessed Oct. 16, 2023).
- [5] "Hypertension," *World Health Organization*, [https://www.who.int/health-topics/hypertension#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/hypertension#tab=tab_1) (accessed Oct. 16, 2023).
- [6] "Low blood pressure (hypotension)," *Mayo Clinic*, <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/low-blood-pressure/symptoms-causes/syc-20355465> (accessed Oct. 16, 2023).
- [7] "Know your risk for high blood pressure," *Centers for Disease Control and Prevention*, [https://www.cdc.gov/bloodpressure/risk\\_factors.htm](https://www.cdc.gov/bloodpressure/risk_factors.htm) (accessed Oct. 16, 2023).
- [8] "High blood pressure," *Centers for Disease Control and Prevention*, <https://www.cdc.gov/bloodpressure/index.htm> (accessed Oct. 16, 2023).
- [9] M. Holanger, S. E. Kjeldsen, K. Jamerson, and S. Julius, "Smoking and overweight associated with masked uncontrolled hypertension: A hypertension optimal treatment (HOT) sub-study," *Blood Pressure*, vol. 30, no. 1, pp. 51–59, 2020. doi:10.1080/08037051.2020.1787815.
- [10] E. O'Brien, "From measurement to profiles, phenomena and indices: A workshop of the European Society of Hypertension," *Blood Pressure Monitoring*, vol. 10, no. 6, pp. 291–295, 2005. doi:10.1097/00126097-200512000-00001.
- [11] G. Parati et al., "European Society of Hypertension Practice Guidelines for Ambulatory Blood Pressure Monitoring," *Journal of Hypertension*, vol. 32, no. 7, pp. 1359–1366, 2014. doi:10.1097/hjh.0000000000000221.
- [12] S. M. Fati, A. Muneer, N. A. Akbar, and S. M. Taib, "A continuous cuffless blood pressure estimation using tree-based pipeline optimization tool," *Symmetry*, vol. 13, no. 4, p. 686, 2021. doi:10.3390/sym13040686.
- [13] S. Mahmud et al., "A shallow U-net architecture for reliably predicting blood pressure (BP) from Photoplethysmogram (PPG) and Electrocardiogram (ECG) signals," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 919, 2022. doi:10.3390/s22030919.
- [14] A. Farki, R. Baradaran Kazemzadeh, and E. Akhondzadeh Noughabi, "A novel clustering-based algorithm for continuous and noninvasive cuff-less blood pressure estimation," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2022, pp. 1–13, 2022. doi:10.1155/2022/3549238.
- [15] L. N. Harfiya, C.-C. Chang, and Y.-H. Li, "Continuous pressure estimation using exclusively photoplethysmography by LSTM-based signal-to-signal translation," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 2952, 2021. doi:10.3390/s21092952.
- [16] A. L. Goldberger et al., "Physiobank, PhysioToolkit, and PhysioNet," *Circulation*, vol. 101, no. 23, 2000. doi:10.1161/01.cir.101.23.e215.
- [17] A. Paviglianiti, V. Randazzo, E. Pasero, and A. Vallan, "Noninvasive arterial blood pressure estimation using abpnnet and vital-ECG," *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2020. doi:10.1109/i2mtc43012.2020.9129361.
- [18] J. Kraithl, U. Timm, H. Ewald, and E. Lewis, "Non-invasive measurement of blood components," *2011 Fifth International Conference on Sensing Technology*, 2011. doi:10.1109/icsenst.2011.6136976.
- [19] "A wireless heart rate monitoring system based on photoplethysmography (PPG) technique," *Strad Research*, vol. 7, no. 9, 2020. doi:10.37896/sr7.9/011.
- [20] Joon Lee et al., "Open-access mimic-II database for Intensive Care Research," *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2011. doi:10.1109/iembs.2011.6092050.
- [21] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.
- [22] I. Goodfellow et al., "Generative Adversarial Networks," *Communications of the ACM*, vol. 63, no. 11, pp. 139–144, 2020. doi:10.1145/3422622.



# Hepatit hastalığının tespitinde bulanık mantık ve makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırılması

## Comparison of fuzzy logic and machine learning methods in detection of hepatitis disease

Cengiz Coşkun<sup>1\*</sup>, Emre Yüksek<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mardin Artuklu Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, [cengizcoskun@artuklu.edu.tr](mailto:cengizcoskun@artuklu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8552-1363>

<sup>2</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, [eyuksekk@sivas.edu.tr](mailto:eyuksekk@sivas.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1885-5539>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 23 Haziran 2023  
Revizyon 30 Ağustos 2023  
Kabul 16 Kasım 2023  
Online 31 Aralık 2023

#### Anahtar Kelimeler:

hepatit, bulanık mantık, makine öğrenmesi, öznelik seçimi

### ÖZ

Yaygın bir karaciğer rahatsızlığı olan hepatit, dünya çapında önemli halk sağlığı sorunlarından biridir. Klinik verilerin doğru yorumlanması, hepatit tanısının yapılabilmesi için ele alınması gereken en önemli sorunlardan birisidir. Bu çalışmada, ölümcül hepatit hastalığının tanısı için öznelik seçimi yöntemi uygulanarak, bulanık modelleme ile çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerinin hastalık tespitindeki başarıları karşılaştırılmıştır. Çalışmada UCI makine öğrenimi deposundan edinilen hepatit veri seti kullanılmıştır. Kullanılan veri seti ilk olarak veri ön işlemeden geçirilmiş, sınıflandırma başarısının artırılması için öznelik seçimi ile veri setindeki özellik sayısı azaltılmıştır. Özellik sayısı azaltılan veri seti kullanılarak bulanık model ve makine öğrenmesi modelleri denenmiştir. Elde edilen sonuçlar çeşitli metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda Bulanık Mantık yöntemi ile doğruluk %94 olurken, Gradient Boosting algoritması ile doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f-skör metriği açısından sırasıyla %98.36, %98.68, %98.95 ve %98.91 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hepatit hastalığının teşhisinde makine öğrenmesi yöntemlerinden Gradient Boosting yönteminin diğer makine öğrenme yöntemlerine ve bulanık yaklaşıma göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 June 2023  
Received in revised form 30 August 2023  
Accepted 16 November 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

hepatitis, fuzzy logic, machine learning, feature selection

### ABSTRACT

Hepatitis, a common liver disorder, is one of the major public health problems worldwide. Accurate interpretation of clinical data is one of the most important problems to be addressed in order to diagnose hepatitis. In this study, the success of fuzzy modeling and various machine learning methods in disease detection is compared by applying feature selection method for the diagnosis of fatal hepatitis. The hepatitis dataset obtained from the UCI machine learning repository was used in the study. The dataset was first subjected to data preprocessing and the number of features in the dataset was reduced by feature selection to increase the classification success. Fuzzy model and machine learning models were tested using the reduced number of features. The results obtained were evaluated using various metrics. As a result of the studies, the accuracy with the Fuzzy Logic method was 94%, while the accuracy with the Gradient Boosting algorithm was calculated as 98.36%. The results show that Gradient Boosting algorithm is more successful than other machine learning methods and fuzzy approach in the diagnosis of hepatitis disease.

Doi: 10.24012/dumf.1319102

\* Sorumlu Yazar



## Giriş

Hastalık teşhisi, tıp ve sağlık alanında bir hastalığın tedavisinde atılması gereken ilk ve en önemli adımdır. Hastalığın yanlış teşhisi, genellikle komplikasyona yol açmakta ve nihayetinde de ölümle sonuçlanabilen, yanlış tedavilere yol açabilmektedir [1]. Hastalık tedavisinde, hastalığın başlıca belirtileri ve semptomlarının düzgün bir şekilde analiz edilerek elde edilen teşhis çerçevesinde doğru tedavinin uygulanması kritik öneme sahiptir. Tedavinin doğru zamanda ve doğru şekilde uygulanması ise oldukça zor olmakla birlikte hastalık ve hastanın geçmişi hakkında çok fazla bilgi gerektirmektedir. Bu sebeple hastalığın teşhisinin doğru bir şekilde yapılması ve hastalık niteliğinin tespiti hayati önem arz etmektedir.

Karaciğer rahatsızlıklarının doğru zamanda tespit edilemediği durumlarda, hastalık, ölüme neden olabilmektedir. Karaciğer rahatsızlıklarının başlıca nedenleri; bağımlılık yapan uyuşturucu vb. maddelerin kullanımı, sürekli alkol ve sigara kullanımı, günlük eşyaların ortak kullanımı ve sterilizasyon olmadan veya doğru koruma önlemleri alınmadan yapılan kan naklidir [2]. Karaciğer rahatsızlıklarının analizi için birçok yöntem ve yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan bazıları fiziki muayene, karaciğer testleri, ultrason, karaciğer biyopsisi ve kan testleridir.

Dünya genelinde, son evredeki karaciğer rahatsızlıkları önemli ölüm sebeplerindedir [3]. Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre 2017 yılında hepatit nedeni ile 1,4 milyon ölüm gerçekleşmiş ve 325 milyon insan enfekte olmuştur [4].

Günümüzde yapay zekâ, birçok farklı alandaki tıbbi problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılmakta ve bu problemlerin çözülebilmesi için akıllı sistemler geliştirilmektedir [5]. Bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System, FIS) ve makine öğrenmesi yöntemleri, problemleri analiz etmek ve çıkarım yapmak için kullanılan yapay zekâ yöntemleridir. Bu yöntemler otonom robotlar, çeşitli endüstri alanları, bilgisayar bilimleri, tıbbi sistemler, hava tahmin sistemleri ve tarım gibi hayatın birçok alanında kullanılmaktadır.

Literatürde, hastalıkların tespiti için yapay zekâ yöntemlerinin kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Doğrusal Diskriminant Analizi (Linear Discriminant Analysis, LDA) ve Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Network based on Fuzzy Inference System, ANFIS) kullanarak geliştirilen modellerle hepatit teşhisinde %94.16 oranında başarı sağlanmıştır [6]. Yapay Bağışıklık Tanıma Sistemi (Artificial Immune Recognition System, AIRS) ve Bulanık Kaynak Tahsis Mekanizmasını (Fuzzy Resource Allocation System) kullanarak hepatit teşhisi yapabilen bir sistemde 10-fold çapraz doğrulama (cross validation) uygulayarak %92.59 oranında doğruluk elde edilmiştir [7]. Doğrusal Olmayan Yinelemeli Kısmi En Küçük Kareler (Non-Linear Iterative Partial Least Squares) ve Kendini Düzenleyen Harita (Self Organizing Map) kullanarak geliştirilen hepatit teşhisinde ROC metriği bakımından %93.06 başarı sağlanmıştır [8]. Çok Katmanlı Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi (Multilayer Mamdani Fuzzy Inference System) kullanılmış hepatit B teşhisi sistemi %92.2 oranında başarı sağlamıştır [9]. ANFIS kullanan bir hepatit teşhis sistemi %95.24 oranında başarı sağlamıştır

[10]. Levenberg-Marquardt algoritması ile Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network) kullanan bir hepatit teşhis sistemi, 10-fold çapraz doğrulama uygulayarak %91.87 oranında başarı sağlamıştır [11]. Başka bir kalp rahatsızlığı teşhis sisteminde Relief algoritması, Rough Set yöntemi ile C4.5 sınıflandırma algoritması kullanılmış ve Jackknife çapraz doğrulama yöntemi uygulanarak %92.59 oranında başarı sağlanmıştır [12]. Genetik Algoritma ve ANFIS kullanarak hepatit teşhis sistemi %97.44 oranında başarı sağlamıştır [13]. Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) ve Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing) yöntemleri ile geliştirilen hepatit teşhis sisteminde 10-fold çapraz doğrulama ile %96.25 oranında başarı sağlanmıştır [14]. Temel Bileşen Analizi (Principle Component Analysis, PCA) ve En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi (Least Squares Support Vector Machine, LSSVM) kullanan hepatit teşhisinde %95 oranında başarı sağlanmıştır [15]. Başka bir hepatit teşhis sisteminde Fisher Doğrusal Analiz (Local Fisher Discriminant Analysis) ve SVM kullanılmış ve %96.77 oranında başarı sağlanmıştır [16]. Rough Set ve Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Machine Learning, ELM) kullanan bir hastalık teşhis sisteminde %93.75 oranında başarı elde edilmiştir [17]. ELM ve Tek Katmanlı İleri Beslemeli Sinir Ağı (Single Layer Feed Forward Neural Network) kullanılan sistemde %94.44 oranında başarı sağlanmıştır [18].

Bu çalışmada öznelik seçimi yöntemi (feature selection) ile bulanık çıkarım sistemi ve makine öğrenmesi kullanılarak hepatit hastalığı tespiti için model geliştirilmeye çalışılmış ve bulanık çıkarım sistemi ile makine öğrenmesi modellerinin başarıları karşılaştırılmıştır. İlk aşamada, öznelik seçimi ile veri kümesindeki özellik sayısı azaltılmaya çalışılmıştır. Bunun için her bir özneliğin çıktı değişkeni ile sahip olduğu korelasyon değeri kullanılarak hastalıkla ilişkili en önemli özellikler seçilmeye çalışılmış ve bu sayede sınıflandırma doğruluğunun artırılması hedeflenmiştir. İkinci aşamada ise hepatit hastalığının teşhisi için seçilen özellikler kullanılarak bulanık çıkarım sistemi ve makine öğrenmesi modelleri ile sonuç üretilmiştir. Bu yaklaşım, literatürde yapılmış önceki çalışmalara oranla daha az hesaplama süresi gerektirmesi, azaltılmış sınıflandırma karmaşıklığı ve daha yüksek doğrulukta sınıflandırma başarısı sunması gibi sebeplerle bu çalışmada uygulanmıştır.

Çalışmanın kapsamı Bulanık Mantık ve Makine Öğrenmesi algoritmalarının kullanılarak hepatit hastalığının tespiti için kıyaslanmasıdır. Giriş bölümünde, bu alanda yapılan benzer çalışmalara, Materyal ve Metot bölümünde kullanılan modellerin başarı ölçütlerinin hesaplanmasına ve bulanık mantık ve makine öğrenmesi algoritmalarına ve çalışma prensiplerine değinilmiştir. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma bölümünde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Son Bölümde, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

## Materyal ve Metot

Bu çalışmada hepatit hastalığının teşhisinde kullanılacak modeller oluşturulmadan önce veri ön işleme ve öznelik seçimi işlemleri uygulanmıştır. Öznelik seçimi ile, veri setindeki gereksiz özellikler çıkarılarak, çıktı değerini belirleyici özelliklerin modelde yer alması, çıktı değeri üzerinde etkisi az olan özelliklerin modelde kullanılmaması

sağlanmıştır. Çalışmada açık erişimli UCI Makine Öğrenmesi Deposundan alınan Hepatit hastalık [19] veri seti kullanılmıştır. Veri setinde öznitelik seçimi ile kullanılacak özellikler belirlenmeden önce ön işleme yapılarak eksik ve gereksiz veriler silinmiştir.

### Kullanılan Veri Seti

Çalışmada açık erişimli UCI Makine Öğrenmesi Deposundan alınan Hepatit hastalık veri seti kullanılmıştır. Veri setinde yer alan özellikler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri seti.

Özellik No	Özellik Adı	Özellik Değer Aralığı
1	Hasta ID	1 – 615
2	Yaş	19 – 77
3	Cinsiyet	E – K
4	ALB (Albümin)	14.9 – 82.2
5	ALP (Alkalen fosfataz)	11.3 – 416.6
6	ALT (Alanin Aminotransferaz)	0.9 – 325.3
7	AST (Aspartat Aminotransferaz)	10.6 – 324
8	BIL (Bilirubin)	0.8 – 254
9	CHE (Kolinesteraz)	1.42 – 16.41
10	CHOL (Kolesterol)	1.43 – 9.67
11	CREA (Kreatinin)	8.0 – 1079.1
12	GGT (Gama Glutamil Transferaz)	4.5 – 650.9
13	PROT (Kan Proteini)	44.8 – 90.0
14	Kategori	0=Kan Bağışçısı, 0s=Şüpheli Kan Bağışçısı, 1=Hepatit Hastası, 2=Fibrozis Hastası, 3=Siroz Hastası

### Veri Ön İşleme

Veri ön işleme aşamasında öncelikle veri setindeki eksik veri içeren veriler silindi. Ardından daha az hesaplama süresi ve daha az karmaşıklık için veri seti üzerinde F-test uygulanarak gereksiz özellikler veri setinden çıkarıldı. Ayrıca SMOTE [20] yöntemi kullanılarak eksik sayıdaki sınıf türleri (1=Hepatit Hastası, 2=Fibrozis Hastası, 3=Siroz Hastası) çoğaltıldı. Ayrıca kategorik değerler içeren kategori özelliğinde 0=Kan Bağışçısı ve 0s=Şüpheli Kan Bağışçısı kategorileri kendi aralarında Hasta Değil olarak ve 1=Hepatit, 2=Fibrozis ve 3=Siroz kategorileri de kendi aralarında Hasta olarak birleştirildi. Son olarak da birleştirilen kategorilere Label Encoder işlemi uygulanarak veri ön işleme işlemi bitirildi. Veri ön işleminin ardından veri setindeki özellikler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Veri ön işleme sonrası veri seti.

Özellik No	Özellik Adı	Özellik Değerleri
1	ALB	14.9 – 82.2
2	AST	10.6 – 324
3	BIL	0.8 – 254
4	GGT	4.5 – 650.9
5	Hastalık Durumu	0 (Hasta Değil), 1 (Hasta)

### Bulanık Mantık

Mantık biliminin temel yapı taşı olan önermeler, doğruluk değerine sahip hüküm bildiren ifadelerdir. Antik Yunan döneminden başlayarak günümüze kadar gelen klasik mantıkta önermeler yanlış ve doğru olmak üzere doğruluk değerini  $\{0,1\}$  kümesinden alır. Klasik mantığın belirsizlik kavramına yer vermeyen yaklaşımı sonucu, bazı problemlerin çözümünde ortaya çıkan çözümsüzlüklerle birlikte 20. yy başlarından itibaren, felsefi olarak eleştirilmeye; doğada ve bilimde var olan belirsizlikten bahsedilmeye başlandığı görülmektedir [21], [22]. Klasik mantığın karşısında yer alan bulanık mantık teorisi, 1965 yılında Zadeh tarafından ortaya atılmıştır [23]. Bulanık mantık teorisi, iki değerli önermeler yerine belirsizlik kavramının göz önüne alındığı, değerini  $[0,1]$  aralığından alan doğruluk derecesine sahip önermeleri temel almaktadır. Böylece Zadeh, klasik iki değerli mantığın dayandığı keskinlik yaklaşımı yerine, insanların düşünmesinde ve akıl yürütmesinde kullandığı belirsizliği öne çıkarmıştır. Bulanık mantık teorisi temel anlamda bulanık küme teorisine dayanır. Bulanık kümeler, keskin sınırlara sahip küme kavramı yerine sınırları belirsiz olan ve elemanların üyeliklerinin kümeye aidiyeti keskin olmayan küme anlayışına dayanmaktadır. Klasik mantıkta akıl yürütme yolu ile çıkarım yapılır, bunun için mantık biliminin farklı yaklaşımları kullanılır. Bulanık akıl yürütme (yaklaşık akıl yürütme) de bulanık küme ve bulanık mantık teorilerini temel alır. Günlük hayatımızda kullandığımız akıl yürütme, klasik mantıkta yer alan akıl yürütme yaklaşımlarına benzemekle birlikte belirsizlik taşıyan kavramlar üzerinden yapıldığından, bulanık akıl yürütme yaklaşımını andırmaktadır. Bulanık modellemede kullanılan çıkarım mekanizmaları, tanımlanmış olan bulanık küme ve bulanık kuralları kullanarak bulanık akıl yürütmenin uygulanmasını ve karşılaşılan yeni değerler için tahmin yapılmasını sağlar. Bulanık modellemede kullanılan üç temel çıkarım mekanizması Mamdani, Sugeno ve Tsukamoto yaklaşımlarıdır. Bu yöntemler sayesinde günümüz dijital sistemlerinde, bulanık küme ve bulanık mantık teorilerinden faydalanılarak bulanık akıl yürütme işleminin yapılması sağlanmış ve insan benzeri akıl yürütmenin bir yansıması olan bulanık modellemenin yolu açılmıştır.

### Makine Öğrenmesi

Yapay zekânın bir alt dalı olan makine öğrenmesi, karmaşık veriden bir örüntü tespit edilmesi ve akılcı kararlar verebilmek için istatistikten ve bilgisayarların işlem gücünden faydalanmaktadır.

Bu çalışmada sınıflandırma algoritmalarından Random Forest, Decision Tree, XGBoost, Gradient Boosting, MLP, Support Vector Machine (SVM) ve k-Nearest Neighbors algoritmaları kullanılmıştır.

**k Nearest Neighbors :** Bu algoritma sınıflandırılmak istenen verinin daha önceki verilerden k tanesine olan yakınlığını kullanarak sınıflandırma yapmaktadır. Komşuluk mesafesini ölçmek için Öklid uzaklığı kullanılmaktadır. Uzaklıkları hesaplanan k tane örneğin ait oldukları sınıfların çoğunluğuna göre yeni veri bir sınıfa atanır.

**Decision Tree :** Bu yöntemde eğitim aşamasında veri setinden faydalanılarak bir ağaç yapısı oluşturulur. Karşılaşılan yeni veri için ağacın kökünden başlanılarak her

düğümde yapılan karşılaştırma ile ağacın yapraklarındaki sınıf etiketlerine giden kollar ile sınıflandırma işlemi yapılmaktadır.

**Random Forest** : Sınıflandırma işlemi sırasında birden fazla karar ağacı üretmek sınıflandırma oranını yükseltmeye amaçlayan bir algoritmadır. Rastlantısal olarak seçilen karar ağaçları bir araya gelerek karar ormanını oluşturur.

**Gradient Boosting** : Random Forest algoritmasına benzeyen bu algoritma karar ağaçlarını kullanmaktadır. Aralarındaki temel fark, son tahminin tüm ağaçların doğrusal bir toplamı olması ve her ağacın amacının önceki ağacın hatasını en aza indirmeye çalışmasıdır.

**Support Vector Machine** : Support Vector Machine, iki sınıftan oluşan ve doğrusal olmayan şekilde ayrılabilen veri kümesi için, veri kümesindeki sınıfları sonsuz sayıda bölün çizginin (karar sınırı) olduğu temel prensibi ile çalışan bir algoritmadır. İki sınıfın en iyi şekilde ayıran çizginin seçimi, eğitim numunelerinin bir alt kümesi kullanılarak gerçekleştirilir.

**Multi Layer Perceptron** : Multi Layer Perceptron, insan beyninin bilgiyi işleme sürecini taklit eden bir algoritmadır. MLP, giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. Giriş katmanı, dışarıdan kendisine gelen bilgileri işlemek üzere gizli katmana iletir. Gizli katmanlarda işlenen bilgiler, çıkış katmanında tahmin sonucu üretilerek sistemden çıkmaktadır.

**XGBoost** : Gradient Boosting temelli bir algoritmadır. XGBoost, Gradient Boosting farklı olarak aşırı öğrenmeyi önlemek için daha düzenli bir model biçimlendirmesi kullanılmaktadır.

### Modellerin Geliştirilmesi

Bu çalışmada hepatit hastalık veri seti kullanılarak Bulanık Mantık ve Makine Öğrenmesi yöntemleri ile modeller oluşturulmuş ve elde edilen modellerin başarımları değerlendirilmiştir. Modellerin başarımlarını arttırmak için veri setinde, F-test kullanılarak öznelik seçimi, SMOTE yöntemi kullanılarak eksik sınıf verilerinin eklenmesi ve kategorik verilerin sayısallaştırılması gibi veri ön işlemleri yapılmıştır. F-test sonucu veri setindeki ALB, AST, BIL, GGT ve Hastalık durumu öznelikleri seçilmiştir.

Çalışmada bulanık modelin geliştirilmesi aşamasında Python programlama dilinde geliştirilmiş olan pyFUME [24] kütüphanesi kullanılmıştır. pyFUME kütüphanesi, bulanık modelleme konusunda oldukça faydalı bir kütüphane olması sebebiyle çalışmada tercih edilmiştir. Bulanık modeldeki üyelik fonksiyonları ve kurallar, pyFUME kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur.

Modelde, her bir özellik için 3 bulanık küme tanımlanmış – Düşük, Normal, Yüksek–; düşük ve yüksek bulanık kümeler için üçgen üyelik fonksiyonlar, Normal bulanık kümeler için ise yamuk üyelik fonksiyonlar oluşturulmuştur. Her bir özellik için oluşturulan üyelik fonksiyonları Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Veri ön işleme sonrası veri seti.

Özellik	Destek Aralığı, Bulanık Küme Adı, Tipi
ALB	0 – 65, Düşük, üçgen
	30 – 100, Normal, yamuk
	75 – 150, Yüksek, üçgen
AST	0 – 175, Düşük, üçgen
	130 – 360, Normal, yamuk
	300 – 400, Yüksek, üçgen
BIL	0 – 70, Düşük, üçgen
	30 – 200, Normal, yamuk
	150 – 300, Yüksek, üçgen
GGT	0 – 100, Düşük, üçgen
	35 – 600, Normal, yamuk
	500 – 700, Yüksek, üçgen

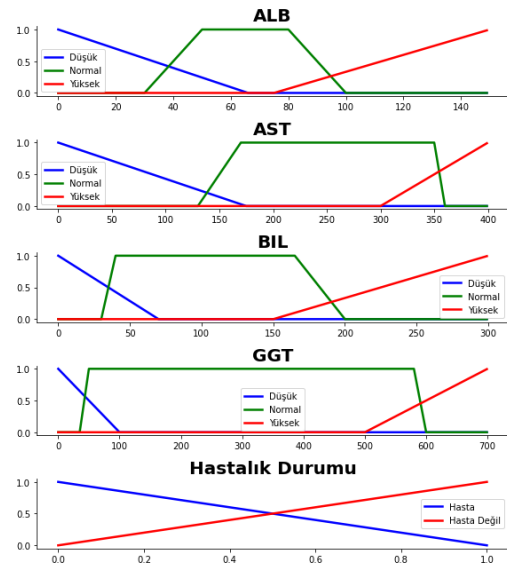
Her bir özellik için oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 2’de gösterilmiştir.

Üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasının ardından bulanık modeldeki kurallar oluşturulmuştur. Kurallar uzman görüşü ile oluşturulmuş ve 14 kural bulanık modele eklenmiştir.

Bulanık modelde çıkarım mekanizması olarak Mamdani çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Modelde durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Ağırlık merkezi yönteminde, tetiklenen kurallardan gelen üyelik değerlerinin, bulanık çıkış kümeleri üzerinde kestiği alanlar toplanır. Daha sonra bu alanların geometrik ağırlık merkezi hesaplanır. Ortaya çıkan değer ise durulaştırılmış çıkış değeridir.

1. If (ALB is yüksek) and (AST is düşük) and (BIL is düşük) and (GGT is düşük) then (HASTA is 1) (1)
2. If (ALB is yüksek) and (AST is düşük) and (BIL is düşük) and (GGT is normal) then (HASTA is 1) (1)
3. If (ALB is düşük) and (AST is normal) and (BIL is düşük) and (GGT is düşük) then (HASTA is 1) (1)
4. If (ALB is düşük) and (AST is düşük) and (BIL is normal) and (GGT is düşük) then (HASTA is 1) (1)
5. If (ALB is düşük) and (AST is düşük) and (BIL is düşük) and (GGT is düşük) then (HASTA is 1) (1)
6. If (ALB is düşük) and (AST is düşük) and (BIL is düşük) and (GGT is normal) then (HASTA is 1) (1)
7. If (ALB is düşük) and (AST is normal) and (BIL is düşük) and (GGT is normal) then (HASTA is 0) (1)
8. If (ALB is normal) and (AST is düşük) and (BIL is düşük) and (GGT is düşük) then (HASTA is 0) (1)
9. If (ALB is normal) and (AST is düşük) and (BIL is normal) and (GGT is normal) then (HASTA is 0) (1)
10. If (ALB is normal) and (AST is düşük) and (BIL is düşük) and (GGT is normal) then (HASTA is 0) (1)
11. If (ALB is normal) and (AST is normal) and (BIL is düşük) and (GGT is düşük) then (HASTA is 1) (1)
12. If (ALB is düşük) and (AST is yüksek) and (BIL is normal) and (GGT is normal) then (HASTA is 1) (1)
13. If (ALB is normal) and (AST is normal) and (BIL is düşük) and (GGT is normal) then (HASTA is 1) (1)
14. If (ALB is normal) and (AST is normal) and (BIL is normal) and (GGT is normal) then (HASTA is 1) (1)

Şekil 1. Bulanık modeldeki kurallar.



Şekil 2. Bulanık model üyelik fonksiyonları.

Çalışmada makine öğrenmesi modellerinin geliştirilmesi Python 3.10 ortamında yapılmıştır. Çalışmada makine öğrenmesi modelleri, en başarılı sonucu veren parametrelerin

bulunması amacıyla GridSearch yöntemi ile geliştirilmiştir. Ayrıca her bir model için 10-çapraz doğrulama uygulanmıştır.

### Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Eğitim verisi ile modeller eğitildikten sonra test verisi ile modellerin başarımları test edilmiştir. Modellerin başarımlarının karşılaştırılması için çeşitli değerlendirme kriterleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada değerlendirme kriteri olarak doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F-Skor kullanılmış; bu ölçütler hesaplanırken karmaşıklık matrisinden faydalanılmıştır. Karmaşıklık matrisi Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Karmaşıklık Matrisi.

		Gerçek Değerler	
		Pozitif (1)	Negatif (0)
Tahmin Değerleri	Pozitif (1)	TP	FP
	Negatif (0)	FN	TN

**TP** : True Positive (Doğru Pozitif): Gerçek sınıfı pozitif olan bir örnek doğru sınıflandırıldı

**FP** : False Positive (Yanlış Pozitif) : Gerçek sınıfı negatif olan bir örnek yanlış sınıflandırıldı

**FN** : False Negative (Yanlış Negatif) : Gerçek sınıfı pozitif olan bir örnek yanlış sınıflandırıldı

**TN** : True Negative (Doğru Negatif) : Gerçek sınıfı negatif olan bir örnek doğru sınıflandırıldı

Doğruluk, doğru sınıflandırılan örnek sayısının tüm örneklerin sayısına oranıdır. Bir modelin başarısını ölçmek için sık kullanılır, ancak tek başına yeterli değildir.

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

Kesinlik, pozitif olan ve doğru tahmin edilen örnek sayısının pozitif olarak tahmin edilen örnek sayısına oranıdır.

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

Duyarlılık, pozitif olan ve doğru olarak tahmin edilen örnek sayısının pozitif örnek sayısına oranıdır.

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

F-Skor, eşit dağılmayan veri kümelerinde hatalı bir model seçimi yapmamak için doğruluk metriğinin yanı sıra tercih edilen bir metriktir ve kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$F - \text{Skor} = \frac{2 \times \text{Duyarlılık} \times \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (3)$$

Bulanık modelin üyelik fonksiyonlarının ve kuralların oluşturulmasının ardından modelin başarısı ölçülmüştür.

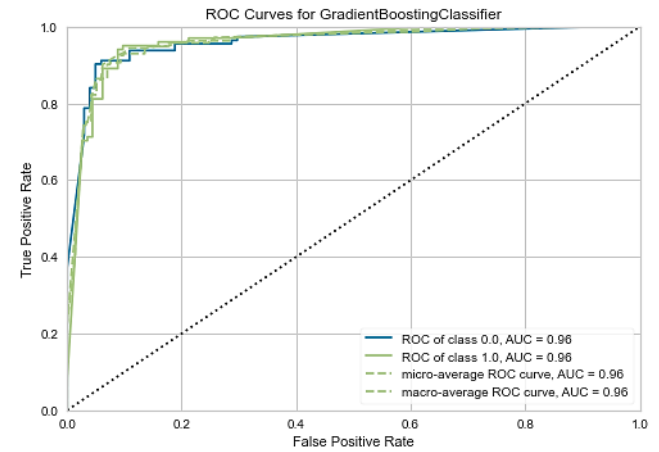
Yapılan ölçümlerin neticesinde bulanık model ile %94 doğruluk değeri elde edilmiştir.

Makine öğrenmesi modellerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5'de gösterilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde hepatit hastalık tespitinde en başarılı sonuç, %98.36 doğrulukla Gradient Boosting algoritması ile alınmıştır.

Bulanık mantık yöntemi ve makine öğrenmesi algoritmalarından elde edilen sonuçlara bakıldığında makine öğrenmesinin bulanık mantığa göre daha başarılı olduğu gözlenmektedir. Kullanılan makine öğrenmesi modelleri karşılaştırıldığında en başarılı sonucun, makine öğrenmesi algoritmalarından Gradient Boosting algoritması ile alındığı görülmektedir. Gradient Boosting algoritmasına ait karmaşıklık matrisi Şekil 3'de ve ROC eğrisi grafiği Şekil 4'de gösterilmiştir.

	Gerçek Değerler	
	Hasta Değil	Hasta
Hasta Değil	TN 98	FP 15
Hasta	FN 5	TP 96

Şekil 3. Gradient Boosting algoritmasına ait karmaşıklık matrisi.



Şekil 4. Gradient Boosting algoritmasına ait ROC-AUC grafiği.

Tablo 5. Sınıflandırma algoritmalarının başarı oranları.

Algoritma ve Hiperparametreleri	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skor	Çapraz Doğrulama (10)	ROC-AUC
Gradient Boosting (loss='log_loss', learning_rate=0.1, n_estimators=200, criterion='friedman_mse')	0.9836	0.9868	0.9895	0.9891	0.9824	0.9699
Random Forest (n_estimators=200, criterion='gini')	0.9703	0.9795	0.9885	0.9840	0.9698	0.9432
XGBoost (learning_rate=0.001, n_estimators=100, objective='binary:logistic')	0.9702	0.9773	0.9885	0.9829	0.9669	0.8660
SVM (C=1.0, kernel='rbf', degree=3, gamma='scale')	0.9682	0.9752	0.9908	0.9829	0.9618	0.8516
Decision Tree (criterion='gini', splitter='best')	0.9639	0.9838	0.9771	0.9804	0.9583	0.8885
MLP (hidden_layer_sizes=(200,), activation='sigmoid', solver='adam', batch_size='auto', learning_rate='constant', learning_rate_init=0.001, max_iter=200)	0.9626	0.9727	0.9794	0.9760	0.9555	0.9450
kNN (n_neighbors=3, weights='distance', algorithm='auto', leaf_size=30, metric='euclidean')	0.9588	0.9706	0.9839	0.9727	0.9576	0.8702
Bulanık Model (Mamdani)	0.9400	0.9689	0.9759	0.9723	0.9387	0.8342

## Sonuçlar

Bu çalışmada, hepatit hastalığının kan değerlerini kullanarak doğru tespit edilmesi için bulanık model ve makine öğrenmesi modellerinin geliştirilmesi ve çıkan sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan ve kan değerleri bilgilerinden oluşan veri seti, UCI Makine Öğrenmesi deposundan edinilmiştir. Veri seti ilk olarak ön işlemeden geçirilmiş ve hatalı/eksik veriler silinmiştir. Ardından bulanık model için üyelik fonksiyonları ile bulanık kurallar oluşturulmuş ve makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiştir. Son olarak hem bulanık modelin hem de makine öğrenmesi modellerinin başarı test edilmiş ve en iyi sonuç %98.36 doğruluk oranı Gradient Boosting algoritması ile elde edilmiştir. Ayrıca Gradient Boosting algoritmasıyla kesinlik, duyarlılık, f-skör ve roc-auc metriklerinden sırasıyla 98.68, 98.95, 98.91, 96.99 skorları elde edilmiştir. Gradient Boosting algoritması ile bulanık mantık yönteminden elde edilen sonuçlara bakıldığında Gradient Boosting algoritmasının daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Bu sonuç makine öğrenmesi modellerinin bulanık modellere göre hastalık tespiti problemlerinde daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan

yöntemlerle elde edilen başarı oranının literatürdeki diğer çalışmalara oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışma ile literatürdeki diğer çalışmaların detaylı kıyaslanması Tablo 6'da gösterilmiştir.

Bu çalışmada makine öğrenmesi modelleri ile bulanık modellerin hepatit hastalığının tespitinde kıyaslanması yapılmıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda makine öğrenmesi modellerinin bulanık modellere göre hepatit hastalığının tespitinde kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceği kanıtlanmıştır. Makine öğrenmesi modellerinin kendi içerisinde kıyaslanması sonucunda ise en başarılı makine öğrenmesi modelinin Gradient Boosting algoritması ile oluşturulan model olduğu gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda sistemin başarısı sinir ağları, bulanık mantık temelli sinir ağları ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak artırılabilir. Ayrıca sistem diğer hastalıkların teşhisinde kullanılmak üzere genişletilebilir.

Tablo 6. Veri ön işleme sonrası veri seti.

Çalışma - Yıl	Kullanılan Yöntem	Başarı Ölçüm Metriği	Başarı Oranı
[6] - 2009	ANFIS, LDA	Doğruluk	94.16
[7] - 2006	AIRS, FRAS, Çapraz Doğrulama (10)	Doğruluk	92.59
[8] - 2019	NIPALS, SOM	ROC	93.06
[9] - 2019	MMFIS	Doğruluk	92.20
[10] - 2019	ANFIS	Doğruluk	95.24
[11] - 2011	YSA, Levenberg-Marquardt, Çapraz Doğrulama (10)	Doğruluk	91.87
[12] - 2017	Relief, Rough Set, C4.5, Jackknife Çapraz Doğrulama	Doğruluk	92.59
[13] - 2013	Genetik Algoritma, ANFIS	Doğruluk	97.44
[14] - 2012	SVM, Benzetilmiş Tavlama, Çapraz Doğrulama (10)	Doğruluk	96.25
[15] - 2011	LSSVM, PCA	Doğruluk	95.00
[16] - 2011	SVM, LFDA	Doğruluk	96.77
[17] - 2013	ELM, Rough Set	Doğruluk	93.75
[18] - 2016	Tek Katmanlı İleri Beslemeli Sinir Ağı, ELM	Doğruluk	94.44
Bu çalışma	Bulanık Mantık, Makine Öğrenmesi, Çapraz Doğrulama (10)	Doğruluk	98.36

## 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 1 ve Yazar 2

-Çalışma konsepti ve tasarım

-Veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması

-Taslağın oluşturulması

## Kaynaklar

- [1] J. M. Ntaganda and M. Gahamanyi, "Fuzzy Logic Approach for Solving an Optimal Control Problem of an Uninfected Hepatitis B Virus Dynamics," *Applied Mathematics*, vol. 06, no. 09, Art. no. 09, 2015, doi: 10.4236/am.2015.69136.
- [2] P. A. Ejegwa and E. S. Modom, "Diagnosis of viral hepatitis using new distance measure of intuitionistic fuzzy sets," *Int J Fuzzy Math Arch*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [3] J. F. Perz, G. L. Armstrong, L. A. Farrington, Y. J. F. Hutin, and B. P. Bell, "The contributions of hepatitis B virus and hepatitis C virus infections to cirrhosis and primary liver cancer worldwide," *Journal of Hepatology*, vol. 45, no. 4, pp. 529–538, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.jhep.2006.05.013.
- [4] W. H. Organization, *Global hepatitis report 2017*. World Health Organization, 2017.
- [5] A. Sardesai, P. Sambarey, V. Kharat, and A. Deshpande, "Fuzzy logic application in gynecology: A

- case study," in 2014 International Conference on Informatics, Electronics Vision (ICIEV), May 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICIEV.2014.6850715.
- [6] E. Dogantekin, A. Dogantekin, and D. Avci, "Automatic hepatitis diagnosis system based on Linear Discriminant Analysis and Adaptive Network based on Fuzzy Inference System," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 8, pp. 11282–11286, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2009.03.021.
- [7] K. Polat and S. Güneş, "Hepatitis disease diagnosis using a new hybrid system based on feature selection (FS) and artificial immune recognition system with fuzzy resource allocation," *Digital Signal Processing*, vol. 16, no. 6, pp. 889–901, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.dsp.2006.07.005.
- [8] M. Nilashi, H. Ahmadi, L. Shahmoradi, O. Ibrahim, and E. Akbari, "A predictive method for hepatitis disease diagnosis using ensembles of neuro-fuzzy technique," *Journal of Infection and Public Health*, vol. 12, no. 1, pp. 13–20, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jiph.2018.09.009.
- [9] G. Ahmad, M. A. Khan, S. Abbas, A. Athar, B. S. Khan, and M. S. Aslam, "Automated Diagnosis of Hepatitis B Using Multilayer Mamdani Fuzzy Inference System," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2019, p. e6361318, Feb. 2019, doi: 10.1155/2019/6361318.
- [10] W. Ahmad et al., "Intelligent hepatitis diagnosis using adaptive neuro-fuzzy inference system and information gain method," *Soft Comput*, vol. 23, no. 21, pp. 10931–10938, Nov. 2019, doi: 10.1007/s00500-018-3643-6.
- [11] M. S. Bascil and F. Temurtas, "A Study on Hepatitis Disease Diagnosis Using Multilayer Neural Network with Levenberg Marquardt Training Algorithm," *J Med Syst*, vol. 35, no. 3, pp. 433–436, Jun. 2011, doi: 10.1007/s10916-009-9378-2.
- [12] X. Liu et al., "A Hybrid Classification System for Heart Disease Diagnosis Based on the RFRS Method," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2017, p. e8272091, Jan. 2017, doi: 10.1155/2017/8272091.
- [13] M. Adeli, N. Bigdeli, and K. Afshar, "New hybrid hepatitis diagnosis system based on Genetic algorithm and adaptive network fuzzy inference system," in 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), May 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599872.
- [14] J. S. Sartakhti, M. H. Zangoeei, and K. Mozafari, "Hepatitis disease diagnosis using a novel hybrid method based on support vector machine and simulated annealing (SVM-SA)," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 108, no. 2, pp. 570–579, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.cmpb.2011.08.003.
- [15] D. Çalışır and E. Dogantekin, "A new intelligent hepatitis diagnosis system: PCA–LSSVM," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 10705–10708, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2011.01.014.
- [16] H.-L. Chen, D.-Y. Liu, B. Yang, J. Liu, and G. Wang, "A new hybrid method based on local fisher discriminant analysis and support vector machines for hepatitis disease diagnosis," *Expert Systems with*

- Applications, vol. 38, no. 9, pp. 11796–11803, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2011.03.066.
- [17] Y. Kaya and M. Uyar, “A hybrid decision support system based on rough set and extreme learning machine for diagnosis of hepatitis disease,” *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 8, pp. 3429–3438, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.asoc.2013.03.008.
- [18] K. B. Nahato, K. H. Nehemiah, and A. Kannan, “Hybrid approach using fuzzy sets and extreme learning machine for classifying clinical datasets,” *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 2, pp. 1–11, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.imu.2016.01.001.
- [19] “UCI Machine Learning Repository: HCV data Data Set.” <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/HCV+data> (accessed Jun. 25, 2021).
- [20] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, “SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique,” *Jair*, vol. 16, pp. 321–357, Jun. 2002, doi: 10.1613/jair.953.
- [21] B. Russell, “Vagueness,” *The Australasian Journal of Psychology and Philosophy*, vol. 1, no. 2, pp. 84–92, 1923.
- [22] M. Black, “Vagueness: An exercise in logical analysis,” *Philosophy of Science*, vol. 4, no. 4, pp. 427–455, Oct. 1937, doi: 10.1086/286476.
- [23] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [24] C. Fuchs, S. Spolaor, M. S. Nobile, and U. Kaymak, “pyFUME: a Python Package for Fuzzy Model Estimation,” in *2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Jul. 2020, pp. 1–8. doi: 10.1109/FUZZ48607.2020.9177565.





# Anne Sağlığı Riski İçin Makine Öğrenmesi Modellerinin Performans Karşılaştırması

## Performance Comparison Of Machine Learning Models For Maternal Health Risk

Fatih Şahin<sup>1\*</sup>, Şeyma Karaca<sup>2</sup>, Gökalp Tulum<sup>3</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Topkapı Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, [fatihshahin@topkapi.edu.tr](mailto:fatihshahin@topkapi.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8036-3156>

<sup>2</sup> Üsküdar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, [seymakaraca1997@gmail.com](mailto:seymakaraca1997@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7790-7896>

<sup>3</sup> İstanbul Topkapı Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, [gokalptulum@topkapi.edu.tr](mailto:gokalptulum@topkapi.edu.tr)  
ORCID :<https://orcid.org/0000-0003-1906-0401>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 10 Temmuz 2023  
Revizyon 4 Ekim 2023  
Kabul 25 Ekim 2023  
Online 31 Aralık 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Anne Ölümleri, Anne Sağlığı Riski Tahmini, Makine Öğrenmesi, Sınıflandırma Algoritmaları Karşılaştırması, Yapay Zekâ

### ÖZ

Sağlık sektöründe hastalıkların teşhisi için yapay zekânın alt dallarından olan makine öğrenmesi oldukça yaygın kullanılmaktadır. Çalışmada anne sağlığı riski üzerine bir veri seti kullanılarak hamilelikte risk üzerine sınıflandırma çalışması yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada, makine öğrenmesi algoritmalarından lineer regresyon, destek vektör makineleri, karar ağacı algoritması, rastgele orman algoritması, çok katmanlı algılayıcı, naive bayes sınıflandırıcısı, k-en yakın komşu algoritması ve XGBoost sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Aynı zamanda her bir algoritma için temel bileşenler analizi (PCA) ve lineer diskriminant analizi (LDA) uygulanmış olup oluşturulan modellerin doğruluk oranlarına bakılarak tahminde bulunulmuştur. Yapılan tahmin sonucunda en yüksek doğruluk oranı %84 ile rastgele orman algoritmasından, PCA dönüşümü kullanılarak yapılan tahmin sonucuna göre en yüksek doğruluk oranı %82 ile rastgele orman algoritması ve K-en yakın komşu algoritmasından ve LDA dönüşümü kullanılarak yapılan tahmin sonucuna göre ise en yüksek doğruluk oranı %85 ile karar ağacı algoritması ve K-en yakın komşu algoritmasından elde edilmiştir. Sınıflandırma işleminde LDA dönüşümünün daha yüksek sonuç elde ettiği görülmektedir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 10 July 2023  
Received in revised form 4 October 2023  
Accepted 25 October 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Maternal Mortality, Maternal Health Risk Estimation, Machine Learning, Classification Algorithms Comparison, Artificial Intelligence)

Doi: 10.24012/dumf.1325431

\* Sorumlu Yazar

### ABSTRACT

Machine learning, one of the sub-branches of artificial intelligence, is widely used in the health science for the diagnosis of diseases. In this study, it was aimed to perform a classification study on risk in pregnancy using a data set on maternal health risk. In this study, linear regression, support vector machines, decision tree algorithm, random forest algorithm, multilayer perceptron, naive bayes classifier, k-nearest neighbor algorithm and XGBoost classifier were used as a classifier. At the same time, principal components analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA) were applied for each algorithm, and predictions were calculated as the accuracy of the models. As a result of the classification, the highest accuracy was 84% for the random forest algorithm. With PCA transform, the highest accuracy was calculated 82% for the random forest algorithm and K-nearest neighbor algorithm. The best accuracy for LDA transform was obtained 85% for decision tree algorithm and K-nearest neighbor algorithm. It is seen that the LDA transformation achieves higher accuracy for the classification process.



## Giriş

Her kadının dünyaya yeni bir hayat getirdiğinde hissettiği mutluluk paha biçilemezdir. Elbette bu sevinci yaşamak her annenin en doğal hakkıdır. Ancak bazı sebeplerden dolayı dünyada ki birçok kadın için bu durum korkutucu hale gelebilmektedir. Hamilelik sırasında annenin yaşadığı bazı problemler hem anne hem de bebeğin sağlığı için riskli durumlar oluşturabilir. Aniden ortaya çıkabilecek komplikasyonlar, şiddetli kanama riski, enfeksiyonlar veya artan kan basıncı gibi nedenler anne ve bebeğin ölümüne yol açabilecek etkenler olarak sıralanabilir. Anne ölümlerinin yaklaşık %94'ünün gelişmekte olan ülkelerde meydana geldiği görülmektedir ve bu ölümlerin neredeyse %75'i önlenemez ölümlerdir [1]. Anne ölümlerinin önüne geçilmesi açısından erken teşhis önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebepten dolayı teşhis yöntemlerinin de önemi büyüktür. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte teşhis yöntemleri de gelişmiş olup yapay zekâ bu yöntemlerden biri olmuştur. Yapay zekâ, hem büyük veri setleri ile rahatça çalışabildiği için hem de hızlı bir şekilde çözüm üretebildiği için son yıllarda çokça tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Makine öğrenmesi yapay zekânın alt dallarından biri olup veri setlerinin eğitilerek tahminlerde bulunulmasını sağlamaktadır.

Marzia Ahmed ve Mohammod Abul Kashem, yaptıkları çalışmada veri setinden anne sağlığı riskini tahminlemek için makine öğrenmesi yöntemlerinden karar ağacı, rastgele orman, destek vektör makineleri, sıralı minimum optimizasyon, lojistik regresyon, naive bayes sınıflandırıcısı, İbk ve lojistik model ağacı algoritmalarını kullanmışlardır. Öznitelik olarak hiper parametre ayarlama yöntemi olan GridSearchCV kullanarak en iyi sonucu %98.51 ile karar ağacı ile elde etmişlerdir [2]. Lokesh Pawar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada anne sağlığı riskini tahminlemek için makine öğrenmesi sınıflandırıcılarından karar ağacı, naive bayes sınıflandırıcısı, çok katmanlı algılayıcı, J48, lojistik model ağacı, rastgele orman, Rep ağacı ve bagging algoritmalarını kullanmışlardır. Gini indeksini kullanarak veri seti üzerinde özellik seçimi yapmışlardır ve en iyi sonucu %70.21 ile rastgele orman ile elde etmişlerdir [3]. Yu Mu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada makine öğrenmesi yöntemlerinden 5 seviye k-en yakın komşu ve karar ağacı algoritmalarını kullanmışlardır. 5 kat çapraz doğrulama ve eğitim doğrulama test veri kümelerinin oranını 3:1:1 yaparak en iyi sonucu %85 ile 5 seviye k-en yakın komşu ile elde etmişlerdir. Karar ağacından ise %79 sonucunu elde etmişlerdir [4]. Zahra Hoodboy ve arkadaşları yaptıkları çalışmada makine öğrenmesi yöntemlerinden destek vektör makinesi, k-en yakın komşu, XGBoost sınıflandırıcısı, AdaBoost sınıflandırıcısı, rastgele orman, lojistik regresyon, Gauss naive bayes sınıflandırıcı ve karar ağacı yöntemlerini kullanmışlardır. k-fold çapraz doğrulama ve sentetik azınlık aşırı örnekleme dengeleme tekniğini kullanarak en iyi sonucu %93 olarak XGBoost sınıflandırıcısı ile elde etmişlerdir [5]. Shuojia Wang ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada makine öğrenmesi yöntemlerinden lojistik regresyon, destek vektör makinesi, karar ağacı, naive bayes sınıflandırıcısı, XGBoost

sınıflandırıcısı ve rastgele orman yöntemlerini kullanmışlardır. 10 kat çapraz doğrulama ve çoklu doğrusalığı önlemek için değişkenlerin Pearson korelasyonunu test ederek en iyi sonucu %79 ile destek vektör makinesi ile elde etmişlerdir [6]. Prajina Edayath, yaptığı çalışmada makine öğrenmesi yöntemlerinden lojistik regresyon, naive bayes sınıflandırıcısı ve rastgele orman kullanmıştır. Alakasız özellikleri azaltmak için RFE yöntemini uygulayarak %62 ile uygulanan tüm yöntemlerin aynı sonucu verdiğini gözlemlemiştir [7]. Silas S. L. Pereira ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada makine öğrenmesi yöntemlerinden rastgele orman, destek vektör makinesi, çok katmanlı algılayıcı, AdaBoost sınıflandırıcısı, karar ağacı ve Gauss naive bayes sınıflandırıcısını kullanmışlardır. Çalışmada RFE yöntemini ve temel bileşen analizini (PCA) uygulayarak en iyi sonucu %98 ile rastgele orman ile elde etmişlerdir [8]. Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların listesi Tablo I'de verildiği gibidir.

Bu çalışmanın amacı; hamilelik esnasında ortaya çıkabilecek kanama veya enfeksiyon gibi risklerin basit tetkik ve ölçümlerden oluşturulabilecek verisetleri ve akıllı sınıflandırıcılar ile, bu komplikasyonlar yaşanmadan önce belirlenebilmesi için makine öğrenme yöntemlerinin performanslarının karşılaştırılmasıdır. Bu neden ile anne sağlığı riski ile literatürde var olan bir veri seti ve denetimli öğrenme yöntemleri olarak da bilinen sınıflandırıcılar kullanarak hamilelikte anne sağlığı riski üzerine bir tahminleme yapmaktır. Bunun yanı sıra çalışmada sınıflandırıcıların performanslarının karşılaştırması hedeflenmiştir. En iyi performansı veren yöntemlerin belirlenmesi, yapılan çalışmalar üzerinde doğru sonuçlar elde ederek hayatımıza yön veren durumlar için etki etmesi açısından önem arz etmektedir.

Anne sağlığı üzerine literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde dönüşüm algoritmaları olarak PCA ve LDA dönüşümü seçiminin çok tercih edilmediği söylenebilmektedir. Bu çalışmada PCA ve LDA dönüşümünün kullanımının modellerin performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülebilmektedir. Özellikle LDA dönüşümünün kullanımı en yüksek doğruluk oranını elde etmeye yardımcı olmuştur. Bu oran %85 ile karar ağacı ve K-en yakın komşu ile elde edilmiştir. Bu sebeple LDA dönüşümünün sınıflandırıcı yöntemleri ile birleştirilerek sınıflandırma başarılarının artırılacağı bu çalışma ile literatüre katkı olarak sunulmuştur..

Tablo 1. Literatür araştırması özet tablo

SAYI	YAYINLA YICI	VERİ SETİ	ALGORİTMA	ÖZNETELİK	SONUÇ
1	Marzia Ahmed ve Mohammad Abul Kashem, 2021	-Dakka'daki hastaneler ve doğum kliniklerinden elde edilen bir veri seti	-Karar ağacı -Rastgele orman -Destek vektör makineleri -Sıralı minimum optimizasyon -Lojistik regresyon -Naive bayes sınıflandırıcısı -Ibk algoritması -Lojistik model ağacı	-GridSearchCV yöntemi -Ki-kare testi -Bilgi kazanımı -Kazanç oranı -15 çapraz katlama doğrulaması	-%98.51 ile Karar ağacı en iyi sonucu vermiştir.
2	Lokesh Pawar ve Arkadaşları, 2022	-Bangladeş' deki hastaneler ve doğum kliniklerinden elde edilen toplam 1014 veri	-Karar ağacı -Naive bayes sınıflandırıcısı -Çok katmanlı algılayıcı -J48 -Lojistik model ağacı -Rastgele orman -REP ağacı -Bagging algoritması	-Gini indeksini ile özellik seçimi -k-kat çapraz doğrulamaya dayanan Robust Modeli -%70 eğitim %30 test ve %60 eğitim %40 test olarak iki senaryo	-%70.21 ile Rastgele orman en iyi sonucu vermiştir.
3	Yu Mu ve Arkadaşları, 2018	-75542 çiftin çok boyutlu gebelik öncesi sağlık verileri	-5 layer k-en yakın komşu -Karar ağacı	-5 kat çapraz doğrulama -Eğitim doğrulama test veri kümelerinin oranı 3:1:1'dir.	-%85 ile 5-layer k-en yakın komşu en iyi sonucu vermiştir.
4	Zahra Hoodbhoy ve Arkadaşları, 2019	-California Üniversitesi Irvine Machine Learning Repository'den elde edilen gebeliğin üçüncü trimesterinde olan 2126 gebe kadından oluşa veri seti	-Destek vektör makinesi -K-en yakın komşu -XGBoost sınıflandırıcı -AdaBoost sınıflandırıcı -Rastgele orman -Lojistik regresyon -Gauss Naive bayes sınıflandırıcısı -Karar ağacı	-K-Fold Çapraz Doğrulama -Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Dengeleme Tekniği (SMOTE)	-%93 ile XGBoost sınıflandırıcı en iyi sonucu vermiştir.
5	Shuojia Wang ve Arkadaşları, 2019	-2015 – 2017 yılları arasında Weill Cornell Medicine ve NewYork Presbyterian Hospital'den alınan veri seti	-Lojistik regresyon -Destek vektör makinesi -Karar ağacı -Naive bayes sınıflandırıcısı -XGBoost sınıflandırıcı -Rastgele orman	-10 kat çapraz doğrulama -Doğrusallığı önlemek için Pearson korelasyonu	-%79 ile destek vektör makinesi en iyi sonucu vermiştir.
6	Prajina Edayath ve Arkadaşları, 2022	-NIH All of Us'un elektronik sağlık kayıtlarında hamile kadınlardan alınan veriler	-Lojistik regresyon -Naive Bayes sınıflandırıcısı -Rastgele orman	-RFE yöntemi -Boyutsallık indirgemesi -Veri seti 60'a 40 olarak ayrılmış	-%62 ile bütün aynı sonucu vermiştir.
7	Silas S. L. Pereira ve arkadaşları	-Anonimleş tirilmiş bir veri seti	-Rastgele orman -Destek vektör makinesi -Çok katmanlı algılayıcı -AdaBoost sınıflandırıcısı -Karar ağacı -Gauss Naive bayes sınıflandırıcı	-RFE yöntemi -Temel Bileşen Analizi (PCA)	-%98 ile rastgele orman en iyi sonucu vermiştir.

## Materyal ve Metot

### Veri Setinin Elde Edilmesi

Çalışmada Marzia Ahmed isimli araştırmacının sunduğu The UCI (University of California, Irvine) Machine Learning Repository web sitesinden alınan “Maternal Health Risk Dataset” [9] adlı veri seti kullanılmıştır. Veriler, Baglades’in kırsal bölgelerinden IoT tabanlı risk izleme sistemi aracılığıyla farklı hastanelerden, toplum kliniklerinden ve anne sağlığı hizmetlerinden toplanmıştır. Veri seti 1014 örnek ve 7 öznitelikten oluşmaktadır. Veri setinde üç etiket bulunmaktadır. Bunlar yüksek risk, düşük risk ve orta risk şeklindedir. Tablo 2’de, veri setinde kullanılan öznitelikler ve açıklamaları gösterilmiştir.

Tablo 2. Öznitelik tablosu

Sıra No	Öznitelik	Açıklama	Değer
1	Age (Yaş)	Annenin hamilelik yaşını belirtir.	Nümerik
2	SistolikBP (Büyük Tansiyon)	Kan basıncının (tansiyon) mmHg cinsinden üst değerini belirtir.	Nümerik
3	DiastolikBP (Küçük Tansiyon)	Kan basıncının (tansiyon) mmHg cinsinden alt değerini belirtir.	Nümerik
4	BS (Kan Şekeri)	Kan şekeri seviyelerini molar konsantrasyon (mmol/L) cinsinden belirtir.	Nümerik
5	HeartRate (Kalp Atımı)	Dakikadaki atış cinsinden normal dinlenme kalp atış hızı.	Nümerik
6	BodyTemp (Vücut Sıcaklığı)	Anne vücut sıcaklığını belirtir. Fahrenheit cinsinden verilmiştir.	Nümerik
7	Risk Level (Risk Düzeyi)	Önceki özellikleri dikkate alınarak gebelik sırasında öngörülen risk yoğunluğu düzeyi	Kategorik

### Öznitelik Seçimi

Makine öğrenmesi yöntemlerini etkin bir şekilde kullanabilmek için ön verilerin işlenmesi esastır. Öznitelik seçimi, veri ön analizinde en sık kullanılan ve önemli tekniklerden biridir [10]. Bu çalışmada dönüşüm olarak Temel Bileşenler Analizi ve Doğrusal Diskriminant Analizi kullanılmıştır. PCA veri kümelerinin boyutunu azaltarak yorumlanabilirliği arttırmak ve aynı zamanda bilgi kaybını en aza indirmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Varyansı art arda maksimize eden yeni ilintisiz değişkenler oluşturarak bilgi kaybını en aza indirir. LDA veri setindeki

değişkenlerin iki veya daha fazla gerçek gruba ayrılmasını sağlamak için kullanılan analizdir. Bu yöntemi kullanarak, p özelliği bilinen birimleri gerçek gruplarına optimal düzeyde atayacak fonksiyonlar bulunabilir [11]. Çalışmada PCA ve LDA dönüşümleri kullanılarak sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır.

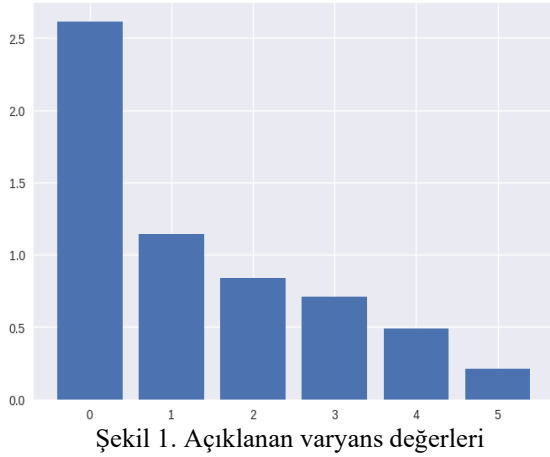
### Sınıflandırıcıların Uygulanması

Çalışmada denetimli öğrenme sınıflandırıcılarından lineer regresyon, destek vektör makineleri, karar ağacı, rastgele orman, çok katmanlı algılayıcı, naive bayes sınıflandırıcısı, k-en yakın komşu ve XGBoost sınıflandırıcısı kullanılmıştır ve aşağıda tanımlamaları verilmiştir.

Lineer regresyon, x ve y değişkenleri arasındaki ilişkinin doğrusal bir şekilde yayıldığı istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemde giriş verisi bağımsız x değişkeni ve çıkış verisi ise x'e bağımlı bir y değişkeni olarak adlandırılır. Yalnızca bir x değişkenine bağlı olan y değişkeni, bağımlı değişken olarak bilinir [12]. Destek vektör makineleri, sınıflandırma ve regresyon analizi yapabilen denetimli öğrenme modellerinden biridir. Eğitim veri setindeki her öge, bir vektörün bir tarafında veya diğer tarafında işaretlenir. Eğitim, yeni bir örnek için iki sınıftan birini belirleyen bir model oluşturur. Bu sınıflandırıcının temel amacı ikili bir doğrusal sınıf oluşturmaktır [13]. Karar ağacı, bir kök düğümü ve her biri bir girdi alan iç düğümlerden oluşan yönlü bir ağaçtır. İç düğümler, girdi özelliklerine göre veriyi bölme kararlarını alır. Test düğümleri, çıktıları bir başka düğüme girdi olarak alan ve belirli bir kurala göre veriyi sınıflandıran veya tahmin eden düğümlerdir. Yaprak düğümleri ise sonuç çıktıları veren ve başka bir düğüme bağlı olmayan düğümlerdir [14]. Rastgele Orman bir ağaç oluştururken her düğümde tüm değişkenler arasından en iyi dalı kullanmak yerine, o düğüm için rastgele bir alt küme seçerek en iyi dala göre dallara ayırma işlemini gerçekleştirir. Bu şekilde, her ağaç farklı bir alt küme ile oluşturulur ve sonuçta oluşturulan tüm ağaçların tahminleri birleştirilerek sınıflandırma yapılır [14]. Çok katmanlı algılayıcılar üç farklı katmandan oluşmaktadır. Bunlar, gelen bilgilerin öğrenme işlemi için kullanıldığı ve gizli katmana iletildiği girdi katmanı, öğrenme işleminin gerçekleştirildiği bir veya birden çok gizli katman ve bilgi çıkışının sağlandığı çıkış katmanıdır. Bu katmanlar ileri beslemeli-geri yayımlı algoritmaların etkili bir şekilde kullanılmasına olanak tanır [15]. Naive Bayes Sınıflandırıcı, veri setindeki verilerin sınıflandırılmasını olasılık hesapları yardımıyla gerçekleştirir. Her bir veri elemanı için ayrı ayrı tüm olasılıkları hesaplar ve en yüksek olasılık değerine sahip sınıfa göre sınıflandırma yapar [16]. K-En Yakın Komşu, bir verinin kendisine en yakın komşularının kimliğini kullanarak sınıflandırma veya regresyon yapar. K, komşu sayısını belirten bir parametredir ve doğru bir sınıflandırma için doğru K değerinin seçilmesi önemlidir [17]. XGBoost sınıflandırıcısı, ağaç güçlendirme mantığına dayanmaktadır. Hızlı işlem yeteneği ve yüksek performansı nedeniyle yüksek başarımda sonuçlar veren bir makine öğrenmesi yöntemidir [18].

Uygulamada bütün sınıflandırma işlemleri için Google Colaboratory [19] üzerinden Python [20] kodları kullanılmıştır. Veri seti eğitim ile test olmak üzere tüm modeller için %75'e %25 olarak ayrılmıştır ve her zaman aynı ayrımı yapması için verisetindeki eğitim ve test verileri sabit tutulmuştur. Daha sonra min-max standardizasyon işlemi uygulanmıştır. Eğitim ve test veri setleri standardize edildikten sonra, denetimli öğrenme sınıflandırıcıları kullanılmıştır.

Veri setine uygulanacak olan dönüşümler uygulanmadan önce boyut sayısı belirleme işlemi yapılmıştır. Temel bileşenler analizi için açıklanan varyans değerlerine bakılarak boyut sayısı 2 olarak belirlenmiş ve LDA dönüşümü için de aynı değer kullanılmıştır. Şekil 1'de en yüksek varyans değerine sahip ilk 5 öznelik gösterilmiştir. PCA ve LDA dönüşümleri tarafından dönüştürülen veri setinde; eğitim veri seti 760 satır ve 2 sütun, test veri seti de 254 satır ve 2 sütundan oluşmaktadır. Uygulamada önce dönüşümsüz model performansları belirlenmiş daha sonra PCA ve LDA dönüşümleriyle elde edilen model performansları belirlenerek karşılaştırma yapılmıştır.



## Sonuçlar

Çalışmada, her bir yöntem için önce dönüşüm yapılmadan doğruluk oranına daha sonra da PCA ve LDA dönüşümü uygulanarak doğruluk oranları hesaplanmıştır. Kullanılan yöntemlerde optimum hiperparametreler deneysel olarak belirlenmiş ve sınıflandırıcıların başarıları karşılaştırılmıştır.

Anne sağlığı riski veri setine; lineer regresyon (LR) uygulandığında, doğruluk oranı %62 olarak elde edilmiştir. PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %60 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %61 olarak elde edilmiştir. Destek vektör makineleri (DVM) uygulandığında, kernel fonksiyonu olarak rbf modeli ile  $\gamma = 31$ ,  $C = 9$  değerleri seçildiğinde en iyi doğruluk oranı %78 olarak bulunmuştur. Aynı parametreler ile PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %77 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %77 olarak elde edilmiştir. Karar ağacı (KA) uygulandığında, "gini" parametresi kullanılarak en iyi doğruluk oranı %79 olarak bulunmuştur. Aynı parametre ile PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %81 olarak

bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %85 olarak elde edilmiştir. Rastgele orman (RO) uygulandığında, ağaç sayısı 31 seçilerek en iyi doğruluk oranı %84 olarak bulunmuştur. Aynı parametre ile PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %82 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %84 olarak elde edilmiştir. Çok katmanlı algılayıcılar (ÇKA) uygulandığında, 3 tane gizli katman ile aktivasyon fonksiyonu "relu" ve ağırlık optimizasyonu "adam" seçildiğinde doğruluk oranı %78 olarak bulunmuştur. Aynı parametreler ile PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %67 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %72 olarak elde edilmiştir. Naive Bayes (NB) sınıflandırıcısı uygulandığında, doğruluk oranı %62 olarak elde edilmiştir. PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %55 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %64 olarak elde edilmiştir. K-en yakın komşu (KNN) uygulandığında,  $k=1$  seçildiğinde en iyi doğruluk oranı %76 olarak bulunmuştur. Aynı parametre ile PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %82 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %85 olarak elde edilmiştir. XGBoost (XGB) sınıflandırıcı uygulandığında, değerlendirme ölçütü olarak "mlogloss" seçildiğinde en iyi doğruluk oranı %78 olarak bulunmuştur. Aynı parametre ile PCA dönüşümü kullanıldığında doğruluk oranı %67 olarak bulunmuştur. LDA dönüşümü kullanıldığında ise doğruluk oranı %72 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verildiği gibidir.

Tablo 3. Sınıflandırıcıların test veri seti doğruluk oranları

Model	Doğruluk	Doğruluk (PCA)	Doğruluk (LDA)
LR	%62	%60	%61
DVM	%78	%77	%77
KA	%79	%81	<b>%85</b>
RO	<b>%84</b>	<b>%82</b>	%84
ÇKA	%78	%67	%72
NB	%62	%55	%64
KNN	%76	<b>%82</b>	<b>%85</b>
XGB	%78	%67	%72

Çalışmada kullanılan sınıflandırıcılar arasında uygulanan t-testi sonuçlarında p değeri 0.05'den küçük hesaplanmıştır. Bu sınıflandırıcıların doğruluk oranlarının birbirleri ile arasında istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir ( $p < 0,05$ ).

## Tartışma ve Öneriler

Sınıflandırıcıların performansları incelendiğinde, rastgele orman %84 ile en yüksek doğruluk oranına sahip olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışma yapan Lokesh Pawar ve

arkadaşları [3] en iyi sonucu %70.21 ile rastgele orman ile elde etmişlerdir. Aynı veri seti ile çalışma yapan Marzia Ahmed ve Mohammad Abul Kashem [2] ise en iyi sonucu %98.51 ile karar ağacı ile elde etmişlerdir. Aynı veri setine aynı sınıflandırıcılar uygulandığında elde edilen sonuçların farklı olmasının en önemli nedeni eğitim ve test verilerinin bölünmesinde farklı yöntemlerin kullanılmış olmasıdır.

Sınıflandırıcıların test veri seti doğruluk oranlarına bakıldığında destek vektör makinesinin en yüksek %78 oranını verdiği görülmektedir. Shuojia Wang ve arkadaşları [6] en yüksek doğruluk oranını %79 ile destek vektör makinesi ile elde etmişlerdir.

PCA dönüşümü kullanılarak yapılan tahminleme sonuçlarına göre en yüksek doğruluk oranının %82 ile rastgele orman ve K-en yakın komşu olduğu görülmektedir. Aynı dönüşümü kullanarak çalışma yapan Silas S. L. Pereira ve arkadaşları [8] en yüksek doğruluk oranını %98 ile rastgele orman ile elde etmişlerdir. Burada öznelik seçimi sonrasında elde edilen öznelik sayıları sınıflandırma başarısını etkileyen faktörlerin başında gelmektedir.

LDA dönüşümü kullanılarak yapılan tahminleme sonuçlarına göre ise en yüksek doğruluk oranının %85 ile karar ağacı ve K-en yakın komşu ile elde edildiği görülmektedir. Yu Mu ve arkadaşları [4] yaptıkları çalışmada en iyi sonucu %85 ile K-en yakın komşu ile elde etmişlerdir. Zahra Hoodboy ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmada en iyi sonucu %93 olarak XGBoost sınıflandırıcısından elde etmişlerdir. Bu çalışma için doğruluk oranlarına bakıldığında ise XGBoost sınıflandırıcısının en yüksek %78 oranını verdiği görülmektedir.

Çalışmada test veri seti doğruluk oranlarına göre lojistik regresyon %62 ile en düşük doğruluk değerini vermiştir.

## Kaynakça

- [1] Demir Yıldırım, A. ve Hotun Şahin, N. (2022) Anne Ölümünün Önlenmesi: Uluslararası Bakım ve İzlem Modelleri, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Ebelik Bölümü, Jinekoloji – Obstetrik Neonatoloji Tıp Dergisi, 19(1), DOI: 10.38136/jgon.842685.
- [2] Ahmed M. ve Kashem M. A. (2020) IoT Based Risk Level Prediction Model For Maternal Health Care In The Context Of Bangladesh, 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI), (19.12.2020-20.12.2020)
- [3] Pawar, L., Arora, D., Malhotra, J., Vaidya, D., Sharma, A. (2022) A Robust Machine Learning Predictive Model for Maternal Health Risk, Proceedings of the Third International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems, ISBN: 978-1-6654-7971-4, DOI: 10.1109/ICESC54411.2022.9885515.
- [4] Mu Y., Feng K., Yang Y. ve Wang J. (2018) Applying Deep Learning for Adverse Pregnancy Outcome Detection With Pre-pregnancy Health Data, MATEC

Prajina Edayath ve arkadaşları [7] lojistik regresyon ile %62 oranında bir doğruluk sağlamışlardır. Bu çalışmaya ve benzer veri setleri kullanılarak daha önce yapılmış çalışmalara bakıldığında doğruluk oranları göz önüne alınırsa rastgele orman, karar ağacı ve k-en yakın komşu yöntemlerinin yüksek performanslar elde edildiği görülmektedir. Bu durum benzer veri setleri kullanılarak gelecekte yapılması hedeflenen çalışmalara yön gösterebilmektedir. Doğru sınıflandırıcı seçimi, doğru performans değerleri elde ettiğinden çalışmaların amacına uygun kullanımlara hazır hale gelebilmesi açısından önem arz etmektedir.

PCA ve LDA gibi dönüşüm yöntemleri ile öznelik boyutu indirgeme işlemlerinde, varyansın maksimize edilmesine odaklanıldığı için bazı durumlarda orijinal veri seti üzerindeki ayırt edici bilgilerin kaybolması olası durumlardandır. Bu durumu etkileyen önemli faktörlerden biri PCA ve LDA'nın veri dağılımının varsayımlarına dayalı olarak çalışmasıdır. Bu durum öznelik indirgeme işlemleri sonucunda sınıflandırma performansında iyileşmenin minimum değerlerde olmasına neden olabilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada öznelik indirgeme işlemleri olarak kullanılan LDA ve PCA ile elde edilmiş veri setleri için elde edilen sınıflandırma performansı ile orijinal veri seti ile gerçekleştirilmiş sınıflandırma performanslarının yakın sonuçlar vermesinin nedeni olarak açıklanabilir.

Anne sağlığı riski veri seti kullanılarak yapılan çalışmada elde edilen modeller üzerinden daha güncel bir veri seti kullanılarak doğruluk tahminleri yapılabilir. Aynı zamanda birden fazla veri seti birleştirilerek hibrit bir çalışma denenebilir. Bu çalışmada LDA dönüşümü fayda sağlamıştır fakat daha farklı öznelikler de kullanılarak en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılabilir. Daha farklı sınıflandırıcıların kullanımı da en iyi modeli bulmada etkili olabilmektedir.

Web of Conferences 189, 10014.

- [5] Hoodbhoy Z., Noman M., Shafique A., Nasim A., Chowdhury D. ve Hasan B. (2019) Use of Machine Learning Algorithms for Prediction of Fetal Risk using Cardiotocographic Data, International Journal of Applied and Basic Medical Research, The Aga Khan University, Department of Paediatrics and Child Health, Department of Artificial Intelligence, 9:226-30.
- [6] Wang S., Pathak J. ve Zhang Y. (2019) Using Electronic Health Records and Machine Learning to Predict Postpartum Depression, Cornell University, International Medical Informatics Association (IMIA) and IOS Press, doi:10.3233/SHTI190351
- [7] Edayath P. (2022) Analysis Of Factors Affecting Maternal Health Using Data Mining Techniques, Master Thesis, Master's Program in Industrial Engineering, University of Texas at El Paso.
- [8] Pereira S. L. S., Filho R. V. C., Ramos R., Oliveira M., Moreira M. W. L., Rodrigues J. J. P. C. ve Solic P. (2020) Improving Maternal Risk Analysis in Public

- Health Systems, 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), (23-26. 09. 2020).
- [9] Ahmed M. (2020) "Maternal Health Risk Data Set" UCI Repository of Machine Learning Databases, University of California, Irvine. Erişim adresi: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Maternal+Health+Risk+Data+Set>
- [10] Ertuğrul S. (2022) Öznitelik Seçimi ve Makine Öğrenimi Kullanılarak Enerji İletim, Kontrol ve Yönetim Sistemlerinde Siber Güvenlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Arel Üniversitesi.
- [11] Saeed M. T. M. (2022) Temel Bileşenler Analizi ve Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Turbofan Motorunun Kalan Faydalı Ömür Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi.
- [12] Doğan G. (2022) Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Betonarme Kirişlerin Burulma Momenti Tahmini, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 9(2); 912-924.
- [13] Batı F. (2020) Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Algoritmaları Kullanılarak Meme Kanseri Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Aydın Üniversitesi.
- [14] Özgür E. (2022) Lenf Kanseri Görüntülerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.
- [15] Kaya M. S. ve İnce K. (2021) Nesnelerin İnternetinde Çok Katmanlı Algılayıcı Kullanarak Zamanlama Analizi Saldırısı ile Özel Anahtar Tahminlemesi, Bilgisayar Bilimleri Dergisi, İnönü Üniversitesi, 385-390.
- [16] Görgün M. (2020) Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Kalp Hastalığının Teşhis Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Aydın Üniversitesi.
- [17] Keskinbıçak F. (2023) Makine Öğrenmesi İle Nohutta Verim ve Tür Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Harran Üniversitesi.
- [18] Azizoğlu F. (2023) Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Kalp Hastalıklarının Sağkalım Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.
- [19] Google (2017). [<https://globalaihub.com/google-colab-nedir-ve-nasil-kullanilir/>], Erişim tarihi: 09.02.2023
- [20] Rossum G (1990). [<https://tr.wikipedia.org/wiki/Python#>], Erişim tarihi: 09.02.2023.
- [21] Kılınç D., Borandağ E., Yücalar F., Tunali V., Şimşek M. ve Özçift A. (2016) KNN Algoritması ve R Dili ile Metin Madenciliği Kullanılarak Bilimsel Makale Tasnifi, Marmara Fen Bilimleri Dergisi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Celal Bayar Üniversitesi, 3:89-94.
- [22] Gürsoy G. (2022) Makine Öğrenmesi Algoritmaları İle Kalp Hastalığı Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Maltepe Üniversitesi.
- [23] Korkmaz A. ve Büyükgöze S. (2019) Sahte Web Sitelerinin Sınıflandırma Algoritmaları İle Tespit Edilmesi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, 16:826-833.
- [24] Durak M. N. (2017) Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Yöntemleri İle Meme Kanserinin Erken Teşhisi, Yüksek Lisans Tezi, İstatistik Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi.



## Prediction of POMA-G Score from Spatiotemporal Gait Parameters

İrfan KÖSESOY<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Kocaeli University, Software Engineering Department, irfan.kosesoy@kocaeli.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-5219-5397

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 12 July 2023  
Received in revised form 26 October 2023  
Accepted 2 November 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Machine Learning, POMA-G  
Prediction, Reliability Analysis,  
Tinetti Mobility Test

Doi: 10.24012/dumf.1326557

\* Corresponding author

### ABSTRACT

The Performance-Oriented Mobility Assessment (POMA) test is a commonly used evaluation tool in rehabilitation and physical therapy to assess an individual's mobility and functional movements. It helps identify areas for improvement by assessing the ability to perform various activities. Experts who are trained in using the POMA test conduct the evaluation, but the results may vary depending on the evaluator. Different evaluators may have different approaches, and even the same evaluator's assessment may differ over time. These variations can affect the reliability of the POMA score. In contrast, gait analysis provides an objective and more reliable way to assess mobility.

In this study, the goal was to predict the gait measurements obtained from the gait portion of the POMA test (POMA-G) using objective spatiotemporal gait parameters. The dataset used for analysis included gait parameters from 44 older adults. The POMA-G scores were rated by two physiotherapists, one of whom was an expert while the other had less experience but was familiar with the test. The study focused on the performance of machine learning based models, including Sequential Minimal Optimization (SMO), K-nearest neighbor (KNN), and Random Forest (RF), in predicting POMA-G scores. The models were trained with selected gait parameters. Results indicated that SMO exhibited the highest R-squared ( $R^2$ ) values of 0.5676, reflecting its superior predictive capabilities. Moreover, the Intra-class Correlation Coefficients (ICCs) for SMO and RF were found to be 0.859 and 0.891, highlighting their exceptional reliability in mobility assessments. The study also examined the reliability of the physiotherapists' assessments and proposed prediction models.

### Introduction

The Performance-Oriented Mobility Assessment (POMA) test is a component of the Tinetti Mobility Test (TMT) and is commonly used in rehabilitation and physical therapy to evaluate an individual's functional movements and activities [1]. It assesses mobility and helps identify areas for improvement. POMA involves various functional tasks, such as walking, climbing stairs, standing on one leg, and reaching for objects [2]. These tests provide valuable information to healthcare professionals for developing personalized treatment plans, tracking progress over time, and assessing the effectiveness of interventions [3]. The scoring criteria for each POMA test may vary, and results are interpreted by healthcare professionals with expertise in mobility impairments [4].

Gait analysis is utilized in biomechanics and physical therapy to study human body movement during walking [5]. It involves using tools and techniques like video cameras, motion capture systems, and specialized software to collect data on gait patterns [6], [7]. Gait analysis provides a detailed picture of joint angles, muscle activity, and other parameters, allowing identification of deviations from a normal gait pattern [8]–[10]. It is particularly useful for individuals with conditions like cerebral palsy or

Parkinson's disease, where gait abnormalities can impact mobility [11], [12]. By analyzing these deviations, healthcare professionals can develop personalized treatment plans to improve gait and mobility. Spatiotemporal gait parameters, which include measurements like stride length and cadence, are important for analyzing gait patterns and guiding interventions [13].

POMA evaluations are typically conducted by trained experts to assess mobility and balance. However, the variability in evaluation approaches and individual differences among experts may lead to variations in POMA scores, affecting reliability. In contrast, gait analysis employs objective measurement devices to assess gait parameters, providing more reliable results.

The objective of this study is to predict gait measurements obtained in the POMA test (POMA-G) using objectively obtained spatiotemporal gait parameters. A dataset from [1] is utilized, including gait parameters from 44 older adults (37 women and 7 men) with an average age of 69.98 years. Participants' gait is recorded using three cameras as they walk in a straight line [14]. POMA-G scores are rated by two physiotherapists, one with extensive experience administering the test daily for the past five years and the other familiar with the test but administering it only once a



year. The physiotherapists evaluate participant videos twice, with a week-long interval between viewings.

It is proposed in this study to integrate machine learning algorithms including Sequential Minimal Optimization (SMO), K-nearest neighbor (KNN), and Random Forest (RF), to predict POMA-G scores. These algorithms serve as the predictive models, with the ultimate goal of enhancing the accuracy and objectivity of mobility assessments. Two feature selection methods, Relief and Correlation-based Feature Selection, are applied to the dataset to enhance the predictive performance of these machine learning models [15]. In addition to predicting POMA-G scores, this study also assesses the reliability of expert assessment and the proposed prediction models.

The following enumeration summarizes the contributions made by this study to the field.

- The study hints at the possibility of automating mobility assessments by leveraging objective data from gait analysis. This contribution points to a future where assessments can be more objective and less prone to subjectivity.
- The research pioneers the application of predictive models to advance the field of mobility assessment. By using machine learning algorithms to predict POMA-G scores from spatiotemporal gait parameters, it introduces a novel and promising approach to evaluating an individual's functional movements and activities.
- The study contributes to the field of rehabilitation and physical therapy by demonstrating the feasibility of predicting POMA-G scores, which evaluate an individual's functional movements and activities, based on spatiotemporal gait parameters obtained from gait analysis.
- The research evaluates the reliability of prediction models by comparing ratings given by expert and amateur physiotherapists. This contribution highlights the importance of assessing the consistency of human evaluators.

The remainder of the paper is organized as follows:

In the second section, the materials and methods are elaborated. The third section presents the results and findings obtained from the study. In the fourth section, a comprehensive discussion of the results is provided. The paper concludes in the fifth section, summarizing the key insights and implications drawn from this research.

**Materials and Methods**

In this section, we provide an overview of the methods and data that were used in the experimental studies. The dataset utilized in these experiments is described in detail below. In order to estimate POMA-G score values, three different machine learning algorithms were employed: SMO, KNN, and RF. Additionally, various feature selection techniques were applied to enhance prediction accuracy. Specifically, these methods were used to identify and select the most relevant features from the dataset, which were then incorporated into the model training process.

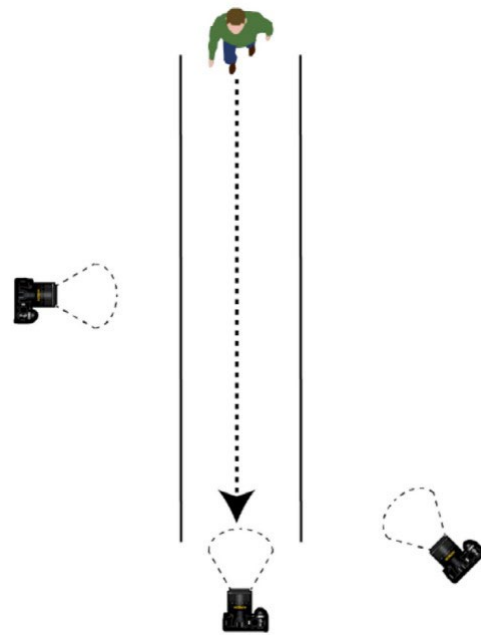


Figure 1. The location of the cameras that were used to record the movements of the participants during the optoelectronic motion-capture trials[1].

Table 1. Spatiotemporal gait parameters provided in the dataset.

Gait Parameters		
Left Cadence	Right Cadence	
Left Foot Off	Right Foot Off	
Left Walking Speed	Right Walking Speed	
Left Single Support	Right Single Support	
Left Stride Time	Right Stride Time	
Left Double Support	Right Double Support	
Left Step Time	Right Step Time	
Left Stride Length	Right Stride Length	
Left Opposite Foot Off	Right Opposite Foot Off	
Left Step Length	Right Step Length	
Left Opposite Foot Contact	Right Opposite Foot Contact	
Left Step Width	Right Step Width	
Left Limp Index	Right Limp Index	
Gait Duration After Data Crop		

**Dataset**

In this study, the dataset provided by [1] is used in the experiments. The study presents a dataset of five parts that focuses on the gait analysis of healthy older adults (37 women and seven men; the average age of 69.98 years,



average body mass index of 27.71). Spatiotemporal gait parameters were collected using a Vicon motion analysis system operating at 100 Hz. The optical motion capture system consisted of seven Vantage V5 cameras arranged in a rectangular area measuring 15 meters in length and 6 meters in width. The cameras were mounted on tripods at a height of 1.90 meters above the floor and were configured to sample at a rate of 100 Hz. In addition to the optical motion capture system, three RGB cameras were placed as shown in Figure 1 to capture video footage of the participants walking while wearing reflective markers.

Both the Vicon system and the RGB cameras recorded the participants' movements simultaneously. Spatiotemporal gait parameters obtained from the optical motion capture system are presented in Table 1.

Physiotherapists administered the Short Physical Performance Battery (SPPB) [13], Gait component of the Performance Oriented Mobility Assessment (POMA-G) [2], and the Mini-Mental State Examination (MMSE) [14] tests to 44 participants. Two physiotherapists independently evaluated videos of the test subjects. One of the physiotherapists was an expert who had administered the test daily for the past five years, while the other was familiar with the test but had only administered it once a year. Both physiotherapists evaluated the videos twice, with a week in between each evaluation.

To sum up in the dataset, the records were obtained from 44 adult individuals during five separate sessions, and from each of these records, 27 gait parameters as provided in Table 1 were extracted, resulting in a dataset of dimensions ( $44 \times 5 \times 27$ ). One of these records was used for training the models, while the remaining were utilized for testing the trained models and conducting the reliability analyses. Additionally, POMA-G scores, collected from both expert and amateur physiotherapists during two sessions ( $44 \times 2 \times 2$ ) for each adult individual, are also provided in the dataset.

#### *i) Prediction Methods*

SMO, KNN, and RF methods have been used to predict POMA-G scores.

**Sequential Minimal Optimization (SMO)** is an algorithm for training Support Vector Machines (SVM). It works by breaking down the larger problem of training an SVM into smaller sub-problems that are easier to solve [16]. As in this study, it is common to utilize SVMs to train models for regression problems in order to predict continuous output values. SMO works by breaking down the problem of training an SVM into a series of smaller sub-problems. These sub-problems are easier to solve than the original problem, and they can be solved iteratively. The overall goal of SMO is to find the values of the SVM's parameters (alpha) that will result in the best possible model. To do this first selects two alpha values to optimize, then solve for the optimal values of these alpha values using a method called quadratic programming. Once these values have been found, the algorithm moves on to the next pair of alpha values and repeats the process. This continues until all of the alpha values have been optimized, resulting in a trained

SVM model. In experimental studies, the model has been trained using a polynomial kernel function.

**K-nearest neighbors (KNN)** is a non-parametric, instance-based supervised learning method used for classification and regression [17]. In the classification setting, the KNN algorithm works by identifying the K number of training examples that are closest in distance to the test example, and then classifying the test example based on the most common class among those K training examples. In the regression setting, the KNN algorithm makes predictions by averaging the K nearest training examples. In the experimental studies, the parameter 'k' was taken as 3 and the Euclidean function was used to calculate the distances between samples.

**Random Forest (RF)** algorithm was introduced by Breiman and has been shown to be effective in a variety of classification and regression tasks [18]. It has gained widespread popularity due to its versatility and performance. It is an ensemble learning method that uses multiple decision trees to make predictions [19]. In the experimental studies, the number of trees in the forest was set as 100.

#### *ii) Feature Selection Methods*

Two feature selection methods, namely Relief and Correlation were applied to the dataset. The selected features resulting from these methods are presented in Table 2. The following subsections provide a brief explanation of these methods.

**Relief feature selection** method [20] was proposed by Kira and Rendell in 1992. Relief works by identifying features that are different from one another in the data. It does this by analyzing how well a feature can predict the class of an instance. The idea is that features that are highly predictive of the class are more important, and should be kept in the model [21].

To calculate the importance of a feature, Relief looks at pairs of instances in the data. For each pair, it calculates the difference in the feature values for the two instances. If the feature values are different, the feature is considered important for distinguishing between the two instances. The more pairs of instances that a feature can distinguish between, the more important it is considered to be.

**Correlation-based Feature Selection (CFS)** is an algorithm to evaluate the worth of each attribute in a dataset. The CFS algorithm calculates the correlation between each attribute and the class attribute, as well as the inter-correlation between each pair of attributes, and uses this information to select a subset of attributes that are highly correlated with the class attribute and are not highly correlated with each other [22]. CFS algorithm can be used in conjunction with a search algorithm, such as best first or Genetic Search, to find the optimal subset of attributes that should be included in the analysis. This can be useful for improving the accuracy of predictive models and for reducing the dimensionality of the data, which can speed up the learning process.

Table 2. Selected gait parameters with Relief and Correlation feature selection methods.

Relief	Correlation
Left Single Support	Right Stride Length
Right Single Support	Left Step Length
Right Foot Off	Left Stride Length
Left Stride Time	Right Step Length
Left Step Time	Right Walking Speed
Left Cadence	Left Walking Speed
Right Stride Time	Right Single Support
Right Step Time	Right Cadence
Right Cadence	Left Cadence
Right Opposite Foot Contact	Left Single Support
Right Double Support	
Gait Duration after data crop	

## Experimental Results

In this section, the prediction of POMA-G scores from spatiotemporal gait parameters and the reliability analyses of POMA-G measurements are performed. The Python programming language is employed to perform reliability analyses, data organization, preprocessing, and visualization of results. Additionally, the Weka software [23] is utilized for training predictive models, conducting tests, and selecting features.

The SMO, KNN, and RF methods are utilized to predict POMA-G scores. The prediction methods are trained using the dataset described in Section 2.1, and 10 fold cross-validation is employed to prevent over-fitting during the training phase. Five records are collected for each participant, and spatiotemporal parameters are extracted from each of these records. The parameters obtained from one of the five records are used to train the models, while the parameters from the remaining records are used to test the trained models. The reliability of the models is assessed by using the values obtained during the testing process.

The intra-class correlation coefficient method [24] is employed in the reliability analysis. Amateur and expert physiotherapists assessed the POMA-G scores in two sessions using the same video recording for each participant. The reliability of the physiotherapists and the prediction models was determined by calculating the intra-class correlation coefficients for each.

### Quality Metrics

The performance of the prediction models was evaluated using three common metrics: root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE), and R-squared ( $R^2$ ). The intra-class correlation coefficient is used in the

reliability analyzes of the measurements. These metrics have been widely utilized in previous researches. Explanation and the corresponding formulas for all the metrics employed in the study are provided in this section.

RMSE is a measure of the difference between the predicted values and the true values in a dataset. It is commonly used to evaluate the performance of a model in predicting continuous variables, such as in regression analysis. It is calculated as the square root of the average of the squared differences between the predicted values and the true values. Lower values of RMSE indicate a better fit between the predicted values and the true values.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (1)$$

MAE is used to evaluate the accuracy of a model's predictions like RMSE. However, while RMSE is the square root of the average squared difference between the predicted and true values, MAE is simply the average absolute difference between the predicted and true values. This means that MAE is less sensitive to outliers than RMSE, as the absolute difference is not squared.

$$MAE = \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (2)$$

R-squared ( $R^2$ ), also known as the coefficient of determination, is a statistical measure that represents the proportion of the variance in the dependent variable that is explained by the independent variables in a regression model. It is a value between 0 and 1, where a value of 0 indicates that the model explains none of the variance in the dependent variable, and a value of 1 indicates that the model explains all of the variances in the dependent variable.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (3)$$

The intra-class correlation coefficient (ICC) is a measure of the consistency of observations within a group. It is used to evaluate the reliability of measurements taken by different raters or judges. The formula for the ICC is:

$$ICC = \frac{\frac{s_B^2}{k}}{\frac{s_B^2}{k} + \frac{s_W^2}{n-k}} \quad (4)$$

where:

- $s_B^2$  is the between-group variance
- $k$  is the number of groups
- $s_W^2$  is the within-group variance
- $n$  is the total number of observations

The ICC can take on values between 0 and 1. A value of 0 indicates that there is no consistency among the observations within each group, while a value of 1 indicates perfect consistency.

### Results

In this section, the validity and reliability of the proposed models are evaluated using several metrics. To assess the validity of the prediction models, the  $R^2$ , MAE, and RMSE

are calculated. A low MAE and RMSE value suggests a more accurate prediction, as it reflects a lower error in the prediction. In contrast, a higher  $R^2$  value indicates a stronger correlation, which indicates a better prediction. The reliability of the models is assessed using the ICC. The ICC is also calculated for the ratings made by physiotherapists to compare the reliability of the ratings made by the proposed models.

Table 3. Comparison of the prediction results of models trained using all features versus those trained using the features selected by the relief and correlation feature selection methods.

		$R^2$	MAE	RMSE
All Features	SMO	0.4575	0.7058	0.8607
	KNN	0.3792	0.6752	0.8557
	RF	0.4745	0.5797	0.7695
Correlation	SMO	0.5676	0.5670	0.7263
	KNN	0.4406	0.6325	0.7989
	RF	0.4576	0.6154	0.7904
Relief	SMO	0.3739	0.6483	0.8676
	KNN	0.2725	0.6838	0.8705
	RF	0.4614	0.5821	0.7760

Spatiotemporal gait parameters were obtained from a single recording session used to train prediction models. The POMA-G scores, as rated by an expert physiotherapist, were used as the ground truth. To prevent overfitting, 10-fold cross-validation method was employed. Three methods, namely SMO, KNN, and RF, were used to predict the POMA-G score. Two different feature selection methods, relief, and correlation feature selection were used to identify the features with the highest correlation to the predicted POMA-G score in order to improve the prediction accuracy. Upon application of feature selection techniques to the original dataset, two additional datasets were created in addition to the original dataset. The prediction methods were trained on these datasets independently, and the performance results for each method were calculated individually.

The prediction results are presented in Table 3. To improve comprehension of the results, the data from this table is also depicted in Figure 2 and 3. These figures allow for a visual comparison of the prediction models in Figure 2, and the feature selection methods in Figure 3.

ICC is a commonly used measure of reliability, particularly for data collected by multiple raters. The ICC scores provided in Figure 4 suggest that expert physiotherapist has higher reliability in their ratings compared to the amateur physiotherapist, as their ICC score is closer to 1.

**Discussion**

The figures and results presented in Table 3 show that the SMO prediction method combined with the Correlation

feature selection method achieved the best  $R^2$  (0.5676), MAE (0.5670), and RMSE (0.7263) values. In terms of  $R^2$ , KNN performed poorly on all datasets compared to the other prediction methods. When comparing SMO and RF, SMO produced better results only when the correlation feature selection method was used. Although the best result among all experiments was obtained with the SMO method, the prediction model comparisons presented in Figure 2 show that Random Forest (RF) gave the best result in 6 out of 9 experiments.

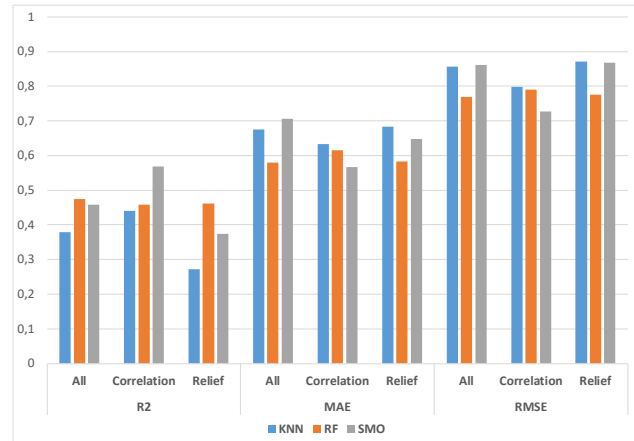


Figure 2. Comparison of the prediction models

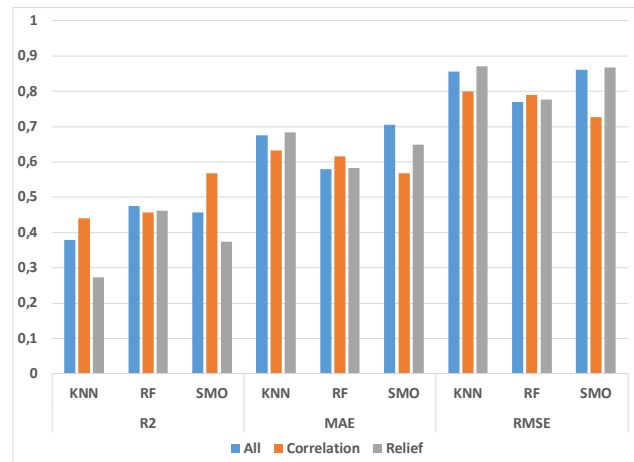


Figure 3. Comparison of the feature selection methods.

The mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) are both measures of the average magnitude of the error in the model's predictions. Lower values for both metrics indicate that the model's predictions are closer to the true values. Except for Correlation feature selection, RF mostly has lower values for MAE and RMSE than the other two algorithms, indicating that it has lower prediction errors on average. When the correlation feature selection method was applied to the dataset, the lowest MAE and RMSE results were obtained with the SMO prediction method.

When feature selection is applied, the correlation-based feature selection method improves the performance of all models except RF prediction. On the other hand, the Relief feature selection method does not help much to improve the

performance of the models, and all models' performance decreased compared to the model trained with all features except the MAE metric of SMO. It can be seen that with correlation-based feature selection, SMO algorithm improves significantly in terms of  $R^2$ , MAE and RMSE, which indicates it's a better choice than the other two algorithms.

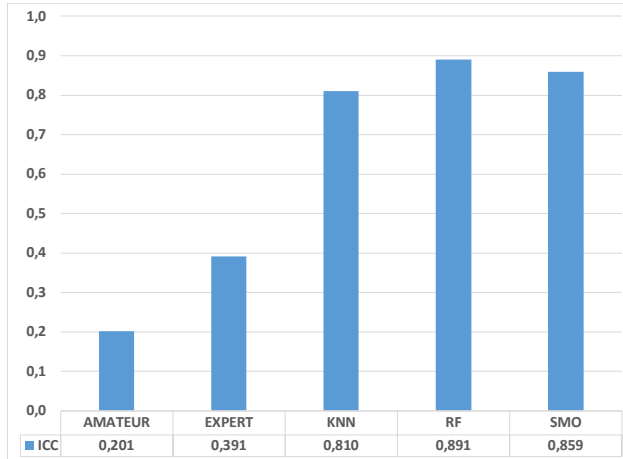


Figure 4. ICC results for the proposed methods' prediction and physiotherapists' ratings.

Based on the Table 3, it seems that the RF algorithm performs generally better than the other two algorithms. When all features are used, the RF algorithm has the highest  $R^2$  value of 0.4745 and the lowest mean absolute error (MAE) of 0.5797, indicating that it has the best overall fit to the data and the lowest prediction errors on average. Additionally, the RMSE of 0.7695 for RF is also lower than the others, indicating that its predictions are less dispersed around the true value. When the correlation-based feature selection method is applied to the dataset, there is an increase in the performance of KNN and SMO. However, when the relief feature selection method is applied it hurts the performance of all the models. Although the relief feature selection method reduces the performance of the model, the performance of RF is still better than the other two models.

When the results in Figure 4 are analyzed, it is seen that there is a moderate level of agreement (0.391) between the ratings given by the experts. The ICC scores for the prediction models, KNN, RF, and SMO, all have much higher ICC scores than the amateur and expert physiotherapists. KNN and SMO have ICC scores of 0.810 and 0.859 respectively, indicating high levels of agreement among the predictions made by the models. Similarly, RF has an ICC score of 0.891, also indicating a high level of agreement among the predictions.

In summary, the ICC values reveal the following:

Amateur and expert groups have lower ICC values, indicating less consistency in measurements within these groups.

KNN, RF and SMO prediction methods have high ICC values, indicating a high degree of agreement and reliability in their predictions in different situations.

ICC values are valuable for assessing the consistency and reliability of measurements or predictions, which is important for understanding the quality and stability of measurements.

## Conclusion

This study shows the use of spatiotemporal gait parameters obtained from gait analysis to predict scores on the gait portion of the POMA-G test. The POMA test is used to evaluate an individual's ability to perform functional movements and activities and is commonly used in the field of rehabilitation and physical therapy. SMO, KNN, and RF methods were used to predict POMA-G scores from the gait parameters. 10-fold cross-validation was used to prevent overfitting during the training phase, and feature selection methods were also applied to improve the performance of the models. Among the three prediction models evaluated, the SMO algorithm performed the best results, with the highest  $R^2$  value and the lowest mean absolute error. The experiments also show that the correlation-based feature selection method generally improved the performance of all models, while the Relief feature selection method did not significantly improve the performance.

The study also evaluated the reliability of the expert assessment of POMA-G scores by comparing the scores given by an expert physiotherapist and an amateur physiotherapist. The results show that expert physiotherapists have higher reliability in their ratings compared to amateur physiotherapists, as their ICC score is higher. The expert physiotherapists' ICC score is moderate (0.391) while the ICC scores for the prediction models, all have high levels of agreement among the predictions made by the models.

Overall, the study suggests that spatiotemporal gait parameters obtained from a gait analysis can be used to predict POMA-G scores with a reasonable level of accuracy.

The ultimate goal is to achieve a comprehensive assessment in an automated manner. This study can be regarded as the initial step towards accomplishing this objective. Forthcoming endeavors will involve the utilization of inertial sensors, such as gyroscopes and accelerometers, to acquire additional components of the POMA assessment.

## References

- [1] P. E. Caicedo, C. F. Rengifo, L. E. Rodriguez, W. A. Sierra, and M. C. Gómez, "Dataset for gait analysis and assessment of fall risk for older adults," *Data Br.*, vol. 33, p. 106550, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.DIB.2020.106550.
- [2] M. E. Tinetti, "Performance-oriented assessment of mobility problems in elderly patients," *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. 34, no. 2, pp. 119–126, 1986, doi: 10.1111/J.1532-5415.1986.TB05480.X.
- [3] M. W. Rivolta *et al.*, "Evaluation of the Tinetti score and fall risk assessment via accelerometry-based movement analysis," *Artif. Intell. Med.*, vol.

- 95, pp. 38–47, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.artmed.2018.08.005.
- [4] S. Köpke and P. G. Meyer, “The Tinetti test,” *Z. Gerontol. Geriatr.*, vol. 39, no. 4, pp. 288–291, Aug. 2006, doi: 10.1007/S00391-006-0398-Y.
- [5] D. Sethi, S. Bharti, and C. Prakash, “A comprehensive survey on gait analysis: History, parameters, approaches, pose estimation, and future work,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 129, p. 102314, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.ARTMED.2022.102314.
- [6] K. S. Al-Zahrani and M. O. Bakheit, “A historical review of gait analysis,” *Neurosci. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 105–108, 2008.
- [7] İ. Kosesoy, C. Öz, F. Aslan, F. Köroğlu, and M. Yiğiltaş, “Reliability and validity of an innovative method of ROM measurement using Microsoft Kinect V2,” *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 24, no. 5, pp. 915–920, Oct. 2018, doi: 10.5505/pajes.2017.65707.
- [8] S. Aich *et al.*, “Design of a Machine Learning-Assisted Wearable Accelerometer-Based Automated System for Studying the Effect of Dopaminergic Medicine on Gait Characteristics of Parkinson’s Patients,” *J. Healthc. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/1823268.
- [9] H. Lee, S. J. Sullivan, and A. G. Schneiders, “The use of the dual-task paradigm in detecting gait performance deficits following a sports-related concussion: A systematic review and meta-analysis,” *J. Sci. Med. Sport*, vol. 16, no. 1, pp. 2–7, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.jsams.2012.03.013.
- [10] I. Kosesoy and C. Oz, “Acquiring Kinematics of Lower extremity with Kinect,” *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.*, no. 32, pp. 92–100, 2021.
- [11] R. A. States, J. J. Krzak, Y. Salem, E. M. Godwin, A. W. Bodkin, and M. L. McMulkin, “Instrumented gait analysis for management of gait disorders in children with cerebral palsy: A scoping review,” *Gait & Posture*, vol. 90, pp. 1–8, 2021.
- [12] M. Pistacchi *et al.*, “Gait analysis and clinical correlations in early Parkinson’s disease,” *Funct. Neurol.*, vol. 32, no. 1, p. 28, 2017.
- [13] J. M. Guralnik, L. Ferrucci, E. M. Simonsick, M. E. Salive, and R. B. Wallace, “Lower-extremity function in persons over the age of 70 years as a predictor of subsequent disability,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 332, no. 9, pp. 556–562, Mar. 1995, doi: 10.1056/NEJM199503023320902.
- [14] M. F. Folstein, S. E. Folstein, and P. R. McHugh, “‘Mini-mental state’. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician,” *J. Psychiatr. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 189–198, 1975, doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.
- [15] E. Acar and M. S. Özerdem, “On a yearly basis prediction of soil water content utilizing sar data: a machinelearning and feature selection approach,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 4, pp. 2316–2330, 2020.
- [16] J. Platt, “Sequential Minimal Optimization: A Fast Algorithm for Training Support Vector Machines,” 1998. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/sequential-minimal-optimization-a-fast-algorithm-for-training-support-vector-machines/>
- [17] S. Zhang, D. Cheng, Z. Deng, M. Zong, and X. Deng, “A novel kNN algorithm with data-driven k parameter computation,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 109, pp. 44–54, 2018.
- [18] L. Breiman, “Random forests,” *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [19] G. Biau and E. Scornet, “A random forest guided tour,” *Test*, vol. 25, no. 2, pp. 197–227, 2016.
- [20] K. Kira and L. A. Rendell, “A practical approach to feature selection,” in *Machine learning proceedings 1992*, Elsevier, 1992, pp. 249–256.
- [21] R. J. Urbanowicz, M. Meeker, W. La Cava, R. S. Olson, and J. H. Moore, “Relief-based feature selection: Introduction and review,” *J. Biomed. Inform.*, vol. 85, pp. 189–203, 2018.
- [22] A. G. Karegowda, A. S. Manjunath, and M. A. Jayaram, “Comparative study of attribute selection using gain ratio and correlation based feature selection,” *Int. J. Inf. Technol. Knowl. Manag.*, vol. 2, no. 2, pp. 271–277, 2010.
- [23] M. Hall, E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann, and I. H. Witten, “The WEKA data mining software: an update,” *ACM SIGKDD Explor. Newsl.*, vol. 11, no. 1, pp. 10–18, 2009.
- [24] J. P. Weir, “Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM,” *J. Strength & Cond. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 231–240, 2005.



## Göz Özelliklerinin UKSB - PSO Modeli kullanılarak Otizm Sınıflandırılması

*Autism Classification of Eye Features using the LSTM-PSO Model*Dilber ÇETİNTAŞ<sup>1\*</sup>, Taner TUNCER<sup>2</sup><sup>1</sup> Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Fırat Üniversitesi, [dcetintas@firat.edu.tr](mailto:dcetintas@firat.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0710-2280><sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, [ttuncer@firat.edu.tr](mailto:ttuncer@firat.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0526-4526>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 14 Temmuz 2023  
Revizyon 11 Kasım 2023  
Kabul 2 Aralık 2023  
Online 31 Aralık 2023

## Anahtar Kelimeler:

Göz hareketleri, UKSB, PSO,  
Pencere Boyutu

## ÖZ

Otizm, birçok biyobelirteci olan karmaşık bir rahatsızlıktır. Bu karmaşık rahatsızlığı tanımlamak ve ayırt edebilmek, birden fazla biyolojik özelliği kullanarak mümkün olabilmektedir. Bu özelliklerden biri de göz hareketleridir. Çalışma, kullanıcılara özgü gözbebeği boyutu, göz pozisyonları (X-Y koordinatları), ilgi alanının noktaları, iris yarıçapı parametrelerinden oluşan dizileri kullanarak otizm spektrum bozukluğu olan (OSB) ve otizm spektrum bozukluğu olmayan (TS) bireyleri UKSB ağı ile otomatik olarak sınıflandırmayı amaçlamaktadır. Klinik bulgular ve uzman görüşüyle tanıyı belirleyen bu rahatsızlık günlük bilgisayar etkileşimiyle, göz hareketlerinin takibi sonucunda belirlenebilecektir. Böylelikle hem erken teşhis ile zaman kazancı sağlanacak hem de tedavi süreci hızlandırılmış olacaktır. Bu doğrultuda ilk adım olarak, her bir hareketin tüm parametreleri ayrı bir dizi olarak alınır. Alınan diziler ikinci basamakta UKSB ağına işlenir. İşleme aşamasında pencere boyutunun doğru seçilmesi, sonucu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu doğrultuda modelde pencere boyutunun optimum seçilebilmesi için PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) algoritması kullanılır. UKSB-PSO hibrit modeli kullanılarak iki senaryo gerçekleştirilir. Bu senaryolardan biri tüm özellikleri içerirken, senaryo 2'de sadece gözbebeği boyutu ve ilgi alanı özellikleri mevcuttur. DVM (Destek Vektör Makinesi) sınıflandırıcısı ile başarı oranı senaryo 2'de %98,64 olarak maximum ölçülmüştür. Sonuçlar, göz izleme verileri kullanılarak otizmin UKSB ile sınıflandırılmasının mümkün olduğunu ve bu yöntemin otizm tanısı ve tedavisi için potansiyel olarak faydalı olabileceğini göstermektedir.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 14 July 2023  
Received in revised form 11  
November 2023  
Accepted 2 December 2023  
Available online 31 December 2023

## Keywords:

Eye-Tracking, LSTM, PSO, Window  
Size

## ABSTRACT

Autism is a complex disorder with many biomarkers. Identifying and differentiating this complex disorder is possible by using more than one biological feature. One of these features is eye movements. The study aims to automatically classify individuals with autism spectrum disorder (ASD) and without autism spectrum disorder (TS) with the LSTM network, using user-specific sequences consisting of pupil size, eye positions (X-Y coordinates), points of interest, iris radius parameters. This disorder, which is diagnosed based on clinical findings and expert opinion, can be determined as a result of daily computer interaction and monitoring eye movements. In this way, early diagnosis will save time and the treatment process will be accelerated. As a first step in this direction, all parameters of each movement are taken as a separate set. The received sequences are processed in the LSTM network in the second step. Choosing the correct window size during the processing stage is one of the most important factors affecting the result. Accordingly, PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm is used to select the optimum window size in the model. Two scenarios are implemented using the LSTM-PSO hybrid model. While one of these scenarios includes all features, scenario 2 only has pupil size and area of interest features. With the SVM (Support Vector Machine) classifier, the success rate was measured to be maximum 98.64% in scenario 2. The results show that it is possible to classify autism with LSTM using eye-tracking data and that this method may be potentially useful for autism diagnosis and treatment.

Doi: 10.24012/dumf.1327654

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Otizm spektrum bozukluğu, hastaların genellikle sosyal iletişim, etkileşim ve hayal gücü eksikliklerine sahip olduğu en yaygın nörolojik bozukluklardan biridir [1]. Bununla birlikte, OSB'nin temel bilişsel eksikliği henüz bulunamamıştır ve bozukluğun temel semptomlarına yönelik etkili tıbbi tedaviler hala eksiktir [2]. Etiyopatogenezi hala belirsizdir, ancak genellikle genetik kusurlar, beyin iltihabı ve hamilelik sırasındaki anormal durumlar gibi biyolojik faktörlerle ilişkili olduğuna inanılmaktadır.

OSB teşhisi konan çocuk sayısındaki keskin artış, bu popülasyon hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekliliğini vurgulamaktadır. Özellikle doğru klinik yöntemler gerekmektedir. Şu anda, otizm rahatsızlığının tanısı için otizm davranışı kontrol listesi [3] ve Çocukluk Otizmi Derecelendirme Ölçeği (CARS) kullanılmaktadır [4]. Bunlar dışında Otizm Spektrum Bozukluğu olan bireylerin, genellikle yüz ifadesi, atipik gözlerle bakma tepkisi gibi farklı sözel olmayan iletişim ipuçlarında ortaya çıkan, önemli ölçüde sınırlı sosyal etkileşim yeteneklerine sahip oldukları bilinmektedir [5]. Bu durum geleneksel yöntem ve müdahaleler dışında alternatif daha az maliyetli bir yol arayışını doğurmuştur. Biyolojik tepkilerin takibi ile teşhis yoluna gidilmiştir. Elektroensefalograf (EEG), VR(Virtual Reality), göz izleme tabanlı teknolojiler OSB'li bireyler için daha nesnel tanı araçları olmuştur. Elektroensefalografi, beyin aktivitesini yüksek zamansal çözünürlükle analiz etmeyi sağlarken göz izleme teknolojileriyle bilinçdışı oluşan verilerin alınıp değerlendirilmesi sağlanır. Biyometrik ölçümlerden yararlanmak, uzman puanlama sürecinde yanlılığı ve öznelliği önlemek açısından da avantajlıdır [6].

Otistik çocukları belirlemek için EEG ve göz verilerinin birleştirilerek kullanıldığı bir çalışmada, DVM sınıflandırıcıları ile birleştirilmiş minimum fazlalık maksimum alaka (MRMR) öznelik seçim yöntemi tercih edilmiştir. 32 özellik seçildiğinde %85.44'e başarıya ulaşılmıştır [7]. Wang'ın inceleme araştırması, OSB'nin dinlenme durumu EEG'sinin elektrofizyolojik güç değişikliklerinin U şeklinde bir profil çizdiğini göstermiştir. Düşük frekans ve yüksek frekans bantlarında aşırı güç ve alfa bandında yetersiz güç olduğu saptanmıştır [8]. Kang ve arkadaşları, OSB'li çocukların sosyal uyaranlar karşısındaki dikkat tepkilerinin normal çocuklardan farklı olduğunu saptamıştır. Normal yetişkinler, yüzlere bakarken, gözlerle aynı zamanda burun ve ağıza da odaklanarak belirli bir bakış kalıbı gösterirken OSB'li bireyler daha dağınık bir bakış rotası göstermişlerdir [9].

Sheikhani [10], nicel EEG'yi (qEEG) değerlendirmek için spektrogram ve tutarlılık değerlerini kullanmış OSB'li çocukların sol beyin yarıküresinde önemli ölçüde daha düşük spektrogram kriter değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Ham verilerden tanı koyma alanında ilk girişim olan çalışmada 136 OSB çocuk ve 136 TS çocuktan alınan 272 video içeren veriseti üzerindeki deneysel sonuçlar, UKSB ağının geleneksel makine öğrenme yöntemlerinden, örneğin Destek Vektör Makinesinden daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır. %92,6 oranında doğruluk elde edilmiştir.

Göz verileri, araç verileri ve çevresel veriler birleştirilerek sürücülerin dikkatinin araştırıldığı çalışmada evrişimli sinir

ağları (CNN) ve uzun kısa süreli bellek (UKSB) hibrit modeli önerilmiş %95,5'lik bir doğrulukla en son modellerden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur [11]. Kang ve arkadaşları tarafından güç spektrumu analizi, çift tutarlılık, entropi ve tutarlılık yöntemleri dahil olmak üzere mümkün olduğu kadar çok özelliği ayıklamak için EEG sinyaline dayalı çok özellikli birleştirme yöntemi kullanılmış, mRMR algoritması kullanılarak seçim yapılmıştır. Sonuçta DVM-doğrusal sınıflandırıcı kullanılarak dokuz özellik seçildiğinde doğruluğun %91,38'e kadar çıktığı gösterilmiştir [12].

Yavaş göz hareketleri (SEM'ler) uykuya başlama dönemini gösterir. SEM'leri algılamak için, fizyolojik sinyallerdeki zamansal bilgiler ve çok modlu bilgilerle başa çıkmak için iki modlu UKSB ağı kullanılır. Ayırt edici bilgileri genişletmek için, iki yatay elektrookülogram (EOG) kanalından gelen sinyallerin toplamı olan yeni bir yatay toplam (HSUM) sinyali tanımlanır. Sinyallerinden gelen özellikleri sınıflandırmak için çift modlu UKSB kullanarak SEM'leri saptamaya yönelik önerilen yöntem, %76,5'lik ortalama F-skorumu elde eder [13]. Bu çalışmada, sanal bir ajanla sosyal etkileşime dayalı olarak gözbebeği tepkilerini (gözbebeği çapı, sabitleme süresi ve sabitleme yeri) yakalayan bir UKSB modeli tasarlanılır. Uygulanan farklı duyu (kızgın, mutlu, nötr) uyaranlara yanıt olarak tüm gözbebeği tepkilerinin OSB oturumlarında önemli ölçüde değiştiği gözlemlenir. Bu bulgular OSB taramasını ortalama %77 doğrulukla desteklerken, kızgın ve mutlu duyu uyaranlarına göre doğruluk daha da artmakta %80 doğruluk değerine ulaşmaktadır [14].

VR sanal ortamında yürürken elde edilen veriler kullanılarak verilerin 2,5 saniyelik bölümlerinden kaydedilen konum, yön ve göz izleme özellikleri, kullanıcının 2,5 saniye sonraki konumunu tahmin edecek bir UKSB modelini eğitmek için kullanıldı. Gelecekteki konumların ortalama 65 cm'lik bir hatayla tahmin edilebileceği bulundu [15].

Genellikle davranışsal bir hedefe yönelik göz hareketleri, diğer herhangi bir motor eylemden önce gelir [16]. Bu nedenle, eylem niyetinin tahmini için zengin bir sinyal sunarlar [17, 18]. DiCriscio ve Troiani, gözbebeği genişlemesinin, sosyal yanıt vermenin klinik OSB ölçüsü ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir [19].

Ahmed ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada otizmin erken teşhisi için makine öğrenmesi, derin öğrenme ve hibrit teknikler olmak üzere farklı yapay zeka tekniği geliştirmişlerdir. GoogleNet ve ResNet-18 modelleri sırasıyla %93,6 ve %97,6 doğruluğa ulaşılmıştır. Hibrit teknikler olan GoogleNet + SVM ve ResNet-18 + SVM için sırasıyla %95,5 ve %94,5 doğruluk elde edilmiştir [20].

Uzun kısa süreli bellek (LSTM) algoritması çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ancak otizm tespiti için doğrudan LSTM algoritmasının kullanımı sınırlıdır. Lakhan ve arkadaşları VGG16-LSTM, VGG19-LSTM ve MobileNet-LSTM modellerini sunarak karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirdiler. MobileNet-LSTM modeli ile en yüksek otistik sınıflandırma doğruluğuna (%96,60) ulaşılmıştır [21].



## Göz Hareketleri ve Veriseti

Göz hareketlerinin kaydedilmesi ve değerlendirilmesi 1800'lü yıllara dayansa da bilgisayar grafiklerinin gelişmesi, görüntü işlemedeki iyileşmeler, gözlerdeki saklı bilgilerin anlaşılır olmasını sağlamıştır. Gözler bilinç dışı yapılan hareketler olduğu için bireylerin fikir, düşünce, ilgi alanı gibi kişisel verileri hakkında örtük bilgiler içermektedir. Bu bilgilere erişebilmek için göz hareketleri ve nasıl yorumlanacağı tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Göz Hareketleri ve Açıklamaları.

Göz Hareketleri	Anlam ve Yorumu
Odaklanma	Kullanıcın gözlerini sabitleyerek bakmasıdır. Odaklanma süresinin uzun olması bakılan alanın kullanıcın ilgisini çektiği olarak yorumlanır.
Sıçrama	A noktasına bakıldıktan sonra B noktasına geçiş sırasında yapılan harekettir. Çok sayıda olması ekran üzerinde birşeyler arandığı anlamına gelir.
Geri yönlü sıçrama	Sağa doğru ilerleyen metin ya da görsellerde geçilen alanlara geri dönme (sola doğru) davranışdır. Bu durum dikkat dağınıklığı veya geçilen alanın anlaşılmadığı bilgisine ulaştırır.
Gözbebeği Boyutu	Bilişsel yük ve duygu durum değişikliklerinden etkilenir. Yapılan aktivitenin zorluğu, duygu durum tespitinde kullanılabilir.
Göz Kırpma	Gözünü koruma, nemli tutma görevleri bulunan bir reflekstir. Yorgunluk, uykusuzluk çıkarımlarında tercih edilir.
Göz Koordinatları	Gözün eksen üzerindeki bakış noktalarıdır. Bakış alanları incelenerek bireyle ilgili kişisel tercih çıkarımları yapılabilir.

[22]'deki çalışmada Fransa'nın Hauts-de-France bölgesindeki Fransız okullarından katılan 59 katılımcıdan veriler toplanmıştır. 29 OSB, 30 TS olan katılımcıların yaş aralığı 3-12 arasında değişmektedir. Göz hareketlerini kaydetmeden önce ebeveyn izinleri alınır ve oryantasyon eğitimi verilir. Normal gelişim gösterenler ve otizm spektrum bozukluğu olanlar diye iki gruba ayrılırlar. Verisetinde yer alan parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Tablodaki parametrelerin dışında CARS skor değerlerinin ve cinsiyetlerin tutulduğu veri dosyası bulunmaktadır.

Tablo 2. Verisetinde yer alan parametreler.

Pupil Diameter (Right -Left)	Gözbebeği çapı
Point of Regard X-Y(Right - Left)	İlgi alanlarının Koordinatları

Eye Position X-Y(Right - Left)	Bakış noktaları
Pupil Size (Right -Left)	Gözbebeği Boyutu
Category (Right -Left)	Bakış Türü(Odaklanma,Sıçrama, Göz Kırpma)
Participant	Katılımcı numarası
Recording Time	Zaman
Color	Gösterilen imgenin rengi
Tracking Ratio	Katılımcının takip oranı
Stimulus	İzletilen video adı
Time of Day	Kayıt yapılan gün

## Veriseti Analizi

Veri setinin sayısal olarak özeti Tablo 3'te verilmiştir. Gruplardaki katılımcı sayısı eşit dağılımlıdır. Daha önceki çalışmalarda belirtildiği gibi otizmin erkek bireylerde daha fazla görülmesi sebebiyle erkek katılımcı sayısı daha fazladır. Ayrıca verilen CARS skor değerlerine göre 14 katılımcı normal, 8 katılımcı düşük, 7 katılımcı şiddetli otizm seviyesinde yer almaktadır. Katılımcıların yaşları 3-12 arasında değişmektedir.

Tablo 3. Verisetinin Özeti.

Katılımcı Sayısı (OSB, TS)	59 (29, 30)
Cinsiyet Dağılımı (E, K)	38 ( $\approx$ 64%), 21 ( $\approx$ 36%)
Yaş Ortalaması	7.88
CARS Skor Ortalaması	32.97

## Motivasyon

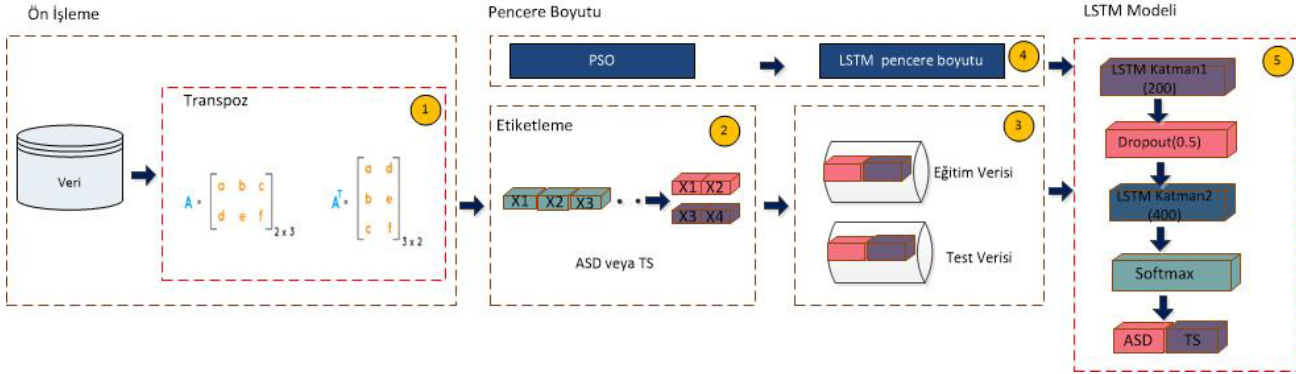
- Otizm değerlendirmesinde etkili olan biyolojik göz parametrelerin tümünü sürece dahil ederek etkisini gözlemlemek
- Bakış trafiğinin sonraki bakış yolunu etkileme oranını ölçmek
- Hiperparametre seçiminde optimum değeri optimizasyonla belirleyebilmek
- Bu alanda kısıtlı yapılmış olan çalışmalara katkı sağlamak

## Metot

UKSB algoritması zaman serisi verilerinin işlenmesinde sıklıkla kullanılan bir yapay sinir ağı modelidir. UKSB modeli, girdi olarak bir dizi zaman serisi verisi alır ve çıktı olarak gelecekteki değerleri tahmin eder. Yapılan göz hareketleri de zaman içerisinde değişim gösterdiği için bu veriler zaman serisi olarak işlendi. Kurgulanan modelde bir adım önceki veriler üzerinden ne kadar geriye gidileceği pencere boyutu ile belirlendi. Pencere boyutu ne kadar büyükse, model o kadar önceki veriye erişebilir. Bu durum modelin daha uzun vadeli tahminler yapmasına olanak tanır.

Ancak, pencere boyutunun çok büyük olması, modelin daha yavaş çalışmasına ve daha az öğrenme yapmasına neden olur. Bu sebeple optimal boyutun seçilmesi gerekir.

- **UKSB modelinin eğitilmesi:** En iyi pencere boyutu belirlendikten sonra, UKSB modeli bu pencere boyutu ile eğitilir ve test veri setinde performansı ölçülür.



Şekil 1. Tasarlanan Metot.

Bu çalışmada PSO algoritması, UKSB modelinin pencere boyutunu optimize etmek için kullanıldı. Bu işlem için, PSO algoritması, pencere boyutunu değiştirerek farklı UKSB modelleri oluşturur ve bunları bir hedef fonksiyonu kullanarak değerlendirir. Hedef fonksiyonu, UKSB modelinin performansını ölçmek için kullanılır. Örneğin, hedef fonksiyonu, UKSB modelinin tahminlerinin gerçek verilerle ne kadar iyi eşleştiğini ölçerek gerekli en uygun değeri seçer. UKSB modelinin pencere boyutunu otomatik olarak ayarlamak ve daha iyi performans sağlayabilmek için takip edilecek adımlar:

**Veri setinin hazırlanması:** PSO algoritmasını kullanarak, pencere boyutunu belirlemek istediğimiz UKSB modelinin eğitim ve test verileri hazırlanır. Eğitim veri seti, modelin öğrenmesi için kullanılırken test veri seti, modelin performansını ölçmek için kullanılır.

• **PSO parametrelerinin belirlenmesi:** PSO algoritmasının performansını etkileyen parametreler belirlenir. Bu parametreler arasında sürü boyutu, maksimum iterasyon sayısı, hız sabitleri ve bireylerin en iyi konumlarını güncellemek için kullanılan ağırlıklar gibi parametreler bulunur.

• **Hedef fonksiyonunun tanımlanması:** Hedef fonksiyonu, UKSB modelinin performansını ölçmek için kullanılır. Bu fonksiyon, UKSB modelinin tahminlerinin gerçek verilerle ne kadar iyi eşleştiğini ölçer. Bu fonksiyon, özellikle UKSB modelinin doğru tahminler yapması için belirli bir pencere boyutuna ihtiyaç duyulduğunda daha yüksek bir değer döndürür.

• **PSO algoritmasının çalıştırılması:** PSO algoritması, farklı pencere boyutlarını deneyerek UKSB modelleri oluşturur ve bu modellerin hedef fonksiyonu kullanarak performansını değerlendirir. Algoritma, sürüsündeki bireylerin konumlarını güncelleyerek en iyi pencere boyutunu bulmaya çalışır.

• **En iyi pencere boyutunun seçilmesi:** PSO algoritması, birçok pencere boyutunu deneyerek en iyi pencere boyutunu bulur. Bu pencere boyutu, en iyi performansı gösteren UKSB modelinin pencere boyutu olarak seçilir.

Bu çalışmada göz izleme teknolojilerinden elde edilen parametre dizilerini UKSB modeli ile otizm sınıflandırılmasında kullanabilecek PSO-UKSB birlikteliğinden oluşan bir metod tasarlanmıştır. Uygulanacak bu metod şekil 1’de belirtilmiştir. Şekil 1’deki basamaklar adım adım açıklanmıştır.

**Veri:** Göz izleme ile otizm değerlendirmesi yapabilmek için veriseti parametrelerinden oluşan  $N \times 15$  bir veriseti hazırlanır. N değeri yapılan göz hareketidir ve kullanıcıya bağlı olarak değişmektedir. Veriler ön işleme adımında eksik bilgi içeriyorsa manuel olarak silinir. Ayrıca satırlar bireyleri sütunlar 52 nitelik içeren değerleri belirtir. Herbir nitelik değerinin tüm kullanıcılardan oluşan veri dizisini alabilmek için transpozuz adımına geçilir.

**Transpozuz:** Verilerde yer alan eksik göz özelliği içeren satırlar manuel olarak silinir. Ardından matris olarak tutulan herbir harekete ait parametre içeriklerinin transpozuz alınır. Böylelikle tüm parametreleri içeren satır elde edilmiş olur.

**Etiketleme:** Satır dizilerinin en sonuna yeni kolon oluşturularak yapılan hareketin OSB’li birey mi yoksa TS’li birey mi olduğunu belirlenerek sınıf etiketleri atanır.

**Ayrırma :** Dizilere parçalanmış ve etiketlenmiş veriler %70-%30 oranında ayrılarak eğitim ve test bölümleri oluşturulur.

Herbir göz hareketi bir satır olarak dosyada yer almaktadır. Bu satırlar genellikle 1 ms lik aralıklarla kaydedilmektedir. Birçok çalışmada deneysel olarak pencere boyutlarına bölünen diziler bir sonraki adıma iletilir. Deneysel olarak alınan pencere boyutunda rastgele seçilen değerler arasından en iyi sonuç veren pencere boyutları seçilmiştir. Fakat bu durum elde edilen başarı oranının en yüksek mi daha iyisi var mı? Sorusunu cevaplayamamaktadır. Zaman serisi verilerinin tahmininde sıklıkla kullanılan UKSB modelleri, daha iyi sonuçlar elde etmek için optimal hiperparametrelerin belirlenmesini gerektirir. Bunlardan biri de pencere boyutudur. Pencere boyutunun belirlenmesi, tahmin doğruluğunu önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, bu çalışmada, PSO algoritması kullanarak UKSB modeli için optimal pencere boyutunun belirlenmesi hedeflenmiştir.

PSO algoritması kullanılarak optimal pencere boyutunun belirlenmesi için bir MATLAB kodu geliştirilmiştir. PSO algoritması, hiperparametre olarak pencere boyutunu alır. Tahmin edilen ile gerçek değer arasındaki farkın en az olduğu pencere boyutu seçilir. Daha sonra, belirlenen optimal pencere boyutu kullanılarak UKSB modeli eğitilir ve tahminler yapılır. UKSB modelinin parametreleri tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Model Parametreleri.

Parametreler	Değerler
UKSB Katman I	Neuron size :200
Dropout	0.5
UKSB Katman II	Neuron size :400
Epoch	30
Aktivasyon Fonksiyonu	Softmax
Optimizasyon Fonksiyonu	Adam
Batch Boyutu	30

Tasarlanan metotta PSO ile UKSB için pencere boyutu belirlenmenin sözde kodu :

1- Başlangıçta, rastgele olarak birkaç pencere boyutu seçilir ve bunlar PSO ile optimize edilir.

2- Sürü boyutu, maksimum adım sayısı,  $c1$ ,  $c2$  ve  $w$  gibi PSO parametreleri belirlenir.

3- Uygunluk(fitness) fonksiyonu tanımlanır. Bu fonksiyon, veri kümesini belirtilen pencere boyutuna göre bölerek bir UKSB modeli oluşturur ve modelin tahminleri ile gerçek değerler arasındaki ortalama kare hatayı (OKH) hesaplar.

4- PSO algoritması tanımlanır:

a. Sürü boyutu oluşturulur ve başlangıç pozisyonları rastgele atanır.

b. Sürü boyutu'nun her bir bireyinin uygunluğu, uygunluk fonksiyonu kullanılarak hesaplanır.

c. Sürü boyutu'nun  $n$  kişisel en iyi ve global en iyi pozisyonları güncellenir.

d. Hızlar ve pozisyonlar güncellenir.

e. Maksimum adım sayısına veya belirli bir duruma ulaşıncaya kadar  $b$ ,  $c$  ve  $d$  adımları tekrar edilir.

5- En iyi pencere boyutu çıktısı verilir.

Kullandığımız metotta ilk katman 200 nöron içerir. Nöron sayısı hafızadaki bilgi sayısını belirtir. Aktivasyon fonksiyonu olarak tanh ve sigmoid kullanır. İkinci UKSB katmanı 400 nöron içerir. Ezberleme durumunun önüne

geçebilmek için nöronların yarısı aktif edilir ve DVM ile ikili sınıflandırma gerçekleştirilir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Otizm sınıflandırmasını incelemek için iki uygulama gerçekleştirildi. İlk uygulamada mevcut tüm göz özellikleri ikinci uygulamada ise ilgi alanı noktaları, gözbebeği boyut değişimi özellikleri UKSB ağında işlenmesinin ardından sınıflandırmaya gidildi. Satır dizileri UKSB ağına verildi ve sonuçlar kıyaslandı. Her iki uygulamada da sınıflandırma başarımlarının performans değerlendirmesini yapabilmek için karmaşıklık matrisi kullanıldı. Bu matriste satırlar gerçek sınıfları sütunlar tahmin edilen sınıflandırmaları belirtmektedir. Tablolarda doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 metrikleri tercih edildi. Tercih edilen metriklerin formülleri denklem1, denklem2, denklem3 ve denklem4’te verilmiştir. Bu metrikleri ölçebilmek için  $dp$  (doğru pozitif),  $dn$  (doğru negatif),  $yp$  (yanlış pozitif),  $yn$  (yanlış negatif) değerleri kullanılır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{dp+dn}{dp+dn+yp+yn} \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{dp}{dp+yp} \quad (2)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{dp}{dp+yn} \quad (3)$$

$$\text{F1 Skor} = \frac{2dp}{2dp+yp+yn} \quad (4)$$

## Uygulama 1:

UKSB sıralı veriler üzerinde etkili bir şekilde çalışan bir derin öğrenme algoritmasıdır. Göz izleme verileri, sıralı verilerdir. Kişinin bakış odakları ve süreleri, sırayla birbirine bağlıdır. Bu nedenle, UKSB, göz izleme verilerini sınıflandırmak için kullanılabilir. UKSB algoritması, bu tür çok boyutlu verileri işlemek için etkili bir seçenektir. UKSB, önceki girdilerin geçmiş bilgilerini hatırlayarak ve gelecekteki girdileri tahmin ederek sıralı verileri analiz eder. Bu sebeple göz izleme teknolojisi yardımıyla alınan göz hareketlerine ait veri kümesi UKSB ile değerlendirilir. Bu değerlendirme yapılırken göz bebeği, göz pozisyonu, ilgi alanı parametreleri farklı kombinasyonlarla UKSB ağına uygulanır.

Veriseti, belirlenen modele göre farklı pencere boyutlarına göre eğitilip başarımların değerleri elde edilmiştir. Veriseti 15 kolondan oluştuğu için PSO için alt sınır=1 üst sınır=15 seçilerek pencere boyutunun 1-15 aralığında alınması sağlanmıştır. Yapılan testler sonucunda pencere boyutunun başarı oranını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Adım sayısı modelin kaç kez eğitildiğini temsil etmektedir. Adım sayısı ve sürü boyut değerleri 2 olarak seçilerek elde edilen değerler Tablo 5’te yansıtılmıştır.

Tablo 5. Adım sayısı=2 Sürü boyutu=2 için başarı değerleri.

Pencere Boyutu	Eğitim	Doğrulama	Test
6	92.25	92.34	89.56
4	93.80	93.46	92.81
13	<b>98.25</b>	<b>98.5</b>	<b>98.5</b>
5	93.07	93.25	91.93

Bu değerlerin ardından en optimum sonuca pencere boyutunun 13 seçilmesi durumunda ulaşılabileceği gözlemlendi. Göz hareketleri ile otizm teşhisinde UKSB modelinin avantajı saptandı. Bu avantajda geçmiş göz hareketlerinin gelecek göz hareketlerindeki etkisi sorgulanıp pencere boyutları değiştirildiğinde gerçekleşen sonuçlar incelendi. Pencere boyutunun başarımlarını etkilemede oldukça önemli bir faktör olduğu saptandı.

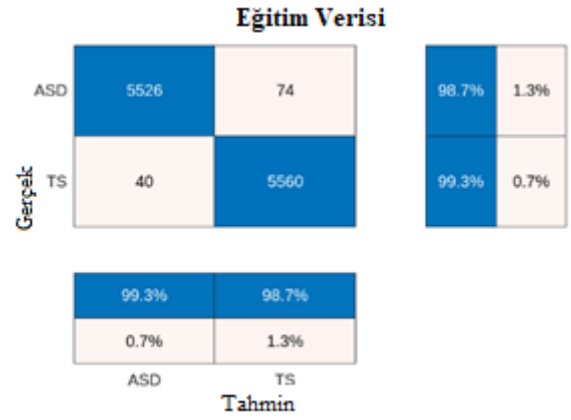
### Uygulama 2:

Daha önce CNN kullanarak gerçekleştirdiğimiz çalışmalarda [23,24] gözbebeği boyutu ve ilgi alanı özellikleri sınıflandırmada oldukça belirleyici özellikler olarak karşımıza çıkmıştı. Bu özelliklerin UKSB ile değerlendirilmesini yaptığımızda Tablo 6'daki oranlara ulaşıldı. Gözbebeği boyutu alınan birey sayısında eksiklik mevcut olduğu için alınan veri sayısı da azdır.

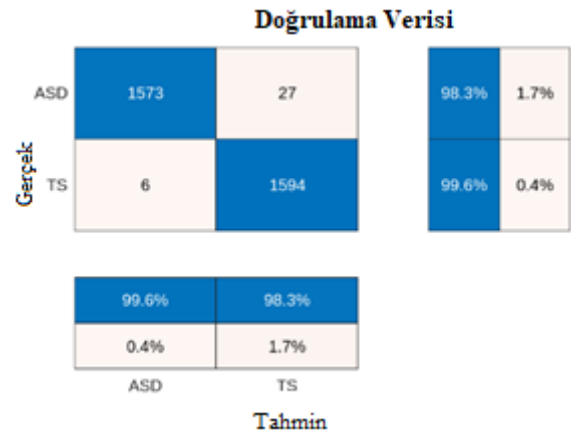
Tablo 6. Adım sayısı=2 Sürü boyutu=2 için başarı değerleri

Pencere Boyutu	Eğitim	Doğrulama	Test
7	95.34	95.59	95.18
6	98.98	98.96	98.62
2	91.15	90.96	90.37
5	<b>98.97</b>	<b>98.96</b>	<b>98.64</b>

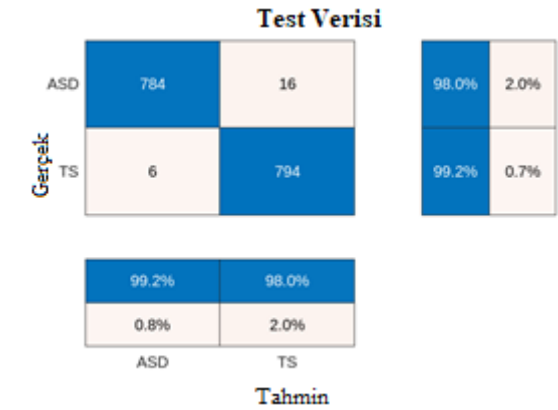
Gözbebeği boyutu ve ilgi alanı özellikleri tasarladığımız modele girdi olarak verilip sürü boyutu ve adım sayılarını uygulamalardaki ile aynı tuttuğumuzda daha iyi oranlar elde edildi. Böylelikle göz bebeği boyutu ve ilgi alanı parametrelerinin sınıflandırmada oldukça etkili özellikler olduğu birkez daha kanıtlanmıştır. En başarılı oran pencere boyutunun 6 gelmesi ile elde edilirken en iyi durumun karmaşıklık matrisi şekil 2.a,2.b,2.c'de gösterilmiştir.



Şekil 2. a) Eğitim Verilerinin Karmaşıklık Matrisi



Şekil 2. b) Doğrulama Verilerinin Karmaşıklık Matrisi



Şekil 2. c) Test Verilerinin Karmaşıklık Matrisi

### Tartışma

Göz izleme ile otizm rahatsızlığını tanımlayabilmek için yapılan bazı çalışmalar ve elde ettikleri sonuçlar tablo 7'de verilmiştir. Farklı verisetleri ve algoritmalar kullanılarak yapılan çalışmalardan daha iyi başarı oranları tarafımızca elde edilmiştir. Göz izleme ile otizm rahatsızlığını tanımlayabilmek için yapılan bazı çalışmalar ve elde edilen sonuçlar tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Farklı veri setleri ile yapılan çalışmalar

Yazarlar	Kullanılan Veriseti	Algoritma	Doğruluk (%)
Romuald Carette,2018 [25]	17 OSB,25TS	UKSB	83
Chen Xia,2020 [26]	31 OSB,43TS	DVM	93
Victoria Yaneva,2020 [27]	20 OSB,20TS	Lojistik Regresyon	75.3
KenjiJ. Tsuchiya,2021 [28]	39 OSB,102TS	Random Forest	78

Literatürde bizimle aynı veriyi kullanan çalışmalar tablo8'de belirtilmiştir. Bu çalışmalar arasında UKSB algoritmasını içeren bir uygulama mevcut değildir. Buna rağmen yapılan uygulamalarla kıyasladığımızda burada da en iyi başarı oranlarına ulaştığımız görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri seti ile yapılmış çalışmaların özeti tablo8'de belirtilmiştir. Bu çalışmalar arasında LSTM algoritmasını içeren bir uygulama mevcut değildir. Elde edilen sonuçlar tablo 8 ile karşılaştırıldığında önerilen yöntemin doğruluk değeri daha yüksek elde edilmiştir.

Tablo 8. Aynı veri setleri ile yapılan çalışmalar

Yazarlar	Kullanılan Veriseti	Algoritma	Doğruluk (%)
Federica Cilia, [29]	29 OSB,30TS	ESA	93
Carette ve ark.) [30]	29 OSB,30TS	Lojistik Regresyon	81.9
Elbattah ve ark. [31]	29 OSB,30TS	Autoencoders	K= 3 için 94
Elbattah ve ark. [31]	29 OSB,30TS	VAE model	70
<b>Önerilen Yöntem</b>	<b>29 OSB,30TS</b>	<b>LSTM</b>	<b>98,64</b>

UKSB ile gerçekleştirdiğimiz uygulamamızda geçmiş göz hareketlerinin hafızaya alınarak değerlendirilmesinin sınıflandırmaya etkisi gözlemlendiğinde oldukça başarılı sonuçlara erişilmektedir. Uygulama 1 ile göz hareketlerine ait tüm özelliklerin kullanılması ile iyi düzeyde sınıflandırmanın

gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Bu başarının oranını belirleyen en önemli faktörün pencere boyutu olduğu ispatlanmıştır.

Pencere boyutu literatürde deneysel yöntemlerle seçilmektedir. Bu duruma çözüm olarak sunulan PSO- UKSB hibrit modeli optimum pencere boyutunu belirleyerek eğitimi gerçekleştirir. Uygulama 1'de tüm özellikler dahil edildiğinde pencere boyutu 13 olduğunda, Uygulama 2'de sınırlı sayıda özellik ile yapılan eğitimde pencere boyutu 5 olduğunda maksimum başarıya ulaşıldı.

Otizm sınıflandırma çalışmasında gözbebeği boyutunun ve ilgi alanı parametrelerinin belirleyici özellikler olduğu bu çalışma ile bir kez daha kanıtlanmaktadır. Özellikle TS bireyleri ayırt etmede bu özelliklerin pozitif etkisinin olduğu görüldü.

Uygulama 1'de mevcut tüm özellikler eğitime dahil edildiğinde OSB'li bireyleri sınıflandırma oranında daha iyi bulgulara ulaşıldı. Bu durum biyolojik parametre sayısı arttıkça otizm rahatsızlığını bulma oranının artacağını göstermektedir.

Göz hareketlerinin veri sayısı maddi sebeplerle hep kısıtlı tutulmaktadır. Bu nedenle derin öğrenme alanında kısıtlı çalışma olması sebebiyle çalışmamız bu alanda öncü olabilecektir.

#### Kaynakça

- [1] Wing, L., & Gould, J. (1979). Severe impairments of social interaction and associated abnormalities in children: Epidemiology and classification. *Journal of autism and developmental disorders*, 9(1), 11-29.
- [2] Loth, E., Spooren, W., Ham, L. M., Isaac, M. B., Auriche-Benichou, C., Banaschewski, T., ... & Murphy, D. G. (2016). Identification and validation of biomarkers for autism spectrum disorders. *Nature reviews Drug discovery*, 15(1), 70-70.
- [3] Volkmar, F. R., Cicchetti, D. V., Dykens, E., Sparrow, S. S., Leckman, J. F., & Cohen, D. J. (1988). An evaluation of the autism behavior checklist. *Journal of autism and developmental disorders*, 18(1), 81-97.
- [4] Schopler, E., Reichler, R. J., DeVellis, R. F., & Daly, K. (1980). Toward objective classification of childhood autism: Childhood Autism Rating Scale (CARS). *Journal of autism and developmental disorders*.
- [5] Ghosh, S., & Guha, T. (2021, November). Towards Autism Screening through Emotion-guided Eye Gaze Response. In 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) (pp. 820-823). IEEE.
- [6] Minissi ME, Chicchi Giglioli IA, Mantovani F, Alcañiz Raya M. Assessment of the Autism Spectrum Disorder Based on Machine Learning and Social Visual Attention: A Systematic Review. *J Autism Dev Disord*. 2022 May;52(5):2187-2202. doi: 10.1007/s10803-021-05106-5. Epub 2021 Jun 8. PMID: 34101081; PMCID: PMC9021060.

- [7] M. Okano and M. Asakawa, "Eye tracking analysis of consumer's attention to the product message of web advertisements and TV commercials," 2017 5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/CITSM.2017.8089270.
- [8] Kang, J., Han, X., Song, J., Niu, Z., & Li, X. (2020). The identification of children with autism spectrum disorder by SVM approach on EEG and eye-tracking data. *Computers in biology and medicine*, 120, 103722.
- [9] Wang, J., Barstein, J., Ethridge, L. E., Mosconi, M. W., Takarae, Y., & Sweeney, J. A. (2013). Resting state EEG abnormalities in autism spectrum disorders. *Journal of neurodevelopmental disorders*, 5(1), 1-14.
- [10] Kang, J., Han, X., Song, J., Niu, Z., & Li, X. (2020). The identification of children with autism spectrum disorder by SVM approach on EEG and eye-tracking data. *Computers in biology and medicine*, 120, 103722.
- [11] Sheikhan, A., Behnam, H., Mohammadi, M. R., Noroozian, M., & Mohammadi, M. (2012). Detection of abnormalities for diagnosing of children with autism disorders using of quantitative electroencephalography analysis. *Journal of medical systems*, 36(2), 957-963.
- [12] Mou, L., Zhou, C., Zhao, P., Nakisa, B., Rastgoo, M. N., Jain, R., & Gao, W. (2021). Driver stress detection via multimodal fusion using attention-based CNN-LSTM. *Expert Systems with Applications*, 173, 114693.
- [13] Kang, J., Zhou, T., Han, J., & Li, X. (2018). EEG-based multi-feature fusion assessment for autism. *Journal of Clinical Neuroscience*, 56, 101-107.
- [14] Kang, J., Zhou, T., Han, J., & Li, X. (2018). EEG-based multi-feature fusion assessment for autism. *Journal of Clinical Neuroscience*, 56, 101-107.
- [15] Stein, N., Bremer, G., & Lappe, M. (2022, March). Eye tracking-based lstm for locomotion prediction in vr. In 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) (pp. 493-503). IEEE.
- [16] A S DiCriscio and V Troiani, "Pupil adaptation corresponds to quantitative measures of autism traits in children," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2017.
- [17] A Klin, W Jones, R Schultz, F Volkmar, and D Cohen, "Visual fixation patterns during viewing of naturalistic social situations as predictors of social competence in individuals with autism," *Archives of General Psychiatry*, vol. 59(9), pp. 809–816, 2002.
- [18] Z Akhtar and T Guha, "Computational analysis of gaze behavior in autism during interaction with virtual agents," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2019, pp. 1075–1079.
- [19] Ghosh, S., & Guha, T. (2021, November). Towards Autism Screening through Emotion-guided Eye Gaze Response. In 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) (pp. 820-823). IEEE.
- [20] Ahmed, I. A., Senan, E. M., Rassem, T. H., Ali, M. A., Shatnawi, H. S. A., Alwazer, S. M., & Alshahrani, M. (2022). Eye tracking-based diagnosis and early detection of autism spectrum disorder using machine learning and deep learning techniques. *Electronics*, 11(4), 530.
- [21] Lakhan, A., Mohammed, M. A., Abdulkareem, K. H., Hamouda, H., & Alyahya, S. (2023). Autism Spectrum Disorder detection framework for children based on federated learning integrated CNN-LSTM. *Computers in Biology and Medicine*, 166, 107539.
- [22] Cilia, F., Carette, R., Elbattah, M., Guérin, J. L., & Dequen, G. (2022). Eye-tracking dataset to support the research on autism spectrum disorder.
- [23] Cetintas, Dilber & Tuncer, Taner. (2021). Eye-Tracking Analysis with Deep Learning Method. 512-515. 10.1109/3ICT53449.2021.9581943.
- [24] Cetintas, Dilber & Tuncer, Taner. (2022). Determining the Type of Document Read Using Eye Movement Properties by Hybrid CNN Method. *Traitement du Signal*. 39. 10.18280/ts.390402.
- [25] R. Carette, F. Cilia, G. Dequen, J. Bosche, J.L. Guerin, L. Vandromme, Automatic Autism Spectrum Disorder Detection Thanks to Eye-Tracking and Neural Network-Based Approach. In: Bastel JB, Ahmed MU, Begum S, "editors'.: Springer Verlag, 2018. p. 75-81.
- [26] C. Xia, K. Chen, K. Li, H. Li (Eds.), Identification of autism spectrum disorder via an eye-tracking based representation learning model 2020 2020-01-01: Association for Computing Machinery.
- [27] V. Yaneva, H. Le An, S. Eraslan, Y. Yesilada, R. Mitkov Detecting High-Functioning Autism in Adults Using Eye Tracking and Machine Learning *Ieee T Neur Sys Reh.*, 28 (6) (2020), pp. 1254-1261.
- [28] K.J. Tsuchiya, S. Hakoshima, T. Hara, et al. Diagnosing Autism Spectrum Disorder Without Expertise: A Pilot Study of 5- to 17-Year-Old Individuals Using Gazefinder *Front. Neurol.*, 11 (2021).
- [29] F. Cilia, R. Carette, M. Elbattah, et al. Computer-Aided Screening of Autism Spectrum Disorder: Eye-Tracking Study Using Data Visualization and Deep Learning *JMIR Hum. Factors*, 8 (4) (2021), p. e27706.
- [30] R. Carette, F. Cilia, G. Dequen, J. Bosche, J.L. Guerin, L. Vandromme, Automatic Autism Spectrum Disorder Detection Thanks to Eye-Tracking and Neural Network-Based Approach. In: Bastel JB, Ahmed MU, Begum S, "editors'.: Springer Verlag, 2018. p. 75-81.
- [31] Elbattah M, Loughnane C, Guérin J-L, Carette R, Cilia F, Dequen G. Variational Autoencoder for Image-Based Augmentation of Eye-Tracking Data. *Journal of Imaging*. 2021; 7(5):83. <https://doi.org/10.3390/jimaging7050083>.



# Tek Fazlı Yarı-Empedans Kaynaklı İnverterlerin Anahtarlama Kaybını Azaltmak İçin Yeni Taşıyıcı Temelli Kontrol Stratejisi

## Novel Carrier-Based Control Strategy for Reduced Switching Losses in Single-Phase Quasi-Impedance Source Inverters

Halil İbrahim Aytekin<sup>\*</sup>, Selim Börekci<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Akdeniz Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, [halilibrahimaytekin@akdeniz.edu.tr](mailto:halilibrahimaytekin@akdeniz.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5650-4417>

<sup>2</sup> Akdeniz Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, [sborekci@akdeniz.edu.tr](mailto:sborekci@akdeniz.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-4118>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 23 Temmuz 2023  
Revizyon 17 Ekim 2023  
Kabul 6 Aralık 2023  
Online 31 Aralık 2023

#### Anahtar Kelimeler:

*Empedans kaynaklı inverter, anahtarlama kayıpları, geçiş kayıpları, Basit artırma darbe genişlik modülasyonu*

### ÖZ

Günümüzde enerji, üretim maliyetlerindeki artış ve fosil kaynakların azalması gibi faktörler nedeniyle giderek daha kritik bir konu haline gelmektedir. Bu durum, doğru akım (DA) güç kaynakları tarafından üretilen enerjinin, son kullanıcılara en verimli şekilde ulaştırılması gerektiği bir sorunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yakıt hücreleri, rüzgar enerjisi ve fotovoltaik enerji gibi doğru akım (DA) güç kaynakları tarafından üretilen enerjiyi, son kullanıcılar için kullanılabilir hale getirmek için güç elektroniği devreleri arasında inverterler yer almaktadır. Aynı şekilde, fotovoltaik sistemlerin daha yüksek verimliliğini sağlamak için maksimum gücün elde edilmesini veya regüle edilmesini sağlayan kontrol yapıları ile iki veya üç aşamalı sistemler gerekmektedir. Empedans kaynaklı inverterler, fotovoltaik panellerden tek aşamada maksimum gücü sağlama ve son kullanıcıya ulaştırma yeteneği nedeniyle geleneksel inverterlere göre avantajlıdır ve en yaygın kullanılan taşıyıcı temelli anahtarlama yapısı "Basit Arttırma Kontrolü" olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, empedans kaynaklı inverterler için anahtarlama sayısını ve buna bağlı olarak ortaya çıkan anahtarlama kayıplarını azaltmaya yönelik taşıyıcı temelli yeni bir anahtarlama yapısı tasarlanmıştır. "Basit Arttırma Kontrolü" yapısından esinlenerek, bu çalışmada mevcut taşıyıcı sinyale paralel yeni bir sinyal kullanılarak anahtarlama sayısı %66 oranında azaltılmış ve çıkış gerilimindeki harmoniklerin frekansları değişmekle birlikte toplam harmonik bozulmasında (THB) değişme olmamıştır. Sonuç olarak, bu yöntem devre anahtarlama elemanları üzerindeki anahtarlama kayıplarını azaltır ve empedans kaynaklı inverterlerin verimliliğini artırma potansiyelini ortaya koyar.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 July 2023  
Received in revised form 17 October 2023  
Accepted 6 December 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

*Impedance source inverter, switching losses, transient losses, simple boost pulse width modulation*

Doi: 10.24012/dumf.1331641

\* Sorumlu Yazar

### ABSTRACT

In today's world, energy is becoming an increasingly critical issue due to factors such as rising production costs and the depletion of fossil resources. This situation poses a challenge in delivering energy generated by direct current (DC) power sources to end-users in the most efficient manner. In this context, inverters play a significant role in converting energy generated from direct current (DC) power sources such as fuel cells, wind energy, and photovoltaic energy into usable form for end-users. Similarly, to achieve higher efficiency in photovoltaic systems, control structures enabling the extraction or regulation of maximum power require two or three-stage systems. Impedance-source inverters, known for their ability to provide maximum power from photovoltaic panels in a single stage and deliver it to end-users, offer advantages over traditional inverters and utilize the widely used carrier-based switching structure known as "Simple Boost Control." In this study, a carrier-based new switching structure has been designed for impedance-source inverters to reduce the number of switching operations and associated switching losses. Inspired by the "Simple Boost Control" structure, in this study, the number of switching was reduced by 66% by using a new signal parallel to the existing carrier signal, and although the frequencies of the harmonics in the output voltage changed, there was no change in the total harmonic distortion (THD). As a result, this method reduces switching losses in circuit switching elements, demonstrating the potential to enhance the efficiency of impedance-source inverters.



## Giriş

İnverterlerin temel amacı, doğru akım (DA) gücü alternatif akım (AA) güce dönüştürmektir. DA güç kaynaklarından biri olan fotovoltaik (PV) panellerinden üretilen enerjinin şebekeye bağlanması ancak inverterler kullanılarak gerçekleştirilebilir. İnverterler, farklı kaynak yapılarına bağlı olarak akım, gerilim ve empedans kaynaklı olmak üzere çeşitli topolojilere sahiptir [1]. PV sistemlerinde en yaygın olarak tercih edilen inverter topolojisi gerilim kaynaklı inverterlerdir [2], [3]. Geleneksel yapılarda, PV sistemlerinden maksimum güç çekilebilmesi (Maximum Power Point Tracker - MPPT) veya düzensiz giriş geriliminin regüle edilmesi için giriş kaynağı ve inverter yapısı arasında DA-DA dönüştürücü veya dönüştürücüler yerleştirilmelidir [4]. Bu durumda DA gerilimden AA gerilim elde edilmesi için inverter dahil en az iki dönüştürücü kullanılması gerekmektedir.

Empedans Kaynaklı İnverter (Impedance Source Inverter - ZSI) ise kullanılan iki dönüştürücünün birleştirilerek kayıpların ve sistemin maliyetinin azaltılabildiği alternatif bir yöntemdir. ZSI, tek bir inverter kullanarak giriş gerilimini yükseltme ve AA formuna dönüştürme işlemini gerçekleştirir, böylece ayrı bir DA-DA dönüştürücüye ihtiyaç duyulmaz [5]–[7]. Basit yapısı, düşük maliyetli olması ve daha az sistem karmaşıklığı gibi özellikleri sayesinde ZSI'lerin, Güç Faktörü Düzeltme (Power Factor Correction - PFC) ve PV uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. ZSI'lerde anahtarlama stratejisi giriş gerilimini yükseltme ve regüle etme işlemini tek dönüştürücü yapısıyla yapabilmesine olanak sağlamaktadır [8]–[14]. Ancak, kullanılan anahtarlama stratejileri ekstra kayıplara neden olabilmektedir.

ZSI'lerin toplam kayıp analizi yapıldığında, yarıiletken kayıplarının diğer kayıplara kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir [15]. Bu nedenle, yapılan çalışmalar yarıiletken kayıplarını azaltmak üzerine yoğunlaşmaktadır. Yeni nesil ve yüksek performanslı yarıiletkenlerin kullanımıyla anahtarlama kayıpları azaltılabilmektedir [16]–[18]. Ancak, bu teknolojilerin endüstriyel kullanım alanı sınırlı olup, ekonomik açıdan karlı değildir. Bunun yanında geleneksel yarıiletkenler kullanılarak modülasyon tekniklerinde yapılan iyileştirmelerle de anahtarlama kayıpları azaltılabilmektedir [19]–[26]. Özellikle üç fazlı sistemlere özel modülasyon yöntemleri ve algoritmalarının uygulanmasıyla anahtarlama kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir [19]–[22]. Benzer şekilde, tek fazlı sistemlerde, taşıyıcı temelli sinüzoidal darbe genişlik modülasyon (Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM) stratejilerinin uygulanmasıyla anahtarlama kaybı azaltılmış ve sistem verimi iyileştirilmiştir [23]–[25].

ZSI'lerde taşıyıcı temelli anahtarlama yönteminde, yarıiletken kaybının toplam kayba oranı, 3kHz ve 8kHz anahtarlama frekanslarında sırasıyla %48,5 ve %85 olarak gözlemlenmiştir [15]. Yarıiletken kayıpları, yarıiletken anahtarın açılıp kapanması oluşan geçiş kayıpları ve iletim durumunda oluşan kayıplar olarak değerlendirildiğinde, geçiş kaybının toplam yarıiletken kaybına oranı %90 olarak

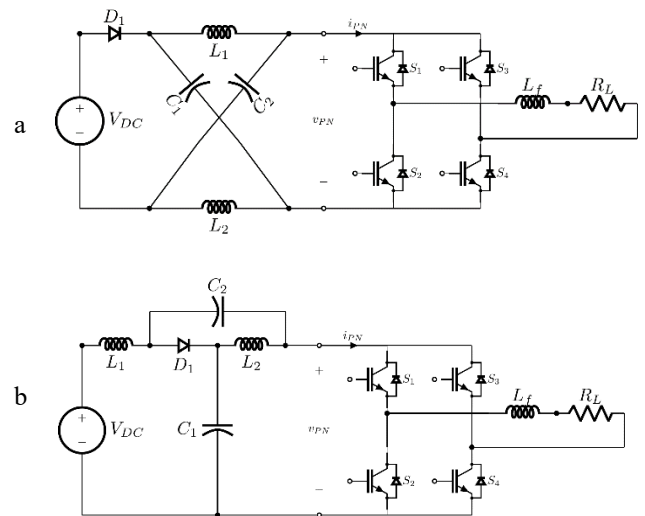
hesaplanmıştır [27]. Geçiş kayıpları, toplam anahtarlama sayısına bağlı olarak önemli ölçüde artmaktadır [15].

Geleneksel tek fazlı gerilim kaynaklı inverter yapılarında, inverterde kullanılan dört yarıiletkenin sadece ikisinin yüksek frekansta anahtarlama yapılması, inverterin daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır [28]. Bir başka çalışmada da yüksek ve düşük frekansta anahtarlama (High and Low Frequency Switching - HLFS) SPWM topolojisi olarak adlandırılan iki frekanslı inverter yapısı, geleneksel ZSI kontrol yöntemine uyarlanmış ve toplam anahtarlama sayısı %50 oranında azaltılmıştır [25].

Bu çalışmada, diğer yöntemlerden farklı olarak, geleneksel ZSI kontrol yönteminde kullanılan taşıyıcı dalga yapısının geliştirilmesiyle Shoot-Through (ST) ve SPWM anahtarlama görevleri bütünleştirilerek yeni bir HLFS yöntemi geliştirilmiştir. Bu sayede inverterdeki anahtarlama sayısı önemli ölçüde azaltılarak yarıiletken kaynaklı kayıpların da azaltılması hedeflenmiştir. Çalışmada, ZSI ile aynı anahtarlama yapılarıyla kontrol edilebilen yarı-empedans kaynaklı inverter (Quasi Impedance Source Inverter - Q-ZSI) devre yapısı tercih edilmiştir [6].

## Yarı-Empedans Kaynaklı İnverterlerin Çalışma Prensipleri

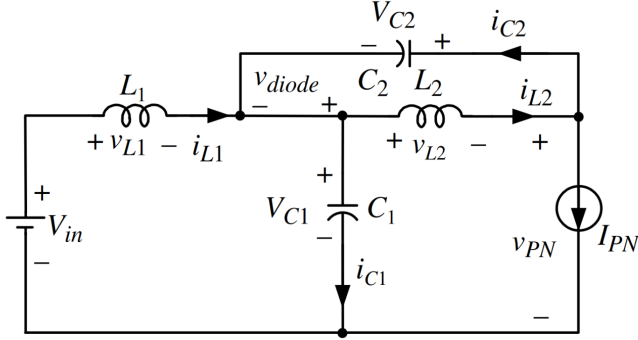
Geleneksel inverter uygulamalarında, giriş geriliminin çıkış gerilimine oranla daha yüksek seviyede olması gerekir. Düşük bir giriş gerilimi durumunda veya PV sistemlerde MPPT yapılması gerektiğinde, sistem maliyeti ve karmaşıklığını artıran bir DA-DA dönüştürücü gerekmektedir. Bunun yerine, ZSI ve Q-ZSI topolojilerin sahip olduğu empedans yapısıyla birlikte, çıkış gerilimi tek aşamada artırabilmektedir. Bu empedans yapısı, iki bobin, iki kondansatör ve bir diyottan oluşur. Şekil 1.a ve Şekil 1.b'de sırasıyla ZSI ve Q-ZSI topolojileri ve empedans yapısı gösterilmektedir [29], [30].



Şekil 1. a) Empedans kaynaklı inverter (ZSI). b) Yarı-Empedans kaynaklı inverter (Q-ZSI).

ZSI ve Q-ZSI, giriş ve çıkış formüllerine göre eşdeğerdir. Ancak Q-ZSI topolojisi, kondansatör boyutunu azaltma ve giriş bobininden sürekli akım çekebilme gibi avantajlara

sahiptir. Q-ZSI, güneş panelleri ve yakıt hücreleri gibi kaynaklardan sürekli olarak akım çekebilme özelliği sayesinde bu kaynak ömrünü azaltmadan kullanmayı sağlar. ZSI ailesi DA bara gerilimini ( $V_{PN}$ ) artırmak için belirli bir çalışma oranında (Duty Ratio -D) Shoot-Through (ST) durumuna girmelidir. ST durumu, aynı anda bir veya iki köprü bacağına kısa devre olması durumuna verilen isimdir ve III. bölümde daha detaylı olarak açıklanacaktır (Şekil 2) [29].



Şekil 2. ST durumu

Giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişki, çalışma oranına bağlı olarak temel ifadesi denklem 8 deki gibidir [29]. Bir anahtarlama periyodu ( $T$ ) sırasında, ST durumunun aralığı  $T_0$  ve ST olmayan durumun aralığı  $T_1$  olarak kabul edilmiştir. ST olmayan  $T_1$  sırasında devre yapasındaki bobin ve kondansatörler üzerindeki gerilimler Denklem 1 ve 2’de verilmiştir. ST durumu  $T_0$  sırasında devre yapasındaki bobin ve kondansatörler üzerindeki gerilimler Denklem 3 ve 4’te verilmiştir.

$$v_{L1} = V_{in} - V_{C1}, \quad v_{L2} = -V_{C2} \quad (1)$$

$$v_{PN} = V_{C1} - v_{L2} = V_{C1} + V_{C2}, \quad v_{diode} = 0 \quad (2)$$

$$v_{L1} = V_{C2} + V_{in}, \quad v_{L2} = V_{C1} \quad (3)$$

$$v_{PN} = 0, \quad v_{diode} = -(V_{C1} + V_{C2}) \quad (4)$$

Kararlı durumda, bir anahtarlama periyodu boyunca indüktörlerin ortalama gerilimi sıfırdır. Denklem 1, 2, 3, 4’ün birleştirilmesiyle Denklem 5 ve 6 elde edilir.

$$V_{L1} = \bar{v}_{L1} = \frac{T_0(V_{C2} + V_{in}) + T_1(V_{in} - V_{C1})}{T} = 0 \quad (5)$$

$$V_{L2} = \bar{v}_{L2} = \frac{T_0(V_{C1}) + T_1(-V_{C2})}{T} = 0 \quad (6)$$

$T_0/T$  yerine  $D$  ve  $T_1/T$  yerine  $(1-D)$  yazıldığında, kapasitörler üzerindeki gerilim değerleri elde edilir (Denklem 7).

$$V_{C1} = \frac{1-D}{1-2D} V_{in}, \quad V_{C2} = \frac{D}{1-2D} V_{in} \quad (7)$$

$$V_{PN} = V_{C1} + V_{C2} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{in} = \frac{1}{1-2D} V_{in} = BV_{in} \quad (8)$$

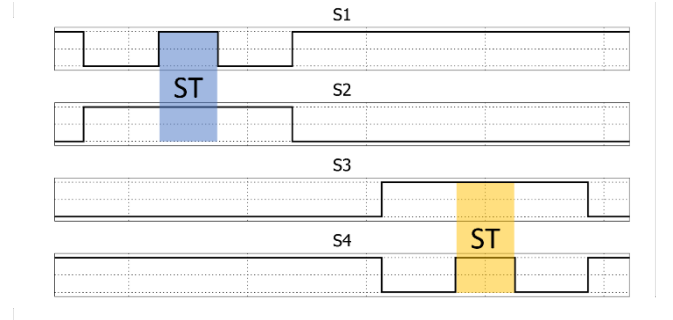
İnverter giriş  $V_{in}$  ile DC bara gerilimi  $V_{PN}$  arasındaki ilişki Denklem 8’deki gibi ifade edilmiştir. İkisi arasındaki oran yükseltme faktörü (Boost - B) olarak adlandırılır. Bu değer ST’nin anahtarlama periyodu içerisindeki çalışma oranı ( $D$ ) ve modülasyon indeksine ( $M$ ) bağlıdır (Denklem 9). ST durumuna izin verilen maksimum süre  $1-M$  kadar olabilir. Buna bağlı olarak  $D$  değeri,  $1-M$  e eşit veya daha küçük değerler olabilir (Denklem 10).

$$B = \frac{v_{pn}}{v_{in}} = \frac{1}{1-2D} \quad (9)$$

$$D \leq 1 - M \quad (10)$$

## Yarı-Empedans Kaynaklı İnverterler İçin Anahtarlama Kontrol Stratejileri ve Kayıları

Tüm geleneksel PWM anahtarlama metotları Q-ZSI’lerin kontrolü için ST çalışma oranına uygun uyarlanarak kullanılabilir. Q-ZSI kontrolünde üç farklı anahtarlama durumu bulunmaktadır. Bunlar aktif durum, ST olmayan (Non-Shoot-Through - NST) sıfır durumu ve ST sıfır durumudur. Aktif durum ve NST sıfır durumu geleneksel VSI ile aynı şekilde kontrol edilir. ST durumu, en az bir köprü bacağına kısa devre olması durumunda oluşur. Şekil 3’te dört yarı iletken  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$  ve  $S4$  olarak tanımlanmış olup, bunların açık ve kapalı durumları basitçe gösterilmiştir.

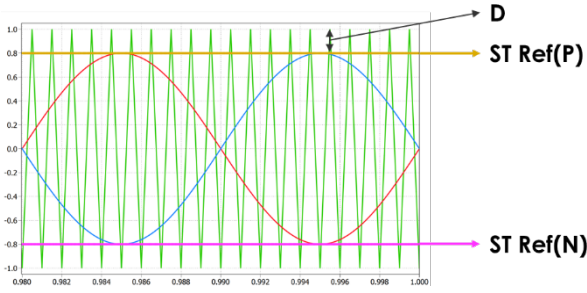


Şekil 3. ST durumu anahtarlama

Q-ZSI devrelerinin çalışmasında ST durumunu doğru bir şekilde yönetmek oldukça önemlidir. Doğru yöntemlerle Q-ZSI devresi, verimli bir şekilde çalıştırılabilir ve istenilen çıkış gerilimi ve akımını sağlayabilir. En çok kullanılan taşıyıcı temelli kontrol yöntemi basit artırma kontrolüdür.

### Basit Artırma Kontrolü

Basit artırma darbe genişlik modülasyonu (Simple Boost Pulse Width Modulation - SBPWM) yöntemi ST durumunu yönetmek için kullanılan geleneksel taşıyıcı temelli kontrol stratejilerinden biridir. SBPWM’de, geleneksel tek kutuplu (Unipolar) taşıyıcı temelli karşılaştırma yapısı kullanılır. Ancak SBPWM, ST durumlarının anahtarlama için Şekil 4 te gösterildiği gibi fazlardan pozitif/negatif ST referans çizgileri eklenmelidir. Bu referans çizgileri, denklem 10’daki istenen gerilimi sağlayacak şekilde  $\pm(1-D)$  olarak belirlenir.



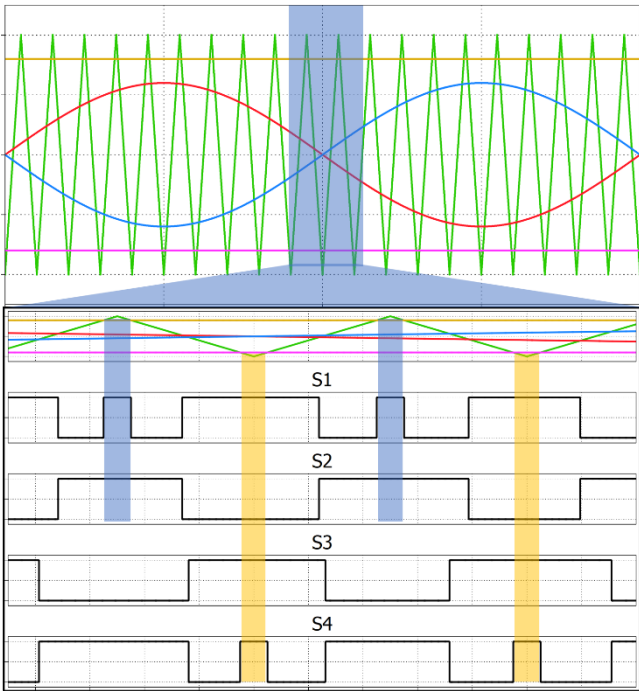
Şekil 4. SBPWM yapısında pozitif ve negatif ST referans çizgileri

SBPWM yönteminin anahtarlama şeması Tablo 1' deki gibidir.

Tablo 1. SBPWM yöntemi anahtarlama şeması.

Yarı İletken	Anahtarlama Koşulu
S1	$(V_{SINE} > V_{TRI}) \vee ((ST Ref(P) < V_{TRI}))$
S2	$V_{SINE} < V_{TRI}$
S3	$-V_{SINE} > V_{TRI}$
S4	$(-V_{SINE} < V_{TRI}) \vee ((ST Ref(N) > V_{TRI}))$

Şekil 4 ve Tablo 1'deki anahtarlama şartlarının sağlanması durumunda, ST referans çizgilerinin anahtarlama yapısına etkisi Şekil 5'da detaylı olarak gösterilmektedir.

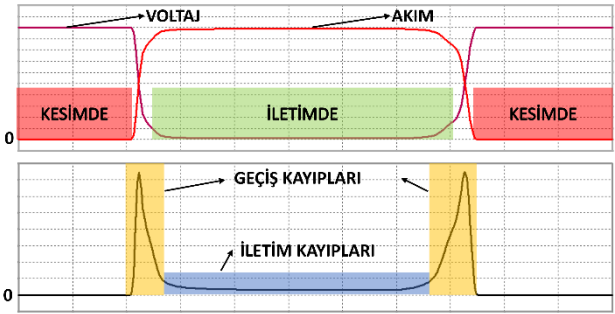


Şekil 5. SBPWM detaylı gösterimi

SBPWM de ST yapabilmek için bütün anahtarlar aynı anda kısa devre yapılabilmektedir. Bunun sonucunda anahtarlama sayısında ve toplam anahtarlama kaybında artış meydana gelmektedir. Anahtarlama sayısını düşürmek için ST'nin sadece inverterin bir bacağına gerçekleşmesi yeterlidir. Bu durumda yarı iletkenlerin toplam anahtarlama sayısı Denklem 11 verilmiştir. (Şekil 5). Anahtarlama kayıplarını minimize etmek, sistem verimliliğini artırmak için önemlidir.

$$\text{Anahtarlama Sayısı} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \cdot 4 = 6 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \quad (11)$$

Anahtarlama kayıpları, güç elektroniği uygulamalarında kullanılan yarıiletken anahtarlar üzerindeki frekans ve gerilim değişimleri nedeniyle meydana gelen kayıplardır. Şekil 6'de, basit bir anahtarlama akım-gerilim grafiği ve bu grafikte ilişkili olarak oluşan anahtarlama kayıpları gösterilmiştir.



Şekil 6. Mosfet anahtarlama kayıpları

Şekil 6 görüldüğü gibi anahtarlama kayıpları kapalı durum (OFF) kayıpları, iletim kayıpları ve geçiş kayıpları olarak üç farklı durumda meydana gelir. Yarıiletkenlerin kapalı durumundaki yüksek direnç değerleri sayesinde "Kapalı durum kayıpları" sıfır olarak kabul edilir. İletim kayıpları, yarı iletken cihazların devamlı iletimde durması nedeniyle ortaya çıkan kayıplardır. Aynı şartlarda çalışan inverterler için, anahtarlama yöntemi veya frekansından bağımsız olarak iletim kayıpları teorik olarak aynıdır [21]. Geçiş kayıpları ise yarıiletken anahtarların açma kapama yaparken geçiş esnasında kısa süreli olarak oluşan ve yüksek güç harcamasına neden olan kayıplardır. Yarıiletken geçiş kaybının toplam yarıiletken kaybına etkisi diğerlerine kıyasla çok yüksektir [27].

Geçiş kaybı, yarıiletken anahtarların yüksek frekanslı anahtarlama sonucu oluşur. Geçiş kaybının tam hesaplanması  $p(t) = v(t) \cdot i(t)$  formülü ile mümkün olsa da  $v(t)$ ,  $i(t)$  fonksiyonları ve toplam kayıp; besleme gerilimi, anahtarlama frekansı, anahtarlama hızı, yarı iletken malzemenin tipi, güç değeri gibi çok sayıda faktöre bağlıdır.

SBC yönteminin ZSI'lerdeki kullanımında yarıiletkenlerin geleneksel anahtarlama esnasında gerçekleşen geçiş kaybı, anahtardan geçen akım ve anahtar üzerindeki gerilimine bağlıdır. Bu kayıp ortalama  $P_{tr_{trad}}$  olarak tanımlanmıştır. ST durumunda gerçekleşen geçiş kaybı, kısa devre akımına bağlıdır ve  $P_{tr_{ST}}$  olarak ifade edilir. Anahtarlama frekansı  $F_{SW}$ , temel frekans ise  $F_{Fund}$  olarak tanımlandığında bir tam periyotta gerçekleşen toplam geçiş kayıpları Denklem 12 ve 13'teki gibi ifade edilir.

$$P_{tr_{trad\_TOTAL}} = 4 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \cdot P_{tr_{trad}} \quad (12)$$

$$P_{tr_{ST\_TOTAL}} = 2 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} P_{tr_{ST}} \quad (13)$$

Toplam kayıp denklem 12 ve 13 toplanmasıyla denklem 14'teki gibi ifade edilebilir.

$$P_{tr_{TOTAL}} = 4 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \cdot P_{tr_{rad}} + 2 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \cdot P_{tr_{ST}} \quad (14)$$

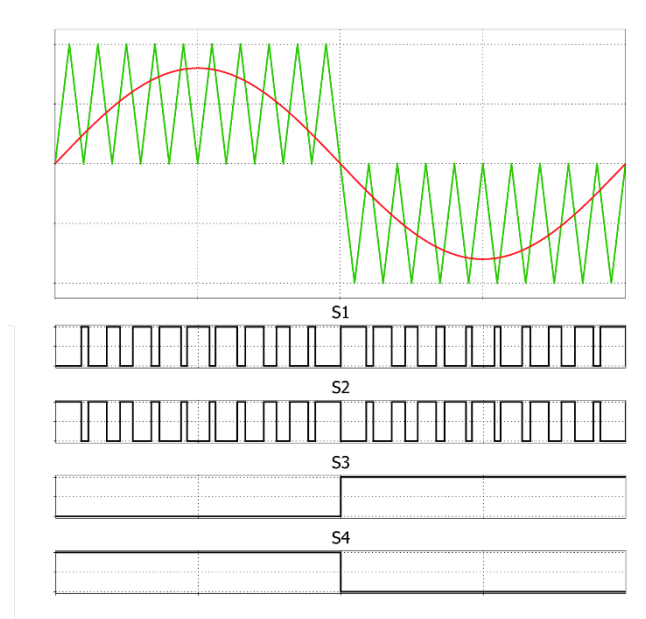
Tek fazlı geleneksel inverterlerdeki dört yarıiletken toplam geçiş kayıpları denklem 12'deki gibi hesap edilir. Buna ek olarak Şekil 5'da görüldüğü gibi ZSI anahtarlama kontrolünde kullanılan SBPWM yönteminde, sadece iki yarıiletken ST durumunda çalışmaktadır. Bu durumda oluşan toplam geçiş kayıpları Denklem 13'te ifade edildiği gibidir. SBPWM yöntemi ile kontrol edilen bir ZSI'nin toplam geçiş kaybını Denklem 14 kullanılarak hesaplandığında, geleneksel inverterlere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

### Yüksek ve Düşük Frekansta Anahtarlama Kontrolü

HLFS, toplam anahtarlama sayısını azaltmaya yönelik kullanılan anahtarlama kontrol yöntemlerinden biridir. Yalnızca bir çift yarıiletken anahtarlama frekansında çalışırken diğer çift ise modüle edilmiş sinüsün frekansında çalışır. Bu yöntemde yarıiletkenlerin anahtarlama koşulları Tablo 2 verildiği gibidir, bu durumda oluşan anahtarlama sinyalleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tablo 2. HLFS Unipolar PWM yöntemi anahtarlama koşulları

Yarı İletken	Anahtarlama Koşulu
S1	$V_{SINE} > V_{TRI}$
S2	$V_{SINE} < V_{TRI}$
S3	$V_{SINE} < 0$
S4	$V_{SINE} > 0$

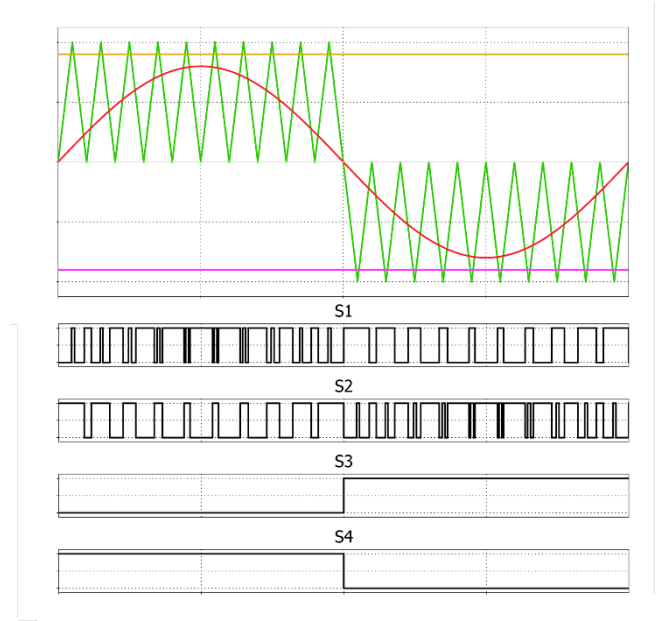


Şekil 7. HLFS unipolar PWM

HLSF yöntemini ZSI'lere uyarlanması, pozitif/negatif ST referans çizgilerinin Şekil 9'daki gibi eklenmesi ile sağlanabilmektedir. Böylelikle ST durumu invertere uygulanmış olur. Bu yöntemdeki ise yarıiletkenlerin anahtarlama koşulları Tablo 3'teki gibidir.

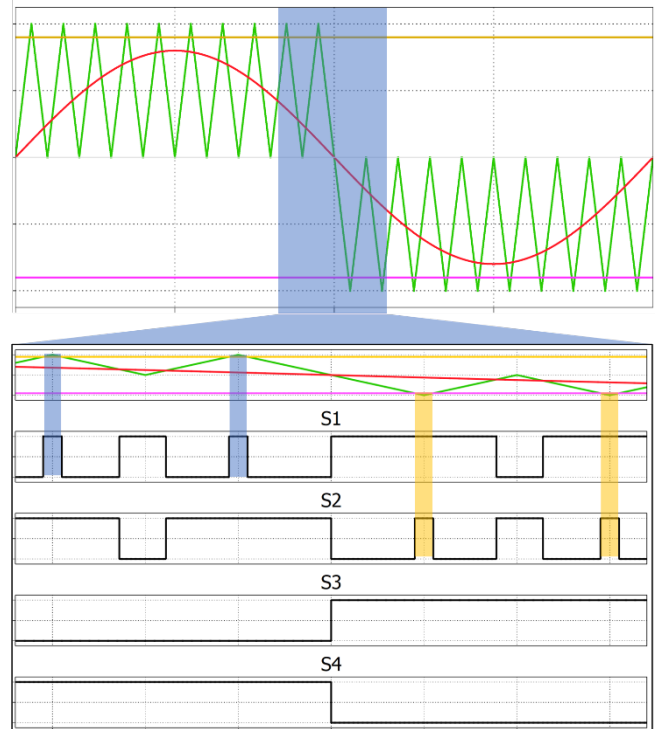
Tablo 3. HLFS yöntemi ve ST durumu anahtarlama koşulları

Yarı İletken	Anahtarlama Koşulu
S1	$(V_{SINE} > V_{TRI}) \vee (ST Ref(P) < V_{TRI})$
S2	$(V_{SINE} < V_{TRI}) \vee (ST Ref(N) > V_{TRI})$
S3	$V_{SINE} < 0$
S4	$V_{SINE} > 0$



Şekil 8. HLFS yöntemi ST durumunun eklenmesi

Şekil 8'deki anahtarlama yapısı Şekil 9'da zaman aralığı daraltılarak ST durumlarının yerleşimi daha detaylı gösterilmiştir.



Şekil 9. HLFS ST durumu detay



HLSF yönteminde geçiş kayıpları yük ve ST durumuna bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{tr_{rad\_TOTAL}} = 2 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \cdot P_{tr_{rad}} \quad (15)$$

$$P_{tr_{ST\_TOTAL}} = (\text{iki adet}) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} P_{tr_{ST}} = \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} P_{tr_{ST}} \quad (16)$$

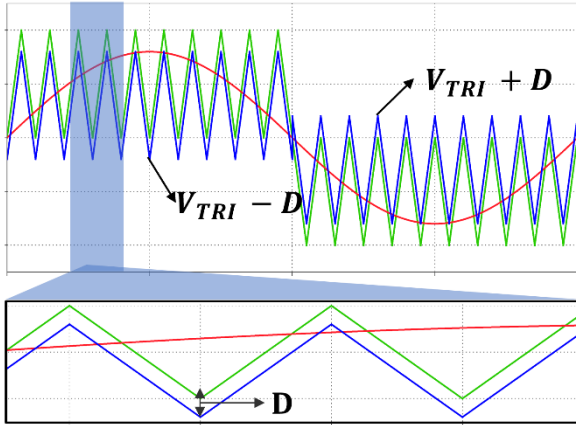
Dört yarıiletken için de toplam geçiş kaybı denklem 15 ve 16 toplanmasıyla Denklem 17 edilebilir. HLFS yöntemine ST durumunun eklenmesi ile SBPWM yöntemine göre geçiş kayıplarının yarı yarıya azalmaktadır [25].

$$P_{tr_{TOTAL}} = 2 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} \cdot P_{tr_{rad}} + \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} P_{tr_{ST}} \quad (17)$$

### Önerilen Anahtarlama Yöntemi

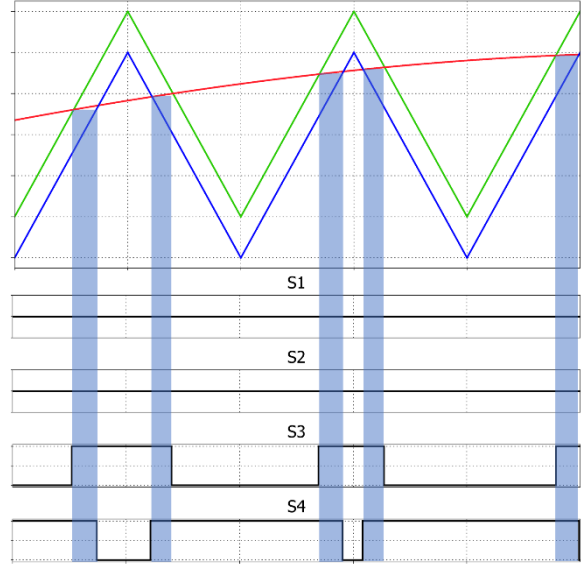
Bu çalışmada, anahtarlama sayısının geleneksel yöntemle göre azaltılması amacı ile geleneksel anahtarlama yöntemine iki yeni özellik eklenmiştir. Bunlardan ilki Bölüm 3'te de anlatılan HLSF yöntemi olup, anahtarlama sayısının yarıya düşmesi sağlanmıştır (Denklem 7).

İkinci özellik ise geleneksel yöntemdeki anahtarlama düzenine ek olarak uyarlanmış ST referans çizgilerinin kullanılmasıdır. Mevcut taşıyıcı sinyaline paralel, M'ye bağlı ve D kadar ötelenmiş ikinci bir taşıyıcı sinyali ekleyerek ST durum kontrolü sağlanmıştır (Şekil 10).



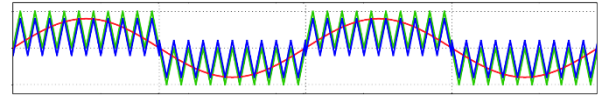
Şekil 10. Önerilen Yöntem

Böylelikle yarıiletkenlerin durumu değiştirilmeden ST durumu oluşturulmuştur. Bu durum Şekil 12'de iki yarı iletkende yavaş anahtarlama diğer ikisinde ise sadece hızlı anahtarlama yapıldığı ve ST durumu için artı bir anahtarlama yapılmadığı açıkça görülmektedir.



Şekil 11. Önerilen yöntem ST durumu

Yarı iletkenler üzerindeki kayıplara bağlı ısınmayı eşit olarak yayabilmek için her temel frekansta, hızlı ve yavaş anahtarların yer değiştirilmiştir (Şekil 12). Böylelikle önerilen yöntem ile ST durum, anahtarın aktif durumunda gerçekleşmekte ve ısının eşit dağılımı sağlanmaktadır.



S1	1	Vsin < Vtri	Vsine > Vtri - D	0
S2	0	Vsin > Vtri + D	Vsin < Vtri	1
S3	Vsin < Vtri	1	0	Vsin > Vtri + D
S4	Vsin > Vtri - D	0	1	Vsin < Vtri

Şekil 12. Önerilen yöntemin zamana bağlı anahtarlama koşulları

Önerdiğimiz anahtarlama kontrol yöntemi taşıyıcı temelli ve basit yapılıdır. Önerilen yöntem ile SBPWM'e kıyasla üçte iki daha az anahtarlama yapılmakta olup anahtarlama esnasında oluşacak kayıplar büyük ölçüde azalmaktadır.

$$P_{tr_{rad\_TOTAL}} = 0 \quad (18)$$

$$P_{tr_{ST\_TOTAL}} = 2 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} P_{tr_{ST}} \quad (19)$$

Anahtarlama esnasında meydana gelen toplam geçiş kaybı Denklem 18 ve 19 toplanmasıyla elde edilebilir. Bu yöntemde yarıiletkenler sadece ST durumunda açılıp kapandığı için geçiş kayıplarını etkileyen akım ST akımıdır. Böylelikle toplam geçiş kaybı Denklem 20'deki gibi hesap edilir.

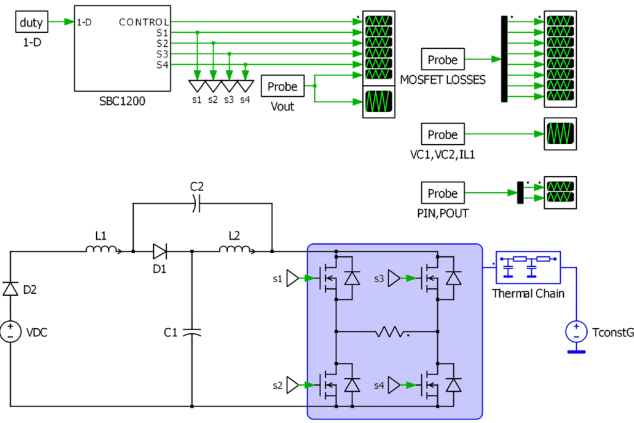
$$P_{trTOTAL} = 2 \cdot \frac{F_{SW}}{F_{Fund}} P_{trST} \quad (20)$$

## Simülasyon ve Sonuçları

Önerilen anahtarlama kontrol yöntemini SBPWM ile kıyaslamak için PLECS programında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Tasarlanan devrenin parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Simulasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Giriş Gerilimi $V_{DC}$	60V
Temel frekans $F_{Fund}$	50Hz
Anahtarlama frekansı $F_{SW}$	10kHz
Maksimum görev oranı D	0.4
Modülasyon indeksi M	1-D
Mosfet iletim direnci $R_{DS\_ON}$	0.55 $\Omega$
Bobinler $L_1, L_2$	10mH
Kapasitörler $C_1, C_2$	470 $\mu$ F
Yük direnci $R_{YÜK}$	560 $\Omega$

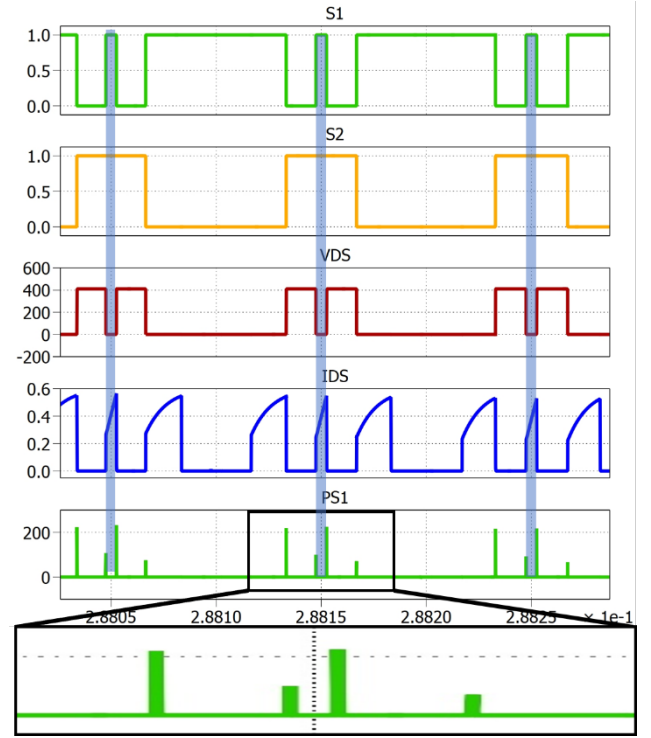


Şekil 13. PLECS devre modeli

Simülasyonda SBPWM yöntemi ile önerilen kontrol yöntemi aynı devreye uygulanmıştır. İki yöntemin karşılaştırılması için sabit yük direnci üzerinde sadece D değiştirilerek verim analizi ve geçiş kaybı hesabı yapılmıştır. Denklem 10'da belirtilen koşulu sağlamak için M değeri her D değeri için 1-D'ye sabitlenmiştir. Bobin ve kapasitör değerleri hesaplanırken mevcut çalışmalardan yararlanılmıştır [30].

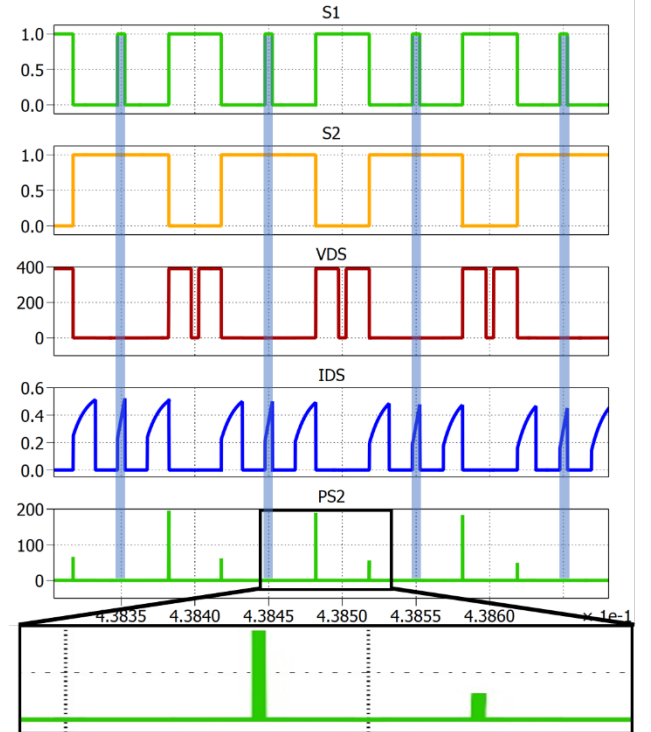
Toplam anahtarlama sayısı ve geçiş kaybı ele alındığında Bölüm 3 ve Bölüm 4'teki eşitliklerle uyumlu olduğu görülmektedir.

SBPWM yönteminde S1 ve S2 anahtarlarının bulunduğu koldaki kayıpları gösteren sonuçlar diğer kol içinde geçerli olacaktır. S1 anahtarı üzerinde meydana gelen geçiş kayıpları Şekil 14'te detaylı olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi S1 anahtarı iki farklı  $I_{DS}$  akımı ile her bir anahtarlama periyodunda iki defa açılıp kapanmaktadır.  $I_{DS}$  akımlarından ilki çıkışa doğru akarken ikincisi ST kısa devre akımı olarak akmaktadır.



Şekil 14. SBPWM yönteminde S1 mosfeti üzerindeki geçiş kaybı

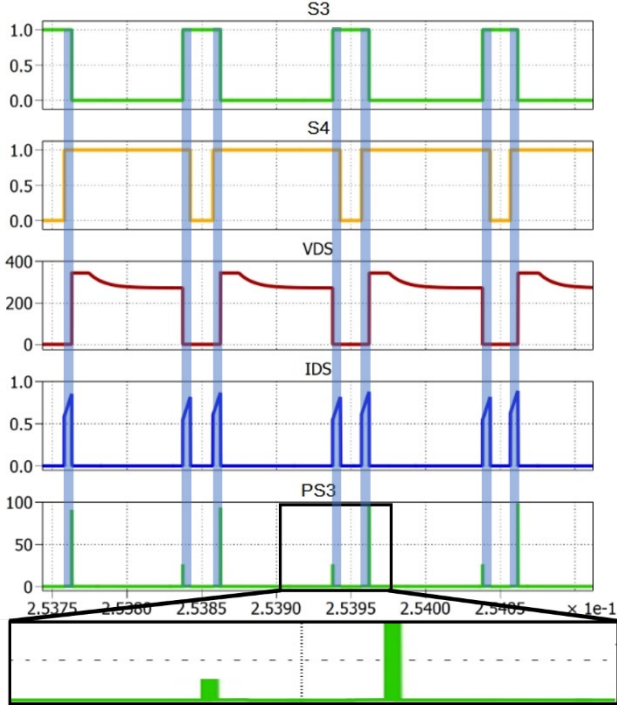
S2 anahtarı üzerinde meydana gelen geçiş kayıpları Şekil 15'da detaylı gösterilmiştir. Burada da S2 anahtarı her bir anahtarlama periyodunda bir defa kapanıp açılmaktadır.  $I_{DS}$  akımı çıkışa doğru akmaktadır.



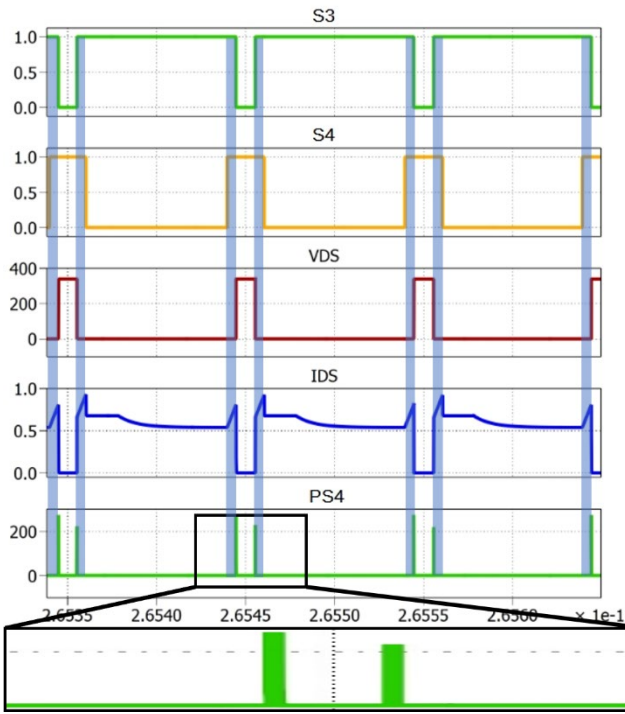
Şekil 15. SBPWM yönteminde S2 mosfeti üzerindeki geçiş kaybı

Şekil 14 ve Şekil 15'dan yola çıkarak diğer anahtarlar için de değerlendirme yapıldığında, simülasyonda ortaya çıkan toplam geçiş kaybı denklem 14 ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Anahtarlama hızları yönünden değerlendirildiğinde ise S1 ve S2'nin düşük hızda S3 ve S4'ün yüksek hızda anahtarlandığı Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmiştir.



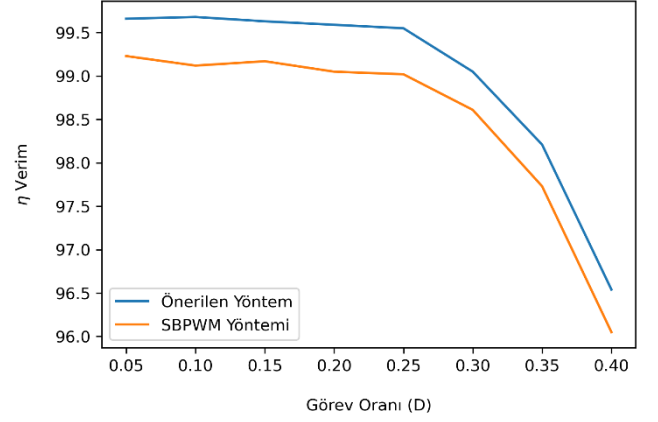
Şekil 16. Önerilen yöntem S3 mosfeti üzerindeki geçiş kayıpları



Şekil 17. Önerilen yöntem S4 mosfeti üzerindeki geçiş kayıpları

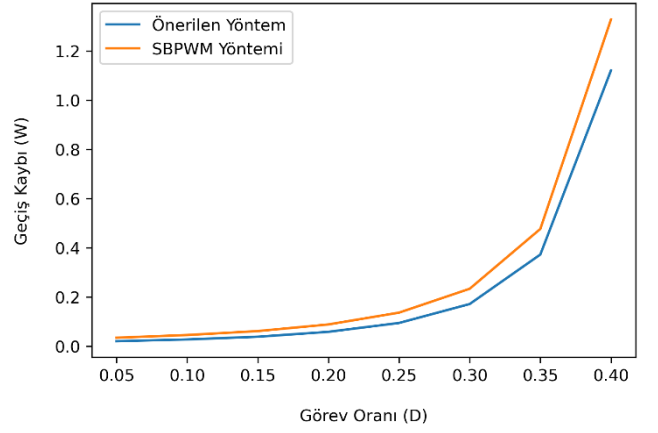
Şekil 16 ve Şekil 17'de S3 ve S4 anahtarlarının ikisinde de  $I_{DS}$  akımının sadece ST den kaynaklanan kısa devre akımı olduğu görülmektedir. Bu esnada S1 ve S2 anahtarları düşük frekansta anahtarlandığından, oluşan toplam geçiş kaybı Denklem 20'yi sağlamaktadır.

ST çalışmada, yalnızca görev oranı D değerinin değiştirilmesi ile önerilen kontrol yöntemin SBPWM yöntemine göre sistemin daha verimli çalışmasını sağlamıştır. Her iki kontrol yöntemi sonucu elde edilen sistem verim grafiği görev oranına bağlı olarak Şekil 18'da gösterilmektedir.



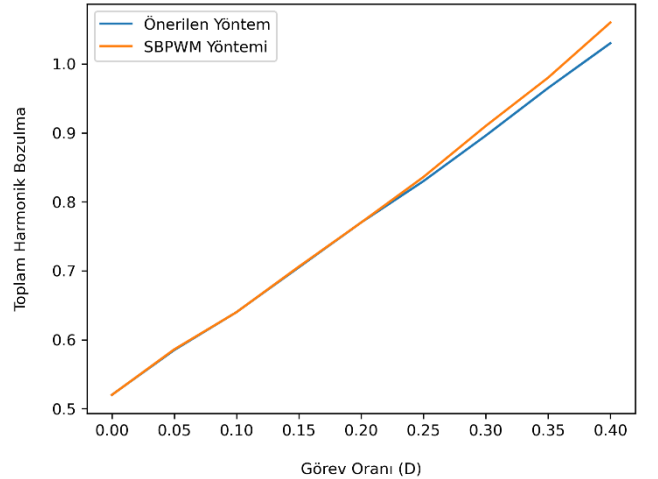
Şekil 18. Simülasyon çıktılarına göre toplam verim analizi

Önerilen yöntemin toplam geçiş kaybının SBPWM yöntemden daha az olduğu Şekil 19'de gösterilmektedir.



Şekil 19. Simülasyon çıktılarına göre toplam geçiş kaybı

Şekil 20'de gösterilen Toplam Harmonik Bozulma (THB) değerleri ile de önerilen yöntemin çıkış sinyalinde SBPWM yöntemine göre bir bozulma olmadığı ölçülmüştür.



Şekil 20 Simülasyon çıktılarına göre THB değerleri



## Sonuçlar ve Tartışma

Tablo 4’te özellikleri verilen devrede bir temel periyotta (20ms) SBPWM yöntemi ile 1200 adet anahtarlama yapılmaktadır. Aynı sürede SBPWM yerine önerilen yöntem kullanıldığında toplam anahtarlama sayısı 400’dür. Önerilen yöntemde anahtarlama geçiş kayıpları yalnızca D’ye bağlı olarak değişmekte olup SBPWM yöntemine göre % 15.61 ile %40.34 arasında daha az ölçülmüştür. Toplam anahtarlama sayısı SBPWM yöntemine göre % 66 oranında azaltılmış ve çıkış gerilimindeki harmoniklerin frekansları değişmekle birlikte THB değerinde değişme olmamıştır.

Sonuç olarak anahtarlama sayısı ve buna bağlı olarak geçiş kayıpları önemli oranda azaltılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi ile simülasyon sonuçlarına göre toplam sistem verimi ortalama % 0.5 artmıştır.

## 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] N. Vázquez ve J. V. López, “11 - Inverters”, içinde *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)*, M. H. Rashid, Ed., Butterworth-Heinemann, 2018, ss. 289-338. doi: 10.1016/B978-0-12-811407-0.00011-8.
- [2] S.-H. Lee, S.-G. Song, S.-J. Park, C.-J. Moon, ve M.-H. Lee, “Grid-connected photovoltaic system using current-source inverter”, *Solar Energy*, c. 82, sy 5, ss. 411-419, May. 2008, doi: 10.1016/j.solener.2007.10.006.
- [3] S. Samerchur, S. Premrudeepreechacharn, Y. Kumsuwun, ve K. Higuchi, “Power control of single-phase voltage source inverter for grid-connected photovoltaic systems”, içinde *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Phoenix, AZ, USA: IEEE, Mar. 2011, ss. 1-6. doi: 10.1109/PSCE.2011.5772504.
- [4] J. Bauer, “Single Phase Voltage Source Inverter Photovoltaic Application”, *Acta Polytech*, c. 50, sy 4, Oca. 2010, doi: 10.14311/1217.
- [5] Fang Zheng Peng, “Z-source inverter”, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, c. 39, sy 2, ss. 504-510, Mar. 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.808920.
- [6] J. Anderson ve F. Z. Peng, “Four quasi-Z-Source inverters”, içinde *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece: IEEE, Haz. 2008, ss. 2743-2749. doi: 10.1109/PESC.2008.4592360.
- [7] B. Farhangi ve S. Farhangi, “Comparison of z-source and boost-buck inverter topologies as a single phase transformer-less photovoltaic grid-connected power conditioner”, içinde *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, Korea: IEEE, 2006, ss. 1-6. doi: 10.1109/PESC.2006.1711742.
- [8] Miaosen Shen, Jin Wang, A. Joseph, F. Z. Peng, L. M. Tolbert, ve D. J. Adams, “Maximum constant boost control of the Z-source inverter”, içinde *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, Seattle, WA, USA: IEEE, 2004, ss. 142-147. doi: 10.1109/IAS.2004.1348400.
- [9] F. Z. Peng, M. Shen, ve Z. Qian, “Maximum Boost Control of the Z-Source Inverter”, *IEEE Trans. Power Electron.*, c. 20, sy 4, ss. 833-838, Tem. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850927.
- [10] F. Zare ve J. A. Firouzjaee, “Hysteresis Band Current Control for a Single Phase Z-source Inverter with Symmetrical and Asymmetrical Z-network”, içinde *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, Nagoya, Japan: IEEE, Nis. 2007, ss. 143-148. doi: 10.1109/PCCON.2007.372960.
- [11] H. Zhang, Y. Liu, D. Sun, B. Ge, H. Abu-Rub, ve F. Z. Peng, “A hybrid modulation method for single-phase quasi-Z source inverter”, içinde *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, PA, USA: IEEE, Eyl. 2014, ss. 4444-4449. doi: 10.1109/ECCE.2014.6953729.
- [12] S. DebBarman ve T. Roy, “Advanced Pulse Width Modulation technique for Z-Source Inverter”, içinde *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Kurukshetra, India: IEEE, Ara. 2014, ss. 1-6. doi: 10.1109/IICPE.2014.7115850.
- [13] K. Yu, J. Zhao, K. J. Tseng, F. L. Luo, ve M. Zhu, “Space vector pulse-width modulation for single-phase full-bridge Z-source inverter: SVPWM FOR SINGLE-PHASE ZSI”, *Int. J. Circ. Theor. Appl.*, c. 43, sy 3, ss. 374-389, Mar. 2015, doi: 10.1002/cta.1946.
- [14] U. Devaraj, S. Ramalingam, ve D. Sambasivam, “Evaluation of Modulation Strategies for Single-Phase Quasi-Z-Source Inverter”, *J. Inst. Eng. India Ser. B*, c. 100, sy 4, ss. 333-341, Ağu. 2019, doi: 10.1007/s40031-019-00378-z.
- [15] I. Grgic, M. Bubalo, D. Vukadinovic, ve M. Basic, “Power Losses Analysis of a Three-phase Quasi-Z-Source Inverter”, içinde *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split, Croatia: IEEE, Eyl. 2020, ss. 1-5. doi: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243732.
- [16] Y. Zhou, L. Liu, ve H. Li, “A High-Performance Photovoltaic Module-Integrated Converter (MIC) Based on Cascaded Quasi-Z-Source Inverters (qZSI) Using eGaN FETs”, *IEEE Trans. Power Electron.*, c. 28, sy 6, ss. 2727-2738, Haz. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2219556.
- [17] R. Iijima, T. Isobe, ve H. Tadano, “Loss comparison of Z-source inverter from the perspective of short-through mode implementation and type of switching device”, içinde *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Taipei, Taiwan: IEEE, Kas. 2015, ss. 1-6. doi: 10.1109/IFEEC.2015.7361518.
- [18] R. Iijima, T. Isobe, ve H. Tadano, “Loss analysis of Z-source inverter using SiC-MOSFET from the perspective of current path in the short-through mode”, içinde *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe: IEEE, Eyl. 2016, ss. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2016.7695676.
- [19] S. Kim, J. Park, K. Lee, ve T. Kim, “Novel Pulse-width Modulation Strategy to Minimize the Switching Losses of Z-Source Inverters”, *Electric Power*

- Components and Systems*, c. 42, sy 11, ss. 1213-1225, Ağu. 2014, doi: 10.1080/15325008.2014.921955.
- [20] A. Abdelhakim, P. Davari, F. Blaabjerg, ve P. Mattavelli, "Switching Loss Reduction in the Three-Phase Quasi-Z-Source Inverters Utilizing Modified Space Vector Modulation Strategies", *IEEE Trans. Power Electron.*, c. 33, sy 5, ss. 4045-4060, May. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2721402.
- [21] I. Grgić, D. Vukadinović, M. Bašić, ve M. Bubalo, "Efficiency Boost of a Quasi-Z-Source Inverter: A Novel Shoot-Through Injection Method with Dead-Time", *Energies*, c. 14, sy 14, s. 4216, Tem. 2021, doi: 10.3390/en14144216.
- [22] S. Sonar, S. Mondal, J. Ghommam, ve S. Banerjee, "An Optimized Space Vector Based Switching Algorithm With Reduced Switching Transitions for Impedance Source Inverter", *IEEE Access*, c. 10, ss. 28965-28974, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153497.
- [23] M. Mohammadi, J. S. Moghani, ve J. Milimonfared, "A Novel Dual Switching Frequency Modulation for Z-Source and Quasi-Z-Source Inverters", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, c. 65, sy 6, ss. 5167-5176, Haz. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2784346.
- [24] A. Abdelhakim, F. Blaabjerg, ve P. Mattavelli, "Single-Phase Quasi-Z-Source Inverters: Switching Loss Reduction Using a Quasi-Sinusoidal Modulation Strategy", içinde *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Anaheim, CA, USA: IEEE, Mar. 2019, ss. 1918-1925. doi: 10.1109/APEC.2019.8721955.
- [25] S. Radman, M. Shahnazari, ve H. Toodeji, "New switching strategy for single-phase multilevel quasi-Z-Source inverter", içinde *2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran, Iran: IEEE, Şub. 2016, ss. 403-408. doi: 10.1109/PEDSTC.2016.7556895.
- [26] I. Roasto, D. Vinnikov, J. Zakis, ve O. Husev, "New Shoot-Through Control Methods for qZSI-Based DC/DC Converters", *IEEE Trans. Ind. Inf.*, c. 9, sy 2, ss. 640-647, May. 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2224353.
- [27] I. Grgić, D. Vukadinović, M. Bašić, ve M. Bubalo, "Calculation of Semiconductor Power Losses of a Three-Phase Quasi-Z-Source Inverter", *Electronics*, c. 9, sy 10, s. 1642, Eki. 2020, doi: 10.3390/electronics9101642.
- [28] D. W. Hart, "Chapter 8-Inverters", *Power Electronics. Ed. by Darlene M. Schueller. McGraw-Hill*, ss. 357-358, 2010.
- [29] Y. Liu, H. Abu-Rub, B. Ge, F. Blaabjerg, O. Ellabban, ve P. C. Loh, "Voltage-Fed Z-Source/Quasi-Z-Source Inverters", içinde *Impedance Source Power Electronic Converters*, IEEE, 2016, ss. 20-34. Erişim: 09 Mart 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7572766>
- [30] Y. Liu, H. Abu-Rub, B. Ge, F. Blaabjerg, O. Ellabban, ve P. C. Loh, *Impedance Source Power Electronic Converters*, 1. bs. Wiley, 2016. doi: 10.1002/9781119037088.



# Performance Evaluation of AVC and HEVC for E-Learning: Optimizing Quality and Reducing Bandwidth Usage

Oğuz KIRAT<sup>1\*</sup>, Tarık YERLİKAYA<sup>2</sup>, Emir ÖZTÜRK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trakya University, Computer Engineering Department, oguzkirat@trakya.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2687-9351

<sup>2</sup> Trakya University, Computer Engineering Department, tarikyer@trakya.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9888-0151

<sup>3</sup> Trakya University, Computer Engineering Department, emirozturk@trakya.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-3734-5171

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

### Article history:

Received 31 July 2023  
Received in revised form  
28 November 2023  
Accepted 5 December 2023  
Available online 31 December 2023

### Keywords:

AVC, Compression, E-Learning,  
HEVC, Video Encoding, Video  
Quality Assessment

Doi: 10.24012/dumf.1335369

\* Corresponding author

E-learning has experienced a surge in popularity, particularly during and after the COVID-19 pandemic. Online learning has proven to be a vital tool for students and educators to continue academic activities while adhering to social distancing guidelines and during the times of natural disasters that disrupt the conventional learning environments. It also offers accessibility to disabled students and those facing challenges to reach to the traditional learning. But due to increased demand, it is crucial to optimize cost of transmission while minimizing bandwidth usage while maintaining high-quality video transmission. To optimize cost and reduce network load, it is essential to minimize bandwidth usage while maintaining high-quality video. In response to this need, we present a novel dataset consisting of four e-learning scenarios. We encoded this dataset using various resolutions, bit rates, and encoder presets, and evaluated it in terms of encoding time, and quality using full-reference objective quality metrics such as MSE, PSNR, and SSIM. After experimenting with more than 1400 videos and configurations of encoders and codecs, we found out that it is possible to transmit videos in exceptional quality at bit rates as low as 5 Mbps for e-learning scenarios. We also present detailed results about correlation between file size, quality and encoding time to make optimizations for specific bandwidth, target quality or encoding speed.

## Introduction

According to CISCO Visual Networking Index, video streaming accounts for 82% of the global internet traffic. For 2022, it is predicted to be between 80% and 90%, surpassing the expectations of previous years [1]. Live streaming, on the other hand, accounts for 17% of internet traffic. During the COVID-19 pandemic, there was an unprecedented surge in the popularity of online lessons, virtual meetings, and e-learning platforms. As a result, an ever-increasing abundance of course materials are now accessible on the internet, supplementing the pre-existing digital resources.

The efficient transmission of multiple videos over the same network connection and cost of server and datacenter equipment necessitates a proficient utilization of network bandwidth at the source. Meanwhile, users on the receiving end may contend with restricted network connections, characterized by both limited latency and bandwidth, making effective video compression paramount. To cater to these requirements, various video encoding and compression standards have been developed, accommodating both lossy and lossless compression options. However, for end users, lossy compression is

typically employed, as video files compressed with lossless methods often entail massive file sizes.

One consequence of employing lossy compression is the potential presence of distortions in the video output. In the context of e-learning videos, it becomes imperative to strike a careful balance in the choice of the compression rate. This is crucial because certain minute details, such as individual letters and intricate figures, might hold vital importance. Consider, for instance, the readability of programming code in a tutorial – a facet that must not be compromised. Unlike typical movies, our dataset primarily comprises relatively static subjects, minimizing complex scenarios that might pose challenges for video encoders. For instance, we encounter few instances of rapidly changing scenes, camera shake effects, explosive particles, or film grain effects, which are often difficult to compress optimally.

In light of these considerations, it is evident that the optimization of video compression techniques plays a pivotal role in ensuring the seamless delivery of educational content in the realm of e-learning. By fine-tuning the compression parameters to strike an ideal balance between file size and visual fidelity, educators, content creators, e-learning platforms and network operators can guarantee an enhanced learning experience for their audiences.

In recent years, various codecs have been developed, such as VP9 [2][3], AV1, VVC [4], ELF-VC [5], and LC-EVC [6]. Though some of them provide more compression in exchange for processing power, hardware encoder/decoder support needs to be considered when the aim is to reach as many users as possible. Therefore, we used H.264 [7] and H.265 [8] codecs in this paper.

H.264 was presented by the ITU-T Video Coding Experts Group (VCEG) and the ISO/IEC JTC1 Moving Picture Experts Group (MPEG) in 2003 and is widely used as the default video encoding standard on many platforms. Although there has been a shift towards alternative applications in recent years due to the increase in video resolutions and bit rates with bandwidth, it has not yet lost its popularity. However, some limitations imposed at the time of the standard's release prevent certain features from being added, hence the need for new methods.

H.265, similarly introduced by VCEG and MPEG in 2013, offers significant improvements over H.264 and presents various mechanisms and improvements to achieve the same quality at higher resolutions with smaller file sizes. Ohm and colleagues, in their study, found that H.265 can reduce the bit rate by 50% compared to H.264. Recently, many hardware manufacturers have also provided hardware-level encoding support for H.265 [9].

Previous studies have compared and measured the effectiveness of lossy coding methods from different perspectives.

Guo et al. compared movies and series on streaming service platforms using the H.264, H.265, and VP9 encoding methods and found that H.265 yielded better results than VP9[10]. They also observed that the difference between encoding methods decreased with an increasing resolution.

Barman and Martini [11] compared H.264, H.265, and VP9 encoding methods on selected gaming videos on the Twitch platform and argued that H.264 was much faster and more efficient in terms of bit rate than VP9. They also stated that the VP9 encoding method gave different results depending on the content.

Calı and Özbek encoded specific images at fixed and variable bit rates and evaluated performance during transmission using Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH) [12].

Kılıç and colleagues compared the compression rate, quality, and encoding time of new-generation video encoding methods for sports, news, and animation videos and obtained quality loss using VMAF, PSNR, and SSIM [13]. The study found that the AV1 and VP9 approaches produced much better results than H.264 but particularly highlighted that the AV1 encoding method had a very high hardware requirement.

Nguyen and his colleagues compared the VVenC, x265, and AV1 encoding methods on videos containing street and road images and analyzed the results regarding PSNR, XPSNR, MS-SSIM, and encoding times [14].

In prior research, studies predominantly focused on encoding scenarios involving movies, series, and game streams, where foreground objects were the primary subject of interest. There are some metrics specific to the type of content [15][16]. However, a significant gap exists in the literature concerning the comparison of results for images containing text-weighted windows. To address this limitation, our study sought to experiment on a specific dataset that emphasizes different aspects compared to previous investigations.

In contrast to other studies, we specifically examined the impact of video compression on text elements as distinct from its effects on objects and scenes. Interestingly, blurring certain portions within objects did not significantly hinder the discernibility of those objects. However, when it came to text, any form of blurring noticeably affected the readability and legibility of the textual content.

In this study, we created a set of four e-learning scenarios that are exactly 30 seconds long. We subsequently encoded them using both the H.264 and H.265 codecs with various configurations. Through these encoding tests, we measured the resulting file sizes, quantified the quality ratios in terms of Mean Squared Error (MSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), and Structural Similarity Index (SSIM) [17], and calculated the encoding times. These essential data points enabled us to identify the most suitable encoding method to employ under specific bandwidth constraints.

By conducting this comprehensive investigation, we aim to fill the gap in knowledge regarding the optimal video compression techniques for e-learning scenarios, particularly when text plays a crucial role in the conveying information.

## Material and Method

For the study, we created a novel dataset consisting of four videos each representing a different scenario. For all videos, we captured lossless screen capture and webcam input. Every video is precisely 30 seconds long with a resolution of 1920x1080 pixels at 30 frames per second. The dataset is available on request.

For every scenario, webcam input was positioned at the bottom right corner of the screen capture for the inclusion of a speaking presenter. This configuration is set up to simulate a real-time or recorded online class experience, enhancing the relevance of the dataset.

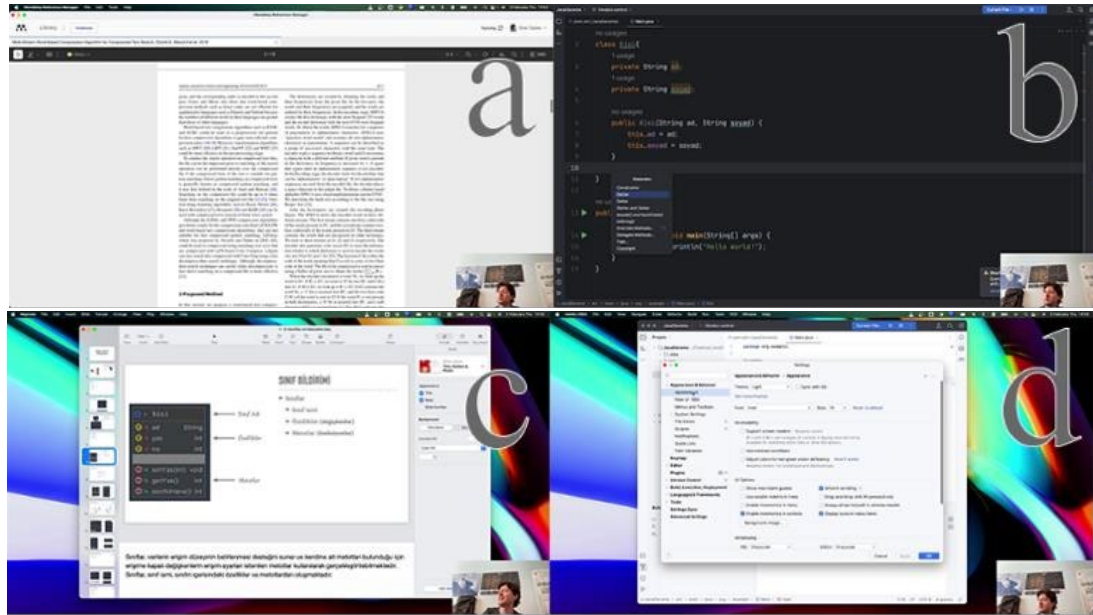


Figure 1. Frame samples: Article (a) Coding (b) UI (c) and Presentation (d) scenario

Four scenarios that are inspected in this study are explained in Table 1.

Table 1. Explanation of the videos in the dataset.

Scenario	Description
Presentation	The lecturer presents a course presentation. Content is generally static.
User Interface	The lecturer talks about configuring a program on its user interface.
Article Review	The lecturer presents a PDF article. The article was scrolled and zoomed in during the video. Therefore, this is the most complex scenario.
Coding	The lecturer writes a Java class on an IDE.

Sample frames from each video scenario in Table 1 are given in Figure 1. As seen in Figure 1, each scenario contains different types and amounts of text. We also downsampled the lossless 1920x1080 pixel resolution videos from each scenario to 1280x720 pixels, using bicubic interpolation to see the effects of reduction in resolution.

While some video streaming services may offer 4K resolution option, it is pertinent to note that 4K streaming is limited to specific devices and demands high bandwidth requirements. As a result, for the purpose of this study, we have deliberately excluded resolutions exceeding 1920x1080 pixels. H.264 and H.265 are selected due to their high compatibility and large number of supported hardware decoders.

In order to account for diverse network technologies and their associated bandwidth limitations, we considered a range of bit rates for our experiments. These bit rates were specifically chosen to span from UMTS/R99, which provides a maximum bandwidth of 384 kbps, to broadband connections offering up to 20 Mbps. This approach enables us to assess the performance of the chosen video codecs across various network conditions, ensuring that our conclusions remain applicable to real-world scenarios with varying network capacities.

Table 2 highlights the various configuration options explored in our study, encompassing all the cases used in our experiments.

Table 2. All configuration options in the study.

Configuration Type	Possibilities Tested
Scenarios	Article Review, Coding, Presentation, User Interface
Codecs	H.264 (AVC), H.265 (HEVC)
Resolutions	1280x720, 1920x1080 pixels
Presets	veryslow, slower, slow, medium, fast, faster, veryfast, superfast, ultrafast
Bit rates	300 kbps, 500 kbps, 700 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps, 5Mbps, 7 Mbps, 10 Mbps, 15 Mbps, 20 Mbps

We encoded all videos with different scenarios for each codec and resolution using nine different presets and ten different bit rates. As a result, we created 1440 different output video samples and calculated objective metrics for each video output.

The presets for x264 and x265 are named as *ultrafast*, *superfast*, *veryfast*, *faster*, *fast*, *medium*, *slow*, *slower* and *veryslow*. In video encoding, the encoder takes numerous different parameters. Modifying these parameters can affect the encoding and decoding speed, the quality of the encoded video, and the output video size. Each given preset modifies these specific parameters for the encoding method. These parameters mostly involve additional operations during the encoding process to enhance the quality at similar file size. However, in return, they increase the processing complexity, leading to lower encoding and decoding speeds.

For example, *bframes* flag in encoding method determines the number of B frames in encoding process. In video encoding process, there are three types of frames named I, P and B frames and B frames are encoded bidirectionally using frames in both directions. These are the frames with the highest processing complexity to decode. Increasing the number of B frames will increase the compression ratio as well as the processing complexity.

As moving from the *medium* preset to the *veryslow* preset, quality is increased with the increasing number of operations on frames, using estimation algorithms etc., but each additional operation has a negative effect on the encoding time.

All conversions are made using x264 AVC encoder version 0.164.3095baee400 and x265 HEVC encoder version 3.4+31-6722fce1f

MSE, PSNR, and SSIM are used for quality measurement. MSE is a metric for calculating error (noise/degradation) by comparing images pixel by pixel. Formula for MSE is given in equation 1.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \|f(i,j) - g(i,j)\|^2 \quad (1)$$

where *f* is the original image matrix, *g* is matrix of the image to be compared, *m* is the number of rows of pixels, and *i* is the row index. Similarly, *n* is the number of columns of pixels and *j* is the index of that column. MSE values close to 0 is better.

PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) is logarithmic scale of noise in a signal, and widely used in images. If there is no signal, thus two images identical PSNR value is infinite. When the noise increases, PSNR decreases.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{R^2}{MSE} \right) \quad (2)$$

*R* is the maximum fluctuation in the input image data type. For example, if an image has an 8-bit unsigned integer data type, *R* is 255.

As stated by Kufa and Kratochvil, the PSNR value is expected to increase in parallel to quality [18].

SSIM is a metric to compare similarity between two images where  $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y,$  and  $\sigma_{xy}$  are the local means, standard deviations, and cross-covariance for images *x, y*.

$$SSIM(i,j) = \frac{(2\mu_i\mu_j + c_1)(2\sigma_{ij} + c_2)}{(\mu_i^2 + \mu_j^2 + c_1)(\sigma_i^2 + \sigma_j^2 + c_2)} \quad (3)$$

If SSIM value is 1, images perfectly match each other. For quality assessment, we calculated average MSE, PSNR and SSIM values of frames using a function given below:

$$Q_f(o,d) = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{f_y(o_k,d_k) + f_u(o_k,d_k) + f_v(o_k,d_k)}{3}}{n} \quad (4)$$

The parameters and the descriptions of the equation are given in Table 3.

Table 3. Parameters of metric calculation.

Parameter	Explanation
Q	Average representation of the metric for encoded video
o	Original video
d	Compressed/degraded video
f <sub>y</sub>	Metric function for Y channel (MSE, PSNR or SSIM)
f <sub>u</sub>	Metric function for U channel (MSE, PSNR or SSIM)
f <sub>v</sub>	Metric function for V channel (MSE, PSNR or SSIM)
n	Number of frames in a video (900 for our dataset)
k	k <sup>th</sup> frame of the video

### Experimental Results and Discussion

The video encoding process, especially when performed on software-based solutions, is known to be highly CPU intensive. Consequently, employing unnecessarily slow encoder configurations can lead to a significant waste of time and energy, especially if the resulting video quality does not show substantial improvement. To determine the optimal encoding preset for e-learning purposes, we embarked on an extensive encoding process on our dataset, generating a total of 1440 output videos.

Given that the internet might be shared among multiple users in the e-learning environment, the receivers' (students') internet connection speed could be limited, or lecturers' upload speed might be even slower. Therefore, we conducted encoding tests with a range of bit rates. These bit rates started from 300 kbps and reached up to 20 Mbps. This approach allows us to explore the performance of the codecs under various network conditions and bandwidth limitations.

To execute these encoding tests, we utilized a test machine featuring a water-cooled AMD Ryzen 5 5600 processor, which has six cores and twelve threads. This CPU has base clock speed of 3.5 GHz and boost clock speed up to 4.4 GHz. The processor was installed on a B450 chipset motherboard, and the test system was equipped with 32 GBs of 3600 MHz DDR4 RAM. To ensure the accuracy and reliability of the results, we ensured the system operated over the base clock speeds and was not thermally throttled during the tests.

Detailed experimental results are given in the subsections below.

### Encoding Speed vs. Presets

In our test process we utilized the x264 and x265 encoders. Both encoders provide flexibility of selecting different presets, giving us the opportunity to tweak the balance between encoding speed and compression efficiency. The default preset for both encoders is *medium*. However, when faster presets are chosen, certain parameters are adjusted to sacrifice video quality in favor of increased encoding performance. Conversely, selecting slower presets prompts the codec to employ additional operations, thus using more processing power and time, but in exchange enhancing the video quality.

For AVC (H.264) encoding using x264, we observed that the *medium*, *fast*, and *faster* presets demonstrated similar encoding times. However, the *slow* preset had a minimum encoding time that is nearly identical to the average time of the *medium* preset. But the encoding time gap widened when comparing the *slow*, *slower* and *veryslow* presets. Additionally, we noticed considerable variation in encoding times within the same preset, especially while using the *slow*, *slower* and *veryslow* presets, depending on the specific scenario and bit rate.

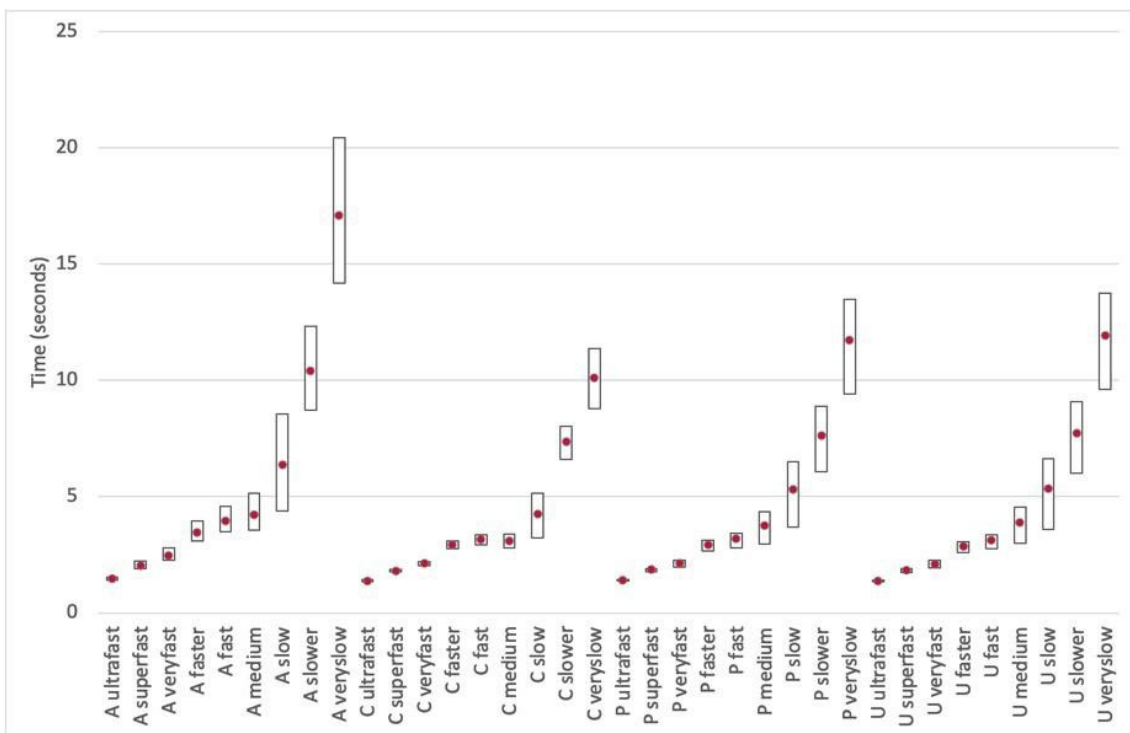


Figure 2. H.264 (AVC) encoding using x264, average encoding time range for each scenario (A=Article, C=Coding, P=Presentation, U=User Interface) and preset, all bit rates combined. The red dots represent average points.



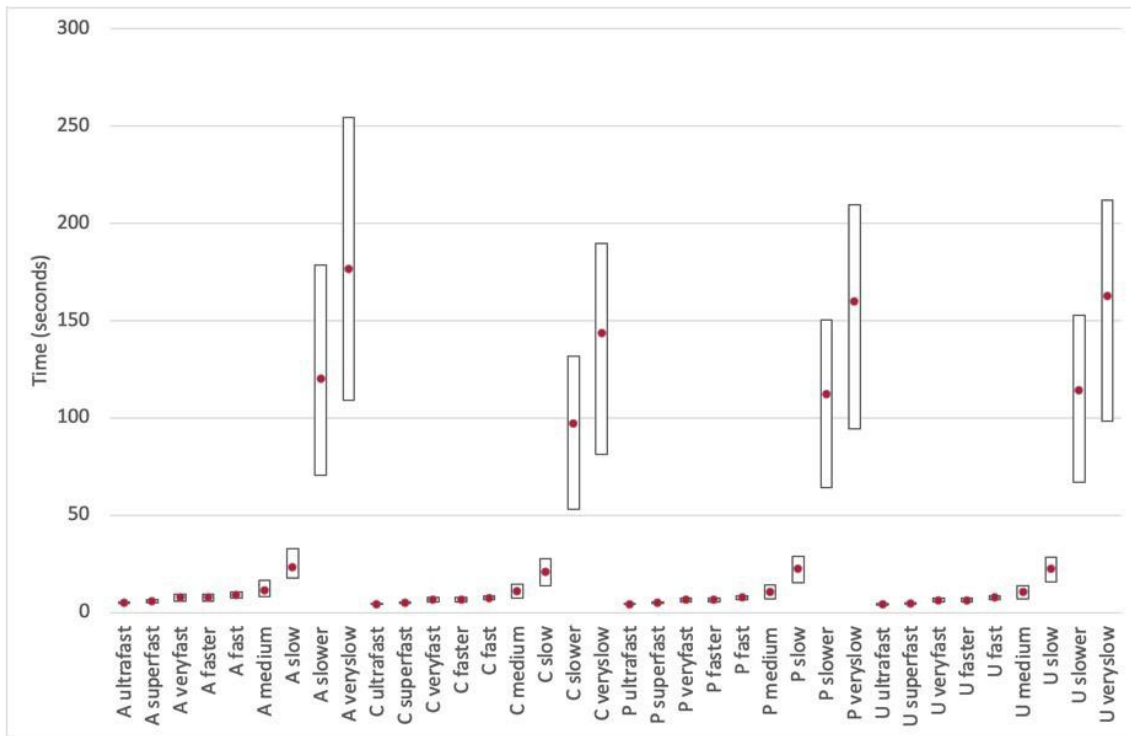


Figure.3. H.265 (HEVC) encoding using x265, average encoding time range for each scenario (A=Article, C=Coding, P=Presentation, U= User Interface) and preset, all bit rates combined. Red dots represent the average point.

In contrast to H.264 encoding using x264, when we applied H.265 encoding using x265, we observed a more pronounced difference in encoding times between the *slower* and *slow* presets. The *slower* preset exhibited encoding times that are between 4-5 times slower than the *slow* preset in most encoding scenarios, and the *slow* preset generally doubled the encoding time required by the *medium* preset. These substantial differences indicate that selecting presets slower than the *medium* preset might not be the most optimal choice considering encoding time, especially if the *medium* preset can deliver the expected video quality for the given scenario. Additionally, we found that encoding videos with a resolution of 1280x720 pixels took less time than encoding videos at 1920x1080 pixel resolution.

Table 4 presents the correlation between preset and encoding time, with the time values representing the averages across all scenarios and bit rates.

From the results, it is evident that the article scenario took the longest time to encode, which was expected due to the motion caused by scrolling and zooming in the video. Conversely, the coding scenario took the shortest time to encode. Figure 2 (for H.264) and Figure 3 (for H.265) further illustrate the encoding time ranges for each scenario and preset.

Table 4. Correlation between preset and encoding time.

Codec / Res.	Preset	Avg. Time (s)	Code c / Res.	Preset	Avg. Time (s)
H.264 1080p	ultrafast	1.41	H.265 1080p	ultrafast	4.40
	superfast	1.89		superfast	5.03
	veryfast	2.22		veryfast	6.76
	faster	3.05		faster	6.77
	fast	3.36		fast	7.97
	medium	3.74		medium	10.78
	slow	5.33		slow	22.25
	slower	8.29		slower	110.90
	veryslow	12.72		veryslow	160.73
H.264 720p	ultrafast	0.78	H.265 720p	ultrafast	2.17
	superfast	0.99		superfast	2.74
	veryfast	1.12		veryfast	4.37
	faster	1.49		faster	4.37
	fast	1.65		fast	5.18
	medium	1.91		medium	6.45
	slow	2.86		slow	13.45
	slower	4.13		slower	72.77
veryslow	6.54	veryslow	106.84		

Regarding H.264 encoding, we observed that e-learning videos can be encoded in real-time on every preset using a modern CPU. For example, in the default *medium* preset, with the exception of two cases, every video could be encoded six times faster than its original length for every bit rate. However, for our test configuration with H.265, reaching real-time encoding on *slower* and *veryslow* presets proved to be unattainable.

Due to the low complexity of videos in our dataset, the *slow* preset for H.265 encoding could encode more than 30 frames per second (fps) for most configurations, especially at low bit rates. If real-time encoding is a requirement, the *medium* preset showed a minimum of 56.25 fps in the worst-case scenario and provided an average SSIM score of 1 for this specific case, which can be considered nearly lossless, thus might be recommended.

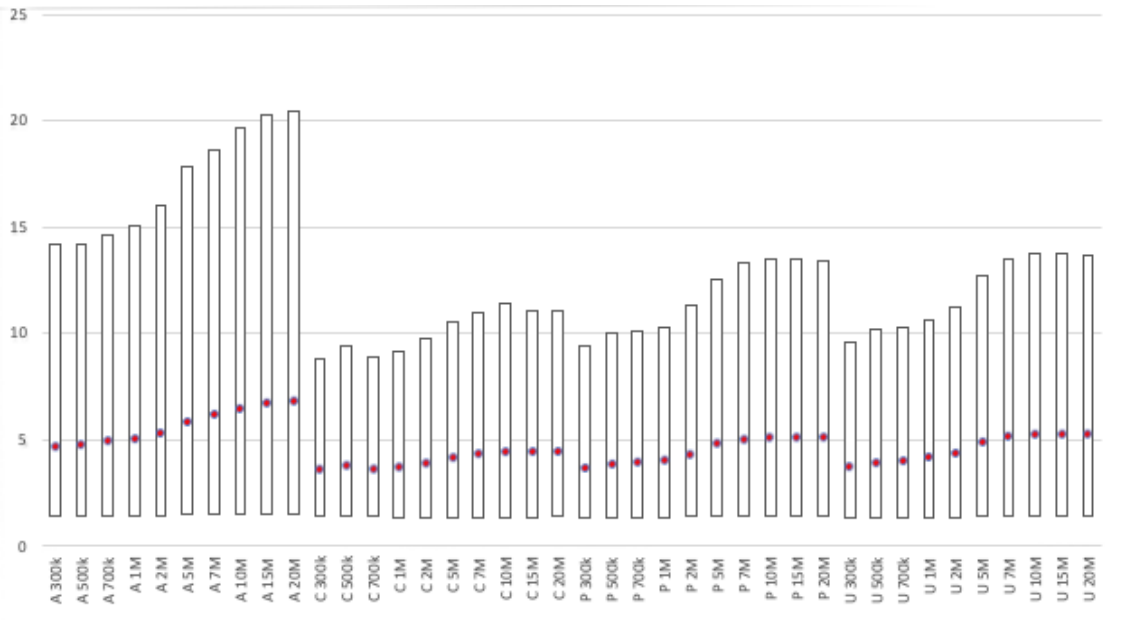


Figure 4. H.264 (AVC) encoding using x264, average encoding time range (s) for each scenario (A=Article, C=Coding, P=Presentation, U= User Interface) and bit rate, all presets combined. Red dots represent the average point.

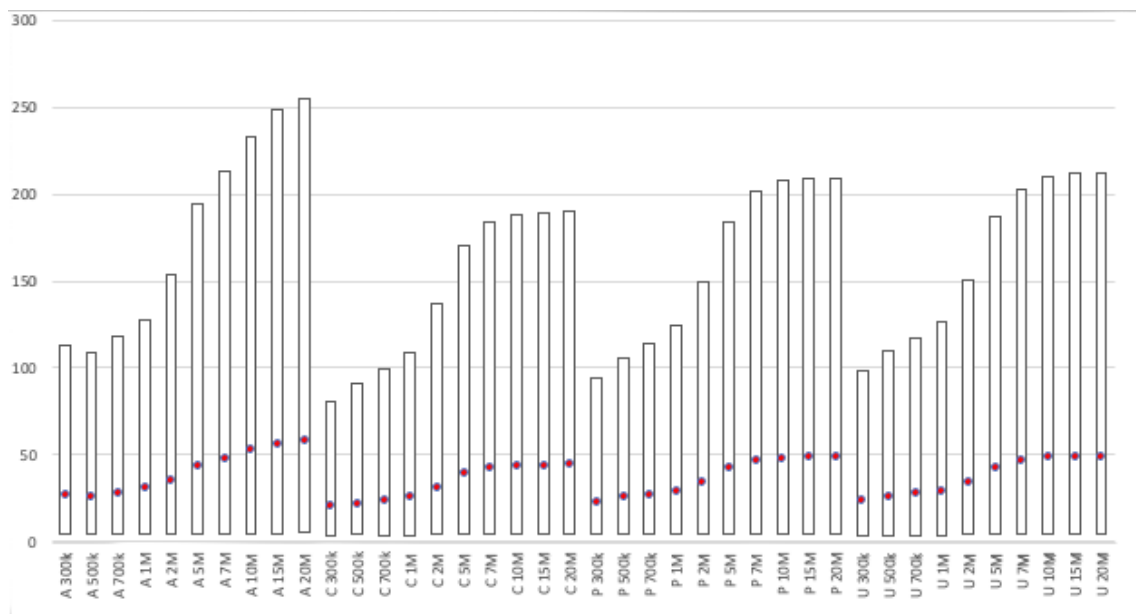


Figure 5. H.265 (HEVC) encoding using x265, average encoding time range (in seconds) for each scenario (A=Article, C=Coding, P=Presentation, U= User Interface) and bit rate, all presets combined. Red dots represent the average point.

**Encoding Speed vs. Bit rate**

When analyzing each scenario individually, the experimental results indicated that increasing the bit rate

generally led to an increase in encoding time. However, it is important to note that the complexity of the video content directly influenced the encoding time.

Figure 4 and Figure 5 provide a detailed representation of the encoding time results for different bit rates across various scenarios.

As observed in the figures, the H.264 codec consistently achieved real-time encoding results for all bit rate configurations on a modern computer and using a modern encoder.

H.265 codec, while performing efficiently at lower bit rates, started to experience a slowdown in encoding time after reaching the 5 Mbps mark. This suggests that beyond this threshold, the H.265 codec struggled to maintain real-time encoding capabilities.

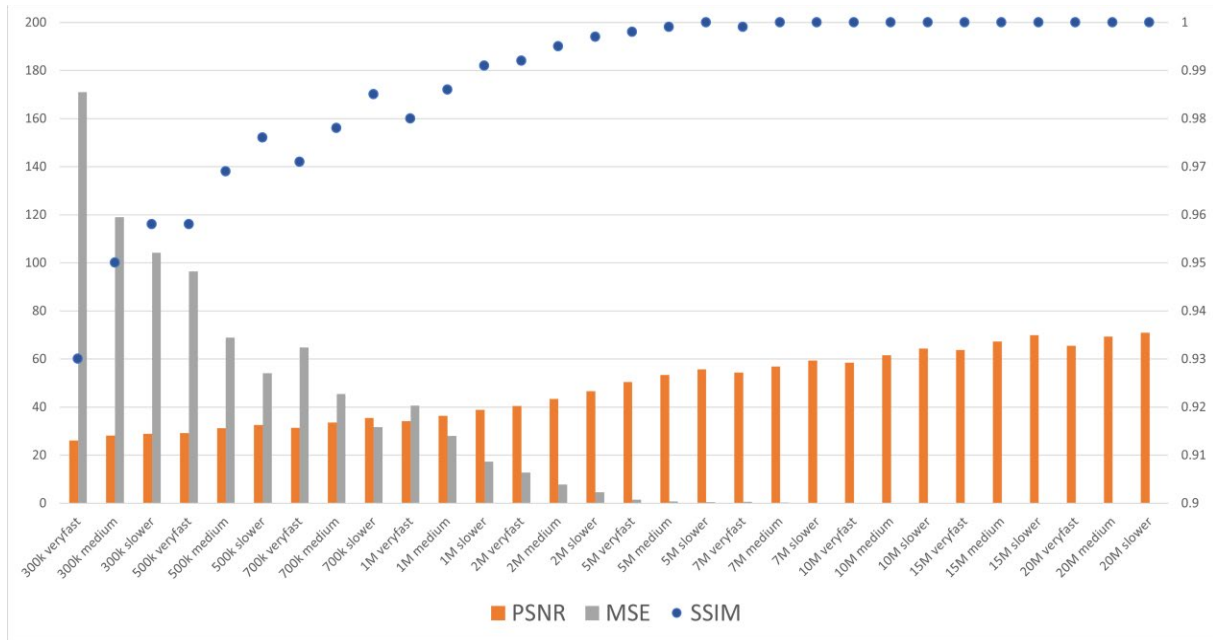


Figure 6. H.264 (AVC) encoding using x264 in 1920x1080 pixels, quality of article scenario.

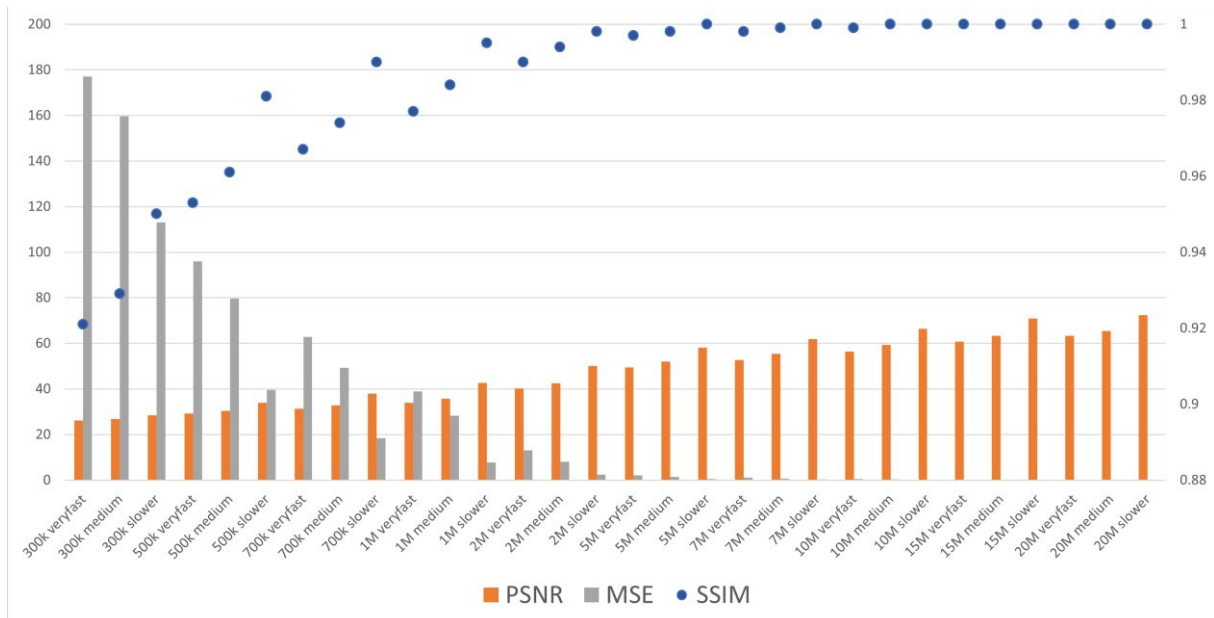


Figure 7. H.265 (HEVC) encoding using x265 in 1920x1080 pixels, quality of article scenario.

### Encoding Time of AVC vs. HEVC

The experimental results unequivocally demonstrate that in nearly all cases, the encoding time required for HEVC (H.265) is significantly longer when compared to AVC (H.264). Based on our empirical data, it can be deduced that encoding videos using HEVC is at least 1.89 times slower than AVC, on average showing a difference of 5.78 times.

Particularly, in high bit rate scenarios and when utilizing slower encoding presets, the encoding time disparity between HEVC and AVC becomes more pronounced, up until HEVC being 21.82 times slower than AVC.

These findings demonstrate the importance of encoding times while selecting a codec, particularly in cases where hardware-based encoders are not usable.

### Quality Comparison

In our effort to assess the quality of the encoded video outputs, we conducted a frame-by-frame comparison between each output and its corresponding original lossless source video. To ensure consistency and to evaluate Full HD display viewing, the 1280x720 resolution output videos were upscaled back to the original 1920x1080 pixel resolution using bicubic interpolation. It is important to note that due to the initial resolution decrease in the 1280x720 pixel resolution outputs, a maximum SSIM score of 0.983

is achieved within all outputs in that resolution. This outcome is anticipated, as some data loss occurs during the downscaling process.

For both H.264 and H.265 codecs, all configurations with bit rates greater than 2 Mbps achieved an SSIM greater than 0.99, indicating high visual fidelity and quality. While certain configurations of slower presets in H.264 and H.265 attained an SSIM value above 0.99, it is essential to acknowledge that this level of quality is not consistently achievable across all configurations.

In Figure 8, we present the calculated average SSIM values for each bit rate on the *veryfast* preset. Notably, among the HEVC (H.265) 1920x1080 pixel resolution video outputs, we obtained an average SSIM score of 1, which can be considered nearly lossless, for bit rates as low as 700 kbps for the *coding* scenario and 5 Mbps for the *article* scenario. These results demonstrate the impressive compression capabilities of the HEVC codec at relatively lower bit rates.

In Figures 6 and 7, we depict the calculated average quality metrics (PSNR and MSE) for the *article* scenario across different bit rates and presets (*veryfast*, *medium*, and *slower*). The left axis in the graphs represents PSNR and MSE values, while the right axis corresponds to the SSIM metric.

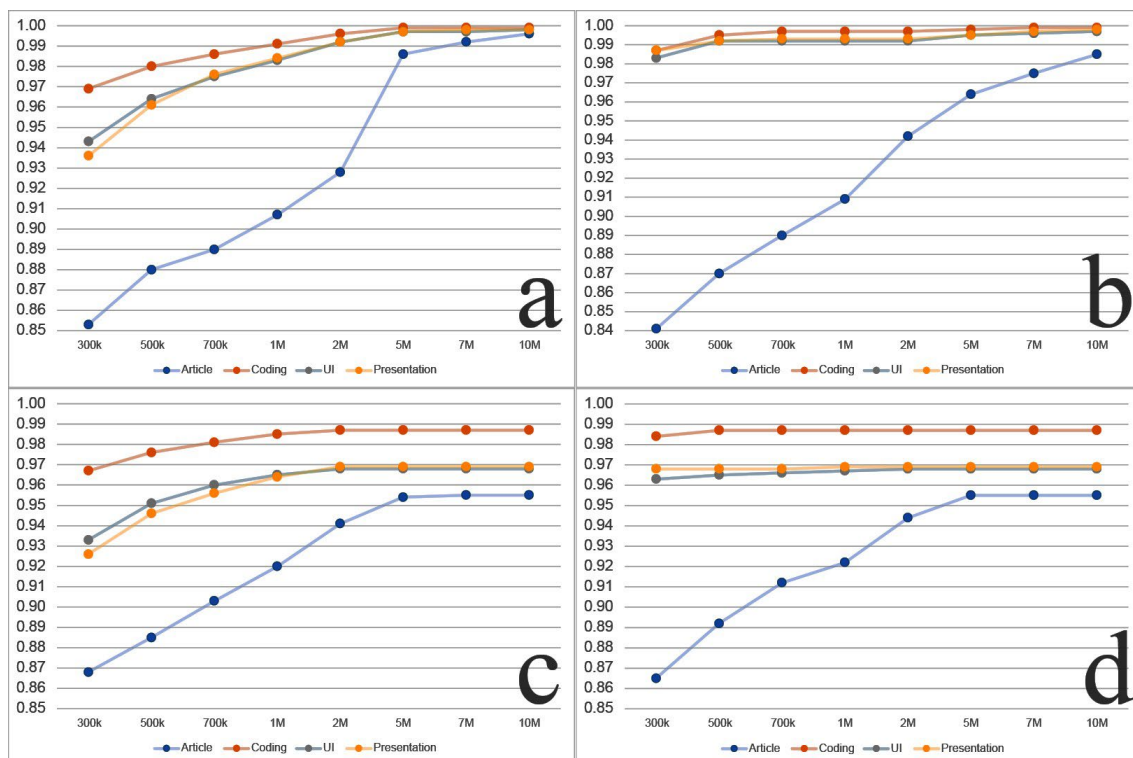


Figure 8. Average SSIM values for each bit rate on veryfast preset. (a- AVC 1920x1080, b- HEVC 1920x1080, c- AVC 1280x720 d- HEVC 1280x720)

## Conclusion

It is evident that in e-learning, videos primarily consist of text-based content, such as presentations and PDFs. Therefore, it is crucial to ensure that the encoding used during transmission over the network maintains a certain level of quality and readability for the text. Existing encoding methods are predominantly evaluated on datasets containing videos with mainly moving objects, and the evaluation of quality results is based on these datasets. However, in text-heavy videos, the blurring effect becomes more critical as it can significantly impact text legibility.

Based on the results obtained in the study, except for *slower* and *veryslow* preset configurations, both H.264 and H.265 codecs are capable of real-time encoding. H.264 shows real-time results across all the configurations, while H.265 starts to lose its real-time capability after reaching a 5 Mbps bit rate.

For both codecs, the study found that video quality after 2 Mbps is well-maintained without compromising text readability. Although the *slower* or *veryslow* codec configurations might offer better quality results than other presets, in some cases, it could be more practical to increase the bit rate instead of selecting these slower presets, as doing so would preserve the chance of real-time encoding.

The results of the study demonstrate that HEVC (H.265) generally outperforms AVC (H.264) in terms of average SSIM score. However, it is important to consider decoder availability and hardware decoding support. While HEVC offers higher compression efficiency and better quality, it comes with the trade-off of considerably slower encoding times, which might be a concern for real-time applications.

Even on AVC, it is noteworthy that selecting presets faster than *medium* with a bit rate between 2 Mbps and 5 Mbps can effectively transfer videos with sufficient quality for e-learning purposes. Moreover, an average bandwidth of 5 Mbps is adequate to transmit all videos at 1920x1080 pixel resolution, achieving SSIM scores near 1 and enabling near-real-time encoding on modern CPUs using x264.

The experiments conducted in this study have provided valuable insights into the impact of bit rate and preset selection on the output quality and processing time of video encoding. The findings hold significant implications for researchers and media producers, offering valuable guidance to improve their video encoding workflows since there is limited research on video quality assessment for e-learning.

In future studies, there are plans to develop a method for selecting the appropriate bit rate and encoding method dynamically based on the available bandwidth in real-time. This would involve examining the data obtained during transmission to ensure efficient utilization of available network resources while maintaining optimal video quality and readability for e-learning videos.

## 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.

## Authors' Contributions

Each author contributed equally to the article prepared.

## References

- [1] T. Barnett, S. Jain, U. Andra, "Cisco visual networking index (vni) complete forecast update, 2017–2022," *Americas/EMEAR Cisco Knowledge Network (CKN) Presentation*, 2018, Accessed: Feb. 04, 2023. [Online]. Available: [https://get.drivenets.com/hubfs/1211\\_BUSINESS\\_SERVICES\\_CKN\\_PDF.pdf](https://get.drivenets.com/hubfs/1211_BUSINESS_SERVICES_CKN_PDF.pdf)
- [2] "The WebM Project | Welcome to the WebM Project." <https://www.webmproject.org/> (accessed Feb. 04, 2023).
- [3] D. Mukherjee, J. Han, J. Bankoski, R. Bultje, A. Grange, J. Koleszar, P. Wilkins, Y. Xu, "A technical overview of VP9 - The latest open-source video codec," *SMPTE Annual Technical Conference and Exhibition 2013, SMPTE 2013*, pp. 376–392, 2013, doi: 10.5594/M001518.
- [4] Standard ISO/IEC 23090-3, *Versatile Video Coding*. 2020.
- [5] O. Rippel, A. G. Anderson, K. Tatwawadi, S. Nair, C. Lytle, L. Bourdev, "ELF-VC: Efficient Learned Flexible-Rate Video Coding," *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 14459–14468, Apr. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2104.14335.
- [6] Information Technology, "General Video Coding—Part 2: Low Complexity Enhancement Video Coding," *Standard ISO/IEC 230942:2021*. Nov. 2021.
- [7] Recommendation ITU-T H.264 and ISO/IEC 14496-10 (AVC), "Advanced Video Coding for Generic Audio-Visual Services," *ITU-T and ISO/IEC JTC 1*. May 2003.
- [8] Recommendation ITU-T H.265 and ISO/IEC 23008-2 (HEVC), "High Efficiency Video Coding," *ITU-T and ISO/IEC JTC 1*. Apr. 2013.
- [9] G. J. Sullivan, J. R. Ohm, W. J. Han, T. Wiegand, "Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 22, no. 12, pp. 1649–1668, 2012, doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221191.
- [10] L. Guo, J. de Cock, A. Aaron, "Compression Performance Comparison of x264, x265, libvpx and

- aomenc for On-Demand Adaptive Streaming Applications,” *2018 Picture Coding Symposium, PCS 2018 - Proceedings*, pp. 26–30, Sep. 2018, doi: 10.1109/PCS.2018.8456302.
- [11] N. Barman, M. G. Martini, “H.264/MPEG-AVC, H.265/MPEG-HEVC and VP9 codec comparison for live gaming video streaming,” *2017 9th International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX 2017*, Jun. 2017, doi: 10.1109/QOMEX.2017.7965686.
- [12] M. Cali, N. Ozbek, “Comparative analysis of adaptive streaming with CBR and VBR encoded scalable videos,” *SIU 2021 - 29th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications, Proceedings*, Jun. 2021, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477909.
- [13] T. Kilic, A. M. Gulbahce, M. Yildiz, “Performance Evaluation of Next Generation Video Compression Approaches Using Objective Quality Measurement Methods,” *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 - Proceedings*, Oct. 2020, doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302130.
- [14] T. Nguyen, A. Wieckowski, B. Bross, D. Marpe, “Objective Evaluation of the Practical Video Encoders VVenC, x265, and aomenc AV1,” *2021 Picture Coding Symposium, PCS 2021 - Proceedings*, Jun. 2021, doi: 10.1109/PCS50896.2021.9477482.
- [15] Z. Shang, Y. Chen, Y. Wu, H. Wei, S. Sethuraman “Subjective and Objective Video Quality Assessment of High Dynamic Range Sports Content”, *IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2023, pp. 556-564
- [16] A. Telili, S. A. Fezza, W. Hamidouche, and H. F. Z. B. Meftah, ‘2BiVQA: Double Bi-LSTM Based Video Quality Assessment of UGC Videos’, *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, Nov. 2023.
- [17] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, “Image quality assessment: From error visibility to structural similarity,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, Apr. 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [18] J. Kufa, T. Kratochvil, “Comparison of H.265 and VP9 coding efficiency for full HDTV and ultra HDTV applications,” *Proceedings of 25th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2015*, pp. 168–171, Jun. 2015, doi: 10.1109/RADIOELEK.2015.7128999.



## Workflow Scheduling for Cloud Computing Using Evolutionary Algorithm

Mehmet KAYA<sup>1</sup>, Betül BOZ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Marmara University, Computer Engineering Department, mehmet.kaya@marmara.edu.tr, Orcid No: 0009-0003-7393-4226

<sup>2</sup> Marmara University, Computer Engineering Department, betul.demiroz@marmara.edu.tr, Orcid No 0000-0001-7819-347X

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 1 August 2023

Received in revised form 25

November 2023

Accepted 25 November 2023

Available online 31 December 2023

Keywords:

*Workflow Scheduling, Cloud  
Computing, Evolutionary Algorithm*

Doi: 10.24012/dumf.1335981

\* Corresponding author

### ABSTRACT

Cloud computing provides powerful, highly scalable, flexible resources for real world applications. It also reduces the cost and operation expenses. Workflow scheduling is important for getting higher performance, reducing cost and using resources more efficiently in cloud computing. Workflow scheduling in cloud systems assigns tasks to resources available in the system and aims to utilize cloud resources by decreasing makespan of the workflow. In this study, an evolutionary algorithm is proposed to solve workflow scheduling problem. The main objective of this work is to minimize the makespan of the schedule. To achieve this goal, problem specific crossover operator and mutation operators are proposed in the evolutionary algorithm. The crossover operator will combine the problem-specific information stored in both parents to create a new individual. The mutation operators will explore neighbor solutions using some intelligent search mechanisms. This unique design of the operators increases the diversity of the search space and the quality of the solutions. As a result, the workflow schedules obtained from the evolutionary algorithm decreases the makespan of the workflow in the cloud system. The performance of the proposed study is measured using well-known scientific workflows and is compared with the algorithms from the literature. The proposed study outperforms all related algorithms in 67% of the test cases and obtains the same results in the remaining test cases.

## Introduction

Cloud computing aims to provide computing resources to real world applications dynamically. The performance of cloud services is mostly dependent on the scheduling of tasks to the available computing resources in the cloud. If the scheduling is not properly done, then the computing resources in the system may be underutilized or overutilized. Improper scheduling may result as an increase in the execution time of the tasks, waste of system resources and increase in cost for usage of resources [1]. Since there are limited number of resources in the cloud and the total number of requests for using these resources are increasing day by day, efficient scheduling of tasks in cloud computing is very crucial.

Scheduling problem is known to be NP-complete [2], so meta-heuristic algorithms are proposed to find optimal or sub-optimal solutions. There are many meta-heuristic algorithms that successfully provide schedules [3] but they are not specifically designed for cloud systems [4]. Min-Min [5], Max-Min [5], First Come First Serve (FCFS) [6], Heterogenous Earliest Finish Time (HEFT) [7], Minimum Completion Time (MCT) [8] are heuristic algorithms that are very widely used in cloud computing studies. Min-Min algorithm mainly focuses on the task that can be executed

in the minimum completion time, whereas in Max-Min the task with the longest execution time is first selected and assigned to the VM that will execute the task fastest. FCFS assigns the tasks to VMs according to their arrival time. HEFT is a list-based scheduling algorithm which includes a task priority list. Each task has an estimated completion time and decisions about scheduling are made according to this value. MCT uses expected minimum execution time of tasks. There are also algorithms that consider multi-objectives such as makespan and cost using task duplication [9], genetic algorithm [10], evolutionary algorithm [11] and neural network based dynamic workflow scheduling [12].

The main motivation behind this study is to design an evolutionary algorithm considering the properties of cloud systems. Cloud systems offer multiple computing resources to the users so in our algorithm the individuals are designed as a two-dimensional array. The first dimension refers to computing resources and the second dimension holds the tasks assigned to these computing resources. The crossover operator is designed to carry the information included in the parents to the offspring. 3 different mutation operators and a hybrid mutation operator using these 3 different mutation operators in a probabilistic manner, are proposed in this study. The



mutation operators are designed to explore neighbor solutions using some intelligent search mechanisms. Since the main performance issue of cloud computing is the total execution time of the workload, our main objective is to decrease makespan of the workflow. The performance of the proposed algorithm is promising and can be extended to support other QoS (Quality of Service) requirements such as makespan, cost, reliability using multi-objectives.

The rest of the paper is organized as follows. In the next section, workflows and their representation are explained, and then the details of the proposed algorithm is given. In Section 3, the simulation environment used for workflows in cloud and scientific workflows used in the experiments are provided. Then the performance of the algorithm is given with a comparison of well-known scheduling algorithms. Finally the conclusions and future directions for the proposed study are provided.

## Material and Method

### Workflow Representation

Workflow is representing the input tasks and their dependencies using a Directed Acyclic Graph (DAG). DAG is denoted by  $W = \{V, E\}$  where  $V$  is the set of vertices, and  $E$  is the set of edges between these vertices.

Tasks are denoted as vertices  $V = \{t_0, \dots, t_n\}$  where  $t_0$  to  $t_n$  represent  $n$  tasks in the workflow. Data dependency between these tasks are denoted as edges between related vertices in the graph as  $E = \{t_i \rightarrow t_j \mid t_i, t_j \in V\}$  denoting that there is a data dependency from  $t_i$  to  $t_j$ . The size of data that needs to be transferred in between two tasks may vary, therefore weights are added to the edges to denote the transfer amount. An example workflow with 8 tasks is shown in Figure 1. The dependencies between the tasks are represented with the edges having different weight values. In this example, the highest amount of data transfer is between  $t_6$  and  $t_7$ .

For a task  $t_i \in T$ ,  $P(t_i)$  denotes the set of precursors of  $t_i$ ,  $S(t_i)$  denotes the set of successors of  $t_i$ . If a task does not have any successors, it is an exit task. There can be more than one exit task. All exit tasks can be routed to one exit task which is denoted as  $t_e$ . Finishing time of the task  $t_i \in T$ , can be denoted as  $FT(t_i)$  and starting time of the task  $t_i \in T$ , can be denoted as  $ST(t_i)$ . Makespan of a workflow is calculated as follows:

$$Makespan(W) = FT(t_e) \quad (1)$$

### Evolutionary Algorithm

Evolutionary algorithm is a metaheuristic method that is commonly used in optimization problems. Since evolutionary algorithms are inspired by biological evolution, they use some mechanisms like reproduction, mutation, recombination, and selection. Population of the algorithm includes candidate solutions to the optimization problem, where each solution is represented as individuals in the population. Individual representation may change

depending on the problem considered. Fitness function determines the quality of a solution. An Evolutionary Algorithm generally has the following steps: initialization, selection, crossover, mutation and termination.

Initial population is created in the initialization step. Some individuals in the initial population can be created using a heuristic approach to speed up the optimization process and others are created randomly to generate diversity. Once the initial population is created, the fitness of each individual is calculated. Both crossover and mutation operations are applied to the individuals of the population and new individuals which are referred as offsprings, are created. If the offspring has a better fitness value, then it will be replaced with its parents. This process is repeated until the termination criteria is met.

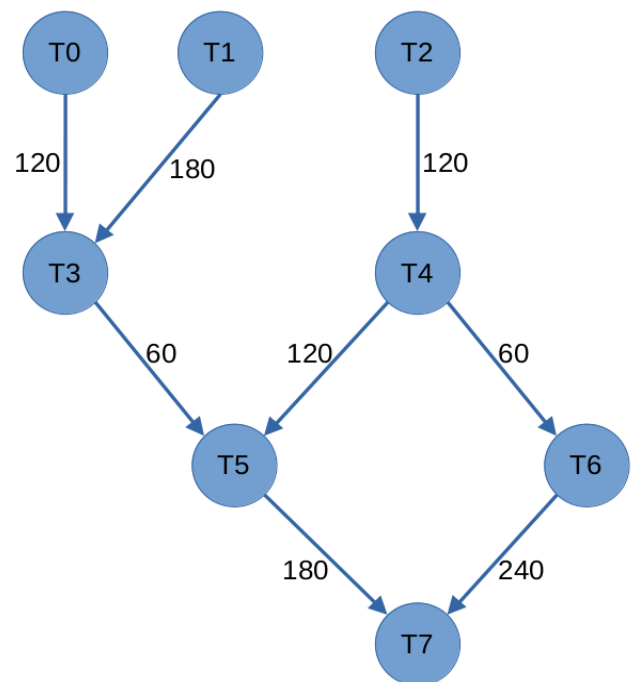


Figure 1. An example workflow represented as a DAG

### Proposed Algorithm

The proposed algorithm takes the workflow as a DAG and number of resources available in the cloud referred as Virtual Machines (VMs) as an input. It also takes some algorithm specific inputs such as the generation size, population size and mutation rate. The details of our proposed algorithm are given in the following subsections.

#### Individual representation and initial population generation

Individual  $S$  is represented as a two-dimensional array.  $S[i]$  includes an array list of tasks that are assigned to  $VM_i$  and  $S[i][j]$  denotes the ID of the task that is assigned to

$VM_i$ . The order of the tasks assigned to a VM does not represent in which order they will be executed.

$VM_0$	$T_1$	$T_3$	$T_6$	$T_7$
$VM_1$	$T_2$			
$VM_2$	$T_0$	$T_4$	$T_5$	

Figure 2. An example individual representation

An example individual representation is given in Figure 2. Individual  $S = \{\{1, 3, 6, 7\}, \{2\}, \{0, 4, 5\}\}$  includes 3 task sets, so all tasks are assigned to 3 different VMs. The first set  $\{1, 3, 6, 7\}$  shows that  $t_1, t_3, t_6$  and  $t_7$  are assigned to  $VM_0$ . The second set  $\{2\}$  contains a single task  $t_2$  which is assigned to  $VM_1$ . Finally, the last set denotes that  $t_0, t_4$  and  $t_5$  will be executed in  $VM_2$ .

Initial population is generated randomly. Each individual in the population contains the assignment of tasks to VMs. While creating an individual, all tasks from  $t_0$  to  $t_n$  are selected and assigned to a random VM. The makespan of the solution represented by each individual is calculated and assigned as the fitness value of that individual.

**Algorithm 1: Crossover Operation**

**Input:** Two individuals in the population as parents ( $parent_1, parent_2$ ),

**Output:** An offspring

- 1 Find the mean value of sizes of the task sets in the chromosomes  $size_{mean}$
- 2 Set the crossover point as  $\text{floor}(size_{mean}/2)$
- 3 Generate empty chromosomes  $offspring_1$  and  $offspring_2$
- 4 Copy the first  $\text{floor}(size_{mean}/2)$  elements in the task sets from  $parent_1$  to  $offspring_1$
- 5 Copy all the elements those are not included in  $offspring_1$  from  $parent_2$  to  $offspring_1$
- 6 Copy the first  $\text{floor}(size_{mean}/2)$  elements in the task sets from  $parent_2$  to  $offspring_2$
- 7 Copy all the elements those are not included in  $offspring_2$  from  $parent_1$  to  $offspring_2$
- 8 Randomly choose one of the offsprings and return it

**Crossover operator**

Crossover operator is performed on two individuals selected from the population referred as  $parent_1$  and  $parent_2$ , and at the end of the crossover one offspring is generated as shown in Algorithm 1. Tournament selection

is used while selecting the parents. In tournament selection, 3 individuals from the population are selected randomly and the individual with the best fitness value is assigned as  $parent_1$ . The same procedure is applied for selecting  $parent_2$ .

While generating the offspring, some part of the solution is taken from  $parent_1$  and the other part is taken from  $parent_2$ , so a crossover point should be found. In this work, one point crossover is used. Each parent's task set sizes for each VMs are calculated. Half of the mean value of the task set sizes determines the crossover point.

The first offspring's task set elements come from the first parent until the crossover point is reached. The remaining part of the offspring's task set elements come from the second parent. The second parents task sets are checked from beginning to the end to determine whether they already exist in the offspring or not. If they are not available in the offspring, then they will be added to the task sets.

For the second offspring, the same operations will be performed by switching the order of the parents. Two offsprings are created and one of them is selected randomly and mutation is applied to this offspring.

To clarify the execution of the crossover operation, an illustrative example is provided in Figure 3. The size of the task sets for  $parent_1$  is 4, 2 and 3. The size of task sets for  $parent_2$  is 4, 4 and 1. The mean value of all the task set sizes is 3. Half of this value, which is 1, selected as the crossover point. All the elements before the crossover point are copied from  $parent_1$  to  $offspring_1$  and  $parent_2$  to  $offspring_2$ . The remaining part is added from the other parent if it is not already included in the solution.

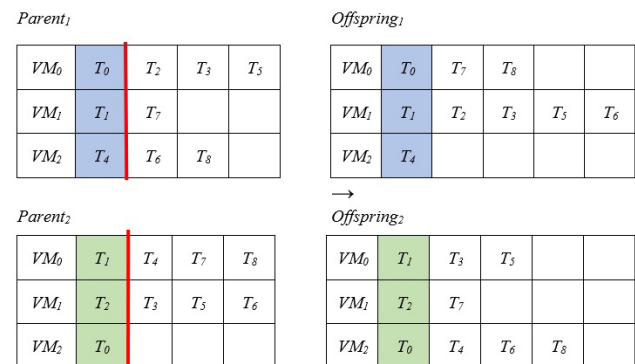


Figure 3. Crossover applied to parents to generate offsprings.

**Mutation**

Mutation is applied to the offspring generated at the end of the crossover operator. In this study, three different mutation techniques are proposed.

The first mutation operator is named as *Random Swap Mutation Operator (RSM)*. This operator randomly selects

two tasks from different VMs and swaps these tasks. As an example, Task 6 from  $VM_0$  and Task 4 from  $VM_2$  are selected randomly and are swapped in the offspring. In the final solution represented by the offspring, Task 6 is executed on  $VM_2$  and Task 4 is executed on  $VM_0$  as shown in Figure 4.

$VM_0$	$T_1$	$T_3$	$T_6$	$T_7$	→	$VM_0$	$T_1$	$T_3$	$T_4$	$T_7$
$VM_1$	$T_2$					$VM_1$	$T_2$			
$VM_2$	$T_0$	$T_4$	$T_5$			$VM_2$	$T_0$	$T_6$	$T_5$	

Figure 4. Random swap mutation operator

The second mutation operator is named as *Random Move Mutation Operator (RMM)*. This mutation operator randomly selects a VM and a position, removes the task in that position from the VM. It then assigns this task to a new VM where its new position is randomly set.

The final mutation operator is named as *Intelligent Move Mutation Operator (IMM)*. This operator again selects a task randomly and removes it from the VM it is assigned to. It then searches for the successors and predecessors of the task. The removed task is placed to a VM right after its predecessor or right before its successor to minimize communication overhead.

**Fitness calculation and population update**

Since the objective of this study is to decrease the makespan of the workflow, the fitness value is equal to the makespan of the solution present in the individuals. The individual with the smallest fitness value is reported as the best solution once the algorithm is completed.

For population update, elitism is used. Best individual in the population is added to the next generation. Crossover and mutation operations are performed to add new individuals to the population. All the new individuals are kept separately from the current population. Current population is replaced by the new population after all the new population members are generated.

**Workflow simulator and scientific workflows**

WorkflowSim [13] is a well-known framework for simulating workflows in the cloud environment. It is implemented using Java programming language. We used WorkflowSim as our workflow simulator in the experiments.

CyberShake, Montage, Epigenomics are realistic scientific workflows that are used to test the performance of our algorithm. These workflows are generated by Pegasus Workflow Generator [14]. The structure of these workflows is given in Figure 5. The CyberShake workflow is used to characterize earthquake hazards. The Epigenomics workflow is used to automate various

operations in genome sequence processing. The Montage application stitches together multiple input images to create custom mosaics of the sky.

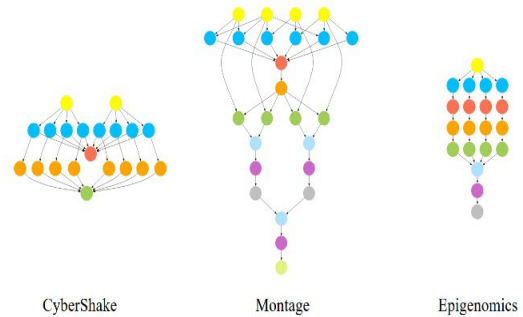


Figure 5. The structure of scientific workflows [15]

**Results**

The proposed evolutionary algorithm has some parameters which are population size, generation size and mutation rate. The first set of experiments show the performance of the algorithm for varying population size, the number of offsprings generated and the mutation operators. The proposed algorithm updates the whole population in each iteration; therefore, it generates new offsprings where the number of offsprings are equal to the population size in each iteration. The performance of the algorithm for varying population size with respect to number of offsprings generated is shown in Figure 6, Figure 7 and Figure 8. In each test, the population size varies between 25, 50, 100 and the experiments are performed on Montage scientific workflow for 25, 50 and 100 tasks. These tests are also performed on CyberShake and Epigenomics scientific workflows, and the results show similar trends.

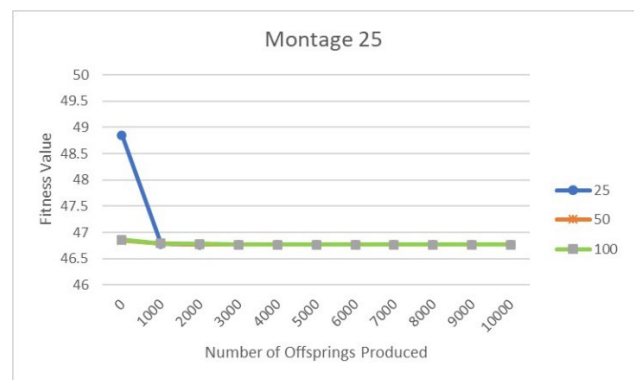


Figure 6. The effect of population size on the performance of the algorithm for Montage Scientific Workload with 25 tasks.

The fitness value of the initial population is higher when the population size is set to 25 for 25 tasks, and 25 and 50

for 50 and 100 tasks as compared to a population size of 100. This shows that as the number of individuals in the population increases, the chance to obtain better solutions also increases, which in turn leads to smaller fitness values. But as the algorithm continues to iterate, the fitness values of the population tend to decrease and finally reach near equal values. The time it takes to reach these results varies depending on the number of tasks considered. Therefore, the population size of the algorithm is set to 50 and the generation size of the algorithm is set to 2000 for smaller workflows which has 25 to 60 tasks and 5000 for larger workflows which has 100 tasks.

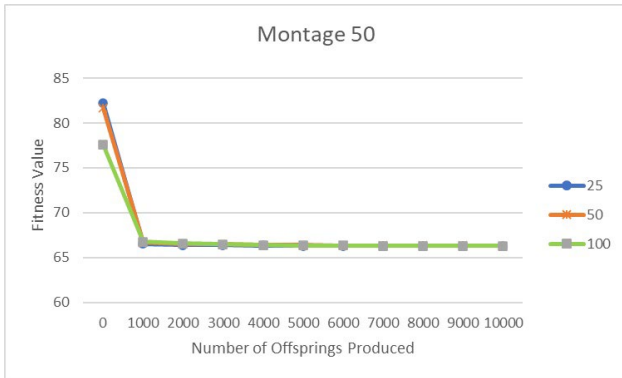


Figure 7. The effect of population size on the performance of the algorithm for Montage Scientific Workload with 50 tasks.

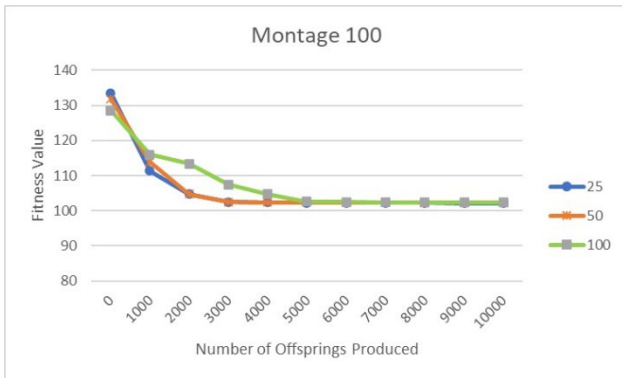


Figure 8. The effect of population size on the performance of the algorithm for Montage Scientific Workload with 100 tasks.

Next the performance of our algorithm is explored for different mutation strategies. Mutation rate is chosen as 0.2, 0.5 and 0.8. Depending on the previous studies from the literature, the number of VMs is selected as 20. The algorithm is executed for 10 runs and the best, average fitness values with their standard deviation are reported for different mutation operators with varying mutation rates.

The performance of the algorithm is first evaluated using 3 different mutation strategies. Once the performance of these mutation operators is evaluated, it is observed that

depending on the structure of the workflow, different mutation operators can perform better in different cases, so hybrid mutation operators are added to the algorithm. Hybrid mutation operator chooses one of the mutation strategies depending on a given probability. Hybrid Mutation Operator 1 (HM1) uses Random Swap Mutation (RSM), Random Move Mutation (RMM) and Intelligent Move Mutation (IMM) with a probability of 35%, 35% and 30%, respectively. Whereas the probabilities of RSM, RMM and IMM are set to 45%, 45% and 10%, respectively for Hybrid Mutation Operator 2 (HM2).

The performance of these mutation strategies for different mutation rates using Montage scientific workflow are shown in Table 1. When the number of tasks considered is 25, all operators show the same performance and obtain the same results in all runs, and the standard deviation is 0. As the number of tasks are increased to 50, all operators except IMM show similar performance in most of the runs and standard deviation is low. When 100 tasks are used in the experiments, the RMM and HM2 operators show the best performance, whereas the performance of IMM is the worst. When the performance of RMM and HM2 operators on varying mutation rates is explored, they give the best average results when the mutation rate is chosen as 0.5. The performance of CyberShake scientific workflow has similar trend as can be seen from Table 2. Finally, the performance of the algorithm using Epigenomics scientific workflow is given in Table 3. All operators except IMM obtain the best results for 24, 48 and 100 tasks. When the average values are compared, RMM and HM2 operators with mutation rates 0.5 and 0.8 obtain the best results in all runs, therefore their standard deviation is 0.

From all these tests reported in Table 1, Table 2 and Table 3, we can conclude the following for mutation operators:

- IMM gives the worst result in all of the cases.
- Hybrid mutation strategies give the best result in most of the cases due to the reason that they use multiple strategies so that they explore the neighbor solutions.
- HM2 with mutation rate 0.5 gives the best result in most of the test cases.

Table 4 shows the performance of the algorithm for 3 different scenarios. “EA-WM” denotes the performance of the algorithm when only crossover is applied to the parents. EA-HM2 denotes the performance of the algorithm when HM2 with mutation rate 0.5 is used, whereas EA-Best shows the best result obtained from 5 different mutation operators with 3 different mutation rates. As can be seen from the table, selecting HM2 with a mutation rate of 0.5 gives the best result in 66% of the test cases, and gives good results in the remaining test cases. So instead of executing the algorithm 15 times for each mutation operator – mutation rate couple, HM2 with mutation rate 0.5 can be selected as the mutation operator in the proposed study.

Table 1. Performance of different mutation strategies using Montage Workflow

Mutation		# of Tasks								
		25			50			100		
Type	Probability	Best	Average	Std. Dev.	Best	Average	Std. Dev.	Best	Average	Std. Dev.
RSM	0.2	46.77	46.77	0.00	66.20	66.22	0.03	101.67	101.74	0.10
	0.5	46.77	46.77	0.00	66.20	66.21	0.01	101.66	101.69	0.02
	0.8	46.77	46.77	0.00	66.20	66.23	0.03	101.68	101.74	0.04
RMM	0.2	46.77	46.77	0.00	66.20	66.25	0.05	101.91	102.00	0.10
	0.5	46.77	46.77	0.00	66.20	66.23	0.02	101.86	101.90	0.03
	0.8	46.77	46.77	0.00	66.20	66.22	0.02	101.91	102.00	0.05
IMM	0.2	46.77	46.77	0.00	66.38	66.51	0.06	106.05	112.48	2.39
	0.5	46.77	46.77	0.00	66.33	66.47	0.08	102.42	108.72	5.31
	0.8	46.77	46.77	0.00	66.37	66.45	0.05	102.32	106.59	5.36
HM1	0.2	46.77	46.77	0.00	66.20	66.24	0.04	101.68	101.78	0.19
	0.5	46.77	46.77	0.00	66.20	66.21	0.01	101.68	101.75	0.08
	0.8	46.77	46.77	0.00	66.20	66.21	0.02	101.73	101.80	0.06
HM2	0.2	46.77	46.77	0.00	66.20	66.23	0.03	101.67	101.80	0.22
	0.5	46.77	46.77	0.00	66.20	66.21	0.02	101.67	101.69	0.02
	0.8	46.77	46.77	0.00	66.20	66.23	0.02	101.68	101.80	0.10

Table 2. Performance of different mutation strategies using CyberShake Workflow

Mutation		# of Tasks								
		30			50			100		
Type	Probability	Best	Average	Std. Dev.	Best	Average	Std. Dev.	Best	Average	Std. Dev.
RSM	0.2	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.99	0.15
	0.5	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.80	0.25
	0.8	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.66	0.20
RMM	0.2	262.20	262.32	0.26	283.25	283.25	0.00	303.56	306.26	2.71
	0.5	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	304.33	1.19
	0.8	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.85	0.24
IMM	0.2	262.20	262.32	0.26	283.25	283.56	0.27	327.06	340.75	8.34
	0.5	262.20	262.26	0.20	283.25	283.62	0.25	311.32	328.22	13.64
	0.8	262.20	262.26	0.20	283.25	283.41	0.25	308.57	314.54	3.67
HM1	0.2	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.75	0.24
	0.5	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.75	0.24
	0.8	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.75	0.24
HM2	0.2	262.20	262.20	0.00	283.25	283.31	0.16	303.56	303.80	0.25
	0.5	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.85	0.24
	0.8	262.20	262.20	0.00	283.25	283.25	0.00	303.56	303.61	0.15

Table 3. Performance of different mutation strategies using Epigenomics Workflow

Mutation		# of Tasks								
		24			48			100		
Type	Probability	Best	Average	Std. Dev.	Best	Average	Std. Dev.	Best	Average	Std. Dev.
RSM	0.2	5584.32	5584.33	0.01	7731.38	7731.41	0.02	32821.92	33038.76	322.91
	0.5	5584.31	5584.33	0.01	7731.37	7731.38	0.02	32821.92	32821.92	0.00
	0.8	5584.31	5584.33	0.01	7731.37	7731.37	0.00	32821.92	32821.92	0.00
RMM	0.2	5584.29	5584.29	0.00	7731.38	7731.38	0.00	32821.92	33223.44	250.52
	0.5	5584.29	5584.29	0.01	7731.37	7731.38	0.00	32821.92	33168.75	332.75
	0.8	5584.29	5584.29	0.00	7731.37	7731.38	0.01	32821.92	32923.61	101.99
IMM	0.2	5584.29	5584.37	0.05	7731.40	7778.41	148.47	41117.57	44919.36	2113.30
	0.5	5584.29	5584.34	0.05	7731.38	7731.45	0.07	41328.05	43611.06	1943.12
	0.8	5584.29	5584.35	0.04	7731.40	7731.45	0.05	43161.06	44015.77	783.13
HM1	0.2	5584.29	5584.29	0.00	7731.37	7731.38	0.01	32821.92	32822.15	0.48
	0.5	5584.29	5584.29	0.01	7731.37	7731.37	0.00	32821.92	32876.18	123.06
	0.8	5584.29	5584.29	0.00	7731.37	7731.38	0.01	32821.92	32822.03	0.35
HM2	0.2	5584.29	5584.29	0.00	7731.37	7731.38	0.00	32821.92	32885.28	200.35
	0.5	5584.29	5584.29	0.00	7731.37	7731.37	0.00	32821.92	32821.92	0.00
	0.8	5584.29	5584.29	0.00	7731.37	7731.38	0.00	32821.92	32821.92	0.00

Table 4. Performance comparison of the algorithm with/without mutation

Workflow	# of Tasks	EA - WM	EA - HM2	EA - Best
CyberShake	30	<b>262.199</b>	<b>262.199</b>	<b>262.199</b>
	50	<b>283.254</b>	<b>283.254</b>	<b>283.254</b>
	100	341.137	<b>303.562</b>	<b>303.562</b>
Epigenomics	24	5584.420	<b>5584.287</b>	<b>5584.287</b>
	48	7731.619	<b>7731.374</b>	<b>7731.374</b>
	100	42887.049	32821.916	<b>32821.915</b>
Montage	25	46.789	<b>46.765</b>	<b>46.765</b>
	50	66.743	<b>66.196</b>	<b>66.196</b>
	100	113.412	101.666	<b>101.658</b>



Table 5. Performance comparison of the proposed algorithm with algorithms from the literature

Workflow	# of Tasks	HEFT	Data Aware Scheduling	FCFS	Max-Min	MCT	Min-Min	Round Robin	EA-HM2
CyberShake	30	262.199	262.822	262.822	262.199	262.822	262.822	262.822	262.199
	50	283.254	283.771	283.771	283.254	283.771	283.771	283.771	283.254
	100	603.669	323.438	323.438	304.275	323.438	326.14	323.438	<b>303.562</b>
Epigenomics	24	5584.289	5584.37	5584.374	5584.289	5584.374	5584.374	5584.374	<b>5584.287</b>
	48	7731.41	7731.477	7731.459	7731.459	7731.459	7731.449	7731.459	<b>7731.374</b>
	100	32824.09	34963.04	34963.04	36947.03	34963.04	43018.52	40010.52	<b>32821.97</b>
Montage	25	46.765	46.773	46.773	46.765	46.773	46.773	46.773	46.765
	50	66.338	66.398	66.398	66.314	66.398	66.404	66.398	<b>66.196</b>
	100	102.296	102.146	102.252	102.052	102.252	102.274	102.156	<b>101.666</b>

Table 6. Comparison of the proposed algorithm with algorithms from the literature using t-test

Workflow	# of Tasks	HEFT	Data Aware Scheduling	FCFS	MAX-MIN	MCT	MIN-MIN	Round Robin
CyberShake	30	1	1.82E-233	1.8E-233	1	1.8E-233	1.82E-233	1.82E-233
	50	1	2.68E-229	2.7E-229	1	2.7E-229	2.68E-229	2.68E-229
	100	9.191E-55	1.943E-33	1.94E-33	2.829E-05	1.94E-33	1.9E-34	1.943E-33
Epigenomics	24	4.404E-08	1.232E-37	1.23E-37	4.404E-08	1.23E-37	1.232E-37	1.232E-37
	48	2.24E-181	1.98E-191	6.3E-190	6.27E-190	6.3E-190	5.96E-189	6.27E-190
	100	1.316E-49	1.73E-103	1.7E-103	1.3E-108	1.7E-103	1.09E-115	5.9E-113
Montage	25	1	5.75E-213	5.8E-213	1	5.8E-213	5.75E-213	5.75E-213
	50	4.121E-16	5.353E-19	5.35E-19	1.391E-14	5.35E-19	3.092E-19	5.353E-19
	100	1.577E-24	2.704E-22	6.17E-24	1.761E-20	6.17E-24	3.079E-24	1.826E-22

Finally the performance of the proposed study is compared with the algorithms from the literature as given in Table 5. The proposed algorithm outperforms the other algorithms in 6 of the 9 test cases, and gives the same performance in the remaining test cases. Our algorithm is especially better than the other algorithms when the number of tasks in the cloud computing system increases.

The statistical analysis of the performance comparison of the algorithms using t-test is shown in Table 6. In all scientific workloads when number of tasks reach 100, the proposed algorithm significantly outperforms all related studies.

## Discussion

In this study 3 different mutation operators RSM, RMM and IMM are proposed. Since IMM uses the information of the predecessor and successor of the task that is moved from one VM to the other, it is assumed that it would be

intelligent, would decrease the computation time and would perform the best among all the mutation strategies, but the experimental results showed the opposite where IMM gave the worst performance. These results denote that random movements instead of intelligent strategies perform better. When performance of the mutation operators that include randomness are explored, in some test cases RMM outperformed RSM, whereas in others it is the opposite. So, hybrid mutation strategies are proposed which show the best performance.

The proposed algorithm is compared with related studies from the literature and when the task size increases in the workflow, it is observed that the performance improvement of the proposed algorithm increases. Since in cloud computing systems, large number of tasks are considered, the proposed algorithm can provide a better solution. One disadvantage of our proposed study is its execution time. It runs much slower as compared to the studies used for performance comparison.

## Conclusion

In this study, an evolutionary algorithm for workflow scheduling in cloud computing systems is proposed. The properties of the cloud resources and workflows are used to design the individual representation, crossover operator and mutation techniques. The main power of our algorithm comes from the selection of individual representation with problem specific information, the crossover operator that explores the search space successfully and mutation techniques that explores the neighbor solutions. The experimental study shows that the proposed algorithm outperforms related studies from literature and can provide better solutions for cloud computing.

The objective of the proposed study is to decrease the makespan of the workflow, as a future work the proposed algorithm can be extended to work with multiple objectives. The VMs considered in our study are homogenous, the computing power of the VMs can be heterogenous. Since in the individual representation, unique sets are defined for each VM, heterogeneity can easily be added to the algorithm. Finally, the proposed mutation operators and hybrid strategies can be used by other scheduling algorithms to increase their performance.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

## Authors' Contributions

-Study conception and design: Mehmet Kaya and Betül Boz

-Analysis and interpretation of data: Mehmet Kaya

-Drafting of manuscript: Mehmet Kaya and Betül Boz

-Critical revision: Betül Boz

## References

- [1] E. H. Houssein, A. G. Gad, Y. M. Wazery, and P. N. Suganthan, "Task Scheduling in Cloud Computing based on Meta-heuristics: Review, Taxonomy, Open Challenges, and Future Trends", *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 62.
- [2] M. R. Garey and D. S. Johnson, "A guide to the theory of np-completeness", *Computers and intractability*, 1979, pp. 641–650.
- [3] R. Zarrouk, I. E. Bennour, and A. Jemai, "A two-level particle swarm optimization algorithm for the flexible job shop scheduling problem", *Swarm Intelligence*, 2019, pp. 1–24.
- [4] N. Sadashiv, and S. D. Kumar, "Cluster, grid and cloud computing: A detailed comparison", *2011 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, 2011, pp. 477–482.
- [5] S. H. H Madni, Latiff, M. S. A. Abdullahi, M., Abdulhamid, and M. Usman, "Performance comparison of heuristic algorithms for task scheduling in iaas cloud computing environment", *PLoS ONE*, 2017, 12: 5.
- [6] A. Brandwajn, and T. Begin, "First-come-first-served queues with multiple servers and customer classes", *Performance Evaluation*, 2019; 130, pp. 51–63.
- [7] H. Topcuoglu, S. Hariri, and M. Wu, "Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing", *IEEE transactions on parallel and distributed systems*, 2002, 13(3), pp. 260-274.
- [8] B. Li, L. Niu, X. Huang, H. Wu, and Y. Pei, "Minimum completion time offloading algorithm for mobile edge computing", *IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, IEEE, 2018, pp. 1929–1933.
- [9] F. Yao, C. Pu, and Z. Zhang, "Task Duplication-Based Scheduling Algorithm for Budget-Constrained Workflows in Cloud Computing", *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 37262-37272.
- [10] H. Aziza and S. Krichen, "A hybrid genetic algorithm for scientific workflow scheduling in cloud environment", *Neural Computing & Applications*, 2020, 32(18).
- [11] M. Zhang, H. Li, L. Liu and R. Buyya, "An adaptive multi-objective evolutionary algorithm for constrained workflow scheduling in Clouds", *Distributed and Parallel Databases*, 2018, 36(2), pp. 339-368.
- [12] G. Ismayilov and H. Topcuoglu, "Neural network based multi-objective evolutionary algorithm for dynamic workflow scheduling in cloud computing", *Future Generation computer systems*, 2020, 102, pp. 307-322.
- [13] W. Chen and E. Deelman, "WorkflowSim: A toolkit for simulating scientific workflows in distributed environments", *2012 IEEE 8th International Conference on E-Science, Chicago, IL, USA*, pp. 1-8. doi: 10.1109/eScience.2012.6404430.
- [14] E. Deelman, K. Vahi, G. Juve, M. Rynge, S. Callaghan, P. J. Macchling, R. Mayani, W. Chen, R. Ferreira da Silva, M. Livny, and K. Wenger, "Pegasus, a workflow management system for science automation", *Future Generation Computer Systems*, 2015, 46, pp. 17-35.
- [15] S. Bharathi, A. Chervenak, E. Deelman, G. Mehta, M. -H. Su and K. Vahi, "Characterization of scientific workflows", *2008 Third Workshop on Workflows in Support of Large-Scale Science*, Austin, TX, USA, 2008, pp. 1-10, doi: 10.1109/WORKS.2008.4723958.



# From Pixels to Paragraphs: Exploring Enhanced Image-to-Text Generation using Inception v3 and Attention Mechanisms

Zeynep KARACA\*, Bihter DAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Firat University, Technology Faculty, Software Engineering Department, krczeynep1996@outlook.com, Orcid No: 0000-0002-7751-8567

<sup>2</sup> Firat University, Technology Faculty, Software Engineering Department, bihterdas@firat.edu.tr, Orcid No 0000-0002-2498-3297

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 10 August 2023  
Received in revised form 4  
November 2023  
Accepted 11 November 2023  
Available online 31 December 2023

### Keywords:

*Inception v3 Model, Attention  
Mechanisms, Textual Content  
Extraction, Image-to-Text  
Generation*

## ABSTRACT

Processing visual data and converting it into text plays a crucial role in fields like information retrieval and data analysis in the digital world. At this juncture, the "image-to-text" transformation, which bridges the gap between visual and textual data, has garnered significant interest from researchers and industry experts. This article presents a study on generating text from images. The study aims to measure the contribution of adding an attention mechanism to the encoder-decoder-based Inception v3 deep learning architecture for image-to-text generation. In the model, the Inception v3 model is trained on the Flickr8k dataset to extract image features. The encoder-decoder structure with an attention mechanism is employed for next-word prediction, and the model is trained on the train images of the Flickr8k dataset for performance evaluation. Experimental results demonstrate the model's satisfactory ability to accurately perceive objects in images.

Doi: 10.24012/dumf.1340656

\* Corresponding author

## Introduction

In today's digital age, the efforts towards converting visual content into text have continued to be a critical step for various applications such as data analysis, content indexing, search engines, and many more. This transformation allows visual data to become more accessible and meaningful by adopting a textual format [1]. At this juncture, deep learning techniques have played a pivotal role in the conversion of visual data into textual descriptions. Deep learning, a subset of artificial intelligence, revolves around neural networks and utilizes vast amounts of data to automatically extract intricate features [2]. These techniques have significantly enhanced the performance of the process of transforming images into text. The integration of deep learning into the image-to-text conversion process has resulted in substantial performance improvements. Particularly, encoder-decoder architectures combine convolutional neural networks (CNNs) to extract visual features and recurrent neural networks (RNNs) to translate these features into textual descriptions. This fusion enables the effective capture of essential features and patterns within images, ultimately leading to the generation of textual explanations that are natural and coherent. Moreover, the use of techniques such as attention mechanisms contributes to further refining

image-to-text conversion [3]. Attention mechanisms emphasize specific visual features during text generation, leading to more meaningful and contextually rich descriptions. By enhancing image-to-text transformation performance, attention mechanisms contribute to achieving consistent and high-quality outcomes. Supported by deep learning techniques, the conversion of visual data to textual descriptions stands as a pivotal step, facilitating the generation of more meaningful, consistent, and natural texts. Through these approaches, a broader spectrum of applications that utilize visual data in text format can be realized [4].

The rest of the paper has been organized as follows: In the 2nd section, related studies from the literature are presented. The 3rd section details the dataset specific to the proposed model, the InceptionV3 method, and the Attention Mechanism. In the 4th section, Experimental Results and Discussion are provided. Finally, the last section contains the Conclusion of the study.

## Literature Review

In the literature, various studies have been conducted on generating text from images, most of which have utilized machine learning and deep learning techniques.

Kanimozhiselvi et al. utilized three CNN architectures, namely Inception-V3, ResNet50, and Xception models, for feature extraction, and employed LSTM for caption generation. They used the Flickr 8k dataset and achieved the highest accuracy with the Xception architecture, obtaining a 75% accuracy after training Xception + LSTM for 50 epochs [5]. Bai et al. employed a CNN-based generation model using Conditional Generative Adversarial Networks (CGAN) to create image captions. They used Multi-modal Graph Convolutional Networks (MGCN) to establish visual relationships between objects. Their experiments on the MSCOCO 2014 dataset showed improved performance compared to state-of-the-art methods [6]. Agrawal et al. proposed a model based on encoder and attention-based decoder. They used a pre-trained Convolutional Neural Network (CNN) as the encoder and introduced an attention mechanism to generate captions that best match the image. They employed the Inception v3 architecture and Recurrent Neural Networks (RNN) to extract image features and create captions. The model incorporated the Bahdanau Attention Mechanism and performed better compared to traditional methods [7]. Kılıçkaya et al. addressed the problem using the Im2Text method focusing on meta-class features. They used the Pascal Sentences dataset consisting of 1000 images, each associated with 5 different captions created by 5 individuals, totaling 5000 captions. Their approach yielded a Bleu1 score of 0.0067 [8]. Lu et al. aimed to generate captions for fine art images by developing a virtual-real semantic alignment training process. They used the MS COCO and ArtCap datasets during model training. Their model achieved a Bleu1 performance of 0.508, a Meteor performance of 0.1317 [9]. Yang et al. focused on generating human-centric captions to determine human behaviors. They introduced the Human-Centric Caption Model (HCCM) relying on detailed feature extraction and interaction. They proposed a three-branch hierarchical caption model, creating a dataset called Human-Centric COCO (HC COCO). While showing improvements over existing methods, their approach fell short in generating detailed captions [10]. Li et al. proposed a semantic matching method combining semantic similarities to learn hidden correlations between images and captions. They used local semantic similarity measurement mechanisms based on the comparison of semantic units. The model achieved high-performance results on the MSCOCO

dataset, with Bleu1 at 81.2, Bleu4 at 39.0, Rouge\_1 at 58.9, and CIDEr-D at 128.5 [11]. Jaknamon et al. presented a Transformer-based approach named ThaiTC for image captioning. They used image transformer and text transformer instead of traditional CNN and RNN for encoding and decoding, respectively. Their experiments showed varying performances on different datasets [12]. Krisna et al. aimed to generate effective and accurate captions for rainy-noisy images. They developed an end-to-end architecture using GAN-based methods. They incorporated a conditional GAN architecture for handling distorted images, an Inception v3 encoder, and a Bahdanau Attention mechanism-based GRU decoder. Their model performed well in generating captions [13]. Shambharkar et al. proposed a beam-search based CNN+RNN architecture which generates multiple captions for an image and selects the best caption among these based on similarity with reference captions. The RSCID dataset was utilized, and their approach outperformed the non-beam-searched encoder-decoder architecture [14]. Feng et al. proposed a model that integrates caption and gaze tracking by learning the relationship between captions and eye-tracking patterns. The dataset contained 400 training images, 200 validation images, and 400 test images. The model showed a Recall@5 performance of 0.0048 [15]. Cai et al. presented a multimodal fashion image captioning model, achieving a performance of Bleu1 at 46.5, Meteor at 22.3, and Rouge at 38.6 [16]. Ye et al. proposed a joint training two-stage (JTTS) method for remote sensing image captions. They used RSICD, UCM-captions, and Sydney-captions datasets, achieving high-performance results [17]. Wang et al. introduced a caption transformer (CapFormer) architecture for remote sensing image captions. Their model achieved performance improvements, with Bleu1 at 66.12 and Rouge\_1 at 49.78 [18]. Malhotra et al. proposed a model using ResNet50 for image encoding and RNN and LSTM for sentence generation, achieving F1 Score 77.8, Meteor 27.6, and accuracy 70 [19]. Yang et al. proposed the Context-Sensitive Transformer Network (CSTNet) method, achieving improved performance compared to SOTA, with Bleu1 at 81.1, Meteor at 29.4, and Rouge at 59.0 [20]. Wang et al. suggested a parallel fusion RNN+LSTM architecture that enhances efficiency and achieves better results than the dominant approach. Their model obtained Bleu1 at 66.7 and Meteor at 16.53 after training [21]. Table 1 shows a comparison of the studies.

Table 1. The comparison of literature reviews

Author	Method	Dataset	Bleu-1	Bleu-4	Meteor	Rouge-L	Cider
Kılıçkaya et al.[8]	Im2Text	Pascal Sentences	0.0067				
Lu et al.[9]	Semantic Alignment method	MSCOCO ArtCap	0.508		0.1317		
Li et al. [11]	Semantic Matching	MSCOCO	81.2	39.0		58.9	128.5
Shambharkar et al. [14]	Beam-Search CNN+RNN	RSCID					

Cai et al. [16]	Multimodal fashion	FACAD	46.5	22.3	38.6	
Ye et al. [17]	JTTS	UCM-Captions	0.8696		0.8364	
		Sydney-Captions	0.8492		0.7660	
		RSICD	0.7893		0.6823	
		RSICD+	66.12		48.78	
Wang et al. [18]	CapFormer	GoogleEarth				
Yang et al. [20]	CSTNet	MSCOCO	81.1	29.4	59.0	
Wang et al. [21]	RNN+LSTM	Flickr8k + Neural Talk1	66.7	16.53		
<b>The proposed</b>	InceptionV3	Flickr8k	52.77	48.39	64.17	89.90

**Material and Methods**

In this study, a deep learning architecture for automatic image caption generation is presented by incorporating an attention mechanism. In our application, the Inception v3 deep learning architecture with an encoder-decoder architecture is utilized. The Inception v3 architecture serves as the encoder, with a CNN-based encoder and an LSTM-based decoder. To enhance the meaningfulness and detail of generated captions, an attention mechanism is integrated into the Inception v3 model. Through the CNN-based encoder, a thought vector is obtained, extracting image features. The generated image features and image details are then fed into the LSTM decoder. The LSTM decoder produces captions in natural language. The added attention mechanism in the model oversees the input sequence during each step of the decoding process, focusing on selected portions of the input sequence at specific steps. This mechanism contributes to creating captions that better describe the image. The Inception v3+Attention Mechanism model is trained using the Flickr8k dataset. The proposed architecture is illustrated in Figure 1.

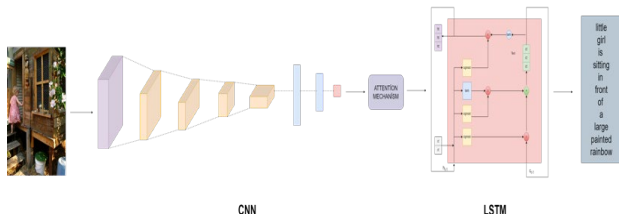


Figure 1. Architecture of the proposed system

**Dataset**

In this study, the Flickr8k dataset was utilized. The Flickr8k dataset comprises multiple captions for each image. The dataset contains a total of 8091 images. The textual files

within the dataset provide descriptions of objects and events present in the images. Each image is associated with five captions. The inclusion of multiple captions for a single image aids in generalizing the model and facilitating more accurate caption generation [24]. Figure 2 showcases some images from the Flickr8k dataset, while Figure 3 displays an image along with its corresponding caption from the Flickr8k dataset.



Figure 2. Some of images in the Flickr8k

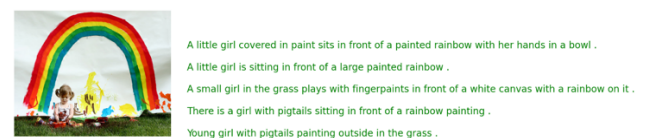


Figure 3. An example for image-to-text from the Flickr8k

**Convolutional Neural Network**

Convolutional Neural Networks (CNNs) are a class of deep learning architectures that have been successfully employed in various fields such as image recognition, image localization, speech recognition, language translation, and image Classification [22]. The CNN architecture is commonly utilized in the domain of image processing, where it takes an image as input and transforms it into a

matrix format for recognition and processing by computers. The CNN method consists of different layers that extract and classify features from diverse aspects of images.

Starting with the input image, it undergoes Convolutional Layer, Pooling Layer, and Fully Connected Layer operations, ultimately being prepared as input for the deep learning model. The Convolutional Layer is the first layer that processes the image in CNN architectures. It employs a filter smaller than the image's dimensions to extract features. The model updates filter values iteratively to enhance the extraction of image features. The Pooling Layer focuses on discarding irrelevant features and concentrating on more important ones. Two common techniques used in CNN architectures are Average Pooling and Max Pooling. The filter employed in the convolutional layer is also used in the pooling layer, depending on the chosen pooling method [22]. For max pooling, the maximum value in the filter region is selected, while for average pooling, the average of the values in the filter region is taken. After passing through the convolutional and pooling layers, the image is transformed into a matrix and then further into a vector through the Fully Connected Layer. The input image that traverses through these layers becomes ready for training with neural networks [23]. Figure 4 shows the used CNN architecture.

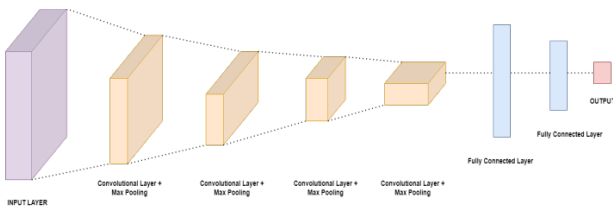


Figure 4. The CNN architecture

**Inception V3 Model**

The Inception V3 deep learning architecture, developed by Google, is a multi-level feature extraction image recognition model. The Inception V3 deep learning architecture employs Convolutional Neural Networks (CNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) units. The Inception V3 model with a CNN-based architecture has been trained on over a million images from the ImageNet dataset [24]. It is referred to as Inception v3 due to the existence of different versions of this architecture. The key difference from previous architectures lies in the addition of convolutional layers, batch normalization, and fully connected layers [25]. It achieves a lower error rate compared to previous versions and similar models.

The Inception v3 deep learning architecture extracts useful features from input images in the training part of the dataset and utilizes these features more effectively [26]. Unlike Inception v1 and Inception v2, Inception v3 has more layers, consisting of 42 layers. Despite its 42-layer depth, it offers better accuracy and lower computational costs compared to the previous version. Despite having 42 layers, it is 2.5 times more efficient than GoogleNet and more efficient than AlexNet [27]. The Inception v3 architecture is an image recognition model that achieves more than 78.1% accuracy on the ImageNet dataset [28]. The Inception v3 model comprises 21 million parameters. The

input images for the Inception v3 model are in the shape of 299 x 299 x 3 (RGB). The layer structure of the model is illustrated in Figure 5.

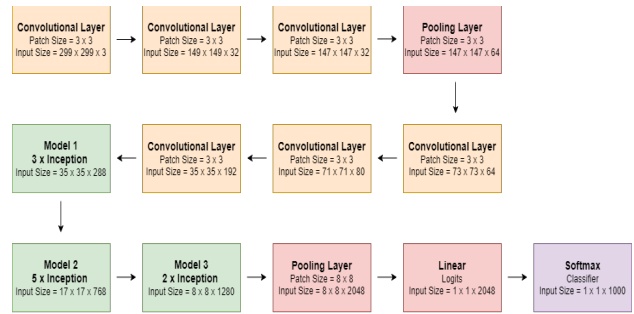


Figure 5. The used Inception V3 architecture

**Long-Short Term Memory**

LSTM was designed to overcome the short-term memory issues of RNNs by providing better memory storage. Due to its ability to capture long-term dependencies and preserve sequences, LSTM has become the most widely used RNN architecture [29]. LSTM finds applications in various fields such as language modeling, text generation, image processing, handwriting recognition, music processing, and text translation. It has the capability to retain information over long periods [30]. LSTM utilizes a cell state and various gates. The cell state is a pathway that carries information and enables predictions, often referred to as the memory of the network. The decision about what information to carry along the cell state is made by gates. These gates determine whether certain pieces of information are necessary or not. Figure 6 shows the LSTM structure.

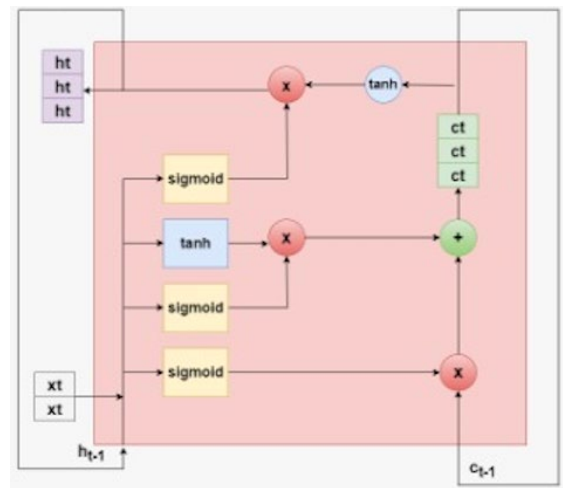


Figure 6. The LSTM structure

**Attention Mechanism**

The attention mechanism aims to create more focused captions that encompass the highlights of an image [7]. Visual attention is a mechanism that filters out irrelevant information from complex visual scenes. When generating a caption, the model ensures that it pays more attention to relevant areas in the image [28].



In sequence-to-sequence models, the entire input is compressed into a fixed-length vector through the encoder to be fed into the decoder. The intuition behind the Attention Mechanism is that rather than compressing the input, it might be better for the decoder to look back at the input sequence at each step. The decoder can take the context vector, which is a weighted sum of representations of the input data at each step, as input. Intuitively, the weights determine how much focus each step's content should place on the input token, and these weights can be differentiated to learn the attention mechanism alongside other neural network parameters. Models that incorporate attention mechanisms demonstrate better performance compared to the original sequence-to-sequence architectures [28].

### Encoder-decoder

The input image is introduced to the system using the Inception V3 model. The input image is sent to the CNN (Convolutional Neural Network) part of the Inception V3 model. The features of the image are extracted by the encoder. CNN processes the images and generates an image feature map. The attention mechanism takes these extracted feature maps along with the hidden state. A weight is assigned to each pixel of the image. These weights are then combined with the input words at each time step. Once combined, they are sent to the LSTM (Long Short-Term Memory) network. The decoder takes the features extracted by CNN as input and generates captions using LSTM. The image features, which are a fixed-length vector, feed into the decoder as input along with the token indicating the beginning of the sequence, <start>. To produce the output word of the decoder, at each time step, it takes the previous time step's hidden state and the predicted word. This process is repeated for all words until the sequence end token, <end>, is generated.

The decoder incorporates an attention mechanism to generate the created captions in a more detailed and accurate manner. Thanks to the attention mechanism, the captions are produced in a more focused manner. The attention mechanism focuses on the region of the image and the previously generated words to create captions.

### Experimental Results

Various automatic evaluation criteria are used to assess the success of text generation in the literature. Popular metrics for evaluating image-to-text generation include BLEU, ROUGE, METEOR, and CIDEr. These metrics produce values between 0-1 or 0-100. Lower values indicate that the generated captions poorly describe the image, while higher values suggest that the captions effectively describe the image and are as good as human translations.

- Bi-Lingual Evaluation Understudy (BLEU): Compares machine-generated translation to human-generated translation regardless of word order. Calculates by comparing word matches and dividing candidate words by reference words. Ranges from 0 to 1, with higher values indicating better alignment.
- Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluating (ROUGE): An N-gram based metric comparing N-

grams between machine and reference translations. ROUGE metrics provide scores between 0 and 1. Higher scores near 1 suggest strong matching between generated and reference captions.

- ROUGE\_L: It measures longest matching sequence of words.
- ROUGE\_N: It measures unigram, bigram, trigram and higher order n-gram overlap.
- Metric for Evaluation of Translation with Explicit Ordering (METEOR): METEOR adjusts precision and recalls calculations.

Table 2 shows the performance results of the proposed system using Inception V3 and the Attention mechanism.

Table 2. The performance results.

Metrics	Results
BLEU-1	52,77
BLEU-2	50,63
BLEU-3	49,76
BLEU-4	48,39
METEOR	64,17
ROUGE_L	<b>89,90</b>
ROUGE_N	<b>81,88</b>

According to Table 1, it is seen that the text similarity and n-gram text similarity using the longest common subsequences are high. Figure 7 shows the results of the real captions and prediction captions.

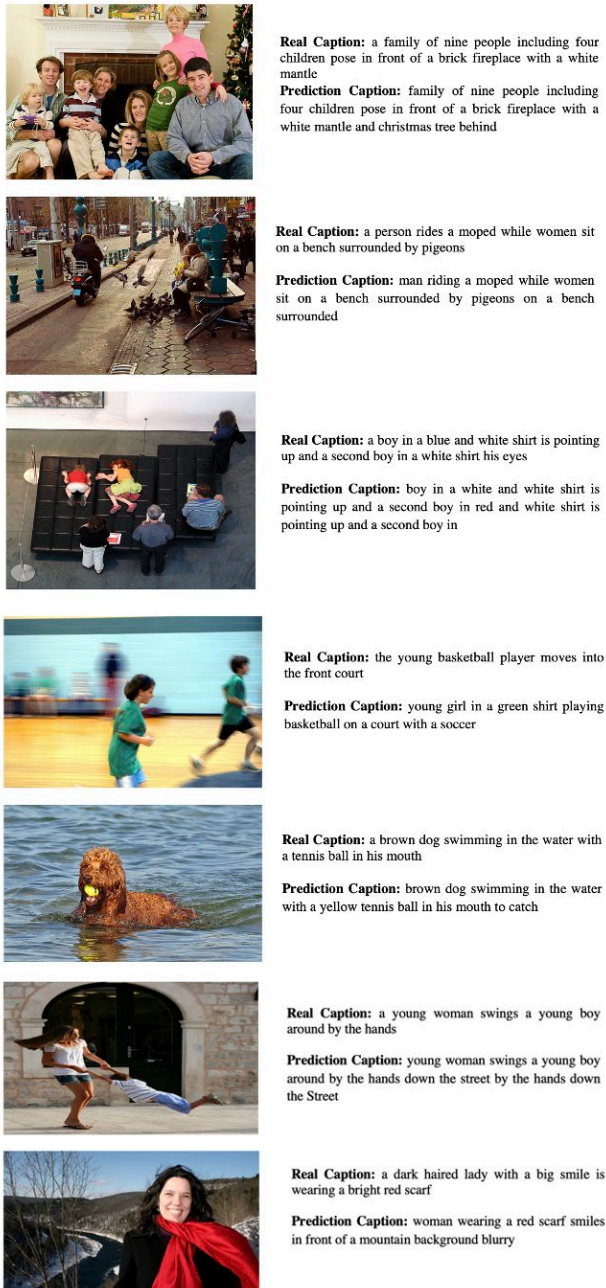


Figure 7. Results of prediction captions

According to Figure 7, it is seen that the captions produced with the proposed system better express the real pictures and draw attention not only to the people or colors in the image but also to the details in the background. It is clear that the proposed system pays better attention to the details in the image. For example, in the image of the girl wearing a red scarf, the real caption does not pay attention to the details in the background, whereas the prediction made with the proposed system states that the girl is both wearing a red scarf and is in front of a mountain in the back, and the image is blurry.

## Conclusion

In this study, existing approaches in the literature for obtaining image captions were reviewed, and an approach that incorporates the attention mechanism in addition to the

Inception V3 model was proposed. In the proposed approach, images extracted from the Flickr8k dataset were provided as input to the model, aiming to generate a sentence that describes the given image as the output. The images were fed into the Inception V3 model, and a CNN+LSTM based model with an added attention mechanism was employed. The images were processed through the CNN to extract image feature maps. The attention mechanism took these features as hidden states. The decoder then utilized the image features to generate captions. The generated captions for each image have accurately perceived the objects in the images, resulting in coherent and satisfying sentences.

Results of the ROUGE\_L, ROUGE\_N, and METEOR metrics were close to 1, indicating high performance. While the BLEU-1, BLEU-2, BLEU-3, and BLEU-4 scores are not very low, they appear to be relatively lower compared to the other metrics, which could be attributed to the small dataset used in this study. This proved to be a disadvantage for our work. In future research, improvements in background modeling and the utilization of larger datasets are planned to generate more meaningful captions for images.

## Acknowledgment

This study was supported by Firat University Scientific Research Projects Coordination Unit (FUBAP) with the project number ADEP.22.06."

## References

- [1] M. Bahani, A. E. Ouazizi, and K. Maalmi, "The effectiveness of T5, GPT-2, and BERT on text-to-image generation task," *Pattern Recognition Letters*, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.patrec.2023.08.001.
- [2] Y. Tian, A. Ding, D. Wang, X. Luo, B. Wan, and Y. Wang, "Bi-Attention enhanced representation learning for image-text matching," *Pattern Recognition*, vol. 140, p. 109548, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.patcog.2023.109548.
- [3] H. Polat, M. U. Aluçlu, and M. S. Özerdem, "Evaluation of potential auras in generalized epilepsy from EEG signals using deep convolutional neural networks and time-frequency representation," *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, vol. 65, no. 4, pp. 379-391, 2020, doi: 10.1515/bmt-2019-0098.
- [4] H. Elfaik and E. H. Nfaoui, "Leveraging feature-level fusion representations and attentional bidirectional RNN-CNN deep models for Arabic affect analysis on Twitter," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 35, no. 1, pp. 462-482, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2022.12.015.
- [5] C. S. Kanimozhiselvi, K. V. K. S. P, and K. S, "Image Captioning Using Deep Learning," in *2022 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Jan. 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICCCI54379.2022.9740788.
- [6] C. Bai, A. Zheng, Y. Huang, X. Pan, and N. Chen, "Boosting convolutional image captioning with

- semantic content and visual relationship," *Displays*, vol. 70, p. 102069, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.displa.2021.102069.
- [7] V. Agrawal, S. Dhekane, N. Tuniya, and V. Vyas, "Image Caption Generator Using Attention Mechanism," in 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Jul. 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9579967.
- [8] M. Kılıçkaya, E. Erdem, A. Erdem, N. İ. Cinbiş, and R. Çakıcı, "Data-driven image captioning with meta-class based retrieval," in 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Apr. 2014, pp. 1922-1925, doi: 10.1109/SIU.2014.6830631.
- [9] Y. Lu, C. Guo, X. Dai, and F.-Y. Wang, "Data-efficient image captioning of fine art paintings via virtual-real semantic alignment training," *Neurocomputing*, vol. 490, pp. 163-180, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.neucom.2022.01.068.
- [10] Z. Yang, P. Wang, T. Chu, and J. Yang, "Human-Centric Image Captioning," *Pattern Recognition*, vol. 126, p. 108545, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.patcog.2022.108545.
- [11] J. Li, N. Xu, W. Nie, and S. Zhang, "Image Captioning with multi-level similarity-guided semantic matching," *Visual Informatics*, vol. 5, no. 4, pp. 41-48, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.visinf.2021.11.003.
- [12] T. Jaknamon and S. Marukatat, "ThaiTC:Thai Transformer-based Image Captioning," in 2022 17th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP), Nov. 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/iSAI-NLP56921.2022.9960246.
- [13] A. Krisna, A. S. Parihar, A. Das, and A. Aryan, "End-to-End Model for Heavy Rain Image Captioning," in 2022 4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), Dec. 2022, pp. 1646-1651, doi: 10.1109/ICAC3N56670.2022.10074181.
- [14] P. G. Shambharkar, P. Kumari, P. Yadav, and R. Kumar, "Generating Caption for Image using Beam Search and Analyzation with Unsupervised Image Captioning Algorithm," in 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), May 2021, pp. 857-864, doi: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432245.
- [15] Y. Feng, K. Maeda, T. Ogawa, and M. Haseyama, "Human-Centric Image Retrieval with Gaze-Based Image Captioning," in 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Oct. 2022, pp. 3828-3832, doi: 10.1109/ICIP46576.2022.9897949.
- [16] C. Cai, K.-H. Yap, and S. Wang, "Attribute Conditioned Fashion Image Captioning," in 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Oct. 2022, pp. 1921-1925, doi: 10.1109/ICIP46576.2022.9897417.
- [17] X. Ye et al., "A Joint-Training Two-Stage Method For Remote Sensing Image Captioning," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-16, 2022, doi: 10.1109/TGRS.2022.3224244.
- [18] J. Wang, Z. Chen, A. Ma, and Y. Zhong, "Capformer: Pure Transformer for Remote Sensing Image Caption," in IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Jul. 2022, pp. 7996-7999, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883199.
- [19] R. Malhotra, T. Raj, and V. Gupta, "Image Captioning and Identification of Dangerous Situations using Transfer Learning," in 2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Mar. 2022, pp. 909-915, doi: 10.1109/ICCMC53470.2022.9753788.
- [20] Xin Yang et al., "Context-Aware Transformer for image captioning," *Neurocomputing*, vol. 549, p. 126440, 2023, doi: 10.1016/j.neucom.2023.126440.
- [21] M. Wang, L. Song, X. Yang, and C. Luo, "A parallel-fusion RNN-LSTM architecture for image caption generation," in 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Sep. 2016, pp. 4448-4452, doi: 10.1109/ICIP.2016.7533201.
- [22] M. Şeker and M. S. Özerdem, "Automated Detection of Alzheimer's Disease using raw EEG time series via. DWT-CNN model," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 13, no. 4, pp. 673-684, Jan. 2023, doi:10.24012/dumf.1197722.
- [23] S. Örenç, E. Acar, and M. S. Özerdem, "Utilizing the Ensemble of Deep Learning Approaches to Identify Monkeypox Disease," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 13, no. 4, pp. 685-691, Jan. 2023, doi:10.24012/dumf.1199679.
- [24] S. Degadwala, D. Vyas, H. Biswas, U. Chakraborty, and S. Saha, "Image Captioning Using Inception V3 Transfer Learning Model," in 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICES), Jul. 2021, pp. 1103-1108, doi: 10.1109/ICES51350.2021.9489111.
- [25] O. Turk, D. Ozhan, E. Acar, T. C. Akinci, and M. Yilmaz, "Automatic detection of brain tumors with the aid of ensemble deep learning architectures and class activation map indicators by employing magnetic resonance images," *Zeitschrift für Medizinische Physik*, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.zemedi.2022.11.010.
- [26] K. Joshi, V. Tripathi, C. Bose, and C. Bhardwaj, "Robust Sports Image Classification Using InceptionV3 and Neural Networks," *Procedia*

- Computer Science, vol. 167, pp. 2374-2381, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.290.
- [27] C. Szegedy et al., "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," in 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Jun. 2016, pp. 2818-2826, doi: 10.1109/CVPR.2016.308.
- [28] X. Yu, Y. Ahn, and J. Jeong, "High-level Image Classification by Synergizing Image Captioning with BERT," in 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Oct. 2021, pp. 1686-1690, doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9620954.
- [29] C. Zhang, Y. Dai, Y. Cheng, Z. Jia, and K. Hirota, "Recurrent Attention LSTM Model for Image Chinese Caption Generation," in 2018 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), Dec. 2018, pp. 808-813, doi: 10.1109/SCIS-ISIS.2018.00134.
- [30] K. Xu, H. Wang, and P. Tang, "Image captioning with deep LSTM based on sequential residual," in 2017 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Jul. 2017, pp. 361-366, doi: 10.1109/ICME.2017.8019408.



## Thermal Image Processing for Automatic Detection of Fusarium Root and Crown Rot Disease In Tomato Plants

Aysin BİLGİLİ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>: GAP Agricultural Research Institute, Planth Health Department, Sanlıurfa, [aysin.bilgili@tarimorman.gov.tr](mailto:aysin.bilgili@tarimorman.gov.tr), Orcid No: 0000-0003-0801-0484.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 10 August 2023  
Received in revised form 11  
October 2023  
Accepted 24 October 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Plant disease, thermal imaging,  
machine learning, tomatoes

Doi: 10.24012/dumf.1340922

\* Corresponding author

### ABSTRACT

Plant diseases can lead to significant yield losses and economic damages, but these losses can be mitigated through early disease diagnosis. In recent times, remote sensing techniques have been widely used for early disease detection even before visible symptoms appear. This study focused on the potential of early detection of Fusarium Root and Crown Rot in Tomato Plants, which causes substantial yield losses in tomato plants, under controlled conditions using thermal images. In this research, thermal images were obtained from both disease-inoculated and disease-free control plants throughout the plant growth period under controlled conditions. These images underwent preprocessing in a computer environment, and various feature parameters related to temperature changes in both groups (such as minimum, maximum, standard deviation, and skewness) were extracted. These extracted features were then used as inputs for different machine learning techniques, including K-Nearest Neighbors (KNN), Logistic Regression (LR), and Naive Bayes (NB), to classify healthy and diseased plants. Overall, the disease-inoculated plants exhibited higher average temperatures compared to the healthy control plants. The performance of the compared machine learning techniques in distinguishing between healthy and diseased plants was found to be in the order of KNN, NB, and LR, with success rates of 72%, 68%, and 60%, respectively. This study demonstrated the potential of using combined thermal images with different machine learning techniques for early diagnosis of Fusarium Root and Crown Rot in Tomato Plants. The results show promising prospects for utilizing thermal imaging in the early detection of plant diseases, leading to better management and reduction of yield losses and economic impacts.

## Introduction

Plant diseases cause significant losses in the yield and quality of cultivated crops reducing food security [1]. Globally, yield losses due to plant diseases can reach up to 20-30 percent [2],[3], depending on the type of plant and pathogen involved. However, these losses can be mitigated through early intervention and the use of advanced disease detection techniques. Traditionally, diseases have been identified using visual assessments and field surveys. Although these methods are commonly employed, they are expensive, time-consuming and more suitable for small-scale areas. Early intervention in disease management can also help reduce the inaccurate and excessive application of pesticides, offering environmental and economic benefits [4]. Consequently, research on this topic is of utmost importance [4],[5].

In recent years, the combination of remote sensing techniques and machine learning methods has become increasingly prevalent for disease detection. Remote sensing techniques offer several advantages, including quicker disease diagnoses and reduced labor requirements, particularly when dealing with large areas [1]. Spectroradiometry and satellite imagery are among the

remote sensing methods that have successfully been used for the early detection of various plant diseases [6], [7].

Thermal imaging has emerged as a popular non-destructive and user-friendly technique for detecting plant diseases, applicable in both laboratory and field settings. It operates by capturing radiance in the infrared spectrum (7-12 micrometers) and translating it into visible images, enabling the detection and measurement of temperature variations in objects. The application of thermal imaging has been extensively studied in diverse fields, including agriculture [8].

Thermal imaging technology detects temperature changes in plants caused by disease or pest infestation, indicating the presence of stress in the affected region [9]. These temperature fluctuations, which can be captured effectively using thermal imaging, are a result of internal chemical changes in infected plants and cannot be observed using visual imaging methods [10]. Analyzing these thermal changes provides valuable insights for early disease prediction and offers a promising approach for disease management.

Various studies have reported the use of thermal imaging technology for pre-symptomatic identification of diseases

[1], [9], [11], [12]. In their study, Raza et al. [11] developed a machine learning system to remotely detect plants infected with the tomato powdery mildew fungus. They combined thermal and visible light image data with depth information to improve detection accuracy. The researchers extracted a novel feature set from the image data using local and global statistics, which proved effective in capturing relevant information about the plants and their infection status. By integrating these features with depth information, they achieved a significant improvement in accuracy. Moreover, their feature set not only identified plants intentionally inoculated with the fungus but also detected plants that acquired the disease through natural transmission during the experiment. Overall, their findings demonstrated the potential of this combined approach for accurately detecting diseased plants and identifying both initially infected and naturally transmitted infections.

Tomatoes are a globally cultivated vegetable, with production exceeding 187 million tons and covering an area of over 5 million hectares. Türkiye ranks as the third-largest tomato producer globally, with a production of 13,204,015 tons and an area of 181,879 hectares in 2020 [13]. Tomato cultivation takes place in open fields as well as controlled environments like greenhouses. However, tomato crops are vulnerable to root rot and soil fungal diseases, leading to significant losses. Common fungal pathogens affecting tomatoes include *Fusarium* spp., *Rhizoctonia solani*, and *Sclerotium rolfsii*. Among them, *Fusarium* species, particularly *Fusarium solani* and *Fusarium oxysporum*, are responsible for a substantial proportion of plant diseases. Vascular wilt, a disease affecting tomatoes, is caused by a pathogen that enters the plant through roots or wounds and colonizes the vascular tissue, resulting in wilting. Root and crown rot diseases, characterized by wilting, yellowing, and drying of the plant, occur during the plant's growth period in the field [14].

*Fusarium* wilt can cause widespread epidemics, leading to significant yield reductions, sometimes up to 100%. Hyphae of the pathogens are activated by plant root secretions, allowing them to penetrate the roots and disrupt metabolism of the plant and sap circulation. As a result, the plant experiences reduced photosynthetic activity, wilting, and eventual death, impairing its ability to absorb and transport water and nutrients.

Remote sensing techniques, including spectral methods, have been extensively studied for the early detection of *Fusarium* root and crown rot diseases in tomatoes. However, the application of thermal imaging in the detection of root diseases in tomatoes is relatively limited. Specifically, in the case of tomato plants, there is a lack of studies focusing on the use of thermal imaging for detecting *Fusarium* spp. or other root diseases.

The goal of this study was to determine the effectiveness of thermal imaging in distinguishing between diseased and healthy tomato seedlings that were inoculated with a specific pathogen. The study aimed to assess the potential

of thermal imaging as a method for identifying and monitoring disease progression in tomato plants during their development stages.

## Materials and methods

### Climate room trial

Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings used in this study were grown in a climate room in the Plant Health Laboratory of GAP Agricultural Research Institute (GAPTAEM) at Sanliurfa province, Türkiye. H-2274 tomato variety sensitive to *Fusarium* spp. was used in this study. All the physical conditions of the climate room such as temperature (26°C), humidity (60%) and lighting (16 hours of light, 8 hours of darkness) were controlled at constant level. In the pots, a 1:1 mixture of peat and perlite was employed [15].

Tomato plants have been infected with *Fusarium* spp. disease. After the *Fusarium* disease was inoculated at the rate of  $10^4$  cfu/gr on tomato plants [14], the presence of the pathogen was tried to be detected with a thermal camera. The diseased tomato plants were screened by comparing with the healthy plants without any treatment. In this way, two different groups of tomato plants were obtained; these are diseased and inoculated with *F. solani* and *F. oxysporum* (*Fusarium* +), and healthy and uninoculated with *Fusarium* spp. (*Fusarium* -). Each group consisted of four pots and each pot was formed from 4 tomato seedlings. From each pot five leaves were randomly selected for thermal camera measurements.

The data used in the study are the reflection values taken from the tomato leaves by the thermal camera. To symbolize classes; (F) described tomato plants inoculated with *Fusarium* and (H) described as healthy tomato plants refers that the situation is present or not present.

### Experimental setup and inoculation of tomato plants

The root, crown rot and wilt fungi disease isolates used in the study were obtained from the Southeastern Anatolia Project (GAP) tomato fields and tested for their pathogenicity. Isolates with high levels of pathogenicity (*F. solani* 70 % and *F. oxysporum* 80 %) were used in testing. (Fig. 1.).

Artificial inoculation was performed by introducing fungal agar discs (2 mm in size) into autoclaved oat culture mixed with potato dextrose agar (PDA). The mixture was then allowed to grow for 2–3 weeks in an incubator. Subsequently, a 25 g/m<sup>2</sup> artificial culture of the fungal isolates was added to 2 kg pots containing a peat and perlite mixture in a 1:1 ratio by volume. Tomato seedlings, which were cultivated in controlled greenhouses at GAPTAEM Koruklu Research Station, were transplanted into the pots when they reached the 3–4 leaf stage, which was approximately 40–45 days after germination. Each fungus (*F. solani* and *F. oxysporum*-FORL) and the control group (non-inoculated plants) were subjected to separate experiments. The experiment followed a randomized plot design with 4 replications, and each replication contained



3 plants. Scala values used to evaluate the disease were 0-3, sensitive, moderate and resistant. The entire setup was kept in the Climate Chamber of the Plant Health Department of GAPTAEM (GAP Agricultural Research



Figure 1. In the left picture-c; Furthest right pot is Healthy Control Plants with uninoculated *F. solani* (F -), the other pots from right 2. 3. and 4. pots are Diseased Plants inoculated with *F. solani* (F +). In the right picture-d; The right tomato seedling is Diseased Plant inoculated with *F. oxysporum* (F+) and the left tomato seedling is Control-*F. oxysporum* (F-).

growing season. To monitor the progression of the experiment, thermal images were taken every week for 6 weeks, starting from the date the seedlings were planted in the pots.

Table 1. Thermal imaging sampling times and the number of samples taken

Date	Control	Diseased
20.12.2019	11 Sample	12 Sample
27.12.2019	12 Sample	12 Sample
02.01.2020	12 Sample	12 Sample
09.01.2020	12 Sample	12 Sample
17.01.2020	12 Sample	12 Sample
23.01.2020	12 Sample	12 Sample

### Thermal camera

The thermal camera serves as a diagnostic tool utilized across different industries to detect and measure abnormal temperatures or cold areas in specific regions. It comprises lenses and sensors designed to capture the thermal energy emitted by objects. Unlike other temperature-measuring devices, the thermal camera does not require direct contact with the equipment being assessed. Instead, it operates as an imaging system that analyzes infrared energy patterns. The camera translates this invisible infrared energy into visual representations, displaying the general structure of the image, along with colors and shapes corresponding to the infrared energy distribution. As a result, the thermal camera can identify issues that may not be visible to the naked eye, providing valuable insights into hidden problems and potential malfunctions [1], [16].

In this study, the TESTO 885 model thermal camera was used. The camera has a detector size of 320\*240 pixels.

Institute Directorate) under controlled conditions, maintaining a temperature range of 24 °C – 25 °C and a humidity level of 60% throughout the



The thermal information obtained is enhanced using SuperResolution technology, bringing it to a size of 640\*480 pixels. The camera allows measurements with a temperature resolution of 0.03°C. Thermal imaging is recorded at a 30-degree angle. Additionally, the camera captures RGB images, but the resolution and field of view for RGB images are higher. To utilize the images taken by the camera in the software, the camera's proprietary software, IRSOFT, was used to open and obtain both the thermal and RGB images on the computer (Fig.2.).

### Image Fusion of Thermal and RGB Images

The thermal camera used simultaneously captures thermal images and records RGB images. However, there are differences in the field of view, size, and resolution between the recorded thermal and RGB images. This dissimilarity complicates their combined usability during image analysis. To overcome this problem, an image alignment or registration process, known as Image Registration, is performed. With this process, the objects in the two images are brought to the same position or aligned. The image registration is carried out using a point matching method, specifically the SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) algorithm. This algorithm ensures scale-invariant feature transformation, enabling the matching of features between the thermal and RGB images. After the thermal and RGB images are successfully aligned, the resulting image is cropped to match the size of the thermal image.



Figure 2. Thermal imaging

**Plant Regions Segmentation and Obtaining Thermal Image Data of Plant Regions**

Flow Diagram given in Fig.3 shows the steps in early distinguishing of root rot disease in tomatoes.

In thermal images, all temperature information in a specific area is obtained on a pixel-by-pixel basis. Therefore, processing the entire thermal image can lead to erroneous results. To address this, the plant region is detected based on RGB images, and other areas are cleared from consideration. This process involves color-based segmentation, where the RGB image is transformed into the HSI (Hue-Saturation\_Intensity) color space using the expressions given in Equations given below. The resulting Hue data contains color information. For plant region detection, the Hue value within the range of 45 to 75 is selected. This range is used to identify green and related tones typically associated with plants. Using this color data, plant regions are separated from the rest of the image. The identified plant regions are then matched with the aligned thermal image. This process ensures that only the plant regions are obtained in the thermal image. It's important to note that the appearance of these regions may vary based on factors such as the leaf surface of the captured plant and the distance of imaging. These differences need to be considered while analyzing the thermal image of the plant regions.

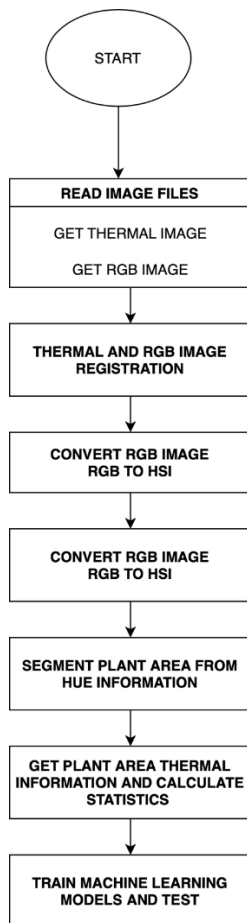


Figure 3. Flow Diagram demonstrating methodologies in early distinguishing of root rot disease in tomatoes

Initially, it is needed to begin the process of converting the RGB color space image to the HSI space by normalizing the RGB values (Equations 1 -3);

$$r = \frac{R}{R + G + B}, g = \frac{G}{R + G + B}, b = \frac{B}{R + G + B} \quad (1)$$

$$h = \cos^{-1} \left\{ \frac{0.5 \cdot [(r-b) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{1/2}} \right\} h \in [0, \pi] \text{ for } b \leq g \quad (2)$$

$$h = 2\pi - \cos^{-1} \left\{ \frac{0.5 \cdot [(r-g) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{1/2}} \right\} h \in [0, 2\pi] \text{ for } b > g \quad (3)$$

$$s = 1 - 3 \cdot \text{Min}(r, g, b) \quad s \in [0, 1]$$

$$i = (R + G + B) / (3 \cdot 255) \quad i \in [0, 1]$$

the h, s, and i values within the ranges [0, 360], [0, 100], and [0, 255], respectively, are calculated using the formulas: H = hx180/π, S = sx100, and I = ix255.

**Extracting Features from The Thermal Data of The ROI (Region of Interest)**

The thermal data of the identified plant regions serves as input data for the classification process. Statistical features are computed from the thermal image, including pixel count, maximum, minimum, mean, standard deviation, kurtosis, skewness, and moment values. By doing so, 8 feature attributes (Number of pixel, Min, Max, Mean, Standart deviation, Skewness, Kurtois, Moment) are obtained from the thermal image.

In our dataset, there are a total of 143 samples. 75% of these samples (108 samples) are used for training, while the remaining 25% (35 samples) are used for testing. The machine learning algorithms (Naive Bayes, Logistic Regression, and KNN) are trained using the 108 training samples, and then testing is performed on the 35 test samples. The obtained features are used to predict diseases using the mentioned algorithms.

The K-Nearest Neighbors (K-NN) algorithm looks at the k closest neighbors to determine the class or value of a data point. These neighbors are determined using a specific similarity metric. The parameter k represents the number of selected neighbors. In classification problems, the majority class of the neighbors is used for prediction, while in regression problems, the average value of the k nearest neighbors is used as the predicted value. K-NN is a simple algorithm that does not build a model during training, but its computational cost may increase with large datasets or a high number of features. Logistic regression is a statistical model used for classification problems. By learning the weights of independent variables in a dataset,

it predicts the probability of a data point belonging to a specific class. It employs a sigmoid function to constrain these probabilities to the [0, 1] range. Usually, probabilities above a specified threshold are assigned to one class, and those below it are assigned to another. Its simplicity, speed, and interpretability make it a preferred choice, especially for binary classification problems. Naive Bayes is a machine learning algorithm based on Bayes' Theorem and is particularly employed in applications like text classification. Essentially, it operates by assuming independence between features, which is often referred to as the "naive" assumption. During the training phase, probabilities for each class are determined, and during the testing phase, the probability of belonging to a specific class is calculated using Bayes' Theorem. The class with the highest probability is then selected as the prediction.

## **Results and Discussion**

The early diagnosis of plant diseases is crucial to mitigate economic losses caused by these diseases. In this context,

remote sensing techniques have become increasingly popular. Particularly, the use of thermal images combined with machine learning techniques for the early diagnosis of diseases has been found beneficial in controlled greenhouse conditions as well as field conditions [17].

In this study, thermal images of tomato plants with root disease inoculation and healthy tomato plants without disease inoculation were obtained under controlled conditions. The research aimed to explore the potential of using thermal images for early diagnosis of the disease. By comparing thermal images between the diseased and healthy plants, the study investigated the possibility of utilizing thermal imaging as a tool for early detection of the disease. Additionally, three different machine learning classification techniques were compared in this study for the classification of healthy and diseased plants based on thermal images.

Thermal images were obtained to compare temperature changes between healthy and pathogen-inoculated diseased plants. Thermal images were captured for both healthy and

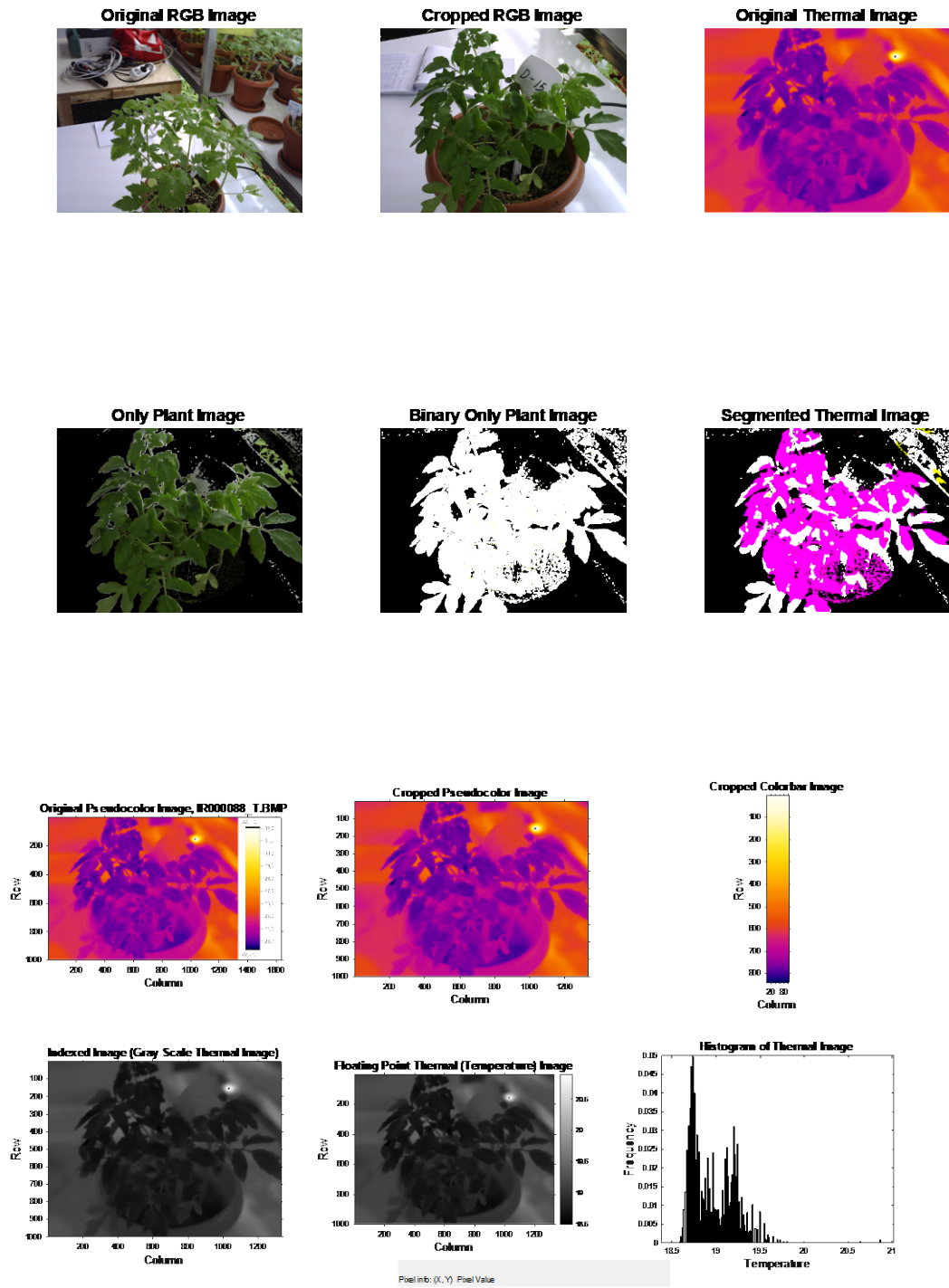


Figure 4. Pictures showing thermal and RGB images and their fusion

Table 2. The features extracted from thermal images of some plant samples.

SAMPLE	MIN	MAX	MEAN	STD_DEV	KURTOIS	SKEWNESS	MOMENT	WEEKS	CLASS	STATUS
1	18,50	20,90	20591,00	0,44	68295,00	-21943,00	-0,19	1	0	HEALTHY
8	20,90	21,90	21603,00	0,21	24835,00	-11559,00	-0,01	2	2	DISEASED
11	21,00	21,90	21632,00	0,19	24828,00	-11559,00	-0,01	2	0	HEALTHY
18	23,10	24,50	24084,00	0,29	24835,00	-11559,00	-0,03	3	2	DISEASED
29	22,10	23,70	23224,00	0,33	24835,00	-11559,00	-0,04	5	1	DISEASED
39	23,60	24,70	24373,00	0,23	24835,00	-11559,00	-0,01	6	1	DISEASED

diseased plants, and their temperature variations were compared. The table 2 presents some selected plants' statistical results regarding temperature changes. It can be observed that, generally, the average temperature values of diseased plants are higher compared to healthy plants.

Diseased plants may have higher temperatures when observed through thermal imagery due to several reasons that includes increased metabolic activity or inflammation response. Diseased plants often experience stress, which can lead to an increase in metabolic activity. The pathogen enters the plant through stomata, leading to alterations in the metabolic processes of plant tissues. This includes changes in respiration, photosynthesis, and transpiration within the plant. This heightened metabolic rate can generate more heat, causing the plant to have a higher temperature when compared to healthy plants [18]. Plants can activate defense mechanisms when they are under attack by pests or pathogens. These responses may include the release of signaling molecules or chemicals that can induce local inflammation-like reactions. These responses might elevate the temperature in the affected areas.

At a height of 50 cm from the canopy, using thermal images obtained from a thermal camera, researchers observed a decrease in leaf surface temperatures in diseased plants compared to healthy ones. However, in this study, there was an increase in temperature. The decrease in leaf surface temperature in diseased plants was attributed to the masking effect caused by fungal disease, which covers the leaf surface with spores [1]. Similarly, Awad et al. [19] found that in wheat plants artificially inoculated with pathogens under greenhouse conditions, there was a temperature decrease shortly after (around one hour later) the disease transmission. They attributed this temperature decrease to a similar cause. The high density of spores had a masking effect on the leaf surface, leading to a reduction in leaf surface temperatures in infected plants. On the other hand, researchers studying downy mildew in grapevines under field conditions observed an increase in leaf temperatures long before visible symptoms became apparent, using thermal images obtained with an infrared camera [18].

Table 3. The Accuracy assessment of distinguishing healthy and unhealthy plants based on thermal images using different machine learning techniques.

ACTUAL/ CLASSIFIED	HEALTHY/ HEALTHY	HEALTHY / UNHEALTHY	UNHEALTHY / HEALTHY	UNHEALTHY/ UNHEALTHY	ACCURACY	ERROR RATE
	TP	FP	FN	TN		
<b>KNN</b>	14	4	6	11	0,72	0,28
<b>Naive Bayes</b>	10	8	3	14	0,68	0,32
<b>Logistic Regression</b>	11	7	7	10	0,6	0,4

To evaluate the dependability of the classification approach, the accuracy of the classified images can be gauged using an overall accuracy metric. To calculate the overall accuracy, it involves dividing the number of correctly classified plants by the total number of plants [1].

Table 3 presents the error matrix for the classification outcomes using three different methods; KNN, Naive Bayes and Logistic regression. Among the four distinct classification methods, the KNN (k-Nearest Neighbors) technique yielded the highest classification accuracy, reaching 72%.

The Table 3 shows that disease detection can be achieved with 72% accuracy. Moreover, similar results were obtained with other methods.

Omran [1] achieved an overall success rate of 72 % in early distinguishing peanut leaf disease with varying degrees of disease using thermal imagery. The temperature difference observed between healthy and infected plants allowed the researchers to effectively differentiate between the two groups. The variations in leaf surface temperatures provided a clear distinction, enabling them to identify and discriminate healthy plants from those infected with the disease.

Synthetic data was generated using the SMOTE method. In this way the amount of data is doubled. The same results were obtained by applying statistical methods and machine learning methods. Since the results obtained were not different from the previous ones, it was seen that no advantage was gained by increasing the data.

In the study conducted by Singh et al. [17], they modeled the severity of wilting in chickpeas using RGB and thermal images, comparing different machine learning techniques. The researchers divided the dataset into two groups: the training set and the test set. The Cubist model outperformed other common machine learning models such as MARS, PLS, SVM and RF producing more successful results in comparison (with R2 value higher than 0.8).

## Conclusion

The results obtained from this study demonstrated the potential of using thermal images and machine learning techniques to diagnose Fusarium root and crown rot disease in tomatoes at an early stage under controlled conditions. Overall, the ability to distinguish between healthy and diseased plants at an early stage was found to be 72%. Among the compared classification techniques, the most successful one was K-Nearest Neighbors (KNN). However, the validity of the method needs to be tested by applying the results under field conditions. Additionally, further investigations are required to examine the applicability of integrating thermal cameras into unmanned aerial vehicles (drones) and testing the method on different plant species in various field conditions. Early diagnosis of plant diseases in this manner can prevent further spread of diseases, leading to reduced economic losses and a decrease in the use of chemicals, thereby contributing to environmental pollution reduction. In conclusion, the combination of thermal imaging and machine learning techniques holds promise for the early diagnosis of Fusarium root and crown rot disease in tomatoes. The potential implementation of this approach in real-world field conditions and on other plant types warrants further exploration for effective disease management and sustainable agriculture practices.

## Ethics committee approval

No ethical clearance is required for the preparation of the article.

## Conflict of Interest Statement

There are no conflicts of interest involving any individuals or institutions associated with the prepared article.

## Acknowledgement

I would like to thank Dr. Mehmet Emin Tenekeci for his contributions to obtaining the thermal images in the article.

## References

- [1] El-Sayed Ewis Omran, "Early sensing of peanut leaf spot using spectroscopy and thermal imaging", *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63:7, 883-896, 2017.
- [2] Carvajal-Yepes M, Cardwell K, Nelson A, Garrett KA, Giovanni B, Saunders DGO, Kamoun S, Legg JP, Verdier V, Lessel J, Neher RA, Day R, Pardey P, Gullino ML, Records AR, Bextine B, Leach JE, Staiger S, Tohme J., "A global surveillance system for crop diseases", *Science*, vol. 364, no. 6447, pp. 1237-1239, Jun 2019.
- [3] Savary S, Willocquet L, Pethybridge SJ, Esker P, McRoberts N, Nelson A. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol*. 2019 Mar;3(3):430-439. doi: 10.1038/s41559-018-0793-y. Epub 2019 Feb 4. PMID: 30718852.
- [4] J.C., Zhang, R.L., Pu, J.H., Wang, W.J., Huang, L., Yuan, J.H. Luo, "Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 85, pp.13-23. 2012.
- [5] E., Bauriegel, A., Giebel, M., Geyer, U., Schmidt, W.B. Herppich, "Early detection of Fusarium infection in wheat hyper-spectral imaging", *Computers in Agriculture*, vol. 75, pp. 304-312.
- [6] K., Karadag, M.E., Tenekeci, R., Taşaltın, A. Bilgili, "Detection of pepper fusarium disease using machine learning algorithms based on spectral reflectance". *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28, no. 100299. 2017.
- [7] A., Bilgili, A.V., Bilgili, M.E. Tenekeci, and K. Karadag, "Spectral characterization and classification of two different crown root rot and vascular wilt diseases (*Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici* and *Fusarium solani*) in tomato plants using different machine learning algorithms". *Eur J Plant Pathol*, vol. 165, pp. 271–286, 2023.
- [8] R. Ishimwe, K. Abutaleb, and F. Ahmed, "Applications of Thermal Imaging in Agriculture—A Review". *Advances in Remote Sensing*, 3, 128-140.
- [9] H. Erdoğan, A.K. Butuner and Y.S. Sahin, "Detection of Cucurbit Powdery Mildew, *Sphaerotheca Fuliginea* (Schlech.) Polacci by Thermal Imaging in Field



- Conditions” Scientific Paper Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development”, 23, 1, 2023.
- [10] I., Bhakta, S., Phadikar, K. Majumder, H. Mukherjee and A. Sau, “A novel plant disease prediction model based on thermal images using modified deep convolutional neural network”, *Precision Agric*, no: 24, pp. 23–39, 2023.
- [11] S.A. Raza, V. Sanchez, G. Prince, J. P. Clarkson, N. M. Rajpoot, “Registration of thermal and visible light images of diseased plants using silhouette extraction in the wavelet domain,” *Pattern Recognition*, vol. 48, no. 7, pp. 2119-2128, 2015.
- [12] I.C. Hashim, A.R.M.Shariff, S.K. Bejo, F.M. Muharam, K. Ahmad and H. Hashim, “ Application of thermal imaging for plant disease detection, ” *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 540, 012052.
- [13], FAOSTAT World Food and Agriculture- Statistical Yearbook 2022. <https://www.fao.org/3/cc2211en/cc2211en.pdf>.
- [14] A. Bilgili, “Determination of Root Rot Factors in GAP Region Pepper Cultivation, Molecular Characterization of the Active Pathogen and Investigation of the Efficiency of Mycorrhiza in its Control”. Ph.D Thesis, Turkey, Harran University. 2017 (In Turkish).
- [15] Upov. Tomato, guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability. 2013. Retrieved October 20, 2022, from <https://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg044.pdf>.
- [16] M., Çalışan, & İ. Türkoğlu, “Termal Kameralar Ve Uygulamaları, TMMOB Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu” 2011, Elazığ.
- [17] R.N. Singh, P. Krishnan, C Bharadwaj, B. Das, “Improving prediction of chickpea wilt severity using machine learning coupled with model combination techniques under field conditions”, *Ecological Informatics*, vol. 73, 101933, 2023.
- [18] S. Zia-Khan, M. Kleb, N. Merkt, S. Schock, J. Müller, “Application of Infrared Imaging for Early Detection of Downy Mildew (*Plasmopara viticola*) in Grapevine”, *Agriculture* 2022, 12, 617.
- [19] Y. M. Awad, A. A. Abdullah, T. Y. Bayoumi, K. Abd-Elsalam and A. E. Hassanien, "Early detection of powdery mildew disease in wheat (*triticum aestivum* L.) using thermal imaging technique", *Intelligent Systems' 2014*, pp. 755-765, 2015.



## Teknolojik Ürün İnceleme Veri Akışında Twitter Duyarlılık Analizi

*Twitter Sentiment Analysis on a Technological Product Review Data Stream*Sibel TARIYAN ÖZYER<sup>1\*</sup><sup>1</sup>: Ankara Medipol Üniversitesi, Ankara, [sbltariyan@gmail.com](mailto:sbltariyan@gmail.com), Orcid No: 0000-0002-0312-9016.

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 13 Ağustos 2023  
Revizyon 17 Ekim 2023  
Kabul 21 Ekim 2023  
Online 31 Aralık 2023

## Anahtar Kelimeler:

Twitter, Duygu Analizi, Ürün  
Yorumu

## ÖZ

Günümüzde twitter ve benzeri hizmetler birçok kullanıcı tarafından kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı olarak her yerde ve önemli hale gelmiştir. Kullanıcılar bu hizmetleri kullanarak içerik mesajlarını yayabilmektedirler; mevcut durumlarını paylaşabilmektedirler. Anlık mesajlar birçok kişiyle bilgi ve görüş paylaşımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu etkileşim, film ve ürün incelemeleri, haberler, etkinlikler vb. hemen hemen her şeyi içermektedir. Elektronik bilgi paylaşımından önce bir ürünü satın almak için fikir sahibi olmanın kaynağı, kişinin sosyal çevresi olarak tanımlanmaktaydı ancak Twitter'ın yaygınlaşmasıyla birlikte bu durum oldukça değişti. Tüm iş akışlarını ve pazarlama tekliflerini önemli ölçüde yeniden şekillendirmiştir. Markalar hakkında görüşlerin paylaşılması, kuruluşların da güvenirlenmeyen bazı kullanıcıların göz ardı edilmesinden sonra, kullanıcıların mesajlarını analiz edip toplayarak duygularının toplanmasına da yol açtı.

Tweet mesajları piyasalardaki düşüncüyü hayata geçirmek için oldukça verimlidir, ancak mesajlar kısa, yapılandırılmamış ve dilbilgisi açısından hatalı olabilir. Bu çalışmada kısa bir süreliğine yayınlanan bir mobil işletim sistemi sürümü ile ilgili mesajlar duygu analizi için incelenmiştir. Kullanım yorumlarını öğrenmek için tweet mesajları üzerine çalışılmıştır.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 13 August 2023  
Received in revised form 17 October 2023  
Accepted 21 October 2023  
Available online 31 December 2023

## Keywords:

Twitter, Sentiment Analysis,  
Product Review

## ABSTRACT

Nowadays twitter and similar services are being adopted by many users. They have become ubiquitous and important in real-time. By using these services, users can disseminate their contents and share their current status. Instant messages play an important role in sharing information and opinions with many people. This interaction includes almost everything like movie and product reviews, news, activities and etc. The source of information to have an opinion to buy an item was the social circle of oneself but it has changed after the prevalent use of twitter. It reshapes the whole business and marketing offerings substantially. Sharing opinions about the brands also oriented also organizations to analyze and collect the sentiment of the users after disregarding some of them because of trust issues.

Tweet messages are very resourceful to realize the opinion in markets, however messages may be short, unstructured and grammatically incorrect. In this paper, messages on a mobile operation system released for a short period of time has been studied for sentiment analysis. Tweets have been studied to know the usage comments.

Doi: 10.24012/dumf.1342578

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Twitter, günümüzde en popüler çevrim içi hizmetlerden biridir ve kullanıcıların tweet adı verilen durum mesajlarını oluşturabildiği günden güne artan fazla sayıda kullanıcı grubuna sahiptir. Kullanıcılar bu tweet gönderilerini yalnızca dünyadaki herhangi bir şey hakkında ne düşündüklerini güncellemek için değil, aynı zamanda ilgilendikleri ürünlere, hizmetlere, etkinliklere ve diğer Twitter kullanıcılarına yönelik görüşlerini ifade etmek için de kullanırlar. Yazarlar bu konuda [1] birçok durumu özetlemektedir. Twitter kullanıcıları tarafından ifade edilen görüşler, restoranlar, elektronik ürünler, oteller vb. hakkında ürün/hizmet incelemeleri gibi gerçek dünya durumlarında yararlıdır. Pazarlamacılar, bu tür tweet gönderileri üzerinde bir duyarlılık analizi yaparak, ürün ve hizmetlerine ilişkin halkın algısını belirleyebilmelidir; tüketiciler, diğer kullanıcıların ilgilendikleri ürün/hizmet hakkında ne düşündüklerini önceden bilebilir. Twitter, kullanıcılar arasında yönlendirilmiş bağlantılar sağlar ve geniş bir kullanıcı ve konu yelpazesinde duygu açısından zengin bilgiler barındırır. Bu nedenle, Twitter'dan kullanıcı görüş ve duygularının çıkarılmasının birçok uygulama için çok faydalı olacağı açıktır. Bu araştırmanın temel amacı, Twitter'da belirli bir ürün/hizmet hakkında yorum yapan gerçek kişilerin duygu/değerlendirmelerini belirleme sürecini kolaylaştırabilecek bir ürün veya hizmetle ilgili tweet mesajlarını analiz etmektir.

Bir duygu, bir kişinin olumlu veya olumsuz duygusu olarak tanımlanabilir. Görüş madenciliği, çeşitli içeriklerde ifade edilen görüşleri ayıklamak, sınıflandırmak, anlamak ve değerlendirmek için hesaplama tekniğidir [2]. Duygu sınıflandırması alanında, çoğu başlangıçta film incelemelerini [3] ve blog gönderilerini [4] sınıflandırmaya odaklanan ve film incelemelerini sınıflandırmak ve performanslarını karşılaştırmak için farklı sınıflandırıcılar kullanan önemli miktarda araştırma yapılmıştır.

Bu makalede ifade edilen duyguya dayalı olarak tweet gönderileri nötr/kutupsal olarak ve ardından kutupsal olarak pozitif veya negatif olarak sınıflandırmaya odaklanılmıştır, ayrıca -1 ile +1 arasında değişen kutupsallık için değer atanır; burada -1, güçlü olumsuz duyguyu, +1 ise güçlü olumlu duygu ve tarafsız bir inceleme/genel bilgi/yardım istemek için 0. -0,9 ila +0,9 arasındaki kutuplar, duyguları ifade etmek için kullanılan kelime ve ifadelerin yoğunluğuna göre atanır. Bu çalışmada, iOS7'nin insanlar tarafından yapılan incelemelerinde tartışılan önemli kavramları da belirlenmiştir. Çalışmada, tweet mesajlarından ürün güncelleme, pil, uygulama, bilgi, yardım olmak üzere beş önemli kavram belirlenmiştir. İnsanlar yeni işletim sistemi iOS7 hakkında beğenseler de beğenmeseler de genel olarak yorum yaptıklarında güncelleme atanır. Kişiler iPhone'larını iOS7'ye güncelledikten sonra pil ömrü hakkında yorum yaptıysa pil atanır. Uygulama konsepti, insanlar iOS7'nin yeni özellikleri/uygulamaları hakkında iyi ya da kötü tartışıyorsa atanır. Bilgi ve Yardım, iOS7 kullanıcılarının biraz yardım istediği veya diğer kullanıcıların sorularını yanıtladığı/iOS7 hakkında

bazı genel bilgiler sağladığı iki tarafsız kavramdır. Tweet mesajlarını çeşitli yönlerden kaynaklanan duygulara göre sınıflandırmaya çalışan çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada da aynı yaklaşım izlenerek insan faktörü ortadan kaldırılarak işlem yapılmaktadır. Duygu analizi çalışmasının tek bir ürüne/hizmete özgü olmamasına rağmen makalede yalnızca iOS7 ürünü üzerinde çalışılmıştır. İzlenen yol aynı olmasına rağmen farklı ürünler için Tweet gönderisinde duyguları kullanılan kelimelerin yoğunluğuna göre eğitim sonunda özelleşmiş sonuçlar elde edilebilir. Benzerliğine göre, diğer ürünler/hizmetler için de aynı veriler kullanılabilir; onlar hakkında yorum yapmak aynı olabilir.

Twitter'daki duygu analizi, makine öğrenimi yoluyla duygu analizi yapmaya çalışan diğer araştırmalardan farklı bir paradigmadır [6]. Bu, tweet içeriklerinde ifade edilen duyguları belirlemede mevcut olan kısıtlamalardan kaynaklanmaktadır. 140 karakterlik sınırlama nedeniyle, insanlar sıklıkla farklı bağlamlarda farklı yorumlara yol açabilecek kısaltılmış formlar ve kısaltmalar kullanırlar. Ayrıca argo kullanımı ve gramer yapısı tartışmaya açık olan cümleler ön işleme gereksinimini katlanarak artırır. Doğal dil işlemedeki bu tür sınırlamalar nedeniyle, bu sorun sonuçların doğruluğunu artırmada bir darboğaza dönüşmektedir. Belirsizlik, doğruluğu azaltan başka bir faktördür. Örneğin, insanlar "Nike" kelimesini hem popüler giyim ve aksesuar markasına hem de Yunan tanrıçasına atıfta bulunmak için kullanırlar, ancak bağlama bağlı olarak hangi Nike'tan söz ettikleri hemen belli olmayabilir. Bu nedenle, bazı durumlarda iki terimin net bir şekilde ayırt edilememesi hatalı sonuçlara yol açmaktadır. Ek olarak, ifadelerin ruh halini ifade etmek için kullanılması, duyguların duygusal semboller kullanılarak analiz edilmesine yönelik bir dizi araştırmayı da tetiklemiştir.

Twitter görüşlerinin analizi, çok çeşitli gerçek dünya uygulamaları için faydalı olacaktır; trendlere göre reklam yerleştirilmesinden, belirli bir konuya yönelik duygu toplayan uygulamalara kadar. Kullanıcılar, satın alma kararlarını bilinçli olarak vermek için belirli bir ürün veya hizmet için geri bildirim türünü belirleyebilir. Twitter'da ifade edilen görüşler, çoğunluğu BT okuryazarı olan çok geniş bir kitlenin algılarını yansıttığından, anket uygulamaları ve kuruluşlar bu araştırmadan özellikle yararlanacaktır. Ek olarak, tweet mesajları bir ülke gibi belirli bir coğrafi bölge için toplandığında, bu yaklaşım yerel bölgelere uyacak şekilde yapılabilir.

Bildirinin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm II'de, bu alanda daha önce yapılmış ilgili çalışmalar tartışılmaktadır. Bölüm III, verilerin ön işlenmesinde dikkate alınan teknikleri özetlemektedir; Bölüm IV, sınıflandırma için kullanılan yaklaşımları tartışır ve Bölüm V, bu araştırma süresince elde edilen sonuçları özetler. Son olarak, bölüm VI, bu çalışma için sonuç ve sınırlamaları belirtir.

## İlgili Çalışma

Mikroblog, internette hızla büyüyen yeni bir trend. Geleneksel olarak bloglar, yazması birkaç dakika süren uzun yazılardır. Mikroblog, kullanıcıların birkaç dakika

içinde kısa düşünceler veya bilgiler yayınlamasına olanak tanır. Bu nedenle, Twitter gibi mikroblog platformları, insanların ne yaptığını ve iletişim kurduğunu keşfetmenin harika bir yoludur [5]. Böylece Twitter trendlerini ve görüşlerini keşfetmek, araştırma için oldukça popüler bir alan haline geldi. Bu alanda dünyanın her yerindeki araştırmacılar ve akademisyenler tarafından birçok araştırma yapılmıştır. Duygu analizi günümüzde çok popüler bir araştırma konusu haline gelmektedir.

Tweetlerdeki duygu analizleri tipik olarak iki aşamada yapılır: (a) duygu ifadelerinin belirlenmesi ve (b) tweet gönderilerinde ifade edilen duygunun kutupsallığının belirlenmesi [7]. Araştırmacılar tarafından tweet gönderilerini sınıflandırmak ve Twitter'daki duyguları ve eğilimleri analiz etmek için kullanılan farklı yaklaşımlar olmuştur. Çoğu araştırmacı sözlüksel kaynakları kullanır ve Tweetlerin duygusallığına sözcüksel öğelerin varlığına göre karar verir [7][8]. Diğer bazı araştırmacılar, daha iyi doğrulukla daha fazla sonuç elde etmek için bağlaç kuralları gibi ek özellikleri sözcüksel analizle birleştirir [9].

Bu alandaki ilk araştırmalardan biri, yazarların tweet'lerdeki duyguları otomatik olarak sınıflandırmak için yeni bir yaklaşım uyguladıkları çalışmalarıdır[10]. Uzaktan öğrenme metotlarıyla tweet gönderisi içerisinde eklenen simgelerle, örneğin ☺ ile biten mesajlar olumlu olarak değerlendirmişlerdir. Aynı şekilde ☹ ile biten içerikleri de olumsuz olarak değerlendirmişlerdir. Öznitelik uzayında tek kelimelik veya ardışık iki kelimelik öbekleri dikkate almışlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, tek kelimelik öbeğin iki kelimelik öbektan daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu yaklaşımın bir dezavantajı, bu test için toplanan verilerin kelime bazlı arama sorgularıyla elde edilmesidir. Araştırmada ayrıca POS Tagger(sözcük türü etiketleyici) özelliklerinin kullanımını da denemiştir; sonuçlarının tweet mesajlarının sınıflandırılmasında yararlı olmadığı gösterilmiştir. Fransızca dilinde yapılan bir çalışmada da duygusal metinlerden oluşan bir sözlük oluşturularak video oyunu yorumlarında polarite sınıflandırması ile kelimelerin duygusal normları tespit edilmeye çalışılmıştır[13]. Twitter mesajları için otomatik bir duygu sınıflandırıcı Brezilya'daki bir TV şovu için atılan tweet mesajlarının duygu analizinde kullanılmıştır[14]. Tweet mesajları yalnızca bir duyarlılık puanıyla karakterize edilmemelidir, bunun yerine gönderideki her bir farklı kavram için bir duyarlılık notu verilmelidir. Bu, genel olarak, belirli bir konuyla ilgili gönderi görüşlerinin daha ayrıntılı bir analiziyle sonuçlanmasına sebep olacaktır[16]. Popüler olayların tipik olarak duyarlılık gücündeki artışlarla ilişkili olup olmadığını değerlendiren, bir aylık İngilizce Twitter gönderileri üzerine bir çalışmada da terim kullanımındaki görece artışın bir ölçüsüyle belirlenen ilk 30 olayı kullanan sonuçlara göre, popüler olayların normalde olumsuz duygu gücündeki artışlarla ilişkili olduğuna dair güçlü kanıtlar sunmaktadır. Olaylara ilginin zirveye ulaşmasının zirveye ulaşmadan önceki durumuna göre daha güçlü olumlu duygulara sahip olmasını tetiklediğine dair bazı kanıtlar sunmaktadır[17]. Akan twitter mesajlarında dengesiz sınıf etiketleriyle başa çıkarak sınıflandırma

yapabilmek için kayan pencereli bir Kappa istatistiği önerilmiştir[18]. Başka bir çalışmada, güncel bir konu olan COVID-19 üzerine duygu analizi gerçekleştirilmiştir[20]. Twitter duygu analizi için kavram tabanlı ve birleştirici hiyerarşik kümeleme üzerine inşa edilmiş denetimsiz bir topluluk/işbirliği çerçeveli farklı öğrenme yöntemleri önerilmiştir[21]. Dillerin duygu analizine etkisini araştırmak için 68 adet makale toplanmış ve farklı dillerde yapılan duygu analizindeki farklılıklar incelenmiştir[22]. Araştırmacıların duygu analizine ilişkin çalışmaları gözden geçirebilmesi için duygu analizine ilişkin literatür incelemeleri de mevcuttur[19].

Yapılan çalışmalardan birinde, üç farklı kaynaktan toplanan 1000 adet twitter verisinin kutupsallığının etiketlenmesi ve etiketlenen verinin kullanılarak geri kalan 1000 tweet verisinin kutup tahmini gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yazılan kutup tahminlerinin tetkikiyle tweet mesajlarının karakteristik özellikleri incelenmiştir. Tweetlerin nasıl yazıldığı gibi bazı özelliklerini ve onları oluşturmak için kullanılan kelimelerin meta bilgileri üzerine çalışılmıştır. Kelimelerin polaritesine ve kelimelerin türlerinin etiketine ek olarak, tweet mesajının başka biri tarafından tekrar gönderilme durumu, noktalama işaretleri, sosyal media etiketlerine sahip olması ve ünlem işaretleri gibi sözdizimi özellikleri kullanılmıştır. Elde edilen test sonuçlarının doğruluğu, (a) bu mesajların ham kelime temsili kullanmak yerine daha soyut bir temsil kullanarak oluşturulması; ve (b) birleştirilen veri kaynakları tarafından sağlanan makul kalitede etiketlere bağlıdır[11].

Farklı bir çalışmada, Google Nexus, Armani, Android vb. popüler ürünlerin hakkındaki duygularının tespit edilmesidir. Bu, söz konusu şirketler için ürünlerinin sakıncalarını tespit edebilmeleri nedeniyle ticari bir değere sahiptir. Hali hazırda, firmaların rekabet edebilmesi için ürünlerde yaşanan olumsuzluklar, duygu analizi takip edilerek gerektiğinde iyileştirmeler yapılabilir[12]. Yapılan çalışmada, önde gelen markalar hakkındaki ifadeler üzerinde duygu analizi yapılarak ticari duygu analizini gerçekleştiren ticari bir ürün tanıtılmaktadır. Başka bir çalışmada da anahtar kelimelerin fikir belirtmek için kullanımında gerekli eşleştirmelerin yapılması gerçekleştirilmiştir. Sosyal medya etiketlerinin de ifadelerin kinaye amacı taşıyıp taşımadığının tespiti ve dikkate alınmasında karar verme üzerine yaklaşımlar üzerine çalışılmıştır [5]. Örneğin #sarcasm hashtag'i, bir marka veya etkinlik hakkında alaycı tweet mesajları tanımlamak için kullanılabilir.

## Veri Seti

Önerilen yaklaşımda, Twitter'dan iOS7 için tweet mesajlarını toplamak için Twitter Arama API'sini kullanılmıştır. Twitter'dan veri toplama işlemi, beklenenden daha fazla çaba gerektirmesine rağmen tamamlandıktan sonra içerik bilgileri elle etiketlenerek eğitim verisi oluşturulmuştur. Veri seti, 2013-2104 yıl aralığında ürünün kısa süreli kullanımı sonrası revizyonla yenilenmesi nedeniyle seçilmiştir. Toplanan verilerin tarihi Ekim 2013'ten Aralık 2013'e süreyi içeren üç aylık bir süreyi kapsamaktadır.. Bu araştırmada kullanılan ürün

olan iOS7, Eylül ayı sonunda piyasaya sürülmüştür. Böylece insanlar sonraki aylarda bu konuda yorumlar yazarak ürün hakkındaki düşüncelerini paylaşmışlardır. Seçilen ürününü başka bir ilginç özelliği de insanların henüz iOS7 çıkmadan tweet mesajlarını atmaya başlamasıdır. İlgili o kadar fazladır ki iOS7 kullanıma sokulmadan önceki ve sonraki 24 saat içinde 7 milyon civarında tweet mesajı atılmıştır. Seçilen ürün hakkında atılan tweetlerin bu özellikleri toplanan yorumları ilginç bir veri kaynağı haline getirmektedir. iOS7 tweet'leri için eğitim seti, her tweet mesajına bir polarite değeri ve konsept bilgisi atanarak manuel olarak hazırlanmıştır. Eğitim ve test verisi olarak ayrılan veri setinde Olumsuz/Olumlu/Nötr tweetleri içeren 1.151 adet tweet mesajı eğitim amaçlı kullanılmaktadır. 22.899 tweet test amaçlı olarak kullanılmıştır. Bunun için NaiveBayesMultinomialText kullanılarak Java dilinde otomatik sınıflandırıcı uygulaması geliştirilmiştir.

## Veri İşleme

Tweet mesajlarında kullanıcıya veya duruma bağlı olan dil değişkenliğinin öngörülemeyen doğası nedeniyle belirli tweet içerik simgelerini standartlaştırmak için ön işleme tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Çoğu tweet mesajının bir tür gramer veya imla hatası, kısaltma, konuşma dili ve argo kelimeler içerme olasılığı çok yüksektir; Paylaşılan düşüncenin kısıtlı mesaj uzunluğu ile ifade edilmesi de durumu zorlaştırmaktadır.

Ön işleme süreci, ilgisiz mesajların veri setinin dışında bırakılarak yalnızca ilgili içeriği tweet mesajlarının dahil edilmesiyle başlamıştır. Bu yazıda uygulanan teknikler, özellikle mikro blog duygu analizinde bilgi alma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Toplanan veriler, mesaj dizilerinin özellik vektörüne dönüştürülmesine yardımcı olan bir dizi ön işlem adımından geçirilir.

Yürütülen ön işleme adımlarından bazıları aşağıda açıklanmıştır. Söz konusu ön işleme tekniği kullanılarak eğitim veri setinden çıkarılan özelliklerin/niteliklerin kalitesi, sınıflandırıcıların performansını doğrudan etkilediğinden, bu, tüm sınıflandırma sürecindeki en kritik aşamadır.

Ön işlem adımları, ifadeleri değiştirme, küçük harfe çevirme, url linklerini kaldırma, kullanıcı adlarının ve sosyal medya etiketlerinin kaldırılması, noktalama işaretlerinin kaldırılması, gereksiz kelimelerin kaldırılması ve fazladan uzatılan kelimelerin kaldırılması olarak belirlenmiştir.

## İfadeleri Değiştirme

Birçok mikro blog gönderisinde, ifadeler, kullanıcılar tarafından duyguları kısa ve öz bir şekilde ifade etmenin kolay bir yolu olarak kullanılmaktadır. Yorumları paylaşanlar metin içerisinde alaycı bir üslup kullanabilirler. Tweet mesaj içeriklerinde geçen kelimelerle ifade edilen duyguların tam tersi işaretler kullanarak tam tersi anlamlara işaret edebilirler. Örneğin, "iOS7'yi sevmiyorum. Olmamasına sevindim 😊". Bu cümle, kullanılan 😊 ifadesiyle birlikte ürün için

kelimelerde ifade edilen duygunun zıttı bir şekilde alaycı bir anlam içermektedir. Çoğu araştırmacı, ifadeleri tweet mesajının duygusunu tanımlamak için güçlü ifade sembolleri olarak kullanır, veri setinde kullanılan kelimeler ile duygunun aynı paralellikte olması için eğitim setinde iki anlamlı durumlara sahip olan mesajlardaki ifadeler kaldırılarak eğitim verisine dahil edilmiştir.

## Küçük Harfe Çevirme

Metinleri sınıflandırırken büyük/küçük harfe bakılmaksızın tüm belirteçlerin karşılık gelen özellikle eşleşmesinde tutarlılığı sağlama için kelime eşleştirmesinde bire bir aynı olması önemlidir. Mikro bloglarda düzensiz büyük harf kullanımı (bazı kişiler "iOS7FacINGBiGpRoBeLmS" gibi karışık harf kullanır) konusunda kısıtlayıcı bir durum olmamasından dolayı önem içermektedir.

## URL Linklerini Kaldırma

Alan darlığı ve ifade edilmek istenilen içeriklerin kapsamlı anlatılması gibi nedenlerle tweet mesajları URL linkleri de içerir. URL'deki içerik, bir kullanıcının ifade etmeye çalıştığı duyguyla ilgili ek bilgi sağlayabilir, ancak içerikleri için URL'leri ilaveten taranarak içeriklerini tutmak oldukça masraflı bir işlemdir. Bunun dışında, içeriklerin dinamik olması sebebiyle ilgili URL linkinin pasif olması veya içeriğinin değişmiş olması da muhtemeldir. Modelin eğitimi sırasında özellik boyutunu küçültmek için, eğitim tweet mesajlarındaki tüm URL'ler aynı değere eşleştirilmiştir. Tüm URL linkleri <URL> değeri ile değiştirilmiştir. Bu, özellik boyutunu önemli ölçüde azaltmıştır.

## Kullanıcı Adlarının ve Sosyal Medya Etiketlerinin Kaldırılması

Twitter'da gönderiler, bir kullanıcı adının önünde bir @ belirteci kullanılarak diğer kullanıcılara işaret edebilir. Ve kullanıcılar Twitter'da kategorik olarak işaretlemek için tweet mesajları # kullanarak etiketler. Yine, öznitelik sayısındaki fazla sayıda artışını önlemek ve farklı çok sayıda kullanıcı adıyla sınıflandırmada yanlış sonuçlar elde edilebileceğinden dolayı kullanıcı adından bahsedilmesi durumunda ilgili mesaj içeriğinde sabit bir <USER> sembolü ile kullanıcıdan bahsedilmesi gösterilmiştir. Kullanıcı adlarının ve aynı şekilde sosyal medya etiketlerinin bu şekilde değiştirilmesi, özellik boyutunu büyük miktarda azaltır.

## Noktalama İşaretlerinin Kaldırılması

Mikro blog alanında, uygun dilbilgisinden uzak durmak ve duyguları daha kolay iletmek için gereğinden fazla miktarda noktalama işareti kullanımı oldukça yaygındır. Çoğu zaman kullanıcılar tweet mesajını, tweet'in duygusuna herhangi bir anlam ifade etmeyen gereksiz noktalama işaretleriyle doldururlar. Bu nedenle, bu adımda, eğitim setinde gereksiz özelliği önlemek için ilgisiz noktalama işaretleri kaldırılmıştır.

## Gereksiz Kelimelerin Kaldırılması

Bilgi Erişiminde, sınıflandırma işlemine önemli bir değer katmayan, son derece yaygın (yüksek bir ters belge

frekansı değerine sahip) sözcükleri kaldırmak yaygın bir işlemdir. 'a', 'an' ve 'the' gibi yaygın sözcüklere toplu olarak gereksiz kelime adı verilir. Onları sınıflandırmanın karmaşıklığını azaltmak için tweet mesajlarından atılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Keza, bu kelimeler tweet mesajının anlamlandırılmasına bir katkı sağlamamaktadır.

### Uzatılan Kelimelerin Kısaltılması

Twitter kullanıcıları kendi dillerinde daha çok gayri resmi bir dil kullanma eğilimindedirler. Bazen kelimelerde yer alan bazı harfleri yineleyerek duygularını daha çok pekiştirme yoluna gidebilmektedirler. Örneğin, "saddddd" terimi, sadece "üzgün" ifadesinden daha fazla yoğunluk taşımaktadır. Eğitim ve değerlendirme sırasında, sürekli tekrarlanan herhangi bir karakterin veya harfin art arda üçten fazla tekrarlanması durumunda ilgili kelime sadece üç karakterlik bir diziye indirgenmiştir. Belirli bir kelimenin [15] düzenli kullanımı ile vurgulu kullanımı arasında ayırım yapılmalıdır. Örneğin, "coooooooooooooool" kelimesi daha yaygın olan iki karakterli "cool"a indirgenmek yerine "cool" a çevrilmiştir.

### Metodoloji

Bu bölümde, tweet gönderilerini sınıflandırmak için kullanılan yöntem açıklanmıştır.

### Deneyle

Bu çalışmada, Twitter'da yorum yapılan diğer tüm ürün/hizmetlerle aynı amaca hizmet eden etkin bir şekilde kullanılabilir iOS7 adlı bir ürünle ilgili büyük bir tweet mesaj havuzu tasnif edilmeye çalışılmıştır. Bu süreçte öncelikle gelen ön işlenmiş veriler nötr, pozitif ve negatif olmak üzere üç ayrı kategoriye ayrılır. Daha sonra, manuel olarak sınıflandırılan veriler, sınıflandırıcının eğitimi için eğitim verileri olarak kabul edilmiştir. Tweet'ler dizge şeklinde olduğundan, tweet mesajlarını sınıflandırmak için NaiveBayesMultinomialText sınıflandırıcısı kullanılır. Nötr verilerin belirlenmesi nedeniyle, pozitif/negatif sınıflandırma doğruluğunun arttığı sonucu çıkarılabilir.

### Tweet Mesajlarının Sınıflandırılması

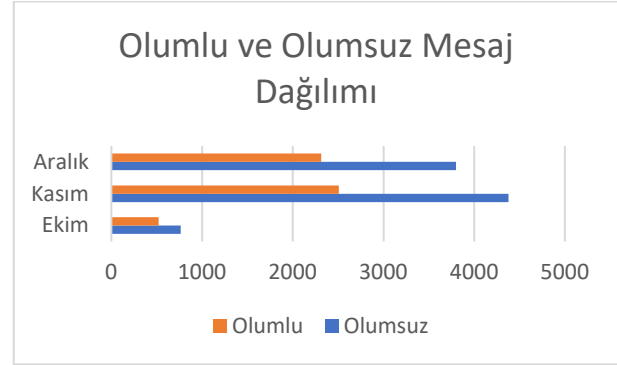
Önceden işlenmiş tweet mesajı verilerinin duyarlılık analizi, aşağıda tartışıldığı gibi sınıflandırıcı kullanılarak gerçekleştirilir. Yeni Zelanda Waikato Üniversitesi tarafından geliştirilen ve sürdürülen veri madenciliği ve makine öğrenimi aracı WEKA; WEKA'nın API versiyonu bu amaçla JAVA programı içerisine gömülü olarak kullanılmaktadır ve tweet mesajları eğitim veri setine ve kodda belirtilen sınıflandırıcıya göre otomatik olarak sınıflandırılmaktadır.

### NaiveBayesMultinomialText Sınıflandırıcısı

NaiveBayesMultinomialText sınıflandırıcısı, bir tweet'in nötr, pozitif veya negatif gibi belirli bir sınıfa ait olma olasılığını hesaplayan Bayes teoremine dayanan olasılıksal bir modeldir. Multinomial Naive Bayes, Naive Bayes'in daha çok metin belgeleri için tasarlanmış özel bir sürümüdür. Basit naif Bayes, bir belgeyi belirli kelimelerin varlığı ve yokluğu olarak modelleyebilirken,

Multinomial Naive Bayes, [10]'da belirtilen sorunlarla başa çıkabilmek için kelime sayımlarını açık bir şekilde modeller ve altta yatan katlı derim dağılımını kullanır. Sınıflandırıcının başta gelen avantajları düşük hesaplama maliyeti, büyük verilerle etkin bir şekilde çalışabilmesi, gerçekleştiriminin hızlı ve doğru çalışması, çoklu sınıf tahminine uygunluğu ve metin sınıflandırıcısı olarak iyi bir performans göstermesidir.

Bu deneyde, yukarıda tartışılan sınıflandırıcı, 22899 örneğin test veri seti için kullanılmıştır. Eğitim modeli, önceden işlenmiş manuel açıklanmış verilerin JAVA programında WEKA'ya yüklenerek oluşturulmuş ve daha sonra sınıflandırıcı eğitilmiş ve sonrasında test edilmiştir.



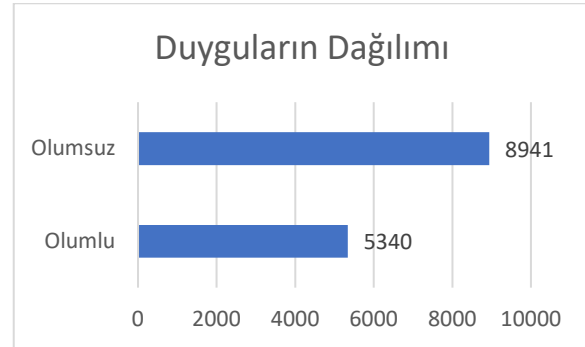
Şekil 1. Olumlu ve Olumsuz Tweet Mesajlarının Dağılımı.

Şekil 1'de olumlu ve olumsuz tweet mesajlarının aylık olarak dağılımı verilmektedir. Burada, üç aylık bir süre boyunca tweetlerin tweet mesajlarının sınıflandırılması verilmiştir. Bu zaman dilimindeki Twitter'da yer almış olan iOS7 tartışması gözlemlenebilir. iOS7 tweet mesajlarının genel sonucunun olumsuz olduğu sonucuna da varılabilir. İnsanların genellikle olumsuz bir izlenime sahip oldukları anlaşılmaktadır.

### Çıktılar ve Değerlendirme

#### Olumlu/Olumsuz Sınıflandırma

Aşağıdaki şekilde, test verisinde elde edilen doğruluk sonucu verilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Olumlu ve Olumsuz Duygular (%63 Olumlu, %37 Olumsuz).



Verilerin sınıflandırmasında yalnızca iki duyguya baktığımızda pozitif/negatif sınıflandırmada Multinomial Naïve Bayes sınıflandırıcısı %89 oranında doğruluk göstermiştir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada, Twitter mikroblog verilerinin duygu analizi ve görüş sınıflandırma problemi incelenmiştir. Ham twitter mesajlarının (tweetlerin) ön işleme detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ön işleme tabi tutulmuş tweet mesajlarının önemli bir adımı da mesajların konuyla alakalandırılması ve kutupluluk/nötr olma durumlarının manuel olarak gözden geçirilmiştir. Her bir tweet mesajı için manuel etiketlenerek bir kutup değeri atanır; Negatif tweetler için -0,1 ile -1 arasında değişen değerler, tweetlerin içerdiği kelimelerin yoğunluğuna göre, pozitif tweetler için yine tweetlerin içerdiği kelimelerin yoğunluğuna göre +0,1 ile +1 arasında değişen değerler atanır, Tarafsız tweetler ise eğer kullanıcılar tweetlerde genel bilgi veriyorsa veya herhangi bir konuda yardım istiyorsa 0 atanır. Bu işlem manuel olarak yapılır ve ardından Multinomial Naïve Bayes Sınıflandırıcı bu 1151 adet tweet verisi kullanılarak eğitilir ve elde edilen model kullanılarak 22.899 tweet mesajı otomatik olarak sınıflandırılır.

Bu çalışmada kullanılan sınıflandırıcı küçük veri setiyle eğitime olanak sağlaması, düşük hesaplama maliyeti, sonuçlarının doğru ve hızlı elde edilmesi ve doküman sınıflandırmasına uygunluğu gibi gerekçelerle seçilmiştir. İleride üstte bahsedilen seçme kriterlerinden feragat etmeden farklı sınıflandırma algoritmalarının birlikte yer alabileceği melez bir algoritma geliştirilebilir. Bu çalışmada, öznelilik uzayının küçültülmesi de hedeflenmiştir. Bunun için de mesajlar ön işlemden geçirilmiştir. Ancak ön işlem aşamasında da iyileştirmeler yapılabilir. Örneğin, kelimelerin eşanlamlıları, aynı yoğunluktaki kelimelerin kutuplarını elde etmek için kullanılabilir. Tweet mesajlarındaki argo ve yanlış yazılmış sözcükler dikkate alınmamıştır. Sınıflandırmada daha iyi sonuçlar elde etmek için argo ve yanlış yazımların düzeltilmesi ele alınabilir. Çünkü her veri kıymetlidir. Ayrıca, görünmeyen kelimeleri modellemek için Eklemeli Yumuşatma tekniği kullanılabilir.

Alay tespiti, karşılaştırma işleme, bağlam değiştirme vb. gibi doğal dil işleminin daha zor çalışma konularından bazıları da kullanılabilir. Uluslararası ifadelerin ve yabancı kelimelerin sınıflandırılması da daha ayrıntılı olarak incelenebilir.

## Kaynaklar

- [1] [Pang, Bo, and Lillian Lee. "Opinion mining and sentiment analysis." *Foundations and Trends® in information retrieval* 2.1–2 (2008): 1-135.
- [2] Pang, Bo, Lillian Lee, and Shivakumar Vaithyanathan. "Thumbs up? Sentiment

- classification using machine learning techniques." arXiv preprint cs/0205070 (2002).
- [3] Davidov, Dmitry, Oren Tsur, and Ari Rappoport. "Enhanced sentiment learning using twitter hashtags and smileys." *Coling 2010: Posters*. 2010.
- [4] Parikh, Ravi, and Matin Movassate. "Sentiment analysis of user-generated twitter updates using various classification techniques." *CS224N final report 118 (2009)*: 1-18.
- [5] Go, Alec, Richa Bhayani, and Lei Huang. "Twitter sentiment classification using distant supervision." *CS224N project report, Stanford 1.12 (2009)*: 2009.
- [6] L. Barbosa and J. Feng, Robust sentiment detection on twitter from biased and noisy data, in *Proc. 23rd International Conference on Computational Linguistics: Posters, 2010*, pp. 36-44.
- [7] Jansen, Bernard J., et al. "Twitter power: Tweets as electronic word of mouth." *Journal of the American society for information science and technology* 60.11 (2009): 2169-2188.
- [8] Prasad, Suhaas. "Micro-blogging sentiment analysis using bayesian classification methods." *Technical Report. Stanford University, 2010*.
- [9] Agarwal, Apoorv, et al. "Sentiment analysis of twitter data." *Proceedings of the workshop on language in social media (LSM 2011)*. 2011.
- [10] Murphy, Kevin P. "Naive bayes classifiers." *University of British Columbia 18.60 (2006)*: 1-8.
- [11] Pak, Alexander, and Patrick Paroubek. "Twitter as a corpus for sentiment analysis and opinion mining." *LREc. Vol. 10. No. 2010*. 2010.
- [12] Esmin, Ahmed AA, Roberto L. De Oliveira Jr, and Stan Matwin. "Hierarchical classification approach to emotion recognition in twitter." *2012 11th International Conference on Machine Learning and Applications. Vol. 2. IEEE, 2012*.
- [13] Pak, Alexander, and Patrick Paroubek. "Twitter for sentiment analysis: When language resources are not available." *2011 22nd International Workshop on Database and Expert Systems Applications. IEEE, 2011*.
- [14] Lima, Ana CES, and Leandro N. de Castro. "Automatic sentiment analysis of Twitter messages." *2012 Fourth International Conference on Computational Aspects of Social Networks (CASoN). IEEE, 2012*.
- [15] Celikyilmaz, Asli, Dilek Hakkani-Tür, and Junlan Feng. "Probabilistic model-based sentiment analysis of twitter messages." *2010 IEEE Spoken Language Technology Workshop. IEEE, 2010*.
- [16] Kontopoulos, Efstratios, et al. "Ontology-based sentiment analysis of twitter posts." *Expert systems with applications* 40.10 (2013): 4065-4074.
- [17] Thelwall, Mike, Kevan Buckley, and Georgios Paltoglou. "Sentiment in Twitter events." *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 62.2 (2011): 406-418
- [18] Bifet, Albert, and Eibe Frank. "Sentiment knowledge discovery in twitter streaming data." *International conference on discovery science*.

- Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [19] Giachanou, Anastasia, and Fabio Crestani. "Like it or not: A survey of twitter sentiment analysis methods." *ACM Computing Surveys (CSUR)* 49.2 (2016): 1-41.
- [20] Nezhad, Zahra Bokae, and Mohammad Ali Deihimi. "Twitter sentiment analysis from Iran about COVID 19 vaccine." *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews* 16.1 (2022): 102367.
- [21] Bibi, Maryum, et al. "A novel unsupervised ensemble framework using concept-based linguistic methods and machine learning for twitter sentiment analysis." *Pattern Recognition Letters* 158 (2022): 80-86.
- [22] Kılıçer, Seda, and Ruya Samli. "Farklı dillerdeki metinler üzerinde yapılan duygu analizi çalışmalarının incelenmesi." *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 13.3 (2022): 493-509.



# Classifying Release Notes Explanations using BERT: An Initial Step to Automatic Versioning in Distributed Software Development

Abdulkadir ŞEKER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet University, Computer Engineering Department, aseker@cumhuriyet.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-4552-2676

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 18 August 2023  
Received in revised form 11  
October 2023  
Accepted 21 October 2023  
Available online 31 December 2023

### Keywords:

Release note, Software versioning,  
Explainable AI, BERT, Software  
development process.

Doi: 10.24012/dumf.1345893

\* Corresponding author

## ABSTRACT

Distributed Software Development is the practice of developing software with a team in different locations. The process of software versioning is crucial in distributed development as it helps in keeping track of the various software versions that are being developed and maintaining projects. In transition of each new version, the development team present release notes that inform all team members and stakeholders are aware of changes and provide tracking project progresses. Release notes consist information about the features, bug fixes, and other changes included in a new software release. Generating release notes and determining the release transition timing for new software versions can be costly. Despite of there are some papers about generating release notes in the literature, there is not any study about automatic versioning. In this context, the aim of this paper is to predict the development types in release notes as the first phase of an automated versioning tool that is planned to be built in future work. We used BERT which is one of the popular transformers to classify developments of release notes and our model has 86% accuracy rate on our own public dataset. Additionally, we presented insights on the model's decision-making process in the context of explainable AI using ELI5 library.

## Introduction

Distributed software development (DSD) refers to the practice of developing software using a distributed team, where team members are located in different geographic locations [1]. There are several benefits to using a distributed team for software development includes accessing to a larger pool of talent, cost savings, improved work-life balance. DSD allows organizations to tap into a global pool of talent, allowing them to find the best developers for their projects regardless of location. It also allows for greater flexibility in scheduling and the ability to work around the clock, as teams in different time zones can take over development tasks [2].

One of the important processes of DSD is software versioning. Software versioning is the process of assigning unique version numbers to unique states of computer software [3]. These version numbers are used to identify and track changes to the software as it is developed and released. Versioning helps teams to coordinate the development and release of software, and it helps users to understand the state and evolution of the software [4].

There are many different conventions and strategies for versioning software, and the specific approach used can vary depending on the needs of the software and the

development team. In general, most of projects used semantic versioning [5]. In this approach, software versioning involves a combination of a major version number, a minor version number, and a patch number, with each number representing a different level of change to the software. Major releases are typically more significant and may include significant new features or major changes to the software. Minor releases, on the other hand, are typically smaller and may include bug fixes, security updates, and small new features or improvements. The frequency of minor releases is often higher than the frequency of major releases. The frequency of software releases can vary greatly depending on the software and the development team behind it. Some software is released on a very frequent basis, with new versions or updates being released every few weeks or even every few days. Other software may only be released once or twice a year, or even less frequently.

Each new version of software has release notes which explain the development of related release. Release notes are documents that provide information about the features, bug fixes, and other changes included in a new software release. They are typically written by the development team and are intended to help users understand what has changed in the latest version of the software [6]. Release notes may include a list of new features, a summary of bug fixes and

performance improvements, and any known issues or limitations. They may also provide guidance on how to upgrade to the new release, as well as information about compatibility with other software or systems. Release notes are an important resource for users, as they help them stay informed about the latest updates and ensure that they are using the most current version of the software. In the context of distributed software development, software release notes are particularly important for several reasons [7]. They help ensure that all team members and stakeholders are aware of the changes that have been made to the software. This is especially important in a distributed environment, where team members may be working in different locations and time zones. They can serve as a reference point for future development, allowing team members to easily look back and understand the reasoning behind certain decisions that were made. Moreover, they can also be used to help track the progress of the development project and identify any potential issues or delays. Overall, software release notes play a vital role in the successful development and distribution of software, helping to ensure that all team members are informed and aligned on the direction of the project. There are several types of developments that may be included in software release notes, such as new features, improvements, bug fixes, security updates, performance improvements and deprecations, etc.

The cost of generating release notes will depend on a number of factors, including the complexity of the software being released, the size of the team working on the project, and the tools and processes being used [8]. Development teams may feel that the process of generating release notes is an extra time burden [9]. Nevertheless, it requires them to document the changes that have been made to the software. However, release notes serve an important purpose in communicating the changes that have been made to stakeholders, such as customers, users, and other team members. Without clear and concise release notes, it can be difficult for these stakeholders to understand the impact of the changes and how they should be using the updated software. There are a number of ways that teams can make the process of generating release notes more efficient, such as using automated tools to generate draft release notes, establishing clear guidelines and templates for writing release notes, and involving the appropriate team members in the process.

In our empirical study, we firstly analyzed the release notes of a popular open source project and predicting the development types of release notes in order to automatically generate them in the next studies. To conduct this study, we collected some release notes from four open-source project. After that, we use the transformers that is the one of popular deep learning models to predict the development types. By predicting the development types of release notes, we may be able to automate the process of generating release notes for future releases. Thanks to automate this process, development team may be able to save time, resources and improve the efficiency.

Other parts of the study are organized as follows. In the second section, the data set used are explained in detail. In the third section, the literature that guided the study was

examined. The research methodology is presented and the findings are given in detail in the next sections. In the last section, the results of the study are presented and future studies are expressed.

## Related Works

Classifying and labeling issues in software projects is a significant challenge. While developers may occasionally label issues, the practice is not widely used [10]. Different methods are being explored to address this challenge. In one study, the authors examined the cost of inaccurately labeling issues [11]. In another study, a naive bayes method was used to classify and analyze 4000 issues extracted from JIRA [12].

Despite some studies on issue labeling and classification, there is limited research in the literature on classifying developments within release notes. The one of the studies about this problem, the authors used classic machine learning techniques. The most successful model is based on SVM with the %77 accuracy rate [13].

Some other studies focus on generating release notes. In a study, the authors develop a framework named as ARENA, for automatically generating release notes [9]. Another study found that release notes generated using this method were more accurate than those created manually [14].

Text classification serves as a foundational domain within the realm of natural language processing, garnering significant attention from researchers and practitioners alike [15]. In recent years, deep learning models have emerged as powerful tools for tackling this challenge, with transformers gaining widespread prominence [16]. Notably, Soyalp et al. introduced an expanded transformer model designed specifically for text classification tasks, achieving superior performance when compared to earlier state-of-the-art models like LSTM and CNN [17]. In another study, a BERT-based CNN model was leveraged to classify Chinese news articles, exhibiting exceptional accuracy [18]. These studies underscore the transformative impact of deep learning and transformer-based approaches in advancing text classification techniques.

## Materials and Methods

The diagram below illustrates the flowchart utilised in this study (Figure 1).

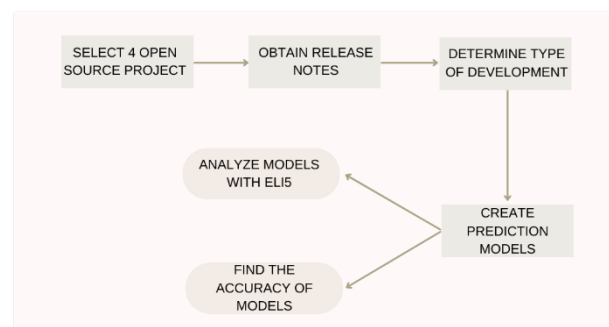


Figure 1. The flowchart of the study.

## Collecting Data with Labels

We selected four popular open-source projects in different domain to conduct our study. As we review projects, we determined according to their release consistency schedule and the presence of comprehensive release notes. Thus, we create a dataset from the release notes of Mozilla Firefox [19], Thunderbird [20], Slack [21], and OBSProject [22]. In our dataset, we collected 333 release notes published after each version's migration (Table 1).

To crawl this data, we used selenium framework. Our dataset is shared on a GitHub repository. With this framework, we navigate the web pages of each release. Thereby we use the unique features (id, class, type) of web components, we reach the context of release notes developments. Then, we record them with labels into an excel file. In the release notes, developments and changing labeled such as new, fixed, changed, unresolved, developer, enterprise, web platform, improvements, addition, etc.

The labels introduce the development types of release note explanations in related release. Some of them are given below.

- **New:** It typically refers to the introduction of new features or functionality that has been added to the software or system being released.
- **Changed:** It typically refers to modifications or updates that have been made to existing features or functionality of the software or system being released. It could also refer to changes in the behavior of the software or system. These changes could be bug fixes, performance improvements, or changes in the user interface or user experience.
- **Fixed:** It typically refers to a correction of a problem or error that existed in a previous version of the software or system. This could include resolving issues such as bugs, glitches, or crashes that have been reported by users or identified by the development team. These fixes are done to improve the stability, performance and correct the problem that was previously identified in the software.
- **Unresolved:** It typically refers to issues, bugs or problems that have been reported but have not yet been fixed or addressed in the current release. These are known issues that developers are aware of and are working to resolve in future releases. The unresolved issues may also be reported in the bug tracking system. This information is usually provided in the release notes to inform the users of the current state of the software and to set expectations for the known issues that are yet to be fixed.

As observed, the definitions of labels are often similar to one another, which makes the classification of them a challenging task.

As seen Figure 1, each release note consists of some development types of titles (new, fixed, development, etc.) and explanations about changing part of the application. While we were creating the dataset, we record each part of notes as an individual development.

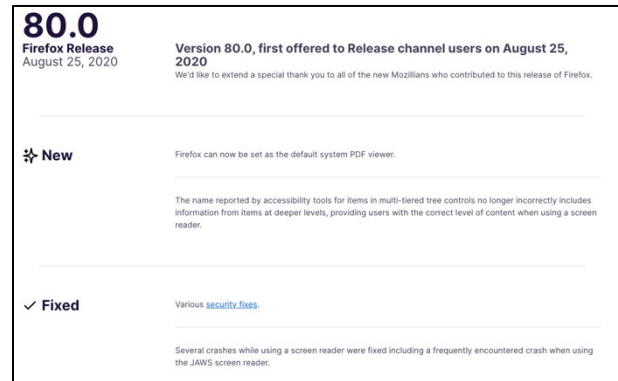


Figure 2. An example of a release notes of The Mozilla Firefox Project.

For example, in Figure 2, there are two changes that are titled with “New”. In this way, in our dataset there are 800 total rows with labels (Table 1).

Table 1. The dataset information.

	Release Count	Total Changes
Chrome	74	212
Slack	134	74
ThunderBird	67	196
OBSProject	58	318

In our dataset, some of the labels (classes) are used rarely. Because of that we bring together some labels into “other” label. In Table 2, it is given that the number of labels in our dataset.

Table 2. The label counts of changes in our dataset.

Initial Status		Status After Merge	
labels	count	labels	count
<i>new</i>	115	<i>new</i>	115
<i>fixed</i>	295	<i>fixed</i>	295
<i>changed</i>	226	<i>changed</i>	226
<i>unresolved</i>	63	<i>unresolved</i>	63
<i>developer</i>	30		
<i>enterprise</i>	32		
<i>web platform</i>	2	<i>other</i>	101
<i>improvements</i>	34		
<i>changed</i>	2		
<i>addition</i>	1		

## Pre-processing

Pre-processing is an important step in natural language processing (NLP). It involves preparing the raw text data for further processing and analysis. The specific steps in the preprocessing stage can vary depending on the task and the specific needs of the project, but common steps include;

- Tokenization: This involves splitting the text into individual words or smaller pieces called tokens.
- Lowercasing/uppercasing: This involves converting all text to either lowercase or uppercase.

- Removing punctuation: This involves removing any punctuation marks from the text.
- Removing numbers: This involves removing any numerical values from the text.
- Removing stop words: This involves removing common words that do not add significant meaning to the text, such as "the" "and" and "but".
- Stemming: This involves reducing words to their base form to reduce the dimensionality of the data. For example, "jumping" "jumps" and "jumped" would all be reduced to the base form "jump".

We applied pre-processing steps to our dataset, except for stemming. We attempted to use four different stemmer libraries/framework such as TextHero, Lancaster, Porter and Snowball. As seen in Table 3, we found that TextHero library has the most accurate and fastest stemming process among four, and noticed that it did not change the words too much. As a result, there was no significant impact on the prediction model, so we did not apply stemming to dataset.

### Creating Classification Model with Transformers

Transformers are a type of neural network architecture that was introduced in the paper of Vaswani et al [23]. Since then, they have become one of the most popular and effective models in natural language processing (NLP) tasks, such as machine translation and language modeling.

One of the key innovations of the Transformer architecture is the use of self-attention mechanisms. In a traditional

neural network, the input is processed sequentially through a series of layers, with each layer using the output of the previous layer as input. In contrast, the Transformer uses self-attention mechanisms, which allow the model to consider the entire input sequence simultaneously when processing a particular element in the sequence [23].

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) is a state-of-the-art language processing model developed by Google [24]. It is trained with approximately 4 million words extracted from Wikipedia and BooksCorpus to understand the context of a word based on the words that come before and after it—a technique called contextual modeling. BERT is designed to preprocess text data for natural language processing tasks such as question answering, classification, and language translation, by encoding the context of words in a sentence. DistilBERT, on the other hand, is a smaller and faster version of BERT. It is a distilled version of BERT, which means that it has been trained to have a smaller architecture while still maintaining a similar performance to BERT. DistilBERT can be fine-tuned for the same NLP tasks as BERT but with less computational resources.

To predict the development types of release notes changes, we used two different BERT models, “DistilBERT-base-uncased” and “BERT-base-uncased”.

We divided the dataset into 80% for training and 20% for testing. Before training, we shuffled data with the Pandas library. In one of the iterations, the distribution of labels in the training and testing datasets is shown in Table 4.

Table 3. The comparison of the stemming libraries.

	WORD	TextHero	Lancaster	Porter	Snowball
SAMPLE WORDS	information	information	inform	inform	inform
	developer	developer	develop	develop	develop
	various	various	vary	variou	various
	fixed	fix	fix	fix	fix
	images	images	im	imag	imag
	capturing	capture	capt	captur	captur
	activities	activities	act	activ	activ
	stories	stories	story	stori	stori
	automatic	automatic	autom	automat	automat
Running Time		75ms	576ms	856ms	702ms

Table 4. The distribution of the test-train dataset parts.

Label	Label_num	Type	Record
changed	4	train	180
		test	45
fixed	0	train	232
		test	58
new	2	train	90
		test	23
other	1	train	78
		test	20
unresolved	3	train	51
		test	12



We develop our models in the Google Colaboratory platform with NVIDIA-SMI GPU. We trained our models with ktrain library which is a lightweight wrapper library

for TensorFlow Keras. The hyper parameters of our models are given Table 5.

Table 5. The hyper parameters of our models.

	Bert	DistilBert
model name	BERT base uncased	DistilBERT base uncased
epoch size	5	5
learning rate	5e-5	5e-5
batch size	6	6
maxlen	500	500

## Results

### Model Results

Our model provides class-specific scores and overall evaluation metrics. Classification problems are commonly

evaluated using accuracy, precision, recall, and F1 score metrics. In a multi-class problem, the calculation of these metrics is specific to each class [25]. The terms of metrics (True Positives, True Negatives, False Positives, False Negatives) are different to binary classification. In figure 3, it is seen that the difference between them.

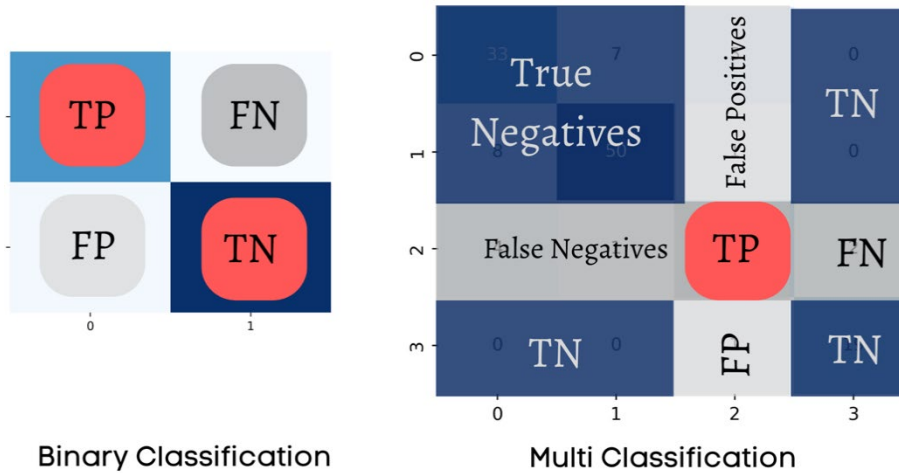


Figure 3. The comparison of between binary-class and multi-class classification.

Precision is referred to the proportion of correct predictions among all predictions for a particular class. Recall is referred to the proportion of examples of a specific class that have been predicted by the model as belonging to that class. F1 Score is the harmonic mean of precision and recall.

$$\text{precision}_{class_i} = \frac{TP_{class_i}}{TP_{class_i} + FP_{class_i}} \quad (1)$$

$$\text{recall}_{class_i} = \frac{TP_{class_i}}{TP_{class_i} + FN_{class_i}} \quad (2)$$

$$\text{f1score}_{class_i} = 2 \times \frac{\text{precision}_{class_i} * \text{recall}_{class_i}}{\text{precision}_{class_i} + \text{recall}_{class_i}} \quad (3)$$

These metrics should be used with caution as it can be misleading, especially when the class distribution is imbalanced. Because of that we also give macro and averaged metrics. The macro approach calculates the average measure for each class without considering class

size. In contrast, the weighted method takes into account the number of samples per class and calculates a weighted average measure. For example, weighted and macro precisions are calculated with Equation 4 and Equation 5.

$$\text{precision}_{weight} = \frac{\sum(\text{precision}_{class_i} * \text{number of sample}_{class_i})}{\sum(\text{number of sample}_{class_i})} \quad (4)$$

$$\text{precision}_{macro} = \frac{\sum(\text{precision}_{class_i})}{\text{number of classes}} \quad (5)$$

In these equations above, “i” is the class index and the sum (Σ) is over all classes.

In addition to these evaluation metrics, the confusion matrices of the models is also provided. The results of above metrics and confusion matrices for both models are presented below.

Table 6 and 7 present the precision, recall, and f1-scores for each class of the dataset. The last column shows the number of samples associated with each label. Additionally, the

overall macro and weighted metrics of the models can be found at the bottom of the table (italic). Lastly, the last row of the table shows the overall accuracy score of the model. In the tables, the top two scores in each column are displayed in bold font.

Table 6. The evaluation metrics of the “DistilBERT” model.

	<b>precision</b>	<b>recall</b>	<b>f1-score</b>	<b>support</b>
changed	0.73	0.73	0.73	45
fixed	0.83	0.85	0.84	59
new	0.67	0.70	0.68	23
other	0.90	0.95	0.93	20
unresolved	1.00	0.77	0.87	13
<hr/>				
macro avg	0.83	0.80	0.81	160
weighted avg	0.80	0.80	0.80	160
<hr/>				
<b>accuracy</b>	<b>0.80</b>		<b>160</b>	

The results of the first model “DistilBERT” are given Table 6. According to results, the model is given overall 0.80 accuracy. The confusion matrix of DistilBERT model is given Figure 4.

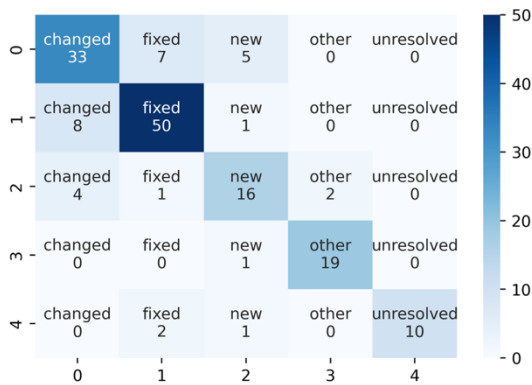


Figure 4. The confusion matrix of “DistilBERT” model.

The model confused between “changed” and “fixed” label. Indeed, these two classes are very similar in definition and content.

Table 1. The evaluation metrics of the “BERT” model.

	<b>precision</b>	<b>recall</b>	<b>f1-score</b>	<b>support</b>
changed	0.79	0.84	0.82	45
fixed	0.88	0.85	0.86	59
new	0.90	0.83	0.86	23
other	1.00	1.00	1.00	20
unresolved	0.79	0.85	0.81	13
<hr/>				
macro avg	0.87	0.87	0.87	160
weighted avg	0.87	0.86	0.86	160
<hr/>				
<b>accuracy</b>	<b>0.86</b>		<b>160</b>	

Table 7 presents the BERT model’s results. The BERT model has higher scores because it contains more comprehensive data than the DistilBERT model. In our dataset, we combined rare labels under the "other" category.

Because of the model has labeled all data it could not decide on as "other.", the highest scores are seen in the "other" label. The overall accuracy of this model is 0.86.

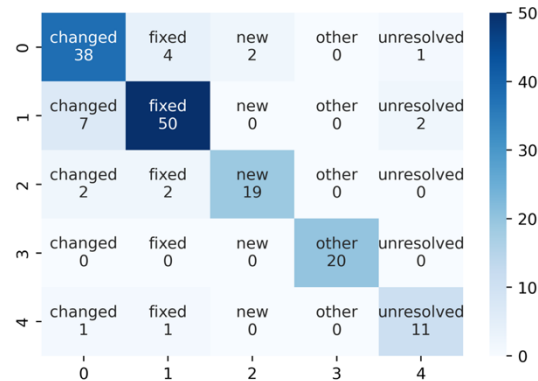
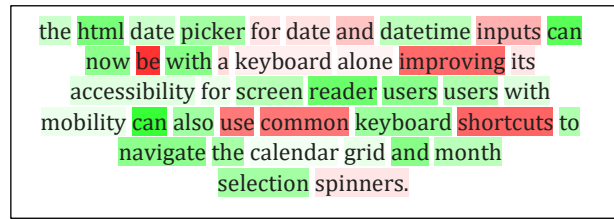


Figure 5. The confusion matrix of “BERT” model.

When looking at each class individually (Figure 5).

- ✓ The “changed” class is most often confused with the “fixed” class.
- ✓ The “fixed” class is most often confused with the “changed” class.
- ✓ The “new” class is most often confused with the “fixed” and “changed” classes.
- ✓ The “unresolved” class is most often confused with the “fixed” and “changed classes.

This situation also shows that the "changed" and “fixed” classes are the most difficult to distinguish.

After seeing these results, we wanted to perform another analysis to understand how the model makes decisions based on the classes.

**The explanation of AI**

We analyze the BERT model's explainable AI aspect in order to gain insight into the model's decision-making process. With this purpose, we use ELI5 (explain like I'm five) that is a Python library that provides an easy-to-use interface for interpreting the predictions of machine learning models [26]. It allows users to inspect the features of a model that are most important for making a prediction and to understand the reasoning behind a model's predictions. Additionally, it has some visualization tools which can be used to understand the predictions. It helps non-technical people or people who are not experts in machine learning to understand how a model works and why it makes certain predictions.

We gathered release notes from recent versions of Mozilla Firefox and observed which words in the release notes are prominent to classifying process. Besides, after removing these words from the sentence, we also investigate whether the decision of the model changes or not when we ask for a prediction again.

Our model correctly predicted the label for the first below sample, which was labeled as “new”.

*SAMPLE 1: “the html date picker for date and datetime inputs can now be with a keyboard alone improving its accessibility for screen reader users with mobility can also use common keyboard shortcuts to navigate the calendar grid and month selection spinners”*

ELI5 is a library that helps to explain the predictions made by the model. It produces a colorful output that shows which parts of the input were most important in the model's decision-making process. This can clarify how a model is making its predictions and identifying any potential issues or biases in the model's decision-making. In our sample the output of ELI5 explain() methods is given below.

In addition to the explanations, ELI5 also provides a table that shows the weights of the words in the input text during the decision-making process. The table can be used to identify any patterns or relationships in the input text that the model is using to make its predictions. In Table 8, it is seen that the words have negative impact on decision such as “improving, common, shortcuts and use”.

Table 2. The weights of words used by ELI5 to decision-making process in the Sample-1.

y=changed top features		y=fixed top features		y=new top features		y=other top features		y=unresolved top features	
Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature
+0.664	improving	+1.226	shortcuts	+0.419	mobility can	+0.471	mobility can	... 35 more positive ...	
+0.550	now be	+0.650	a keyboard	+0.310	now	+0.451	month	... 24 more negative ...	
+0.492	be	... 29 more positive ...		+0.294	navigate	+0.413	shortcuts to	-0.369	keyboard
+0.410	now	... 23 more negative ...		+0.270	can	... 34 more positive ...		-0.371	datetime
... 26 more positive ...		-0.440	also	... 38 more positive ...		... 22 more negative ...		-0.392	improving
... 34 more negative ...		-0.484	for	... 17 more negative ...		-0.375	be	-0.399	spinners
-0.461	month	-0.488	the	-0.344	mobility	-0.400	with	-0.406	the
-0.482	accessibility	-0.566	datetime	-0.416	common	-0.425	calendar	-0.408	can
-0.539	mobility can	-0.588	reader	-0.507	be	-0.480	picker	-0.451	shortcuts
-0.590	navigate	-0.746	to	-0.507	<BIAS>	-0.520	shortcuts	-0.460	for
-0.679	<BIAS>	-0.790	keyboard	-0.642	shortcuts	-0.542	keyboard	-0.511	<BIAS>
-0.705	users	-1.187	now	-0.711	improving	-1.023	now	-0.568	now

Then, we chose a description that our model is unable to predict correctly. Although, the correct label is “fixed”, the model predicted as “new”.

*SAMPLE 2: “when using a screen reader on windows pressing enter to activate an element no longer fails or clicks the wrong element and or another application window for those blind or with very limited vision this technology reads out loud what is on the screen and users can adapt them to their needs now on our platform without errors.”*

when using a screen reader on windows pressing enter to activate an element no longer fails or clicks the wrong element and or another application window for those blind or with very limited vision this technology reads out loud what is on the screen and users adapt them to their needs now on our platform without errors

Table 3. The weights of words used by ELI5 to decision-making process in the Sample-2.

y=changed top features		y=fixed top features		y=new top features		y=other top features		y=unresolved top features	
Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature
+1.241	without errors	+2.690	errors	+1.495	this technology	+1.196	this technology	+0.362	reads out
+0.842	this technology	+0.935	fails	+1.452	without errors	+0.961	vision this	+0.351	enter to
+0.534	longer	+0.835	when	+0.960	vision this	+0.863	without errors	+0.339	fails or
+0.474	for those	+0.669	wrong	+0.744	technology reads	+0.673	technology reads	... 38 more positive ...	
... 34 more positive ...		+0.540	using	... 37 more positive ...		+0.624	activate an	... 42 more negative ...	
... 41 more negative ...		... 39 more positive ...		... 36 more negative ...		... 41 more positive ...		-0.323	what
-0.500	users	... 40 more negative ...		-0.493	without	... 41 more negative ...		-0.328	clicks
-0.538	our	-0.670	vision this	-0.567	using	-0.469	platform	-0.370	using
-0.545	those	-0.683	for those	-0.580	<BIAS>	-0.477	limited	-0.405	pressing
-0.567	when	-0.692	technology reads	-0.648	fails	-0.564	activate	-0.447	a
-0.622	fails	-1.686	this technology	-0.668	no longer	-0.655	without	-0.515	<BIAS>
-1.728	errors	-2.010	without errors	-1.782	errors	-0.944	errors	-0.636	errors

As seen from Table 9, the phrase that cause the model to make mistakes can be given as " vision this technology reads ".

The last selected sample is one that our model was unable to predict correctly. The real label is “changed”, the model predicted as “new”.

SAMPLE 3: “firefox has a new focus indicator for links which replaces the old dotted outline with a solid blue outline this change unifies the focus indicators across form fields and links which makes it easier to identify the focused link especially for users with low vision.”

firefox has a new focus indicator for links which replaces the old dotted outline with a solid blue outline this change unifies the focus indicators across form fields and links which makes it easier to identify the focused link especially for users with low vision

Table 4. The weights of words used by ELI5 to decision-making process in the Sample-3.

y=changed top features		y=fixed top features		y=new top features		y=other top features		y=unresolved top features	
Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature	Weight?	Feature
+1.385	replaces	... 16 more positive ...		+1.291	firefox has	+0.927	new	+0.441	links which
+1.130	has	... 19 more negative ...		+0.732	which replaces	+0.700	which replaces	... 38 more positive ...	
+0.589	low	-0.399	low	+0.722	new	+0.674	firefox has	... 28 more negative ...	
+0.540	has a	-0.429	blue	+0.662	firefox	... 35 more positive ...		-0.369	low
+0.480	blue	-0.473	indicator	+0.259	users with	... 25 more negative ...		-0.375	new
... 22 more positive ...		-0.478	replaces	+0.258	old dotted	-0.504	low	-0.381	the
... 39 more negative ...		-0.484	easier	... 32 more positive ...		-0.514	<BIAS>	-0.403	which
-0.463	indicator	-0.492	vision	... 24 more negative ...		-0.615	old	-0.406	focus
-0.781	firefox	-0.509	outline	-0.294	change	-0.639	has a	-0.421	a
-1.087	which replaces	-0.525	focus	-0.605	has	-0.679	blue	-0.463	links
-1.185	new	-0.777	new	-0.890	replaces	-0.701	replaces	-0.484	outline
-1.779	firefox has	-0.838	firefox	-0.950	<BIAS>	-1.121	has	-0.492	<BIAS>

The words “replace” and “new” have negative impact to the decision of the model.

As can be seen from the examples, an AI model considers some words more when deciding for text classification. Particularly effective words here are "replace, fix, new, this, etc".

**Evaluating Model with Unseen Data**

Lastly, we used data not seen by the model to evaluate our best model. The results for the 10 enhancements taken from the version notes of the new versions that are not in the dataset are given below (Table 5). In this context, it is also seen that the dataset is %84 successful.

**Conclusion**

In this paper, we analyzed the release notes of four open-source projects. In these release notes, we aimed to predict the development types such as new, fixed or changed. Contrast to previous papers, we used for classification BERT that is one of the popular transformer models. We developed models with two different pre-trained models of BERT.

In the text classification model development process, there's a pre-processing step applied to text data. However, after trying 4 different stemming libraries, we found that stemming did not have a significant impact on the model. Because of that, we apply other process except stemming.

As results of models are given that some common metrics such as accuracy, recall, precision, and f1-score. We presented the scores per class and the average scores calculated using various methods while presenting results. We achieved better results compared to a study using traditional machine learning methods.

Besides, according to our conclusions from the confusion matrices, the model experiences the most confusion in the "changed" and "fixed" classes. It is also estimated that these two classes are similar to each other when considering the developments made in version transitions.

Lastly, we investigated how the model made its classification decision using explainable AI concept and presented the prominent parameters (words) in this context.

In this research paper, we employ text classification techniques, a fundamental aspect of Natural Language Processing (NLP), to address a pertinent challenge within the realm of software engineering. Our objective is to extend our investigations in future work by analyzing commit notes within open-source projects. Specifically, we aim to ascertain the nature of the development being undertaken within these projects. Furthermore, we intend to provide recommendations for version transitions and their corresponding significance levels based on the degree of change identified in these commit notes. This research bridges the gap between NLP and software engineering, offering valuable insights into the management and evolution of open-source software projects.

Table 5. Unseen data scores of the best model

	Text	Actual Class	Predicted Class
1	You'll encounter less website breakage in Private Browsing and Strict Enhanced Tracking Protection with SmartBlock, which provides stand-in scripts so tha...	new	new
2	Now, you can set a default app to open a file type. Choose the application you want to use to open files of a specific type in your Firefox settings	fixed	new
3	The native HTML date picker for date and datetime inputs can now be used with a keyboard alone, improving its accessibility for screen reader users. Users ...	new	changed
4	Firefox builds in the Spanish from Spain (es-ES) and Spanish from Argentina (es-AR) locales now come with a built-in dictionary for the Firefox spellchecker	new	new
5	Fixes the default search engine being reset on upgrade for profiles which were previously copied from a different location.	fixed	fixed
6	You can now pin private windows to your Windows taskbar on Window 10 and Windows 11 for simpler access. Also, private windows have been redesigned...	new	new
7	Removed a configuration option to allow SHA-1 signatures in certificates: SHA-1 signatures in certificates—long since determined to no longer be secure ...	changed	changed
8	Power profiling — visualizing performance data recorded from web browsers — is now also supported on Linux and Mac with Intel CPUs, ...	new	new
9	When using a screen reader on Windows, pressing enter to activate an element no longer fails or clicks the wrong element and/or another application window.	fixed	fixed
10	Removed subject common name fallback support from certificate validation. This fallback mode was previously enabled only for manually	changed	changed

## References

- [1] A. B. Marques, R. Rodrigues, and T. Conte, 'Systematic literature reviews in distributed software development: A tertiary study', in IEEE 7th International Conference on Global Software Engineering, ICGSE 2012, 2012, pp. 134–143. doi: 10.1109/ICGSE.2012.29.
- [2] L. Linsbauer, F. Schwägerl, T. Berger, and P. Grünbacher, 'Concepts of variation control systems', *Journal of Systems and Software*, vol. 171, p. 110796, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JSS.2020.110796.
- [3] A. M. Aytakin, 'Release Management with Continuous Delivery: A Case Study', *Release Management with Continuous Delivery: A Case Study*, vol. 8, no. 9, 2014, Accessed: Jan. 08, 2023. [Online]. Available: <https://publications.waset.org/9999440/release-management-with-continuous-delivery-a-case-study>
- [4] L. Layman, L. Williams, D. Damian, and H. Bures, 'Essential communication practices for Extreme Programming in a global software development team', *Inf Softw Technol*, vol. 48, no. 9, pp. 781–794, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.INFSOF.2006.01.004.
- [5] T. Preston-Werner, 'Semantic Versioning 2.0.0 | Semantic Versioning'. Accessed: Jan. 10, 2023. [Online]. Available: <https://semver.org/>
- [6] G. Karsai and D. Balasubramanian, 'Assurance Provenance: The Next Challenge in Software Documentation', in *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Software Engineering*, vol. 13702, T. Margaria and B. Steffen, Eds., Springer, Cham, 2022, pp. 90–104. doi: 10.1007/978-3-031-19756-7\_6.
- [7] A. C. B. G. da Silva, G. de F. Carneiro, F. Brito e Abreu, and M. P. Monteiro, 'Frequent Releases in Open Source Software: A Systematic Review', *Information 2017*, Vol. 8, Page 109, vol. 8, no. 3, p. 109, Sep. 2017, doi: 10.3390/INFO8030109.
- [8] S. S. Nath and B. Roy, 'Automatically Generating Release Notes with Content Classification Models', *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, vol. 31, no. 11–12, pp. 1721–1740, Jan. 2022, doi: 10.1142/S0218194021400192.
- [9] L. Moreno, G. Bavota, M. Di Penta, R. Oliveto, A. Marcus, and G. Canfora, 'ARENA: An Approach for the Automated Generation of Release Notes', *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 106–127, Feb. 2017, doi: 10.1109/TSE.2016.2591536.

- [10] A. Şeker, B. Diri, and H. Arslan, 'Using Open Source Distributed Code Development Features on GitHub: A Real-World Example', in 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, 2020, pp. 518–525.
- [11] K. Herzig, S. Just, and A. Zeller, 'It's not a bug, it's a feature: How misclassification impacts bug prediction', in Proceedings - International Conference on Software Engineering, 2013, pp. 392–401. doi: 10.1109/ICSE.2013.6606585.
- [12] M. Ohira et al., 'A dataset of high impact bugs: Manually-classified issue reports', in IEEE International Working Conference on Mining Software Repositories, IEEE Computer Society, Aug. 2015, pp. 518–521. doi: 10.1109/MSR.2015.78.
- [13] A. Şeker, S. Yeşilyurt, İ. Can Ardahan, and B. Çınar, 'Prediction of Development Types from Release Notes for Automatic Versioning of OSS Projects', in Smart Applications with Advanced Machine Learning and Human-Centred Problem Design, Springer International Publishing, 2023, pp. 399–407. doi: 10.1007/978-3-031-09753-9\_28.
- [14] M. Ali, A. Aftab, and W. H. Butt, 'Automatic Release Notes Generation', Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences, ICSESS, vol. 2020-October, pp. 76–81, Oct. 2020, doi: 10.1109/ICSESS49938.2020.9237671.
- [15] S. Minaee, N. Kalchbrenner, E. Cambria, N. Nikzad, M. Chenaghlu, and J. Gao, 'Deep Learning--based Text Classification: A Comprehensive Review', ACM Computing Surveys (CSUR), vol. 54, no. 3, Apr. 2021, doi: 10.1145/3439726.
- [16] A. Gasparetto, M. Marcuzzo, A. Zangari, and A. Albarelli, 'A Survey on Text Classification Algorithms: From Text to Predictions', Information 2022, Vol. 13, Page 83, vol. 13, no. 2, p. 83, Feb. 2022, doi: 10.3390/INFO13020083.
- [17] G. Soyalp, A. Alar, K. Ozkanli, and B. Yildiz, 'Improving Text Classification with Transformer', Proceedings - 6th International Conference on Computer Science and Engineering, UBMK 2021, pp. 707–712, 2021, doi: 10.1109/UBMK52708.2021.9558906.
- [18] X. Chen, P. Cong, and S. Lv, 'A Long-Text Classification Method of Chinese News Based on BERT and CNN', IEEE Access, vol. 10, pp. 34046–34057, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3162614.
- [19] 'Mozilla Firefox Release Notes'. Accessed: Jan. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.mozilla.org/en-US/firefox/releases/>
- [20] 'Thunderbird Release Notes — Thunderbird'. Accessed: Jan. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.thunderbird.net/en-US/thunderbird/releases/>
- [21] 'Slack for Windows - Release Notes | Slack'. Accessed: Jan. 16, 2023. [Online]. Available: <https://slack.com/release-notes/windows>
- [22] 'Releases · obsproject/obs-studio'. Accessed: Jan. 16, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/obsproject/obs-studio/releases>
- [23] A. Vaswani et al., 'Attention is All you Need', in Advances in Neural Information Processing Systems, Curran Associates, Inc., 2017.
- [24] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. T. Google, and A. I. Language, 'Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding', in Proceedings of NAACL-HLT 2019, Minnesota, 2019, pp. 4171–4186. Accessed: Jan. 17, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1810.04805>
- [25] M. Grandini, E. Bagli, and G. Visani, 'Metrics for Multi-Class Classification: an Overview', arXiv preprint arXiv:2008.05756, Aug. 2020.
- [26] 'ELI5 '. Accessed: Jan. 24, 2023. [Online]. Available: <https://eli5.readthedocs.io/en/latest/overview.html>





## COVID-19 Aşıları için Türkçe Tweetlerle Duygu Analizi

*Sentiment Analysis with Turkish Tweets for COVID-19 Vaccines*Deniztan Ulutaş Karakol<sup>1\*</sup>, Çetin Cömert<sup>2</sup><sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, [deniztanulutas@ktu.edu.tr](mailto:deniztanulutas@ktu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2131-1057><sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, [ccomert@ktu.edu.tr](mailto:ccomert@ktu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2019-6990>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 11 Eylül 2023  
Revizyon 3 Aralık 2023  
Kabul 7 Aralık 2023  
Online 31 Aralık 2023

## Anahtar Kelimeler:

Metin madenciliği, Tweet analizi,  
Duygu analizi, COVID-19 aşıları,  
Pandemi

## ÖZ

Zamanın ve teknolojinin gereksinimleri ile "Web" anlamsal ve akıllı teknolojilerle dönüşüme uğramış ve kullanıcıların aktif olarak içerik yaratabildiği, herhangi bir konuda görüşlerini ifade edebildiği çok yönlü sanal interaktif bir platform haline gelmiştir. Bu platformlardan biri olan sosyal medya sayesinde bilgi ve fikirlerin yayılması kolaylaşmıştır. Günümüzde sosyal medya platformlarında üretilen veriler metin madenciliği yöntemleri sayesinde basit, hızlı ve etkili bir şekilde analiz edilebilmektedir. Analiz sonuçları satış tahminleri, pazarlama, çevre, sağlık, toplumun duygu ve düşüncelerini saptama gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada COVID-19 global hastalığı için geliştirilen Sinovac ve Biontech aşıları için Twitter kullanıcılarının paylaştıkları tweetler üzerine zamansal duygu analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylece aşıların insanlar üzerindeki olumlu ya da olumsuz etkileri ortaya çıkarılmıştır. Sonuçta aşı olan ya da olmayan insanların aşılarına karşı duyguları ölçülmüş, aşıların olumlu ya da olumsuz etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, insanların çoğunlukla aşılarından memnun olduğu görülmektedir. Ancak nüfusun bir kısmının endişe ve korku duyması, aşıların insanlar üzerindeki etkisinin olumsuz taraflarını da yansıtmaktadır. Bu çalışma farklı aşı veya tıbbi tedavi türleri için de uyarlanıp insanlar için yol gösterici olabilir.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 11 September 2023  
Received in revised form 3 December 2023  
Accepted 7 December 2023  
Available online 31 December 2023Keywords: Text mining, Tweet  
analysis, Sentiment analysis,  
COVID-19 vaccines, Pandemic

Doi: 10.24012/dumf.1358519

\* Sorumlu Yazar

## ABSTRACT

With the requirements of time and technology, the "Web" has been transformed by semantic and smart technologies and has become a versatile virtual interactive platform where users can actively create content and express their opinions on any subject. Thanks to social media, which is one of these platforms, the dissemination of information and ideas has become easier. Today, data produced on social media platforms can be analyzed simply, quickly and effectively thanks to text mining methods. Analysis results are used in many areas such as sales forecasts, marketing, environment, health, and determining the feelings and thoughts of the society. From this point of view, in this study, a temporal sentiment analysis was performed on the tweets shared by Twitter users for the Sinovac and Biontech vaccines developed for the COVID-19 global disease, and the results were compared. Thus, the positive or negative effects of vaccines on humans have been revealed. As a result, the feelings of people who have or have not been vaccinated against vaccines were measured, and it was aimed to evaluate the positive or negative effects of vaccines. According to the results of the analysis, it is seen that people are mostly satisfied with the vaccines. However, the anxiety and fear of a part of the population also reflects the negative aspects of the impact of vaccines on humans. This study can be adapted for different types of vaccines or medical treatments and may guide people.

## Giriş

Günümüzde internetteki sayısız gelişmeler sayesinde veri artık birçok farklı kaynaktan farklı biçimlerde üremekte ve gün geçtikçe devasa bir şekilde artmaktadır. Birçok kurumsal ve özel uygulamalar sanal platformlara taşındıkça insanlar taşınabilir bilgisayarlar, akıllı telefonlar ya da benzeri aygıtlarla zaman ve konum kısıtlaması olmadan birbiri ile iletişim kurabilmekte ve ihtiyaç duyduğu uygulamaları kullanabilmektedir. Son yıllarda sosyal medyanın toplumumuzda rolünün artması bilgi ve görüşlerin yayılmasını kolaylaştırmıştır. Instagram [1], Facebook [2] ve Twitter [3] sosyal medyada önde gelen üç büyük platformdur. Facebook ve Instagram daha çok görsel ağırlıklıyken, Twitter metin ağırlıklıdır. Twitter, insanların herhangi bir konu hakkında “tweet” olarak adlandırılan mesajlar paylaşabileceği ve duygularını yayımlayabileceği bir mikroblog sitesidir. Bu sayede Twitter, duyu yoğunluklu bir veri kümesi olarak düşünülebilir. Tipik bir tweet, hashtag'ler (etiket), referanslar (@) da dahil olmak üzere “0 – 280” karakter arasında metinden oluşur. Tweetlerle duyu analizi son yılların popüler konuları arasındadır. Şirketler kullanıcıların nabzını attıkları tweetler aracılığı ile ölçebilmekte ve markalarının genel duyarlılığını izleyebilmektedir. Tüketiciler de ürün tercihlerini yaparken duyu analizinden faydalanmaktadır.

Duyu analizi metin madenciliğinin bir türüdür. Metin madenciliği, belgelerdeki yapılandırılmamış metinsel verilerden ilginç örüntüler ve faydalı bilgiler çıkarır [4]. Duyu analizi metinsel verilerde örtülü (gizli) olan toplu görüşü ortaya çıkarmaktadır. Popüler uygulamaları belirli bir ürün, hizmet veya siyasi olaylar hakkında sosyal medyadan duyguların otomatik olarak ortaya çıkarılmasıdır. Duyu analizi, belirli bir metindeki anlamı veya duyguyu doğru bir şekilde anlamak için ortak duyu bilgisi gerektirir. Bunun için genellikle SentiTurkNet [5], SentiWordNet [6], SenticNet [7], NRC Emotion Lexicon [8], HisNet [9], SentiDraw [10] ve SentiFars [11] gibi duyu sınıflandırmasına ait kutuplu kavramları içeren sözlükler, duyu kavramlarını ve ilişkilerini içeren Emotion Ontology [12], OntoSenticNet [13] gibi ontolojiler ya da istatistiksel ve öğrenmeye dayalı yöntemler [14]-[19] kullanılır.

Literatürde tweetler üzerine metin madenciliği ve duyu analizi konusunda çeşitli çalışmalar [20]-[40] mevcuttur. Saran vd. (2019), 23 Ağustos–8 Eylül 2019 tarihleri arasındaki “Amazon yangını” ile ilgili Twitter gönderilerine duyu analizi uygulayarak Amazon ormanındaki yangın olayları için halkın ruh hali modellerini değerlendirmişlerdir. Tweetleri ve yorumları analiz etmek, metni tanımlamak ve sınıflandırmak için sözlük ve makine öğrenimi algoritmalarını kullanmışlardır. Analiz edilen İngilizce tweetlerin sonuçlarına göre 739 nötr, 503 olumlu, 258 olumsuz tweet belirlenmiştir [20]. Albayrak vd. (2017), insanların bedelli askerlik konusundaki düşüncelerini analiz etmek için konu ile ilgili belirli tarihlerde atılan Türkçe tweetler üzerinden SentiTurkNet sözlüğünü kullanarak duyu analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre tweetlerin %16 oranında pozitif, %5 oranında negatif ve %79 oranında ise nötr olduğu görülmektedir [21]. Almatar vd. (2020), Kuveyt'te insanların ne zaman hangi konular hakkında düşündüklerini, düşündükleri hakkında nerede

tweet attıklarını analiz etmişlerdir. Çalışma, insanların ilgi ve düşüncelerinin bir hafta boyunca nasıl değiştiğinin izlenmesine katkıda bulunmuştur. Örneğin, insanlar hafta içi mi yoksa hafta sonları mı belirli bir konuyla daha çok ilgileniyorlardı veya bu ilgi düzeylerini etkileyen hafta içi bir olay mı vardı? Çalışmada ilgi alanlarını keşfetmek için Twitter-LDA (Latent Dirichlet Allocation) modeli kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Arapça tweetler analiz edilmiş ve Kuveyt'te din, duyu, eğitim ve kamu politikasının en popüler ilgi alanları olduğu belirlenmiştir. İnsanların din ile ilgili tweetleri çoğunlukla Cuma günü, politika ve eğitim hakkındaki tweetleri hafta içi ve duygusal ifadeler hakkındaki tweetleri çoğunlukla hafta sonları attığı görülmüştür [22]. Song ve Xia (2016), Avustralya'daki Curtin Üniversitesi, Bentley kampüsünde coğrafi referanslı Twitter duyu polaritesinin kurumsal ve zamansal dağılımını araştırmışlardır. Çalışmada Twitter duygularının farklı bölgeler ve zaman dilimleri arasında nasıl değiştiğinin araştırılması amacıyla kampüs, fen ve mühendislik binaları, sosyal bilimler binaları, kütüphane, amfi, yurt, eğlence ve park alanları olmak üzere altı bölgeye ve yarıyıl başı, yarıyıl ortası, yarıyıl sonu ve sınav sonrası incelemeler için dört zaman dilimine ayrılmıştır. Çalışmada İngilizce tweetler analiz edilmiş ve analiz sonucunda olumlu tweetlerin en yüksek yüzdesinin sosyal bilimler alanında, olumsuz paylaşımların en yüksek yüzdesinin fen bilimleri ve mühendislik ile yurt alanlarında gerçekleştiği görülmüştür. Olumsuz tweetlerin sayısının kütüphane ve fen-mühendislik alanlarında dönem sonuna doğru artarak sınav döneminde zirveye ulaşırken, dönem sonunda eğlence, spor ve yurt alanlarında düştüğü görülmüştür [23]. Häberle vd. (2019), Los Angeles'ta coğrafi etiketli İngilizce Twitter metin mesajlarına kurumsal analiz uygulayarak binaların türlerini ticari ve konut olarak sınıflandırmışlardır. Kentsel yapı türlerini sınıflandırmak için metin özelliklerini uzaktan algılama görüntüleri ile birleştirmişlerdir. Çalışmada yapılan sınıflandırmada makine öğrenme yöntemlerinden Destek Vektör makineleri, Naive Bayes ve Evrimsel Sinir Ağları kullanılmıştır. Sınıflandırma sonuçları, saf sosyal medya metninden bina sınıflandırma işleminin oldukça zor olduğunu göstermiştir [24]. Alowaidi vd. (2017), eğitilmiş makine öğrenme yöntemlerine (Naive Bayes ve Destek Vektör makineleri) dayanan Arapça semantik Twitter duyu analizi modeli geliştirmişlerdir. Tweetleri Arapça WordNet içeriğindeki kavramlarla zenginleştirerek semantik analiz yapmışlardır. Deneysel sonuçlar, kavram özelliklerinin kullanılmasının, temel BoW (Bag Of Words) gösteriminden daha iyi performans verdiğini göstermiştir [25]. Resch vd. (2018), İngilizce tweetleri analiz ederek Napa'da 2014 yılında meydana gelen depremin sebep olduğu izleri ve hasarları semantik makine öğrenme teknikleri ile birlikte kurumsal ve zamansal analiz yaparak ortaya çıkarmışlardır. Sonuçlar deprem ayak izlerinin güvenilir ve doğru bir şekilde tanımlanabileceğini ve ilgili semantik konuların önceden bilgi gerektirmeden otomatik olarak tanımlanabileceğini göstermiştir. Çalışmada ayrıca önemli kayıpların nerede oluştuğunu gösteren bir hasar haritası oluşturulmuştur. Analiz sonuçları, Federal Acil Durum Yönetim Ajansı (FEMA) tarafından sağlanan teknik kılavuz izlenerek resmi deprem ve hasar haritalarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır [26]. Tavoschi vd. (2020), Twitter kullanarak bir aş ile ilgili Eylül 2016 ve Ağustos 2017

tarihleri arasında İtalya'da meydana gelen önemli olaylar hakkında kamuoyunun görüş kutupluluğunu eğitilmiş makine öğrenme teknikleri kullanarak izlemişlerdir. Çalışmada İtalyanca tweetler kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre tweetlerin yüzde 60'ı tarafsız, yüzde 23'ü aşırı karşıtı, yüzde 17'si ise aşırı lehinde olarak sınıflandırılmıştır [27]. Nemes ve Kiss (2021), Twitter kullanıcılarının covid/coronavirus konusunda attıkları tweetleri oluşturan kelimeler arasındaki ilişkileri baz alarak duygularını tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Doğal dil işleme ve duygu sınıflandırması için Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network) tekniği kullanmışlardır. Çalışmada 24-25 Nisan 2020 ve 13-14 Mayıs 2020 tarihlerindeki İngilizce tweetler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sosyal medyada aşılara ilgili duyguların çoğunlukla olumlu olduğu ancak zamanla olumlu duygularda artış olurken olumsuz duyguların da arttığı gözlemlenmiştir [28]. Beşkirli vd. (2021), Covid-19 aşısı duyurusundan önceki ve sonraki zaman diliminde Twitter'da aşısı ile ilgili atılan toplam 10000 adet İngilizce tweet üzerinde duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan ilk veri seti COVID-19 aşısının 3. faz denemeleri esnasında elde edilen twitter verilerinden oluşmaktadır. İkinci veri seti COVID-19 aşısının 3. faz denemeleri esnasında seri duyurusu yapıldıktan sonra elde edilen Twitter verilerinden oluşmaktadır. Aşının seri üretim duyurusundan önce atılan tweetlerin duygusal içeriği %31 olumlu, %29 olumsuz iken %41 nötr olarak belirlenmiştir. Ancak aşısı çalışmalarının seri üretim duyurusu yapıldıktan sonra olumlu düşünceler %53'e yükselirken, olumsuz düşünceler %14'e ve nötr düşünceler %33'e gerilemiştir [29]. Çakmak ve Oğuzlar (2022), Ekim-Aralık 2020 tarihleri arasındaki "5G" ve "vaccination (aşılama)" etiketlerini birlikte kullanarak Twitter'dan elde edilen İngilizce tweetlerle COVID-19 aşısı için duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada tweetlere Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları (CART), Naive Bayes (NB), K-En Yakın Komşu (KNN) ve Rastgele Orman (RF) algoritmaları uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre dünya genelinde Twitter üzerinden fikrini beyan eden kişilerin %36,4'ünün 5G ile COVID-19 aşısı hakkında pozitif algıya sahip olduğu, %35,6'sının pozitif ya da negatif görüşe sahip olmadığı ve %28'inin de negatif görüş bildirdiği görülmüştür [30]. Aygün vd. (2021), COVID-19 aşısı hakkında Twitter kullanıcılarının yaklaşımını ölçmek için Türkiye ve bazı ülkeler için duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Tweetler politika, sağlık, medya ve diğer olmak üzere dört farklı sınıfa ayrılarak derin öğrenme yöntemleri ile analiz edilmiştir. Çalışmada 15 Kasım-15 Mart 2020 aralığındaki Türkçe ve İngilizce tweetler kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre tweetlerde aşılarda %48,5 olumlu, %31,7 nötr ve %19,8 olumsuz görüş hakimdir [31]. Nemes ve Kiss (2021), Beşkirli vd. (2021), Çakmak ve Oğuzlar (2022), Aygün vd. (2021), bu çalışma ile benzer çalışmalar yapmışlardır. Ancak COVID-19 aşısı ülkemizde uygulanmaya başlamadan önceki tarihlere ait İngilizce tweetleri kullanmaları, duygu sınıflandırması için makine öğrenme veya derin öğrenme yöntemlerini kullanmaları ile bu çalışmadan farklıdır. Bu çalışmada aşılarda ülkemizde uygulanmaya başladığı tarihten itibaren atılan Türkçe tweetler kullanılarak sözlük tabanlı bir duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Lyu vd. (2021), pandemi başlangıcından itibaren ilk 10 ay içerisinde kamuoyunun

COVID-19 aşılarna yönelik tutumlarını ve aşısı kabullenmelerini veya tereddütlerini öğrenmek için tweetleri kullanarak konu modelleme ve duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 11 Mart 2020-31 Ocak 2021 tarihleri aralığındaki İngilizce tweetler kullanılmıştır. Kanada Ulusal Araştırma Konseyi Duygu Sözlüğü kullanılarak duygu analizi yapılmış ve konu modelleme için gizli Dirichlet tahsisi kullanılmıştır. Konu modelleme sonucunda 16 konu belirlenmiştir. Aşılama ile ilgili görüşler en çok tweet atılan ve en çok tartışılan konu olarak belirlenmiştir. Rusya'nın dünyanın ilk COVID-19 aşısını onayladığı 11 Ağustos 2020 tarihinde aşısı konusundaki ilerlemeler dünya çapında en çok tartışılan konu haline gelmiştir. Aşısı yaptırmaya talimatı konusu Ocak 2021'in ilk haftasından sonra en çok tartışılan konu haline gelmiştir. Haftalık ortalama duygu puanları, duyguların olumlu yönde arttığını göstermiştir. Duygu analizi sonucu güvenin en baskın duygu olduğunu, ardından beklenti, korku, üzüntü vb. duyguların geldiğini göstermiştir. Güven duygusunun, Pfizer'in aşısının %90 etkili olduğunu açıkladığı 9 Kasım 2020'de zirveye ulaştığı görülmüştür [32]. Liu ve Liu (2021), Pfizer'in ilk COVID-19 aşısını duyurusunun ardından kamuoyu duyarlılığını ölçmek ve konuma göre duyarlılığın değişimini tespit etmek için duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1 Kasım 2020-31 Ocak 2021 tarihleri arasındaki COVID-19 aşısıyla ilgili İngilizce tweetler kullanılmıştır. Tweetlerde geçen duygunun gerçek olup olmadığını belirlemek amacıyla Valence Aware sözlüğü ve duygu çıkarımcısı kullanılmıştır. Tweetlerde geçen başlıca konuları çıkarmak için gizli Dirichlet tahsisi kullanılmıştır. Hem zamansal hem de konumsal analiz gerçekleştirerek farklı konularda gönderilen tweetlerdeki duygu farklılıkları belirlenmiştir. Sonuçta analiz edilen tweetlerin yüzde 42,8 olumlu, yüzde 26,9 nötr ve yüzde 30,3 olumsuz duygular içerdiği belirlenmiştir. Olumlu duygu içeren tweetler için deneme sonuçları, yönetim, yaşam, bilgi, etkililik ve olumsuz duygu içeren tweetler için deneme sonuçları, komplo, güven, etkililik ve yönetim olmak üzere 5'er konu belirlenmiştir [33]. Lyu vd. (2021), Liu ve Liu (2021), İngilizce tweetleri kullanmaları ve 31 Ocak 2021'den sonraki tweetleri analize dahil etmemeleri nedeniyle bu çalışmadan farklılık göstermektedirler. Marcec ve Likic (2022), Twitter'da COVID-19 aşısı ile ilgili atılan İngilizce tweetlere duygu analizi uygulamışlardır. 1 Aralık 2020-31 Mart 2021 tarihi aralığındaki 4 aylık döneme ait tweetleri kullanmışlardır. Çalışma sonuçları Pfizer ve Moderna aşılarna ilişkin duyguların 4 ay boyunca olumlu ve istikrarlı görüldüğünü buna karşılık, AstraZeneca/Oxford aşısına ilişkin olumlu duyguların Aralık ayı ile Mart ayı karşılaştırıldığında önemli bir düşüş göstererek zamanla azaldığını göstermiştir [34]. İlgili çalışma duygu sınıflandırmasında AFINN [35] sözlüğünü kullanması, İngilizce tweetler kullanması ve 31 Mart 2021 tarihinden sonraki tweetleri analiz etmemesi yönleriyle bu çalışmadan farklıdır. Villavicencio vd. (2021), Filipinler'de COVID-19 aşılarna yönelik duygular üzerine olumlu, olumsuz ve tarafsız olmak üzere analiz yapmışlardır. Naive Bayes sınıflandırma modelini kullanmışlardır. Çalışmada 1-31 Mart 2021 tarihlerindeki İngilizce ve Filipince tweetler analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tweetlerin %83,38'i olumlu, %8,26'sı olumsuz, %8,36'sı nötr duygu içermektedir [36]. Ansari ve Khan (2021), COVID-19 aşısı ile ilgili kamuoyu

tepkisini ölçmek için dünya çapında atılan İngilizce tweetleri kullanarak duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 15 Mayıs-25 Haziran 2021 tarihleri arasındaki tweetler kullanılmıştır. Naïve Bayes sınıflandırıcısı kullanılarak duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçta Türkiye için atılan tweetler olumsuz duygu ağırlıklı olarak bulunmuştur [37]. Villavicencio vd. (2021), Ansari ve Khan (2021), İngilizce ya da Filipince tweetler kullanmaları, makine öğrenme yöntemlerini kullanmaları ve 2021 yılının sadece belli aylarındaki tweetleri analiz etmeleri sebebiyle bu çalışmadan farklıdır. Çılgın vd. (2022), Türkiye’de COVID-19 aşılara ilişkin kamu duyarlılığını aşıyla ilgili tweetlere makine öğrenmesi algoritmalarını uygulayarak analiz etmişlerdir. Çalışmada 1 Nisan-31 Ağustos 2021 tarihleri arasında toplam 412.588 adet Türkçe tweet kullanılmıştır. Sonuçta incelenen tüm tweetlerin %17,70’inin pozitif, %41,97’sinin nötr ve %40,34’ünün negatif duygu polaritesinde olduğu tespit edilmiştir [38]. Aslan (2022), derin öğrenme tabanlı doğal dil işleme tekniklerini kullanarak Türk halkının aşılarda süreciyle ilgili duygularını ve tepkilerini araştırmak için duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, Twitter’da 16 Haziran-18 Eylül 2021 tarihleri arasında paylaşılan Türkçe tweetler kullanılmıştır. Analiz sonucunda tweetlerin %34,9’unun olumlu, %49,6’sının nötr, %15,5’inin olumsuz duygu dağılımına sahip olduğu görülmüştür [39]. Çılgın vd. (2022), Aslan (2022), Türkçe tweetlerle bu çalışmaya benzer duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. İlgili çalışmalar 2021 yılının belirli aylarındaki tweetleri kullanmışlardır. Ancak bu çalışmada 2021 yılının tamamı da analize dahil edilmiştir. Mermer ve Özsezer (2023), COVID-19 aşı tartışmalarını analiz etmek için Twitter verisine duygu analizi uygulamışlardır. Çalışmada 10 Mart 2020- 18 Nisan 2022 aralığındaki 10.308 adet Türkçe tweet kullanılmıştır. Çalışma sonucunda COVID-19 aşılı ile ilgili tweet kullanıcılarının %7,5’inin olumlu, %0,59’unun olumsuz, %91,91’inin nötr duyguda olduğu belirlenmiştir. Çalışmada duygu analizi hem sözlük tabanlı hem de makine öğrenme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir [40]. İlgili çalışma bu çalışmaya benzer bir çalışmadır. Ancak Nisan 2022’den sonraki tweetlerin de analize dahil edilmesi ve duygu sınıflandırmasında SentiTurknet sözlüğünün kullanılmasıyla bu çalışma ilgili çalışmadan farklıdır.

Resmi olarak Mart 2020’de ülkemize giren Covid-19 sebebiyle Mart 2023 itibariyle ülkemizde toplam 102.174 [41] vefat sayısına ulaşılmıştır. Günümüzde virüsün etkinliği azalmış olsa da henüz tüm dünyada tamamen bitmemiştir. 31 Temmuz – 27 Ağustos 2023 tarihleri arasında dünya çapında yaklaşık 1,4 milyon yeni vaka ve yaklaşık 1800 yeni ölüm vakası rapor edilmiştir [42]. Virüs ile mücadelede geliştirilen aşılardan etkili çözüm olarak görülmektedir. Ülkemizde ve tüm dünyada uygulanan aşılardan olumlu ve olumsuz etkileri üzerine insanların görüşlerini alabilmek için sosyal medya platformları tercih edilmektedir. Bu amaçla çoğunlukla Twitter’da paylaşılan tweetler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yurt içinde insanların COVID-19 aşılı ile ilgili duygularını ölçmek için bir veri madenciliği uygulaması olan *metin madenciliği* gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Sinovac ve Biontech aşılı ile ilgili atılan Türkçe tweetler üzerine duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece insanların aşılara karşı duyguları ölçülmüş ve

aşılardan insanlar üzerindeki olumlu ya da olumsuz etkileri incelenmiştir.

## Veri Madenciliği

Veri Madenciliği, her çeşit veriden örtülü ve anlamlı bilgilerin elde edilmesi işlemidir [43]. Elde edilen bilgiler kamu ve özel sektör ile her çeşit özel topluluk tarafından önemli kararların alınmasında hatta devlet yönetiminin izleyeceği politikaların belirlenmesinde kullanılır.

Literatürde ilişkisel, Web ve büyük veri madenciliği olmak üzere üç çeşit veri madenciliği tanımlanmıştır. İlişkisel veri madenciliği ilişkisel verilerden bilgi çıkarımını, Web madenciliği web dokümanları ve erişim kayıtlarından bilgi çıkarımını, büyük veri madenciliği ise büyük veriden bilgi çıkarımını ifade eder [43]. Büyük veri; büyük hacmi, çeşitliliği, hızı, değişkenliği ve doğruluğu ile ayırt edilir [44]. Tüm dünyada sağlık, sosyal bilimler, mühendislik, eğitim alanlarında ve sosyal medya platformlarında hızla genişlemektedir.

## Metin Madenciliği

Metin madenciliği metinsel veriden örtük ve anlamlı bilgilerin çıkarılması işlemidir. Veri madenciliği, verilerin önceden yapılandırılmış bir biçimde depolandığı varsaydığından ön işleme aşamasında veriler temizlenerek, normleştirilir ve birçok veri tabanı tablosu birleştirilir. Buna karşılık, *metin madenciliğinde* ön işleme operasyonları, doğal dil belgeleri için temsili özelliklerin tanımlanması ve çıkarılması işlemlerinden oluşur [4]. Veri madenciliği büyük ölçüde sayısal verilere bağlıysa da, *metin madenciliği* metinlerin sözcüksel ve sözdizimsel yapısına bağlıdır.

Bir *metin madenciliği* uygulaması olan *Duygu Analizi* için sırasıyla *metin ön işleme*, *ilişkilendirme* ve *katagorileme* adımları gerçekleştirilir.

### Metin ön işleme

Metin ön işleme aşaması indeksleme ve kodlama işlemlerinden oluşur. Metin indeksleme, cümlelerden oluşan bir metni içerdiği kelimelere ayırma işlemidir. Bu işlem sırasıyla ‘Tokenization’, ‘Stemming’, ‘stop-words’ kaldırma ve terim ağırlıklandırma aşamalarından oluşur. ‘Tokenization’, bir metin öbeğini boşluk, noktalama işaretleri veya özel işaretlere göre kelimelere ayırma işlemidir. ‘Stemming’, ‘tokenization’ işleminden üretilen her bir kelimeyi kök haline dönüştürme sürecidir. ‘Stop-words’ kaldırma bağlaçlar, edatlar gibi dilbilgisi için gerekli ancak anlamsız sözcüklerin kaldırılmasıdır. Ağırlıklandırma, her kelimeye önem derecesine göre ağırlık hesaplama işlemidir. Terim frekansı ve TF-IDF ağırlığı, sözcüklerin ağırlıklandırılmasında kullanılan popüler şemalardır. Terim frekansı metin içinde her kelimenin geçiş sıklığını ifade eder. TF-IDF şeması ile hesaplanan kelime ağırlıkları, verilen metinde kelimelerin bulunması ile doğru orantılı, diğer metinlerde söz konusu kelimelerin bulunması ile ters orantılıdır. “ $d_i$ ” dokümanı içinde bir “ $t_i$ ” kelimesinin TF-IDF ağırlığı “ $w_{ij}$ ” [45] eşitliği ile hesaplanır. “N” toplam sözcük sayısını,  $DF_i$  “ $t_i$ ” kelimesini içeren metin sayısını,  $Tf_i$  “ $t_i$ ” kelimesinin metin içindeki geçiş sayısını ifade eder.

$$\omega_{ij} = \log \frac{N}{DF_i} (1 + \log TF_i) \quad [45]$$

Metin kodlama işleminde, indekslemeden çıkarılan kelimelerden bazıları wrapper, temel bileşenler analizi, bağımsız bileşen analizi, tekil değer ayrışımı gibi belirli yöntemler kullanılarak seçilir ve her bir metnin kodlanmasında bunlara sayısal değerler atanır. Bu değerler kelimelerin metin içindeki önem derecelerini belirtir. Ön işleme sonucunda kelimeleri temsilen sayısal bir vektör oluşturulur.

#### Metin ilişkilendirme

Metin ilişkilendirme, kelime kümelerinden kelimelerin ilişkilendirme kurallarının üretilmesi işlemidir. Kelime ilişkilendirme, kelimeler arasındaki nedensel ilişkilerin (Eğer-sonra kuralları) çıkarılması işlemidir. İndeksleme işlemiyle içerdiği kelimelerle ilişkilendirilen her metin için kelime-doküman matrisi oluşturulur. Matriste her satır bir metne, her sütun bir kelimeye ve matrisi temsil eden her veri ilgili metinde o kelimenin ağırlığına karşılık gelir. Kelime kümeleri, matristen çıkarılır. Kelimelerin ilişkilendirme kuralları Apriori algoritması tarafından üretilir. Algoritma için kelime kümeleri, matriste ağırlıkları sıfır olmayan kelimeler alınarak satır satır oluşturulur. Algoritmaya girdi olarak matristeki sütunlara karşılık gelen kelime listesi ve kümeleri verilir, çıktı olarak ilişkilendirme kuralları oluşturulur.

#### Metin kategorilendirme

Metin kategorilendirme, her metne önceden tanımlanmış kategorilerden birinin veya birkaçının atanması süreci olarak tanımlanır. Bunun için makine öğrenme algoritmaları kullanılır. Veri öğelerini sınıflandırma modeli olarak bir liste veya bir kategori ağacının önceden tanımlanması gerekir. Metinler her kategoriye örnek olarak ayrılır. Tüm örnek metinler, bir kelime listesine endekslenir ve bunlardan bazıları seçilir. Kategorilere ayrılan örnek metinler sayısal vektörlere kodlanır. Örnek metinlerden kodlanmış eğitim örnekleri kullanılarak, sınıflandırma algoritmasına bağlı olarak denklemler, sembolik kurallar veya optimize edilmiş parametreler oluşturulur; buna öğrenme süreci denir. Öğrenme sürecinden sonra, örnek metinlerden ayrılmış metinler sınıflandırılır. Spam e-posta filtreleme, duygu analizi, bilgi filtreleme ve konu yönlendirme metin sınıflandırmasının türleri arasındadır.

Duygu analizi, metin sınıflandırmasının özel bir örneğidir. Bir görüşü “pozitif”, “nötr” veya “negatif” olarak sınıflandırma sürecidir. Bu süreçte bir görüşe metinsel bir girdi verisi verilir ve çıktı olarak bu üç tutumdan biri oluşturulur. Üç kategoriden biriyle etiketlenen metinler toplanır ve sayısal vektörler halinde kodlanır. Makine öğrenimi algoritması, örnek etiketli metinlerden kodlanan sayısal vektörleri öğrenir. Test için verilen bir metin sayısal bir vektöre kodlanır ve üç kategoriden birine sınıflandırılır.

Duygu analizinde diğer bir yöntem duygu sınıflandırması içeren polarite sözlüklerinin kullanılmasıdır. Bu

çalışmada sözlük tabanlı duygu analizi yapılmış ve bu amaçla SentiTurkNet kullanılmıştır. SentiTurkNet, duygu sınıflandırması ve fikir madenciliği uygulamaları için tasarlanmış Türkçe için oluşturulmuş bir polarite sözlüğüdür. WordNet'in [46] tüm eş anlamlı sınıflarının “olumluluk”, “olumsuzluk” ve “tarafsızlık” kavramlarına göre otomatik olarak açıklanması ile oluşturulmuştur. İngilizce WordNet ve SentiWordNet ile eşleştirilmiştir. Türkçe WordNet'teki tüm eş anlamlı sınıflara (synset) polarite sınıfından (pozitif, objektif/nötr veya negatif) bir kavramın atanması ile oluşturulmuştur. Dilden bağımsızdır ve farklı dillerde de uygulanabilir.

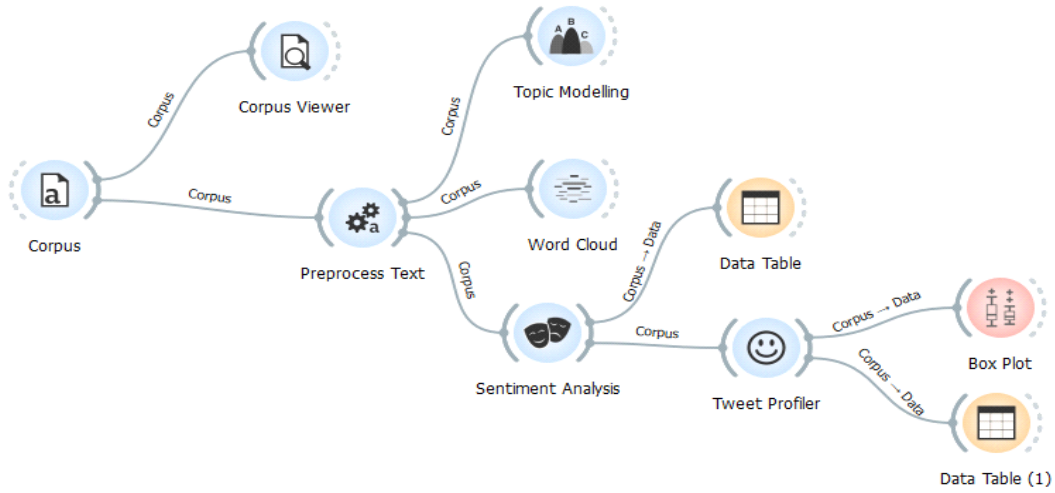
#### Orange

Orange [47], Slovenya'da Ljubljana Üniversitesi tarafından geliştirilen, Python dilinde yazılmış, açık kaynak kodlu bir makine öğrenimi, veri madenciliği ve veri görselleştirme yazılımıdır. Akademik çalışmalarda, endüstri alanında ve eğitim-öğretim'de kullanılmaktadır. En önemli endüstriyel ortak, Orange'ı ilaç geliştirmede kullanılan ve ilgili çeşitli bölümlerinin geliştirilmesine sponsorluk yapan bir ilaç devi olan Astra-Zeneca'dır [48]. Orange, içerdiği Twitter aracı ile Twitter API'sine erişim sağlayarak tweet analizine olanak sağlamaktadır. Ancak Orange ile en son iki hafta içinde atılmış tweetler çekilebilmektedir. Daha eski tarihlere ait tweetler çekilememektedir. API planları 30 Mart 2023'te değiştirildikten sonra Twitter artık ücretsiz erişim ve ücretsiz Tweet alımını desteklememektedir. Bu çalışmada tweetler Python kodu kullanılarak snsrape ile Twitter Api'sinden Twitter veri erişim ve ücret politikası değişmeden önce çekilmiştir. Elde edilen tweetlerle gerçekleştirilen duygu analizi uygulamasında Orange Metin Madenciliği eklentisi kullanılmıştır.

#### Duygu analizi gerçekleştirimi

Sosyal medya kullanımındaki büyüme oranıyla birlikte, kullanıcılar tarafından üretilen veri miktarının artması insanların güncel her konu hakkında görüşlerini ifade edebildiği Twitter'ı, duygu analizi ve fikir madenciliğini sağlayan bir araç haline getirmiştir. Bu değişim, önemli konularda kitlelerin nabzını kolayca ölçmek ve önemli kararlar alabilmek için kurum, kuruluş ve kişileri sosyal medya kullanımına yöneltmiştir. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada COVID-19 için geliştirilen Sinovac ve Biontech aşılı için Twitter kullanıcılarının paylaştıkları tweetler üzerine duygu analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçta insanların aşılardaki duygularını öğrenmek ve aşılardan insanların üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak amaçlanmıştır.

Çalışmada gerçekleştirilen duygu analizi iş akışı Şekil 1'de gösterilmektedir. İlk olarak Twitter'dan Sinovac ve Biontech ile ilgili tweetler elde edilmiştir. Tweetlere ön işlemler (Preprocess Text) uygulandıktan sonra konu modellemesi (Topic Modelling) yapılmıştır. Konu modelleme ile tweetlerde geçen konular ve konularda geçen popüler anahtar kelimeler incelenmiştir. Ardından WordCloud (Kelime Bulutu) aracı ile tweetlerde en sık geçen kelimeler ağırlıklarıyla bulunmuştur. Son aşamada



Şekil 1. Twitter duygu analizi iş akışı.

tweetler üzerine duygu analizi (Sentiment Analysis) uygulanmıştır. Duygu analizi sonuçları Orange Tweet Profiler ile hesaplanarak Box Plot'da görselleştirilmiştir. Sonuç olarak yaklaşık iki yılda COVID-19 aşılı hakkında atılan tweetlerin sahiplerinin aşı hakkındaki duygu profilleri belirlenmiştir.

### Materyal ve yöntem

Çalışmada kullanılan tweetler Python kodu kullanılarak sncscrape ile Twitter Api'sinden çekilmiştir. İlk olarak "Sinovac" anahtar kelimesini içeren tweetler aşının ülkemizde uygulanmaya başladığı tarihten itibaren 13 Ocak 2021-16 Şubat 2023 zaman aralığında elde edilmiştir. Daha sonra "Biontech" anahtar kelimesini içeren tweetler Biontech aşısının ülkemizde uygulanmaya başladığı tarihten itibaren 28 Temmuz 2021-23 Şubat 2023 zaman aralığında elde edilmiştir. Elde edilen tweetlerden retweetler ve yinelenen tweetler ayıklandıktan sonra Sinovac için toplam 326085 tweet ve Biontech için toplam 213474 tweet analiz edilmiştir. İkinci aşamada Tweetlere metin ön işleme analizi uygulanmıştır. Ön işlemler, kelimelerdeki harfleri küçük harfe dönüştürme, aksanları ortadan kaldırma, HTML ve URL etiketlerini kaldırma, hashtag'lerin (#) kaldırılması, metni kelimelere ayırma (Tokenization) ve filtreleme işlemlerini içerir. Filtreleme işlemleri noktalama işaretlerinin, tekrar eden kelimelerin ('ve', 'veya', içinde) ve bağlaçların kaldırılması aşamalarını içerir. Bu amaçla Apache Lucene Türkçe "Stop Words" (Durak Kelimeleri) listesi genişletilerek kullanılmıştır. Ön işlemlerden sonra metin içeriğindeki aşı ile ilgili olmayan kelimeler, site linkleri, yanlış yazılmış kelime ekleri temizlenmiştir. Üçüncü aşamada ön işlemlerden geçmiş olan tweetler Word Cloud aracı ile analiz edilmiş ve tweetlerde en çok kullanılan kelimeler belirlenmiştir (Şekil 2-9). Word Cloud, tweetlerde geçen tüm kelimeleri, kelimelerin boyutlarını, sözcüklerin ağırlığını (sıklığını) gösterir. Sözcükler, ağırlıklarına göre listelendiği için hangi kelimelerin kaç kez kullanıldığı ve kelimelerin popülerlik

durumu görülür. Örneğin, Şekil 2'de Sinovac ile ilgili tweetlerde en çok kullanılan üç kelime sırasıyla Sinovac (64033), ol (39860) ve aşı (23878)'dir. Şekil 6'da Biontech ile ilgili tweetlerde en çok kullanılan üç kelime ise sırasıyla Biontech (16967), ol (12914) ve doz (8798)'dir. Tweetlerde bulunma sıklıklarına göre görselleştirilen kelimeler araştırılan konuların içerikleri hakkında kullanıcıya bilgi verir. Dördüncü işlem adımında Konu Modelleme ile her metindeki kelime kümelerine ve sıklıklarına göre konular bulunmuştur. Bir tweet farklı oranlarda birden çok konu içerebildiği için aynı zamanda belge başına konu ağırlığı da hesaplanmıştır. Bu amaçla 'Latent Dirichlet Allocation' (LDA) tekniği kullanılmıştır. Bu teknik ile bir konuda ilgili olan veya olmayan sözcükler ve aynı anda olumlu veya olumsuz olabilen konu ağırlıkları hesaplanır. Bu şekilde tweetlerde geçen 10 konu ve bu konularda geçen popüler anahtar kelimeler belirlenmiştir. Sıradaki adımda Duygu Analizi gerçekleştirilerek metinlerdeki duygular tahmin edilmiştir. Orange Duygu Analizi aracı "Liu & Hu" [49] ve Vader [50] duygu modüllerini ve tekniklerini kullanır. "Liu & Hu" tekniği sözlük tabanlı çalışır ve nihai puan hesaplanırken pozitif kelimelerin toplamı ile negatif kelimelerin toplamı arasındaki fark alınarak belgenin uzunluğuna göre normalleştirilip 100 ile çarpılır. Sonuç nihai puan, belgedeki duygu farkının yüzdesini yansıtır. Vader tekniği ise; sözlük ve kural tabanlı duygu analizini destekler. İki teknik arasındaki fark; Vader tekniğinin sadece İngilizce metinlerin üzerinde çalışmasıdır. Çalışmada Türkçe duygu sınıflarının oluşturulması için Orange'a SentiTurknet sözlüğü özel sözlük olarak import edilerek kullanılmıştır. Duygu analizi sonucunda pozitif ve negatif olmak üzere iki adet öznelik hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar -1'e ne kadar yakın ise duygu o kadar olumsuz, +1'e ne kadar yakın ise duygu o kadar olumludur. Bu şekilde tweetler, bir sorgu terimiyle ilgili olarak olumlu veya olumsuz şekilde sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırma sonucunda oranlama yapılarak hangi duygunun yüksek olduğu belirlenmektedir.









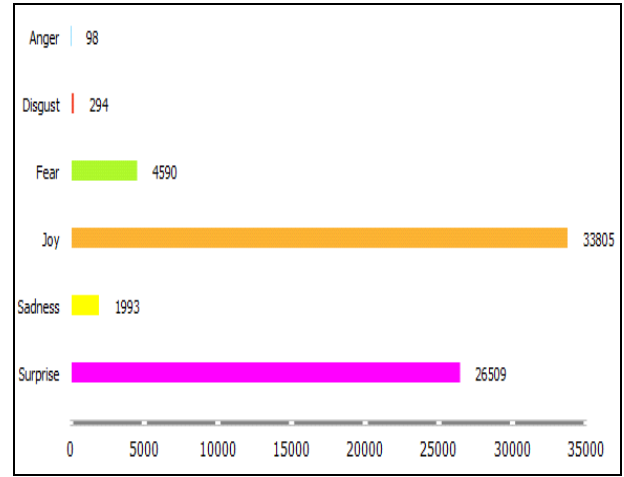
2'sinin kızgınlık içerdiği görülmüştür. 2021 yılında Sinovac için atılan tweetlerin duygu analizi sonuçları incelendiğinde en yüksek duygunun %53,69 ile sevinç olduğu görülmüştür. İkinci sırada %36,56 ile şaşkınlık duygusu, üçüncü sırada ise %6,43 ile korku duygusu yer almaktadır. 2022 yılında Sinovac için atılan tweetlerin analiz sonuçları incelendiğinde %56,43 sevinç, %34,3 şaşkınlık, %5,98 korku içerdiği görülmektedir. 2022 yılında aşı hakkındaki sevinç duygusunun önceki yıla göre arttığı görülmektedir. Ancak şaşkınlık ve korku duygusunun 2021 yılına göre azaldığı görülmektedir. Şekil 14'te görüldüğü üzere Biontech aşısı ülkemizde uygulanmaya başlandığı tarihten itibaren 2021 yılında ilk iki ay (Temmuz-Ağustos) için atılan 18172 tweet analiz edildiğinde 9559'unun sevinç, 6991'inin şaşkınlık, 485'inin üzüntü, 1019'unun korku, 71'inin nefret, 47'sinin kızgınlık içerdiği görülmüştür. Şekil 15'e bakıldığında Biontech aşısı için 2021 yılının son dört ayında atılan 138556 tweet incelendiğinde 52522'sinin sevinç, 38834'ünün şaşkınlık, 40354'ünün üzüntü, 6299'unun korku, 377'sinin nefret, 170'inin kızgınlık içerdiği görülmüştür. 2021 yılının son dört ayında Biontech aşısıyla ilgili "üzüntü" ifadesinin önceki iki aya kıyasla çok yüksek çıkmasının sebebi aşı olma oranlarının artması, zaman ilerledikçe aşılardan yan etkilerinin ortaya çıkma ihtimalleri ve bu dönemde diğer dönemlere kıyasla çok fazla tweet atılması olduğu düşünülmektedir. Şekil 16'da görüldüğü üzere Biontech aşısı için 2022 yılında atılan toplam 52362 tweet analiz edildiğinde 26550'sinin sevinç, 20450'sinin şaşkınlık, 1657'sinin üzüntü, 3414'ünün korku, 188'inin nefret, 102'sinin kızgınlık içerdiği görülmüştür. Şekil 17'de görüldüğü üzere Biontech aşısı için 2023 yılının ilk ayında atılan 4384 tweet analiz edildiğinde 2035'inin sevinç, 1812'sinin şaşkınlık, 140'ının üzüntü, 350'sinin korku, 30'unun nefret, 17'sinin kızgınlık içerdiği görülmüştür.

2021 yılında Biontech hakkında atılan tweetlerin duygu analizi sonuçları incelendiğinde en yüksek duygunun %39,61 ile sevinç olduğu görülmüştür. İkinci sırada %29,24 ile şaşkınlık duygusu, üçüncü sırada ise %4,67 ile korku duygusu yer almaktadır. 2022 yılında Biontech hakkında atılan tweetlerin duygu analizi sonuçları incelendiğinde en yüksek duygunun %50,70 ile sevinç olduğu görülmektedir. İkinci sırada %39,05 ile şaşkınlık, üçüncü sırada ise %6,52 ile korku duygusu yer almaktadır. 2022 yılında Biontech aşısı hakkındaki sevinç, şaşkınlık ve korku duygularının önceki yıla kıyasla arttığı görülmektedir. Şekil 18, 19 ve 20'de Sinovac ve Biontech aşılarının 2021-2022 yıllarındaki duygu değişiminin karşılaştırılması gösterilmektedir.

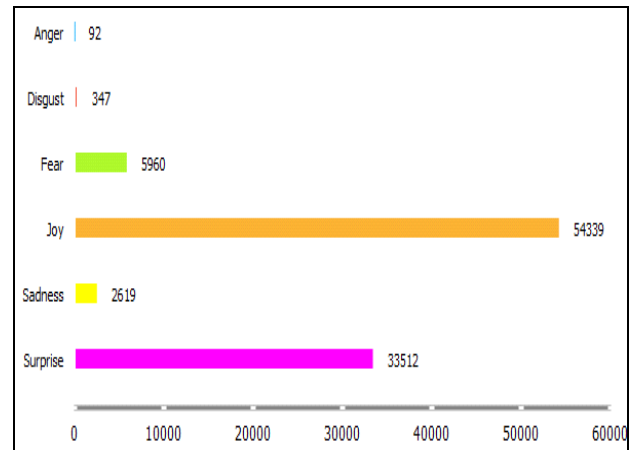
Genel olarak her iki aşı hakkında atılan tweetlerin analizi sonucunda COVID-19 aşılarının insanlar üzerinde olumlu etkisi olduğu, aşılardan memnun kalındığı görülmektedir. Sinovac ve Biontech aşıları karşılaştırıldığında Sinovac aşısından daha çok memnun kalındığı görülmektedir. Ancak analiz sonuçlarının bir kısmı COVID-19 aşılarının insanlar üzerinde olumsuz etkilerinin de olduğunu göstermektedir.

Çalışmada elde edilen tweetlerin büyük bir kısmının konum bilgilerinin eksik olduğu görülmüştür. Bu sebeple konuma göre duygu analizi gerçekleştirilememiştir.

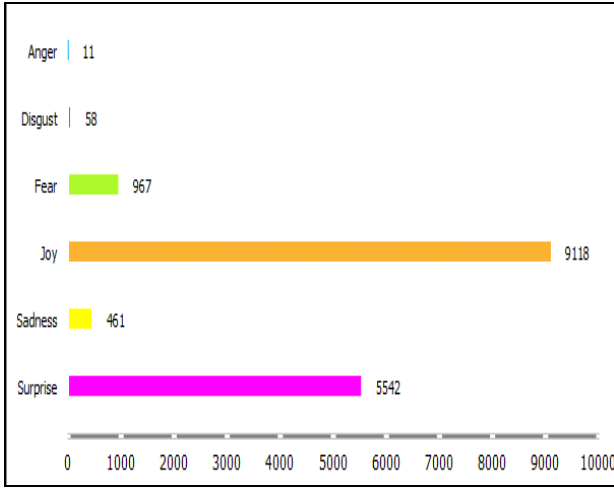
Bu çalışma ile benzer duygu analizi yapan Çılgın vd. (2022) ve Aslan (2022) analiz sonuçlarında bu çalışmadan farklı olarak aşılarda nötr duygunun daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Bu farkın sebebi olarak ilgili çalışmaların 2021 yılının sadece belli aylarına ait tweetleri değerlendirmeleri ve bu çalışmadan farklı olarak makine öğrenme yöntemlerini kullanmaları olduğu düşünülmektedir. Mermer ve Özsezer (2023) de bu çalışmaya benzer duygu analizi yapmış olmalarına rağmen aşılarda nötr duygunun daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Bunun sebebinin ilgili çalışmanın Nisan 2022'den sonraki tweetleri analize dahil etmemesi, makine öğrenme yöntemlerini kullanması ve bu çalışmadakinden farklı bir duygu sözlüğü kullanmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.



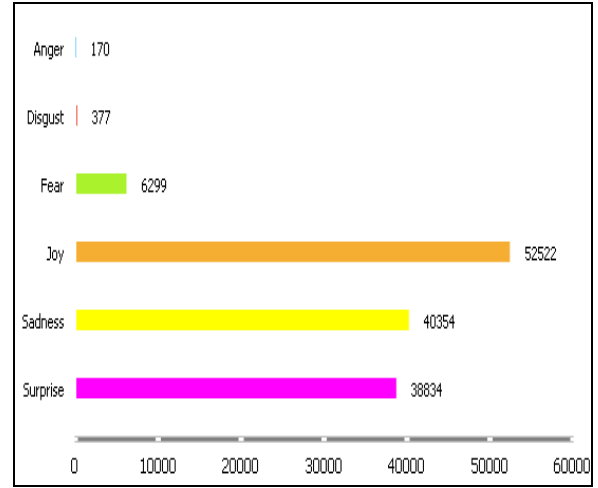
Şekil 10. Sinovac için Duygu Analizi sonuçları (13.01.2021- 30.06.2021).



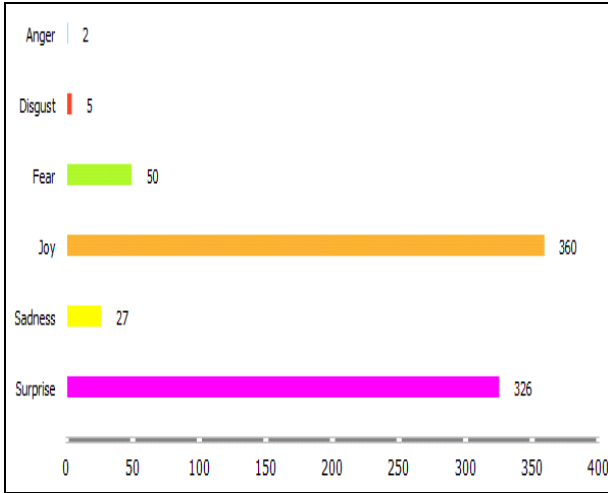
Şekil 11. Sinovac için Duygu Analizi sonuçları (01.07.2021-31.12.2021).



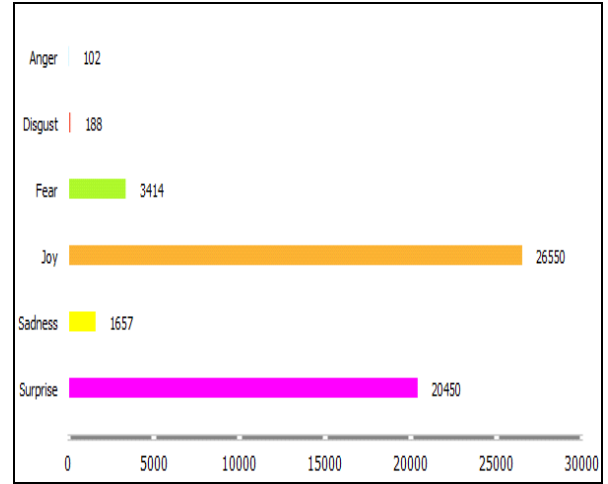
Şekil 12. Sinovac için Duygu Analizi sonuçları (01.01.2022- 31.12.2022)



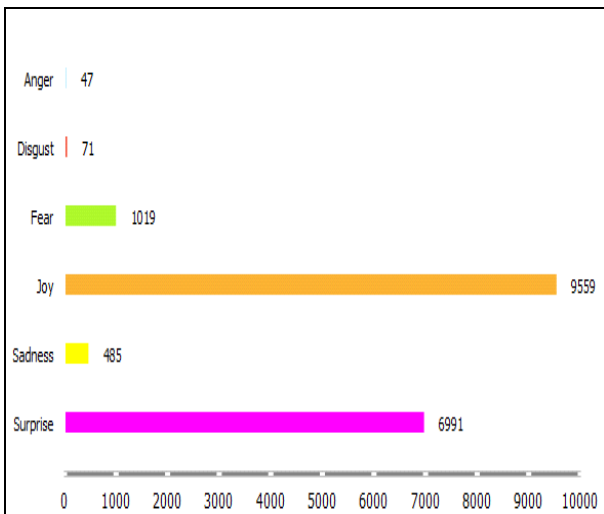
Şekil 15. Biontech için Duygu Analizi sonuçları (13.08.2021-31.12.2021).



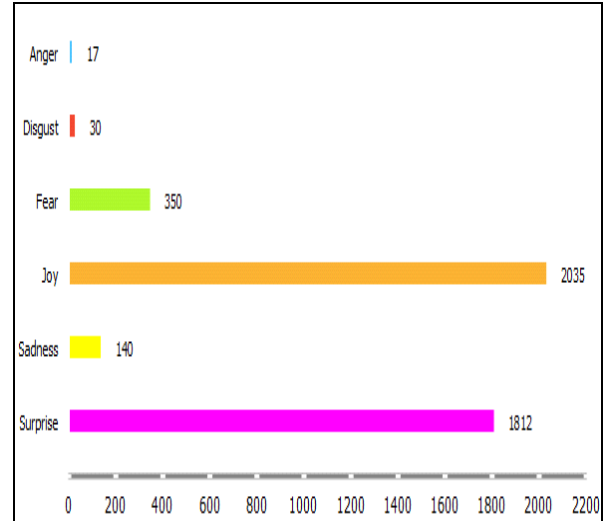
Şekil 13. Sinovac için Duygu Analizi sonuçları (01.01.2023-16.02.2023)



Şekil 16. Biontech için Duygu Analizi sonuçları (1.1.2022-31.12.2022).

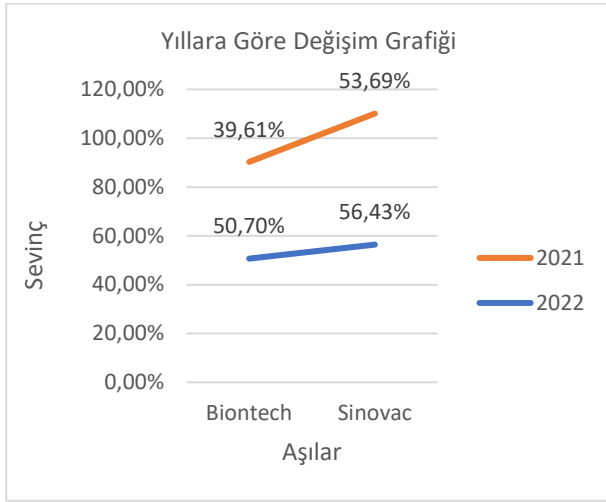


Şekil 14. Biontech için Duygu Analizi sonuçları (28.07.2021-12.08.2021).

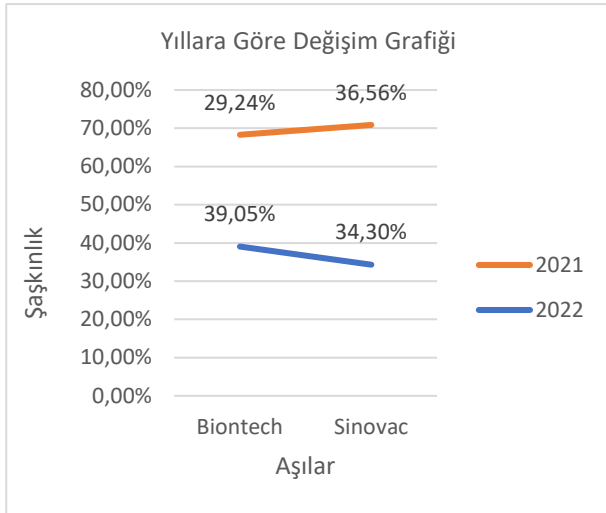


Şekil 17. Biontech için Duygu Analizi sonuçları (1.1.2023-23.02.2023).

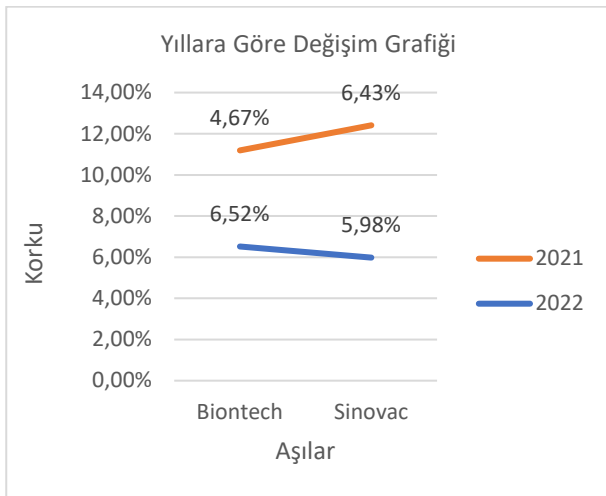




Şekil 18. Aşılar hakkında yıllara göre duygu değişimi



Şekil 19. Aşılar hakkında yıllara göre duygu değişimi



Şekil 20. Aşılar hakkında yıllara göre duygu değişimi

## Sonuçlar ve gelecek çalışma

Yaklaşık iki yıl ülkemizde ve tüm dünyada etkili olan COVID-19 pandemisi tüm insanlığın sağlığını tehdit etmiş önemli sayıda can kayıplarına sebep olmuştur. İnsanlar üzerinde olumsuz izler bırakan COVID-19 virüsüne karşı geliştirilen aşilar hastalığı hafif atlatılmak için koruyucu çözüm olarak görülmektedir. Ancak aşı karşıtı tutumlar ve aşı uygulamalarından sonra gelişen sorunlar ve yan etkiler insanları tedirgin etmektedir. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada COVID-19 aşilarından Sinovac ve Biontech özelinde, metin madenciliği teknikleri ile duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla aşı hakkındaki olumlu ya da olumsuz tecrübelerini ve düşüncelerini Twitter üzerinden paylaşan insanların tweetleri elde edilerek duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde COVID-19 aşilarının toplumda çoğunlukla olumlu yönde etki yaptığı görülmüştür.

Öte yandan, analiz sonuçlarına göre aşı ile ilgili olumlu duygular fazla olsa da, nüfusun bir kısmının endişe ve korku duyması, aşiların insanları üzerindeki etkisinin olumsuz taraflarını da yansıtmıştır. Bu çalışmanın farklı aşı türleri ya da medikal tedavi yöntemleri için de uyarlanabileceği ve bu sayede insanlar için yol gösterici olabileceği düşünülmektedir. Gelecek çalışmada, makine öğrenmesi algoritmaları ile duygu sınıflandırması yapılarak tweetler üzerine duygu analizi gerçekleştirilip sonuçları bu çalışma ile karşılaştırılacaktır.

## Kaynaklar

- [1] “Instagram,” [Online]. Available: <https://www.instagram.com/>.
- [2] “Facebook,” [Online]. Available: <https://www.facebook.com/>.
- [3] “Twitter,” [Online]. Available: <https://twitter.com/>.
- [4] R. Feldman and J. Sanger, “The Text Mining Handbook”, Advanced Approaches in Analyzing Unstructured Data, Cambridge University Press, 2006.
- [5] R. Dehkharghani, Y. Saygin, B. Yanikoglu and K. Oflazer, “SentiTurkNet: a Turkish polarity lexicon for sentiment analysis”, Lang Resources & Evaluation, 50:667–685, 2016.
- [6] S. Baccianella, A. Esuli, F. Sebastiani, “SENTIWORDNET 3.0: An Enhanced Lexical Resource for Sentiment Analysis and Opinion Mining”, Proceedings of the Seventh International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'10), May, Valletta, Malta, 2010.
- [7] E. Cambria, D. Olsher, D. Rajagopal, “VSenticNet 3: A Common and Common-Sense Knowledge Base for Cognition-Driven Sentiment Analysis”, July, Conference: AAAI, 2014.
- [8] S. M. Mohammad and P. D. Turney, “Crowdsourcing a word-emotion association lexicon”, Computational Intelligence, 29(3), 436–465. 2013.
- [9] M. Özcelik, N. B. Arıcan, Ö. Bakay, E. Sarıms, G. N. Bayazıt, Ö. Ergelen ve T. O. Yıldız, “HisNet: A Polarity Lexicon based on WordNet for Emotion Analysis”,



In Proceedings of the 11th Global Wordnet Conference, pages 157–165, University of South Africa (UNISA). Global Wordnet Association, 2021.

- [10] S. S. Sharma and G. Dutta, “SentiDraw: Using star ratings of reviews to develop domain specific sentiment lexicon for polarity determination”, *Information Processing and Management* 58 (2021) 102412, 2021.
- [11] R. Dehkharghani, “SentiFars: A Persian Polarity Lexicon for Sentiment Analysis”, *ACM Trans. Asian Low-Resour. Lang. Inf. Process.* 19, 2, Article 21, 12 pages, September, 2019.
- [12] “Emotion Ontology”, [Online]. Available: <https://bioportal.bioontology.org/ontologies/MFOEM>.
- [13] M. Dragoni, S. Poria, E. Cambria, “OntoSentNet: A Commonsense Ontology for Sentiment Analysis”, *IEEE Intelligent Systems*, May/June, p.77-85, 2018.
- [14] B. Pang, L. Lee and S. Vaithyanathan, “Thumbs up? Sentiment classification using machine learning techniques”, In: *Proceedings of the ACL-02 conference on empirical methods in natural language processing-Volume 10* (pp. 79–86), Association for Computational Linguistics, 2002.
- [15] A. Xie, Agarwal, B. Vovsha, I. O. Rambow and R. Passonneau, “Sentiment analysis of Twitter data”, In: *Proceedings of the workshop on languages in social media Association for Computational Linguistics*, (pp. 30–38), 2011.
- [16] S. M. Başarslan ve F. Kayaalp, “Sentiment Analysis with Machine Learning Methods on Social Media”, *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal Regular Issue*, Vol. 9, N. 3 (2020), 5-15, 2020.
- [17] F. Fang Yao, Y. Wang, “Domain-specific sentiment analysis for tweets during hurricanes (DSSA-H): A domain-adversarial neural-network-based approach”, *Computers, Environment and Urban Systems* 83 (2020) 101522, 2020.
- [18] N. Mukhtar, A. M. Khan, N. Chiragh, “Lexicon-based approach outperforms Supervised Machine Learning approach for Urdu Sentiment Analysis in multiple domains”, *Telematics and Informatics*, 35 (2018) 2173–2183, 2018.
- [19] D. Michailidis, N. Stylianou and I. Vlahavas, “Real Time Location Based Sentiment Analysis on Twitter - The AirSent System”, In *SETN '18: 10th Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, July 9–15, 2018, Rio Patras, Greece. ACM, New York, NY, USA, Article 4, 4 pages. <https://doi.org/10.1145/3200947.3201052>, 2018.
- [20] S. Saran, L. Singla & P. Singh, “Twitter analytics for integrated research in biodiversity”, *Asian conference on remote sensing*. In *Proceedings of the 40th Asian Conference on Remote Sensing ACRS*, 2019.
- [21] M. Albayrak, K. Topal ve V. Altıntaş, “Sosyal Medya Üzerinde Veri Analizi: Twitter”, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, C.22, Kayfor 15 Özel Sayısı, s.1991-1998, 2017.
- [22] M. G. Almatar, H. S. Alazmi, L. Li and E. A. Fox, “Applying GIS and Text Mining Methods to Twitter Data to Explore the Spatiotemporal Patterns of Topics of Interest in Kuwait”, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 702; 2020, doi:10.3390/ijgi9120702.
- [23] Z Song and J. Xia, “Spatial and Temporal Sentiment Analysis of Twitter data”, In: Capineri, C, Haklay, M, Huang, H, Antoniou, V, Kettunen, J, Ostermann, F and Purves, R. (eds.) *European Handbook of Crowdsourced Geographic Information*, Pp.205–221, 2016, London: Ubiquity Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/bax.p>. License: CC-BY 4.0
- [24] M. Häberle, M. Werner and X. X. Zhua, “Geospatial text-mining from Twitter – a feature space analysis with a view toward building classification in urban regions”, *European Journal of Remote Sensing* 2019, Vol. 52, No. S2,2–11, <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1586451>, 2019.
- [25] S. Alowaidi, M. Saleh, O. Abulnaja, “Semantic Sentiment Analysis of Arabic Texts”, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 8, No. 2. 2017.
- [26] B. Resch, F. Usländer and C. Havas, “Combining machine learning topic models and spatiotemporal analysis of social media data for disaster footprint and damage assessment”, *Cartography and Geographic Information Science*, 45:4, 362-376, 2018, DOI: 10.1080/15230406.2017.1356242.
- [27] L. Tavoşchi, F. Quattrone, E. D’Andrea, P. Ducange, M. Vabanesi, F. Marcelloni and L. P. Lopalco, “Twitter as a sentinel tool to monitor public opinion on vaccination: an opinion mining analysis from September 2016 to August 2017 in Italy”, *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 16:5, 1062-1069, 2020, DOI: 10.1080/21645515.2020.1714311.
- [28] L. Nemes and A. Kiss, “Social media sentiment analysis based on COVID-19”, *Journal of Information and Telecommunication*, 5:1, 1-15, DOI: 10.1080/24751839.2020.1790793, 2021.
- [29] A. Beşkirli, E. Gülbandılar ve E. Dağ, “Metin Madenciliği Yöntemleri ile Twitter Verilerinden Bilgi Keşfi”, *ESTUDAM Bilişim Dergisi*, Cilt 2, Sayı 1, 21-25, 2021.
- [30] Çakmak, E. T., & Oğuzlar, A. (2022). Sosyal Medyada Duygu Analizi: COVID-19 Sürecinde 5G Algısı. *International Journal of Social Inquiry*, 15(1), 55-68.
- [31] Aygün, I., Kaya, B., & Kaya, M. (2021). Aspect based twitter sentiment analysis on vaccination and vaccine types in covid-19 pandemic with deep learning. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(5), 2360-2369.
- [32] C. J. Lyu, L. E. Han, K. G. Luli, “COVID-19 Vaccine-Related Discussion on Twitter: Topic Modeling and Sentiment Analysis”, *J Med Internet Res* 2021, 23(6), e24435, 2021.

- [33] S. Liu and J. Liu, "Public attitudes toward COVID-19 vaccines on English-language Twitter: A sentiment analysis", *Vaccine* 39 (2021) 5499–5505, 2021.
- [34] Marcec, R., & Likic, R. (2022). Using twitter for sentiment analysis towards AstraZeneca/Oxford, Pfizer/BioNTech and Moderna COVID-19 vaccines. *Postgraduate medical journal*, 98(1161), 544-550.
- [35] Å. F. Nielsen, "A new anew: evaluation of a word list for sentiment analysis in microblogs", *CEUR Workshop Proc* 2011;718:93–8, 2011.
- [36] C. Villavicencio, J. J. X. Macrohon, X. A. Inbaraj, J. H. Jeng, J. G. Hsieh, "Twitter Sentiment Analysis towards COVID-19 Vaccines in the Philippines Using Naïve Bayes", *Information*, 12, 204, 2021, <https://doi.org/10.3390/info12050204>.
- [37] Ansari, M. T. J., & Khan, N. A. (2021). Worldwide COVID-19 Vaccines Sentiment Analysis Through Twitter Content. *Electronic Journal of General Medicine*, 18(6).
- [38] Çılğın, C., Gökçen, H., & Gökşen, Y. (2022). Twitter’da COVID-19 aşılarna karşı kamu duyarlılığının çoğunluk oylama sınıflandırıcısı temelli makine öğrenmesi ile duygu analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1093-1104.
- [39] Aslan, S. (2022). BiGRU-CNN Tabanlı Derin Öğrenme Modeliyle Türkiye’deki Covid-19 Aşılarına Yönelik Twitter Duygu Analizi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(2), 312-330.
- [40] Mermer, G., & Özsezer, G. (2023). Discussions About COVID-19 Vaccination on Twitter in Turkey: Sentiment Analysis. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 17, e266.
- [41] "Covid19," [Online]. Available: <https://covid19.saglik.gov.tr/>.
- [42] "WHO," [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update-on-covid-19---1-september-2023>
- [43] T. Jo, "Text Mining Concepts, Implementation, and Big Data Challenge", *Studies in Big Data*, Springer, Volume 45, ISBN 978-3-319-91814-3, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91815-0>. 2019.
- [44] X. Wu, X. Zhu, G. Wu and W. Ding, "Data Mining with Big Data", *IEEE Transactions On Knowledge And Data Engineering*, Vol. 26, No. 1, 2014.
- [45] G. Salton, C.S. Yang, "On the specification of term values in automatic indexing". *J. Doc.* 29, 351–372, 1973.
- [46] "Wordnet," [Online]. Available: <https://wordnet.princeton.edu/>.
- [47] "Orange," [Online]. Available: <https://orangedatamining.com/>.
- [48] J. Demšar and B. Zupan, "Orange: Data Mining Fruitful And Fun", *Proceedings of the 15th International Multiconference, Information Society-IS*, Volume A, 2012.
- [49] M. Hu and B. Liu, "Mining and Summarizing Customer Reviews", *KDD’04*, August 22–25, Seattle, Washington, USA, 2004.
- [50] C. J. Hutto, E. Gilbert, "VADER: A Parsimonious Rule-based Model for Sentiment Analysis of Social Media Text", *Proceedings of the Eighth International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, Michigan, USA, June 1–4, 2014.



# Bir Güç Türbini Kanatçığında Akışkan Yapı Etkileşimi Analizi Kullanımı Metodolojisi

## Methodology of Usage of Fluid Structure Interaction Analysis for a Power Turbine Blade

Özge Altun<sup>1\*</sup>, Görkem Madenoğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [okutlu@ogu.edu.tr](mailto:okutlu@ogu.edu.tr)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0958-333X>

<sup>2</sup>TEI-TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş., [gorkem.madenoglu@tei.com.tr](mailto:gorkem.madenoglu@tei.com.tr)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-1330>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 23 Haziran 2023  
Revizyon 24 Ağustos 2023  
Kabul 9 Ekim 2023  
Online 31 Aralık 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Akışkan yapı etkileşimi, Jet Motorları, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

### ÖZ

Akışkan Yapı Etkileşimini (AYE) içeren problemlerle pek çok mühendislik alanında karşılaşılmasına rağmen bu alanda yapılan çalışmalar uzun bir geçmişe sahip değildir ve sınırlıdır. AYE analizleri yüksek basınç ve sıcaklık ile mekanik ve termal yüklerin fazla olduğu jet motorlarına ait parçalar için etkin bir şekilde avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışmada literatürde yer alan AYE çalışmalarına yer verilmiş ve günümüz jet motor parçalarının tasarımı esnasında uygulanabilecek AYE analizleri metodolojisi hakkında bilgi verilmiştir. AYE analizlerinde kullanılan temel denklemler anlatılmış, tek yönlü, çift yönlü, sıkı ve gevşek bağlı AYE analiz yapıları, kullanım yerleri ve algoritmaları detaylı olarak ele alınmıştır. Akışkan kısmın, yapısal kısmın şekil değiştirmesinden az etkilendiği bir problem sayısal olarak incelenmiştir. Tek yönlü ve çift yönlü AYE analizler sonucunda maksimum hava hızları arasında %0.09 fark olduğu tespit edilmiştir. Jet motorlarında veya farklı mühendislik alanlarında AYE analizlerini kullanacak bilimsel çalışmalara yönelik hangi yöntemlerin daha avantajlı olduğu hakkında bilgi verilmiştir. Sonuç olarak, yüksek maliyetli deneysel çalışmalar ve testlerden önce; zaman, iş gücü ve ekonomik tasarruf sağlayan AYE analizlerinin kullanımının önemi vurgulanmıştır.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 June 2023  
Received in revised form 24 August 2023  
Accepted 9 October 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Fluid Structure Interaction, Jet Engines, Computational Fluid Dynamics

### ABSTRACT

Although problems involving Fluid Structure Interaction (FSI) are encountered in many engineering fields, studies in this field do not have a long history and are limited. FSI analysis also effectively provide advantages for jet engine parts where pressure and temperature, mechanical and thermal loads are high. In this study, the FSI studies in the literature are included and information about the FSI analysis methodology that can be applied during the design of today's jet engine parts is given. The basic equations used in FSI studies are explained; one-way, two-way, strongly and loosely coupled FSI analysis structures, usage areas and algorithms are explained in detail. A problem in which the fluid part is less affected by the deformation of the structural part has been numerically investigated. As a result of one-way and two-way AYE analysis, it was determined that there was a 0.09% difference between maximum air speeds. Information is given about which methods are more advantageous for scientific studies that will use FSI analyzes in jet engines or in different engineering fields. As a result, before expensive experimental studies and tests; the importance of using FSI analysis, which provides time, labor and economic savings, has been emphasized.

Doi: 10.24012/dumf.1318801

\* Sorumlu Yazar

## 1. Giriş

Birçok alanda mühendislere tasarımlar konusunda yardımcı olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gibi çözüm yöntemleri haricinde günümüzde bu iki disiplinin beraber uygulanması ile ortaya çıkan Akışkan Yapı Etkileşimi (AYE) analizleri de yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

AYE problemlerinde, bir veya daha fazla katı yapısal bölge, iç veya kendisini çevreleyen akışkan akışı ile etkileşime girmektedir. Bu nedenle AYE problemleri birçok bilim ve mühendislik alanında önemli roller oynamaktadır. Ancak bu tür problemlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi, doğrusal olmamaları ve multidisipliner yapıları nedeniyle çözümleri oldukça zordur [1]-[3]. Çoğu AYE problemi için analitik çözümler elde etmek imkansız olup, deneysel çalışmaların da kapsamı sınırlıdır. Bu nedenle katı ve sıvı arasındaki karmaşık etkileşimde yer alan temel fiziği anlamak ve araştırmak, yeni tasarımların yapılabilmesi ve mevcut tasarımların geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca katı ve sıvı arasındaki etkileşim, sayısal simülasyonlar kullanılarak hızlı bir şekilde değerlendirilebilmektedir [4].

AYE analizleri, rüzgâr türbin kanatçıklarının incelenmesinde sıkça kullanılan analizlerdir. Doğan [5], çalışmada rüzgâr türbini kanatları için 2-D ve 3-D analizler yapmıştır. Çalışmada farklı hücum açılara sahip NACA0012 kanat profili kullanılmış ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde akışkan kısmı için ANSYS CFX ve yapısal kısım içinse ANSYS Mechanical yazılımları kullanılmıştır. HAD analizleri, 2-D ve sıkıştırılmaz akış kabulüyle yapılmıştır. Sıkıştırılmaz akış kabulü nedeniyle artan hücum açısına bağlı olarak Mach sayısında da artışlar gözlemlenmiş, ancak belirli bir hücum açısı değerinden sonra analiz sonuçları ile test sonuçları arasında farklılıklar görülmüştür.

MacPhee ve Beyene [6], rüzgâr türbin kanadı için deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, kanat üzerine gelen rüzgâr yükü nedeniyle kanat hücum açılarının değişimini ve bu değişimin türbin performansına etkisini incelemişlerdir. Tek yönlü ve çift yönlü AYE analizleri yapan MacPhee ve Beyene [6], rüzgâr etkisi altında türbin kanatlarının şekil değiştirmesinin hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar için analizler yapmışlar, ayrıca elde ettikleri analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak sonuçların uyumluluğunu kıyaslamışlardır.

Literatürde rüzgâr türbinlerinin performansına yönelik yapılan çalışmalar dışında rüzgâr türbin gövdelerinin dayanımını hesaplamak ve tasarımları iyileştirmek için de AYE analizleri kullanılmıştır.

Jo ve ark. [7], rüzgâr türbini üzerine gelen rüzgâr yükünü tek yönlü AYE analiz yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Türbülanslı akış analizleri için Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport) modelini kullanarak basınç yüklerini hesaplayan yazarlar elde ettikleri bu değerleri yapısal modele aktararak taşıyıcı kulede meydana gelen şekil değişimini elde etmişlerdir.

Farklı bir disiplinde yapılan bir diğer çalışma ise insan vücudunda kalbin görevini yapabilecek özelliklere sahip bir pompanın AYE analizleridir [8]. Yazarlar, akışkan analizlerini OpenFOAM yazılımıyla yaparken, kendilerinin oluşturdukları yazılım ile yapısal analizler ile akışkan-yapı analizleri arasındaki bağlantıyı gerçekleştirmişlerdir.

Literatürde deneysel verilerin bulunduğu AGARD 445.6 roket kanadı için de sürekli rejim AYE analizleri gerçekleştirilmiştir [9]. Yazar çalışmada akışkan analizleri için CFX v.13, yapısal analizler için ANSYS Mechanical'ı kullanmıştır. Akgül [9] çalışmada, roket kanadı için çift yönlü AYE analizleri yapmış, elde ettiği sonuçları ise literatürde yer alan deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Daha sonra doğruladığı yöntemi kullanarak farklı bir roket geometrisi üzerinde analizler yapmıştır. Yazar, AYE analiz sonuçlarını karşılaştırdığında, yapısal modelde şekil değişiminin dikkate alınmasının yapılan analizlerin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini tespit etmiştir.

Kamakoti ve Shyy [10], ise yine AGARD 445.6 kanadını kullanarak kanatlardaki titreşim ve titreşime bağlı olarak kanatlarda meydana gelen kırılma konusunu incelemişler ve aeroelastik analizler yapmışlardır. Çalışmada, farklı bağlantı türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını ele almışlardır. Yapının doğal frekanslarını çift yönlü AYE analizleri kullanarak hesaplayıp, kanadın etrafından geçen akışkan nedeniyle oluşan titreşim frekansıyla kanadın doğal frekansını karşılaştırmışlardır.

Havacılık sektöründe uçuş emniyetine uygun üretim yapma zorunluluğu, kullanılan malzemelerin ve üretim yöntemlerinin pahalı olması, sıkı toleranslar, üretilen ürünlerin yüksek kalitede olma gerekliliği, uzun ve zahmetli tasarım süreçlerinin nedenleri olarak gösterilebilir. Uçuş emniyetinin son derece önemli olması, üretim yöntemleri ve malzemelerinin oldukça pahalı olması nedeniyle bu sektörde çalışan mühendislerin tasarım esnasında en ufak ayrıntılara dikkat etmesi, bakım ve üretim yöntemleri, kullanılacak malzemeler gibi kritik konuları detaylı bir şekilde ele almaları gerekmektedir. Bu nedenle, havacılık sektöründe gaz türbin bileşenleri için hem yapısal hem de akış analizlerini içeren AYE analizleri önem kazanmaktadır.

Gaz türbinlerine yönelik AYE analizlerini kullanarak çalışma yapan Dhopade ve ark. [11], türbinlerinin hava girişinde bulunan fanın düşük ve yüksek çevrimlerinde, fan kanatlarında meydana gelebilecek yorulma olasılığı ve ömür hesabı üzerine çalışmışlardır. Hesaplamalarda çift yönlü AYE analiz yöntemini kullanmışlardır. Mekhonoshina ve ark. [12], zamana bağlı çift yönlü AYE analizlerini kompresör kanatçıklarına uygulayarak, değişen gerilmeleri araştırmışlardır. Modeli basitleştirmek için 12 sabit ve 12 dönen kanatçıktan oluşan modelin on ikide birlik kısmını analizlerinde kullanmışlardır. Sabit kanatçığın hava akışı sırasında şekil değiştirmediği kabulü ile akışkan yapı etkileşim bölgesi olarak, dönen kanatçığı seçmişlerdir. Ubulom [13] çalışmada yüksek basınç türbin kanadının yorulma miktarını tahmin etmek için AYE bağlantı yöntemlerinin etkisini araştırmıştır. Analizler sonucunda birleştirilmiş çözümlerin türbin kanatlarının yorulma

özelliklerinde ve ömür değerlerinde farklı sonuçlar verebileceği görülmüştür.

Bu çalışmada, aynı anda hem yapı hem de akış analizlerine sahip AYE problemleri için sayısal yöntemlerin gözden geçirilmesi ve bu alanda yapılan çalışmalarda disiplinler arası iş birliğinin önemine değinmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda, günümüzde kullanılan gaz türbinli motorlarda yer alabilecek bir güç türbini kanatçığının ilk tasarım aşaması ile ilgili yapılabilecek AYE analizlerinde karşılaşılan zorluklarını giderilmesi için verimli ve doğru bir metodoloji ve algoritma oluşturmak, kullanılan yöntemlerin temel özelliklerini belirlemek hedeflenmiş ve bu çalışmanın hem gaz türbinleri hem de farklı disiplinlerde AYE analizi yapacak araştırmacılara yol göstereceği düşünülmektedir.

Çalışmada AYE problem formülasyonu ele alınmış, çözüm yöntemleri tanımlanmış, daha sonra sistemleri bağlama ve yönetici denklemler konularına değinilmiştir. Bir güç türbini döner kanatçığı için tek yönlü ve çift yönlü AYE analizleri sonucunda elde edilen maksimum hava hızları karşılaştırılmıştır.

## 2. Akışkan Yapı Etkileşimi (AYE)

AYE, yapısal mekaniği ve akışkanlar dinamiğini tanımlayan kanunlar arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Bu olgu, akışkanla etkileşim halinde olan yapıların şekil değişimlerinin ve hareketlerinin incelenmesinde önemli yer tutmaktadır.

Bir yapı etrafındaki akış, çevrelediği yapı üzerinde gerilme ve gerilmelere sebep olur. Oluşan bu gerilmeler ve gerilmeler akışın ve yapının karakteristiğine göre hesaba katılacak kadar çok büyük veya göz ardı edilebilecek derecede çok küçük olabilmektedir.

Hesaba katılacak kadar büyük gerilme ve gerilmelerin söz konusu olduğu gaz türbinli motorlardaki güç türbini kanatçıkları, rüzgar türbin kanatçıkları ve uçak kanatları gibi pek çok mühendislik sistemlerinde, akışkan yapı etkileşimleri, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken oldukça önemli bir olgudur.

### 2.1 Akışkan Yapı Etkileşim Problem Formülasyonu

Bu çalışmada gaz türbininde yer alan 1 adet döner ve 1 adet sabit kanatçık ele alınmıştır (Şekil 1). Türbin kanatçıkları için Girişte sabit toplam basınç ( $P_{in} = 259657$  Pa), giriş yüzeyi boyunca ise  $827 \div 927$  °C arasında değişmekte olan sıcaklık dağılımı sınır şartı kullanılmıştır. Çıkış sınır şartı olarak  $\dot{m} = 0.059280$  kg/s kütleli debi değeri uygulanmıştır. Hesaplama alanı dış sınırı  $\Gamma$  olan  $Y$  ile gösterilmektedir. Bu çözüm bölgesi  $Y_s$  yapısal bölge ve  $Y_f$  akışkan bölgeyi içermektedir. Akışkan-yapı ara yüzü ise  $\Gamma_s$  ile tanımlanmaktadır.

Akışkan ve yapı için hareket denklemleri, D'Alembert ilkesinin bir sonucu olarak [14]:

$$\rho \dot{v}_i - \sigma_{ij,i} + f_i = 0 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $f_i$  yer çekimi ivmesi gibi gövde kuvvetidir.

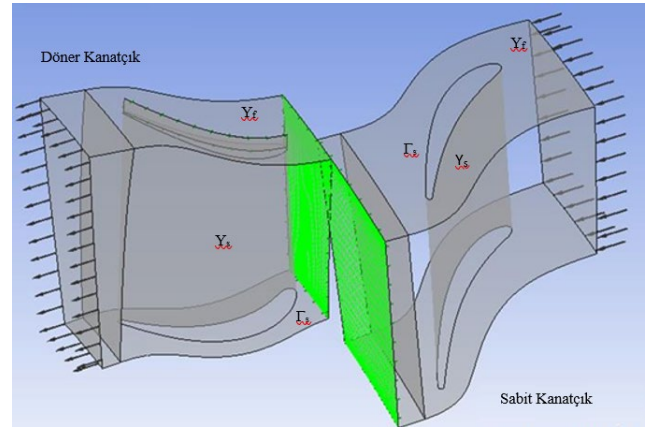
Yapısal bölge ( $Y_s$ ) için denklemler [14];

$$\rho^s \dot{v}_i^s - \sigma_{ij,j}^s + f_i^s = 0 \quad (2)$$

Burada s üst indisi yapı ile ilişkili miktarı belirtmektedir. Ayrıca  $v_i^s$  malzemenin hızıdır ve yer değiştirme alanının zaman göre türevidir ( $v_i^s = \dot{u}_i^s$ ).

Denklem (2)' de yer alan ilk iki terim atalet ve iç gerilmelerle ilişkilidir. Hooke yasasından, doğrusal elastik malzemeler için yapısal gerilim Denklem (3) ile ifade edilir [14].

$$\sigma_{ij}^s = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{ll} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3)$$



Şekil 1. Bir gaz türbini için AYE probleminde akışkan ve yapı bölgelerinin gösterimi [14]

Yapısal gerilme tensörü  $\sigma_{ij}^s$ , şekil değiştirme hızı tensörü ( $\varepsilon_{ij}$ ), Lamé sabitleri  $\lambda$  ve  $G$ 'nin fonksiyonudur.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4a)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4b)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4c)$$

Denklem (4b) ve (4c)'de  $E$ , Young modülü ve  $\nu$  Poisson oranıdır.

Akışkan bölgesi ( $Y_f$ ) için denklemler [14];

$$\rho^f \dot{v}_i^f - \sigma_{ij,j}^f + f_i^f = 0 \quad (5)$$

Denklem (5) genellikle Euler tanımıyla ifade edilir. Böylece eylemsizlik teriminden,

$$\dot{v}_i^f = \frac{dv_i^f}{dt} = \frac{\partial v_i^f}{\partial t} + v_i^f v_{i,j}^f \quad (6)$$

Denklem (6) elde edilir. Sıkıştırılmaz Newton tipi akışkan için, akışkan gerilme tensörü [14];

$$\sigma_{ij}^f = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (7)$$

Denklem (7)'den elde edilebilir. Bu denklemde viskoz gerilme tensörü;

$$\tau_{ij} = 2\mu(e_{ij} - \frac{\delta_{ij}e_{kk}}{3}) \quad (8a)$$

$$e_{ij} = (v_{i,j}^f + v_{j,i}^f) \quad (8b)$$

Denklem (7)'de  $p$  sıkıştırılmazlık koşulunu uygulamak için gerekli kuvvet olarak görülebilen statik basınçtır ve  $v_{i,i}^f = 0$ 'dır.

Akışkan-yapı ara yüzü  $\Gamma_s$  ele alınırsa,  $\Gamma_s$  boyunca kaymama durumunu korumak için, Dirichlet ve Neumann koşulları uygulanabilir [14];

$$v_i^s = v_i^f \quad (9)$$

$$\sigma_{ii}^s n_i = \sigma_{ij}^f n_j \quad (10)$$

Denklem (10) hem akışkan hem de yapı ortak ara yüzünün yer değiştirme koşulunun bir diğer ifadesidir,

$$x_i^s = x_i^f \quad (11)$$

Bazı FSI yöntemlerinde düzgün bir ara yüz profili için, Denklem (9) yerine Dirichlet kısıtlaması olarak Denklem (11) dikkate alınmaktadır.

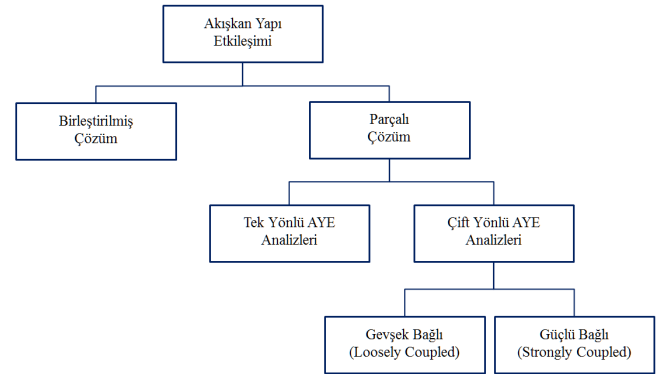
## 2.2 Akışkan Yapı Etkileşim Çözüm Yöntemleri

AYE problemlerinin çözümünde iki temel yöntem söz konusudur. Şekil 2'de gösterildiği gibi AYE analizleri birleştirilmiş ve parçalı çözümler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmanın kapsamını da oluşturan parçalı çözüm yöntemi tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çift yönlü AYE analizleri ise gevşek bağlı ve güçlü bağlı çözüm yöntemlerini içermektedir.

Bu yöntemlerden ilki birleştirilmiş çözüm yöntemidir. Birleştirilmiş yöntemde yapısal çözücünün kullandığı denklem ve matrisler ile akışkan çözücünün kullandığı denklemler ve matrisler birleştirilerek tek bir matris oluşturulur. Bu tek bir matrisin çözülmesiyle hem akışkan hem de yapısal çözüm sonuçları elde edilir. Birleştirilmiş çözüm sonucunda fiziksel olarak gerçeğe en yakın sonuçlara ulaşılmaktadır. Ancak birleştirilmiş çözüm yönteminde sonuçların elde edilmesi uzun zaman almaktadır.

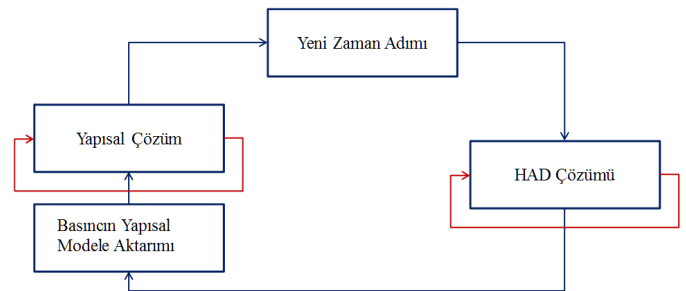
Birleştirilmiş çözüm yönteminin zahmetli ve uzun zaman alması nedeniyle, parçalı AYE analiz yöntemi daha fazla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Parçalı AYE çözümünde, akışkan ve yapı çözümleri ayrı ayrı çözüm yaparak belirlenen zaman adımlarında problemi çözerler. Çözüm sonucunda elde edilen, problemin çözümünde gerekli olan sonuçlar akışkan çözücünden yapısal çözücüye ve yapısal çözücünden akışkan çözücüye aktarılır.

Parçalı çözüm yönteminin altında yer alan tek yönlü AYE analizinde, sadece akışkan çözücüsünde elde edilen basınç değerleri yapısal çözücüye aktarılmaktadır. Tek yönlü analizlerde akışım etkisi altında kalan yapısal kısmın şekil değişimi ihmal edilmektedir. Tek yönlü AYE analizlerinde akış geometrisinin değişmediği kabulü yapılmaktadır ve bu çözüm yöntemi yapısal kısımda önemli şekil değişimlerinin olmadığı durumlarda kullanılmalıdır.



Şekil 2. AYE analizlerinin sınıflandırılması [15].

Şekil 3'te tek yönlü AYE analizleri için oluşturulan blok diyagramı verilmiştir. Tek yönlü AYE analizlerinde, her bir analiz zaman adımı için akışkan ve yapısal çözümler sadece bir defa çözüm yapılmakta, HAD çözümünde elde edilen basınç değerleri yapısal çözücüye aktarılmakta ve yapısal çözüm sonucunda yeni bir analiz adımı başlamaktadır.



Şekil 3. Tek Yönlü AYE Analiz Şeması [16].



Çift yönlü AYE analizlerinde ise tek yönlü AYE analizlerinden farklı olarak, yapısal kısmın şekil değişimi ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Analiz sırasında, yapısal kısmın geometrisinde meydana gelen değişim nedeniyle akış geometrisi de değişmektedir. Bu nedenle çift yönlü AYE analizlerinde her bir analiz adımı sonrasında, HAD analizleri sonucu elde edilen basınçlar yapısal çözüme aktarılırken, yapısal çözüm sonrası elde edilen, modelde meydana gelen şekil değişimleri de HAD analizine aktarılır. Akış geometrisindeki güncellemeleri analizlere aktarmak için, her yeni çözüm adımında akışkan modeldeki ağ yapısı, yapısal modeldeki şekil değişimlerine bağlı kalınarak güncellenir. Çift yönlü AYE analizlerinde her analiz zaman adımı için akışkan ve yapısal çözümlerin iteratif olarak çalışması, ağ yapılarının güncellenmesi çözümlere ulaşmak için uzun zaman harcanmasına neden olmaktadır.

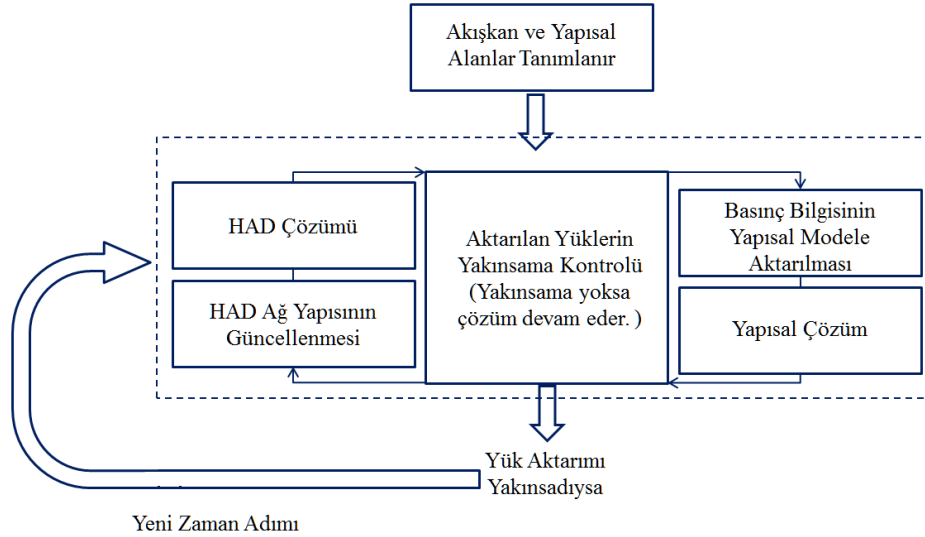
Çift yönlü analizlerde çözüm, başlangıç sınır şartlarında akış analizleriyle başlar. Akış analizinden elde edilen basınç değerleri yapısal modele aktarılır. Yapısal çözücü, akış analizinden elde edilen basınç verilerini sınır şartı olarak kullanır ve yapısal kısımda oluşan şekil değişimini hesaplar. Hesaplanan şekil değişimi, akışkan çözücüdeki ağ yapısına

aktarılırak ağ yapısı güncellenir. Böylece ikinci adımdan itibaren yapısal modeldeki şekil değişimine uygun akışkan analizleri yapılır.

Bu çözüm yönteminde akışkan ve yapısal çözümler arasında sürekli bilgi aktarımı söz konusu olduğundan her adımda bu bilgi aktarımı kontrol edilmelidir. Ayrıca yapısal çözücüde ve akışkan çözücüde kullanılan ağ yapıları birbirlerinden farklı olması sebebiyle bilgi aktarımı kontrolünün yapılması çözüm doğruluğu açısından önem arz etmektedir.

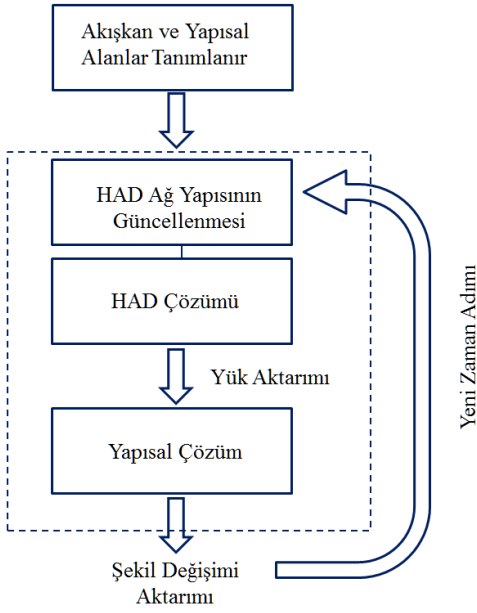
Her adımda çözümler arasında veri aktarımı ve yakınsamanın kontrol edildiği analize güçlü bağlı çift yönlü AYE analizleri adı verilir. Güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinin blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.

Gevşek bağlı çift yönlü AYE analizlerinde, güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinin aksine veri aktarımı kontrolü ve yakınsama önemsenmez. Eğer akışkan ve yapısal kısımlarında birbirleriyle uyumlu ağ yapıları kullanılıyorsa gevşek bağlı çift yönlü AYE analizleri kullanılabilir. Aksi takdirde akışkan ve yapısal çözücü arasındaki bilgi aktarımı sırasında farklılıklar ve hatalar kaçınılmaz olur.



Şekil 4. Güçlü Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi [16].

Gevşek bağlı çift yönlü AYE analizlerinin çalışma şeması Şekil 5'te gösterilmiştir.



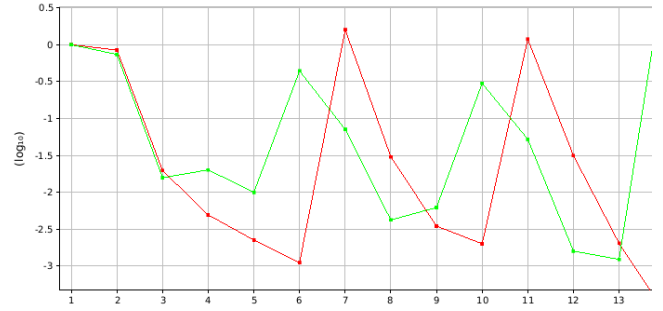
Şekil 5. Gevşek Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi [15].

### 2.3 Sistemleri Bağlama

AYE analizleri hangi birleştirme yöntemi seçilirse seçilsin farklı fiziksel alanlar için ayrı çözümlerin oluşturulduğu bölümlü bir çözüm yöntemidir. Akışkan kısımda akışkanlar dinamiği, katı kısımda ise yapı dinamiği çözümleri yapılmaktadır. Çözümlerde akışkan ve katı arasındaki sınırda akışkan-yapı ara yüzü tanımlanır ve bu ara yüzde akışkan ve yapı çözümleri arasında bilgi paylaşımı yapılır. Bu bilgi paylaşımı birleştirme yöntemine göre değişmektedir. Tek yönlü bağlamada yapıya etki eden akışkan basıncı yapısal çözücüye aktarılırken çift yönlü analizlerde yapının basıncın etkisiyle yer değiştirmesi de akışkan çözücüye aktarılmaktadır [16].

Sistemleri bağlama, AYE analizleri gibi farklı disiplinlerin kullanıldığı analizlerde kolaylık sağlayan bir yazılımdır ve Ansys Workbench paket yazılımında yer almaktadır. Akışkan kısım için HAD ve yapısal kısım için SEM analiz modellemeleri tamamlandıktan sonra, sistemleri bağlama kullanılarak, analiz adım zamanları, analiz süreleri, bilgi aktarımının yapılacağı bölgeler ve bu yazılımlar arasında hangi verilerin paylaşılacağı belirlenebilir.

Sistemleri bağlama yazılımı içinden gerekli düzenlemeler ve ayarlamalar sonrası, çözüm süreci başlar ve sonuçlar takip edilebilir. Sistemleri bağlama kullanılarak yapılmış bir AYE analizinin çözümü sırasında oluşan grafik Şekil 6'da verilmiştir. HAD analizi sonucunda oluşan basınç dağılımının yapısal tarafa aktarımındaki yakınsama değerleri yeşil çizgiler ile gösterilmektedir. Kırmızı çizgiler ise yapısal analiz sonucunda hesaplanan şekil değiştirme değerlerinin HAD analizine aktarıldığı sıradaki yakınsama durumunu göstermektedir. Yatay eksen ise iterasyon sayısı yer almaktadır.



Şekil 6. Sistemleri Bağlama Ekranındaki Yakınsama Görşeli [15].

### 2.4 Sistemleri Bağlama Yönetici Denklemleri

Çift yönlü ve güçlü bağlı AYE analizlerinde akışkan ve yapısal modeller arasında her analiz adımında veri aktarımı olmaktadır. Fakat her iki modelde kullanılan ağ yapıları farklı olduğundan aktarılan verilerin ne kadarının doğru olduğu kontrol edilmelidir.

Bu nedenle sistemleri bağlama yazılımı çift yönlü ve güçlü bağlı AYE analizleri sırasında veri aktarımındaki değişiklikleri kontrol eder. Eğer veri aktarımındaki değişiklikler belirlenen değerlerin altına inmezse analiz durdurulur. Yazılım yakınsama kontrolünü Denklem (12), (13) ve (14) numaralı formüller ile yapar [17].

$$\Delta_l = \frac{1}{\omega} (\varphi_l^i - \varphi_l^{i-1}) \quad (12)$$

Denklem (12)'de,  $\omega$  rahatlatma parametresidir. Denklemde yer alan  $\varphi$  veri aktarımı yapılan değişkenin değerini,  $l$  alt indisi veri aktarımının yapılacağı konumu,  $i$  üst indisi ise çözümler arasında veri aktarımının yapıldığı iterasyon numarasını temsil etmektedir.  $\Delta_l$  ise iki iterasyon arasında aktarılan verinin değişimini göstermektedir.

$$\hat{\Delta}_l = \frac{\Delta_l}{((\max|\varphi| - \min|\varphi|) + |\bar{\varphi}|) * 0.5} \quad (13)$$

Burada,  $\hat{\Delta}_l$ , Denklem (12)'de hesaplanan  $\Delta_l$  değerinin normalize edilmiş halidir. Normalize edilmiş değişim değeri, Denklem (12)'de bulunan iterasyonlar arası değişim değerinin, aktarımı yapılan verilerin maksimum ve minimum mutlak değerlerin arasındaki fark ile aktarılan verilerin ortalamasının toplanıp yarıya bölünmesi sonucu elde edilen değere oranlanması ile bulunur.

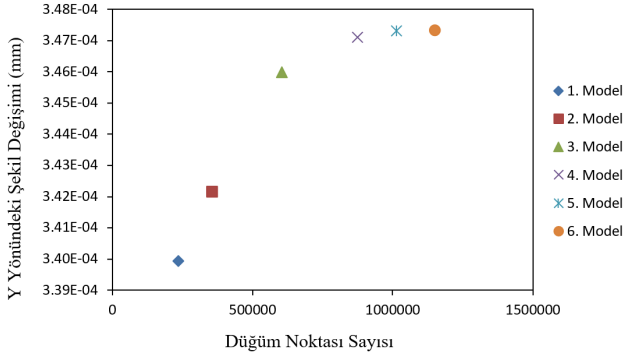
$$RMS = \sqrt{(\hat{\Delta}_l)^2} \quad (14)$$

Yakınsama kontrolü Denklem (13)'te verilen ifade ile yapılır.

### 2.5 Ağdan Bağımsızlık ve Analiz Sonuçları

Bu çalışmada TurboGrid yazılımı kullanılarak oluşturulan ağ yapısı için, ağ yapısının etkisi incelenmiştir. Ayrıca ağ yapısında bulunan hücre ve düğüm noktası sayısı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, en doğru sonucun elde

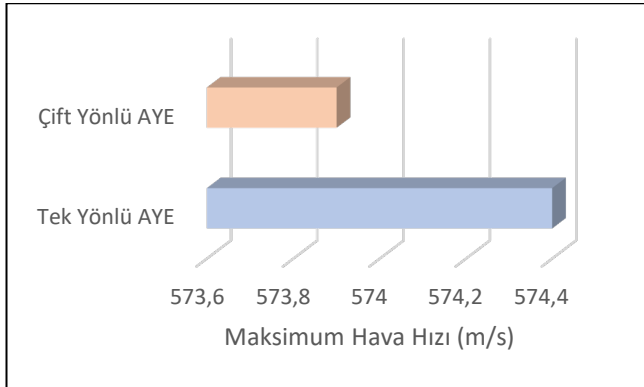
edilebileceği en az sayıda hücre içeren model araştırılmıştır. Şekil 7’de oluşturulan farklı ağ yapılarının düğüm noktası sayıları ve şekil değiştirme sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7. Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları.

Şekil 7’de gösterilen grafik farklı ağ yapısındaki modellerin sonuçlarını göstermektedir. Modellerdeki düğüm noktası sayısı arttıkça, y yönündeki şekil değişimi değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle ilk üç model için sonuçlar oldukça farklı çıkmaktadır. Ancak 4, 5 ve 6. Modellerin sonuçları birbirine oldukça yakındır. Bu sebeple, bu üç modelden en az hücre ve düğüm noktasına sahip olan model 4 uygun ağ yapısı olarak seçilmiştir. Model 4’te yaklaşık 880000 düğüm noktası ve 830000 hücre vardır. Sabit kanatçık akış hacmine de model 4’te kullanılan ağ yapısı özellikleri ile sayısal ağ oluşturulmuş ve takip eden analizler bu ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde türbülans modeli olarak ‘Shear Stress Transport (SST)’ modeli kullanılmıştır.

Şekil 1’de verilen döner ve sabit kanatçık yapısı için tek yönlü ve güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinde havanın akış hacminde ulaşabileceği maksimum hızlar incelenmiş olup, elde edilen hız değerleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Tek Yönlü ve Güçlü Bağlı Çift Yönlü AYE Analizlerinde Maksimum Hava Hız Değerleri

Her iki çözümden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında % 0.09 oranında fark olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonucun ışığında, yapısal bir değişimin incelenmeyeceği analizlerde tek yönlü AYE sonuçlarının da hata oranının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇ

CFD yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde tam yakınsama elde edilmesi, çözümlerin doğruluğu açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle, yapılan analizlerde ağ bağımsızlığı gibi duyarlılık analizi yapılması gerekir. Sistemlerin birleştirilmesinde yöntemlerin doğru bir şekilde kavranması, doğru çözümlerin elde edilmesine yardımcı olabilir.

Bu çalışmada AYE analizlerinde kullanılan farklı yaklaşımlar ele alınmış ve hangi yaklaşımın hangi tür ihtiyaçlara cevap verebileceği değerlendirilmiştir. Ele alınan her bir yöntemde de hesaplama süreçlerinde bazı temel farklılıklar vardır ve bu nedenle sayısal çözümler de farklılık gösterir.

Tek yönlü AYE analizlerinde akışın, yapısal kısmın şekil değişiminden etkilenmediği kabulü yapılmaktadır. Bu yöntemde akışkan ve yapısal çözümler ayrı ayrı çözüm yaparlar. İlk olarak HAD analizi çözüm sonuçları elde edilir. HAD analizinden elde edilen basınç dağılımı yapısal çözücü SEM’e aktarılır. Akışın oluşturduğu etki SEM’de bir sınır şartı olarak işleme alınarak tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilebilir.

Yapısal kısmın şekil değişiminden akışkan kısmının az etkilendiği durumlarda kullanılan tek yönlü AYE analizleri, çift yönlü analizlerle karşılaştırıldığında oldukça hızlı sonuç vermektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, yapısal kısımda meydana gelen değişikliklerin akış hacmine etkisinin ihmal edilmemesi gereken durumlarda, çift yönlü AYE analizleri uzun zaman gerektirmesine rağmen tercih edilmelidir.

Çift yönlü yaklaşımda, şekil değiştiren yapısal kısmın akışkan bölgesine etkisi ihmal edilmez. İteratif çözümler uygulanarak, yapısal kısımda meydana gelen şekil değişimi akışkan hacminin geometrisine uygulanarak HAD analizi tekrarlanır. HAD ve SEM çözümleri sırayla çözüme dahil olurlar ve şekil değişimini, basınç değerlerini ve ağ yapılarını birbirlerine aktarırlar.

Tek yönlü ve çift yönlü analiz sonuçlarında maksimum hava hızı sırasıyla 573.9 m/s ve 574.4 m/s’dir. Ortaya konulan probleme göre yapısal değişimin önemli olmadığı durumlarda tek yönlü AYE sonuçları ile çift yönlü AYE analiz sonuçlarının çok yakın olduğu yapılan analizle doğrulanmıştır. Bu nedenle şekil değişim değeri çok yüksek olmayan yapılarda ve akışkan hacminin yapısal şekil değişiminden çok etkilenmediği durumlarda tek yönlü AYE analizlerini tercih etmek daha mantıklıdır. Çift yönlü analizlerde karşılaşılan uzun zaman gereksinimi ve yakınsama zorluğu gibi etkenler tek yönlü analizleri daha öne çıkarmaktadır.

Gaz türbinli motorlarda, türbin kanatçıklarının yorulma ve ömür davranışlarını incelemek gerekirse basınç ve şekil değişim değerlerine bağlı olarak kanatçıklar üzerinde oluşan gerilmelerin değişimleri incelenmelidir. Analizi yapılacak probleme uygun yöntemin seçimi uygun doğrulukta ve düşük maliyetli bir analiz elde edilmesine yardımcı olabilir.

AYE analizleri kullanılarak, jet motor parçalarının tasarımında, yüksek maliyetli deneysel çalışmalar ve testlerden önce; zaman, iş gücü ve ekonomik tasarruf için tasarımların mükemmel ulaşmasında bu analizlerin kullanılması büyük kolaylıklar sağlayacaktır.

## 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

ALTUN: Çalışma konsepti ve tasarım, taslağın oluşturulması, revizyon, yüksek lisans tezinde danışmanlık.

MADENOĞLU: Yüksek lisans tez çalışması, çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması

## Kaynaklar

[1] S. K. Chakrabarti, "Numerical Models in Fluid- Structure Interaction: (Advances in Fluid Mechanics)," 1st ed. WIT Press, 2005, 42.

[2] E. H. Dowell and K. C Hall, "Modeling of fluid-structure interaction," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 33, pp. 445-490, 2001.

[3] H. J.-P. Morand and R. Ohayon, "Fluid-Structure Interaction: Applied Numerical Methods," 1st ed., Wiley, 1995.

[4] G. Hou, J. Wang and A. Layton, "Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction - A Review," *Commun. Comput. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 337-377, 2012.

[5] K. Doğan, "Yatay eksenli rüzgar türbin kanatlarının akışkan-yapı etkileşimi yönünden incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2014.

[6] D. W. MacPhee and A. Beyene, "Experimental and fluid structure interaction analysis of a morphing wind turbine rotor," *Energy*, vol. 90, pp. 1055-1065, 2015.

[7] C. H. Jo, D. Y. Kim, Y. H. Rho, K. H. Lee and C. Johnstone, "FSI analysis of deformation along offshore pile structure for tidal current power," *Renewable Energy*, vol. 54, pp. 248-252, 2013.

[8] R. L. Campbell and E. G. Paterson, "Fluid-structure interaction analysis of flexible turbomachinery," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 27, pp. 1376-1391, 2011.

[9] M. Akgül, "Static aeroelastic analysis of a generic slender missile using a loosely coupled fluid structure interaction method," Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 2012.

[10] R. Kamakoti and W. Shyy, "Fluid-structure interaction for aeroelastic applications," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 40, pp. 535-558, 2004.

[11] P. Dhopade, A. J. Neely and J. Young, "Fluid-structure interaction of gas turbine blades", *17th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Auckland, New Zeland, 4s, 2010.

[12] E.V. Mekhonoshina, V. Y. Modorskii and V. Y. Petrov, "Numeric simulation of the interaction between subsonic flow and a deformable profile blade on the compressor experiment phase," *International Conference Information Technology and Nanotechnology*, Samara, Russia, 8s, 2015.

[13] I. Ubulom "Influence of fluid-structure interaction modelling on the stress and fatigue life evaluation of a gas turbine blade," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 235, no. 5, pp. 1019-1038, 2021.

[14] G. Hou, J. Wang, A. Layton, "Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction-A Review," *Communications in Computational Physics*, Vol.12, No.2, 337-377, 2012.

[15] G. Madenoğlu, "Jet Motoru Güç Türbini Kanatçıklarının Akışkan Yapı Etkileşimi Analizleri ile İncelenmesi," Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri, Nisan 2017.

[16] F.-K. Benra, H. J. Dohmen, J. Pei, S. Schuster and B. Wan, "A Comparison of One-Way and Two-Way Coupling Methods for Numerical Analysis of Fluid-Structure Interactions," *Journal of Applied Mathematics*, 1-16, 2011.

[17] ANSYS V. 17, 2017 System Coupling User's Guide.

## Simgeler Dizini

$E$	Young modülü	$\sigma_{ij,i}$	Yapısal gerilme tensörü
$e_{ij}$	Deformasyon hızı	$\tau_{ij}$	Viskoz gerilme tensörü
$f_i$	Gövde kuvveti	$\vartheta$	Poisson oranı
$p$	Statik basınç	$\varepsilon_{ij}$	Şekil değiştirme hızı tensörü
$v$	Hız	$\mu$	Viskozite
$Y_s$	Yapısal bölge		
$Y_f$	Akışkan bölge	Üst İndis	
$\Gamma_s$	Akışkan-yapı ara yüzü	$f$	Akışkan ile ilişkili miktar
$\rho$	Yoğunluk	$s$	Yapı ile ilişkili miktar



# Bir Boyutlu Sanal Doku Ortamındaki Sıcaklık Değişiminin Uçuş Zamanı Yöntemi İle Hesaplanması

## Measurement Temperature Change In 1D Virtual Phantom Using Time of Flight Method

Mustafa Uyğun<sup>1\*</sup>, M. Serhan Küçüka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Teknolojiler ABD, [mustafauygun9@gmail.com](mailto:mustafauygun9@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4486-6223>

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, [serhan.kucuka@deu.edu.tr](mailto:serhan.kucuka@deu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2281-561X>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 3 Temmuz 2023  
Revizyon 20 Eylül 2023  
Kabul 8 Ekim 2023  
Online 31 Aralık 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Ultrason, akustik, dokularda sıcaklık ölçümü, simülasyon, uçuş zamanı yöntemi

### ÖZ

Bu çalışmada bilgisayar ortamında akustik fantom oluşturulmuş ve fantom üzerinde iki farklı sıcaklık dağılımı için akustik simülasyon gerçekleştirilmiştir. İki farklı sıcaklık dağılımı için elde edilen dönüş sinyallerine çapraz korelasyon uygulanarak yerel noktalardaki zaman kaymaları hesaplanmıştır. Zaman kayması vektörünün ekstenel eğimlerinin doku sabiti ile çarpılmasıyla her noktadaki sıcaklık değişimi hesaplanmıştır. Sıcaklık tahmininde, analiz sonucunda bulunan zaman kaymalarının yatay eksene göre eğimlerinin bulunması için geri fark yöntemi ve doğru uydurma yöntemi kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sıcaklık dağılımı ilk durumda doku 37°C'de üniform sıcaklıkta ve ikinci durumda doku merkezi 45°C ve etrafında çan eğrisi yaparak azalan şekilde tanımlanmıştır. Sıcaklık ölçümündeki maksimum sapmaların, geri fark yönteminde 1,99°C, doğru uydurma yönteminde 0,75°C olduğu ve kullanılan modelin tek boyutlu uygulamada yeterli olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile birlikte ileride yapılacak iki boyutlu simülasyon ve deneysel çalışmalar için taban oluşturulmuştur.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 3 July 2023  
Received in revised form 20 September 2023  
Accepted 8 October 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Ultrasound, acoustic, temperature measurement in tissues, simulation, time of flight method

### ABSTRACT

In study, virtual acoustic phantom was created and acoustic simulation was performed for two different temperature distributions. Local time-shifts were calculated by applying cross correlation to ultrasonic signals obtained from simulation results. The temperature distribution was estimated by multiplying the axial slopes of the time shift vector by the tissue constant. In the temperature estimation, the back difference method and the linear fitting were used to find the slopes of the time shifts, and the results of two methods were compared. In study, the first temperature distribution, defines the tissue is uniform at 37°C, and in the second temperature distribution, the temperature is reaching 45°C in the center of tissue in the shape of Gaussian curve. The maximum deviation in the temperature estimation were found 1.99°C in the back difference method and 0.75°C in the linear fitting method. Study shows that, time-shift based temperature estimation is successful in on one-dimensional application. Thus, basis for future multidimensional simulation and experimental studies has been established.

Doi: 10.24012/dumf.1321801

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Hipertermi ve ısı ablasyon uygulamaları ile tümör dokuları küçültülebilmekte veya yok edilebilmektedir. Sıcaklık artışı sonucunda tümör dokusunda bulunan hücrelerin enzim faaliyetleri yavaşlamakta ve planlı hücre ölümleri gerçekleşmektedir. Bir diğer mekanizmada yüksek sıcaklık uygulaması sonucunda proteinler doğrudan denaturasyona uğramakta, doku hızlıca su kaybetmekte ve kömürleşme gerçekleşmektedir, [1]. Bu tedavilerin başarılı olması için dokuya belirli bir ısı dozunu uygulanması gerekmektedir. Hipertermi tedavisi için dokunun belirli bir sıcaklıkta (40-45 °C) belirli bir süre (>30 dakika) tutulması gerekmektedir. Kömürleşme için gerekli sıcaklık değeri yükselmekle birlikte (>60 °C), işlem daha kısa sürede (30 s'ye kadar) gerçekleşmektedir, [2].

Doku içi ısı görüntülemenin önemi burada belirgin hale gelmektedir. Tedavi esnasında dokunun maruz kaldığı sıcaklık dağılımının tedavi süresince izlenmesi ile birlikte, tümörlü doku ve çevre sağlıklı dokuların aldığı ısı doz belirlenebilir. Böylelikle hem tümörün hem de sağlıklı çevre dokuların aldığı zarar nicel olarak tespit edilebilir ve tedavinin başarısında ölçüt olarak kullanılabilir.

Ultrasonik görüntüleme, bir ısı ablasyon sırasında tedavinin izlenmesi ve başarı tespiti için klinikte kullanılan bir tekniktir. Ablasyon sürecinde, yakılan doku bölgesinden gaz çıkışı gözlemlenmekte ve tedavi yorumlanmaktadır, [3]. Isıl görüntüleme tekniklerinin geleneksel ablasyon tedavi izlemelerinin yanında yardımcı bir ölçüt olacağı öngörülmektedir. Ablasyon görüntülemenin yanı sıra sıcaklık kontrollü ilaç salınımlarında sıcaklık tahmini kullanılmaktadır, [4].

Dokularda ısı görüntüleme girişimsel olarak doku içerisine daldırılan ısılıçiftler ile gerçekleştirilebilir. Ancak girişimsel ölçüm, komplikasyon yaratma riskini içerdiğinden ve farklı bölgelerde ölçüm için ayrı ısılıçiftlerin doku içerisine yerleştirilmesi gerektiğinden dolayı dezavantajlıdır. Girişimsel olmayan bir teknik olarak manyetik rezonans tabanlı ısı görüntüleme teknikleri uygulamalarda yer almaktadır, [5],[6]. Ancak manyetik rezonans cihazları klinik uygulamalar için maliyeti yüksek bir görüntüleme tekniğidir. Ultrason tabanlı ısı görüntüleme taşınabilir, düşük maliyetli ve dokuya zarar vermeyen yönleri ile dikkat çekmektedir, [7]. Ticari ultrasonik görüntüleme cihazlarından elde edilen sinyaller üzerinde analiz gerçekleştirilerek sıcaklık görüntüleme gerçekleştirilebilir. Ultrasonik ısı görüntülemeye mutlak sıcaklık yerine dokuda meydana gelen sıcaklık artışları hesaplanmaktadır. Başlangıç sıcaklık değerinin doku merkez sıcaklığı (37°C) olarak varsayılması ile mutlak sıcaklık yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Ancak, sıcaklık değişiminin ultrasonik yöntemle hesaplanması, sinyallerin üst üste binmesi ve gürültü nedeni ile ayrıntılı bir analiz gerektirmektedir.

Doku sıcaklığının değişimi ile birlikte dokunun termoakustik özellikleri ve buna bağlı olarak ses hızı değişmekte, ayrıca ısı genleşme etkisinden ötürü ilgili bölgenin gerçek derinliğinde kaymalar oluşmaktadır.

Bunun bir sonucu olarak, geri dönüş sinyalinin uçuş süresindeki değişiminin değerlendirilmesi ile sıcaklık değişimi hesaplanabilmektedir [8],[9]. Literatürde doku fantomu [9]–[12] ve hayvan deneyleri [12]–[14] ile yapılan deneysel çalışmalarda doku içi sıcaklık artışı gerçekleştirilmiş ve ticari ultrasonik sistemler kullanılarak sıcaklık ölçümü zaman kayması yöntemi ile elde edilmiştir. Varghese vd. [13] ve Anand vd. [10] çalışmalarında zaman kaymaları değerlerini RF sinyali üzerinde çapraz korelasyon işlemi uygulanmasıyla elde etmişlerdir. Simon vd. [9], Liu ve Ebbini [12] RF sinyali analitik sinyale çevirmiş ve analitik sinyaldeki faz kaymalarından hareketle zaman kaymalarını tespit etmişlerdir. Sakakibara vd. [11] çalışmasında 2B görüntü üzerindeki piksellerin kaymalarını tespit etmiş ve bu kaymalardan yerel yer değiştirmelerini tespit ederek sıcaklık tahmini yapmışlardır.

Liu ve Ebbini [12] 1°C ve altı sapmalar ile gerçek zamanlı olarak sıcaklık ölçümü yapılabildiğini bildirmiş, Anand ve ark. [10] fantom çalışmasında ısı çift ölçümüyle arasındaki maksimum farkı 0,24°C olarak tespit etmişlerdir. Ultrasonik sıcaklık sırasında dokuların maruz kaldığı hareketlerin etkisini ve ölçümde bu etkinin telafisi üzerine çalışmalar bulunmaktadır [15]–[17]. Isıl gerinim görüntüleme, zaman kayması temelli ölçüm ile aynı temele sahip bir görüntüleme modalitesidir. Yöntemde kontrollü bir sıcaklık artışı sonucunda doku içi zaman kaymaları hesaplanmakta ve gerinim bilgisine dönüştürülmektedir. Yağ ve su gibi dokular zıt ısı gerinim profiline sahiptirler. Bu dokuların ısı gerinimlerinin ters işaretli olması ön bilgisi ile dokuya kontrollü bir sıcaklık artışı uygulanması ve ısı gerinimlerinin ölçülmesi sonucunda, doku içerisindeki bölgelerin su veya yağ bazlı oldukları tespit edilmektedir [18]–[20].

Kullanılabilecek diğer bir yöntemde, doku empedansının değişimi sonucunda dönüş sinyalinin genliğinde oluşan değişimlerin değerlendirilmesiyle sıcaklık tahmini yapılabilmektedir. Geri dönüş enerjisindeki değişim [21]–[23] ve fotoakustik ölçüm tekniği [24] sinyal genliğindeki değişimleri değerlendiren tekniklerdir.

Literatürde farklı şartlarda gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ilişkin çalışmalar olmakla birlikte, sıcaklık ölçüm kriterlerinin sistematik değerlendirilmesine ilişkin çalışma görülmemiştir. Bu çalışmada sanal ortamda simülasyon çalışması yapılarak sıcaklık dağılımının hesaplanması ve ölçüm yönteminin değerlendirme kriterlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda MATLAB [25] üzerinde yansıtıcı özellikleri içeren sanal bir doku fantomu oluşturulmuş ve k-Wave paket programı ile dokuda iki farklı sıcaklık dağılımı için akustik simülasyon gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, dönüş sinyalleri üzerinde uçuş zamanı değişimine dayalı sıcaklık tahminleme yöntemi kullanılarak sıcaklık dağılımı hesaplanmış ve tanımlanmış sıcaklık profilinden olan sapmalar belirlenmiştir.



## Tek Boyutlu Doku Fantomu İçindeki Akustik Sinyallerin Modellenmesi

### Doku Fantomunun Oluşturulması ve Sıcaklık dağılımı

Çalışmada MATLAB üzerinde yansıtıcı parçacıklar içeren tek boyutlu sanal bir karaciğer doku fantomu tanımlanmıştır. Hesaplama alanı tek boyutlu olup, derinliği kullanılan çalışma frekansında ( $f = 8,5$  MHz) 300 dalga boyuna ( $\lambda$ ) karşılık gelecek şekilde 54,353 mm seçilmiştir. Homojen olmayan bir ortam oluşturabilmek için doku içerisine akustik yansıtıcı parçacıklar tanımlanmıştır. Her bir parçacığın derinliği  $0,15\lambda$ 'dır. Parçacıklar, aralarındaki ortalama uzaklık  $11\lambda$  ve aralarındaki uzaklığın standart sapması  $2,2\lambda$  olmak üzere Gaussian profilde yerleştirilmişlerdir. Parçacıkların akustik empedanslarının doku empedansından hafifçe farklı olduğu varsayılmıştır. İçinde parçacıkların bulunduğu tek boyutlu doku ortamı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir ve fantom doku ve içerisindeki yansıtıcı parçacıkların termo-akustik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tek boyutlu doku ortamı ve yansıtıcı parçacık dağılımı

Karaciğerin  $37^{\circ}\text{C}$ 'de ses hızı Tablo 1'de  $1578$  m/s olarak verilmiştir. Empedans farklılığı yaratmak için yansıtıcı ses hızları  $1530$  m/s olarak tanımlanmış ve yansıtıcıların yoğunluğu doku ile eşit kabul edilmiştir. Doku içindeki ortalama ses hızı Denklem 1'in kullanılması ile  $1577,38$  m/s olarak hesaplanmıştır. Burada  $r$ , doku içerisinde bulunan yansıtıcıların toplam kalınlığının tüm hesaplama alanı kalınlığına oranıdır.

$$\frac{1}{c_{ortalama}} = \frac{(1-r)}{c_{doku}} + \frac{r}{c_{yansitici}} \quad (1)$$

Akustik simülasyon çalışmasında doku içerisindeki her bir noktaya, referans sıcaklıktaki ( $37^{\circ}\text{C}$ ) yoğunluk ve ses hızı değerlerinin ve ses hızının sıcaklıkla değişim katsayısının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada yoğunluğun sıcaklıkla değişimi ihmal edilmiştir.

### Doku ve parçacık empedans değerleri

Akustik empedans

$$Z = \rho \cdot c \quad (2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Ses dalgasının farklı bir ortama geçişi sırasındaki basınç ve enerjisinin yansıma oranları iki ortam arasındaki empedans farkına bağlı olarak sırası ile

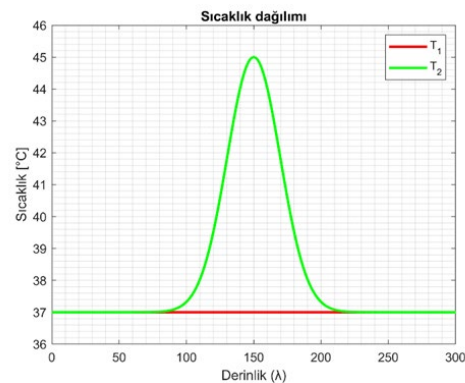
$$R_{Basinç} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3a)$$

$$R_{Enerji} = R_{Basinç}^2 \quad (3b)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Burada  $R$ , yansıma katsayısı,  $Z$  akustik empedans,  $\rho$  yoğunluk ve  $c$  ses hızı değerleridir. İndisler sırasıyla doku (1) ve yansıtıcı (2) özelliklerini tanımlamaktadır. Tablo 1'de verilen değerler kullanılarak  $37^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki doku-yansıtıcı arayüzeyi için yansıma basınç oranı  $0,0154$ , dönüş enerjisi oranı ise  $\sim 2,385 \times 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. Göz önüne alınan doku içerisinde, parçacıktan ana dokuya geçişte ve ana dokudan parçacığa geçişlerin her birinde yansımalar olmakta, ayrıca bu yansımaların tekrar geri yansıması ile çoklu yansımalar oluşmaktadır. Çalışmada çoklu yansımalar meydana gelecek benek gürültülerinin minimum olması istenmiştir. Bu nedenle saçıcılar arası uzaklık yüksek tutularak seyrek saçıcı modeli oluşturulmuştur. Böylelikle bir saçıcı bölgeden gelen sinyal üzerinde bulunan, ilgili saçıcıdan daha önde konumlanmış diğer saçıcılardan kaynaklı gürültüler azaltılmıştır. Benek etkileri bu çalışmanın kapsamına alınmamıştır.

### Doku içerisindeki sıcaklık değişiminin tanımlanması

Oluşturulan doku fantomu içerisinde iki ayrı sıcaklık dağılımı tanımlanmıştır. İlk durumda doku her noktada  $37^{\circ}\text{C}$ 'de bulunmaktadır. İkinci sıcaklık durumunun, dokunun merkezine uygulanan bir ısıtma sonucunda oluştuğu varsayılmıştır. Termal terapi uygulamalarında sıcaklık dağılımı noktasal, çizgisel, alan ısıtması veya hacim ısıtması olmak üzere uygulama bölgesinin şekline göre ve çevre bölgedeki doku yapısına ve kan dolaşımına bağlı olarak değişmektedir. Literatürde deneysel olarak yapılan çalışmalarda termal ablasyon uygulamalarının benzetimi amacıyla, ölçüm yapılacak doku odağında noktasal sıcaklık artışı uygulaması gerçekleştirilmektedir [9-14]. Bu uygulama sonucunda ısı transferi fiziki ve doku termal özelliklerine göre odak çevresinde sıcaklık dağılımı oluşmaktadır. Bu çalışmada temel amacın sıcaklık tahminleme kriterlerini belirlemek olması nedeni ile bir pik nokta etrafında Gaussian sıcaklık profili oluştuğu varsayılmıştır. Buna göre, dokunun merkezinde  $45^{\circ}\text{C}$  için pik yapacak ve merkezden her iki yönde yaklaşık  $70 \lambda$  uzaklıkta, çan eğrisinin kuyruğu  $37^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşacaktır. İki ayrı sıcaklık dağılımı Şekil 2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. İlk ve ikinci durum sıcaklık dağılımları

### Akustik Simülasyon

Akustik benzetim modelinde, MATLAB üzerinde kullanılan kWave [27],[28] yazılım paketi içeriğindeki genel akustik korunum denklemleri, üzerinde değişiklik yapılmadan kullanılmıştır.

### Başlangıç ve Sınır Şartları

- Başlangıç anında ( $t_0 = 0$ ) dokudaki akustik basınç değeri sıfırdır.

$$t = t_0 \quad p(x, t_0) = 0 \quad (4)$$

Tablo 1. Doku termofiziksel özellikleri [26]

Doku	Ses Hızı (37°C)	dc/dt	Yoğunluk (37°C)	Akustik Soğurma, $\alpha$ dB/cm	Kaynak
Karaciğer	1578	0,8375	1050	0,3	[26]
Yansıtıcı	1530	0,8375	1050	0,3	-
Doku (ortalama)	1577,38	0,8375	1050	0,3	-

- $x=0$  noktasında  $\delta t_{atım}$  süresi kadar giriş sinyali uygulanmıştır.

$$p(0, t) = \begin{cases} A \cdot \sin(2\pi f t), & 0 < t \leq \delta t_{atım} \\ 0, & t > \delta t_{atım} \end{cases} \quad (5)$$

- Hesaplama alanının her iki ucuna akustik soğurucu ortam olarak haricen PML (Perfectly Match Layer) katmanı tanımlanmıştır. Bu katman hesaplama alanı uçlarından geriye olabilecek yansımaları sönmölmektedir.

Simülasyon başlangıcında, ilk grid üzerinden atım süresi boyunca tanımlanmış bir basınç sinyali yayılmakta, sonrasında tüm simülasyon süresi boyunca dönüş basınç değerleri aynı grid elemanı üzerinden dinlenmektedir.

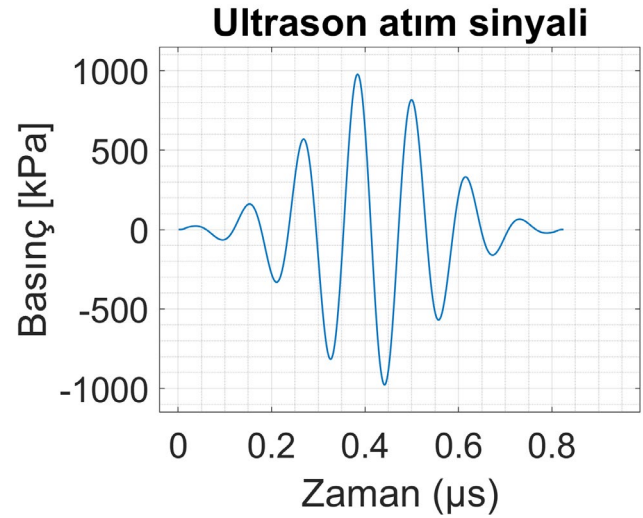
### Hesaplama parametreleri

Gridler arası uzaklık ve zaman adımı sıklığı hesaplama yükünü ve doğruluğunu etkilemektedir. Bu iki değer sıklaştırılması sonucunda sistemin hesap yükü artmakta, sıklığının azaltılması durumunda dalga formlarının oluşumunda hata gözlemlenmektedir. Bu etkileri gözlemlemek için başlangıçta bir kare dalga atılarak geri dönüş sinyallerinin değişimi izlenmiş ve hesaplama aralıkları hissedilir ölçüde bir dalga bozulmasının olmayacağı sıklıkta seçilmiştir. Buna göre grid genişliği dalga boyunun 1/20'si ve hesaplama zaman adımı frekansın 1/100'ü olarak alınmıştır.

### Atım sinyali

1 GPa basıncındaki genlik ve 8,5 MHz frekansında oluşturulmuş, 7 periyotluk süreye sahip sinüzoidal dalgaya ait vektörün elemanları, Gaussian dağılımın elemanları ile birebir çarpım yapılmış ve çarpım sonucunda elde edilen sinyal 1. sıradaki grid üzerine

tanımlanan sanal transdüser ile dokuya gönderilmiştir. Atım sinyali formu Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Giriş atım sinyali

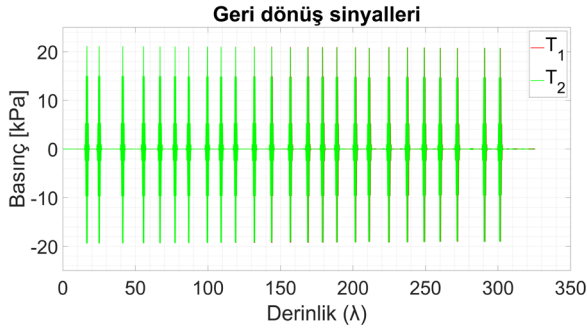
### Dönüş sinyallerinin değerlendirilmesi

İki farklı sıcaklık durumu için (37°C sabit sıcaklık ve doku içinde yukarıda tanımlanan sıcaklık dağılımının olması hali) kWave üzerinde simülasyon çalıştırılmış ve geri dönüş basıncının zamana bağlı değişim sinyali bir numaralı grid üzerinden kaydedilmiştir. Sinyal üzerinde, ses hızının ortalama değeri kullanılarak zaman bilgisinden derinlik bilgisine dönüşüm yapılmıştır, (Denklem 6).

$$Derinlik = \frac{t \cdot c_{ort}}{2} \quad (6)$$

Akustik soğurma nedeniyle geri dönüş sinyallerinde derinlik arttıkça zayıflama meydana gelmektedir. Bu zayıflamayı telafi etmek için zaman ekseninde derine indikçe sinyale akustik soğurma katsayısı temel alınarak kazanç uygulanmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen geri dönüş sinyalleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Geri dönüş sinyallerinde kırmızı sinyal ilk sıcaklık durumunu, yeşil sinyal ikinci sıcaklık durumunu göstermektedir. Burada dönüş sinyallerinin saçıcıların konumuna karşılık gelen

yerlerde pik değere ulaştığı, ancak yansımalar nedeniyle sinyallerin üst üste binmiş sinüzoidal dalga formlarından oluştuğu görülmektedir. Sıcaklık değişiminden dolayı ikinci durumdaki dönüş sinyalinde bir farklılaşma oluşmaktadır.



Şekil 4. Geri dönüş sinyalleri

### Sıcaklık Dağılımının Tahminlenmesi

Sıcaklık değişiminin tahminlenmesinde zaman kayması yöntemi kullanılmıştır. Dokuda sıcaklık değişimi olması halinde, dokunun sıcaklığa bağlı genişmesi ve ses hızının değişimine bağlı olarak sinyal uçuş süresi değişmektedir.

Zaman kayması ikinci durumda ölçülen geri dönüş süresi ile birinci durumda ölçülen geri dönüş süresi arasındaki fark olup Denklem 7'de ifade edilmiştir.

$$\delta t(z) = TOF_2(z) - TOF_1(z) \quad (7)$$

Burada  $\delta t$ , dokunun aynı noktasından geri dönen sinyal için uçuş süresi değişimini göstermektedir. Uçuş süresi değişiminden tersine işlem yapılarak, Denklem 8-9'da verilen bağıntılar ile doku sıcaklık değişimi hesaplanabilmektedir, [9].

$$\delta T(z) = \frac{c_0(z)}{2} \left( \frac{1}{\alpha(z) - \beta(z)} \right) \frac{\partial}{\partial z} \delta t(z) \quad (8)$$

$$\beta(z) = \frac{1}{c_0(z)} \left. \frac{\partial c(z, T)}{\partial T} \right|_{T=T_0} \quad (9)$$

Burada  $c_0(z)$ , herhangi bir  $z$  derinliğindeki doku bölgesinin başlangıç durumundaki ses hızı değeri,  $\alpha(z)$  doğrusal ısıl genişleme katsayısıdır. Ultrasonik sinyaller ayrık zaman ile ifade edildiğinden ötürü bu denklemin ayrıklaştırılmış hali kullanılmaktadır, (Denklem 10).

$$\Delta T(i) = \left( \frac{1}{\alpha(i) - \beta(i)} \right) \frac{\Delta \delta(i)}{\Delta i} \quad (10)$$

Burada denklemin doku ile ilgili özelliğini belirleyen sol terim, doku sabiti olan  $k_{doku}$ 'ya eşitlenmiştir, (Denklem 11).

$$k_{doku} = \left( \frac{1}{\alpha(i) - \beta(i)} \right) \quad (11)$$

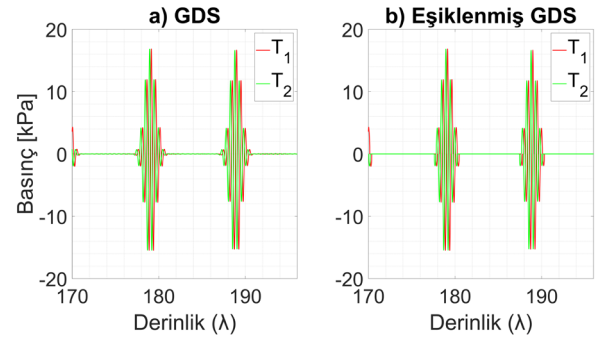
Denklem 10, doku sabitinin yerine yazılmasıyla tekrar düzenlenmiş ve Denklem 12 elde edilmiştir. Bu denkleme

göre, zaman kaymalarının zaman adımı eksenine göre eğiminin bir doku sabiti ile çarpılması ile sıcaklık tahmini gerçekleştirilmektedir.

$$\Delta T(i) = k_{doku} \frac{\Delta \delta(i)}{\Delta i} \quad (12)$$

### Simülasyon verisi üzerinde uygulama

Bu bölümde, elde edilen simülasyon verisi üzerinde, ultrasonik sıcaklık tahminlemesi adım adım gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda elde edilen geri dönüş sinyalleri her bir zaman adımına karşı gelen basınç değeridir. Zaman adımı serisinden derinlik serisine dönüşüm, görselleştirme ve veri sunumlarında gerçekleştirilmektedir. Elde edilen geri dönüş sinyallerinde Şekil 5'te görüldüğü üzere yansıtıcılardan meydana gelen dönüşleri ifade eden, ana dalga formlarına kıyasla küçük genlikli gürültüler bulunmaktadır. Bu gürültüleri elimine etmek için 1 kPa altındaki değerleri sıfıra eşitleyen bir eşikleme filtresi uygulanmıştır. Sıcaklık tahmin analizleri, filtre edilmiş sinyal üzerinden yürütülmüştür.



Şekil 5. Filtre öncesi ve sonrası basınç değerleri

Tahminlemenin ilk aşamasında, sıcaklık dağılımına ait sinyaller arasındaki zaman kaymaları bulunacaktır. Elde edilen sinyallerdeki örnek bir zaman kayması Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Zaman kayması

Çalışmada zaman kayması algoritmasının doğruluğunu tespit etmek amacıyla analitik yoldan karşılaştırma yapılmıştır. Her bir grid için beklenen uçuş süresi, önceden tanımlanmış sıcaklık dağılımı ve geometriye göre Denklem 13 ile hesaplanmıştır. İkinci ve ilk durumdaki sıcaklıklara karşılık gelen uçuş süreleri arasındaki fark alınarak beklenen (olması gereken) zaman kayması değerleri hesaplanmıştır.

$$t(z, T) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z}{c(z, T)} \quad (13)$$

Sıcaklık değişiminin sinyal üzerinden hesaplanabilmesi için Denklem 12’de belirtildiği üzere sırası ile a) dalga formlarının zaman serisi üzerinde ne kadar kaydıklarının tespit edilmesiyle yerel zaman adımı kaymaları vektörü bulunmakta b) bu vektörün zaman adımı eksenine göre eğimi elde edilmekte c) elde edilen bu eğim doku sabiti ile çarpılarak yerel noktalardaki sıcaklık tahmini gerçekleştirilmektedir.

### Sinyal üzerinde zaman kayması bulunması

Çalışmada seyrek yansıtıcı modeli kullanılmasından ötürü, tekil yansıtıcılardan gelen her bir geri dönüş atımı sinyalde ayırt edilebilir olarak gözükmemektedir. Bu durumda, n. yansıtıcı dolayısıyla oluşan dalga formu, derinlik ekseninde n. atıma denk gelmektedir, (Şekil 7). Yansıtıcılara ait bu bölgeler sinyal üzerinde tespit edilmiştir ve algoritmalar sinyallerdeki bu bölgeler üzerinde ayrı ayrı çalıştırılarak zaman kayması vektörleri elde edilmiştir.



Şekil 7. Yansıtıcılar ve sinyal

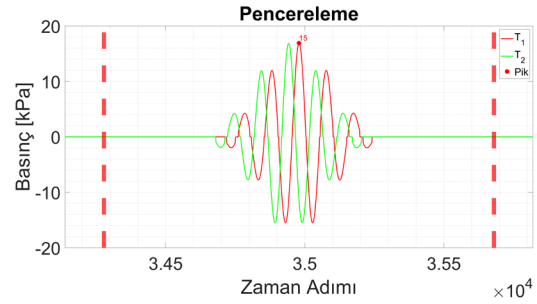
Birinci sıcaklık dağılımına ait dönüş sinyali referans durum olarak kabul edilmiştir. Referans sinyali üzerindeki yerel maksimum pikler MATLAB üzerindeki “findpeak” komutu ile tespit edilmiştir ve bu piklerin koordinatları her bir tekil yansıtıcı ile ilişkilendirilmiştir, (Şekil 8).



Şekil 8. Yansıtıcılar ve ait oldukları pikler

T1 ve T2 sıcaklık durumuna ait sinyaller üzerinde, her bir yansıtıcı koordinatının merkezinde olduğu 2 atım sinyali

süresi genişliğinde pencereler açılmıştır, (Şekil 9). Açılan pencereler üzerinde, her bir yansıtıcı için ayrı ayrı olarak çapraz korelasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Bir pik etrafına açılan çapraz korelasyon penceresi

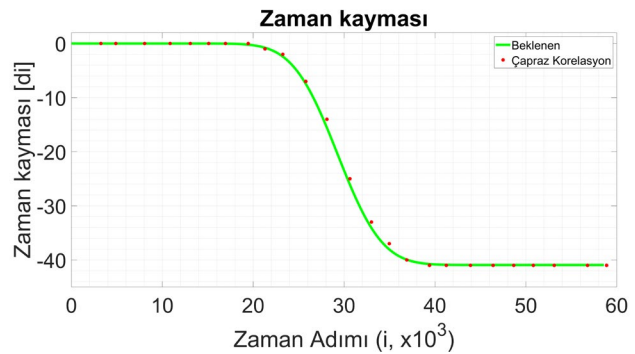
Çapraz korelasyon işlemi iki farklı sinyalin benzerliklerini tespit etmekte kullanılan bir sinyal analiz yöntemidir. Reel sayılardan oluşan iki sinyal için; referans sinyal sabit olmak üzere, benzerlik tespiti yapılacak ikinci sinyal  $-\infty$ ’dan  $+\infty$ ’a doğru referans sinyalin üzerinde kaydırılmaktadır. Her kaydırma adımında iki sinyal penceresi, nokta çarpımına sokulmakta ve sonucu “Çapraz Korelasyon Katsayısı” olarak ilgili kaydırma adımına yazılmaktadır. Her bir  $\tau$  kaydırma için çapraz korelasyon katsayısı Denklem 14’te verilmiştir, [29].

$$R_{CK}(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} s_1(t) \cdot s_2(t + \tau) dt \quad (14)$$

Burada  $s_1$  ve  $s_2$  çapraz korelasyonun gerçekleştirileceği sinyallerdir.  $-\infty$ ’dan  $+\infty$ ’a veya kapalı bir aralıktaki  $\tau$  değerleri ile yapılan çapraz korelasyon sonucunda  $R_{CK}$  vektörü elde edilir. Bu vektördeki maksimum değer  $\tau$  indisi “ $\tau_{kayma}$ ” ilgili yansıtıcı için zaman kaymasına,  $\delta(i)$ , eşit olmaktadır. (Denklem 15).

$$\tau_{kayma} = \operatorname{argmax} R_{CK} \quad (15)$$

Tüm yansıtıcı bölgeler için bu çapraz korelasyon yöntemi uygulanmış ve  $\delta i$  zaman kayması vektörü elde edilmiştir. MATLAB üzerinde çapraz korelasyon “xcorr” fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çapraz korelasyon grafiği Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Çapraz korelasyon ile elde edilen zaman kaymaları



### Zaman kayması grafiğinin zaman eksenine göre eğiminin bulunması

Bu bölümde sinyal üzerinden elde edilen zaman kaymaları vektörleri üzerinde eksene eğimler elde edilmiştir.  $\Delta\delta i/\Delta i$  terimini elde etmek için a) iki noktalı geri fark şeması, b) parçalı doğru uydurma olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır.

İki noktalı geri fark: Eğimin iki noktalı geri fark yöntemi ile hesaplanması Denklem 16'da verilmiştir.

$$\frac{\Delta\delta i[n]}{\Delta i} = \frac{\delta i[n] - \delta i[n-1]}{i[n] - i[n-1]} \quad (16)$$

Parçalı doğru uydurma: Parçalı doğru uydurma yönteminde, zaman kayması vektörü üzerinde bir pencere açılmış ve pencere içindeki değerler kullanılarak doğrusal bir eğri uydurulmuştur. Bu doğrunun eğimi  $\Delta\delta i/\Delta i$  değeri olarak alınmaktadır. Çalışmada seyrek yansıtıcı modeli kullanıldığından ötürü, parçalı doğru uydurmada önce MATLAB üzerinde "pchip" fonksiyonu ile interpolasyon uygulanmıştır. İnterpole edilmiş zaman kayması vektöründe, sinyal üzerinde bulunan piklerin koordinat değerleri etrafında 7 periyot genişliğinde pencere açılmıştır. Bu pencere içerisindeki zaman kaymaları değerleri kullanılarak MATLAB "polyfit" komutu ile doğru uydurma gerçekleştirilmiştir. Bulunan doğrunun eğimi,  $\Delta\delta i/\Delta i$  olarak kaydedilmiştir.

### Sıcaklık tahminlemesinin yapılması

Geri fark ve parçalı doğru uydurma yöntemleri kullanılarak iki farklı  $\Delta\delta i/\Delta i$  vektörü elde edilmiş ve  $\Delta\delta i/\Delta i$  değerlerinin öncül olarak bilinen doku sabiti  $k_{doku}$  ile çarpılması ile sıcaklık tahmini gerçekleştirilmiştir. Doku sabitinin hesaplanmasında, doğrusal ısıl genişleme katsayısı 0 olarak alınmıştır. Ses hızı ve ses hızının sıcaklığa bağlı değişiminde dokunun ortalama değeri alınmış ve  $\beta$  terimi Denklem 9 kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

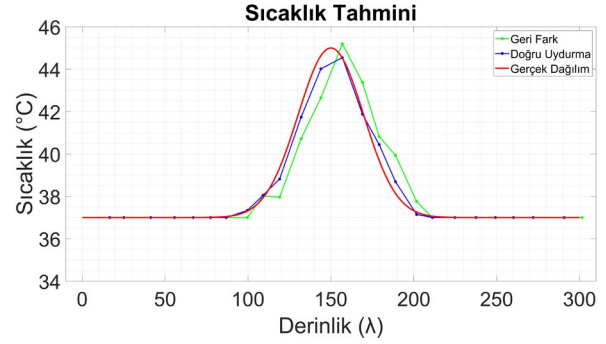
$$\beta = \frac{1}{1577,38 \left[ \frac{m}{s} \right]} 0,8375 \left[ \frac{m}{s \cdot K} \right] \quad (17)$$

$$= 5,3094 \times 10^{-4} \left[ \frac{1}{K} \right]$$

$\alpha$  ve  $\beta$  terimlerinin Denklem 11'de yerine konulmasıyla  $k_{doku}$  sabiti aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$k_{doku} = \left( \frac{1}{0 - 5,3094 \times 10^{-4} \left[ \frac{1}{K} \right]} \right) = -1883,44K \quad (18)$$

Elde edilen  $k_{doku}$  katsayısı ile zaman kaymasının zaman eksenine göre eğimleri çarpılmış ve sıcaklık tahminlemesi gerçekleştirilmiştir, (Şekil 11).



Şekil 11. Sıcaklık tahminlemesi

Geri fark şeması ile elde edilen sıcaklık tahmini, gerçek sıcaklık profilini yaklaşık 5-10λ kadar derinlik eksenindeki kayma ile takip etmektedir. Parçalı doğru uydurma yönteminde bu fark daha az olmakla beraber iki yöntem de tanımlanan Gaussian profile benzer bir sıcaklık değişim profili göstermektedir. Tablo 2'de geri fark ve parçalı doğru uydurma yöntemiyle yapılan sıcaklık tahminleri verilmiş ve beklenen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır. Geri fark şemasında maksimum sapma 1,99°C parçalı doğru uydurmada maksimum sapma 0,75°C olarak tespit edilmiştir.

Tablo 2. Sıcaklık tahminleri

Nokta	Geri fark ile hesaplanan sıcaklık, °C	Parçalı doğru uydurma ile hesaplanan sıcaklık, °C	Tanımlanan sıcaklık, °C
1	37,00	37,00	37,00
2	37,00	37,00	37,00
3	37,00	37,00	37,00
4	37,00	37,00	37,00
5	37,00	37,00	37,00
6	37,00	37,00	37,01
7	37,00	37,00	37,05
8	37,00	37,34	37,31
9	38,02	38,05	37,94
10	37,96	38,82	39,35
11	40,72	41,74	42,29
12	42,65	44,02	44,64
13	45,19	44,55	44,52
14	43,38	41,87	42,02
15	40,82	40,44	39,69
16	39,94	38,69	38,14
17	37,76	37,15	37,26
18	37,00	37,00	37,07
19	37,00	37,00	37,01
20	37,00	37,00	37,00
21	37,00	37,00	37,00
22	37,00	37,00	37,00
23	37,00	37,00	37,00
24	37,00	37,00	37,00

### Değerlendirme

Çalışmada literatürde mevcut olan sıcaklık tahmin algoritması örnek bir tek boyutlu doku sanal fantomu üzerinde adım adım uygulanmıştır. Fantom modeli olarak seyrek dağıtılmış çoklu saçıcılar kullanılmış ve bu saçıcıların ses hızı değerleri doku ses hızı değerinden hafifçe düşük

seçilmiştir. MATLAB üzerinde k-Wave paket programı ile simülasyon gerçekleştirilmiş ve elde edilen sinyaller üzerinde sıcaklık tahmin algoritması gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık tahminlemesinde kullanılan zaman kaymasının zaman eksenine göre eğimleri geri fark ve parçalı doğru uydurma yöntemleri ile elde edilmiş ve bu iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemle elde edilen tahminlerin Gaussian profile uygun bir biçimde dokudaki sıcaklık artış merkezi etrafında oluştuğu görülmüştür. Geri fark yönteminde, sıcaklık profilinin gerçek profilden derinlik ekseninde bir sapma ile gerçekleştiği, parçalı doğru uydurmadaki derinlik eksenindeki sapmanın daha düşük olduğu görülmüştür. Geri fark yönteminde hesaplanan sıcaklık değerindeki maksimum sapmanın 1,99°C, doğru uydurma yöntemindeki maksimum sapmanın 0,75°C olduğu görülmüştür.

Parçalı doğru uydurma ile yerel bir noktadaki sıcaklık artışını hesaplarken daha fazla veri kullanıldığından dolayı gerçek profile yakın olması beklenen bir sonuçtur. İnterpole edilmiş zaman kayması vektörü üzerinde gerçekleştirilecek bir yumuşatma ile Gaussian profile daha uygun yumuşak bir sıcaklık dağılımı alınması mümkündür ancak sıcaklık artış verilerinin ham halleri ile ilgilenildiğinden bu yumuşatma uygulaması gerçekleştirilmemiştir. Doku içerisindeki odaklamalı ısıtma uygulamalarında, ilgilenilen bölgede ne derece sıcaklık artışının gerçekleştirildiğini tespit etmek amaçlanmaktadır. Bu ölçüt dahilinde algoritmaya uygun bir yumuşatma filtresi eklenerek artış bölgesindeki toplam ısı doz belirlenebilir.

Bu çalışmada ultrasonik sinyallerde görülen gürültüler sınırlı olarak simülasyona dahil edilmiştir. Akustik doğasından ötürü meydana gelen benek gürültü etkisi çalışmanın kapsamına alınmamış ve var olabilecek etkilerin en aza indirilmesi amaçlanarak seyrek saçıcı modeli oluşturulmuştur. Böylelikle bir saçıcıdan dönen sinyalin üzerinde oluşabilecek, diğer saçıcılardan kaynaklanan çoklu yansımalar elenmiştir. İleride yapılacak 2B çalışmalarda daha sık bir saçıcı modeli oluşturulması ve benek etkilerin sıcaklık ölçümüne etkisinin incelenmesi planlanmaktadır. Bu çalışmada temel bir akustik sanal fantomun oluşturulması ve sıcaklık tahmin modelinin bu fantom üzerinde sınanarak temel değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Gürültünün mevcut yöntemin sıcaklık ölçüm kriterleri üzerindeki etkisi iki boyutlu saçıcı ortamlar üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlarda incelenecektir.

Çalışma temel düzeyde bir boyutlu simülasyon üzerinde mevcut yöntemin kriterlerini ve ölçme yetkinliğini tespit etmek için gerçekleştirilmiştir. Simülasyon yöntemi geriye dönüş sinyallerini saçıcı bölgelerdeki ani empedans değişiminden kaynaklanan bir boyutlu düzlem dalga şeklinde oluşturmaktadır. Aynı şekilde dalga kaynağı da bir boyutlu doğadan ötürü düzlemsel dalga üretmektedir. Gerçek bir dokuda hem dalga hem de geri dönüş sinyalleri küresel yayılım ilkelerine bağlı olarak oluşacaktır ve saçılım etkileri çok boyutlu ortamda görülmeye başlanacaktır. Bir boyutlu modelde yalnızca gerisin geriye yansıma etkileri gözlemlenmektedir. İki ve üç boyutlu simülasyonlarda ve deneysel sonuçlarda akustik saçılma özelliği benek etkilerine yol açacak ve bu etkiler herhangi bir derinlikten gelen sinyalin geri dönüş zamanlarında sapmaya neden

olacaktır. Bu etkiler ileriki çalışmalarda iki boyutlu simülasyon ile tekrarlanacak yeni ölçümlerde incelenecektir.

Çalışmada akustik soğurma etkisi, geri dönüş sinyallerini gerçek bir dokudan alınan sinyallerde olduğu gibi derinlikle azalan bir şekilde elde etmek için modele eklenmiştir. Elde edilen sinyaller üzerinde bir kazanç uygulaması yapılarak soğurma nedeniyle gerçekleşen zayıflamaların karşılanması amaçlanmıştır. Yöntemde iki farklı sıcaklık dağılımına ait sinyallerde, bir merkez etrafında pencere açılmış ve pencere içindeki sinyal parçacıkları çapraz korelasyona sokularak en yüksek benzerliğin olduğu değer tespit edilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda 7 periyotluk bir geri dönüş sinyalinde sinyalin sonu ile başı arasındaki kazanç katsayısı oranı binde 4,4 olarak hesaplanmış ve yapılan sıcaklık tahminlerinin aynı olduğu görülmüştür. Akustik soğurma etkileri ve kazanç uygulamasının çok boyutlu simülasyonlarda ve gerçek ortam deneylerinde sonuca etki edebileceği öngörülmektedir. Bu çalışmalarda akustik saçılma doğası ile birlikte daha uzun mesafe kat eden dalgalar önemli derecede zayıflayacak ya da tamamen soğurulacaktır. Bu etkiler ileride yapılacak çok boyutlu çalışmalarda incelenecektir.

İleriki çalışmalarda 2B modelleme yapılarak kriterlerin çok boyutlu ortamda saçılmalar olması durumundaki geçerliliği araştırılacaktır. Böylelikle gerçeğe daha yakın bir sıcaklık artış tahminlemesinin yapılması beklenmektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazar Mustafa Uyğun, YÖK 100/2000 Programı doktora bursiyeri olarak Yüksek Öğretim Kurumu'na teşekkürlerini sunar.

## ETİK STANDARTLARI BEYANI

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

## YAZARLARIN KATKILARI

**Mustafa Uyğun:** Deneyleri yapmış, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**M. Serhan Küçükca:** Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Dewhirst, M.W., Abraham, J. ve Viglianti, B. "Evolution of Thermal Dosimetry for Application of Hyperthermia to Treat Cancer". *Advances in Heat Transfer*, 47: 397–421. (2015)
- [2] Chu, K.F. ve Dupuy, D.E. "Thermal ablation of tumours: Biological mechanisms and advances in therapy". *Nature Reviews Cancer*, 14(3): 199–208. (2014)
- [3] Smith, S. ve Gillams, A. "Imaging appearances following thermal ablation". *Clinical Radiology*, 63(1): 1–11. (2008)



- [4] Lee, F.-F., He, Q., Gao, J., Pan, A., Sun, S., Liang, X. vd. "Evaluating HIFU-mediated local drug release using thermal strain imaging: Phantom and preliminary in-vivo studies". *Medical Physics*, 46(9): 3864–76. (2019)
- [5] Rieke, V. ve Pauly, K.B. "MR thermometry". *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 27(2): 376–90. (2008)
- [6] Blackwell, J., Krašny, M.J., O'Brien, A., Ashkan, K., Galligan, J., Destrade, M. vd. "Proton Resonance Frequency Shift Thermometry: A Review of Modern Clinical Practices". *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 55(2): 389–403. (2022)
- [7] Lewis, M.A., Staruch, R.M. ve Chopra, R. "Thermometry and ablation monitoring with ultrasound". *International Journal of Hyperthermia*, 31(2): 163–81. (2015)
- [8] Maass-Moreno, R., Damianou, C.A. ve Sanghvi, N.T. "Tissue temperature estimation in-vivo with pulse-echo". *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, Seattle. p. 1225–9. (1995)
- [9] Simon, C., Vanbaren, P. ve Ebbini, E.S. "Two-dimensional temperature estimation using diagnostic ultrasound". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 45(4): 1088–99. (1998)
- [10] Anand, A., Savéry, D. ve Hall, C. "Three-dimensional spatial and temporal temperature imaging in gel phantoms using backscattered ultrasound". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54(1): 23–30. (2007)
- [11] Sakakibara, R., Shindo, Y., Kato, K., Choi, P.K. ve Takeuchi, A. "Basic study of 3-D non-invasive measurement of temperature distribution using ultrasound images during HIFU heating". *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 5(6): 1306–11. (2020)
- [12] Liu, D. ve Ebbini, E.S. "Real-time 2-D temperature imaging using ultrasound". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(1): 12–6. (2010)
- [13] Varghese, T., Zagzebski, J.A., Chen, Q., Techavipoo, U., Frank, G., Johnson, C. vd. "Ultrasound monitoring of temperature change during radiofrequency ablation: Preliminary in-vivo results". *Ultrasound in Medicine and Biology*, 28(3): 321–9. (2002)
- [14] Chiang, H.K., Liao, C.-K., Chou, Y.-H., Pan, T.-T. ve Pan, S.-C. "In-vitro ultrasound temperature monitoring in bovine liver during RF ablation therapy using autocorrelation". *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, Münih. p. 1439–42. (2002)
- [15] Bayat, M. "Non-Invasive In Vivo Ultrasound Temperature Estimation", *Doktora Tezi*, The Faculty Of The Graduate School Of The University Of Minnesota. [Minneapolis]. (2014)
- [16] Park, S., Hwang, J., Park, J.-E., Ahn, Y.-C. ve Kang, H.W. "Application of Ultrasound Thermal Imaging for Monitoring Laser Ablation in Ex Vivo Cardiac Tissue". *Lasers in Surgery and Medicine*, 52(3): 218–27. (2020)
- [17] Foiret, J. ve Ferrara, K. "Advances in thermal strain imaging: 3D motion and tumor validation studies". *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS 2015*, Taipei. p. 1–4. (2015)
- [18] Nguyen, M.M., Ding, X., Leers, S.A. ve Kim, K. "Multi-Focus Beamforming for Thermal Strain Imaging Using a Single Ultrasound Linear Array Transducer". *Ultrasound in Medicine and Biology*, 43(6): 1263–74. (2017)
- [19] Shah, J., Thomsen, S., Milner, T.E. ve Emelianov, S.Y. "Ultrasound guidance and monitoring of laser-based fat removal". *Lasers in Surgery and Medicine*, 40(10): 680–7. (2008)
- [20] Yin, C., Wang, G., Yang, K., Tu, J., Guo, X. ve Zhang, D. "Thermal strain imaging in vivo using interpolated IQ-images". *Ultrasonics*, 110: 106292. (2021)
- [21] Arthur, R.M., Straube, W.L., Starman, J.D. ve Moros, E.G. "Noninvasive temperature estimation based on the energy of backscattered ultrasound". *Medical Physics*, 30(6): 1021–9. (2003)
- [22] Maraghechi, B., Kolios, M.C. ve Tavakkoli, J. "Feasibility of detecting change in backscattered energy of acoustic harmonics in locally heated tissues". *International Journal of Hyperthermia*, 36(1): 964–74. (2019)
- [23] Shaswary, E., Assi, H., Yang, C., Kumaradas, J.C., Kolios, M.C., Peyman, G. vd. "Noninvasive calibrated tissue temperature estimation using backscattered energy of acoustic harmonics". *Ultrasonics*, 114: 106406. (2021)
- [24] Shah, J., Park, S., Aglyamov, S., Larson, T., Ma, L., Sokolov, K. vd. "Photoacoustic imaging and temperature measurement for photothermal cancer therapy". *Journal of Biomedical Optics*, 13(3): 034024. (2008)
- [25] MATLAB. "R2020a". *The MathWorks Inc.*, Natick, Massachusetts. (2020)
- [26] Duck, F.A. "Physical properties of tissue: A comprehensive reference book". *Academic Press Inc*, ISBN 0-12-222800-6, Cambridge. (1990)
- [27] Treeby, B.E., Budisky, J., Wise, E.S., Jaros, J. ve Cox, B.T. "Rapid calculation of acoustic fields from arbitrary continuous-wave sources". *Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1): 529–37. (2018)
- [28] k -Wave. "A MATLAB toolbox for the time-domain simulation of acoustic wave fields". <http://k-wave.org>.
- [29] Viola, F. ve Walker, W.F. "A comparison of the performance of time-delay estimators in medical ultrasound". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50(4): 392–401. (2003)



# A numerical and theoretical investigation into torsional buckling of composite driveshaft incorporating carbon nanotube

Hamza TAŞ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Manisa Celal Bayar University, Mechanical Engineering Department, hamza.tas36@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-6527-338X

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 2 August 2023  
Received in revised form 11 December 2023  
Accepted 12 December 2023  
Available online 31 December 2023

### Keywords:

Carbon nanotube, torsional buckling, micromechanical model, driveshaft, finite element analysis, laminated composite

Doi: 10.24012/dumf.1336638

\* Corresponding author

## ABSTRACT

Composite driveshafts have emerged as a potent substitute for traditional driveshafts because of their excellent strength-to-weight and stiffness-to-weight ratios. At the same time, usage of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) as a reinforcement has gained a great momentum due to their superb mechanical, electrical, and thermal characteristics. In this work, a micromechanical model combining the rule of mixtures and the Halpin-Tsai (H-T) model was used to calculate elastic constants of MWCNTs-added carbon fiber reinforced epoxy resin. This micromechanical model considers the effect of agglomeration, aspect ratio, waviness, and random orientation of MWCNTs. Elastic constants of MWCNTs/epoxy resin calculated by using micromechanical model was compared by experimental results available in the literature. Moreover, finite element analysis (FEA) was carried out to predict the critical torsional buckling load of composite driveshafts for various MWCNTs concentrations and fiber orientation angles. The FEA results were compared with the results obtained theoretically. The results showed that Young's modulus of MWCNTs/epoxy resin calculated by using the micromechanical model follows the experimental findings. When compared to pure carbon fiber-reinforced epoxy resin,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ , and  $G_{23}$  (elastic constants of composite lamina) showed improvements of 0.66%, 27.80%, 49.02%, and 37.50%, respectively, in the case of 10vol.% MWCNTs addition. The ply orientation angle has a more dominant effect on  $T_{cr}$  than the MWCNTs concentration.

## Introduction

Fiber-reinforced polymer (FRP) composites become more and more popular in automotive, aerospace, military, construction, and other industries due to their superior specific strength and stiffness compared to many traditional materials such as steel and aluminium [1]–[4]. Particularly in the automotive industry, composite materials have a wide range of applications. According to Ref. [5], by 2024, the automotive sector is predicted to be one of the top users of composite materials, with yearly consumption expected to exceed \$15.5 billion.

The driveshaft one of the most critical parts of an automobile serves as the link between the engine and the axles and is responsible for transmitting the high torques that are applied to the wheels [6]–[10]. Conventional driveshafts commonly made of steel have a low cost of production and great fabricability but are massy. Since weight has a significant impact on automobile performance, it is practical to improve it by replacing traditional heavy drive shafts with composite ones. Weight savings ranging from 24% to 80% have been recorded by researchers [7], [11]–[13] when employing FRP composite driveshafts in place of steel driveshafts.

The design of a driveshaft is carried out based on the design specifications such as buckling torque capability, torque transmission capability, natural bending frequency, weight, and speed. A composite drive shaft was designed by Rangaswamy and Vijayarangan [14] using genetic algorithms for E-glass/epoxy and HM-carbon/epoxy composites with the goal of minimizing shaft weight while still meeting requirements for torsional buckling strength, torque transmission, and natural bending frequency. Kannan et al. [6] investigated the effect of stacking sequence and fiber orientation angles on the natural frequency, torsional stiffness, and buckling strength of a composite driveshaft. When compared to a typical steel shaft, composite materials led a significant weight reduction. The findings also showed that the torsional characteristics of the composite shafts are significantly influenced by the fiber orientation angle. Modelling and analysis of composite drive shafts for several ply angles and layer counts were performed and so the safest design criterion was determined by Altin et al. [7]. The numerical results showed that the 10-layer model with a winding angle of +/- 45 degrees has the lowest cost regarding strength. Gülşah [15] studied the torsional buckling behaviour of thin-walled rectangular cross-sectional composite tubes. Effects of tube length, cross section, and ply angle on the

critical torsional buckling load were investigated. The results revealed that critical torsional buckling load occurs between the ply angle of 20° and 40°. Critical buckling load increased with the decrease of tube length, but its impact is not as great as that of ply angle and edge rate. Rastogi [16] reported a study presenting a thorough method for designing driveshafts using automotive applications. Preliminary design tools meeting performance requirements such as critical speed, torsional strength, torsional buckling strength, and torsional fatigue for composite driveshafts were developed using closed-form analytical solutions and validated through in-depth finite element analyses. Shokrieh et al. [17] studied the torsional buckling behaviour of the composite driveshaft. Influences of ply angle, stacking sequence, and boundary conditions on the torsional buckling load were also examined. The findings demonstrated that the torsional buckling load is significantly influenced by fiber orientation and stacking sequence. They also concluded that finite element modelling enables a highly accurate prediction of the buckling torque.

The excellent electrical, mechanical, and thermal characteristics of carbon nanotubes (CNTs) have led to their recent consideration as potential nanoscale additives for polymer composites. Since CNTs have an elastic modulus and tensile strength in the range of 50-100 GPa and 1.4 TPa, respectively, introducing CNTs to polymers results in an increase of mechanical properties of polymers [18]. Schadler et al. [19] reported a 20% increase in tensile modulus and a 24% increase in compression modulus. Allaoui et al. [20] concluded that in comparison to pure resin matrix, the elasticity modulus and yield strength for composites containing 1 and 4 wt% carbon nanotubes, respectively, have increased by 2 and 4 times. Tai et al. [21] indicated 97.0% and 49.8% improvement in tensile strength and tensile modulus, respectively, when 3 wt% CNTs were added into the phenolic. Jain et al. [22] investigated the reinforcement effect of carbon fiber-epoxy (CF-EP) composites with CNTs and indicated that the ultimate tensile strength and interlaminar shear strength of CF-EP are increased by 17% and 28%, respectively, by the addition of 0.3 wt% CNTs.

To estimate the effects of CNT incorporation on the mechanical characteristics of the polymers, several micromechanical models have been suggested. In order to predict the elastic modulus of CNT-reinforced polymer nanocomposites Hassanzadeh-Aghdam et al. [23] constructed a micromechanical model that takes into account a number of significant parameters, such as the random orientation and distribution of wavy CNTs, the directional behaviour of CNTs, and the CNT/polymer interphase. Fisher et al. [24] created a model integrating finite element findings and micromechanical models to determine the effective modulus of wavy CNTs-reinforced polymer. Anumandla and Gibson [25] proposed a micromechanics model considering the curvature, length, and random arrangement of nanotubes for determining the effective elastic modulus of carbon nanotube-reinforced composites. Thostenson and Chao [26] revised the

micromechanical model utilized for the modelling of short fiber composites to calculate the elastic modulus of the carbon nanotube-reinforced nanocomposite. The outcomes demonstrated that the elastic features of nanocomposites are significantly influenced by nanotube diameter. Seidel and Lagoudas [27] applied the Mori-Tanaka, self-consistent, and composite cylinders micromechanics approaches to calculate the Poisson's ratio, shear modulus, and elasticity modulus of aligned CNTs-reinforced nanocomposites. Pan et al. [28] created a model by exchanging effective fibers with wavy carbon nanotubes so as to investigate the effective elastic modulus of CNT/polymer composites, focusing on CNT waviness and agglomeration. The findings revealed that CNT-reinforced composites' elastic modulus is substantially influenced by agglomeration and waviness.

The main objective of this study is to examine the effects of MWCNT on the critical torsional buckling load of composite driveshafts numerically and theoretically. In this study, elastic constants of MWCNTs-added carbon fiber-reinforced epoxy resin were calculated using a micromechanical model that combines the rule of mixtures and the Halpin-Tsai (H-T) model. The impact of MWCNT aggregation, aspect ratio, waviness, and random orientation is considered by this micromechanical model. Elastic constants of MWCNTs/epoxy resin computed by using a micromechanical model were compared with the published experimental results. The critical torsional buckling load of composite driveshafts is also predicted using finite element analysis (FEA) for different MWCNT concentrations and fiber orientation angles. The results of the FEA were compared to those found theoretically. Additionally, a regression equation was constructed that gives the variation of the critical torsional buckling load of composite driveshaft with the change of ply orientation angle and MWCNT concentration.

## Micromechanical model

### Elastic constants of CNTs-reinforced polymer matrix

Understanding the mechanical behaviour of CNT-reinforced polymer composites under torsional loads requires knowledge of elastic constants such as elasticity modulus, Poisson's ratio, and shear modulus. In this work, the mechanical properties of CNTs-based polymer composites were determined by combining the rule of mixtures and the Halpin-Tsai (H-T) model. This combined model considers the impacts of agglomeration, random orientation, aspect ratio, and waviness of CNTs in the matrix when calculating the mechanical properties of nanocomposite [29]–[31].

The elasticity modulus of the straight-aligned CNTs incorporated polymers ( $E_{m-CNT}$ ) can be predicted by using the following H-T model [29]:

$$E_{C/M} = (E_{CNT/m} - 1)V_{CNT} \quad (1)$$

where  $E_{C/M}$  and  $E_{CNT/m}$  can be calculated by utilizing Equation (2) and (3).

$$E_{C/M} = \frac{E_{m-CNT} - E_m}{E_m} \quad (2)$$

$$E_{CNT/m} = \frac{E_{CNT}}{E_m} \quad (3)$$

In Equations (1), (2), and (3),  $E_m$ ,  $E_{CNT}$ , and  $E_{m-CNT}$  are Young's modulus of polymer matrix, carbon nanotube, and carbon nanotube incorporated polymer matrix, respectively.  $V_{CNT}$  denotes the volume fraction of carbon nanotubes in the polymer matrix.  $E_{CNT/m}$  is the ratio of the Young's modulus of the carbon nanotube to that of the polymer matrix. As already mentioned, Equation (1) can only be used to calculate straight-aligned CNTs reinforced polymers. However, in real-world situations, agglomeration, random orientation, and waviness of the CNTs embedded in the matrix have a significant impact on the mechanical properties. Besides, aspect ratio of CNTs plays an important role in the mechanical characteristics of CNTs-reinforced polymers. Therefore, adding random orientation factor  $\beta_R$ , waviness factor  $\beta_W$ , and length efficiency factor  $\beta_L$  to Equation (1) enables to predict the elasticity modulus of CNT-reinforced polymers with sufficient accuracy. As a result, Equation (1) can be rewritten as

$$E_{C/M} = (\beta_R \beta_W \beta_L E_{CNT/m} - 1) V_{CNT} \quad (4)$$

where random orientation factor  $\beta_R$  is 1/3 and 1/5 for 2-D (in-plane) and 3-D situations, respectively. Length efficiency factor  $\beta_L$  takes a value in the range of 0 and 1 and can be determined by using Equation (5):

$$\beta_L = \frac{\tanh \lambda \tau}{\lambda \tau} \quad (5)$$

in which  $\lambda$  is the aspect ratio of CNT.  $\lambda$  and  $\tau$  parameters can be determined as follows:

$$\lambda = \frac{2l}{d} \quad (6)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{-2}{E_{CNT/m}(1 - v_m) \ln(V_{CNT})}} \quad (7)$$

where  $d$  and  $l$  are the diameter and length of the CNT, respectively.  $v_m$  states the Poisson's ratio of the matrix. Both CNT aspect ratio and volume fraction of CNT in the matrix are crucial for the length efficiency factor. Therefore,  $\beta_L$  approaches one for high aspect ratios and large volume fractions. The waviness factor  $\beta_W$  is equal to one for the straight CNTs, but less than one for wavy CNTs.  $\beta_W$  can be determined by

$$\beta_W = 1 - \frac{a}{w} \quad (8)$$

where  $w$  and  $a$  represent the half-wavelength and amplitude of the curving CNT.

Even though the relationship between the  $E_{m-CNT}$  and  $V_{CNT}$  is linear according to Equation (4), many experimental research [32]–[36] concluded a non-linear relationship between the  $E_{m-CNT}$  and  $V_{CNT}$ . This non-linear relationship is due to the increasing tendency of carbon nanotubes to agglomerate as the CNTs fraction in the matrix rises. Thus, Equation (4) is modified by the addition of the agglomeration factor  $\beta_A$ .

$$E_{C/M} = (\beta_R \beta_W \beta_L E_{CNT/m} - 1) V_{CNT} \beta_A \quad (9)$$

In Equation (9),  $\beta_A$  can be determined by

$$\beta_A = \exp(-\alpha V_{CNT}^\beta) \quad (10)$$

where  $\alpha$  and  $\beta$  parameters are associated with the agglomeration degree of CNTs in the matrix.  $\alpha$  and  $\beta$  parameters are considered as 9 and 0.9, respectively [30].

Given that the CNTs-reinforced polymer matrix behaves in a quasi-isotropic manner, the following equation can be used to determine its shear modulus [4]:

$$G_{m-CNT} = \frac{E_{m-CNT}}{2(v_{m-CNT} + 1)} \quad (11)$$

where Poisson's ratio of CNTs-based polymer matrix ( $v_{m-CNT}$ ) is equal to Poisson's ratio of polymer matrix ( $v_m$ ).

The equation as follows can be used to compute the density of the CNTs-based polymer matrix:

$$\rho_{m-CNT} = \rho_{CNT} V_{CNT} + \rho_m V_m \quad (12)$$

where  $\rho_m$  and  $\rho_{CNT}$  are respectively the densities of polymer matrix and carbon nanotube.  $V_m$  symbolizes the volume fraction of the polymer matrix in the CNTs-added polymer matrix.

### Elastic constants of unidirectional lamina

The elasticity modulus of a unidirectional lamina longitudinal direction,  $E_1$ , density,  $\rho_c$ , and Poisson's ratio,  $v_{12}$ , can be computed by using the mixture rule [37].

$$E_1 = E_f V_f + E_{m-CNT} V_{m-CNT} \quad (13)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_{m-CNT} V_{m-CNT} \quad (14)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_{m-CNT} V_{m-CNT} \quad (15)$$

where  $E_f$ ,  $\rho_f$ , and  $v_f$  denote Young's modulus, density, and Poisson's ratio of fiber, respectively.  $V_f$  is fiber volume fraction in the lamina. In the present study,  $V_f$  and  $V_{m-CNT}$  were taken to be 60% and 40%, respectively. Since using the rule of mixture to calculate the elasticity modulus in the transverse direction,  $E_2$ , Poisson's ratio,  $v_{12}$ , and shear modulus',  $G_{12}$  and  $G_{23}$  don't give sufficiently consistent

results with experimental data, the modified H-T equation can be utilized to compute these elastic constants [38].

$$\frac{P}{P_{m-CNT}} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (16)$$

where  $P_{m-CNT}$  is the corresponding properties of the CNTs-based polymer matrix.  $P$  can be regarded as  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$  and  $G_{23}$ .  $\eta$  is an experimental parameter and can be computed by using the following equation.

$$\eta = \frac{\frac{P_f}{P_{m-CNT}} - 1}{\frac{P_f}{P_{m-CNT}} + \xi} \quad (17)$$

where  $P_f$  and  $P_{m-CNT}$  mean corresponding properties of fiber and CNTs-based polymer matrix. Reinforcing factor  $\xi$  can be chosen as 2 for  $E_2$  calculation and 1 for  $\nu_{23}$ ,  $G_{12}$ , and  $G_{23}$  calculation [37].

**Critical torsional buckling load of composite driveshafts**

Since composite driveshafts are designed as long, thin and hollow structures, they are susceptible to torsional buckling under a torsion load. Critical torsional buckling load,  $T_{cr}$ , for thin-walled orthotropic driveshafts can be determined by [14]

$$T_{cr} = (2\pi r^2 t)(0.272)(E_x E_y^3)^{1/4} \left(\frac{t}{r}\right)^{3/2} \quad (18)$$

where  $E_x$  and  $E_y$  are the elasticity modulus of composite driveshaft in the direction of axial and hoop, respectively.  $t$  and  $r$  state the thickness and mean radius of the composite driveshaft. Equation (18), which is commonly used to design driveshafts, was developed from the equation for an isotropic cylindrical shell.

**Finite element analysis**

The finite element method (FEM), a numerical method, is used to find the approximate solution of partial differential equations. FEM can be used to solve problems in a variety of engineering and mathematical physics fields, such as heat transfer, mass transport, structural analysis, fluid flow, and electromagnetic potential. FEM breaks down a complex system into smaller pieces known as finite elements to solve a problem. FEM generates equations for each finite element and then merges them to get the solution for the entire structure rather than solving the problem for the whole structure in just one step [39].

In this study, a commercially available finite element analysis (FEA) program, ANSYS 22 R2 was used to find the critical torsional buckling loads of composite driveshafts subjected to the torsion load. ANSYS Composite PrepPost (ACP), an integrated tool in the Ansys Workbench environment, was used to model the composite driveshaft. ACP uses the Ansys Mechanical solvers to carry out structural, thermal, and fluid-solid interaction

simulations. ACP enables to create laminated composites defined layer-by-layer [40].

In this study, LY 5052 Epoxy resin, AS4 Carbon fiber, and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were used as matrix material, reinforcing material, and nanofiller. Some material properties of these components are illustrated in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of nanocomposite components

	LY5052 Epoxy resin [30]	AS4 Carbon fiber [41]	MWCNTs [30]		
$E_m$ (GPa)	3.11	$E_{f11}$ (GPa)	225	$E_{CNT}$ (GPa)	900
$G_m$ (GPa)	1.152	$E_{f22}$ (GPa)	15	$L_{CNT}$ (nm)	2000
$\nu_m$	0.35	$G_{f12}$ (GPa)	15	$d_{CNT}$ (nm)	3
$\rho_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.17	$G_{f23}$ (GPa)	7	$\rho_{CNT}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.25
		$\nu_{f12}$	0.20		
		$\nu_{f23}$	0.40		
		$\rho_f$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.79		

The elastic constants of MWCNTs-reinforced LY5052 epoxy resin for the MWCNTs volume fractions of 0.0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10% was determined by Equations (1)-(11). Then, elastic constants of MWCNTs-incorporated AS4 carbon fiber/LY5052 epoxy resin were obtained by using Equations (13)-(17). These elastic constants were used in the FEA.

In the current work, a composite driveshaft with inner and outer diameters of 40 and 44 mm and made of eight laminas with a uniform thickness of 0.25 mm was modelled. The length of the composite driveshaft is 500 mm. A schematic view of the composite driveshaft and its dimensions are illustrated in Fig. 1.

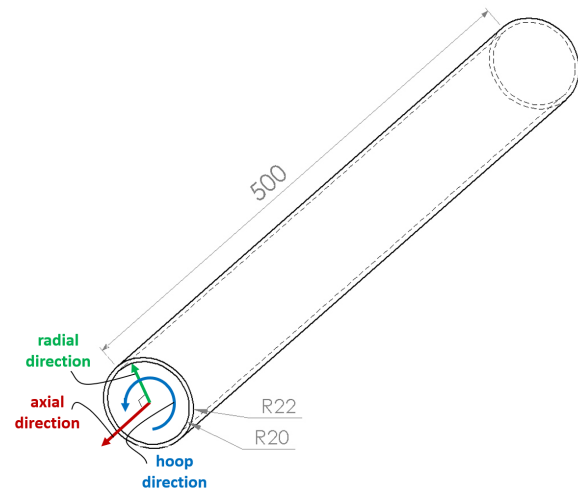


Figure 1. Schematic view of composite driveshaft (Dimensions are in mm)

A two-dimensional surface mesh with 16002 Quad4 elements and 16065 nodes was generated to carry out the torsional buckling analysis. The resulting surface mesh is displayed in Fig. 2.

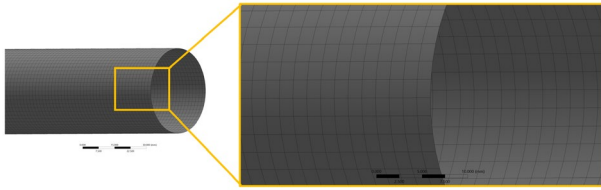


Figure 2. Mesh configuration

In FEA, the composite driveshaft was exposed to torsional load of 1 Nm at one end while being fixed in all directions at the other. Following the static analysis of the composite driveshaft, stress results are recorded to compute the torsional buckling load. Torsional buckling load is calculated by multiplying static torsional load and load multiplier.

## Results and discussion

### Effects of MWCNTs inclusion on the mechanical properties of epoxy resin

The mechanical properties of MWCNTs-reinforced epoxy resin which were theoretically calculated for various volume fractions are presented in Table 2. The inclusion of MWCNTs into the epoxy resin causes a remarkable increase in elasticity modulus, shear modulus, and density. Approximately 17%, 52%, and 72% improvements occur in Young’s modulus and shear modulus in the case of 1.0vol.%, 4.0vol.%, and 10.0vol.% MWCNTs addition. However, density increases only 0.8%, 3.2%, and 8.0% when 1.0vol.%, 4.0vol.%, and 10.0vol.% MWCNTs are added. This means 16%, 47%, and 59% increments in specific elastic and shear moduli for additions of 1.0vol.%, 4.0vol.%, and 10.0vol.% MWCNTs, respectively. Increments in specific elastic and shear moduli are smaller than the increases in elastic and shear moduli due to the non-linear relationship between the elastic/shear modulus and MWCNTs volume fraction, but the linear relationship between the density and MWCNTs volume fraction.

Table 2. Mechanical properties MWCNTs-included epoxy resin

$V_{CNT}$ (vol%)	$E_{m-CNT}$ (GPa)	$G_{m-CNT}$ (GPa)	$\rho_{m-CNT}$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.00	3.110	1.152	1.250
0.25	3.251	1.204	1.253
0.50	3.390	1.255	1.255
1.00	3.649	1.351	1.260
1.50	3.883	1.438	1.265
2.00	4.092	1.516	1.270
3.00	4.445	1.646	1.280
4.00	4.721	1.749	1.290
6.00	5.091	1.886	1.310
8.00	5.280	1.956	1.330
10.00	5.344	1.979	1.350

Fig. 3 shows how the elastic modulus of epoxy resin reinforced with MWCNTs changes as a function of the MWCNTs concentration. In Fig. 3, It is clear that as the MWCNTs volume fraction increases, Young’s modulus increases, but at a decreasing rate due to the agglomeration of MWCNTs. Duan et. al [34] also reported a decrease in Young’s modulus for the MWCNTs concentration greater than 0.6 wt%. Fig. 3 demonstrates a high degree of consistency between the findings of the current study and

those of Omidi et al. [29]. It is obvious that adding factors such as random orientation, waviness, length efficiency, and agglomeration into the H-T model resulted in a good agreement between predictions and experimental findings.

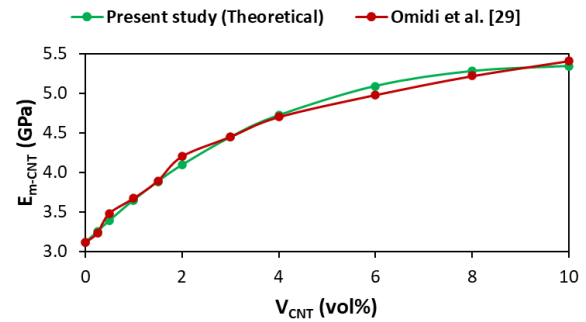


Figure 3. Variation of elasticity modulus of MWCNTs-based epoxy resin with MWCNTs volume fraction ( $\beta_r = 0.2$ ,  $\lambda = \frac{2l}{d}$  where  $l = 2000nm$  and  $d = 30nm$ ,  $v_m = 0.35$ ,  $\beta_w = 0.5$ , and  $\beta_A = \exp(-\alpha V_{CNT}^\beta)$  where  $\alpha = 9$  and  $\beta = 0.9$ )

The effect of the MWCNT waviness on the elastic modulus of MWCNTs-based epoxy resin as a function of MWCNTs concentration is presented in Fig. 4. It is obvious that the waviness of MWCNTs plays a critical role in elastic modulus. As the waviness factor increases, which means straighter MWCNT, Young’s modulus rises. With increasing MWCNT concentrations, this rise becomes more pronounced. Paunikar and Kumar [42] also reported a considerable decrease in effective Young’s modulus even with small waviness. Additionally, predicted results calculated for the waviness factor of 0.5 are in good agreement with the experimental results obtained by Omidi et al. [29].

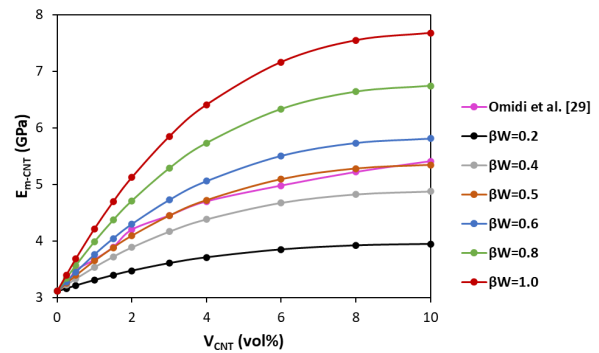


Figure 4. Variation of elasticity modulus of MWCNTs-based epoxy resin with MWCNTs volume fraction depending on the  $\beta_w$  waviness factor fraction ( $\beta_r = 0.2$ ,  $\lambda = \frac{2l}{d}$  where  $l = 2000m$  and  $d = 30nm$ ,  $v_m = 0.35$ , and  $\beta_A = \exp(-\alpha V_{CNT}^\beta)$  where  $\alpha = 9$  and  $\beta = 0.9$ )

Influence of the MWCNT length on Young’s modulus of MWCNTs-reinforced epoxy resin as a function of MWCNTs volume fraction is illustrated in Fig. 5. As it can be seen from Fig. 5, the length of the MWCNT has a significant impact on Young’s modulus of MWCNTs-



reinforced epoxy resin. As the length of the MWCNT rises, the elastic modulus of epoxy resin reinforced with MWCNTs increases. This increase is more pronounced for MWCNTs shorter in length. After a certain length of the MWCNT (approximately 4 μm), further increasing the length of the MWCNT has a negligible effect on the elastic modulus (Fig. 6). A similar trend has also been observed by Aghadavoudi et al. [43].

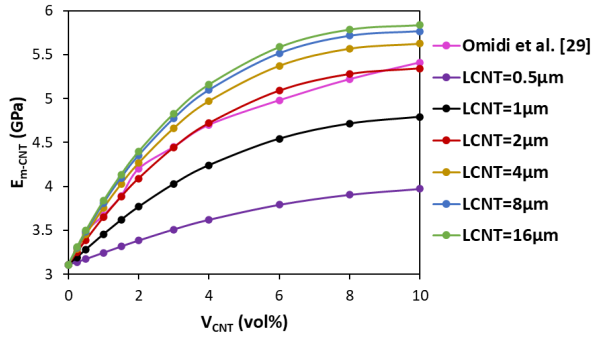


Figure 5. Variation of elasticity modulus of MWCNTs-based epoxy resin with MWCNTs volume fraction depending on the aspect ratio of MWCNTs ( $\beta_r = 0.2$ ,  $\lambda = \frac{2l}{d}$  where  $d = 30nm$ ,  $v_m = 0.35$ ,  $\beta_w = 0.5$ , and  $\beta_A = \exp(-\alpha V_{CNT}^\beta)$  where  $\alpha = 9$  and  $\beta = 0.9$ )

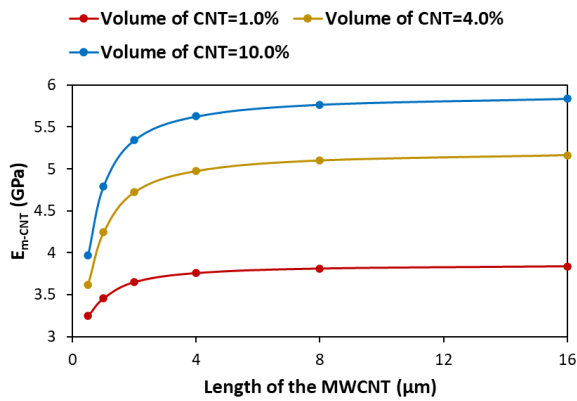
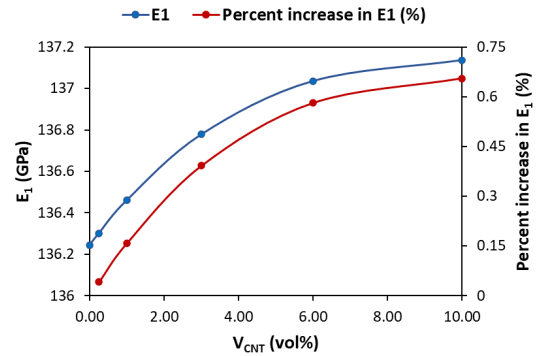


Figure 6. Variation of elasticity modulus of MWCNTs-reinforced epoxy resin with the length of the MWCNT

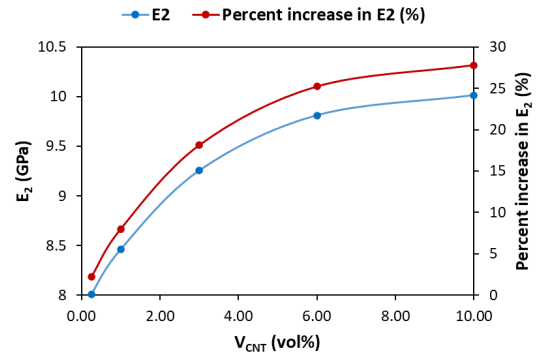
**Elastic constants of MWCNTs-added carbon fiber-reinforced epoxy resin**

The elastic constants of the unidirectional composite lamina for various MWCNTs volume fractions are presented in Table 3. These elastic constants were used as input data for FEA. It is obvious that while MWCNT concentration has a negligible effect on  $E_1$ , it has a considerable impact on  $E_2$ ,  $G_{12}$ , and  $G_{23}$ . Elasticity modulus in the longitudinal direction for unidirectional laminates is dominantly controlled by the continuous fibers rather than MWCNTs. Therefore, the rise in  $E_1$  is negligible when compared to the increase in  $E_2$ ,  $G_{12}$ , and  $G_{23}$  [44]. Compared to pure carbon fiber-reinforced epoxy resin, there is a 0.66%, 27.80%, 49.02%, and 37.50% improvement in  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ , and  $G_{23}$  in the case of 10vol.% MWCNTs inclusion (Fig. 7). Increase in elastic constants declines as the MWCNTs

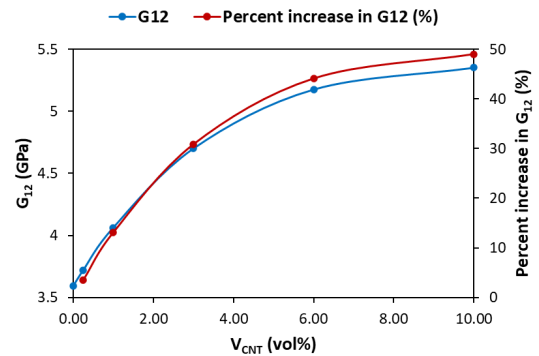
concentration rises because of non-homogeneous dispersion of MWCNTs.



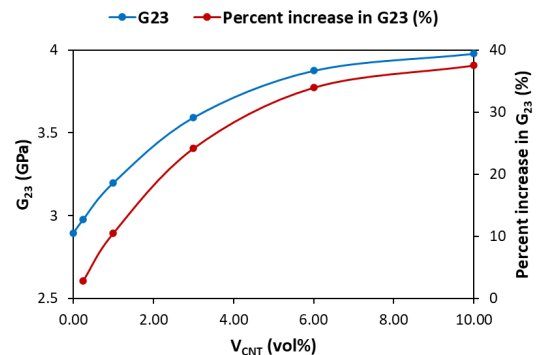
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7. Variation of (a)  $E_1$ , (b)  $E_2$ , (c)  $G_{12}$ , and (d)  $G_{23}$  of unidirectional composite lamina with the MWCNTs volume fraction

Table 3. Variation of elastic constants of the unidirectional composite lamina with MWCNTs concentration

V <sub>CNT</sub> (vol%)	0.00	0.25	1.00	3.00	6.00	10.00
E <sub>1</sub> (GPa)	136.244	136.300	136.460	136.778	137.036	137.137
E <sub>2</sub> (GPa)	7.835	8.008	8.462	9.255	9.811	10.013
G <sub>12</sub> (GPa)	3.592	3.719	4.063	4.701	5.177	5.353
G <sub>23</sub> (GPa)	2.893	2.976	3.197	3.592	3.875	3.978
ν <sub>12</sub>	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260	0.260
ν <sub>23</sub>	0.379	0.379	0.379	0.379	0.379	0.379

**Effect of MWCNTs inclusion on the critical torsional buckling load of composite driveshaft**

The critical torsional buckling load of the composite driveshaft was predicted both numerically and theoretically. Critical torsional buckling load computed by using Equation (18) for various MWCNTs concentrations was compared with those from FEA. The variation of the critical torsional buckling load of composite driveshaft with the change of MWCNTs volume fraction and percentage error (%) between the FEA and theoretical results are presented in Fig. 8. It is clear from Fig. 8 that as the MWCNTs content increases critical torsional buckling load rises. However, after a certain MWCNTs content (6.0vol.%), the effect of MWCNTs on the critical torsional buckling load is negligible. For theoretical and numerical calculations, the 10.0vol.% MWCNT addition to pure lamina results in increases of 20.4% and 26.7%, respectively. For all MWCNT concentrations, the critical torsional buckling load predicted numerically is higher than those calculated theoretically. The highest percentage error is 5.1%, indicating that the theoretical and numerical results are in good agreement. Therefore, the following investigations were carried out by using FEA.

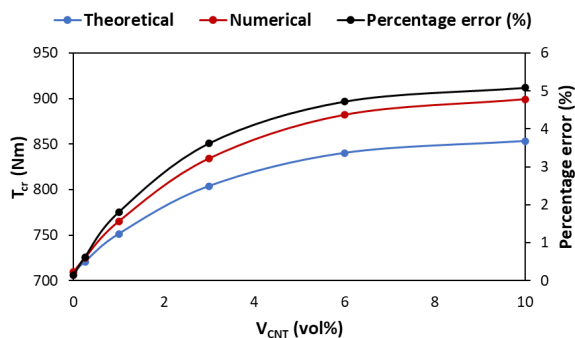


Figure 8. Variation of critical torsional buckling load of [0]<sub>8</sub> composite driveshaft for various MWCNTs concentrations

In this study, the effect of ply orientation angle on the critical torsional buckling load was examined by using FEA. Fig. 9 illustrates the change of critical buckling load for various ply orientation angles. As it can be seen from Fig. 9, the ply orientation angle has a significant influence on the critical torsional buckling load. When compared to 0° ply orientation angle, critical torsional buckling load reduces by 8.7% and 3.9% for 30° and 45° ply orientation

angles, respectively. However, further increasing the ply orientation angle results in a sharp increase in critical buckling load. Critical torsional buckling load increases by 30.9% and 201.9% for 60° and 90° ply orientation angles, respectively, in comparison to 0° ply orientation angle. Badie et al. [45] also reported that 90° ply orientation angle is the best for the peak torsional buckling. The fibers aligned in the hoop direction at this ply orientation angle result in an increasing modulus (E<sub>y</sub>). Since T<sub>cr</sub> is directly proportional to the cube of E<sub>y</sub> according to Equation (18), T<sub>cr</sub> increases as the ply orientation angle increases. The highest value of the buckling torque is reached when the fibers are orientated at 90 degrees since the expression of buckling torque is dominantly related to the elasticity modulus of the composite driveshaft in the hoop direction.

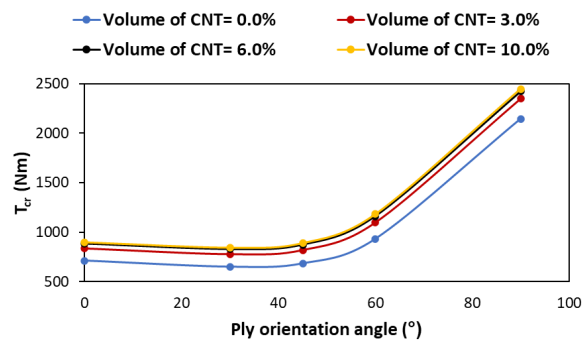


Figure 9. Variation of critical torsional buckling load of composite driveshaft with the change of ply orientation angle

3D surface and contour plots showing the variation of critical torsional buckling load with MWCNTs content and ply orientation angle are illustrated in Fig. 10. According to Fig. 10, the ply orientation angle of continuous carbon fibers dominates the critical torsional buckling load rather than MWCNTs. Furthermore, it is evident that the ply orientation angle has no bearing on the beneficial effects of MWCNTs on T<sub>cr</sub>, excluding the 90° ply orientation angle. Increases in T<sub>cr</sub> are 26.7%, 30.4%, 30.7%, 27.3%, and 14.2% in the case of 10vol.% MWCNTs addition compared to pure lamina for 0°, 30°, 45°, 60°, and 90° ply orientation angle, respectively. At a 90° ply orientation angle, the beneficial effect of MWCNTs on T<sub>cr</sub> decreases.

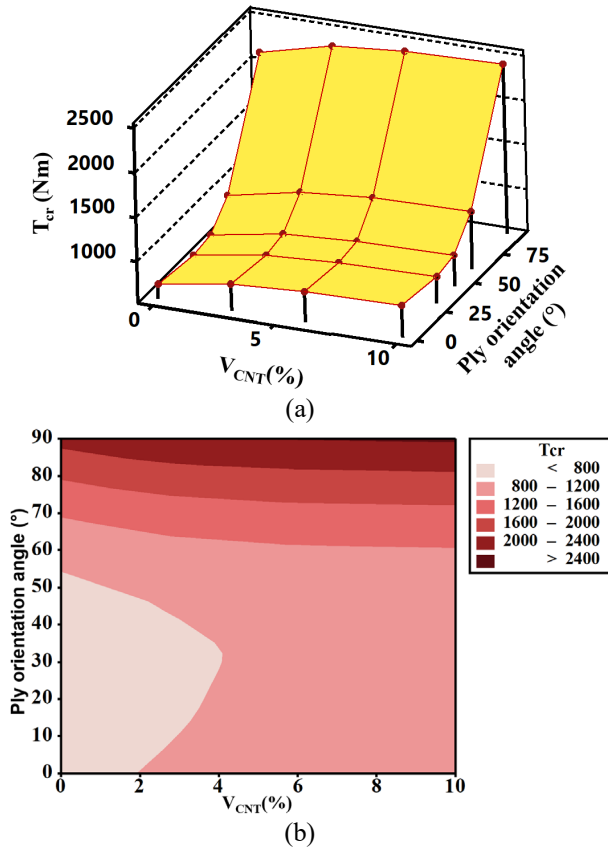


Figure 10. a) 3D surface and b) Contour plot of critical torsional buckling load versus MWCNTs concentration and ply orientation angle

Table 4. Comparison of  $T_{cr}$  values obtained by FEA and by using regression equation

$V_{CNT}$ (vol.%)	$\theta$ (°)	$T_{cr}$ (Nm)-FEA	$T_{cr}$ (Nm)-Reg.Eq	Relative error (%)
0	0	709.87	676.73	-4.67
0	30	648.06	752.88	16.17
0	45	682.18	671.17	-1.61
0	60	929.54	849.39	-8.62
0	90	2143.90	2145.45	0.07
3	0	834.11	804.63	-3.53
3	30	776.03	876.87	12.10
3	45	817.83	804.84	-1.59
3	60	1095.40	1037.80	-5.26
3	90	2347.50	2397.97	2.15
6	0	881.96	839.95	-4.76
6	30	826.75	906.56	9.65
6	45	871.83	835.41	-4.18
6	60	1160.00	1083.89	-6.56
6	90	2421.40	2451.30	1.23
10	0	899.11	887.39	-1.30
10	30	845.11	941.27	11.38
10	45	891.41	864.99	-2.96
10	60	1183.20	1113.13	-5.92
10	90	2447.40	2470.98	0.96

In order to have a better comprehension of the relationship between the critical torsional buckling load, fiber orientation angle, and MWCNTs concentration, a regression equation with the  $R^2 = 99.07$  was constructed as follows:

$$T_{cr} = 743.00 + 50.20V_{CNT} - 17.76\theta - 3.34V_{CNT}^2 + 0.37\theta^2 + 0.126V_{CNT}\theta \quad (19)$$

where  $\theta$  denotes the ply orientation angle. Table 4 shows the  $T_{cr}$  values obtained by FEA and by using Equation (19). It is obvious that this regression equation can accurately predict the  $T_{cr}$  value with an average error of 5.28%.

Fig. 11a, b, c, and d illustrate the effect of MWCNTs volume fraction on the first mode shape of torsional buckling whereas Fig. 11b, e, f, g, and h show the influence of ply orientation angle on the first mode shape of torsional buckling. As shown in Fig. 11, MWCNT concentration has no impact on the first mode shape, but the ply orientation angle significantly alters it. As the ply orientation angle rises, number of circumferential waves increases. Moreover, it is obvious that all composite driveshafts exhibit helical buckling mod.

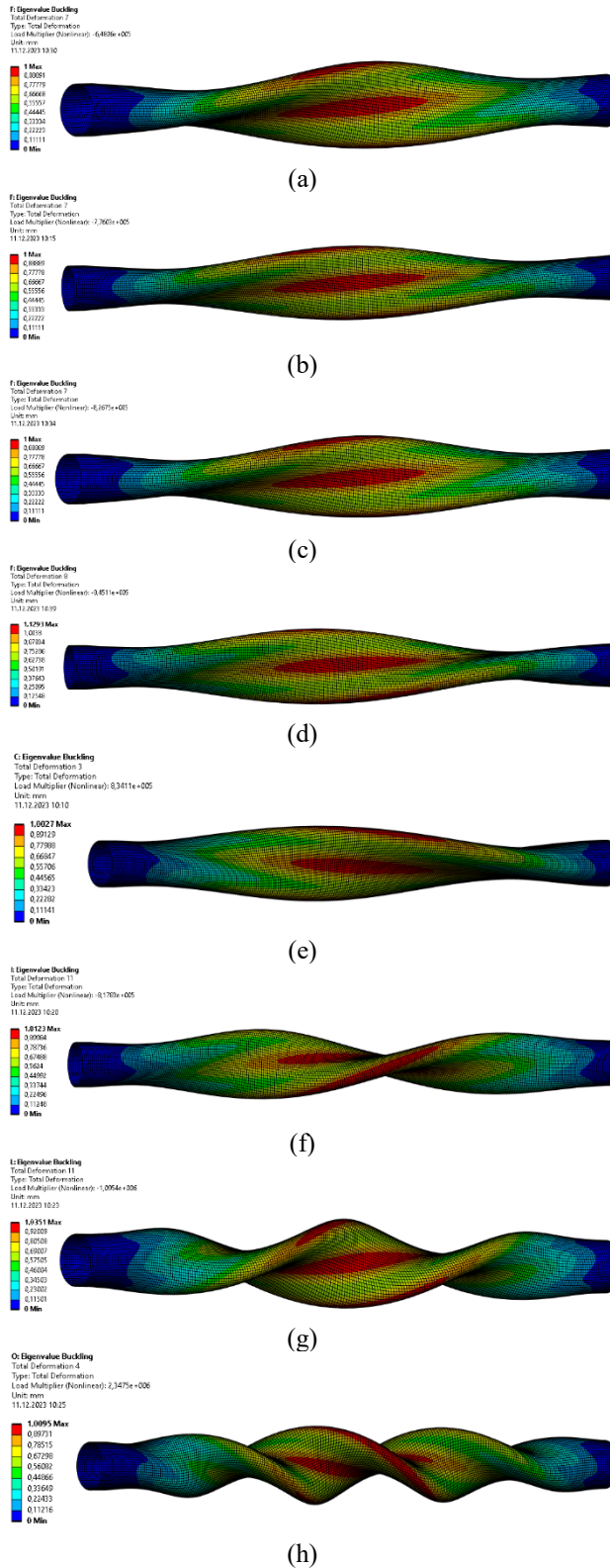


Figure 11. First mode shape of torsional buckling for the composite driveshaft with a)  $V_{CNT} = 0.0vol. \%$  and  $\theta = 30^\circ$  b)  $V_{CNT} = 3.0vol. \%$  and  $\theta = 30^\circ$  c)  $V_{CNT} = 6.0vol. \%$  and  $\theta = 30^\circ$  d)  $V_{CNT} = 10.0vol. \%$  and  $\theta = 30^\circ$  e)  $V_{CNT} = 3.0vol. \%$  and  $\theta = 0^\circ$  f)  $V_{CNT} = 3.0vol. \%$  and  $\theta = 45^\circ$  g)  $V_{CNT} = 3.0vol. \%$  and  $\theta = 60^\circ$  h)  $V_{CNT} = 3.0vol. \%$  and  $\theta = 90^\circ$

## Conclusions

The following conclusions can be made:

- ❖ Introducing MWCNTs into the epoxy resin results in a notable improvement in elasticity modulus, shear modulus, and density. When 1.00%, 4.00%, and 10% MWCNTs are included into epoxy resin, Young's modulus and shear modulus, respectively, improve by around 17%, 52%, and 72%.
- ❖ The waviness and length of the MWCNT have a great influence on Young's modulus of MWCNTs/epoxy resin. Increase of both waviness factor which means straighter MWCNT and length results in a boost of elastic modulus.
- ❖ While MWCNTs concentration has an insignificant impact on the  $E_1$ , it considerably affects the  $E_2$ ,  $G_{12}$ , and  $G_{23}$ .
- ❖ The addition of 10vol.% MWCNT to pure lamina raises  $T_{cr}$  by 20.4% and 26.7%, respectively, according to the theoretical and numerical calculations.
- ❖ Critical torsional buckling load decreases by 8.7% and 3.9% for  $30^\circ$  and  $45^\circ$  ply orientation angles, respectively, when compared to  $0^\circ$  ply orientation angle. But as the ply orientation angle is increased further, the critical buckling load increases dramatically. For  $60^\circ$  and  $90^\circ$  ply orientation angles, respectively, the critical torsional buckling load rises by 30.9% and 201.9% as compared to the  $0^\circ$  ply orientation angle.
- ❖ Except for the  $90^\circ$  ply orientation angle, the ply orientation angle has little to no impact on the favorable effects of MWCNTs on  $T_{cr}$ .
- ❖ All composite driveshafts buckle in a helical mode.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

## Author Contribution

Every section of the paper is prepared by Hamza TAŞ.

## References

[1] H. Taş and I. F. Soykok, "Effects of carbon nanotube inclusion into the carbon fiber reinforced laminated composites on flexural stiffness: A numerical and theoretical study," *Compos. Part B Eng.*, vol. 159, pp. 44–52, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.09.055.

[2] E. M. Soliman, M. P. Sheyka, and M. R. Taha, "Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 47, pp. 39–47, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.03.002.

- [3] J. Galos, "Thin-ply composite laminates: a review," *Compos. Struct.*, vol. 236, p. 111920, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111920.
- [4] S. K. Georgantzinos, P. A. Antoniou, G. I. Giannopoulos, A. Fatsis, and S. I. Markolefas, "Design of Laminated Composite Plates with Carbon Nanotube Inclusions against Buckling: Waviness and Agglomeration Effects," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/nano11092261.
- [5] "Automotive Composites Market Size, Share & Global Forecast Analysis: 2019-2024," Stratview Research, SRTI130, Oct. 2019. Accessed: Jul. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.stratviewresearch.com/581/automotive-composites-market.html>
- [6] R. Kannan, I. D. Lawrence, G. Kaviprakash, and A. Regan, "Design and Analysis of Composite Drive Shaft for Automotive Application," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, pp. 429–436, Aug. 2014.
- [7] B. Altin, A. A. Bekem, and A. Ünal, "Determination of Design Criteria for Composite Drive Shaft in Automobiles," *Politek. Derg.*, pp. 1–1, Dec. 2023, doi: 10.2339/politeknik.1028437.
- [8] S. K. S. Nadeem, G. Giridhara, and H. K. Rangavittal, "A Review on the design and analysis of composite drive shaft," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, Part 3, pp. 2738–2741, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.01.058.
- [9] A. Bolshikh, "Computational and experimental study of the strength of a composite drive shaft," *Transp. Probl.*, vol. 16, no. 1, p. 75, 2021.
- [10] V. Chougule, A. Gupta, and S. Chavan, "Design and Manufacturing of Carbon Fiber Composite Drive Shaft as an Alternative to Conventional Steel Drive Shaft," *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 3, no. 10, pp. 674–683, 2018.
- [11] A. Ravi, "Design, Comparison and Analysis of a Composite Drive Shaft for an Automobile," *Int. Rev. Appl. Eng. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–28, 2014.
- [12] V. S. Bhajantri, S. C. Bajantri, A. M. Shindolkar, and S. S. Amarapure, "DESIGN AND ANALYSIS OF COMPOSITE DRIVE SHAFT," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 738–745, 2014.
- [13] B. Gireesh, S. Shrishail B, and V. N. Satwik, "Finite Element & Experimental Investigation of Composite Torsion Shaft," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 1510–1517, 2013.
- [14] T. Rangaswamy and S. Vijayarangan, "Optimal Sizing and Stacking Sequence of Composite Drive Shafts," vol. 11, Jan. 2005.
- [15] G. ALAR ÖNER, "Torsional Buckling to Thin Walled Composite Tubes," Ph.D. Thesis, Atatürk University, 2009.
- [16] N. Rastogi, "Design of Composite Driveshafts for Automotive Applications," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2004-01-0485, Mar. 2004. doi: 10.4271/2004-01-0485.
- [17] M. M. Shokrieh, A. Hasani, and L. B. Lessard, "Shear buckling of a composite drive shaft under torsion," *Compos. Struct.*, vol. 64, no. 1, pp. 63–69, Apr. 2004, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00214-9.
- [18] S. Saha and S. Bal, "Influence of nanotube content on the mechanical and thermo-mechanical behaviour of –COOH functionalized MWNTs/epoxy composites," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 40, no. 5, pp. 945–956, Sep. 2017, doi: 10.1007/s12034-017-1433-x.
- [19] L. S. Schadler, S. C. Giannaris, and P. M. Ajayan, "Load transfer in carbon nanotube epoxy composites," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 26, pp. 3842–3844, Dec. 1998, doi: 10.1063/1.122911.
- [20] A. Allaoui, S. Bai, H. M. Cheng, and J. B. Bai, "Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 15, pp. 1993–1998, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00129-X.
- [21] N.-H. Tai, M.-K. Yeh, and J.-H. Liu, "Enhancement of the mechanical properties of carbon nanotube/phenolic composites using a carbon nanotube network as the reinforcement," *Carbon*, vol. 42, no. 12–13, pp. 2774–2777, 2004, doi: 10.1016/j.carbon.2004.06.002.
- [22] V. Jain, S. Jaiswal, K. Dasgupta, and D. Lahiri, "Influence of carbon nanotube on interfacial and mechanical behavior of carbon fiber reinforced epoxy laminated composites," *Polym. Compos.*, vol. 43, no. 9, pp. 6344–6354, 2022, doi: 10.1002/pc.26943.
- [23] M. Hassanzadeh-Aghdam, R. Ansari, and A. Darvizeh, "A new micromechanics approach for predicting the elastic response of polymer nanocomposites reinforced with randomly oriented and distributed wavy carbon nanotubes," *J. Compos. Mater.*, vol. 51, no. 20, pp. 2899–2912, Aug. 2017, doi: 10.1177/0021998317712571.
- [24] F. T. Fisher, R. D. Bradshaw, and L. C. Brinson, "Fiber waviness in nanotube-reinforced polymer composites—I: Modulus predictions using effective nanotube properties," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 11, pp. 1689–1703, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00069-1.
- [25] V. Anumandla and R. F. Gibson, "A comprehensive closed form micromechanics model for estimating the elastic modulus of nanotube-reinforced composites," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 12, pp. 2178–2185, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.09.016.
- [26] E. T. Thostenson and T.-W. Chou, "On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 5, p. 573, Feb. 2003, doi: 10.1088/0022-3727/36/5/323.
- [27] G. D. Seidel and D. C. Lagoudas, "Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites," *Mech. Mater.*, vol. 38, no. 8, pp. 884–907, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.mechmat.2005.06.029.
- [28] J. Pan, L. Bian, H. Zhao, and Y. Zhao, "A new micromechanics model and effective elastic modulus of nanotube reinforced composites," *Comput. Mater.*

- Sci.*, vol. 113, pp. 21–26, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.commat.2015.11.009.
- [29] M. Omid, H. Rokni D.T., A. S. Milani, R. J. Seethaler, and R. Arasteh, “Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of mixtures,” *Carbon*, vol. 48, no. 11, pp. 3218–3228, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.carbon.2010.05.007.
- [30] S. K. Georgantzinos, P. Antoniou, S. Markolefas, and G. Giannopoulos, “Finite element predictions on vibrations of laminated composite plates incorporating the random orientation, agglomeration, and waviness of carbon nanotubes,” *Acta Mech.*, vol. 233, no. 5, pp. 2031–2059, May 2022, doi: 10.1007/s00707-022-03179-6.
- [31] M. K. Hassanzadeh-Aghdam and J. Jamali, “A new form of a Halpin–Tsai micromechanical model for characterizing the mechanical properties of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites,” *Bull. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 3, p. 117, Apr. 2019, doi: 10.1007/s12034-019-1784-6.
- [32] M.-K. Yeh, T.-H. Hsieh, and N.-H. Tai, “Fabrication and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes/epoxy nanocomposites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 483–484, pp. 289–292, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2006.09.138.
- [33] S. Kanagaraj, F. R. Varanda, T. V. Zhil'tsova, M. S. A. Oliveira, and J. A. O. Simões, “Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 15, pp. 3071–3077, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2007.04.024.
- [34] K. Duan *et al.*, “A critical role of CNT real volume fraction on nanocomposite modulus,” *Carbon*, vol. 189, pp. 395–403, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.carbon.2021.12.083.
- [35] J. F. Wang, J. P. Yang, L. -h. Tam, and W. Zhang, “Effect of CNT volume fractions on nonlinear vibrations of PMMA/CNT composite plates: A multiscale simulation,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 170, p. 108513, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2021.108513.
- [36] M. Tarfaoui, K. Lafdi, and A. El Moumen, “Mechanical properties of carbon nanotubes based polymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 103, pp. 113–121, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.08.016.
- [37] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition. U.S.: CRC Press, 2006.
- [38] J. C. H. Affdl and J. L. Kardos, “The Halpin-Tsai equations: A review,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 5, pp. 344–352, 1976, doi: 10.1002/pen.760160512.
- [39] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*, Fifth Edition. USA: Cengage Learning, 2011.
- [40] EnginSoft, “Ansys Composite PrepPost: A user-friendly approach to analyze composite material structures.” Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.enginsoft.com/solutions/ansys-composite-prepost.html>
- [41] P. D. Soden, M. J. Hinton, and A. S. Kaddour, “Chapter 2.1 - Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre reinforced composite laminates,” in *Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer Composites*, M. J. Hinton, A. S. Kaddour, and P. D. Soden, Eds., Oxford: Elsevier, 2004, pp. 30–51. doi: 10.1016/B978-008044475-8/50003-2.
- [42] S. Paunekar and S. Kumar, “Effect of CNT waviness on the effective mechanical properties of long and short CNT reinforced composites,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 95, pp. 21–28, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.commat.2014.06.034.
- [43] F. Aghadavoudi, H. Golestanian, and Y. Tadi Beni, “Investigating the effects of CNT aspect ratio and agglomeration on elastic constants of crosslinked polymer nanocomposite using multiscale modeling,” *Polym. Compos.*, vol. 39, no. 12, pp. 4513–4523, 2018, doi: 10.1002/pc.24557.
- [44] M. Garg, S. Sharma, and R. Mehta, “Pristine and amino functionalized carbon nanotubes reinforced glass fiber epoxy composites,” *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 76, pp. 92–101, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.05.012.
- [45] M. A. Badie, E. Mahdi, and A. M. S. Hamouda, “An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1485–1500, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.042.





# Logaritmik İşlem Süreleri Toplamı Tabanlı Öğrenme ve İş Bozulması Etkileri Altında Demontaj Hattı Problemi

## Disassembly Line Balancing Problem Under The Effects of Sum-of-Logarithm-Processing-Time-Based Learning and Job Deterioration

Halime Somtürk<sup>1\*</sup>, Mehmet Duran Toksarı<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, [halime.somturk@gop.edu.tr](mailto:halime.somturk@gop.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7329-495X>

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, [dtoksari@erciyes.edu.tr](mailto:dtoksari@erciyes.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9577-1956>

### MAKALE BİLGİLERİ

### ÖZ

*Makale Geçmişi:*

Geliş 25 Eylül 2023  
Revizyon 11 Aralık 2023  
Kabul 12 Aralık 2023  
Online 31 Aralık 2023

*Anahtar Kelimeler:*

*Demontaj hattı dengeleme (DHD),  
Logaritmik işlem süreleri toplamı  
tabanlı öğrenme etkisi,  
İş bozulması etkisi,  
Hibrit PSO-GA yaklaşımı*

Artan çevresel farkındalık, ekonomik kaygılar ve yasal kurallar sayesinde, son zamanlarda ürün geri kazanımı veya yeniden üretimi yoğun ilgi görmektedir. Demontaj, ömrünü tamamlamış ürünlerin geri kazanımı aşamasındaki en önemli süreçlerden biridir. Bu yüzden, etkin ve dengeli kurulmuş demontaj hatları önem taşımaktadır. Bu çalışmada, demontaj hattı dengeleme (DHD) problemleri, eş zamanlı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında incelenmiştir. DHD literatüründe, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması eş zamanlı olarak ilk kez çalışılmıştır. Herhangi bir iş, istasyondaki sırasına göre, kendisinden önceki işlerin işlem sürelerinin logaritmik toplamından etkilenmektedir. İş bozulması ise, işin işleme başlamasını geciktiren bozulmalardır. Öğrenme işlerin işlem sürelerinin azaltırken, bozulma artırmaktadır. Bu çalışmada amaç fonksiyonu, açılan istasyon sayısı minimizasyonudur. Öğrenme ve bozulma etkisi altındaki DHD probleminin çözümü için hibrit (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu- Genetik Algoritma) PSO-GA algoritması geliştirilmiştir. Farklı öğrenme ve bozulma oranları için sonuçlar elde edilip karşılaştırmalar yapılmıştır. Öğrenme ve bozulma etkisinin, DHD problemlerinde dikkate alındığında amaç fonksiyonu değerinde iyileşmeler görülmüştür.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

*Article history:*

Received 25 September 2023  
Received in revised form 11 December 2023  
Accepted 12 December 2023  
Available online 31 December 2023

*Keywords:*

*Disassembly line balancing (DLB),  
Sum-of-logarithm-processing-time-  
based learning effect,  
Job deterioration effect,  
Hybrid PSO-GA approach*

Product recovery or remanufacturing has recently received a lot of attention as a result of rising environmental consciousness, economic worries, and laws and regulations. Disassembly is one of the most important processes in the recovery phase of end-of-life products. It's crucial to develop efficient and balanced disassembly lines. In this study, disassembly line balancing (DLB) problems are investigated under the effects of simultaneous sum-of-logarithm-processing-time-based learning and job deterioration. In the DLB literature, it is the first time to study simultaneous sum-of-logarithm-processing-time-based learning and job deterioration. Any job's processing time is influenced by the logarithmic sum of the processing times of its predecessors, in the station's order. Job deterioration delays the job start time. While learning reduces the processing time of jobs, deterioration increases. In this study, the objective function is the minimization of the number of opened stations. A hybrid PSO-GA algorithm has been developed to solve the DLB problem under the effects of learning and deterioration. Results for different learning and deterioration rates were obtained and comparisons were made. When the learning and deterioration effects were taken into account in DLB problems, improvements were observed in the objective function value.

*Doi: 10.24012/dumf.1366117*

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Doğal kaynakların azalması, depolama maliyetlerinin artması, toplumun zamanla daha bilinçlenmesi ve çevre ile ilgili yasa ve yönetmeliklerin etkisi ile üreticiler, tüketiciden çıkan tekrar kullanılabilir olan ürünlerin geri kazanımını sağlamaya yönelmiştir [1], [2]. Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesi ve yaşam döngüsünün kısalması ile birlikte ömrünü tamamlamış ürünlerin sayısı artmaktadır [3], [4]. Son kullanma tarihi geçmiş veya ömrü tükenmiş bu ürünlerin yeniden kullanılması veya yeniden üretilmesi ekonomik fayda sağlamakta ve aynı zamanda bu ürünlerden kaynaklanan çevre kirliliğini azaltmaktadır [3].

Demontaj, ürün geri kazanımında ürünlerin sistematik olarak alt bileşenlere ayrılmasını sağlayan en önemli ve zaman alıcı adımdır. Demontaj işlemi genellikle iş istasyonlarından oluşan bir hat üzerinde gerçekleştirilir. Demontaj hatları, ömrünü tamamlamış ürünlerin geri dönüştürülmesi veya yeniden üretilmesi için fırsatlar sunmaktadır [5]. Kaynak kullanımını optimize etmek için bir demontaj hattı dengeli olmalıdır. Demontaj hattı dengeleme, verimli ve etkili ürün geri dönüşümü sağlamanın en uygun yoludur. Demontaj hattı dengeleme problemleri, görevler arasındaki öncelik ilişkilerini sağlamak, çevrim süresini aşmamak gibi birkaç optimizasyon kısıtını karşılayacak şekilde belirli demontaj görevlerinin istasyonlara atanmasına izin verir. Bu nedenle, verimli ve dengeli bir şekilde tasarlanmış demontaj hattı, çevresel ve endüstriyel açıdan öneme sahiptir [6].

Demontaj işlemi, üründen ayrılacak parçalara göre kısmi demontaj ve komple demontaj olmak üzere iki şekilde olabilir. Kısmi demontajda ürün tamamen demonte olmaz. Tekrar kullanılabilir durumda olan veya ihtiyaç duyulan parçalar sökülür. Komple demontajda ise ürünün tüm parçaları ayrılır [7]. Farklı endüstri alanlarına göre düz, paralel ve U şeklinde demontaj hatları bulunmaktadır [3].

DHD problemini çözerken, görevler arasındaki öncelik ilişkileri ve çevrim süresi kısıtları dikkate alınmalıdır. Öncelik ilişkileri DHD problemini daha karmaşık hale getirir. Çözülmesi ve doğrulanması zor olan problemler, NP zor problem olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, DHD problemleri, kısıtlar dahilinde karmaşıklaştığı için optimum sonuca ulaşılması zorlaşmaktadır ve NP zor problemlerdir [8].

DHD problemi ilk olarak Güngör ve Gupta [9] tarafından sistematik yaklaşıma yönelik sezgisel bir yöntem kullanılarak çalışılmıştır. Güngör ve Gupta [10], tehlikeli ürünlerin öncelikli olarak sökülmesine izin veren minimum istasyon sayısını hedefleyen sezgisel bir yaklaşım önermiştir.

DHD problemlerini çözmek için kullanılan yöntemler üç kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar sezgisel yöntemler, metasezgisel yöntemler ve matematiksel programlama teknikleridir. İlk kategori sezgisel tabanlı çözüm yaklaşımlarıdır. Güngör ve Gupta [11], farklı durumlarda DHD problemi için basit bir sezgisel yöntem geliştirmiştir. McGovern ve Gupta [12], çok amaçlı DHD problemi için bir ağırlıklı/2 optimal(2-opt) hibrit algoritma önermişlerdir. Ren ve ark. [13], bu yöntemi ağırlıklara dayalı çok kriterli kararlarla genişletmiştir. Mete ve ark. [14], istasyon sayısını en aza indirmek için ışın aramayı önermiştir. İkinci kategori metasezgisel yöntemlerdir. Genetik algoritmalar [8], [15], [16], karınca kolonisi optimizasyonu [17], [18], yapay arı kolonisi algoritması [19], [20], tabu arama algoritması [21],

parçacık sürü optimizasyonu [22], [23], yerçekimsel arama algoritması [24], yapay balık sürüsü algoritması [25], değişken komşuluk arama algoritması [24], ateş böceği algoritması [26] ve ayrı guguk kuşu arama algoritması [3]. Üçüncü yöntem olarak, DHD problemlerini optimal olarak çözmek için matematiksel programlama teknikleri kullanılmaktadır. Altekin ve ark. [27], kar odaklı kısmi DHD problemi için bir karma tamsayı programlama formülasyonu geliştirmiştir. Altekin [28], stokastik DHD'ye parçalı doğrusal programlama uygulanmasını önermiştir. Kaynak kısıtlı DHD sorunu için bir matematiksel model sunulmuştur [29]. Ilgın ve ark. [30], DHD hattı için doğrusal fiziksel programlama, Paksoy ve ark. [31] bulanık hedefler kullanan karma bir model önermiştir. Özceylan ve Paksoy [32], doğrusal olmayan karma tamsayı programlama modeli kullanarak çok amaçlı DHD sorununu çözmüştür. DHD problemleriyle ilgili detaylı literatür çalışması Özceylan ve ark. [33] ve Laili ve ark. [34] tarafından yapılmıştır.

Klasik DHD problemlerinde işlerin işlem sürelerinin sabit olduğu varsayılır. Ancak gerçek hayattaki uygulamalarda işler çeşitli etkiler altında olabilir ve işlerin işlem süreleri değişkenlik gösterebilir. Gerçek hayatta, çalışanlar yaptıkları işleri tekrarladıkları takdirde iş süreçlerini öğrenir ve daha verimli çalışabilirler. İşçilerin beceri ve deneyimlerinin artmasıyla birlikte, işlerin işlem süreleri de giderek azalacaktır [35]. Bu olgu literatürde öğrenme etkisi olarak bilinir.

Wright [36], üretim operasyonlarına dayalı öğrenme kavramını düşünen ilk kişidir. Biskup [37] ve Cheng ve Wang [38], öğrenme etkisini çizelgeleme alanında çalışan öncülerdir. Biskup, pozisyona dayalı bir öğrenme modeli önermiştir ve bunu tek makineyi çizelgeleme problemine uygulamıştır. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi çizelgeleme problemlerinde nadiren kullanılmıştır [39]–[41].

Öğrenme etkisi ve iş kaybı literatürde derinlemesine incelenmiştir. Gerçek hayatta, öğrenme etkisi ve iş kaybı aynı anda meydana gelir. Örneğin, üretim ortamı giderek daha rekabetçi hale geldikçe, işletmeler müşterilere daha fazla ürün çeşitliliği sağlamak için daha kısa üretim sürelerine ve daha sık ürün değişikliklerine yönelmektedir. Bu tür iş ortamlarında çalışanların yaşadıkları öğrenmeler ve unutmalar çok önemlidir. Unutma olarak adlandırılan, düşük performansla neden olan ürün ve süreç değişiklikleri, çalışanları etkiler [42].

Bir iş, makinede işlenirken veya işlenmeyi beklerken bozulabilir. Bu nedenle, işe başlama saatine bağlı olarak bozulma etkisi altında işlem süresi artmaktadır. Gupta [43], bozulma etkisini çizelgeleme problemine ilk olarak eklemiştir. Haddehaneye girmeyi beklerken, külçe sıcaklığının düşmesi durumunda külçenin tekrar ısıtılması gerekecektir. Yangınla mücadelede gecikme olursa yangını söndürmek için gereken süre artacaktır [44], [45]. Kötüleştiren koşullar altında diğer faktörler şunlardır: Kötüleştiren hava veya artan karanlık, makineleri veya araçları onarmak, vb. Tüm bu durumlarda, gecikmeler genellikle işlem sürelerini uzatır [55].

Klasik DHD problemlerinde işlerin işlem süreleri süreç boyunca sabit kabul edilmektedir. Bu çalışmada, DHD problemlerine logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi ile iş bozulması etkisi eş zamanlı uygulanmıştır ve belirli bir döngü süresi için iş istasyonu

sayılarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Öğrenme ve bozulma etkisinin tüm görevler için eşit olduğu varsayılmaktadır.

Bu makalenin katkısını şu şekilde özetleyebiliriz:

•DHD problemi ilk defa, eş zamanlı olarak logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi ile iş bozulması etkisi düşünülerek çözdürülmüştür. Klasik DHD problemlerinde işlerin işlem süreleri, süreç boyunca sabittir. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi ile sıradaki işin işlem süresi, kendisinden önceki sıralarda yer alan işlerin işlem sürelerine bağlıdır. Aynı istasyonda, önceki sıralara atanan işlerin işlem sürelerinin logaritmik toplamının bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, iş bozulması işler normalden daha uzun sürede tamamlanabilmektedir. Bu çalışmada her iki etkinin de düşünüldüğü DHD problemlerinin işlem sürelerindeki değişiklik sonucunda açılacak istasyon sayısındaki değişim incelenmiştir.

• Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında DHD problemi için matematiksel model geliştirilmiştir. Problem NP-zor yapıda olduğu için Lingo.11 optimizasyon programı ile çok küçük boyutlu problem için çözüm aranmıştır. Daha büyük boyutlu problemlerin çözümünde ise hibrit PSO-GA algoritması kullanılmıştır. Önerilen hibrit metasezgisel yöntemle optimal sonuca veya optimal sonuca en yakın sonuca ulaşmak hedeflenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Problem tanımı ve formülasyonu

DHD problemi, talebi karşılarken demontaj hattındaki kaynakları en verimli şekilde kullanmayı amaçlar. Demontaj hattı yerleşiminin iyileştirilmesi, kaynakların verimli kullanılması, demontaj görevlerinin öncelik ilişkileri dikkate alınarak iş istasyonlarına en uygun şekilde atanması ve gerekli minimum iş istasyonu sayısının bulunmasıdır (Güngör ve Gupta, 2002). Bu çalışmada, DHD probleminin modellenmesinde logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri dikkate alınmıştır.

Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri modelinde,  $p_{ir}$ , r. sırada yer alan i işinin güncel işlem süresidir. Bu durumda;

$$P_{i(r)} = p_i \left( 1 + \sum_{l=1}^{r-1} \ln p(l) \right)^a \quad (1)$$

burada  $a < 0$  öğrenme oranı ( $1/r$ ) ve  $p_i$ , i işinin gerçek işlem süresidir. Öğrenme etkisi indeks değeri, öğrenme oranının 2 tabanında logaritmik değerine eşittir. Denklem(1), logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi altında i işinin işlem süresini hesaplamaktadır.

$$P_{i(r)} = p_i + at_r \left( 1 + \sum_{l=1}^{r-1} \ln p(l) \right)^a \quad (2)$$

$a > 0$ , bozulma oranı ( $dr$ ),  $t_r > 0$ , i görevinin başlangıç zamanıdır.

Denklem(2), r. sıradaki i işinin, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altındaki işlem süresini hesaplamaktadır. Görevler, önce bozulmadan, daha sonra öğrenmeden etkilenir. Çünkü öğrenme etkisi işin pozisyonu ile ilgiliyken, bozulma etkisi işin başlama zamanı

ile ilişkilidir. Öğrenme, işin kendisinden önceki işlerin işlem sürelerinin logaritmik değerlerinin toplamı ile ilgilidir. Yani, iş ne kadar ileri sıraya atanırsa, öğrenme etkisi o kadar fazla olur. Bozulma ise işin başlangıcında vardır.

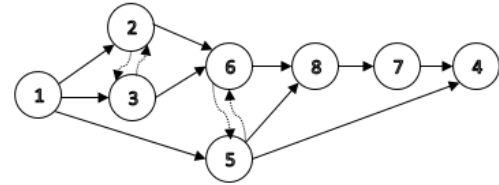
Güngör ve Gupta [10] tarafından oluşturulan DHD probleminin matematiksel modeli, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında DHD problemi için geliştirilmiştir. Mevcut problem 8 görevden oluşmaktadır. Tablo 1, görevleri ve ilgili parametreleri göstermektedir.

Görevler arasındaki öncelik ilişkileri Şekil 1'de görüldüğü gibidir. Şekil 1'de de görüldüğü gibi Parça-1, Parça-2, 3 ve 5'ten önce demonte edilmelidir.

Tablo 1. Görev tanımları ve işlem süreleri

Görev no	Görev Tanımı	İşlem süresi(sn)
1	PC'nin üst kapağının çıkarılması (TC)	14
2	Sabit sürücünün çıkarılması	10
3	Arka düzlemin çıkarılması (BP)	12
4	PCI kartların çıkarılması (PCI)	18
5	PCI kartların çıkarılması (PCI)	23
6	İki RAM modülünün çıkarılması (RAM)	16
7	Güç ünitesinin (PU) çıkarılması	20
8	Anakartın çıkarılması (MB)	36

Parça-6, Parça-2 ve 3'ten sonra demonte edilmelidir. İşlerin istasyonlara atanmasında işler arasındaki öncelik ilişkileri önemlidir. Öncelik ilişkileri, DHD problemini karmaşıklaştırıp zorlaştırmaktadır.



Şekil 1. 8-parçalı verinin öncelik ilişkileri

Model geliştirilirken dikkate alınması gereken varsayımlar;

1. Her iş sadece bir istasyonda sadece bir pozisyona atanabilir.
2. İşlerin istasyona atanmasında öncelik ilişkileri dikkate alınmalıdır.
3. Tek tip ürün işlenir.
4. Bir demonte görevi birden fazla iş istasyonuna bölünemez.
5. Parça çıkarma süreleri deterministik ve sabittir.
6. Bir istasyona atanan tüm işlerin işlem sürelerinin toplamı çevrim süresini geçmemelidir.
7. Sökme görevleri arasında yıkıcı işlemler yoktur.

### Notasyonlar:

#### İndeksler:

$i, k \in N$  görev kümesi

$(i, k) \in SP$  etkileşimli görevler kümesi

$j \in M$  istasyon kümesi

$r \in N$  görevin istasyondaki konumu

### Parametreler:

$a$ : öğrenme indeksi,

$\alpha$ : bozulma indeksi,

$M$ : büyük bir sayı,

$ct$ =her istasyonun çevrim süresi,

**Karar değişkenleri:**

$y_{ij}$ :  $i$  görevi  $j$  istasyonuna atanırsa, 1; Aksi takdirde 0,

$z_j$ :  $j$  istasyonu açıksa, 1; Aksi takdirde 0,

$x_{ijr}$ :  $i$  görevi  $j$  istasyonunda  $r$  pozisyonuna atanırsa, 1; Aksi takdirde 0,

$b_{jr}$ :  $j$  istasyonunda  $r$ . sıraya atama yapıldıysa, 1; Aksi takdirde 0,

$t_{jr}$ :  $j$  istasyonundaki  $r$ . sıradaki görevin işlem süresi,

$c_{jr}$ :  $j$  istasyonundaki  $r$ . sıradaki görevin tamamlanma zamanı,

Aşağıdaki gibi verilen model formülasyonu:

$$f = \text{Min} \sum_{j=1}^n z_j \quad (3)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1 \quad \text{for } \forall i \in n \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} \leq z_j \times ct \quad \text{for } \forall i \in n \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^n c_{jr} \times x_{ajr} \times b_{jr} - \sum_{R=1}^n c_{jR} \times x_{kjr} \times b_{jR} \leq 0 \quad \text{for } \{a, k\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijr} \leq 1 \quad \text{for } \forall j \in M, r \in N \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^n x_{ijr} = y_{ij} \quad \text{for } \forall j \in M, i \in N \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \left( (g_i + \alpha \times c_{j(r-1)} \times b_{jr}) \times x_{ijr} \right) \times \left( 1 + \sum_{l=1}^{r-1} (\ln g_l \times x_{ijl}) \right)^{\alpha} = t_{jr} \quad \text{for } \forall j \in M, r \in N \text{ and } r \neq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n g_i \times x_{ijr} \times b_{jr} = t_{jr} \quad \text{for } \forall i \in N, r = 1 \quad (10)$$

$$c_{jr} = c_{j(r-1)} + t_{jr} \quad \text{for } \forall j \in M, r \in N \text{ and } r \neq 1 \quad (11)$$

$$t_{jr} \times b_{jr} \leq t_{j(r-1)} \times b_{j(r-1)} \times M \quad \text{for } \forall j \in M, r \in N \text{ and } r \neq 1 \quad (12)$$

$$\frac{c_{jr} \times b_{jr}}{M} \leq \frac{c_{j(r-1)} \times b_{j(r-1)}}{M} \quad \text{for } \forall j \in M, r \in N \text{ and } r \neq 1 \quad (13)$$

$$c_{jr} = t_{jr} \quad \text{for } \forall j \in M \text{ and } r = 1 \quad (14)$$

$$x_{ij(r-1)} \leq \sum_{i=1}^n x_{ijr} \quad (I \neq i), (I = 1, \dots, N) \quad (15)$$

$$x_{ijr}, y_{ij}, b_{jr}, z_j \in \{0,1\} \quad (16)$$

Denklem (3)' te verilen çevrim süresini aşmayacak şekilde açılacak istasyon sayısını en aza indirmek amaçlanmaktadır.

Kısıt (4) ve (8)' de, herhangi bir görevin yalnızca bir istasyona atanabilmesi, bu istasyonda da yalnızca bir sıraya atanabilmesi sağlanmaktadır. Kısıt (5), herhangi bir istasyona atanan işlerin işlem süreleri toplamının çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (6), işler istasyona atanırken öncelik ilişkilerinin dikkate alınmasını sağlamaktadır. Kısıt(7), bir işin herhangi bir istasyonda yalnızca bir pozisyona atanabilmesini sağlamaktadır. Kısıt(9), herhangi bir görev ilk sıradan farklı bir sıraya atandığında işlem süresini, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkisi altında hesaplamaktadır. Kısıt(10), herhangi bir işin bir istasyonda ilk sıraya atandığında ki işlem süresini hesaplamaktadır. Kısıt(11), herhangi bir  $j$  istasyonundaki iş tamamlanma süresini hesaplamaktadır. Kısıt(12), iş istasyonlarında farklı pozisyonlardaki işlerin işlem süreleri arasındaki ilişkiyi düzenlemektedir. Kısıt (13,14), herhangi bir istasyonda  $r$  pozisyonundaki işin işlem tamamlama süresi ile  $r-1$  pozisyonundaki işin işlem tamamlama süresi arasındaki ilişkiyi sağlamaktadır. Kısıt(15), bir istasyonda bir işten önce yalnızca bir tane işin yapılabileceğini belirtir. Kısıt (16) ise ikili değişkenleri tanımlamaktadır.

### Hibrit PSO-GA metasezgisel yaklaşım

Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında DHD probleminin çözümünde hibrit PSO-GA metasezgisel yaklaşımı kullanılmıştır. Yöntemin uygulanmasında algoritmanın başlangıç çözümü aşamasında PSO algoritması belirli sayıda iterasyon çalıştırılmıştır. Daha sonra Genetik algoritmanın temel aşamaları olan çaprazlama ve mutasyon yöntemleri ile optimal çözüm aranmaya devam edilmiştir.

### Parçacı Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Eberhart ve Kennedy [47], kuş-balık sürülerinin yiyecek ararken ki hareketlerinden hatta bazen insan davranışlarından esinlenerek, stokastik optimizasyon stratejisine dayalı bir yöntem olan PSO'yu geliştirmişlerdir. PSO'nun temel amacı, sürüyü oluşturan parçacıklar arasındaki sosyal bilgi paylaşımını iyileştirmektir. PSO, rastgele çözüm adaylarıyla popülasyon başlatma ve ardışık nesillerde küresel optimumu arama açısından GA'ya benzese de, çaprazlama ve mutasyona uğramaz. PSO'nun uygulanması diğer sezgisel algoritmalara göre çok kolaydır. PSO daha az hesaplama gerektirir ve düzenlenmesi gereken az sayıda parametresi vardır [48].

PSO, rastgele üretilmiş başlangıç çözümlerinden oluşan bir popülasyonla başlar. Optimal çözüm, çözüm uzayında iteratif olarak aranır. Çözümler, arama uzayında hareket eden parçacıklar olarak adlandırılmaktadır ve her bir parçacık bir çözüm temsil etmektedir. Her bir çözüm, parçacığın arama uzayındaki konumunu gösterir. Ayrıca, her parçacık kendi deneyimi ve tüm popülasyonun deneyiminden faydalanarak sürekli güncellenen bir hızla hareket eder. Her parçacık, bulunduğu iterasyona kadar elde ettiği pbest olarak adlandırılan en iyi sonucu ve tüm sürünün o ana kadar elde ettiği gbest olarak adlandırılan en iyi sonucu hatırlar. Dolayısıyla her bir parçacık, arama uzayındaki konumu,  $x_i^k$ , ve mevcut hızı,  $v_i^k$ , olmak üzere iki niteliğe sahiptir.  $x_i^k$  ve  $v_i^k$ , sırasıyla  $i$  parçacığının  $k$ . iterasyondaki konumu ve hızını temsil etmektedir. Parçacığın  $(k+1)$ . iterasyondaki konumu ve hızı güncellenirken aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (17)$$

$$v_i^{k+1} = w \times v_i^k + c_1 \times \text{rand1}(pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \times \text{rand2}(gbest^k - x_i^k) \quad (18)$$

$$w = w_{max} - \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{\text{iterasyon sayısı}} \right) \times \text{mevcut iterasyon} \quad (19)$$

Burada; rand1 ve rand2, 0-1 aralığında rassal üretilmiş iki sayıdır, w atalet ağırlığıdır.  $w_{min}$ , 0.4 ile  $w_{max}$ , 0.9 arasında bir sayıdır.  $c_1$  ve  $c_2$  ivme katsayısı sabitleridir ve  $c_1=c_2=2$  olarak alınmıştır [47], [49]. Ayrıca,  $pbest_i^k$  i parçacığının en iyi konumudur,  $gbest^k$  k. iterasyona kadarki küresel en iyi konumdur.

### Genetik Algoritma (GA)

Genetik algoritma DLB problemlerinde en yaygın kullanılan evrimsel algoritmalarından biridir [4], [8]. Evrimsel algoritmalar, sadece rastgele çözümler bulmak için tasarlanmamıştır. Olası hata ve belirsizlik oranı içeren yöntemler kullanarak rastgele çözümlerden çok daha iyi çözümler üretmek temel amacındır. GA'da popülasyon, genlerin bir araya gelmesiyle kromozomlardan oluşur ve iki ebeveyn kromozomdan yeni bireylerin üretildiği bir çözüm yapısına sahiptir. Genetik algoritma, kromozomların sürekli çaprazlandığı, mutasyona uğradığı ve en iyi çözüme ulaşılan kadar birbirleriyle rekabet ettiği bir ortam sağlar [8]. GA ile çözüm aşamasında uygulanan adımlar: başlangıç popülasyonunu oluşturma, uygunluk fonksiyonu ve seçimi, turnuva seçim yöntemi, çaprazlama ve mutasyondur.

### Başlangıç popülasyonu oluşturma

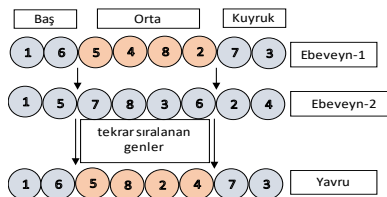
DHD problemini oluşturan işler GA'da ki genlerdir ve işlerin sıralı hali olan bir çözüm adayı ise kromozomdur. Problemi oluşturan işlerin sayısı kadar büyüklükte bir rassal sıra oluşturulur. GA başlangıç popülasyonu bu rassal sıralardan oluşmaktadır. Rassal sıraya göre işler istasyonlara öncelik ilişkileri ve çevrim süresi kısıtları göz önünde bulundurularak atanmaktadır.

### Uygunluk fonksiyonu ve seçimi

Bir bireyin arama uzayındaki performansının ölçüsü uygunluk fonksiyonudur. Çalışmamızda uygunluk fonksiyonu amaç fonksiyonumuz olan minimum istasyon sayısıdır. Ebeveyn seçiminde turnuva seçim tekniği kullanılmıştır. Tüm aday kromozomların uygunluk değerleri hesaplanmış ve ebeveyn popülasyonu, daha iyi performans gösteren adaylardan oluşturulmuştur.

### Çaprazlama Yöntemi

Bu çalışmada çaprazlama yöntemi olarak parça yeniden sıralama yöntemi [15] kullanılmıştır. Şekil 2, bu çaprazlama yönteminin ayrıntılarını göstermektedir.



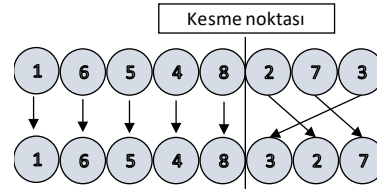
Şekil 2. Parçaları yeniden sıralama yöntemi

Her ebeveyn kromozom rastgele seçilen iki nokta ile 3 parçaya bölünür. Baş ve kuyruk kısımdaki genlerin sıralaması

aynı şekilde yavru kromozoma aktarılır, Ebeveyn-1' de orta parçadaki genler ise Ebeveyn-2'deki sıraları doğrultusunda yavru kromozomun orta kısmına tekrar sıralanarak aktarılır (Şekil 2). Diğer yavru kromozomda ise baş ve kuyruk kısmı Ebeveyn-2 'den aynen aktarılırken, orta kısım için genler Ebeveyn-1'deki sıralarına göre aktarılır.

### Mutasyon Yöntemi

Bu çalışmada mutasyon işlemi olarak tek nokta sağ operatör yöntemi (one point right operatör method) [15] kullanılmıştır. Şekil 3, bu çaprazlama yönteminin ayrıntılarını göstermektedir.



Şekil 3. Tek nokta sağ operatör yöntemi

Mutasyon yönteminin uygulanacağı kromozom üzerinde mutasyon oranı dikkate alınarak bir nokta seçilir. Seçilen noktanın sağ tarafında kalan genler rassal olarak tekrar sıralanır (Şekil 3).

Hibrit PSO-GA algoritmasında problem için başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra ilk uygunluk fonksiyonu değerleri elde edilir. Ardından oluşturan popülasyon için PSO algoritmasının adımları belirlenen iterasyon sayısı kadar uygulanmıştır. GA'nın aşamaları olan çaprazlama ve mutasyondan önce PSO ile çözüm adayları iyileştirilmiştir. Daha sonra, çaprazlama ve mutasyon işlemleri belirlenen çaprazlama ve mutasyon oranları dahilinde uygulanmıştır ve optimum veya optimuma yakın sonuçlar büyük boyutlu problemler için de elde edilmiştir. Hibrit PSO-GA algoritması C# programlama dili kullanılarak yazılmıştır.

### Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde literatürde kullanılan klasik DHD problemleri logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında incelenmiş olup ve hibrit PSO-GA algoritması ile çözümler bulunmuştur. Problemlerin çözüm yöntemlerinin uygulanmasında Intel Core (TM) i5-5200U CPU, 2.20 GHz, 8 GB RAM özellikli bilgisayar kullanılmıştır. Çalışmada, DHD problemlerinde eş zamanlı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkisini değerlendirebilmek için 0.90, 0.80 ve 0.70 olmak üzere 3 farklı öğrenme oranı, 0.10 ve 0.20 olmak üzere iki farklı iş bozulması oranı kullanılmıştır. Bahsedilen iki etki altında demontaj işlemlerinin işlem sürelerinin ve amaç fonksiyonunun nasıl etkilendiği incelenmiştir. Öğrenme etkisi oranı 0.80 iken hesaplamada kullanılan öğrenme etkisi değeri  $\log_2^{0.80} = -0,322$  olarak hesaplanmaktadır.

8 parçalı veri seti için, görev parametreleri kullanılarak çevrim süresi 40 iken istasyon sayısı 4 olarak bulunmuştur [46]. Bu çalışmada, aynı problem için Lingo.11 optimizasyon programı kullanılarak amaç fonksiyonu değeri 4 olarak bulunmuştur. Görevlerin istasyonlara atanması şu şekildedir: Görev-1-2-3, istasyon-1'e atanır, Görev 5-6, istasyon 2'ye

atanır, Görev 7-4, istasyon-3'e atanır ve Görev-8, sırasıyla istasyon-4'e atanır.

Bu çalışmada öğrenme oranı değerleri 0.9, 0.8 ve 0.7, bozulma oranları ise 0.1 ve 0.2 kabul edilmiştir. Öğrenme oranı 0.9 ve bozulma oranı sırasıyla 0.1 ve 0.2 iken, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında 8-parçalı DHD problemi için amaç fonksiyonu değerleri her iki durum için de 4 bulunmuştur. Öğrenme oranı 0.8 iken, bozulma oranı sırasıyla 0.1 ve 0.2 iken etkiler altında amaç fonksiyonu değerleri 3 bulunmuştur. Öğrenme oranı 0.7 iken ise bozulma oranı sırasıyla 0.1 ve 0.2 olduğunda, etkiler altında amaç fonksiyonu değerleri yine 3 olarak bulunmuştur.

### 25-parçalı telefon demontajı örneğinin logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında incelenmesi

DHD literatüründe sıklıkla kullanılan 25 parçadan oluşan hücreli telefon demontaj [50] örneği için sonuçlar elde edilmiştir. 25-parçalı DHD örneğinin görev tanımları, işlem süreleri ve işler arasındaki öncelik ilişkileri Tablo 2'de görülmektedir. Problem için çevrim süresi 18'dir.

Tablo 2. 25-parçalı DHD örneği için görev tanımları, işlem süreleri ve öncelik ilişkileri

Görev	Parça ismi	İşlem süresi	Öncelik ilişkisi
1	Antenna	3	
2	Battery	2	
3	Antenna guide	3	1,2
4	Bolt(Type 1) A	10	
5	Bolt(Type 1) B	10	
6	Bolt(Type 2) 1	15	2
7	Bolt(Type 2) 2	15	2
8	Bolt(Type 2) 3	15	2
9	Bolt(Type 2) 4	15	3
10	Clip	2	4,5
11	Rubber seal	2	10
12	Speaker	2	11
13	White cable	2	6,7,8,9
14	Red/blue cable	2	6,7,8,9
15	Orange cable	2	6,7,8,9
16	Metal top	2	6,7,8,9
17	Front cover	2	13,14
18	Back cover	3	15
19	Curciut board	18	13,14,16,18
20	Plastic screen	5	17
21	Keyboard	1	17
22	LCD	5	21
23	Sub-keyboard	15	16,21
24	Internal IC Board	2	19,23
25	Microphone	2	21

Hibrit PSO-GA sezgisel yaklaşımı 500 iterasyon çalıştırılarak sonuçlar üretilmiştir. Öğrenme oranı ve

bozulma oranı değerleri sıfır iken, yani problemin literatürdeki baz hali için amaç fonksiyonu değeri olan açılan istasyon sayısı değeri 9 olarak bulunmuştur. Tablo 3'te, DHD literatüründe optimum sonuç olarak belirtilen sonucun, oluşturmuş olduğumuz algoritma ile de bulunduğu görülmektedir.

Elde edilen sonuca göre, istasyondaki işlerin tamamlanma süresi çevrim süresini aşmayacak ve öncelik ilişkilerini sağlayacak şekilde atamalar yapılmıştır. 23 ve 3 nolu işler İstasyon-1'e, 11 ve 9 nolu işler İstasyon-2'ye, 25-13-10-22-18-16 ve 12 nolu işler İstasyon-3'e, 8 nolu iş İstasyon -4'e, 7 ve 14 nolu işler İstasyon-5'e, 19 nolu iş İstasyon-6'ya, 6 ve 24 nolu işler İstasyon-7'ye, 2-1-14 ve 4 nolu işler İstasyon-8'e atanırken son olarakta 20-15-5 ve 21 nolu işler İstasyon-9'a atanmıştır (Tablo 4).

Tablo 3. 25-parçalı DHD probleminin literatürdeki çalışmalarda bulunan sonuçlarının karşılaştırılması

Makale	Yaklaşım	İstasyon sayısı
McGovern ve Gupta (2005)	H-K	10
McGovern ve Gupta (2006)	ACO	9
Ding vd. (2010)	MDACO	9
Kalayci vd. (2012a)	SA	9
Kalayci ve Gupta (2012b)	PSO	9
Kalayci vd.(2016)	VNSGA	9
Duta vd.(2016)	CGA	9
Edis(2021)	CP	9
Li vd.(2020)	BBRA	9
Bizim çalışmamız	Hibrit PSO-GA	9

Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenmenin ve iş bozulmasının eş zamanlı etkisi altında mevcut 25-parçalı DHD probleminde, öğrenme ve bozulma oranları değiştiğinde amaç fonksiyonu değeri de değişiklik göstermektedir (Tablo 4). Program, problem için sonuçları elde ederken 500 iterasyon çalıştırılmıştır. Tablo 4'te de görüldüğü üzere, eş zamanlı öğrenme ve bozulma etkisi altında amaç fonksiyonu değeri genellikle azalmıştır. Öğrenme oranı değeri 0.90 iken, bozulma oranı değeri 0.20 olduğunda açılan istasyon sayısı 10'a çıkmıştır. Öğrenme oranının 0.90 olması, 1 birim zamanda yapılabilen bir işin 0.90 birim zamanda yapılabilen olmasıdır. Yani öğrenme oranı değeri düşüldükçe işin daha kısa sürede yapılması demektir.

Bozulma etkisi değeri arttıkça işlerin işlem süreleri artış göstermektedir. Yani, öğrenme ile işin işlem süresi azalırken, bozulmanın etkisi ile işlem süresinde artış görülebilmektedir. Gerçek hayat problemlerinde, bir iş hem öğrenmeden hem de bozulmadan eş zamanlı etkilendiği için, bu çalışmada da işlemlerin her iki etkiden de etkilendiği varsayılmıştır.

Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi ve iş bozulması etkisi dikkate alınmadığı durumda 9 istasyon açılması gerekirken, öğrenme oranı 0.90 ve bozulma oranı 0.20 olduğunda açılan istasyon sayısı 10 olarak bulunmuştur.

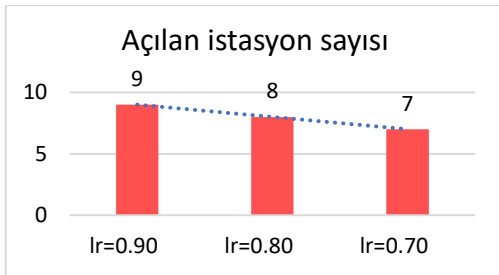


Tablo 4. 25-parçalı veri seti için logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkisi altında görevlerin işlem süreleri ve açılan istasyon sayıları

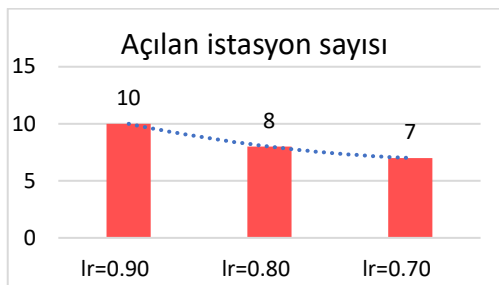
Senaryo	Atanan İşler	İşlem süreleri	İş Tamamlama süresi	Açılan istasyon sayısı
<b>P25 with <math>lr=0.00</math>, <math>dr=0.00</math>, <math>ct=18</math></b>				
Station 1	23-3	15-3	18	
Station 2	11-9	2-15	17	
Station 3	25-13-10-22-18-16-12	2-2-2-5-3-2-2	18	
Station 4	8	15	15	
Station 5	7-14	15-2	17	9
Station 6	19	18	18	
Station 7	6-24	15-2	17	
Station 8	2-1-14-4	2-3-2-10	17	
Station 9	20-15-5-21	5-2-10-1	18	
<b>P25 with <math>lr=0.90</math>, <math>dr=0.10</math>, <math>ct=18</math></b>				
Station 1	9	15	15	
Station 2	5-21-3-15	10-1,67-3,39-2,74	17,8	
Station 3	19	18	18	
Station 4	12-13-25-4-16	2-2,03-2,1-8,91-2,72	17,76	
Station 5	17-10-23	2-2,03-13,48	17,51	9
Station 6	11-7	2-14,03	16,03	
Station 7	24-8	2-14,03	16,03	
Station 8	22-2-20-18-14	5-2,16-4,75-3,29-2,67	17,87	
Station 9	1-6	3-13,67	16,67	
<b>P25 with <math>lr=0.90</math>, <math>dr=0.20</math>, <math>ct=18</math></b>				
Station 1	3-21-12-13	3-1,43-2,52-2,82	9,77	
Station 2	17-6	2-14,21	16,21	
Station 3	15-1-25-4	2-3,14-2,58-9,43	17,15	
Station 4	18-23	3-13,94	16,94	
Station 5	2-11-20-14-16	2-2,22-5,09-3,11-3,48	15,9	10
Station 6	19	18	18	
Station 7	5-22	10-5,84	15,84	
Station 8	8	15	15	
Station 9	24-9	2-14,21	16,21	
Station 10	10-7	2-14,21	16,21	
<b>P25 with <math>lr=0.8</math>, <math>dr=0.1</math>, <math>ct=18</math></b>				
Station 1	5-18-17-1	10-2,72-2,04-2,66	17,42	
Station 2	4-15-16	10-2,04-2,05	14,09	
Station 3	8-13	15-2,29	17,29	
Station 4	25-3-11-23	2-2,7-1,79-10,68	17,17	
Station 5	24-20-7	2-4,39-10,78	17,17	8
Station 6	14-19	2-15,36	17,36	
Station 7	10-2-21-12-9	2-1,86-1,06-1,89-11	17,81	
Station 8	22-6	5-11,38	16,38	
<b>P25 with <math>lr=0.8</math>, <math>dr=0.2</math>, <math>ct=18</math></b>				
Station 1	17-11-9	2-2,03-11,9	15,93	
Station 2	2-10-14-23	2-10-14-23	17,37	
Station 3	22-6	5-11,75	16,75	
Station 4	21-8	1-15,2	16,2	
Station 5	25-1-7	2-2,87-11,54	16,41	8
Station 6	12-18-5-20	2-2,87-7,93-4,55	17,35	
Station 7	16-19	2-15,53	17,53	
Station 8	15-24-3-13-4	2-2,03-2,87-2,27-7,41	16,58	
<b>P25 with <math>lr=0.7</math>, <math>dr=0.1</math>, <math>ct=18</math></b>				
İstasyon 1	6	15	15	
İstasyon 2	22-25-12-9-10	5-1,53-1,5-8,38-1,5	17,91	
İstasyon 3	20-16-19	5-1,53-10,54	17,07	
İstasyon 4	24-5-4-14	2-7,78-5,57-1,47	16,82	7
İstasyon 5	15-1-13-17-2-23	2-2,44-1,5-1,48-1,47-8,04	16,93	
İstasyon 6	18-11-7-21	3-1,57-9,55-1,07	15,19	
İstasyon 7	8-3	15-2,29	17,29	
<b>P25 with <math>lr=0.7</math>, <math>dr=0.2</math>, <math>ct=18</math></b>				
Station 1	24-22-6	2-4,12-9,05	13,75	
Station 2	21-18-12-8-13	1-3,2-1,91-9,53-2,22	18	
Station 3	23	15	15,45	
Station 4	1-5-14-4	3-7,24-1,96-5,58	17,81	7
Station 5	16-15-10-19	2-1,83-1,8-11,08	16,03	
Station 6	11-3-25-9	2-2,59-1,77-8,92	16,51	
Station 7	2-17-7-20	2-1,83-10,28-3,55	17,98	

Bu durumda, iş bozulması etkisi, öğrenme etkisine baskın gelmiştir. Bazı işlerin işlem sürelerinde artış görülmektedir. Örneğin, 5. istasyona 2. sırada atanan 11 numaralı işin işlem süresi normalde 2 iken, etkiler altında 2.22 olmuştur, aynı şekilde aynı istasyonda 4. sıraya atanan 14 numaralı işin işlem süresi normalde 2 iken etkiler altında 3.11 olmuştur. İşlerin işlem süreleri arttığından, çevrim süresini koruyabilmek için istasyonlara atanan iş sayıları azalmıştır ve açılan istasyon sayısında artış meydana gelmiştir.

Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi değeri 0.7 iken, iş bozulması etkisi 0.1 olduğunda 7 istasyon açılması gerekirken, iş bozulması oranı 0.2 olduğunda 8 istasyon açılması gerekmektedir. Öğrenme oranı sabit tutulduğunda, iş bozulması oranındaki artış ile amaç fonksiyonu değerinde de  $\sim$ %14.3 artış olduğu görülmektedir (Tablo 4). Benzer şekilde bozulma oranının 0.1 olduğu durumda, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme oranı 0.7 iken 7 istasyon açılırken, 0.8 olduğu durumda 8 istasyon açılması gerekmektedir. Dolayısıyla, iş bozulması oranı sabit olduğunda öğrenme oranındaki 0.1 birimlik artış ile amaç fonksiyonu değerinde  $\sim$ %14.3 oranında artış meydana gelmiştir.



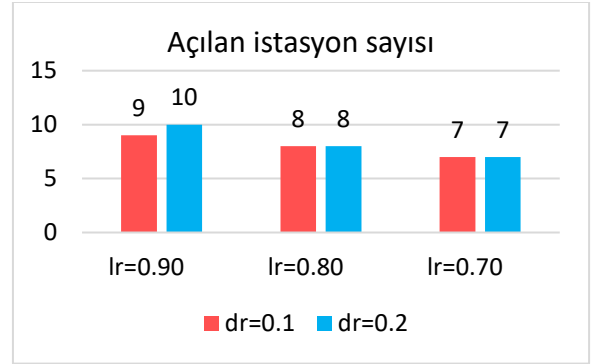
Şekil 4. İş bozulması oranı 0.1 iken farklı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi değerleri ile hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri



Şekil 5. İş bozulması oranı 0.2 iken farklı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi değerleri ile hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri

İş bozulması oranı sırasıyla, 0.1 ve 0.2 olduğunda farklı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme oranları altında 25-parçalı DHD problemi için açılan istasyon sayıları Şekil 4 ve Şekil 5'te görülmektedir. Öğrenme oranı azaldıkça, açılan istasyon sayısı değeri de azalmaktadır. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme oranları sabit iken farklı iş bozulması oranları için elde edilen sonuçlar Şekil 6'da görülmektedir. İş bozulması oranı arttıkça açılan istasyon sayısı artmaktadır. Çünkü iş

bozulması işlerin işlem süreleri üzerinde artırıcı etkiye sahiptir.



Şekil 6. Aynı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme oranı ile farklı iş bozulması oranları için hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri

### Literatürdeki 15 farklı problem için sonuçları karşılaştırılması

Literatürde bulunan 15 farklı DHD problemi [54], eş zamanlı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkisi dikkate alınarak çözdürülmüştür. 0.9, 0.8, 0.7 olmak üzere 3 farklı öğrenme oranı ve 0.1 ve 0.2 olmak üzere 2 farklı iş bozulması oranı kullanılmıştır.

Tablo 5'te belirtilen veri setleri için öğrenme ve bozulma etkileri dikkate alınmadığı durumda bulunan istasyon sayısı değerleri, literatürde bulunan optimum amaç fonksiyonu değerleri ile aynıdır. Yani, hibrit PSO-GA algoritması ile parça sayısı 70'den küçük olan problemler için 500 iterasyon, 70'den büyük problemler için ise 1000 iterasyon çalıştırılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6'da, optimal sonuç sütununda literatürdeki bulunan optimal sonuçlar yer alırken, lr=0-dr=0 sütununda bu çalışmada elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Öğrenme oranı 0.9 iken, bozulma oranı 0.2 olduğunda çalışılan veri setlerinin çoğunluğunda herhangi bir öğrenme veya bozulma etkisi dikkate alınmadığı durumla aynı veya daha kötü sonuçlar elde edilmiştir. Birkaç problem için daha iyi sonuç elde edilebilmiştir.

Bozulma oranının 0.2 olduğunda, öğrenme oranı 0.9 ise iş bozulmasının artırıcı etkisi, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisinden baskın gelmiştir. Örneğin; 45-parçalı (Kilbrid) problemde, etkiler düşünülmediğinde açılan istasyon sayısı 10 iken, öğrenme oranı 0.9 ve bozulma oranı 0.2 olduğunda logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında açılan istasyon sayısı 11 bulunmuştur.

Öğrenme oranı 0.8 ve 0.7 olduğu tüm durumlarda ise amaç fonksiyonu değerinde iyileşme görülmektedir. 89-parçalı Lutz-3 veri setinde öğrenme ve bozulma etkisi dikkate alınmadığı durumda açılan istasyon sayısı 22 bulunmuştur. Öğrenme oranı 0.9 iken, bozulma oranları sırasıyla 0.1 ve 0.2 iken açılan istasyon sayıları sırasıyla 21 ve 23'tür. Burada, bozulma etkisi arttığında istasyon sayısı beklenen şekilde artış göstermiştir. Öğrenme oranı 0.8 iken ve bozulma oranları sırasıyla 0.1 ve 0.2 iken açılan istasyon sayıları sırasıyla 15 ve 18 olarak bulunmuştur. Öğrenme oranındaki 0.10 luk değişim, bozulma oranları 0.1 ve 0.2 iken amaç

Tablo 5. Literatürdeki farklı demontaj problemleri için logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkisi altında elde edilen optimum sonuçlar

Yazar	n	Hibrit PSO-GA Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar									
		Çevrim Süresi	*Optimal Sonuç	öo=0		öo=0.9		öo=0.8		öo=0.7	
				bo=0	bo=0.1	bo=0.2	bo=0.1	bo=0.2	bo=0.1	bo=0.2	
Güngör and Gupta	8	40	4	4	4	4	3	3	3	3	
Mansoor	11	48	4	4	4	4	3	3	2	2	
Mitchell	21	15	8	8	8	8	7	7	5	6	
Gupta et al.	25	18	9	9	9	10	8	8	7	7	
Heskiaoff	28	138	8	8	7	8	5	6	3	4	
Buxey	29	30	12	12	11	12	9	10	7	7	
Lutz-1	32	1414	11	11	9	10	6	7	3	4	
Kilbrid	45	56	10	10	10	11	7	9	5	6	
Hahn	53	2806	6	6	5	6	3	4	3	4	
Tonge	70	364	10	10	9	11	6	7	4	4	
Wee-Mag	75	49	33	33	32	33	29	30	19	21	
Arcus-1	83	7571	16	16	9	11	6	6	5	5	
Lutz-3	89	79	22	22	21	23	15	18	10	11	
Mukherjee	94	222	20	20	18	21	12	15	7	9	
Arcus-2	111	5785	29	29	24	26	14	15	7	7	

Tablo 6. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında amaç fonksiyonundaki değişim (%)

Yazar	Öğrenme ve Bozulma Etkileri Altında Amaç Fonksiyonundaki Değişim (%)					
	öo=0.9		öo=0.8		öo=0.7	
	bo=0.1	bo=0.2	bo=0.1	bo=0.2	bo=0.1	bo=0.2
Güngör and Gupta	0,00	0,00	-25,00	-25,00	-25,00	-25,00
Mansoor	0,00	0,00	-25,00	-25,00	-50,00	-50,00
Mitchell	0,00	0,00	-12,50	-12,50	-37,50	-25,00
Gupta et al.	0,00	11,11	-11,11	-11,11	-22,22	-22,22
Heskiaoff	-12,50	0,00	-37,50	-25,00	-62,50	-50,00
Buxey	-8,33	0,00	-25,00	-16,67	-41,67	-41,67
Lutz-1	-18,18	-9,09	-45,45	-36,36	-72,73	-63,64
Kilbrid	0,00	10,00	-30,00	-10,00	-50,00	-40,00
Hahn	-16,67	0,00	-50,00	-33,33	-50,00	-33,33
Tonge	-10,00	10,00	-40,00	-30,00	-60,00	-60,00
Wee-Mag	-3,03	0,00	-12,12	-9,09	-42,42	-36,36
Arcus-1	-43,75	-31,25	-62,50	-62,50	-68,75	-68,75
Lutz-3	-4,55	4,55	-31,82	-18,18	-54,55	-50,00
Mukherjee	-10,00	5,00	-40,00	-25,00	-65,00	-55,00
Arcus-2	-17,24	-10,34	-51,72	-48,28	-75,86	-75,86

Bu iyileşme oranları, DHD problemlerinin öğrenme ve bozulma etkisi düşünülerek çözülmesi gerektiğini göstermektedir.

fonksiyonu değerinde sırasıyla ~%28.5 ve ~%21.7 azalma sağlanmıştır (Tablo 6). Aynı problem için öğrenme oranı 0.7 olduğunda, bozulma oranları sırasıyla 0.1 ve 0.2 iken açılan istasyon sayıları sırasıyla 10 ve 11 olarak bulunmuştur.

DHD problemlerinin çözümünde öğrenme ve bozulma etkileri dikkate alınmalıdır. Çünkü bu iki olgu gerçek hayatta var olan durumlardır. Yapmış olunan çalışmada, her iki olgunun da problemin çözümünde önemli etkisi olduğu görülmektedir. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında amaç fonksiyonu değeri üzerinde %75'e varan iyileşme görülebilmektedir.

Farklı DHD problemlerinde, aynı öğrenme ve bozulma etkileri ile hesaplanan amaç fonksiyonu değerlerindeki iyileşme oranları farklılık gösterebilmektedir. Çünkü, her DHD problemi için istasyonların çevrim süresi kısıtları farklıdır. DHD problemlerinin çözümünde, istasyonların işleri tamamlama süreleri çevrim kısıtını aşmamalıdır. İşlerin işlem sürelerinin farklı olması ve istasyonlara işler atanırken öncelik ilişkilerinin dikkate alınması gerekliliğinden kaynaklı olarak, istasyonların iş tamamlama süreleri genellikle çevrim süresine eşit olmamaktadır. Böylece istasyonlarda arta kalan zamanlar meydana gelebilmektedir. Öğrenme ve bozulma etkileri altında DHD problemlerinin işlem süreleri genellikle kısaldığı için, işler mevcut istasyonlardaki boş zamanlara kısıtları sağlayacak şekilde dağılır. Dolayısıyla, istasyon sayılarında azalma görülebilmektedir. İstasyonların çevrim süresi arttıkça, istasyona yerleşen iş sayısında artmaktadır. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisi altında, işin işlem süresi kendisinden önceki işlere bağlıdır. Dolayısıyla, bir istasyona ne kadar çok iş atanabiliyorsa, istasyonda daha ileri sıraya atanan işler öğrenmeden o kadar fazla etkilenmektedir. Örneğin; 53 görevden oluşan DHD problemi için herhangi bir etki düşünülmediği durumda 6 istasyon açılması uygun bulunmuştur. Bu durumda istasyon başına ortalama 8.8 iş düşmektedir. 89 parçalı DHD probleminde ise, etkiler düşünülmediğinde istasyon başına 5.2 görev düşmüştür. Öğrenme oranı 0.8 ve bozulma oranı 0.1 olduğunda 53 parçalı problem için açılan istasyon sayısı %50 iyileşme ile 3 bulunurken, 89 parçalı problem için %31.8 iyileşme ile 15 bulunmuştur (Tablo 6).

## Sonuç

Bu çalışmada DHD problemi, eş zamanlı logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altında incelenmiştir. İşler tekrarlandıkça öğrenilir ve daha kısa sürede yapılır. Öğrenme etkisi de DHD problemlerinde işlerin işlem süreleri üzerinde azaltıcı etkiye sahiptir. Logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme etkisinde, bir istasyonda herhangi bir sıraya atanan işin işlem süresi aynı istasyonda kendisinden önceki sıralara atanmış işlerin işlem sürelerinin logaritmik toplamının üstel öğrenme etkisi kuvvetiyle çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. İş bozulması ise, bir işin başlangıç zamanının ötelenmesine sebep olan her türlü bozulmadır. İş bozulması, işin başlama zamanını artırdığı için, işin işlem süresini de artırmış olmaktadır. DHD problemlerinde işlerin işlem sürelerinin sabit olarak alınmaktadır. Oysaki, gerçek hayatta öğrenme ve bozulma, demontaj sürecinde olan durumlardır. Bu çalışmada, DHD literatüründe yaygın olarak kullanılmış olan problemler logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri dikkate alınarak, literatürdeki temel amaç

fonksiyonu olan istasyon sayısı minimizasyonu üzerine çalışılmıştır. Bu problem yapısının çözümü için hibrit PSO-GA algoritması geliştirilmiştir. Kullanılan öğrenme ve bozulma oranları doğrultusunda, açılması gereken istasyon sayısı değerlerinde önemli iyileşmeler kaydedilmiştir. Gelecek çalışmalarda, logaritmik işlem süreleri toplamı tabanlı öğrenme ve iş bozulması etkileri altındaki DHD problemleri için kar maksimizasyonu, artan zaman (idle time) minimizasyonu gibi farklı amaç fonksiyonları için çalışılabilir.

## 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

### SOMTÜRK

Modelin oluşturulması, C# kodunun oluşturulması ve yorumlanması

Çalışmanın yazılması görevlerini üstlenmiştir.

### TOKSARI

Çalışma taslağının oluşturulması ve genel düzeninin planlamasını yapmıştır.

## Kaynaklar

- [1] S. Hezer and Y. Kara, "A network-based shortest route model for parallel disassembly line balancing problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 6, pp. 1849–1865, Mar. 2015.
- [2] S. Agrawal and M. K. Tiwari, "A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, no. 6, pp. 1405–1429, Mar. 2008.
- [3] Z. Li and M. N. Janardhanan, "Modelling and solving profit-oriented U-shaped partial disassembly line balancing problem," *Expert Syst. Appl.*, vol. 183, no. October 2019, p. 115431, 2021.
- [4] K. Wang, X. Li, and L. Gao, "Modeling and optimization of multi-objective partial disassembly line balancing problem considering hazard and profit," *J. Clean. Prod.*, vol. 211, pp. 115–133, 2019.
- [5] E. B. Edis, "Constraint programming approaches to disassembly line balancing problem with sequencing decisions," *Comput. Oper. Res.*, vol. 126, p. 105111, 2021.
- [6] Z. Li, Z. A. Çil, S. Mete, and I. Kucukkoc, "A fast branch, bound and remember algorithm for disassembly line balancing problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 11, pp. 3220–3234, 2020.
- [7] E. Goksoy Kalaycilar, S. Batun, and M. Azizoğlu, "A stochastic programming approach for the

- disassembly line balancing with hazardous task failures,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 60, no. 10, pp. 3237–3262, 2022.
- [8] S. M. McGovern and S. M. Gupta, “A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 179, no. 3, pp. 692–708, Jun. 2007.
- [9] A. Gungor and S. M. Gupta, “Disassembly line balancing,” in *Proceedings of the 1999 annual meeting of the northeast decision sciences institute*, 1999, pp. 193–195.
- [10] A. Güngör and S. M. Gupta, “A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 7, pp. 1427–1467, May 2001.
- [11] A. Güngör and S. M. Gupta, “Disassembly line in product recovery,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 40, no. 11, pp. 2569–2589, Jul. 2002.
- [12] S. M. McGovern and S. M. Gupta, “<Title>2-Opt Heuristic for the Disassembly Line Balancing Problem</Title>,” *Environ. Conscious Manuf. III*, vol. 5262, pp. 71–84, 2004.
- [13] Y. Ren *et al.*, “Disassembly line balancing problem using interdependent weights-based multi-criteria decision making and 2-Optimal algorithm,” *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 1475–1486, 2018.
- [14] S. Mete, Z. A. Çil, K. Ağpak, E. Özceylan, and A. Dolgui, “A solution approach based on beam search algorithm for disassembly line balancing problem,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 41, pp. 188–200, 2016.
- [15] C. B. Kalayci, O. Polat, and S. M. Gupta, “A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 242, no. 2, pp. 321–354, 2016.
- [16] A. Aydemir-Karadag and O. Turkbey, “Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 413–425, 2013.
- [17] C. B. Kalayci and S. M. Gupta, “Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem,” *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 24, no. 3, pp. 413–427, 2013.
- [18] L. P. Ding, Y. X. Feng, J. R. Tan, and Y. C. Gao, “A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 48, pp. 761–771, May 2010.
- [19] C. B. Kalayci and S. M. Gupta, “Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 18, pp. 7231–7241, 2013.
- [20] J. Liu and S. Wang, “Balancing disassembly line in product recovery to promote the coordinated development of economy and environment,” *Sustain.*, vol. 9, no. 2, 2017.
- [21] C. B. Kalayci and S. M. Gupta, “A tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line,” *Prod. Plan. Control*, vol. 25, no. 2, pp. 149–160, Jan. 2014.
- [22] C. B. Kalayci and S. M. Gupta, “A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, pp. 197–209, 2013.
- [23] S. Xiao, Y. Wang, H. Yu, and S. Nie, “An entropy-based adaptive hybrid particle swarm optimization for disassembly line balancing problems,” *Entropy*, vol. 19, no. 11, p. 596, 2017.
- [24] Y. Ren, D. Yu, C. Zhang, G. Tian, L. Meng, and X. Zhou, “An improved gravitational search algorithm for profit-oriented partial disassembly line balancing problem,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 24, pp. 7302–7316, Jun. 2017.
- [25] Z. Zhang, K. Wang, L. Zhu, and Y. Wang, “A Pareto improved artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective fuzzy disassembly line balancing problem,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 86, pp. 1339–1351, 2017.
- [26] L. Zhu, Z. Zhang, and Y. Wang, “A Pareto firefly algorithm for multi-objective disassembly line balancing problems with hazard evaluation,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 24, pp. 7354–7374, 2018.
- [27] F. T. Altekin, L. Kandiller, and N. E. Ozdemirel, “Profit-oriented disassembly-line balancing,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, no. 10, pp. 2675–2693, May 2008.
- [28] F. T. Altekin, “A comparison of piecewise linear programming formulations for stochastic disassembly line balancing,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 24, pp. 7412–7434, Jul. 2017.
- [29] S. Mete, Z. Abidin Çil, E. Özceylan, and K. Ağpak, “Resource constrained disassembly line balancing problem,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 921–925, 2016.
- [30] M. A. Ilgin, H. Akçay, and C. Araz, “Disassembly line balancing using linear physical programming,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 20, pp. 6108–6119, Oct. 2017.
- [31] T. Paksoy, A. Güngör, E. Özceylan, and A. Hancılar, “Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 20, pp. 6082–6096, Oct. 2013.
- [32] E. Özceylan and T. Paksoy, “Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 20, pp. 5985–6001, 2013.
- [33] E. Özceylan, C. B. Kalayci, A. Güngör, and S. M. Gupta, “Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions,” *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 15–16. Taylor and Francis Ltd., pp. 4805–4827, 2019.

- [34] Y. Laili, Y. Li, Y. Fang, D. T. Pham, and L. Zhang, "Model review and algorithm comparison on multi-objective disassembly line balancing," *J. Manuf. Syst.*, vol. 56, no. July, pp. 484–500, 2020.
- [35] G. Mosheiov, "Scheduling problems with a learning effect," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 132, no. 3, pp. 687–693, 2001.
- [36] T. P. Wright, "Factors Affecting the Cost of Engineering," *J. Aeronaut. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 122–128, 1936.
- [37] D. Biskup, "Single-machine scheduling with learning considerations," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 115, pp. 173–178, 1999.
- [38] T. C. E. Cheng and G. Wang, "Single machine scheduling with learning effect considerations," *Ann. Oper. Res.*, vol. 98, pp. 273–290, 2000.
- [39] M. D. Toksari, E. K. Aydogan, B. Atalay, and S. Sari, "Some scheduling problems with sum of logarithm processing times based learning effect and exponential past sequence dependent delivery times," *J. Ind. Manag. Optim.*, vol. 18, no. 3, pp. 1795–1807, 2022.
- [40] T. C. E. Cheng, P. J. Lai, C. C. Wu, and W. C. Lee, "Single-machine scheduling with sum-of-logarithm-processing-times-based learning considerations," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 179, no. 18, pp. 3127–3135, 2009.
- [41] X. X. Liang, B. Zhang, J. B. Wang, N. Yin, and X. Huang, "Study on flow shop scheduling with sum-of-logarithm-processing-times-based learning effects," *J. Appl. Math. Comput.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 373–388, 2019.
- [42] J. B. Wang and Z. Q. Xia, "Flow-shop scheduling with a learning effect," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 56, no. 11, pp. 1325–1330, 2005.
- [43] J. N. D. Gupta and S. K. Gupta, "Single facility scheduling with nonlinear processing times," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 387–393, 1988.
- [44] M. M. Mazdeh, F. Zaerpour, and F. F. Jahantigh, "A fuzzy modeling for single machine scheduling problem with deteriorating jobs," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 1, no. 2, pp. 147–156, 2010.
- [45] O. A. Arik and M. D. Toksari, "Minimizing makespan with fuzzy processing times under job deterioration and learning effect," *J. Ind. Eng.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–17, 2020.
- [46] S. M. McGovern and S. M. Gupta, "Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 30, no. 5–6, pp. 481–496, 2006.
- [47] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 1995, pp. 1942–1948.
- [48] J. M. Nilakantan and S. G. Ponnambalam, "Robotic U-shaped assembly line balancing using particle swarm optimization," *Eng. Optim.*, vol. 48, no. 2, pp. 231–252, 2016.
- [49] H. Garg, "A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 274, pp. 292–305, 2016.
- [50] S. M. Gupta, E. Erbis, and S. M. McGovern, "Disassembly sequencing problem: a case study of a cell phone," *Environ. Conscious Manuf. IV*, vol. 5583, pp. 43–52, 2004.
- [51] S. M. McGovern and S. M. Gupta, "Uninformed and probabilistic distributed agent combinatorial searches for the unary np-complete disassembly line balancing problem," *Environ. Conscious Manuf. V*, vol. 5997, pp. 81–92, 2005.
- [52] C. B. Kalayci, S. M. Gupta, and K. Nakashima, "A Simulated Annealing Algorithm for Balancing a Disassembly Line," *Des. Innov. Value Towar. a Sustain. Soc.*, no. 1, pp. 714–719, 2012.
- [53] L. Duta, I. Caciula, and P. C. Patric, "Column generation approach for disassembly line balancing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 916–920, 2016.
- [54] A. Scholl, "Data of assembly line balancing problems," *Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre*, vol. 93, no. 16, pp. 1–28, 1995.
- [55] G. Mosheiov, "A-shaped policies to schedule deteriorating jobs," *Journal of the Operational Research Society*, 47(9), pp.11841191,1996.





## Güneyköy (Eşme, Uşak)'de Yeralan Altınlı Kuvars Damarlarındaki Arsenopiritlerin Skoroditleşmesi ve Mineralojik özellikleri

### *Mineralogical Features and Scoroditization of Arsenopyrites in Auriferous Quartz Veins Located Around Güneyköy (Eşme, Uşak)*

Asuman KAHYA\*<sup>1</sup>, Öznür KANAAT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 06800, Ankara, Türkiye, [asuman27@gmail.com](mailto:asuman27@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-3387>

<sup>2</sup>Aksaray Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye, [oznuraslan8612@gmail.com](mailto:oznuraslan8612@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8174-7102>

#### MAKALE BİLGİLERİ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ağustos 2023  
Revizyon 3 Kasım 2023  
Kabul 4 Kasım 2023  
Online 31 Aralık 2023

##### Anahtar Kelimeler:

*Skorodit, Au, kuvars damarları, Güneyköy, Menderes Masif, Batı Anadolu*

#### ÖZ

Bu çalışmada, Güneyköy'de (Eşme, Uşak) yeralan Paleozoik yaşlı granitik gnayslarda bulunan Au- içerikli arsenopiritli kuvars damarlarında gelişen skoroditleşmenin mineralojik-petrografik özellikleri ile Au-skoroditleşme ilişkisi incelenmiştir. Çalışma alanında, başlıca en yaygın cevher minerali arsenopirittir. Arsenopiritler kenar ve dilinimleri boyunca skorodite dönüşmüşlerdir. Yapılan jeokimyasal analizlere göre arsenopiritlerin Au içeriği 0,5 ppm ile 10 ppm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Petrografik çalışmalarda ise arsenopiritlerde mikroskobik olarak görülebilir Au olmamasına rağmen arsenopiritin alterasyon ürünü olan skoroditte mikroskobik olarak 30-100 µm boyutunda Au taneleri olduğu belirlenmiştir. Arsenopirit ve arsenopiritte yeralan Au hipojen olarak oluşurken, arsenopiritin alterasyonu sürecinde oluşan skorodit ile skoroditteki Au birikmesi ise süperjen oluşum olarak tanımlanmıştır.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 5 August 2023  
Received in revised form 3 November 2023  
Accepted 4 November 2023  
Available online 31 December 2023

*Keywords: Skorodite, Au, auriferous quartz veins, Güneyköy, Menderes Masif, West Anatolia*

#### ABSTRACT

In this study, the relationship between mineralogical-petrographic features and Au-scoroditization of the arsenopyrite in the auriferous- arsenopyrite quartz veins found in the Paleozoic granitic gneisses in Güneyköy (Eşme, Uşak). The most common ore mineral in the study area is arsenopyrite. Arsenopyrites have transformed into scorodite along their margins and cleavages. According to the geochemical analyzes, it was determined that the Au content of arsenopyrites varied between 0.5 ppm and 10 ppm. Although in petrographic study, there is no microscopically visible Au in arsenopyrite, it has been determined that 30-100 µm in size Au grains are microscopically in scorodite, which is the alteration product of arsenopyrite. While the Au in arsenopyrite and arsenopyrite is formed as hypogene, the accumulation of Au in scorodite and scorodite occurred as supergene during the alteration of arsenopyrite.

Doi: 10.24012/dumf.1338160

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Au içerikli-arsenopiritli kuvars damarları, Batı Anadolu'da, Uşak İlinin 74 km güneybatısında yer alan Güneyköy'de bulunmaktadır. Bu Au içerikli-arsenopiritli kuvars damarları Menderes Masifi'nin metamorfik kayalarında yer almaktadır. Menderes masifinin temel kayacı olan, Paleozoyik yaşlı Güneyköy Formasyonunu oluşturan gnays ve mikaşistlerde bulunan arsenopiritli kuvars damarları, Au içeriği açısından önemlidir. Arsenopiritler kenar ve dilinimleri boyunca skorodite dönüşmüşlerdir. Skorodit arsenopiritin çatlak ve dilinimleri boyunca ve diğer mineraller arasında ince damar, şerit ya da cep şeklinde gözlenmektedir. Skorodit, arsenopiritin ayrışma ürünü olarak oluşan ikincil mineraldir ve arsenopiritin yerini alması sonucu oluşmaktadır. Skorodit'in kimyasal formülü  $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$  (scd) dir. Yapılan petrografik incelemelerde arsenopiritlerde mikroskopik olarak Au bulunmamış olmakla birlikte jeokimyasal analizlerde ise Au içeriğinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Yani mikroskopik ve makroskopik olarak görülmeyen Au (invisible Au) olduğu belirlenmiştir, buna karşılık skoroditlerde ise mikroskopik olarak mikron boyutunda, tek taneler ya da küçük taneli gruplar halinde Au gözlenmektedir. Bu bölgede yapılan önceki çalışmalar bölgenin mineralojisi, genel jeolojisi, tektoniği ve cevherleşmenin kökeni ile ilgilidir [1]-[8]. Bu çalışmanın amacı ise, Güneyköy Au yağında, arsenopirit ve skorodit Au içeriği açısından karşılaştırılarak, Au içeriği açısından arsenopirit-skorodit ilişkisini belirlenecektir.

## Materyal ve Metot

Laboratuvar çalışmaları, saha çalışmalarına paralel olarak yürütülmüştür. Toplam 14 örnek üzerinde mineralojik ve petrografik çalışmalar yaptırılmıştır. Çalışma alanından derlenen 14 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 ile gerçekleştirilmiştir. Kalitatif analizler ICDD kartları ile karşılaştırma yapılarak gerçekleştirilmektedir. 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. İnce ve parlak kesitler ise MTA ince ve parlak kesit yapım atölyelerinde

yaptırılmıştır. Bu kesitler, 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 cevher örneğinin SEM+EDS analizleri MTA Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarında, FEI Inspect F50 FEG-SEM cihazı ile yaptırılmıştır.

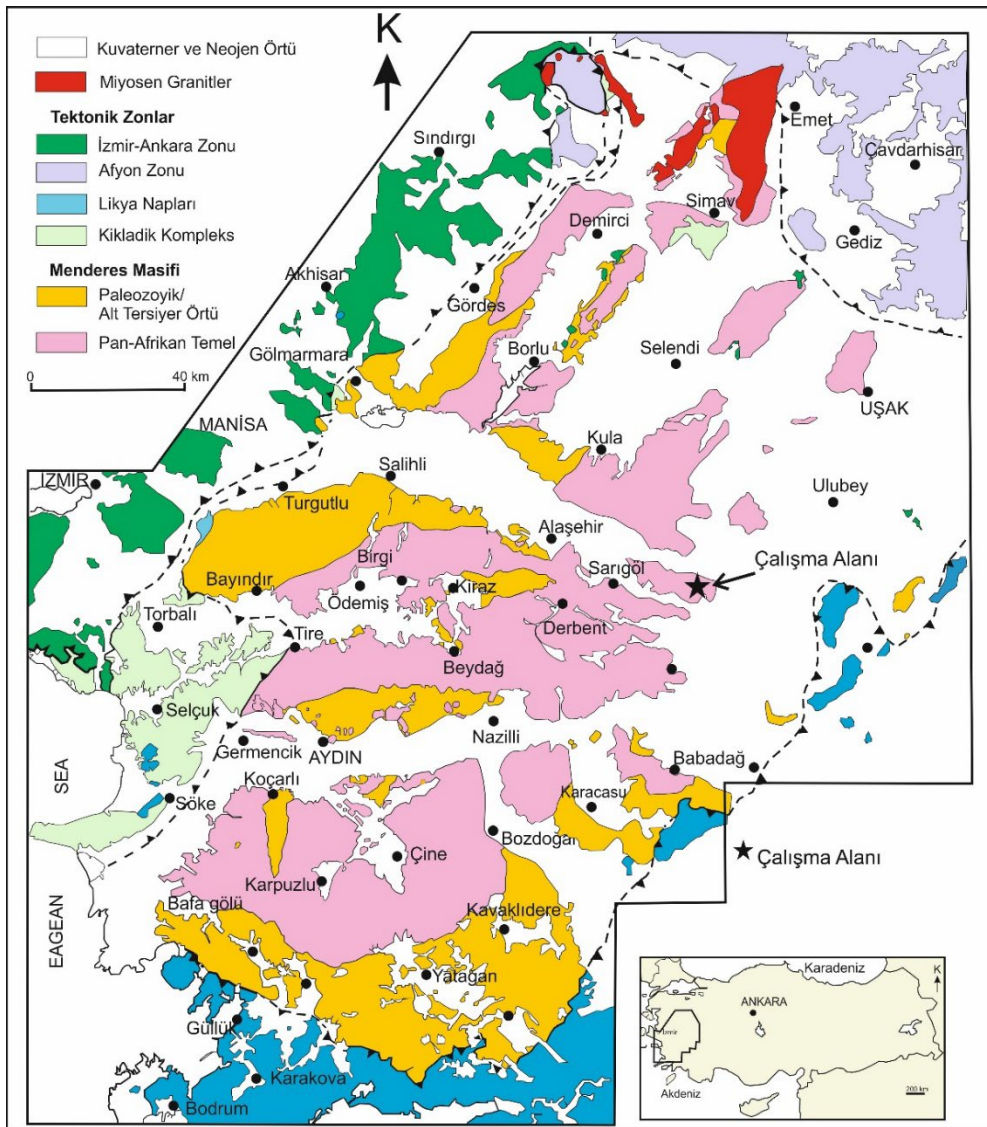
## Bulgular

### Bölgesel Jeoloji

Çalışma alanı Batı Anadolu Bölgesi'nde, Uşak İli sınırlarında yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanının içinde bulunduğu bölge, Menderes Masifinde yer almaktadır. KD-GB uzanımlı Menderes Masifi (200 x 300 km) Batı Anadolu'nun en büyük kabuksal segmentlerinden birini oluşturmaktadır. Bu kristalin kompleks güneyde Likya napları, kuzey ve kuzey batıda ise İzmir - Ankara Zonu ve Kikladik Kompleksin Türkiye'deki uzantısı tarafından tektonik olarak üzerlenmektedir. Masif doğuda ise Neojen yaşlı tortul/volkanik birimlerle örtülmektedir. Menderes Masifi günümüzde aktifliğini sürdüren D-B uzanımlı graben sistemleriyle Demirci-Gördes asması (kuzey asması), Ödemiş-Kiraz asması (orta asması) ve Çine asması (güney asması) olmak üzere üç asması bölünmüştür (Şekil 1). Çalışma alanı Gördes ve Eğrigöz submasifinde yer almaktadır (Şekil 1) [9]. Menderes Masifi i) Pan-Afrikan yaşlı temel ve ii) Paleozoyik - Erken Tersiyer yaşlı örtü serileri olmak üzere iki ana kaya topluluğuna ayrılmaktadır [10]. Pan-Afrikan yaşlı temel kayaları, ilksel çökme yaşı Geç Proterozoyik [11] olan kırıntılı metasedimentlerden oluşmaktadır. Örtü serileri ise kendi içerisinde Paleozoyik ve Mesozoyik-Alt Tersiyer kayaları olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Paleozoyik serileri baskın olarak kuvarsit, fillit ve mermerlerden oluşmaktadır [12]. Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşlı seriler ise alt düzeylerinde metakonglomera arakatlı şist ile başlamakta ve bir geçiş zonuyla zımpara mercerleri içeren platform türü kalın metakarbonatlara geçmektedir. Karbonatlar pelajik mermer tarafından üzerlenmekte ve istif metaolistostromla sonlanmaktadır [10],[12]. Çalışma alanının bulunduğu, Pan Afrikan Temel kayalar yüksek sıcaklık granülit-fasiyesinde metamorfizmaya maruz kalmışlardır [13],[14]. Pan-Afrikan

metamorfizması, Geç Prekambriyen-Erken Paleozoik orojenezi sürecinde kıtasal kalınlaşma ve bindirmeden (overthrusting) kaynaklanmaktadır [15],[16]. Çalışılan altınlı kuvars damarları, Prekambriyen yaşlı yeşilist fasiyesinde metamorfizmaya uğramış granitik gnaylarda yer almaktadır. Menderes Masifi'nin Pan-Afrikan temelini en yaşlı birimlerini kısmen migmatitleşme sunan paragnays ve mika şistlerden oluşan metakırıntılı seri oluşturur. Geç Proterozoyik yaşlı bu kayalar Prekambriyen-Kambriyen'de Pan-Afrikan orojenezi ile ilişkili granit, ekloit ve amfibolit fasiyesi koşullarında çoklu metamorfizmadan etkilenmişlerdir [10], [17]-[19]. Temel serileri Pan-Afrikan Orojenezi ile ilişkili

yaygın asidik/bazik magmatikler tarafından kesilmektedir [13], [20]-[22]. Bu görüşlerin aksine, son yıllarda özellikle Çine Asması'nın güneyinde yapılan tektonik çalışmalarda, temele ait en tipik kayalar olan ve jeokronolojik çalışmalarla Pan Afrikan yaşlı olduğu yönünde yaygın veriler elde edilen asidik magmatiklerin (ortognayslar), i) Geç Kretase [23] veya ii) Erken Tersiyer [24] yaşlı sokulumlar oldukları yönünde görüşler ileri sürülmektedir. Jeokronolojik veriler, Pan-Afrikan ortognaysların ilksel kayalarını oluşturan ana asidik magmatik aktivite fazının 550 My belkide 520-570 My arasında (Geç Proterozoyik-Kambriyen) gerçekleştiğini göstermektedir [20]-[22], [25]-[28].



Şekil 1. Menderes Masifi'nin basitleştirilmiş bölgesel jeoloji haritası [19].

### Çalışma Alanının Jeolojisi

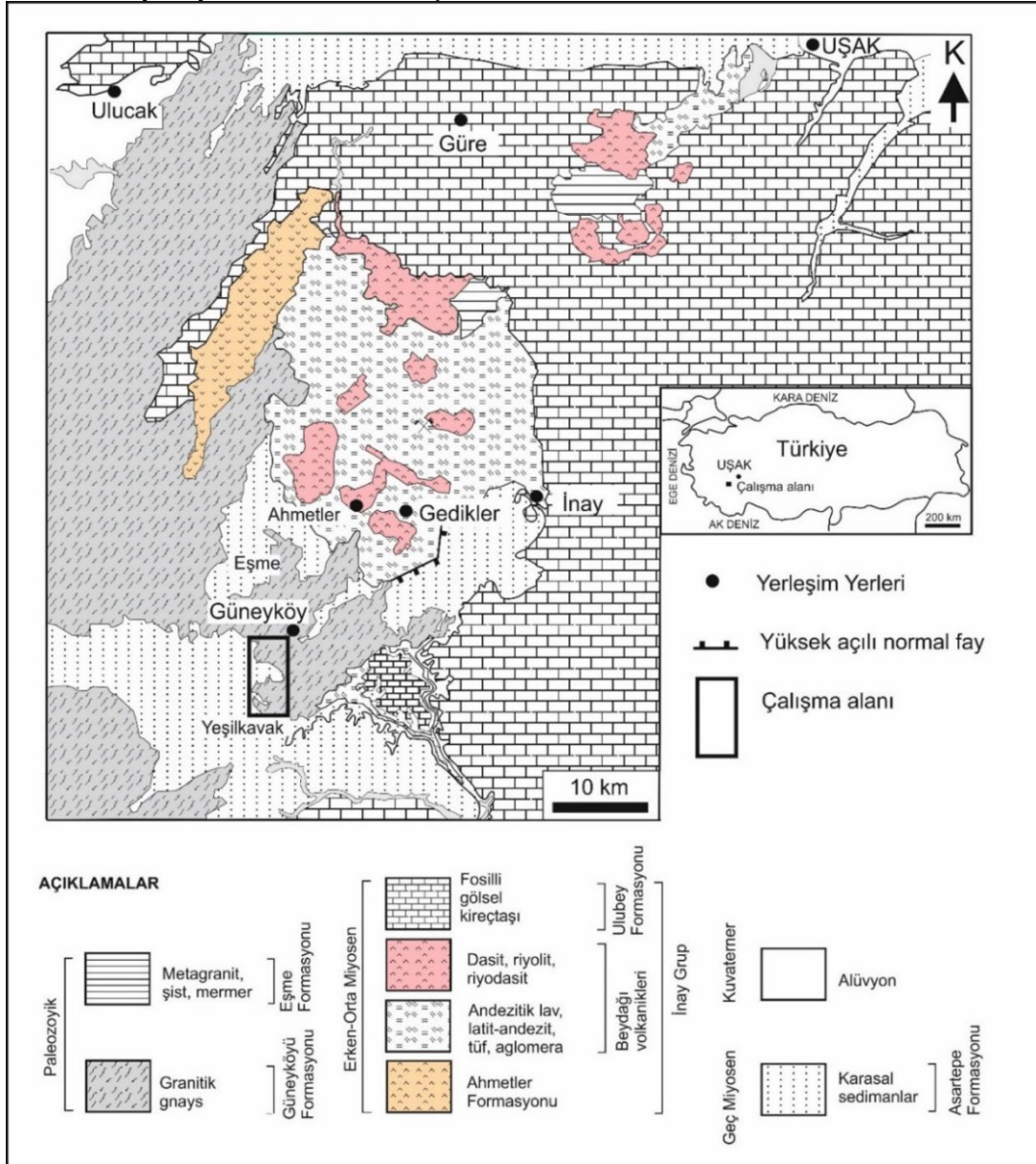
Uşak (Eşme) Güneyköyünde yer alan çalışma alanı, Menderes masifinin temel kayacı olan ve granitik gnaylardan oluşan Paleozoyik yaşlı Güneyköyü

Formasyonu içinde yer almaktadır (Şekil1). Bu formasyon Güneyköy çevresinde iyi yüzeylenmektedir; Menderes masifinin çekirdek kayacına aittir ve pembe-beyaz renkli iri taneli olup aplit, kuvars damarları ve silisce zengin anklavlar içermektedir [1],[29]. Arsenopiritli kuvars



damarları, bu birimlerde yer almaktadır. Bu birim metagranit, şist ve mermerlerden oluşan Paleozoyik yaşlı Eşme Formasyonu tarafından üzerlenmektedir. Bu birimin stratigrafik olarak alt kesiminde, parajen gnayslar granitik gnaysların üzerinde yanal ve düşey geçişli olarak yer almaktadır. Yukarıya doğru gnaysların tane boyutu küçülerek ve ince taneli biyotit gnayslara geçmektedir. Menderes Masifi örtü şistleri üzerinde, mikaşistler, kuvars-muskovit şistler, granat şistler, klorit şistler, serizit şistler gibi ince taneli şistler yer almaktadır. Örtü şistinin üst kesimlerine doğru, ince mermer bantları içeren şistler bulunmaktadır [1], [29]. Bu birimlerin üzerine Miyosen yaşlı Ahmetler formasyonu gelmektedir ve aşağıdan yukarıya doğru Merdivenlikuyu, Balıkcıdere ve Gedikler üyesi olmak üzere üç üyeden oluşmaktadır. Merdivenlikuyu üyesi, yamaç molozlarından oluşmaktadır. Bu üye uyumlu olarak Balıkcıdere

üyesi tarafından örtülmektedir ve akarsu çökel ortamını temsil eden konglomera, kumtaşı, tüfit, kiltası, marn ve kireçtaşlarından oluşmaktadır. Balıkcıdere üyesi, Gedikler üyesi tarafından uyumlu olarak örtülür ve göl ortamında oluşmuş silttaşı, kiltası ve tüfitlerden oluşmaktadır [1],[29]. Beydağ volkanik kayaları, piroklastik kayalardan (riyolitik, andezitik tüfler ve aglomeralar) oluşmaktadır. Ulubey Formasyonu, Ahmetler formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir ve fosilli gölssel kireçtaşlarından oluşmaktadır. Geç Miyosen yaşlı [30] Asartepe formasyonu çalışma alanının güney ve kuzeyinde yüzeylenir ve konglomera ile kumtaşından oluşmaktadır. Kumtaşları ile konglomeralar ardalanmalı olup yer yer ince mamlı-kireçtaşı seviyeleri içermektedir. Bu birimlerin tümü Kuvaterner yaşlı sedimanlar tarafından üzerlenmektedir [1], [29].

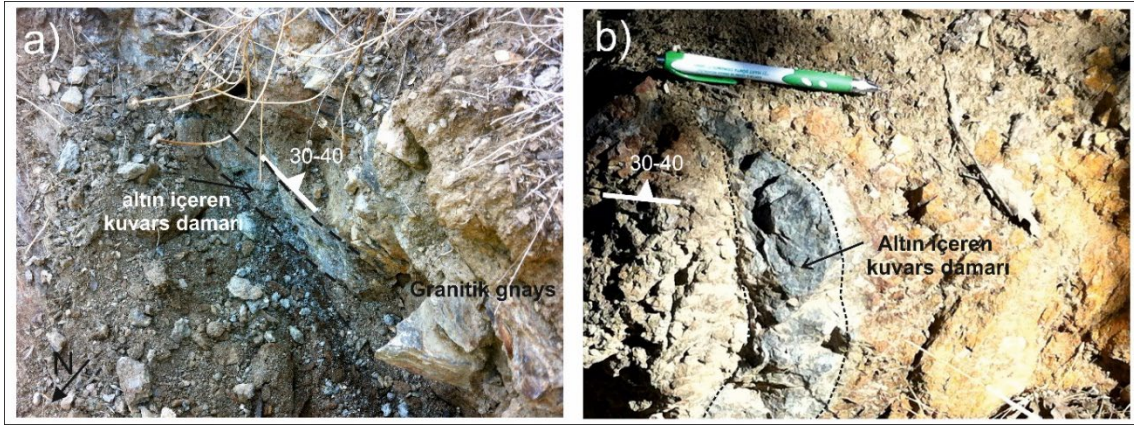


Şekil 2. Çalışma alanının jeolojik haritası [12]'den değiştirilerek alınmıştır [8].

## Mineraloji Petrografi

Çalışma alanında incelenen, altınlı-arsenopirit kuvars damarları, Menderes Masifi'nin tabanında yer alan Güneyköy formasyonunun şist ve gnayslarında yer almaktadır. Bu arsenopiritli-kuvars damarları, şist çatlakları ve şistozite düzlemi ile uyumsuz olarak yada şistozite düzlemlerini keserek, yarı uyumsuz olarak yer almaktadır (Şekil 3, [8]). Bu arsenopiritli-kuvars damarları 15 cm kalınlığına kadar çıkabilmektedir ve K-B yönünde, 40° KD eğimli, 1.5-2 m uzunluğunda yüzeyde gözlenebilmektedir. Baskın şistozite düzlemi D-B yönünde olup 30°S eğimlidir [8]. Cevher mikroskopisi incelemelerine göre, başlıca cevher mineralleri, yaygın olarak arsenopirit az miktarda

pirit, ilmenit, hematit, rutil, eser miktarda limonit, kalkopirit, kovelin ve limonitten oluşmaktadır. Parlak kesit örneklerinde, yaygın olarak gözlenen arsenopirit mineralleri, özşekilsiz-yarı özşekilli, <5-150 mikrometre arasında tane boyunda, bazı örneklerde 600 mikrometreden daha büyük masif agregalar halinde, çoğunlukla kataklastik yapıda gözlenmektedir. Arsenopiritlerin kristal sınırları ve kırıkları boyunca skorodit oluşumları gözlenmiştir. Pirit, arsenopirit içinde inklüzyon veya arsenopiritin kırıklarında ve/veya arsenopirit kristalleri arasında bulunmaktadır, kısmen veya tamamen markazite dönüşmüştür [8].



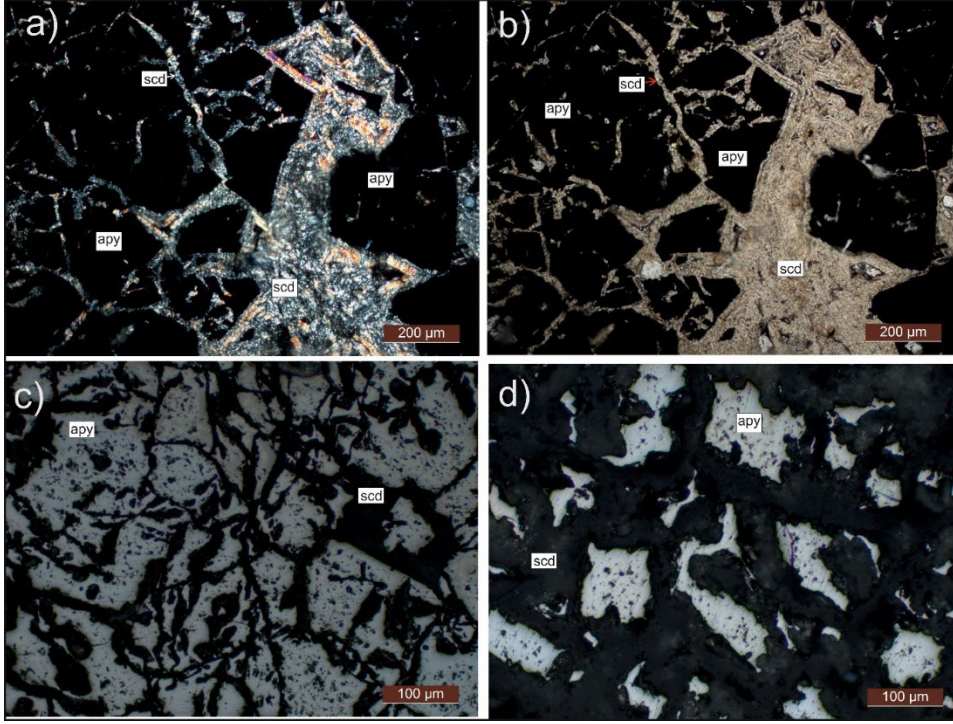
Şekil 3. a) Yan kayacın şistozitesine paralel kuvars damarı, b) Yan kayacın şistozitesi ile yarı uyumlu kuvars damarı.

## Skoroditin Mineralojik Petrografik Özellikleri

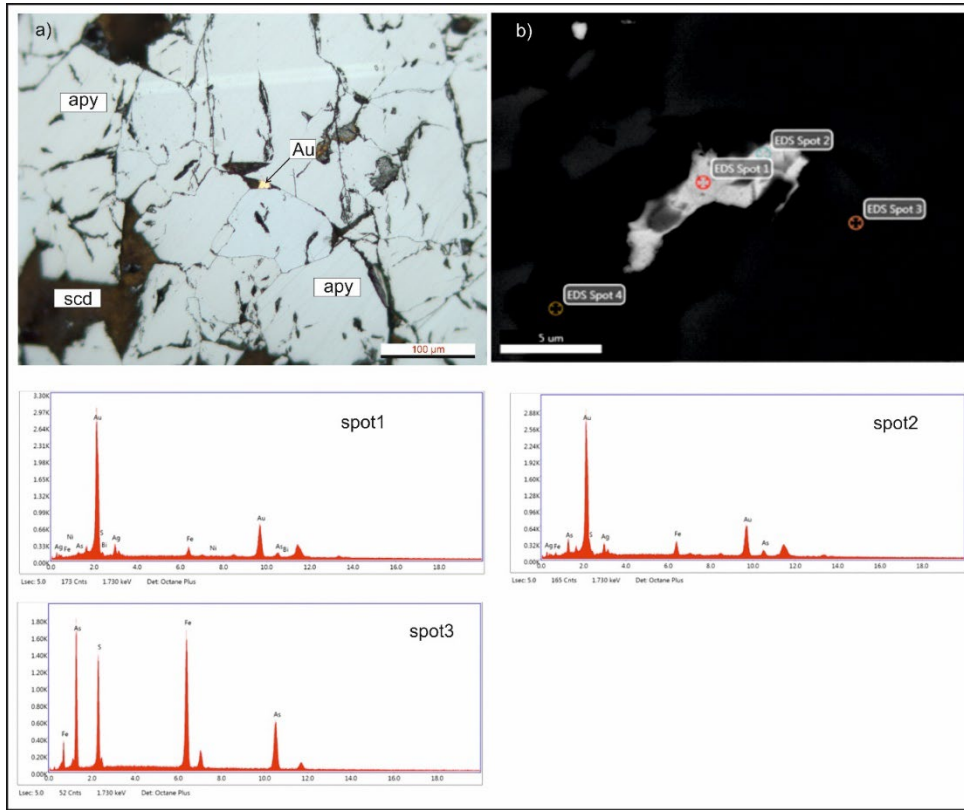
Parlak kesit çalışmalarında, inceleme alanındaki kuvars damarlarında, yer yer masif, yer yer saçınımlı olarak gözlenen arsenopiritler kenar ve dilinimleri boyunca skorodite dönüşmüşlerdir. Skoroditler arsenopiritlerin çatlak ve dilinimleri boyunca ince damar, şerit yada cep şeklinde gözlenmektedir (Şekil 4). Skoroditler, arsenopiritlerin ayrışma ürünüdür ve arsenopiritlerin yerini alması sonucu ikincil olarak oluşmaktadır, bu nedenle skoroditleşmenin ilerlemesi arsenopiritlerin iskeletimsi görüntü almasına neden olmaktadır ve kalıntı arsenopiritler oluşmaktadır [31]. Çalışma alanında skoroditleşmenin ilerlemesi ile arsenopiritlerde kalıntı doku görünümü oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4d). Bazı örneklerde skoroditlerin mikroskopik görünümü, daha kristalli

ve özşekillidir, ancak genel olarak kriptokristalin görünümündedirler (Şekil 4 a,b). Alterasyonun ilk aşamalarında arsenopiritlerin tane sınırları, kırık-çatlakları boyunca skoroditleşmenin geliştiğini yani skoroditleşme başlangıçta tane sınırları boyunca başladığı, daha sonra, tane sınırına dik uzun-ince kapanımlar yoluyla mineralin içine yayılabildiği, sadece skorodit kalana kadar arsenopiriti parçalayabildiği belirtilmiştir. Daha sonra ise bazı arsenopirit tanelerinin kenar-köşelerinin bozulduğu, mineral taneleri arasında breşleşme görüntüsü oluştuğu ve son olarak arsenopiritlerin çoğunlukla skorodit tarafından yeri alındığı ve arsenopiritlerde iskeletimsi, kalıntı dokunun oluştuğunu belirtilmiştir [31]. Çalışma alanındaki arsenopiritlerde hem ilk aşama (Şekil 4c), hemde skoroditleşmenin ilerlediği arsenopiritlerdeki kalıntı dokuların oluştuğu aşama gözlenmiştir (Şekil 4d).





Şekil 4. a, b) Arsenopiritlerin kenar ve çatlakları boyunca oluşan skoroditlerin mikroskopik görüntüsü a: 2. Nikol, UK-2, b) 1. Nikol görüntüsü. c) Arsenopiritlerin, kataklastik görüntüsü ve kırık-çatlakları boyunca oluşan skoroditleşme (parlak kesit, Uk-3), d) Skoroditleşmenin artması sonucu, arsonopiritlerdeki kalıntı, iskeletimsi yapılar (Uk-5)



Şekil 5. a) Skoroditdeki Au'nun parlak kesit görüntüsü, b) SEM+EDX skorodit, arsenopirit.



Tablo1. SEM/EDX ana oksit değerleri (wt%)

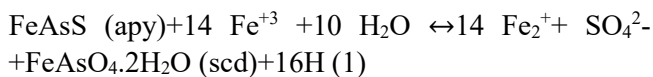
Örnek No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ana oksit (Wt %)														
O	38.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37.38	-	-	39.06
Fe	26.92	34.92	16.53	35.01	18.91	17.81	35.39	4.10	6.18	35.39	26.39	1.56	35.34	26.88
As	34.47	-	16.71	45.62	18.08	18.53	44.40	-	-	45.44	34.54	-	45.24	34.06
S	-	18.90	7.28	19.36	12.08	7.98	20.21	1.39	4.66	19.17	1.69	2.26	19.43	-
Ag	-	-	-	-	-	-	-	10.19	9.07	-	-	12.93	-	-
As	-	46.17	-	45.62	18.08	-	-	3.84	5.35	-	-	1.52	-	-
Au	-	-	1.81	-	31.98	-	-	79.64	74.74	-	-	81.74	-	-
Bi	-	-	57.68	-	18.95	55.68	-	0.51	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	0.32	-	-	-	-	-	-

### Skoroditin ve arsenopiritin SEM+EDX Özellikleri

Çalışma alanında arsenopiritlerin petrografisi incelendiğinde mikroskobik olarak Au olmadığı, skoroditlerde ise mikroskobik olarak mikron boyutunda (30-100 µm), tek taneler halinde ve küçük taneli gruplar halinde skorodit matriksinde, skorodit-arsenopirit sınırında yani arsenopiritler ile dokanaklı Au taneleri gözlenmiştir (Şekil 5 a). Au oluşumu genellikle bizmut taneleri ve çatlak dolgusu şeklindedir. Örneğin bazı yerlerinde Au ile Bizmut birlikte görünürken, bazı yerlerinde bizmuttan uzakta bulunmaktadır (Şekil 5). Çalışma alanında arsenopiritli kuvars damarlarının jeokimyasal verilere göre Au içeriği 0.5 ppm ile 10 ppm arasında, Ag içeriği ise 0.1 ppm ile 20.3 ppm arasında olduğu belirlenmiştir [8]. Tablo 1'de SEM/EDX analizlerinin ana oksit değerlerine Au değeri % 1.81 ile 81.74 aralığında; Ag değeri ise % 9.07 ile 12.93 aralığında değişmektedir. Arsenopiritlerde mikroskobik olarak görülebilir altın olmamasına rağmen altın içeriği yüksek olduğu görülmektedir.

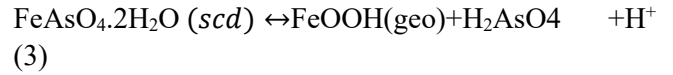
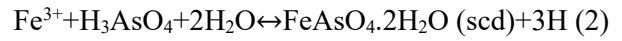
### Tartışma ve Sonuç

Skorodit arsenopiritin yüzey koşullardaki basınç-sıcaklık (P-T) alterasyonu ürünüdür [32],[33]. Skorodite, arsenopiritin düşük çözünürlüklü ayrışma ürünüdür, oksitleyici ve asidik koşullarda çökeler [33],[34].



Skorodit arsenopiritin oksidasyonu sonucu oluşmaktadır, lokal olarak düşük Ph, yüksek arsenat ve Fe aktivitesi gerektirir. Skoroditleşme reaksiyonu devam ettiğinde, arsenopirit tükendikten sonra, Fe ve arsenat konsantrasyonu azalacaktır, bu da Ph'da bir artışa neden olacaktır, skoroditten doğal olarak götit oluşacağından (reaksiyon 3), arsenatın artmasına yol

açacaktır (reaksiyon 2). Tüm bu reaksiyonlar, sistemi daha asidik hale getirmede etkili olan hidrojenin serbest kalmasına neden olmaktadır [31].



Çalışma alanında parlak kesitlerde götit minerali gözlenmediği için reaksiyonun bu aşamaya gelmediği belirlenmiştir. Süperjen alterasyon sürecinde, sülfür (kükürt) oksijenin yerini alınca arsenopirit molekülüleri hidratlanır ve skorodite dönüşür, ayrıca oksijen arsenopiritin kristal kafesi içinde mikroskobik olarak görünmeyen altını (invisible gold) serbest bırakır [35],[36]. Yani sülfürlerin deformasyona maruz kalması durumunda, daha önceki süreçlerle oluşmuş görünmez altının büyük bir kısmı, sülfidin kristal kafesinden atılır [37],[38]. Skorodit matriksinde görünür tanecikler olarak bulunan, görülebilir altın taneciklerini oluşturmak için mobilize olan altının süperjen zenginleşme ile birikmiş olması mümkündür [31]. Sülfürlerin deformasyona maruz kalması durumunda, daha önceki süreçlerle oluşmuş görünmez altının büyük bir kısmı sülfid kristal kafesinden atılacaktır [37],[38]. Görünmez altın, sıcaklık artışı (heating) ve basınç artışı süreci sırasında sülfitlerden atılır [39],[35] kimyada, kurşunun bir femiroksihidroksit ile yer değiştirmesi, skorodit gibi, eğer çok az miktarda klorit varsa, bu klorit metalleri taşıma işlevi görür ve hem altını hemde gümüşü parçalayabilir ve çözebilir. Skorodit oluşurken de, klor sistemde muhtemelen bol olarak bulunmaktadır, oldukça yüksek NaCl/H<sub>2</sub>O oranına ve düşük sıvı kapanım donma sıcaklıklarına dayalı olarak klor sistemde muhtemelen bol olarak bulunmaktadır. Skorodit oluşum reaksiyonları nedeniyle sistemde Ph düşer, çünkü AuCl<sub>4</sub> yalnızca 0.8 civarında oldukça yüksek Eh'de çözünürdür, altın skorodit içinde küçük parçacıklar olarak hızla yeniden çökeler, fakat AgCl<sub>4</sub> ise hala çözelti halindedir ve sistemden ayrılarak,

sistemdeki gümüşü tüketebilir [35],[36],[40]. Altın ile birlikte bulunan gümüş miktarından, superjen altını hidrotermal altından ayırt etmek mümkündür. Eğer, soğuyan (cooling) hidrotermal çözeltiden çökelse, altın genellikle gümüş ile birlikte bulunur [41]. Superjen alterasyona maruz kalan altın, homojen iz element bileşimine daha yatkındır [42]. Çalışma alanında altın içeren arsenopiritli örneklerde Au ile birlikte Ag olması hidrotermal sistemi desteklemektedir. Skoroditin varlığı, hidrotermal süreçlere maruz kalmadan daha çok süperjen alterasyonu desteklemektedir, skorodit arsenopiritin süperjen alterasyon ürünü olarak tanımlanmaktadır ve yüzey P-T koşullarında arsenik sistemin duraylı (stable) versiyonu olarak tanımlanmıştır [32],[33]. Çalışma alanındaki arsenopiritli kuvars damarları, hipojen damar oluşumu ve diğer ilksel olaylar nedeniye ilksel altını içermektedir. Çalışma alanındaki altın içeren arsenopiritli kuvars damarlarındaki ilksel cevherleşmeyi oluşturan çözeltiler metamorfik çözeltilerden türemiştir ve cevherleşme orojenik-tip cevherleşmedir [8]. Altının çözelti ile arsenopiritin yapısından çıkması ve arsenopiritin dışında tekrar çökmesi daha sonra gelişen, yüzey koşullardaki basınç-sıcaklık (P-T) alterasyon sonucunda oluşmaktadır, arsenopirit skorodite dönüşür ve bu süreçte Au skoroditte tekrar birikir [31]. Çalışma alanında hem arsenopirit hemde arsenopiritin alterasyon minerali skoroditte Au bulunmaktadır. Skorodit ile arsenopirit eş zamanlı değerlerdir. Skorodit, arsenopiritin alterasyonu ile oluşmuştur ve arsenopiritin yerini almıştır. Arsenopiritte görünmeyen Au vardır, skoroditte ise remobilize mikroskobik olarak görülebilen, büyük ve küçük taneler halinde Au vardır. Dolayısı ile arsenopiritlerdeki Au oluşumu hipojen oluşum olurken daha sonraki alterasyon süreciyle, skoroditlerde yeniden birikmesi süperjen oluşumdur.

## Teşekkür

2012/02 No'lu Aksaray Üniversitesi BAP projesi ile hazırlanmış olan bu çalışma kapsamında, ince kesitlerin yapımı için Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, İnce kesit laboratuvarı çalışanlarına, SEM + EDX çalışmaları için Ufuk Kibara teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] T. Ercan, A. Dinçel, E. Günay, and A. Türkecan, "Geology of the Uşak region and petrology of volcanics", *Mineral Research and Explorations Institute Turkey (MTA) Report No. 6354*, 1977.
- [2] E. Ercan, A. Dinçel, S. Metin, A. Türkecan, and A. Günay, "Geology of the Neogene basins in Uşak region" *Geological Bulletin of Turkey*, vol.21, pp.97-106, 1978
- [3] T. Ercan, A. Dinçel and A. Günay, "Petrology of the Uşak Volcanics and their place in the Aegean region according to plate tectonics", *Geological Bulletin of Turkey*, vol. 22, pp.185-198, 1979
- [4] E. Bozkurt and R. Oberhänsli, "Menders Massif (western Turkey): Structural, metamorphic and magmatic Evolution-a Synthesis", *International Journal of Earth Sciences*, vol.89, pp.679-708, 2001
- [5] S. Akıska, T. Ünlü and I.S. Sayılı, "Mining geology of the gold occurrences related to the arsenopyrites of İzmir-Ödemiş Region", *Mineral Research Exploration Bulletin*, vol.136, pp.1-8, 2008.
- [6] H. Yılmaz, "Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure", *Journal of Geochemical Exploration*, vol.80, pp.117-135, 2003.
- [7] O.E. Koralay, O. Candan, C. Akal, O.Ö. Dora, F. Chen, M. Satır, and R. Oberhänsli, "Geology and geochronology of Pan-African and Triassic metagranitoids in the Menderes Massif, W-Anatolia", *Turkey Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, vol.142, pp.69-119, 2011
- [8] A. Kahya and Ö. Kanaat, "Geological, mineralogical and fluid inclusion characteristics of auriferous quartz veins at Güneyköy (Uşak, Eşme), Western Turkey", *Neues Jahrbuch für Mineralogie (J.Min. Geochem.)*. vol.195/1, pp.11-25, 2018.
- [9] O. Candan, O.Ö. Dora, R. Oberhänsli, E. Koralay, M. Çetinkaplan, C. Akal, M. Satır, F. Chen, and O. Kaya, "Stratigraphy of the Pan-African basement of the Menderes Massif and relationship with Late Neoproterozoic/Cambrian Evolution of the Gondwana", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, vol.142, pp.25-68, 2011.
- [10] O.Ö. Dora, O. Candan, S.T. Dürr, and R. Oberhänsli, "New evidence concerning the geotectonic evolution of the Menderes Massif" *International earth sciences colloquium on the Aegean region, Abstracts*, p.13-14, 1995.

- [11] O.E. Koralay, O. Ö. Dora, O. Candan, F. Chen, and M. Satir, "Menderes Masifindeki paragnayların ilksel çökeltme yaşına tek zircon 207Pb/206Pb evaporasyon jeokronolojisi yöntemiyle yaklaşım", *56th Geological Congress of Turkey, Abstracts*, pp.64–65, 2003.
- [12] N. Konak, N. Akdeniz, and E.M. Öztürk, "Geology of the south of Menderes Massif, I.G.C.P. project no:5, Correlation of Variscan and pre-Variscan events of the Alpine Mediterranean mountain belt, field meeting", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, pp.42-53, 1987.
- [13] O. Candan, "Metamorphism of the Gabbros in the Aydın-Çine Submassif and Their Correlation with those in the Related Submassifs of the Menderes Massif". *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol.5, pp.123-139, 1996.
- [14] O.Ö. Dora, O. Kaya, E. Koralay and S.T. Dürr, "Revision of the so-called "leptite-gneisses" in the Menderes Massif: A supracrustal metasedimentary origin", *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, vol.89/4, pp.836- 851, 2001.
- [15] O. Candan, and O.Ö. Dora, "Granulite, eclogite and blueschist relics in the Menderes Massif: an approach to Pan-African and Tertiary metamorphic evolution", *Geological Bulletin of Turkey*, vol.41, pp.1-36, 1998.
- [16] O. Candan, M. Çetinkaplan, R. Oberhänsli, G. Rimmelé, and C. Akal, "Alpine high-P/low-T metamorphism of the Afyon Zone and implications for the metamorphic evolution of western Anatolia, Turkey", *Lithos*, vol.84, 102-124, 2005.
- [17] R. Oberhänsli, O. Candan, O.Ö. Dora, and S. Dürr, "Eclogites within the Menderes Massif / Western Turkey", *Lithos*, vol.41, pp.135-150, 1997
- [18] O. Candan, and O.Ö. Dora, "Granulite, eclogite and blueschist relics in the Menderes Massif: an approach to Pan-African and Tertiary metamorphic evolution", *Geological Bulletin of Turkey*, vol. 41, pp.1-36, 1998
- [19] O. Candan, O.Ö. Dora, R. Oberhänsli, M. Çetinkaplan, J.H. Partzsch, F.C. Warkus, and S. D.RR, "Pan-African high-pressure metamorphism in the Precambrian basement of the Menderes Massif, western Anatolia, Turkey", *International Journal of Earth Sciences*, vol.89, pp.793-811, 2001.
- [20] R. Hetzel, and T. Reischmann, "Intrusion age of Pan-African augen gneisses in the southern Menderes Massif and the age of cooling after Alpine ductile extensional deformation" *Geological Magazine*, vol.133, no. 5, pp.565 – 572, 1996
- [21] S. Loos, and T. Reischmann, "The evolution of the southern Menderes massif in SW Turkey as revealed by zircon dating", *Journal of the Geological Society of London*, vol.156, pp.1021-1030, 1999.
- [22] O.E. Koralay, O. Ö. Dora, F. Chen, M. Satir, and O. Candan, "Geochemistry and Geochronology of Orthogneisses in the Derbent (Alaşehir) Area, Eastern Part of the Ödemiş-Kiraz Submassif, Menderes Massif: Pan-African Magmatic Activity", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13, 37-61, 2004
- [23] B. Erdogan and T. Güngör, "The problem of the core–cover boundary of the Menderes Massif and an emplacement mechanism for regionally extensive gneissic granites, western Anatolia (Turkey)", *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol.13, pp.15–36, 2004.
- [24] E. Bozkurt, J.A. Winchester, and R.G. Park, "Geochemistry and tectonic significance of augen gneisses from the southern Menderes Massif (West Turkey)", *Geology Magazine*, vol.132, pp.287-301,1995.
- [25] C. Dannat, "Geochemie, geochronologie und Nd-Sm Isotopie der granitoiden Kerngneiss des Menderes Massivs, SW-Turkey", PhD thesis, Johannes Gutenberg Universität Mainz, 1997.
- [26] R. Hetzel, R.L. Romer, O. Candan, and C.W. Passchier, "Geology of the Bozdağ area, central Menderes massif, SW-Turkey: Pan African basement and Alpine deformation", *Geologische Rundschau*. Vol. 87, pp.394–406, 1998.
- [27] K. Gessner, S. Piazzolo, T. Güngör, U. Ring, A. Kröner, and C.W. Passchier, "Tectonic significance of deformation in granitoid rocks of the Menderes nappes, Anatolide belt, southwest Turkey", *International Journal of Earth Sciences*, vol.89, pp.766-780, 2001.
- [28] K. Gessner, A.S. Collins, U. Ring, and T. Gungor, "Structural and thermal history of poly-

- orogenic basement: U–Pb geochronology of granitoid rocks in the southern Menderes Massif, Western Turkey”, *Journal of the Geological Society of London*, vol.161, pp.93–101, 2004
- [29] Ş. Gonca, “Gold research report in the Uşak-Eşme, Manisa-Kula, Manisa and Uşak area”, *Mineral Research and Explorations Institute Turkey (MTA) Report No: 9520*, Ankara (unpublished), 1992.
- [30] G. Seyitoğlu, M.C. Alçiçek, V. Işık, Alçiçek, S. Mayda, B. Varol, I. Yılmaz and K. Esat, “The stratigraphical position of Kemiklitepe fossil locality (Eşme, Uşak) revised: implications for the Late Cenozoic sedimentary basin development and extensional tectonics in Western Turkey”, *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie*, vol.251, pp.1-15, 2009.
- [31] D. Jonasson, “Mobilization and occurrence of gold within arsenopyrite veins, Akçaabat deposit, southwestern Turkey”, Degree of Master of Science with a major in Earth Sciences 60 hec, University of Gothenburg, Department of Earth Sciences Geovetarcentrum/Earth Science Centre, 2018B1042, 2018.
- [32] M. Mihaljevic, V. Ettler, O. Sebek, P. Grahota, L. Strnad, R. Prochazka, and O. Sracek, “Alteration of arsenopyrite in soil under different vegetation covers”, *Science of the total environment*, vol. 408 no.6, pp.1286-1294, 2010
- [33] P.M. Dove and J.D., Rimstidt, “The solubility and stability of scorodite,  $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ”, *American Mineralogist*, vol.70, No.7-8, pp.838–844. 1985
- [34] Y. Zhu and B. Merkel, “The dissolution and solubility of scorodite,  $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  evaluation and simulation with PHREEQC2”, Technische Universität Bergakademie Freiberg Institut für Geologie, 2001.
- [35] A.W. Mann, “Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles; some observation from Western Australia”, *Economic Geology*, vol.79, No.1, pp.38-49, 1984.
- [36] L.Robb, “Introduction to ore-forming processes”, John Wiley&Sons, 2013
- [37] A.H. Mumin, M.E. Fleet, and S.L. Chryssoulis, “Goldmineralization in As-rich mesothermal gold ores of the Bogosu resteamining district of the Ashanti Gold Belt, Ghana: Remobilization of “invisible” gold”, *Mineralium Deposita*, vol.29, pp. 445-460, 1994
- [38] R.R. Large, L.V., Danyushevsky, C. Hollit, V. Maslennikov, S. Meffre, S. Gilbert, R. Bull, R. Scott, P. Emsbo, H. Thomas, and J. Foster, “Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and carlin-style sediment-hosted deposits”, *Economic Geology*, vol.104, pp.635-668, 2009.
- [39] A.G. Tomkins, and J.A. Mavrogenes, “Redistribution of gold within arsenopyrite and lollingite during pro- and retrograde metamorphism: Application to timing of mineralization”, *Economic Geology*, vol.96, No:3, pp.525-534, 2001.
- [40] J.G. Webster and A.W Mann, “The influence of climate, geomorphology and primary geology on the supergene migration of gold and silver”, *Journal of Geochemical Exploration*, vol.22, No.1-3, pp.21-42, 1984
- [41] C. E. J. De Ronde and P. Blattner, “Hydrothermal alteration, stable isotopes, and fluid inclusions of the Golden Cross epithermal gold-silver deposit, Waihi, New Zealand”, *Economic Geology*, vol.83, pp.895-917, 1988
- [42] R.J. Bovell, “Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: implications for the Supergene Behavior of gold”, *Mineralogical Magazine London*, vol.56, pp.545-545, 1992.



Araştırma Makalesi / Research Article

## Bir mermer ocağında örtü tabakası kazı yönteminin zaman ve maliyet açısından değerlendirilmesi

### *Evaluation of excavation method of overburden in a marble quarry in term of time and cost*

Deniz Aydın<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, [deniz.aydin@dicle.edu.tr](mailto:deniz.aydin@dicle.edu.tr)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4395-6515>

#### MAKALE BİLGİLERİ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 31 Ağustos 2023  
Revizyon 30 Ekim 2023  
Kabul 05 Kasım 2023  
Online 31 Aralık 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Elmas Kesici  
Delme Patlatma  
Zaman ve Maliyet.

#### ÖZ

Bu çalışmada Dimer Grup'a ait Adıyaman Emprador taşının üretiminde örtü tabakasının konvansiyonel yöntem ile kazılması ile delme patlatma yöntemi ile kazılması karşılaştırılmıştır. Konvansiyonel yöntemde örtü tabakasının alınması elmas tel ile kesim yapılmaktadır. Bu yöntemde düşey ve yatay deliklerin delinmesi, elmas tel ile kesimlerin yapılması, parçaların ayrılması ve kırıcı ile boyut küçültülme ve taşıma adımları uygulanmaktadır.

Delme patlatma yöntemi ile örtü tabakasının kazılmasında ise deliklerin belirlenen parametrelere uygun delinmesi, doldurulması ve sıkılama yapılmasının ardından patlatma yapılması ve yine taşıma adımlarını takip etmektedir. Çalışmada örtü tabakasının delme ve kesme işlemlerine hazır hale getirilmesi ve örtü tabakasının alınması sonrası işlemler her iki yöntemde de aynı olduğu için çalışmaya konu edilmemiştir.

Değerlendirmeler neticesinde aynı büyüklükteki alanın elmas kesici ile 118.68 saatte, delme patlatma ile 35.27 saatte kazıldığı görülmüştür. Yine konvansiyonel yöntemin maliyeti 138.64 tl/m<sup>3</sup> iken, delme patlatmada bu maliyet 39.97 tl/m<sup>3</sup> olmuştur. Patlayıcı kullanımı iş için gerekli süreyi %70 kısaltırken, maliyeti de %72 seviyesinde azaltmıştır.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 31 August 2023  
Received in revised form 30 October 2023  
Accepted 05 November 2023  
Available online 31 December 2023

##### Keywords:

Diamond cutter  
Drill and Blast  
Time and Cost

#### ABSTRACT

In this study, the excavation of the overburden with the conventional method and the excavation with the drill and blast method in the production of Adıyaman Emprador stone belonging to the Dimer Group were compared. In the conventional method, the overburden is removed and cut with diamond wire. In this method, drilling of vertical and horizontal holes, cutting with diamond wire, separating parts, downscaling with crusher and transporting steps are applied.

In the excavation of the overburden with the drill and blast method, drilling the holes in accordance with the determined parameters, filling and tightening and blasting and again transporting steps are followed. Due to applying the same methods in the processes of preparing the overburden for drilling and cutting operations and after removing the overburden were not included in the study.

As a result of the evaluations, it was seen that the same size area was excavated in 118.68 hours with a diamond cutter and in 35.27 hours with drilling and blasting. Correlatively, while the cost of the conventional method was 142.59 tl/m<sup>3</sup>, this cost was 39.97 tl/m<sup>3</sup> in drill and blast. The use of explosives shortened the time required for work by 70%, while reducing the cost by 72%.

Doi: 10.24012/dumf.1353342

\* Sorumlu Yazar



## Giriş

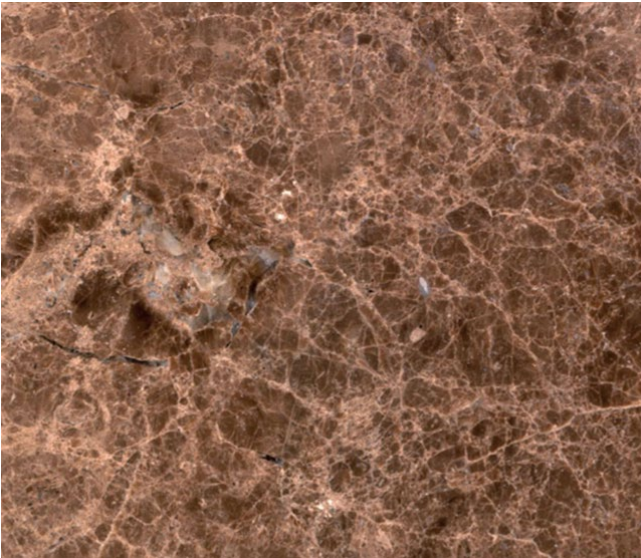
Çalışmaya konu olan mermer ocağı (Şekil 1) Dimer Grup'a ait olup; Adıyaman ili, Kömür beldesi, Kaşköy mevkinde yer almaktadır (Şekil 2). Ocakta Brown Espera ticari adı ile satışa sunulan emprador üretimi yapılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 1. Mermer ocağının genel görünüşü



Şekil 2. Mermer ocağının yerini gösterir uydu görüntüsü



Şekil 3. Brown espera

Emprador; ticari değeri olan ve açık bejden koyu kahverengiye değişen renkler gösteren tektonit özellikli bir kayadır. Bu kayaç aralarında belli açılar bulunan yanıl atımlı fay sistemleri arasında rijit özellikli kireçtaşlarının belli bir düzen içinde rotasyona uğrayarak parçalanmaları ve farklı büyüklükte kırılan parçaların kalsit çimento ile çimentolanmaları şeklinde oluşmaktadır [1].

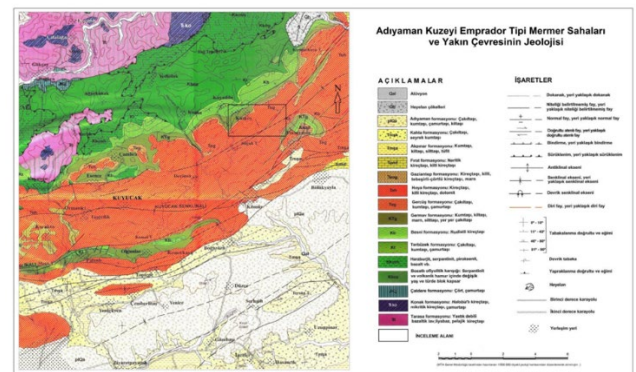
Ocaktan çıkarılan kayacın fiziko-mekanik özelliklerinin tayin edilmesi için deneyler özel bir laboratuvarında yapılmıştır. Bu özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ocaktan çıkarılan mermerin fiziko-mekanik ve teknik özellikleri

Fiziko-Mekanik Ve Teknik Özellikler			
Plaka Verme			İyi
Kenar Köşe Kesilmesi			İyi
Cila Alma			İyi
Sertlik			4 (Mohs)
Yoğunluk			2.82 (g/cm <sup>3</sup> )
Birim Hacim Ağırlık			2.68 (g/cm <sup>3</sup> )
Atmosfer Basıncında Su Emme (Ağırlıkça)	Su	Emme	0.9 (%)
Atmosfer Basıncında Su Emme (Hacimce)	Su	Emme	2.2 (%)
Kaynar Suda Su Emme (Ağırlıkça)			0.9 (%)
Kaynar Suda Su Emme (Hacimce)			2.6 (%)
Basınç Direnci			835 (kgf/cm <sup>2</sup> )
Don Sonrası Basınç Direnci			1110 (kgf/cm <sup>2</sup> )
Don Kaybı			0.1 (%)
Darbe Direnci			9 (kgf.cm/cm)
Eğilme Direnci			69 (kgf/cm <sup>2</sup> )
Görünür Porozite			2.2 (%)
Doluluk Oranı			94.8 (%)
Gözeneklilik Derecesi			5.2 (%)
Ortalama Aşınma Direnci			25.6 (cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> )

## Bölgesel jeoloji

İnceleme alanında, yapısal özellikleri ve kaya türü açısından farklı özellikler gösteren çok sayıda kaya birimi yüzeylenmektedir. Sahanın güney kısımları Güneydoğu Anadolu Otoktonu'na ait kaya birimleri ile örtülü iken, kuzey kesimleri allohton kütlelerden oluşan Toros Orojenik Kuşağı ve dalma batma zonunda oluşan okyanusal kabuğa ait kaya birimleri tarafından temsil edilmektedir (Şekil 4) [1].



Şekil 4. Adıyaman kuzeyi Emprador tipi mermer sahaları ve yakın çevresinin jeolojisi [1]

İnceleme alanı ve yakın yöresinde Triyas-Jura-Kretase'den günümüze kadar değişik yaşlar veren iki tanesi allohton on iki tanesi otokton olan toplam on dört adet birim gözlenmektedir. Emprador tipi mermerlerin elde edildiği birim olan Hoya Formasyonu otokton sınıfta yer almaktadır [1].



Adıyaman yakın kuzeyinde, Tut kuzeyinde, Besni güneybatısı ve Koçalı dolaylarında geniş alanlarda yüzeylenen Hoya Formasyonun tip lokalitesi Diyarbakır ili Çüngüş ilçesinin 2 km güneybatısındaki Hoya köyüdür. Kireçtaşı ve yer yer de dolomitik kireçtaşlarından oluşan birim, ilk kez Perinçek (1978) tarafından adlandırılmıştır [2], [3].

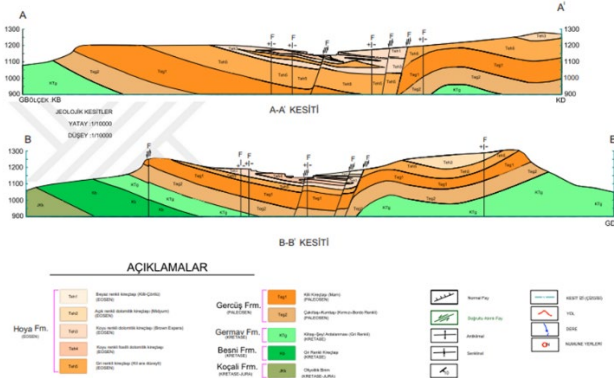
Formasyon; krem, açık grimsi beyaz ve bej renkli orta, bazen masif, yer yer ince tabakalı, yumrulu görünümlü, kahverengi olan, alt kesimlerinde tektonit dokusu gösteren ve parçalanmış kesimleri çok ince sparitik ve seyrek mikritik çimentolu, yer yer bentik foraminiferli, karstik erime boşluklu, makro fosilli kireçtaşları, dolomitik kireçtaşları, marn, silttaşı ve çok kalın tabakalı yer yer tabaka göstermeyen, dik yarılar oluşturan sert köşeli kırılmalı yer yer bol fosilli kireçtaşları ile temsil edilmektedir [1].

Karbonat platformu ortamında çökelmiş olan Hoya Formasyonunun yaşı alt Eosen ve alt Oligosen olup içerisinde fosil barındırır [4], [5].

Yaş verilerine göre Hoya Formasyonu Eosen (Küviziyen-Orta Lütisyan-Erken Priyaboniyen) yaşında olup litoloji ve fauna topluluğuna göre açık şelfin sığ kesiminde çökelmiştir [1].

Hoya Formasyonu renk ve litolojisi dikkate alınarak beş alt birimde incelenebilir. En altta açık gri renkli kil ara düzeyli kireçtaşları ile hemen üzerine gelen koyu renkli fosilli ve karstik boşluklu dolomitik kireçtaşı (fosilli emprador), üste doğru hafif açık renkli dolomitik kireçtaşı (bej dark emprador), koyu renkli dolomitik kireçtaşı (dark emprador veya brown espara), açık renkli dolomitik kireçtaşı (midyum) ve en üstte de açık renkli gözenekli kireçtaşı (ekonomik olmayan) düzeyleri yer almaktadır [1].

İnceleme alanında ekonomik değeri en yüksek olarak bilinen kesim dolomitik kireçtaşı düzeylerinden oluşan koyu kahverengi empradordur. Fosilli ve kalsit dolgu mercerler içerebilen bu kesim 20-30 m kalınlıklar göstermektedir [1]. Şekil 5'te çalışmaya konu olan mermer ocağının da içinde yer aldığı sahanın jeolojik harita ve kesitleri verilmiştir.

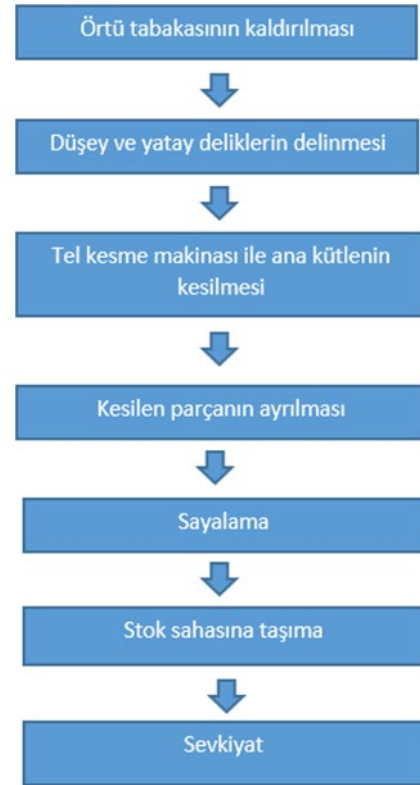


Şekil 5. Adıyaman ili Kömür İlçesi Kaşköy Beldesi mermer sahası jeolojik harita ve kesitleri [1]

### Konvansiyonel yöntem ile örtü tabakasının kazılması

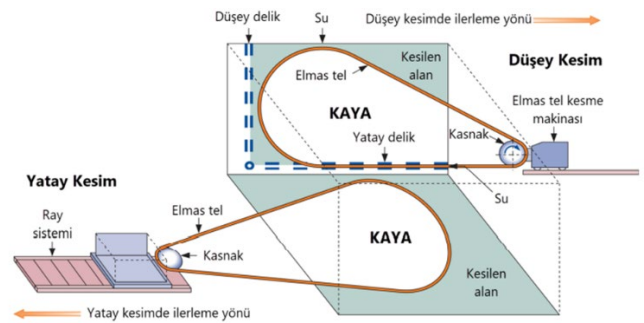
Konvansiyonel yöntemde örtü tabakası elmas tel ile kesilerek taşta ulaşılır. Bu işlem, üretim için takip edilen adımlar ile

neredeyse aynıdır (Şekil 6). Tek fark tepelemelerin devrildikten sonra sayılama işlemi yapılmadan kırıcı vasıtasıyla kaya kamyonuna yüklenebilecek boyuta küçültülerek atık sahasına taşınmasıdır.



Şekil 6. Mermer ocağı iş akım şeması

Köprülü dağ kesim makinesinin ana kayayı kesebilmesi için öncelikli olarak delici (Roc) makine ile dik yönde bir merkez deliği delinir. Ardından iki yönde birer yatay delik delinerek bu üç deliğin birleşmesi sağlanır. Deliklerin birleşmesinden sonra elmas tel bu deliklerden geçirilerek köprülü kesim makinesinin kasnağı etrafından dolaştırılarak kesime başlanır. Yatay (alt) ve düşey (yan) kesimlerin şematik görünüşleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Yatay ve düşey kesimlerin şematik görünüşleri ve elmas telin yapısı [6], [7].

Çalışmaya konu olan ocakta düşey delik açısı 90° boyu 6 metredir. Yatay deliklerin uzunluğu ise sırasıyla 10.8 ve 11.2 metredir. 10.8 metrelik kenarda 6; 11.2 metrelik kenarda 4 adet delik delinmektedir. Belirtilen uzunluk ve adetlerde delinen delikler, üstten bakıldığında ana kayayı eşit boyutlardaki (1.8m\*2.8m\*6m) dikdörtgenler prizmalarına bölünmüş (baklava dilim) olarak kesilmelerini sağlar (Şekil 8).



Şekil 8. Kesimler sonrası yıkıma hazır tepelemelerin üstten görünüşü

### Delme patlatma yöntemi ile örtü tabakasının kazılması

Patlayıcı kullanılarak yapılan kazı, kontrollü bir biçimde ana kaya kütesinin ayrılması amacıyla uygulanan kazı ve üretim yöntemidir. Patlatmada temel amaç; minimum delme, patlatma ve yükleme maliyeti ile güvenli bir şekilde, istenilen malzemenin maksimum miktarda elde edilmesini sağlamaktır [8]. Elde edilecek sonuç, patlatma yapılacak kayaç özelliğine, kullanılacak patlayıcı madde özelliğine ve uygulanacak patlatma tasarımına bağlıdır.

Mermer ocaklarında delme patlatma yöntemi ile örtü kazısı yapılırken en önemli husus taşta zarar vermeden, çatlak oluşumuna ya da var olan çatlakların genişlemesine sebep olmadan kontrollü delme patlatma yapılabilmesidir.

Patlatma yapılacak parselde üretim yönüne doğru 2 metre mesafe alınıp şerit çekilmektedir. Patlatma delikleri çapı 89 cm olan delici ile açılmaktadır.

Delikler arası mesafe 3 metre olacak şekilde 6 metre olan basamak yüksekliği için 2 metre topuk bırakılarak 4 metrelik delikler açılmaktadır. Her 1 metre için 5 kg ANFO kullanılmaktadır. Delikler %50 ANFO %50 sıkılama şeklinde doldurulmaktadır. Patlatma paterni şaşşbeş düzen olarak seçilmiştir. Patlatma tasarım parametreleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Atımlarda uygulanan patlatma tasarım parametreleri

Patlatma Parametreleri	
Delik eğimi	Dik
Delik düzeni	Şaşşbeş
Basamak yüksekliği (m)	6
Delik çapı (mm)	89
Delikler arası mesafe (m)	3
Delik boyu (m)	4
Sıkılama boyu (m)	2
Delik sayısı (adet)	14
Boşaltılan alan (m <sup>3</sup> )	725.76

Yapılan çalışma sırasında gözlemlenen patlatma işlemi için deliklerin doldurulması ve sıkılama işlemi Şekil 9’da, deliklerin doldurulması ile patlatmaya hazır alan Şekil 10’da, sorumlu maden mühendisi gözetiminde yapılan patlatma sonrası basamak görünümü Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 9. Deliklerin doldurulması ve sıkılama işlemi



Şekil 10. Patlatmaya hazırlanmış basamak



Şekil 11. Patlatma sonrası oluşan yığın

### Zaman ve maliyet analizi

Ocakta deliklerin delinmesi için yapılan hazırlık işleri, kesim alanının hazırlanması süreci ve kazılan malzemenin hafriyat sahasına taşınması her iki yöntemde de aynı şekilde yapılmaktadır. Dolayısıyla süre ve maliyete etkileri aynı oranda olacağından değerlendirilmemiş, çalışmada sadece uygulamadaki farklılıklara yoğunlaşmıştır.

Zaman ve maliyet değerlendirmeleri 725.76 m<sup>3</sup> alan için yapılmıştır. Her kalemin birim maliyeti hesaplanmış ve yapılan iş için gerekli sürede oluşturduğu maliyet elde edilmiştir.

Hesaplamlarda dolar kuru 26 lira; mazot litre fiyatı 27 lira olarak sabitlenmiştir. İki yöntem için de görevli mühendis sayısı sabit olduğundan maliyet hesabına dahil edilmemiştir.

### Kesimler için gerekli süre

Öncelikle 6 m uzunluğunda merkez delik ve her iki yönde ki yatay delikler sırasıyla 10.80 m ve 11.20 m olacak şekilde delinip bu 3 deliğin birleştirilmesi sağlanır. Ardından kesimlerin yapılabilmesi için yatay deliklerin delinmesi işlemi yapılır. Her iki kenarda toplam 10 delik açılır. Delik delme işlemleri bittikten sonra kesim işine geçilir. Toplamda 10 kesim yapılır. Tablo 3'te yapılan delgi ve kesim işlemleri ile bunlar için ihtiyaç duyulan süreler verilmiştir.

Tablo 3. Yapılan delgi ve kesim işleri

İşlem	Ölçü	Adet	Birim süre (saat)	Toplam süre (saat)
Merkez deliğin delinmesi	6 m	1	1	1
1.Yatay deliğin delinmesi	10.8 m	1	2.5	2.5
2.yatay deliğin delinmesi	11.2 m	1	3	3
10,80 m lik yüzeyde deliklerin delinmesi	10.8 m	4	2.5	10
11,20 m lik yüzeyde deliklerin delinmesi	11.2 m	6	3	18
Alt kesim *	11.2 m* 10.8 m	1	9.30	9.30
Yan kesim 1*	11.2 m* 6 m	6	5.16	30.96
Yan kesim 2*	10.8 m* 6 m	4	4.98	19.92
Tepelemelerin devrilmesi	1.8m*2.8m*6m	24	1	24
<b>Toplam</b>				<b>118.68</b>

\* Köprülülü dağ kesim ile bir saatte ortalama 13 m<sup>2</sup>'lik kesim yapılabilir.

### Patlatma için gerekli süre

İlk olarak kesim işinde olduğu gibi merkez ve iki adet yatay delik birbirleri ile birleşecek şekilde delinir, ardından alt ve yan kesimler yapılır. Yan kesimlerin sayısı toplamda 2 adettir. Kesimlerdeki amaç serbest yüzey oluşturarak taşın patlatma sırasında zarar görmesini önlemektir. Kesim işlemleri sonrası patlatma delikleri hazırlanır. 6 metrelik basamak yüksekliği için 2 m topuk bırakılarak 4 m olacak şekilde toplam 14 adet delik delinir. Tablo 4'te yapılan delgi ve kesim işlemleri ile bunlar için ihtiyaç duyulan süreler verilmiştir.

Tablo 4. Yapılan delgi ve kesim işleri

İşlem	Ölçü	Adet	Birim süre (saat)	Toplam süre (saat)
Merkez deliğin delinmesi	6 m	1	1	1
1.Yatay deliğin delinmesi	10.8 m	1	2.5	2.5

2.yatay deliğin delinmesi	11.2 m	1	3	3
Alt kesim *	11.2 m* 10.8 m	1	9.30	9.30
Yan kesim 1*	11.2 m* 6 m	1	5.16	5.16
Yan kesim 2*	10.8 m* 6 m	1	4.98	4.98
Patlatma delikleri	4 m	14	0.67	9.33
<b>Toplam</b>				<b>35.27</b>

\* Köprülülü dağ kesim ile bir saatte ortalama 13 m<sup>2</sup>'lik kesim yapılabilir.

Tablo 3 ve Tablo 4'te görülebileceği gibi; elmas tel ile kesim yapılması işi toplamda 118.68 saat sürerken aynı büyüklükteki alanın patlatma yöntemi ile kazılması 35.27 saat sürmüştür.

### Kesim maliyeti

Kesim maliyetini oluşturan kalemler ve tutarları Tablo 5'te verilmiştir. Kesim, delme, devirme ve kırma adımlarının kendi içindeki giderleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Burada her kalemin birim maliyeti hesaplanmış ve belirtilen iş için harcanan zaman ve birim fiyatın çarpılması ile toplam tutar bulunmuştur.

Tablo 5. Elmas tel ile kesim işi maliyeti

İşlem	Maliyet kalemleri	Tutar (tl)
Kesim (60.18 saat)	İşçilik	8023.80
	Elektrik	3514.51
	Amortisman	3309.90
	Bakım	2268.79
	Tel	1255.54
	Su	36108
Delme (34.5 saat)	Sarf	485.10
	İşçilik	5520
	Elektrik	3022.20
	Amortisman	3795
Devirme+Kırma (24 saat)	Bakım	1300.65
	Sarf	35.62
	Mazot	16848
<b>Toplam</b>	İşçilik	3840
	Amortisman	6222
	Bakım	5074.08
<b>Toplam</b>		<b>100623.20</b>

Tablo 5'ten görülebileceği gibi elmas telle kesim yönteminin birim maliyeti 138.64 tl/m<sup>3</sup> olmuştur.

### Patlatma maliyeti

Patlatma maliyetini oluşturan kalemler ve tutarları Tablo 6'da verilmiştir. Kesim ve delme adımlarının kendi içindeki giderleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Burada her kalemin birim maliyeti hesaplanmış ve belirtilen iş için harcanan zaman ve birim fiyatın çarpılması ile toplam tutar bulunmuştur. Patlatma adımı ise 725.76 m<sup>3</sup> büyüklükteki alanın patlatılması için kullanılan malzemelerin tutarları belirtilmiştir.



Tablo 6. Patlatma işi maliyeti

İşlem	Maliyet kalemleri	Tutar
Kesim (19.44 saat)	İşçilik	2591.35
	Elektrik	1135.30
	Amortisman	1069.20
	Bakım	732.89
	Tel	374.66
	Su	11664
	Sarf	485.10
Delme (15.83 saat)	İşçilik	2532.80
	Elektrik	1386.71
	Amortisman	1741.30
	Bakım	596.79
	Sarf	35.62
Patlatma	Anfo	3298.75
	Kapsül	1021.79
	Dinamit	286.19
	Elektrikli Kapsül	1.572
	Ateşleyici	60
		<b>29014.02</b>

Tablo 6'dan görülebileceği gibi patlatma yöntemi ile kazının birim maliyeti 39.97 tl/m<sup>3</sup> olmuştur.

## Sonuç

Bu çalışmada; örtü tabakasının alınması işinin kesim ve patlatma yöntemleri ile yapılmasının zaman ve maliyet açısından farkları değerlendirilmiştir.

Yöntemlerin 725.76 m<sup>3</sup> büyüklükteki alanın boşaltılması için ihtiyaç duydukları süreler incelenmiş ve sonuçlar elmas telli kesici kullanımında toplam süre 118.68 saat iken, patlayıcı kullanımında toplam süre 35.27 saat olmuştur.

Bir başka değişle ihtiyaç duyulan birim zaman; elmas tel ile kesimde 0.16 h/m<sup>3</sup> iken patlayıcı kullanımı ile yapılan kazıda 0.049 h/m<sup>3</sup> olmuştur.

Patlatma yönteminin kullanılması işin tamamlanması için gereken süreyi %70 mertebesinde kısaltmıştır. Başka bir deyişle delme patlatma yönteminde kazı hızının, elmas kesme yöntemine göre yaklaşık %335 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Boşaltılan 725.76 m<sup>3</sup> alan için yapılan maliyet değerlendirmeleri sonucunda; elmas tel ile kesimin toplam maliyetinin 100623.20 tl, birim maliyetinin ise 138.64 tl/m<sup>3</sup> olduğu, yine patlatma ile kazının toplam maliyetinin 29014.02 tl, birim maliyetinin ise 39.97 tl/m<sup>3</sup> olduğu anlaşılmıştır.

Patlayıcı kullanımının maliyeti %72 mertebesinde azalttığı görülmüştür.

Bu çalışma ile serbest yüzey oluşturduktan sonra doğru patlatma parametreleri seçilmiş bir patlatma ile taş zarar vermeden, üretim katına kadar örtü tabakasının kazılmasının zaman ve maliyet açısından önemli derecede fayda sağladığı görülmüştür.

İşletmelerde üretimin her aşamasında, iş sağlığı ve güvenliğini tehlikeye atmamak, kaliteyi düşürmemek ve çevreye duyarlı olmak şartıyla en uygun maliyetle çalışılması tercih edeceğinden bu çalışma ile elde edilen sonuç önem taşımaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışmanın yapılabilmesi için veri, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak desteklerini sunan Dimer Grup Genel Müdürü Maden Yüksek Mühendisi Felat Gökdemir'e, Ocaklar Müdürü Maden Mühendisi Abdülaziz Tekgül'e, Vardiya Sorumlusu Maden Mühendisi Mustafa Kılıç'a ve misafirperverlikleri için tüm ocak çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

## Kaynakça

- [1] S. Kalkan, "Adıyaman yöresindeki emprador tipi mermerlerin oluşumu ve özellikleri," Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi, FBE., 2019.
- [2] V. Koç, "Karaboğaz ve Karababa formasyonlarının (Adıyaman) hidrokarbon potansiyeli ve iz element dağılımlarının incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi, FBE., 2019.
- [3] N. Yıldırım, "Koçali karmaşığımı (Adıyaman) oluşturan okyanusal birimlerin petrolojik özellikleri ve tektonik önemi," Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, FBE., 2017.
- [4] Ö. Korucu ve V. Işık, "Güneydoğu Anadolu Orojenezinde Aksu-Samsat (Adıyaman) Profil Hattının Jeolojik Özellikleri," *Yerbilimleri*, 44 (1), 22-63, 2023. ISSN: 2687-2978.
- [5] E. Gündüz, "Gerger ve yakın çevresinin (Elazığ L42-d4 paftası) jeomorfolojisi (Adıyaman)," Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, SBE., 2021.
- [6] S. N. Almasi, R., Bagherpour, R., Mikael, Y., Ozcelik, "Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(4), 1593-1607, 2017.
- [7] K. Özgüleç, "Mermer ocaklarında kullanılan elmas tel kesme makinası performansının bulanık mantık yaklaşımıyla belirlenmesi," Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, FBE., 2020.
- [8] E. G. Uçkaç, "Bir manyezit işletmesinde patlatma maliyet analizi," Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, FBE., 2018.



## Açısal Dönme Tabanlı Aktif ve Pasif Toprak İtkisi

*Angular Rotation Based Active and Passive Earth Thrust*Murat Hamderi<sup>1\*</sup><sup>1</sup> Türk-Alman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Beykoz, İstanbul [hamderi@tau.edu.tr](mailto:hamderi@tau.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9167-8866>

## MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*Geliş 21 Mart 2023  
Revizyon 04 Kasım 2023  
Kabul 21 Aralık 2023  
Online 31 Aralık 2023*Anahtar Kelimeler:**istinat, konsol duvar, pasif, aktif,  
toprak itkisi*

## ÖZ

Konsol istinat duvarlarında oluşan aktif ve pasif itki duvarın dönme ve yer değiştirmesi ile yakından ilgilidir. Klasik zemin mekaniği çerçevesinde yapılan hesaplarda duvarın yeteri kadar döndüğü ve yer değiştirdiği kabul edilerek aktif ve pasif itkilerin kararlı durumdaki değerleri kullanılır. Özellikle pasif itki için kararlı durumdaki değerleri kullanmak hesabın doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında aktif ve pasif itkiler için elde edilmiş açısal dönme tabanlı aktif ve pasif itki formülleri tanıtılacaktır. Literatürdeki diğer bazı formüller ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar da kullanılarak bir konsol duvar örneği çözülecek, genel bir karşılaştırma yapılacaktır.

## ARTICLE INFO

*Article history:*Received 21 March 2023  
Received in revised form 04 Nov 2023  
Accepted 21 December 2023  
Available online 31 Aralık 2023*Keywords:**Retaining, Cantilever, Wall, Passive  
Active, Earth Thrust*

## ABSTRACT

The active and passive thrusts in cantilever retaining walls are closely related to the rotation and displacement of the wall. Within the framework of classical soil mechanics calculations, the steady-state values of the active and passive thrusts are used, assuming that the wall rotates and displaces sufficiently. Especially for the passive thrust, using steady-state values negatively affects the accuracy of the calculation. In this study, angular rotation based active and passive thrust formulas for active and passive thrusts will be introduced. A cantilever wall example will be solved by using couple of different formulas in the literature. In addition, some comparisons will be made between the results of the formulas and a finite element model.

Doi: 10.24012/dumf.1265609

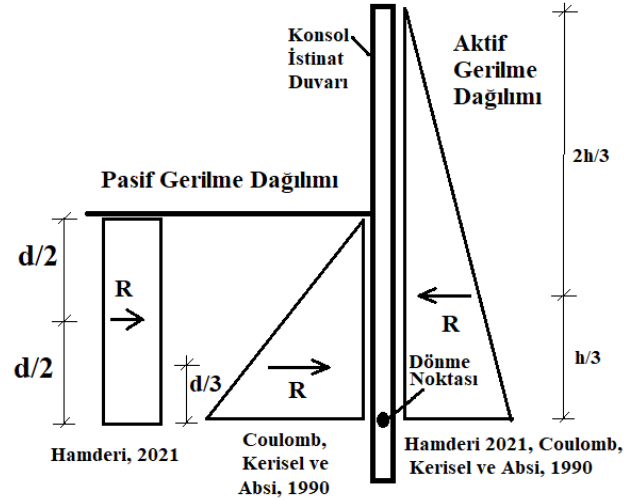
\* Sorumlu Yazar

## Giriş

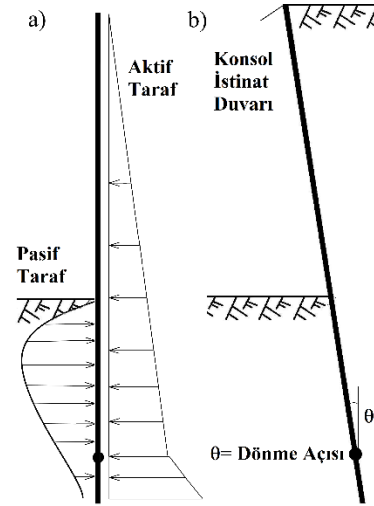
Konsol istinat duvarların hesabında kullanılan aktif ve pasif itki bir çok tasarım yönetmeliğinde Coulomb, Rankine veya logaritmik spiral teorilerine dayanmaktadır [1-4]. Coulomb kama göçmesi yöntemini kullanarak yatay toprak basıncını hesaplamıştır. Daha sonra Poncelet duvar-zemin ve içsel zemin sürtünmesi değerlerini de içeren aktif ve pasif toprak itkisi ifadesini geliştirmiştir [5]. Rankine ise gerilme alanı teorisini kullanarak duvar-zemin sürtünmesini içermeyen ifadeler elde etmiştir [3]. Logaritmik spiral göçme dairelerini kullanarak Caquot ve Kerisel ve Kerisel ve Absi aktif ve pasif itki için tablolar hazırlamıştır [2], [6]. Özellikle, Avrupa’da kullanılan EN 1997-1 yönetmeliğinde bu tabloların kullanılması önerilmektedir [7].

Yukarıda sayılan yöntemlerde toprak itkisi içsel sürtünme açısının ve jeolojik gerilmenin fonksiyonudur. Jeolojik gerilme derinlik ile yaklaşık olarak doğrusal arttığından, aktif ve pasif toprak itki dağılımlarının üçgen şeklinde olduğu kabul edilir (Şekil 1). Padfield ve Mair tarafından önerilen dağılımlar Şekil 2a’da gösterilmektedir [8]. Buna göre aktif taraftaki dağılım üçgen şeklinde, pasif taraftaki dağılım parabol şeklindedir. Bu da uygulamada kullanılan üçgen pasif itki dağılımının pek de doğru bir yaklaşım olmadığı konusunda düşünceler ortaya koymaktadır.

Rijit konsol duvarlar toprak itkisi altında Şekil 2b’de gösterildiği gibi dönerler. Duvarın sıkıştırdığı toprakta pasif itki, duvarın uzaklaştığı toprakta aktif itki oluşur. Oluşan aktif ve pasif itki duvarın dönme açısı  $\theta$  ve yatayda ötelenme miktarı ile orantılıdır. Duvar belli bir miktar dönme ve ötelenme yaptıktan sonra aktif ve pasif itki kararlı duruma ulaşır. Aktif itki için kararlı durum granüler zeminlerde  $0.001H$  olarak verilir ( $H$ = duvar yüksekliği, [9], [10]). 1 m duvar için 1 mm’lik deplasman, aktif itkinin kararlı duruma erişmesi için yeterlidir. Öte yandan, pasif itki için durum farklıdır. Pasif itkinin kararlı duruma erişmesi için  $0.01H-0.02H$  duvar hareketi gereklidir ([9], [10]). Bir başka deyişle 1 m yüksekliğinde bir duvar için 1-2 cm’lik bir hareket gereklidir. Bir çok yönetmelikte betonarme elemanların yapabileceği sehmin/dönmenin  $0,0033H$  ile kısıtlandığı düşünülürse  $0,01H-0,02H$ ’lik bir harekette duvar yapısal hasara uğrayacaktır. Ancak pasif itki için kullanılan geleneksel formüllerin içinde dönme açısı yer almadığından, pasif itki güvensiz tarafta hesaplanmaktadır. Bazı araştırmacılar, içinde dönme açısını barındıran ve aktif itkiyi hesaplayan metotlar geliştirmişlerdir [11-13]. Duncan ve Mokwa ise pasif itki ile duvar deplasmanı arasındaki ilişkiyi hiperbolik model ile açıklamıştır [14]. Hamderi granüler zeminler için aktif ve pasif itki için açısız dönme açısı, zemin modülü, içsel sürtünme açısı ve diğer geleneksel parametreleri içeren formüller türetmiştir [15]. Bu, çalışma kapsamında bu formüller tanıtılacak, bir örneğe uygulanacak, diğer geleneksel formüller ile karşılaştırılacaktır. Ayrıca, daha kapsamlı bir karşılaştırma için örneğin sonlu elemanlar modeli oluşturulacaktır.



Şekil 1. Aktif ve pasif toprak itkisi için uygulamada kullanılan dağılımlar



Şekil 2.a) Padfield ve Mair tarafından önerilen aktif ve pasif gerilme dağılımları, b) Toprak itkisi altındaki konsol duvarın dönmesi

## Materyal ve Yöntem

### Aktif Toprak İtkisi Katsayısı Formülü

Aktif itkinin oluşması için gerekli dönme miktarı sadece  $\theta=0,001\text{rad}$  ( $H=1$  m için sadece 1 mm) olduğundan aktif itkinin kararlı duruma konsol bir duvarda kolayca ulaşılır. Bu durum aktif itki formülüne açısız dönmeyi eklemeyi gereksiz kılmaktadır. Hamderi granüler zeminde aktif toprak itki katsayısının yatay bileşenini, içsel sürtünme açısına ( $\phi$ ), duvar-zemin sürtünme açısına ( $\delta$ ) ve duvar arkasındaki şevim eğimine ( $\beta$ ) bağlı olarak aşağıdaki formül ile ifade etmiştir [15]:

$$k_{ax-ult} = a_1 - b_1 \cdot \left(\frac{\phi+20}{36}\right)^{c_1} \cdot \left(\frac{\delta+0.1}{30}\right)^{d_1} \cdot \left(\frac{\beta+15}{5}\right)^{e_1} \quad (1)$$

Burada  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$  ve  $e_1$  formül katsayıları olup değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Ayrıca,  $\phi \geq 20^\circ$ ,  $\delta \geq 15^\circ$ ,  $\beta \leq \phi/2$  olmalıdır.

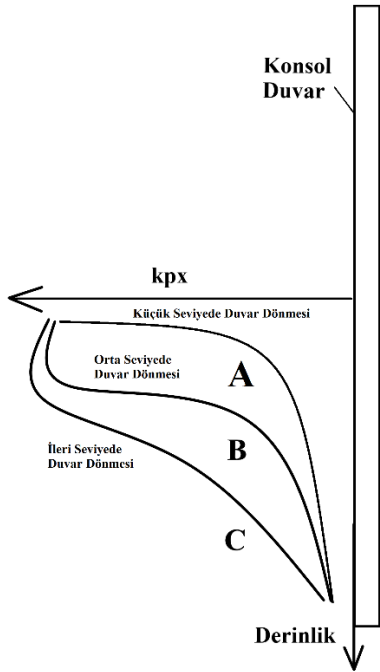


Tablo 1.  $k_{ax-ulu}$  formülünün katsayıları

$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$	$e_1$
2,686955	2,338920	0,194972	0,041700	-0,026646

### Pasif Toprak İtkisi Katsayısı Formülü

Pasif itkinin oluşması için gerekli dönme miktarı  $\theta=0,01-0,02$ rad civarında olduğundan ve bu dönme değerine konsol bir duvarda kolayca ulaşılamayacağından, pasif itki formülüne açılal dönme eklemek gerekmektedir. Pasif itkinin yatay bileşeninin ( $k_{px}$ ) konsol bir duvarda, dönme seviyelerine göre değişimi Şekil 3’de verilmektedir. Buna göre küçük dönmelerde duvarın dönmesine karşı koyan kısım toprağın üst taraflarındadır (Şekil 3,A). Daha büyük dönmelerde duvarın alt tarafları buna katılmaktadır (Şekil 3, B, C). Verilen bu eğriler Padfield ve Mair tarafından verilen parabol şeklindeki eğriye benzerlik göstermektedir.



Şekil 3. Konsol bir duvarda oluşan pasif itki katsayısının yatay bileşeninin duvar dönmesine göre değişimi [15]

Öte yandan bu eğrilerin derinlik boyunca dağılımlarının formülize edilmesi zor olduğundan Hamderi  $k_{px}$  değerinin 1 m’lik bir derinlik için ağırlıklı ortalamasını ( $k_{px-avg}$ ) hesaplayan bir formül türetmiştir. Granüler zeminde pasif toprak itkisi katsayısının ortalama değerinin yatay bileşenini, %1 uzamadaki zemin modülüne ( $E_{1\%Strain}$ ), duvarın dönme açısına ( $\theta$ ) içsel sürtünme açısına ( $\phi$ ), duvar-zemin sürtünme açısına ( $\delta$ ) ve duvar arkasındaki şevim eğimine ( $\beta$ ) bağlı olarak aşağıdaki gibi vermektedir:

$$k_{px-avg} = \sum_{n=0}^{n=5} a_{4n} \cdot \left[ \begin{array}{l} b_{4n} \cdot \left( \frac{E_{1\%Strain}}{50000[kPa]} \right)^{c_{4n}} \cdot \left( \frac{(\phi + 20)}{36} \right)^{d_{4n}} \\ \left( \frac{(\delta + 0.1)}{30} \right)^{e_{4n}} \\ \left( \frac{(\beta + 15)}{15} \right)^{f_{4n}} \cdot (1000\theta_p + 0.0001) \end{array} \right]^n \quad (2)$$

Burada  $a_{4n}$ ,  $b_{4n}$ ,  $c_{4n}$ ,  $d_{4n}$ ,  $e_{4n}$ ,  $f_{4n}$  formül katsayıları olup değerleri Tablo 2’de verilmektedir. Ayrıca,  $\phi \geq 20^\circ$ ,  $\delta \geq 15^\circ$ ,  $\beta \leq \phi/2$  olmalıdır.

Tablo 2.  $k_{px-avg}$  formülünün katsayıları

n	a4	b4	c4	d4	e4	f4
5	8,4099	0,0539	0,5568	0,3958	-1,3184	-0,2440
4	-113,8981	-0,3215	0,8349	-2,9180	0,2616	-0,2772
3	45,8769	0,4577	0,8605	-2,6712	0,2287	-0,2310
2	-189,3166	0,1596	0,8914	-1,8668	0,1214	-0,1128
1	44,6176	0,0664	0,9228	0,2888	0,0406	0,2456
0	0,6705					

### Farklı metotlar ile rijit konsol duvar stabilite hesabı

Rijit konsol duvarların stabilite hesabında dönme ve ötelemeye karşı tahkikler yapılır. Konsol duvar rijit bir giriş olarak kabul edilirse d derinliğindeki dönme noktası üzerinde ve altında pasif ve aktif kuvvetlerin dönme noktasına göre momentleri sıfır olmalıdır (Şekil 1 ve 4). Buradaki çalışmada dönme noktasının altındaki küçük alandaki pasif ve aktif itkiler hesaba katılmayacaktır. Moment dengesi şartına ilaveten pasif ve aktif kuvvetlerin yataydaki bileşkesi teorik olarak sıfır olmalıdır. Ancak, hesaplara güvenlik sayıları da eklendiğinde denge tahkikleri bir miktar teoriden uzaklaşmaktadır.

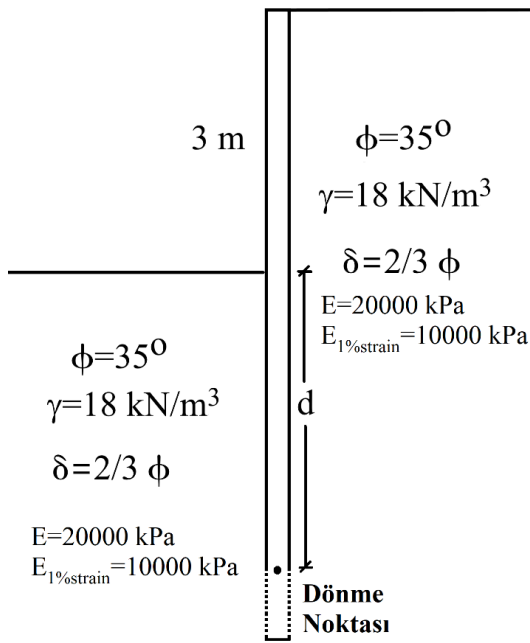
Şekil 4’deki gibi granüler zeminde bulunan 3 m yüksekliğindeki konsol duvarın Coulomb aktif ve pasif kuvvet katsayıları kullanılarak yapılan Faktörlü Moment Metodu (FMM) tahkiki Tablo 3a’da verilmektedir. İçsel sürtünme açısının  $35^\circ$ , zemin-duvar arayüz açısının  $23,3^\circ$  alındığı Coulomb pasif itki formüle göre hesaplanan yatay pasif etki katsayısı 9,1’dir. Buna karşılık aktif itki katsayısı 0,22 olarak hesaplanmıştır. FMM metodunda pasif itkinin d noktası etrafında oluşturduğu moment aktif itkinin oluşturduğunun iki katı olmalıdır. Bu değeri sağlayan d derinliği 1,75 m’dir. Daha sonra pasif itkinin yatay bileşeninin aktif itkinin yatay bileşeninden daha büyük olup olmadığı kontrol edilmelidir. Tablo 3a’da görüldüğü üzere bu koşul da sağlanmaktadır.

Aynı sisteme Coulomb itkileri altında Faktörlü Parametre Metodu (FPM) uygulanırsa d derinliği 2 m bulunur (Tablo 3b). FPM tahkikinde moment dengesinde güvenlik katsayısı

uygulanmaz. Buna karşın içsel sürtünme açısına ( $35^\circ$ ) 1,25 güvenlik katsayısı uygulanmıştır. FMM de olduğu gibi yatayda hesaplanan pasif itkinin aktif itkiden büyük olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Hamderi tarafından verilen  $k_{ax-ult}$  formülüne göre aktif yatay itki katsayısı 0,25 olarak hesaplanmıştır (Tablo 3c). Bu değer Coulomb ile hesaplanan değere çok yakındır. Hamderi'nin pasif itki katsayısında ( $k_{px-avg-hamderi}$ ) içsel sürtünme açısına ilaveten  $E_{1\%strain}$  ve dönme açısı  $\theta$  mevcuttur. Zeminin %1 uzamadaki modülü ( $E_{1\%strain}$ ) 10000 kPa alınmıştır. Betonarme yapılarda izin verilen bağıl dönme/sehim miktarının 1/500 civarında olduğundan yola çıkarak, güvenli tarafta kalınarak duvar dönmesi formüle 1/1000 olarak girilmiştir (Tablo 3c). Bulanan pasif yatay itki katsayısı 1,37 olup bu değer Coulomb ile bulunan 9,1 değerinden oldukça düşüktür. Hamderi'nin formülünü kullanarak FMM yöntemine göre hesaplanan d derinliği 2,95 m'dir. Bu değer Hamderi'nin formülü FPM yöntemine uygulandığında 2,90 m olmaktadır (Tablo 3d).

Kerisel ve Absi'nin tablolarını kullanarak aktif itki katsayısı 0,22 olarak hesaplanmaktadır (Tablo 3e). Bu değer Coulomb ve Hamderi'nin formülleriyle hesaplanan değerlere benzerlik göstermektedir.



Şekil 4. Rijit konsol bir duvar ve çevresindeki zemin özellikleri

Kerisel ve Absi tabloları yardımıyla hesaplanan pasif yatay itki katsayısı 7 olup bu değer Coulomb ile hesaplanan değerden bir miktar düşük, ancak Hamderi'nin formülü ile hesaplanan değerden oldukça yüksektir. FMM ve FPM ile Kerisel ve Absi tablolarından elde edilen aktif ve pasif katsayılar ile kullanılırsa, her iki yöntemde de d derinliği 2 m olarak bulunmaktadır (Tablo 3e, 3f).

Genel olarak FMM ve FPM ile hesaplanan d derinlikleri benzerdir. Öte yandan Hamderi'nin formülüne göre

hesaplanan d derinlikleri Coulomb ve Kerisel ve Absi'ye göre hesaplanan derinliklere göre oldukça konservatif tarafta kalmaktadır. Bu durumu açıklayabilmek için bir sonraki bölümde aynı problem sonlu elemanlar yöntemi ile çözülecektir.

Tablo 3. d derinliği farklı yöntemler ile hesap adımları

a) Coulomb ile Faktörlü Moment Metodu					
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^\circ$ (Güvenli k Faktörü=1)	$M_{pasif}$ (kN.m)	$M_{pasif}/M_{aktif}$	$F_{pasif}$ (kN)	$F_{pasif}/F_{aktif}$
18,0	35,0	147,1	2,0	252,1	5,5
$k_{px-coulomb}$	$k_{ax-coulomb}$	$M_{aktif}$	$\delta^\circ$	$F_{aktif}$ (kN)	<b>d (m)</b>
9,1	0,22	72,2	23,33	45,6	1,75

b) Coulomb ile Faktörlü Parametre Metodu					
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^\circ$ (Güvenli k Faktörü=1,25)	$M_{pasif}$ (kN.m)	$M_{pasif}/M_{aktif}$	$F_{pasif}$ (kN)	$F_{pasif}/F_{aktif}$
18,0	28,0	117,1	1,0	175,7	2,6
$k_{px-coulomb}$	$k_{ax-coulomb}$	$M_{aktif}$	$\delta^\circ$	$F_{aktif}$ (kN)	<b>d (m)</b>
4,88	0,30	114,2	18,67	68,5	2,00

c) Hamderi ile Faktörlü Moment Metodu						
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^\circ$ (Güvenli k Faktörü=1)	$M_{pasif}$ (kN.m)	$M_{pasif}/M_{aktif}$	$F_{pasif}$ (kN)	$F_{aktif}$ (kN)	$F_{pasif}/F_{aktif}$
18,0	35,0	316,7	2,0	214,7	156,2	1,4
$E_{1\%strain}$	$\theta_{pasif}$	$M_{aktif}$	$k_{px-avg-hamderi}$	$k_{ax-ult-hamderi}$	<b>d (m)</b>	
10000	-1/1000	154,9	1,37	0,25	2,95	

d) Hamderi ile Faktörlü Parametre Metodu						
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^\circ$ (Güvenli k Faktörü=1,25)	$M_{pasif}$ (kN.m)	$M_{pasif}/M_{aktif}$	$F_{pasif}$ (kN)	$F_{aktif}$ (kN)	$F_{pasif}/F_{aktif}$
18,0	28,0	287,0	1,4	197,9	207,4	1,0

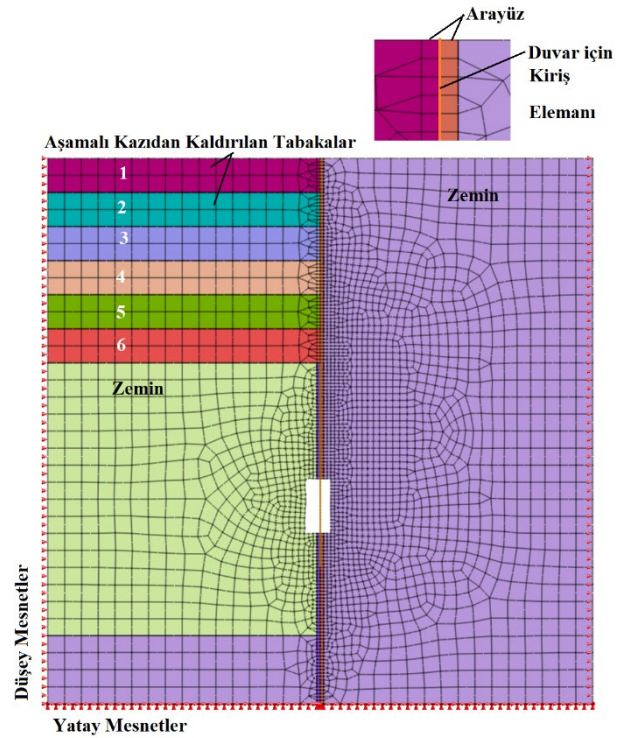
$E_{1\%str}$ ain (kPa)	$\theta_{pas}$	$M_{aktif}$	$k_{px-avg-}$ hamdeleri	$k_{ax-ult-}$ hamdeleri	$d$ (m)
10000	-1/1000	204,0	1,31	0,33	<b>2,90</b>

e) Kerisel ve Absi ile Faktörlü Moment Metodu						
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^{\circ}$ (Güvenli k Faktörü=1)	$M_{pasif}$ (kN.m)	$M_{pasif}/M_{aktif}$ $f$	$F_{pasif}$ (kN)	$F_{aktif}$ (kN)	$F_{pasif}/F_{aktif}$
18,0	35,0	168,0	<b>2,0</b>	252,0	49,5	<b>5,1</b>
$k_{px-}$ Kerisel & Absi	$k_{ax-}$ Kerisel & Absi	$M_{aktif}$	$d$ (m)			
7,0	0,22	82,5	<b>2,0</b>			

f) Kerisel ve Absi ile Faktörlü Parametre Metodu					
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi^{\circ}$ (Güvenli k Faktörü=1.25)	$M_{pasif}$ (kN.m)	$M_{pasif}/M_{aktif}$ $f$	$F_{pasif}$ (kN)	$F_{pasif}>F_{aktif}$
18	28	115	<b>1,0</b>	173	<b>2,56</b>
$k_{px-}$ Kerisel & Absi	$k_{ax-}$ Kerisel & Absi	$M_{aktif}$	$F_{aktif}$ (kN)	$d$ (m)	
4,8	0,3	113	68	<b>2,0</b>	

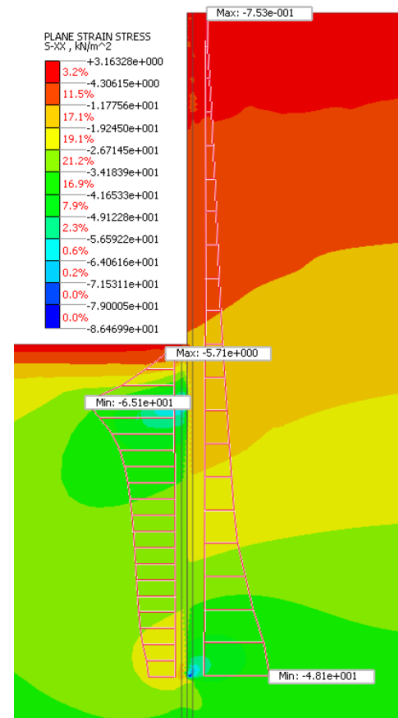
### 3 m yükseklikli konsol istinat duvarının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi

MIDAS GTX NX sonlu elemanları programında modellenen 3 m yüksekliğindeki konsol duvarın gömme derinliği de 3 m alınmıştır. Duvar elemanı olarak 1 m kalınlıklı betonarme kare kiriş kesit kullanılmıştır. Kiriş lineer elastik olarak tanımlanmış, elastik modülü ise 30 GPa olarak alınmıştır. Zemin Mohr-Coulomb zemin modeli ile oluşturulmuş, programa Şekil 4'de verilen değerler girilmiştir ( $\phi=35^{\circ}$ ,  $\delta=23.3^{\circ}$ ,  $E_{1\%strain}=10000$  kPa,  $\gamma=18$  kN/m<sup>3</sup>, Poisson Oranı=0.35). Zemin-duvar arayüzünü modellenmesi işi, kiriş yakınındaki ince tabakanın içsel sürtünme açısının azaltılması yöntemiyle yapılmıştır ( $\delta=2/3 \phi$ ). Sonlu elemanlar ağı kenar ortasında nodların bulunduğu kare ve üçgen elemanlar ile oluşturulmuştur (Şekil 5). Modelde aşamalı imalat yöntemi kullanılmıştır. Birinci aşamada zeminin ilk gerilmeleri oluşturulmuş, ikinci aşamada duvar yerleştirilmiş ve daha sonra 6 aşamada duvarın ötü kazılmıştır.



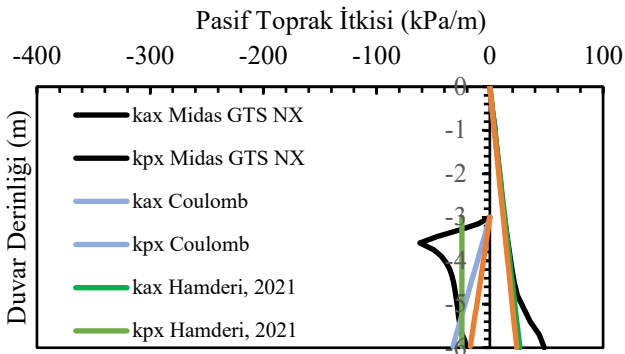
Şekil 5. 3 m yükseklikli konsol istinat duvarının sonlu elemanlar modeli

Şekil 6'da 6. kazı aşaması sonunda duvar boyunca oluşan itkiler verilmiştir. Duvarın sağında itki üçgen şeklinde olup literatürde kullanılan dağılıma benzerdir. Duvarın solundaki pasif itki dağılımı ise uygulamada kullanılan dağılımdan oldukça farklı olup Padfield ve Mair tarafından önerilen dağılıma benzerlik göstermektedir [8] (bknz. Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 6. 3 m yükseklikli konsol istinat duvarında oluşan yatay toprak itkileri

Midas GTS NX programında 3 m yüksekliğindeki duvar için yaklaşık 3 mm yatay deplasman elde edilmiştir. Bu da 1/1000 dönme değerine karşılık gelmektedir. Hamderi'nin pasif itki formülüne dönme değeri doğrudan girilebilmektedir. Ancak diğer formüller ile hesaplanan pasif itkiler EN-1997-1 Tablo C.2'de verilen oranlar doğrultusunda azaltılmalıdır. Bu tabloda gevşek zeminlerde duvarın 15/1000 dönmesi ile en büyük pasif itkinin yarısına ulaşıldığı belirtilmektedir. Öte yandan beklenen dönme için (1/1000) Tablo C.2'de herhangi bir pasif itki azaltma değeri bulunmamaktadır. Bu yüzden, karşılaştırmanın merteye olarak doğru olabilmesi için Coulomb, Kerisel ve Absi formüllerinin verdiği pasif itki değerleri kabaca 15'e bölünecektir. Şekil 7'de konsol duvarda farklı yöntemler ile bulunan toprak itkilerine yer verilmiştir. Buna göre sağ tarafta oluşan aktif itkiler bakımından Coulomb, Hamderi, Kerisel ve Absi, ve Midas GTS NX yöntemleri arasında pek bir fark bulunmamaktadır. Sol tarafta oluşan pasif itkilerde Hamderi ve Midas GTS ile 15 kat azaltılan Coulomb, Kerisel ve Absi yöntemleri merteye olarak benzer sonuçlar vermektedir. Öte yandan böyle bir azaltma mevcut bilimsel çalışma kapsamında yapılmış olup mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği mümkün değildir. Pasif itki hesaplamada dönme doğals olarak içeren bir formülün kullanılması daha uygun olacaktır.



Şekil 7. 3 m yükseklikli konsol istinat duvarında farklı yöntemler ile bulunan toprak itkileri

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında açısıl dönme tabanlı aktif ve pasif toprak itki formülü tanıtılmıştır. Özellikle pasif itki için olan formül duvarın açısıl dönmesini ve zemin modülünü de hesaba kattığından oldukça hassas yaklaşım sunmaktadır.

Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Aktif toprak itki duvardaki küçük bir açısıl dönme ile kararlı duruma ulaşmaktadır. Farklı yöntemler benzer sonuçlar vermektedir.
- Konsol istinat duvarlarda, yönetmeliklerde izin verilen dönme miktarı çerçevesinde pasif toprak itki kararlı duruma ulaşmamaktadır. Konsol duvarlar için dönme açısına bağlı olmayan formüller kullanıldığında kuvvet dengesi hesabı sorunsuz olsa da deplasman kriteri sağlanmayacaktır. Hesabın tam olması için sonlu elemanlar programında deplasman analizi de gereklidir.

- Bu çalışma kapsamında verilen açısıl dönme tabanlı pasif itki katsayısına göre çözümlenen konsol istinat duvarı için bulunan itkiler sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan değerlere yakındır.
- Bu çalışmada sunulan yöntemin konsol istinat duvarlarının tasarımında güvenilir bir araç olacağı 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.

## Kaynaklar

- [1] Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics in engineering practices. New York: Wiley.
- [2] Caquot, A. I., ve J. Kerisel. 1948. Tables for the calculation of passive pressure, active pressure, and bearing capacity of foundations. Paris: Gauthier-Villars.
- [3] Rankine, W. J. M. 1857. "On the stability of loose earth." Proc. R. Soc. London 8: 185–187.
- [4] Coulomb, C. A. 1776. Essai sur une application des regles des maximas et minmas a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. [In French.] Paris: Academie Royale Des Sciences.
- [5] Poncelet, J. V. 1840. Mémoire sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations. Note additionnelle sur les relations analytiques qui lient entre elles la poussée et la butée de la terre. Memorial de l'officier du génie. Paris: Imprimerie et librairie de Bachelier.
- [6] Kérisel, J., and E. Absi. 1990. Active and passive earth pressure tables, Rotterdam, Netherlands: Balkema.
- [7] EN 1997-1, 2004: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Brussels: The European Union.
- [8] Padfield, C. J., ve R. J. Mair. 1984. Design of retaining walls embedded in stiff clay. London: CIRIA.
- [9] Clough, G. W., ve J. M. Duncan. 1991. "Earth pressures." Foundation engineering handbook, uyarlayan H. Y. Fang, 223–235. 2nd ed. New York: Chapman and Hall.
- [10] CGS (Canadian Geotechnical Society). 2006. Canadian foundation engineering manual. 4th. ed. Richmond, BC, Canada: CGS
- [11] Chen, L. 2014. "Active earth pressure of retaining wall considering wall movement." Eur. J. Environ. Civ. Eng. 18 (8): 910–926.
- [12] Bang, S. 1985. "Active earth pressure behind retaining walls." J. Geotech. Eng. 111 (3): 407–412.

- [13] Chang, M. F. 1997. "Lateral earth pressures behind rotating walls." *Can. Geotech. J.* 34 (4): 498–509.
- [14] Duncan, M., ve R. L. Mokwa. 2001. "Passive earth pressures: Theories and tests." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127 (3): 248–257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:3\(248\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:3(248)).
- [15] Hamderi, M. 2021. "Finite Element–Based Coefficient of Lateral Earth Pressure for Cohesionless Soil" *Int. J. Geomech.* 21 (5).
- [16] EN-1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1



# Eruh Su Dağıtım Şebekesinin Metasezgisel Yöntemlerle Optimizasyonu

## Optimization Of Eruh Water Distribution Networks Using Metaheuristic Methods

Recep Demir<sup>1\*</sup>, Fevzi Önen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İLBANK A.Ş. Diyarbakır Bölge Müdürlüğü, [mrcepdmr@gmail.com](mailto:mrcepdmr@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5694-2449>

<sup>2</sup> Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [fonen@dicle.edu.tr](mailto:fonen@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2368-1035>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 25 Temmuz 2023  
Revizyon 31 Ekim 2023  
Kabul 26 Aralık 2023  
Online 31 Aralık 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Epanet programı, Matlab, Epanet-MATLAB araç seti, Genetik algoritma, optimizasyon

### ÖZ

Suyun tüketicilere ulaştırılması maliyet gerektiren birçok işlemde oluşmaktadır. Bu maliyetin büyük bir kısmını su dağıtım şebekeleri oluşturmaktadır. Bu doğrultuda suyun tüketicilere ulaştırılması için kullandığımız şebeke borularının tasarımı da önem kazanmaktadır. Şebeke borularının maliyetlerini azaltmak için şebekenin tasarımı ve optimize edilmesi amacıyla kullanılan birçok yöntem geliştirilmiştir. Metasezgisel yöntemler kullanılarak boru çaplarının optimize edilmesi de bu yöntemlerden bir tanesidir.

Bu çalışmada Siirt ilinin Eruh ilçesine ait mevcut içme suyu şebeke hattı, Epanet programında yeniden tasarlandıktan sonra Epanet-Matlab araç seti kullanılarak şebekedeki boruların çapları ile ilgili maliyet optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon da metasezgisel yöntemlerden olan genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Mevcut durumuna uygun bir şekilde Epanet programı yardımı ile yeniden tasarlanan şebeke hatları, Matlab programına aktarıldıktan sonra şebeke borularına belli basınç kısıtlayıcıları getirilmiştir. Bu doğrultuda genetik algoritma kullanılarak şebeke boruları optimize edildikten sonra elde edilen yeni boru çapları yeniden Epanet programına girilerek sistem başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 25 July 2023  
Received in revised form 31 October 2023  
Accepted 26 December 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Epanet program, Matlab, Epanet-MATLAB toolset, Genetic algorithm, optimization

### ABSTRACT

Due to the increasing population in our country, the correct use of water resources and the delivery of water to consumers are becoming increasingly important. The delivery of water to consumers consists of many processes that require cost. Water distribution networks constitute a large part of this cost. In this direction, the design of the network pipes we use to deliver water to consumers also gains importance. In order to reduce the costs of network pipes, many methods have been developed to design and optimize the network. Optimizing pipe diameters using metaheuristic methods is one of them.

In this study existing drinking water network of Eruh, which is a district of Siirt province, was redesigned with the Epanet program. After that, by using the Epanet-Matlab toolkit, the cost optimization of the water network was made regarding the diameters of the pipes in the network. Genetic algorithm (GA), which is one of the metaheuristic methods, was used in the optimization. After the network lines, which were redesigned with the help of the Epanet program in accordance with the current situation, were transferred to the Matlab program, certain pressure restrictors were introduced to the network pipes. In this direction, after the network pipes were optimized using genetic algorithm, the new pipe diameters obtained were re-entered into the Epanet program and the system was operated successfully.

Doi: 10.24012/dumf.1332405

\* Sorumlu Yazar



## Giriş

Tüm canlılar için vazgeçilmez olan su, yaşamın temel kaynaklarından birisidir. İnsanlık tarihinin başlangıcından günümüze yerkürede su bulunmaktadır. Dünyanın her yerinde kurulmuş olan medeniyetler suyun var olduğu bölgelerde kurulmuşlardır. İnsanoğlunun yerleşik hayata geçmesinin temelinde de sürekli su kaynaklarına ulaşım etkili olmuştur. Medeniyetlerin kurulması, mevcudiyetini devam ettirebilmesi su kaynaklarının varlığı ile mümkündür. Suyun yeterli miktarda ve istenilen kalitede olması insanlık tarihi açısından büyük önem taşımaktadır. İnsanlık tarihinde suyun yanlış kullanımı sebebiyle çöken birçok medeniyet bulunmaktadır. Su, kalabalık toplulukların bir arada yaşamını sürdürebilmesi için gerekli en temel şarttır. Kentlerin artan nüfus ve ihtiyaçları göz önüne alındığında suyun tek başına varlığı da anlamını yitirmekte olup, suyun dağıtım ve kontrolü açısından hidrolik mühendisliğin önemi gün geçtikçe daha çok artmaktadır.

Suyun temel kaynakları ise yeraltı suları, kar ve yağmur suları, nehirler, göller, denizler, okyanuslar ve buzullar olarak sınıflandırılabilir. Dünyada bulunan suyun (1400 milyon km<sup>3</sup>) %2,5'i (35 milyon km<sup>3</sup>) tatlı su kaynakları, %97,5'lik kısmı tuzlu su kaynaklarından oluşmaktadır. Toplam suyun %2,5'lik kısmını oluşturan tatlı su kaynaklarının %0,3'ü (105 000 km<sup>3</sup>) göller ve nehirlerde kullanılabilir durumda iken, kalan büyük bir kısmı ise kutup bölgelerinde ve yüksek dağlarda buzul halinde ve yeraltı suları şeklinde bulunmaktadır (Muluk vd., 2013).

Uzaydan çekilmiş bir uydu fotoğrafından dünyamıza bakıldığında büyük bir bölümünün su olduğu görünecektir. Bunun sebebi ise Dünya yüzeyinin büyük bir kısmının okyanuslarla kaplı olmasıdır. Bu şekilde olması, Dünyada bulunan suyun sanki hiç bitmeyeceği gibi yanlış bir algı oluşturabilir. Dünyada ki suyun yaklaşık 1.338 milyar km<sup>3</sup>'lük miktarı denizler ve okyanuslarda bulunan tuzlu sudur. Bu suyun insanlar için sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi ekonomik değildir. Bahsi geçen miktar, yeryüzünde bulunan toplam suyun %97,5'una karşılık gelmektedir. Dünyada bulunan su kaynaklarını incelediğimizde; tarımsal, evsel ve sanayide güvenli bir şekilde kullanılabilen su miktarı dünyada bulunan suyun ancak %2,5'lik kısmını oluşturmaktadır (Chin, 2000).

Tüm bunlar göz önüne alındığında su kaynaklarının yönetiminin yanı sıra su kaynaklarının tüketicilere uygun maliyetlerde ulaştırılması da büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde su kaynaklarının tüketiciye sağlıklı bir şekilde ulaştırılması işlemi kapalı sistemler kullanılarak yapılmaktadır. Kullanılan bu şebeke sistemlerinin uygun maliyette inşa edilmesi hidrolik mühendisliğin başlıca araştırma konusu olmuştur. İnşa edilecek su dağıtım şebekelerinin amacı talep edilen suyun en uygun maliyette belirli basınçlar altında kesintisiz bir şekilde tüketiciye ulaştırılmasıdır. Su dağıtım sistemleri içerisinde bulunan (hazne, derleme, iletim, kaynak ve dağıtım) maliyet oranlarına baktığımızda, suyunun iletimi ile dağıtım kısmının maliyeti %56'dır (Özdağlar vd., 2006).

Su Dağıtım Sistemleri	
İletim ve dağıtım	%56
Aritma	%26
Depolama	%9
Kaynak	%8
Diğerleri	%1

Tablo 1. Su dağıtım sistemlerinin maliyet dağılımı (Özdağlar vd., 2006)

Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere iletim ve dağıtım sistemlerinin su dağıtım ve iletim maliyetinde %56 ile en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. İletim ve dağıtım sistemlerinin içerisinde bulunan boru maliyetleri ise toplam maliyetin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

New York şebekesini ele alan Schaaque ve Lai (1969) Dinamik Programlama (DP) yöntemini kullanarak şebekenin global optimum değeri üzerine çalışma yapmışlardır. Literatürde en çok kullanılan ve Alperovits ve Shamir (1977) tarafından oluşturulmuş, 8 adet borudan oluşan hayali bir şebeke olan Alperovits ve Shamir (1977) şebekesi üzerinde Lineer programlama (LP) yöntemiyle optimum değerin bulunduğu çalışmadır. Daha sonraki yıllarda ise Lineer programlamanın yanı sıra Lineer Eğimli Olmayan Programlama (LEOP) da birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. 1981 yılında ise Quindry ve arkadaşları (1981) New York şebekesini LP metoduyla ele alıp maliyet optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Yapılan bu optimizasyonun sonucunda şebekenin maliyet değerinin %13 oranında azaltıldığı tespit edilmiştir. Alperovits ve Shamir'in (1977) oluşturdukları gerçek olmayan bir şebeke üzerinde uyguladıkları LP yöntemini 1989 yılında Kessler ve Shamir'in amaç fonksiyonunu ve şebeke debilerinin değiştirmesi sonucu yaptıkları optimizasyonda Alperovits ve Shamir'in 1977 yılında elde ettikleri 497,525 birim maliyet değerini 417,500 birim maliyet değerine düşürmüşlerdir.

Bu çalışmada yapımı tamamlanmış olan bir şehir şebekesinin boru maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla dağıtım şebekesi mevcut durumuna göre Epanet programında yeniden tasarlanmış, Matlab programı yardımıyla metasezgisel algoritmalar kullanılarak boru maliyet analizleri yapılmıştır. Mevcut çalışma iletim ve dağıtım sistemlerinin maliyet açısından önemli bir kısmını oluşturan boru maliyetlerinin minimize edilmesini sağlayarak toplam maliyeti azaltma imkânı sağlamıştır.

## Materyal

Siirt İlinin Erüh ilçesi içme suyu hattının tasarımı ve gerekli hidrolik hesapları Epanet programı kullanılarak yapılmıştır. Epanet ile tasarlanan sistemin çıktılarını Epanet'i Matlab'a bağlamamıza yarayan bir araç seti ile Matlab'a yüklenmiştir. Matlab R2018 programı kullanılarak optimizasyon işlemi yapılmıştır.

## Eruh ilçesinin genel durumu

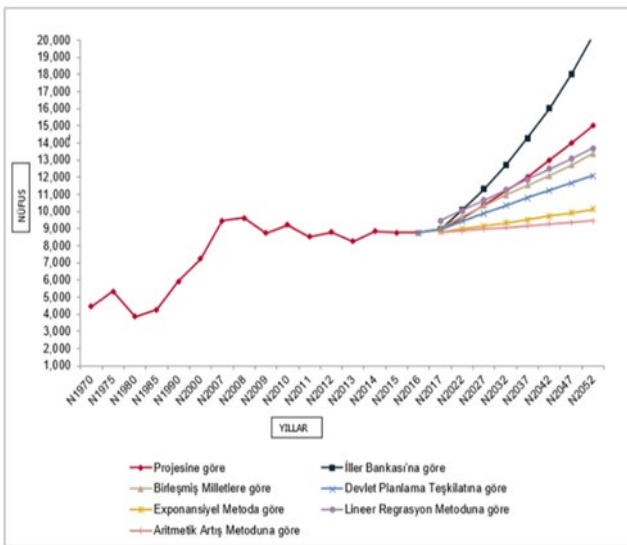
Güneydoğu Anadolu bölgesinde bulunan Eruh ilçesi Siirt iline bağlı ilçe merkezidir. İlçenin doğusunda Şırnak Güneydoğusunda ve batısında Siirt ili yer almaktadır. İlçede toplam 3 mahalle mevcut olup bunlar Fatih, Sarıgül ve diğ mahalleleridir. Şekil 1’de görüldüğü gibi Eruh ilçesi Güneydoğu Anadolu bölgesinde oldukça dağlık bir kesimde yer almaktadır (Demir, 2022).



Şekil 1. Eruh İlçesi Genel Görünüm (Demir, 2022)

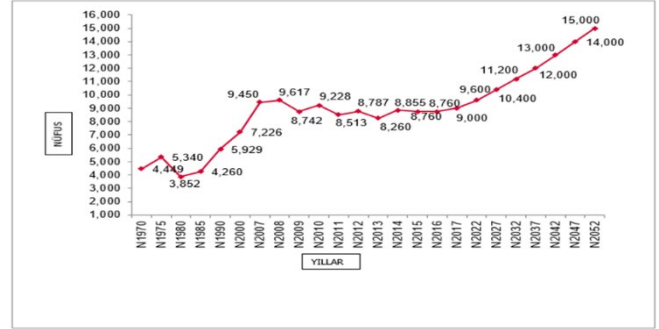
## Nüfus hesapları

Bir yerleşim biriminin içme ve kullanma suyu ihtiyacının belirlenmesi doğrudan doğruya nüfus ile doğru orantılıdır. Eruh ilçesi nüfusu İller Bankası Şartnamesine, geometrik (exponansiyel) metoda, lineer regresyon metodu ve aritmetik artış metoduna, DPT ve BM teşkilatı tarafından yapılan kabullere göre hesaplanarak Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Eruh ilçesi içme suyu projesi nüfus artışları grafiği (Özbek, 2017)

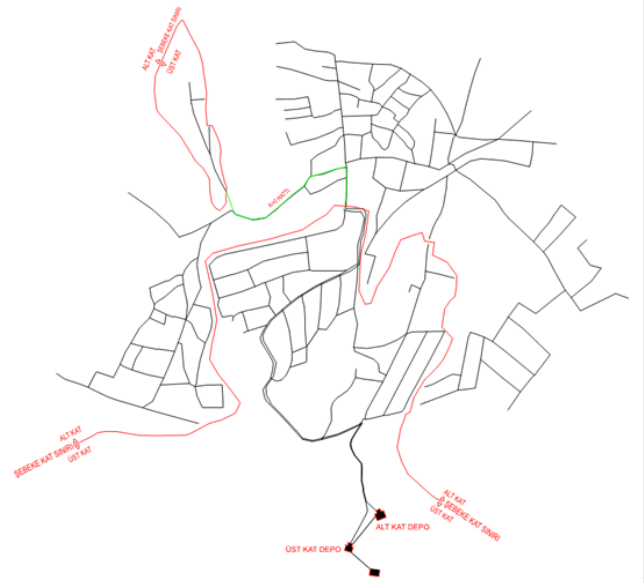
İller Bankası şartnamesine göre 2016 yılı baz alınarak yapılan Siirt ilinin Eruh ilçesine ait gelecek nüfus hesaplamasında  $\text{Ç}$  katsayısı 1.5 alınarak 2052 yılı nüfusu  $N_{2052} = 15000$  kişi olarak hesaplanarak Şekil 3 de gösterilmiştir.



Şekil 3. Eruh ilçesi içme suyu projesi İller Bankası şartnamesine esas nüfus grafiği (Özbek, 2017)

## Su dağıtım şebekesi

Eruh ilçesi içmesuyu projesine göre ilçenin gelecekteki içme suyu ihtiyacı Siyahçeşme kaynağından karşılanacaktır. Siyahçeşme kaynağı, Eruh’un güneydoğusunda yer alan kireçtaşlarından boşalan karstik kaynaktır. Cazibeyle gelen suyun debisi  $Q_{maks}$ : 110 lt/sn ve  $Q_{min}$ : 60 lt/sn’dir. Proje debisi ise,  $Q = 40$  lt/sn’dir. Siyahçeşme kaptajının kaynak krepin kotu 1271,48 m’dir. Onaylı projeye göre Eruh içme suyu şebeke tesisi 2 katlı olarak çözümlenmiştir. Üst kat şebeke 1224,00 m krepin kotunda inşa edilecek olan  $V = 400$  m<sup>3</sup> depodan beslenecektir. Alt kat şebeke ise 1187,00 m krepin kotunda inşa edilecek olan  $V = 1500$  m<sup>3</sup> depodan beslenecektir. Şekil 4.’te Eruh ilçesi içme suyu tesisinin projesi verilmiştir.



Şekil 4. Eruh ilçesi içme suyu projesi 1. kademe şebeke hatları (Demir, 2022)

## Epanet

Epanet programı basınçlı şebekelerdeki hidrolik davranışın ve suyun kalitesinin değişimini çok zamanlı simülasyonlarla (bir gün veya birkaç gün) gerçekleştiren bir bilgisayar programıdır. İçmesuyu şebekesi, borulardan, düğümlerden (boru bağlantıları) pompalardan, valflerden, depolama tanklarından ve rezervuarlardan oluşur. Epanet, birden çok zaman adımından oluşan bir simülasyon süresi boyunca borulardaki akışların gelişimini, her düğümdeki basıncı, tanklardaki su yüksekliğini ve ağdaki kimyasal türlerin konsantrasyonunu izler. Ek olarak, su yaşını simüle edebilir ve kaynak takibi yapabilir. Epanet, bir su dağıtım ağını düğüm noktalarına bağlı bir grup bağlantı olarak modeller. Bağlantılar boruları, pompaları veya kontrol valflerini temsil eder. Düğümler, su talebi olan veya olmayan tankları, rezervuarları veya boru bağlantılarını temsil eder. (Niño vd., 2018).

Epanet'in hidrolik modelleme kabiliyetleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Rossman, 2000);

- Şebekeyi çözerken Darcy-Weisbach, Chezy-Manning ya da Hazen-Williams formüllerini kullanarak yük kayıplarını hesaplar.
- Şebeke ağının boyutlarına sınır koymaz.
- Düğüm noktaları, bağlantı parçaları gibi noktalarda oluşan küçük yersel kayıpları içerir.
- Pompaları modeller ve pompalama için gereken enerjiyi hesaplar.
- Kontrol, basınç vb. vanaları modeller.
- Depolama tanklarının boyutlandırılmasına ve istediğimiz geometriye sahip olmasına imkân verir.
- Düğüm noktalarında oluşacak taleplere göre modelleme yapılmasına olanak verir.

## Epanet-MATLAB Araç Seti

Epanet'in çağrılma yöntemleri bağımsız bir yürütülebilir yazılım olarak, standart bir kabuk (örneğin, Windows'ta Komut Satırı) aracılığıyla çağrılabilir. Paylaşılan bir nesne olarak, ör. Windows, dinamik bağlantı kitaplığı (DLL), değişik programlama dillerinde (Matlab, C++, VB, Python vb.) yazılmış harici yazılımlar benzeri programlama arabirimleri vasıtasıyla çağrılabilir. Epanet'i Matlab ile ara yüzlemenin üç yöntemi bulunmaktadır;

- İlk yöntem, Matlab'ın kitaplık işlevlerini yüklemek ve çağırmak için yerleşik yöntemlerini (yani loadlibrary ve calllib işlevlerini kullanarak) kullanmayı gerektiren programlama aracının yerleşik işlevi aracılığıyla Epanet kitaplığına doğrudan çağrı yapmaktır.
- İkinci yöntem, "sarmalayıcı" kullanmaktır; Bunlar Epanet işlevleriyle benzer adlandırma kurallarını izleyen, kitaplıkla dahili olarak iletişimi yöneten Matlab yöntemleridir. Kullanıcının özel veri yapıları tasarlamasını gerektirir. Her Epanet işlevi için, karşılık gelen bir Matlab işlevi gereklidir ve bu

işlevler kullanılarak yeni algoritmalar tasarlanmalıdır.

- Üçüncü yöntem, ağ yapısını işlemek için standart bir yol sağlayan bir Matlab sınıfı tanımlayarak, birden çok işlevi kullanan prosedürlerin yanı sıra tüm işlevleri çağırmak, simüle etmek ve genel olarak farklı türleri gerçekleştirmek için nesne yönelimli bir yaklaşım kullanmaktır. İşte Epanet-Matlab Toolkit bu yaklaşımı kullanır.

Epanet'te oluşturulan verilerin Matlab aracılığı ile çağrılabilmesine olanak sağlamanın yanı sıra bu verilerin okunması, işlenmesi ve oluşturulan bir problem üzerine değişiklik yaparak optimizasyon işleminin gerçekleştirilebilmesine olanak sağlayan bir arayüz programıdır. Bu çalışma kapsamında Epanet-Matlab toolkit kullanılmıştır.

## Matlab

Matlab, 1970'lerin sonlarında Cleve Moler tarafından geliştirilmeye başlanan programın ilk sürümü Fortran programlama dilinde yazılmıştır. Jack Little ile Steve Bangert 1983 yılında C programlama dili ile tekrar yazmış ve geliştirme çalışmaları için 1984 yılında MathWorks laboratuvarını kurmuşlardır (Kubat, 2019). Matlab; kontrol, görüntü işleme, istatistik, optimizasyon, bulanık kontrol, sinir ağları, sayısal işaret işleme, güç sistemleri, filtre dizaynı, genetik algoritma, şekil, veri tabanı, web sunucusu, finans vb. gibi çeşitli birçok alanda güvenle kullanılabilen toolbox diye adlandırılan araç kutularına sahip programlama dilidir (Kubat, 2019). Matlab C, C++, Fortran ve Java benzeri dilleri farklı olan programlara bağlanma imkânı da sağlar. Gün geçtikçe özellikleri geliştirilen Matlab, değişik alanlardaki birçok problemin çözümünde de aktif olarak kullanılmaktadır. Birden fazla algoritmaya tek bir satır komutuyla ulaşabilmesi sayesinde birden çok satırda bulunan algoritmaları kısaltıp, hem algoritmanın bitiş süresini hem de bellek ihtiyacını önemli oranda azaltmaktadır (Kubat, 2019).

## Metod

Bu çalışmada kesin projesi tamamlanmış olan Eruh İlçesinin içme suyu şebeke hattı mevcut haline uygun olacak şekilde Epanet programı kullanılarak yeniden tasarlandıktan sonra Epanet-Matlab araç seti vasıtasıyla şebeke üzerinde maliyet optimizasyonu yapılmıştır.

## Su Dağıtım Şebekesinin Tasarlanması

Su dağıtım şebekelerinin ihtiyaca cevap verecek şekilde optimum bir şekilde tasarlayabilmek maliyet açısından çok ehemmiyetlidir. Şebeke içerisinde geniş boruların seçilmesi, işçilik ve nakliye maliyeti açısından çok ekonomik değildir. Geniş çaplı boruların seçilmesinin aksine yetersiz gelecek dar boruların seçilmesi aşırı yük ve hız kaybı ile yetersiz debi gibi problemleri ortaya çıkaracaktır. Bu yüzden boru çapı seçilirken hidrolik hesaplar neticesinde tüm sınırlayıcıları sağlayan, ihtiyaca cevap veren boru çapı tespit edilmelidir.

Epanet programı yardımıyla kolaylıkla tasarımı yapılan su dağıtım şebekelerinin optimum değerine Epanet ortamında ulaşılamamaktadır. Bütün ihtimalleri deneyerek optimum boru çapını bulmak özellikle büyük ve karmaşık şebekelerde neredeyse imkansızdır. Bu haliyle şebekedeki optimum çap değerine ulaşmak optimizasyon problemi haline gelmiştir (Batmaz, 2021, Batmaz ve Kayaalp, 2023). İçme suyu şebeke hatlarını optimum bir şekilde tasarlayabilmek için odaklanılan ana faktör, şebekenin ihtiyaç duyduğu miktarda suyu olabilecek en düşük maliyetle tüketiciye ulaştırmaktır. Bu çalışmada Epanet programı ile yeniden tasarlanan içme suyu şebeke hattı Matlab ile optimize edilerek, kullanılan boruların en uygun maliyetle seçilmesine odaklanılmıştır. Bu doğrultuda şebeke tasarımında kullandığımız amaç fonksiyonu;

$$f = \min \sum_{i=1}^M BD_i L_i \quad (1)$$

bu şekilde ifade edilmiştir. Bu denklemde “f” ifadesi amaç fonksiyonu; “M” ifadesi şebekede bulunan toplam boru sayısı; “BD<sub>i</sub>” ifadesi seçilmiş herhangi bir i sayılı boru birim maliyeti; “L<sub>i</sub>” ifadesi ise seçilen i sayılı borunun uzunluğu olarak ifade edilmektedir. Denklem 1’de belirtilen amaç fonksiyonu ile optimum maliyet hesaplaması yaparken tasarım kriterlerine de hizmet edecek şekilde sınırlayıcılar eklenmiştir. İller Bankasının içme suyu tesisleri etüt, fizibilite ve projelerin hazırlanmasına ait teknik şartnamesinde, içme suyu şebekelerinde işletme basınçlarının minimum ve maksimum değerleri nüfusa göre belirlenmiştir. Buna göre nüfusu 50.000 kişiye kadar olan yerlerde minimum işletme basıncı 20 metre, 50.000 kişiden fazla nüfusu olan yerlerde ise 30 metre alınır. Maksimum işletme basıncı ise şebekenin bulunduğu yerin topoğrafik durumuna da bakılarak 60 – 65 metre olarak alınır. Bu çalışma kapsamında kullanılan Eruh ilçesi içme suyu kesin projesine esas müstakbel nüfusun N<sub>2052</sub> = 15000 kişi olması sebebiyle şebeke düğüm noktalarında kullanılacak minimum basınç değeri 20 metre olarak alınmıştır. Bu basınç değerlerine uyacak şekilde bir basınç sınırlayıcısı eklenmiştir. Düğüm noktalarında basınç sınırlayıcı denklem ise;

$$P_{min} \leq P_j \leq P_{max} \quad j = 1 \dots \dots \dots N \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemde “N” ifadesi şebekede bulunan düğüm noktası sayısının toplamını; “P<sub>min</sub>” ifadesi şebekede bulunan düğüm noktalarının minimum basınç değerini; “P<sub>max</sub>” ifadesi şebekede bulunan düğüm noktalarının maksimum basınç değerini ve “P<sub>j</sub>” ifadesi ise şebekede bulunan j numaralı düğüm noktasının basınç değerini ifade etmektedir. Amaç fonksiyonumuz şebekede bulunan düğüm noktaları basınçlarının istediğimiz alt (P<sub>min</sub>) ve üst (P<sub>max</sub>) sınırları arasında kalmasını sağlayan bir ceza değeriyle sınırlandırılmıştır. Bu ceza değerinin denklemi de amaç fonksiyonumuza eklenmiştir.

$$f = \min \sum_{i=1}^M BD_i L_i + P_{ceza} \quad (3)$$

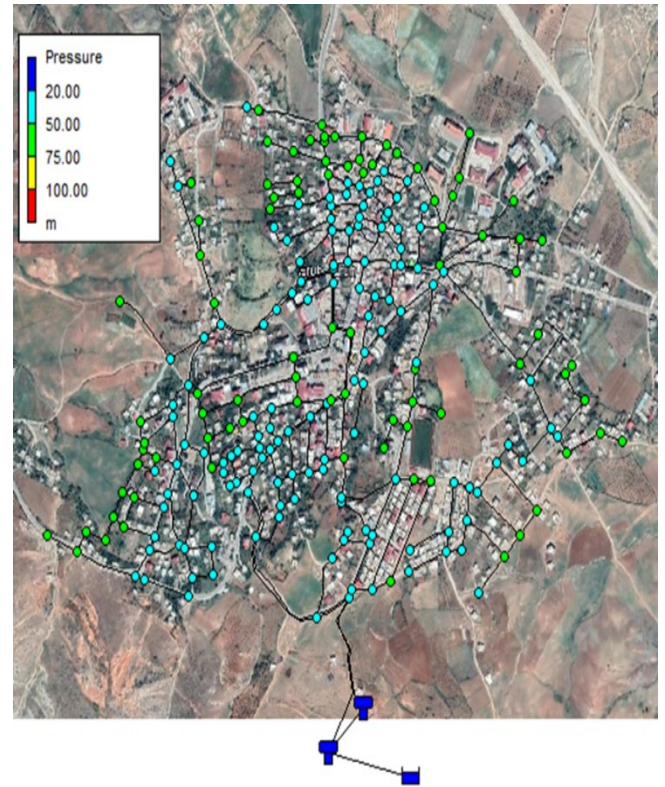
Yukarıda belirtilen denklemde düğüm noktalarındaki basınç değerleri sınırladığımız değeri aşarsa çıkacak sonuç değere ceza maliyet değeri P<sub>ceza</sub> eklenerek (9x10<sup>50</sup> gibi çok büyük bir değer) toplam şebeke maliyetinin çok büyük olması sağlanmıştır. Tekrarlayan aşamalarda çıkan çözüm fonksiyonları maliyet değerlerine göre sınırlanarak, minimum maliyet değerine tekabül edecek çözüm sonucu aslında istenen sonuç olacağından belirlenen sınırları aşan sonuçlar elenecektir.

$$Q_j^{giren} - Q_j^{çikan} - Q_j^{çekilen} = 0 \quad j = 1 \dots \dots \dots N \quad (4)$$

eşitliği yardımı ile şebekede bulunan düğüm noktalarındaki süreklilik kontrolü yapılır.

## Eruh ilçesi içme suyu şebekesi

Eruh İçme suyu tesisinin İller Bankası A.Ş. tarafından onaylanan kesin projesi MsSu programı kullanılarak hazırlanmış ve 2021 yılında ise imalatı tamamlanmış olan Eruh (SİİRT) içme suyu şebeke hattı Şekil 5’te gösterildiği gibi Epanet programı vasıtasıyla yeniden tasarlanmıştır.



Şekil 5. Eruh ilçesi içme suyu şebekesinin Epanet programı ile tasarımı

Eruh ilçesi şebeke hattı 284 adet boru, 225 adet düğüm noktası, 2 adet depo ve 1 adet rezervuardan oluşmaktadır. Şekil 5’te gösterilen ve Epanet ile yeniden tasarımı yapılan bu şebeke mevcut olan şebekeye uygun tasarlanmıştır. Şebeke düğüm noktalarındaki basınç değerleri minimum 20 m olarak belirlenmiştir. Şebekede kullanılan boru cinsleri polietilen (PE100) 10 atü olup, şebekenin optimizasyonunda kullanılacak boruların birim maliyet değerleri Tablo 2’de

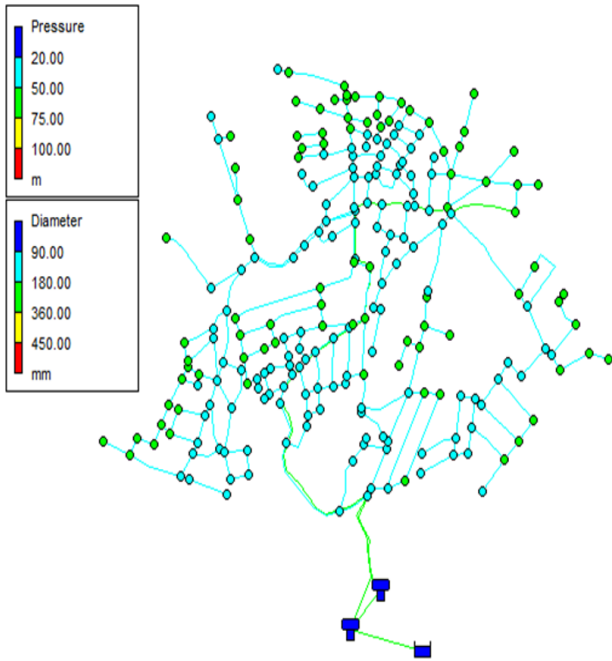


gösterilen İller Bankasının 08.01.2021 onay tarihli fabrika teslim fiyatları (KDV hariç) esas alınarak yapılmıştır.

Fabrika Teslim Boru Fiyatları		
Basınç (Atü)	Çap (mm)	Birim maliyet (Birim/TL)
10	355	355.50
10	280	220.60
10	200	114.40
10	160	73.30
10	140	56.20
10	90	23.70

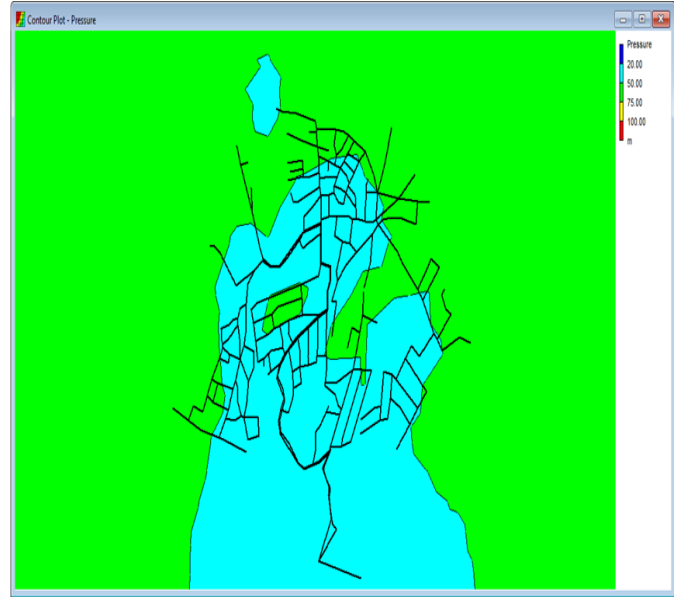
Tablo 2. İller Bankasının 08.01.2021 Onay Tarihli Fabrika Teslim Boru Fiyatları

Şebekenin optimizasyon öncesi yapılan Epanet tasarımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Optimizasyon öncesi Eruh ilçesi içme suyu şebekesi Epanet programı ile tasarımı

Şekil 7'de ise mevcut şebekenin basınç kontur grafiği verilmiştir. Eruh ilçesi mevcut şebekesinin Epanet programında tasarımı yapıldıktan sonra tüm düğüm noktalarında oluşan basınç değeri 20 m'lik minimum basınç sınır değerini sağlamaktadır.



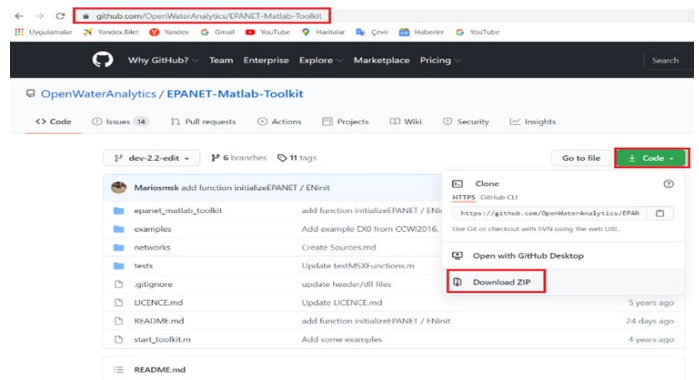
Şekil 7. Eruh ilçesi içme suyu şebekesi Epanet Programı Contour-Plot Pressure grafiği

Eruh ilçesi su dağıtım şebekesinde tüm sistem cazibeli olarak çalışıyor olup, mevcut boru çapları ve mevcut kotlar kullanılarak tasarım yapılmıştır.

## Epanet-matlab araç setinin kullanılması

Epanet-Matlab araç setinin kullanım aşamaları;

**Adım 1:** Ücretsiz portal olan Github'daki "Open Water Analytics" şirketinin kurucuları Marios Kyriakou ve Demetrios Eliades tarafından oluşturulmuş dijital bir depoda erişilebilen Matlab programının Epanet programına arayüz olmasını sağlayan Epanet-Matlab araç setinin ilgili kodları Github internet sitesinden<sup>1</sup> elde edilerek Matlab programına taşınmıştır (Şekil 8).

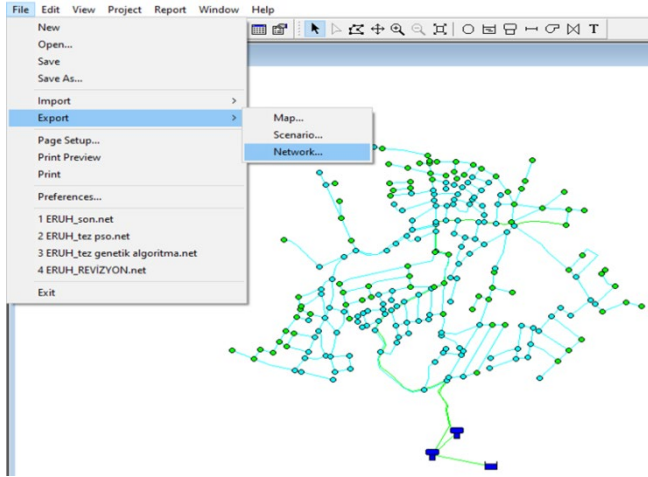


Şekil 8. Epanet-MATLAB araç seti internet adresi

**Adım 2:** Sistem şebeke boru çapları ve diğer tüm değerleri Eruh su dağıtım şebekesi verilerine uygun bir şekilde Epanet programında tasarlandıktan sonra oluşan şebeke verileri inp.

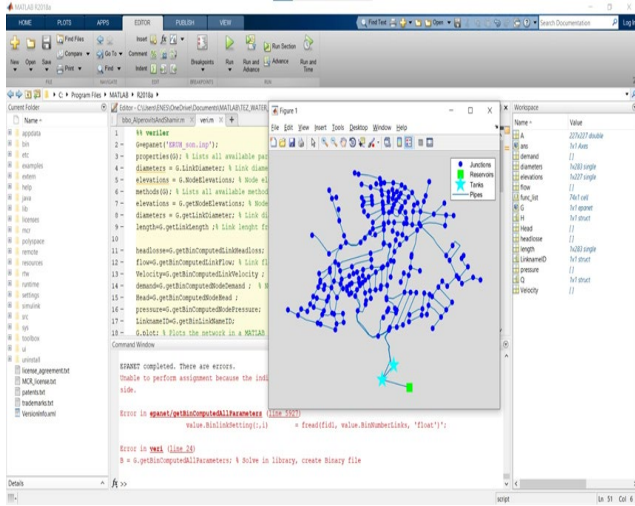
<sup>1</sup> <https://github.com/OpenWaterAnalytics/EPANET-Matlab-Toolkit>

formatıyla dışa aktarılıp Matlab programının ilgili dosya klasörüne gönderilir (Şekil 9).



Şekil 9. Epanet programından şebeke verilerinin çekilmesi

**Adım 3:** Epanet programında tasarlanan şebeke verileri, Matlab ortamında açılacak yeni bir editörde kodlar yardımıyla çağrılarak, veriler üzerinde istenen işlemler yapılır (Şekil 10).



Şekil 10. Epanet verilerinin MATLAB ortamında okutulması

## Optimizasyon

Optimizasyon işlemi, ele alınan bir sistemde belirlediğimiz belli kısıtlar altında, oluşturduğumuz bir amaç fonksiyonu çıktı değerinin optimum olması amacıyla karar değişkenlerine gelecek değerleri belirleme işlemidir. Başka bir deyişle, eldeki kaynakların (zaman, para, malzeme vb.) en uygun biçimde kullanılması amacıyla, belli kısıtlayıcılar altında istenen maksimum verimin alınmasını sağlayan bir teknolojidir. İstenen optimum sonuca ulaşmak amacıyla sisteme giren değerleri ve bu değerlerin ne olacağını belirleme süreci olan optimizasyonda, amacı ifade eden fonksiyonun optimum olması, problemin çeşidine göre minimum yada maksimum değerler olabilir. Bu çalışmada metasezgisel yöntemlerden olan Genetik Algoritma (GA) yöntemi kullanılmıştır. Bu metasezgisel yöntem,

kullandığımız algoritmaların çözeceğimiz problem yapısına uyarlanması ile elde edilen çözüm yöntemlerden biridir.

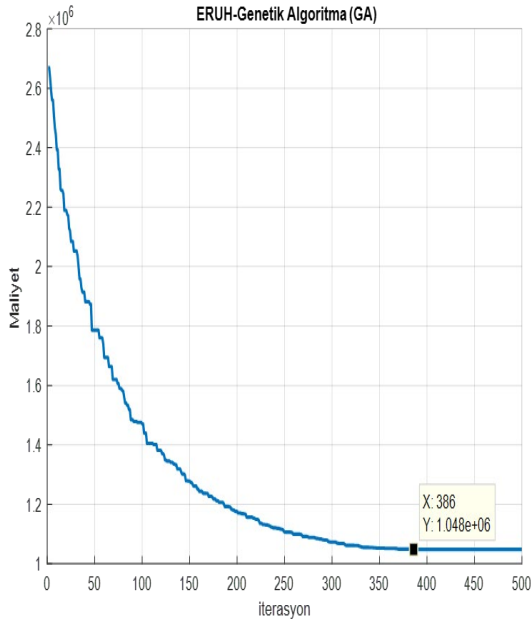
## Optimizasyon değişkenleri

Bu çalışma kapsamında algoritmalarda kullanılmış (nPop) ifadesi popülasyonun sayısını, (MaxIt) ifadesi iterasyonların maksimum sayısını gösterirken, algoritmanın yapısına uygun değişebilen kontrol parametrelerini ise kullanıcı belirlemektedir. Popülasyon sayısı (nPop), algoritmada bulunan bireylerin en uygun değerleri problemin muhtemel çözümüne karşılık gelecektir. Maksimum iterasyon sayısı (MaxIt) ise algoritmada bulunan döngülerin toplam sayısı olarak ifade edilebilir. Yapılacak döngülerin her biri kendi içerisinde popülasyonun sayısına denk sayıda çözümler üretir. Kullanılan algoritmada farklı bir alt döngü yok ise popülasyon sayısının iterasyon sayısı ile çarpılmasıyla değerlendirme sayısına ulaşılır. Kullanılan algoritmaların cinsine göre diğer kontrol parametreleri değişiklik gösterebilir. genetik algoritmada kullanılan işlemlerde mutasyon oranı (Pm), çaprazlama oranı (Pc) gibi bir değer alır. Sonuca ulaşma süresi problemin yapısına uygun değer kümesinin seçilmesi ile ilgilidir. Bu nedenle bu çalışmada algoritma için uygun değerlerin belirlenmesi deneme yanılma yolu ile yapılmaya çalışılmıştır.

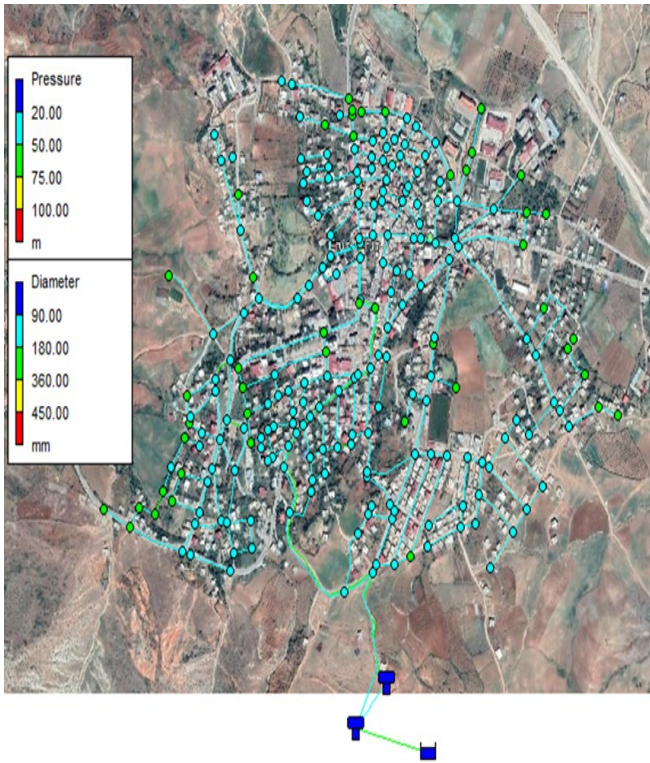
## Genetik algoritma (GA) ile maliyet optimizasyonu

Eruh ilçesi su dağıtım şebekesinde genetik algoritma (GA) ile yapılan optimizasyon işleminde kullanılmak üzere kontrol parametreleri; mutasyon oranı (Pm) 0.93, popülasyon sayısı (nPop) 500, çaprazlama oranı (Pc) 0.25, ve seçim yöntemi olarak da rulet tekerleği yöntemi seçilmiştir. Toplamda 500 iterasyon yapılarak gerçekleşen optimizasyon işleminde optimum maliyet değeri olan  $1,048 \times 10^6$  TL değere 386. iterasyonda ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonu optimum maliyet değerine ulaşana kadar  $386 \times 500 = 193000$  kez çalıştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda maliyet değerinin yapılan iterasyonlar boyunca değişimi Şekil 11'de, optimizasyon sonucu elde edilen yeni boru çapları kullanılarak yeniden Epanet programında tasarlanan Eruh ilçesi içmesuyu şebekesinin düğüm noktalarındaki basınç değerleri ise Şekil 12'de gösterilmektedir.



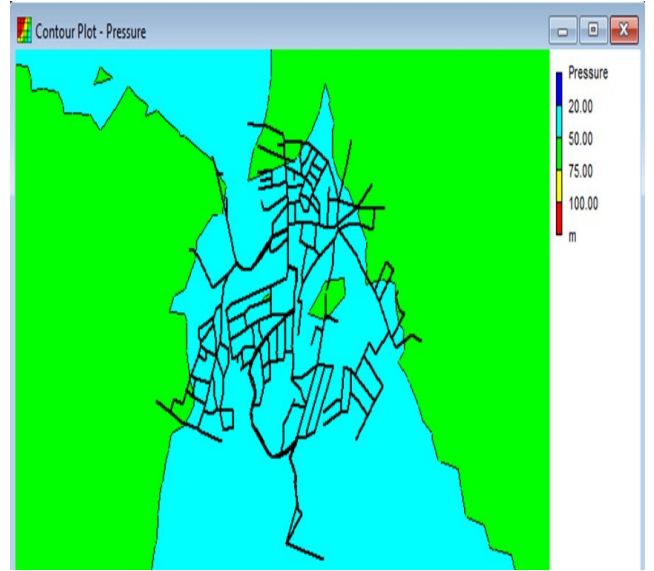


Şekil 11. Eruh ilçesi içme suyu şebekesinin GA'ya ait maliyet değişimi



Şekil 12. GA Optimizasyonu sonrası Eruh ilçesi içme suyu şebekesi Epanet tasarımı

Şekil 12'den de anlaşıldığı üzere GA ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen veriler (boru çapları) Epanet programına tekrardan girilmiş ve sistem başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Şekil 13'te ise GA optimizasyonu sonucu oluşan şebekenin basınç kontur grafiği verilmiştir.



Şekil 13. GA optimizasyonu sonrası Eruh ilçesi içme suyu şebekesi Contour-Plot Pressure grafiği

## Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında mevcut Eruh ilçesi su dağıtım şebekesi Epanet ortamında yeniden tasarlanıp, metasezgisel yöntemlerden olan GA algoritması ile şebekenin boru maliyeti optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan optimizasyon işlemi Epanet araç setinin Matlab yazılımı ile kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Mevcut şebekenin kotları ve çap değerleri kullanılarak Epanet ortamında yeniden modellenmiş, Epanet-Matlab araç seti kullanılarak Matlab ortamına atılmış, Matlab programında belirli kısıtlayıcılar altında optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen yeni boru çap değerleri yeniden Epanet ortamına aktarılmış, sistem başarılı bir şekilde tekrardan çalıştırılmıştır. Toplamda 500 iterasyonda gerçekleşen optimizasyonda 386. iterasyonda optimum maliyet değerine ulaşılmıştır. Eruh ilçesi içme suyu şebekesinin İller Bankasının 08.01.2021 onay tarihli fabrika teslim fiyatları (KDV hariç) baz alınarak yapılan boru maliyetlerinde GA ile yapılan maliyet optimizasyonu sonucu yaklaşık %21.14'lük bir azalma meydana gelmiştir. Dünyada artan nüfusla birlikte yerleşim yerleri her geçen gün daha da genişlemektedir. Bu nedenle su dağıtım sistemlerinin optimum maliyetle tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Bu noktada su dağıtım şebekeleri metasezgisel yöntemlerle optimize edilerek, suyun iletilmesi için ihtiyaç duyulan şebekenin optimum maliyetle inşa edilmesi sağlanabilir.

## Kaynaklar

- [1] Muluk, Ç. ., Kurt, B., Turak, A., Türker, A., Çalışkan, M. ., Balkız, Ö., Gümrükçü, S., Sarıgül, G. ve Zeydanlı, U (2013). Türkiye'de suyun durumu ve su yönetiminde yeni yaklaşımlar: çevresel perspektif. İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği: Doğa Koruma Merkezi.
- [2] Chin, D. A. (2000). *Water-Resources Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, USA.

- [3] Özdağlar, D., Benzeden, E. ve Kahraman, A. M. (2006). Kompleks Su Dağıtım Şebekelerinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. *İMO Teknik Dergisi*, 3851–3867.
- [4] Niño, O. T. V., Alzamora, F. M., Campos, J. C. A. ve Tzatchkov, V. G. (2018). Using the Epanet Toolkit v2.00.12 with Different Programing Environments. *Mexican Institute of Water Technology*.
- [5] Rossman, L. A. (2000). Epanet 2 user's manual. *United States Environmental Protection Agency (EPA)*, 1–200.
- [6] Kubat, C. (2019). *MATLAB Yapay Zeka ve Mühendislik Uygulamaları* (4. bs.). Abaküs Kitap Yayın Dağıtım Hizmetleri.
- [7] Demir, R. (2022). *Eruh Su Dağıtım Şebekelerinin Metasezgisel Yöntemlerle Optimizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- [8] Batmaz, V. (2021). *Su Dağıtım Şebekelerinin Metasezgisel Yöntemlerle Optimizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- [9] Batmaz, V., & Kayaalp, N. (2023). Optimization of water distribution networks using hybrid BBO-IWO algorithm. *Urban Water Journal*, 20(2), 205-222.
- [10] Özbek, O. (2017). *ERUH (Siirt) İçmesuyu Kesin Projesi*



# Experimental Investigation of CFRP-Reinforced Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Loadings and the Failure of Connections Between CFRP to Steel

Said DUSAK<sup>1\*</sup>, Cem Yalçın<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sakarya University, Institute of Natural Sciences, Sakarya, Turkey - [sdusak@gmail.com](mailto:sdusak@gmail.com), Orcid No: 0000-0002-6903-1695

<sup>2</sup>Bogazici University, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey-[yalcince@boun.edu.tr](mailto:yalcince@boun.edu.tr), Orcid No: 0000-0003-3142-8125

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 14 Eylül 2023  
Received in revised form 21 Ekim 2023  
Accepted 21 Ekim 2023  
Available online 31 December 2023

### Keywords:

Steel plate shear wall, Composite panel shear wall, CFRP, Energy dissipation

Doi: 10.24012/dumf.1358193

\* Corresponding author

## ABSTRACT

Steel plate shear walls, as an innovative lateral load resisting system, are widely used in the world. Various configurations have been tried by researchers to increase the shear capacity of steel plate shear walls. In similar studies, it is aimed to obtain better results by changing the material and connection properties of the frame and infill panel. In this study, carbon fiber-reinforced polymer textile (CFRP) is used between two steel infill plates to increase load capacity, ductility and energy dissipation of steel plate shear walls. A specimen of composite plate shear wall through epoxy bonding between two steel plates in a steel frame was prepared, and cyclic loading was applied. The finite element model of the specimen without CFRP textile was prepared, and an in-plane pushover analysis was conducted. The load-displacement curves obtained from the analysis of the model were compared with the experimentally obtained CFRP textile added specimen, and they were found to be in a good agreement. In conclusion, as a result of the addition of CFRP textile to the steel plate shear wall, it was observed that the carbon fiber reinforced polymer delaminated from the plate surface, and its contribution to the system behavior remained limited. The maximum load capacity of the control specimen was 347 kN, 334 kN was obtained in the specimen using CFRP. According to these results, theoretically, the addition of carbon polymer textile to the infill plate increases the strength of the tensile strips, resulting in a higher base shear capacity. However, the expected results cannot be obtained because the adhesive used failure during installation and eliminates the unity of the steel plate and carbon polymer fabric. As a result, it has been observed that to obtain the expected contribution, it is important to ensure that the steel plate and the textile must have full bonding and act as a composite material.

## Introduction

From the time when Wagner (1931) first introduced the idea of using thin plates in moment resisting frames having the main principle that thin steel plates continue to carry lateral loads after buckling, studies were carried out on shear walls formed by placing thin steel plates in the frames [1]. Analytical and experimental research on steel plate shear walls has been carried out since the 1970s [2]. The most important feature of steel plate shear walls is that they dissipate energy, and thus, increase the ductility of the steel frames. In order to improve the behavior of thin steel plates, which are subjected to in-plane shear, studies conducted on composite panel shear walls by using steel plates in combination with other high-strength materials. M. K. Poul and F. N. Alahi conducted nonlinear analysis of the steel plate shear wall reinforced with FRP laminated plates and developed the interaction method of the frame and composite panel to determine the shear strength of the composite panels [3]. Although there are many studies on steel plate shear walls, there are fewer studies on composite panel shear walls [4,5,6]. As an innovative method, the use of fibre-reinforced polymer (FRP) together with plate has been investigated through

theoretical studies. Due to their lightness, high strength and contribution to rigidity, laminated composite plate shear walls have been developed as an alternative to steel plate shear walls [7]. It is desired that the fiber-reinforced polymer plate or textile provides additional strength to the steel tensile strength, parallel to the tension direction of the steel plate shear wall. In one study, it was reported that the best results were obtained when the FRP strips were placed in the fiber direction of both sides and that the fibers began to transfer load after the steel plate completely yielded, and a 20% increase in shear capacity and 10% increase in rigidity were achieved [8]. There are also studies carried out by placing different types of polymer strips, such as glass fiber reinforced polymer (GFRP) between the double plates. The model was prepared by bonding GFRP strips between two plates in a single-story, single-bay frame, and it was reported at the end of the study that an increase was observed in the shear capacity and rigidity of the steel plate shear wall model and that it improved the hysteresis behavior [9,10]. Openings such as doors or windows are required inside the steel plate share walls, which are an effective lateral load carrying system. In those cases, according to the AISC regulations [11], the tear at the corners must be reinforced by steel plates in order to reduce the stress condensation

deteriorated due to the tears. Studies examining the behavior when FRP laminates were utilized as edge reinforcement instead of steel in these window and door openings were carried out. Alipour, Mohamad, and Rahai, Alireza, in their study, demonstrated that the FRP plate prevents stress condensation on the tear corners, provides continuity, and increases the rigidity and strength of the system [12]. Considering the difficulties of steel reinforcements that require welding, this method has been noted to be equally efficient. CFRP plates are used to improve the compressive strength of different geometric structures for reinforcement purposes. 14 different models using CFRP laminates in different thicknesses and angles in cylindrical thin-walled shell structures were developed and subjected to compressive stress from the outer surface. As a result of this strengthening, it was stated that the buckling capacity improved by 77% and the collapse capacity improved by up to 86% [13]. In another study, it was shown that CFRP elements started to buckle at higher load values by using different thicknesses in thin-walled steel storage structures [14]. In a study conducted to demonstrate the interaction of the frame and infill plate in composite FRP-steel plate shear walls, the FRP polymers added to strengthen the infill plate increased the strength, energy damping capacity and secant stiffness of the system, but had no effect on the initial stiffness or had a negative effect. Regarding the frame-infill plate interaction, the use of FRP caused a slight increase in stress in the frame, which increased the effectiveness of the infill wall at the beginning of the loading. In addition, while the use of FRP in single-storey SPSW only affects the behavior of the infill plate, it has been stated that in multi-storey SPSW, it affects both the infill plate and frame behavior because the interaction is high [14,16]. Post-buckling behavior was examined by adding GFRP to steel plate shear walls, which are horizontal load bearing elements obtained by adding wood or steel plates into the moment frames. It has been observed that the benefits in initial stiffness and displacements decrease inversely as the rigidity of the frames increases. The lowest increase in horizontal load capacity was 16% in the stiffest frame with 0° FRP fiber orientation. When the FRP fiber orientation is in the same direction as the tensile rods, the initial stiffness and load capacity reach the highest value [17].

Considering the studies on this subject, carbon fiber reinforced polymer textile (CFRP) was placed between two steel plates involves the scope of this study in order to contribute to the infill plate properties of steel plate shear walls. A specimen was prepared and experimentally subjected to cyclic loading, in which a pair of steel plates, obtained by using the fiber-reinforced polymer textile between steel plates through epoxy, was attached to the frame as a composite panel. The prepared specimen represents the intermediate floor of a single-story, single-bay, 1/3 scale and multi-story building. The behavior of this specimen under cyclic loads, initial rigidity, ductility, maximum load capacity and energy dissipation capacity have been experimentally and analytically investigated and compared.

## 2. Test setup and design of specimen

To increase the shear and energy absorption capacity of steel plate shear walls, a panel was obtained by gluing carbon polymer textile between two thin steel plates. This panel was placed in a steel frame as the panel of the steel plate shear wall and cyclic loading was applied. A one-story, one-bay and semi-rigid steel frame was designed. Pinned beam-to-column connection was prepared to be utilized as the test specimen. It was desired to examine the effect of infill plates on the frame. For this purpose, frame sections were selected so that the frame elements would not yield before the steel plates yielded. HEA260 sections were selected for the columns and HEA240 sections for the frame beams. L75x120x12 profiles were chosen for beam-to-column and frame-panel connections. In the frame as infill panel, a panel with bidirectional CFRP textile fixed with epoxy was placed inside double steel plates at a horizontal angle of 90°. In addition, as the control specimen, a comparison was made with the steel plate shear wall, in which only a 1.00 mm-thick single plate was used. The physical characteristics of these specimens are shown in Table 1. In order to clearly understand the contribution of the infill panel to the frame, a semi-rigid beam-to-column connection that acts almost like a pin was preferred.

The connection of the infill panel and the steel frame was made with self-drilling screws. In this way, easy replacement of plates that were deteriorated subsequent to loading would be allowed via only the connection bolts. The use of welded connection was not preferred as it may lead to local heat-related deformations in carbon fiber reinforced polymer textile. Additionally, as it was reported in the studies that the use of self-drilling screws, which did not require a hole preparation prior to the connection, was an alternative method and that it provided sufficient performance, a connection of M6 (6-mm diameter) bolts with 40mm spacing was preferred in the frame and plate joint region [18]. Test specimens were fastened to the concrete foundation with clevises. Experiments were carried out in Bogaziçi University Structural and Materials Laboratories. The laboratory was equipped with 2000kN-capacity reaction wall and a 1000kN-capacity dynamic actuator of with 150-mm stroke in both directions. The test setup is given in Figure 1, while the steel plate shear wall specimen with CFRP addition is presented in Figure 2. During testing, out-of-plane deformations of the specimens were prevented via a rigid frame attached to the main setup. Figure 3 shows the preparation of the panel through CFRP textile and lamination used in the CLB specimen that was obtained by fixing between two 0.50 mm plates with epoxy adhesive.

Tension tests were conducted by taking coupons from steel infill plates. Table 2 lists the average and standard deviation values of the material properties. These values are used in the finite element model. S275 steel for frame profiles; S235 quality steel was used in the infill plates. 10.9 class steel was used in the frame bolts.

Carbon fibers have high tensile strength. For this reason, it is used in many areas such as construction, especially in strengthening buildings against earthquakes. Brought together, carbon fibers are used in the form of tape, plaque, strip or fabric. It is possible to obtain very light construction materials with a tensile strength approximately ten times higher compared to steel with an equivalent cross sectional area. In this study, as the steel

plate placed in the frame acted as tension strips under shear stress, CFRP textile was used to increase the capacity of those strips. A composite panel was obtained through 600gr/m<sup>2</sup> bidirectional CFRP textile mounted with the help of epoxy between two 0.5mm steel plates. The technical properties of this CFRP textile are given in Table 3.

Table 1 – Test specimens and their properties

Specimen Name	Specimen Details	Panel/Plate Thickness	Infill Property
Control Specimen	Single Steel Plate Shear Wall (TL)	t=1.0mm	1.0mm Steel Plate
Specimen 1	Double Layer Steel Plate Shear Wall with CFRP (CLB)	t=0.5mm+CFRP+t=0.5mm	0.5mm Steel Plate + CFRP Textile + 0.5mm Steel Plate

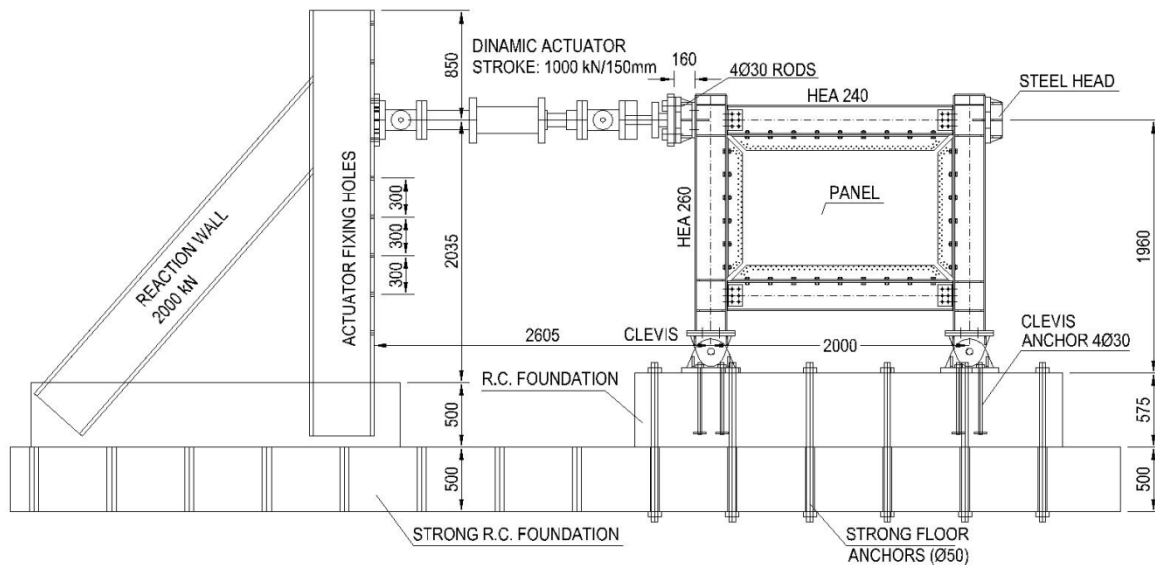


Figure 1. Test Setup (Dimensions are in mm)



Figure 2. CLB specimen double-layer steel plate shear wall with CFRP (+2/3\*δy; 4.02 mm)



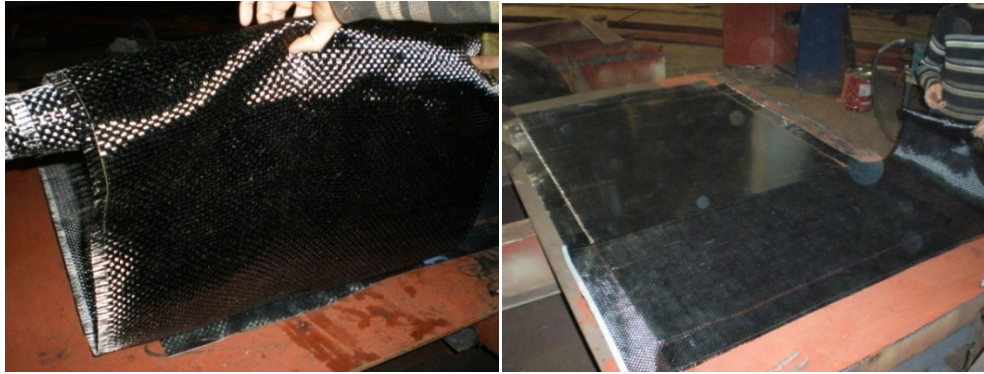


Figure 3. CFRP textile used in the CLB specimen and placing the fabric inside the double steel plates using epoxy

Table 2. Tensile Test Results of Steel Plates plates

Specimen No.	1	2	3	Mean	Standard Deviation
Thickness (mm)	0.50	0.50	0.50		
Width (mm)	25.00	25.00	25.00		
Yield Stress (MPa)	296	365	330	330.3	34.34
Ultimate Stress (MPa)	416	404	369	396.3	24.51

Table 1. Technical properties of the CFRP textile

Color	Black
Type	Bidirectional fabric textile
Unit Weight (gr/m <sup>2</sup> )	600
Mean Thickness (mm)	0.34
Ultimate Stress (MPa)	392
Elasticity Modulus (Mpa)	230 000

### 3. Finite element model

Finite element model analysis was performed to see how the specimens behave when experimental cyclic loading is applied. In this way, a comprehensive comparison was made with the experimental results. ABAQUS Standard (Hibbit et al.) software [19] was used to prepare the finite element models of non-CFRP specimens. Likewise, the strip model was created using SAP2000 structural analysis software [20]. Since the plate turns into diagonal strips when shear load is applied along its own plane, in the Strip model the strips are defined as pin-ended elements that can only for axial tensile loads.

Equation 1 is a formula used to calculate the inclination angles of steel plates [21]. The inclination angle of the steel plates was calculated as 46° according to this formula. Strip elements were analyzed in this way. The cross-sectional area of each strip is found by multiplying the plate thickness and the width of the tension area.

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_p L}{2A_c}}{1 + t_w h \left( \frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)} \quad (1)$$

- $\alpha$  : Strip angle
- $t_p$  : Steel Plate thickness
- $L$  : Specimen width
- $A_c$  : Column section area

- $H$  : Specimen height
- $A_b$  : Beam section area
- $I_c$  : Column inertia moment

The beam-to-column connection of the bare frame was defined in both models and the analysis results were calibrated with the test results.

Steel plate and sandwich panel shear wall samples were modeled by adding infill plates. Although the presence of fiber polymer material was not taken into account in the modeling process, the difference between the model and test results clearly revealed the contribution of CFRP textile. In the strip model, a total of 11 parallel tension strips with a 200 mm wide tension area are defined as in Figure 4. The strip model was used in specimen design. In the finite element model, the S4R shell element was used to define the column and beam elements of the frame, and the S8R5 shell element was used to define only the thin plates. Figure 5 shows the finite element model. Figure 6 shows the load-displacement curve obtained as a result of the analysis of the model. The specimen representing the plates on both sides of the panel that was obtained by using CFRP acted very similar to the specimen of the steel plate shear wall. Increasing load values were obtained with increasing displacement values in cyclic loading. At the ultimate value, the infill plate was torn and failed. The results obtained from the finite element model will be compared with the experimental results in Section 5.



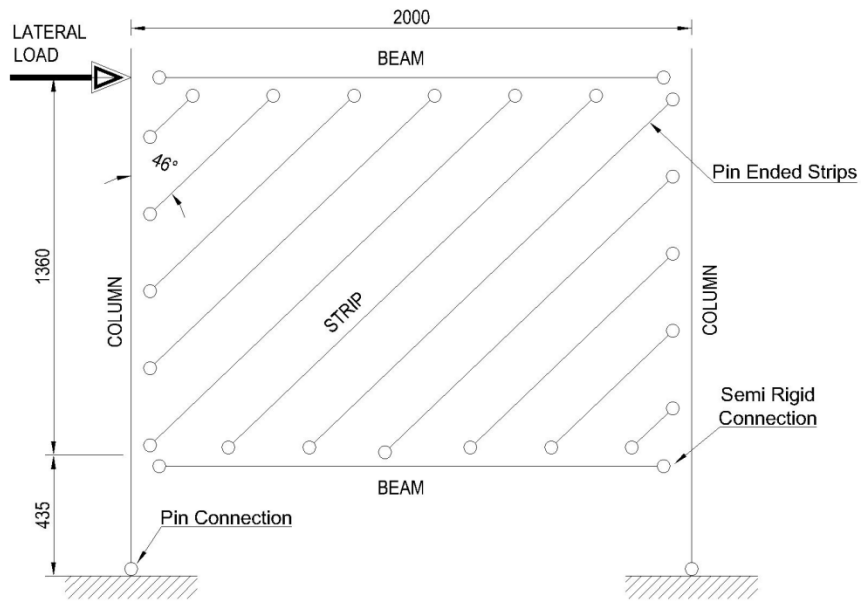


Figure 4. Strip model of Specimen (Dims are in mm)

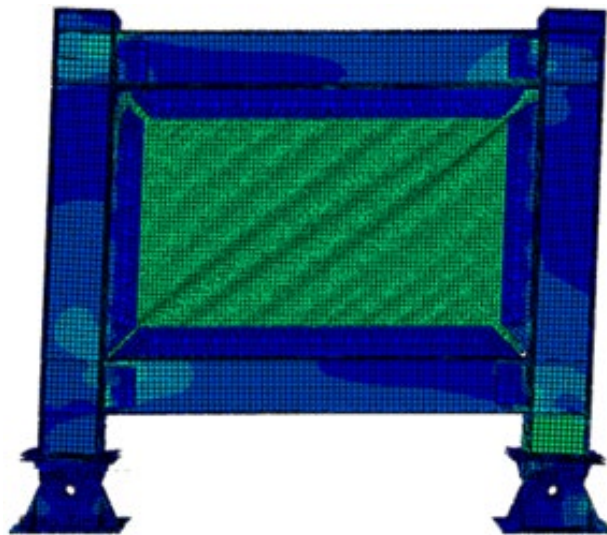


Figure 5. Finite element model of specimen

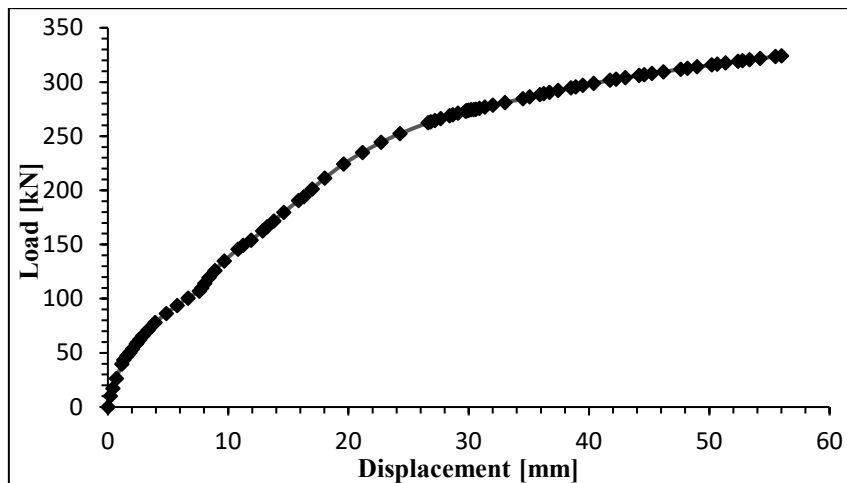


Figure 6. Load-displacement curve of FEM analyses

#### 4. Experimental study and test results

The stresses and displacements obtained during cyclic loading were collected and evaluated. This section introduces the experimental results by discussing the experimental observations and collected outputs. Quasi-static cyclic loading was applied in accordance with ATC-24 regulation [22]. The displacement value, which corresponds to 0.75 times the yield load of the system, was determined as  $\delta^*$ . Cyclic loading increased step by step compared to ATC24. These steps are multiples of  $\delta^*$ . First step;  $1/3$  of  $\delta^*$ , second step;  $2/3$  of  $\delta^*$ , third step; it is applied as  $1 \delta^*$ . The next steps are increased by integer multiples of  $\delta^*$ . A total of three cyclic loadings were applied for each displacement value. The loading protocol is presented in Table 4.

Following the increasing drift values of the experiment, deformations such as separation and crushing were observed between the beam web connection angle and the column flange in the beam-to-column connections. These changes indicated plasticization around the bolt hole on the web of the beam. No deformation was observed in the beam-to-column connection apart from the beam web was yielded around the bolt hole. The test specimen subjected to cyclic loading specified in the loading protocol showed a ductile behavior and was close to the single-plate specimen, which is the control specimen of this study. However, lower initial stiffness and maximum base shear were obtained as the combination of the plate, and polymer fabric did not provide sufficient response. In the first cycles, the specimen showed elastic behavior, and the load-displacement graph in all three cycles followed a very close path to each other. The cyclic graph is given in Figure 7.

At the  $+1\delta_y$  displacement step (0.32% drift; 6.02 mm top displacement), the tension fields became prominent, and there were strains around the screws at the plate-to-fisher plate connection. At this displacement value, base shears of 68.56 kN in push and 82.06 kN in pull direction were obtained in the first cycle. The difference between the load values in the pushing and pulling directions for the first three displacements could be interpreted as the effect of the FRP textile used for these steps. At  $+5\delta_y$  displacement step (1.61%; 30.07 mm), a load of 263.22 kN in push and 255.05 kN in pull direction was obtained in the first cycle. At this stage, it was possible to observe

permanent deformation of the plates subsequent to buckling, especially around the bolts and at the corners of the plate. At  $+9\delta_y$  displacement step (2.91%; 54.16 mm), a load of 323.14 kN in the pushing direction and 327.62 kN in the pulling direction were obtained in the first cycle, and tears formed due to repeated loading and repeated deformation of the tension field modes on the plate. Small crushes and tears formed around the bolts enlarged to 20-mm in size, and the tear between the bolts in the lower left corner merged to form a 50mm long tear (Figure 8).

At  $+10\delta_y$  displacement step (3.19%; 59.36 mm), in the first cycle, the load increased in the pushing direction to 334.12 kN, and decreased in pulling to 264.70 kN. In response to the decrease in load, tears on the bolt connection and plate increased in the pulling direction, while no tears were formed at this scale in the pushing (Figure 9). In the second and third cycles, there was a decrease of 51% (from 238,59 kN to 165,65 kN) in the pushing, while in the pull direction, it decreased to 181.15 kN and 153.35 kN, respectively, and there occurred a 53% decline in the value of maximum load capacity. These sudden load drops coincide with the tearings on the plate. Although the maximum load capacity decreased by more than 50% at the end of the third cycle in the previous displacement step, the experiment was continued one more step by increasing the displacement to see the possible effect of the CFRP textile between the two plates. At  $+11\delta_y$  displacement step (3.53% drift; 65.75 mm top displacement), values of 163.85 kN, 139.69 kN, 130.49 kN in push direction, and values of 135.03 kN, 96.77 kN, 93.86 kN in pull direction were obtained in last three cycles. The plate was torn 150 mm from the lower right and left corners. At this stage, the plates were mostly torn from the connection screws and repeated buckling area and acted similarly to the single-plate specimen. The test was terminated at this stage, as the load obtained in the last cycles of this displacement value decreased by 61% in the push and by 72% in the pull directions of the highest values reached during the loading.

The view of the single plate, which is the control specimen, at a displacement of  $+5\delta_y$  is shown in Figure 10. The single-plate specimen showed less crushing and tearing at the same displacement step than that of the specimen reinforced with carbon fiber polymer textile fabric.

Table 4. Cyclic loading histories of the CLB specimen

Displacement Steps	Number of Cycles	Cumulative Num. of Cycles	Relative Disp. Ratio to $\delta_y$ ( $\Delta/\delta_y$ )	Relative Disp. [mm]	Top Disp. [mm]	Drift (%)
1	3	3	0.34	1.45	1.98	0.11
2	3	6	0.67	2.93	4.02	0.22
3	3	9	1	4.39	6.02	0.32
4	3	12	2	8.77	12.02	0.65
5	3	15	3	13.13	17.99	0.97
6	3	18	4	17.57	24.07	1.29
7	3	21	5	21.95	30.07	1.61

8	3	24	6	26.52	36.33	1.95
9	3	27	7	30.74	42.11	2.26
10	3	30	8	35.14	48.14	2.58
11	3	33	9	39.53	54.16	2.91
12	3	36	10	43.33	59.36	3.19
13	3	39	11	48.00	65.75	3.53

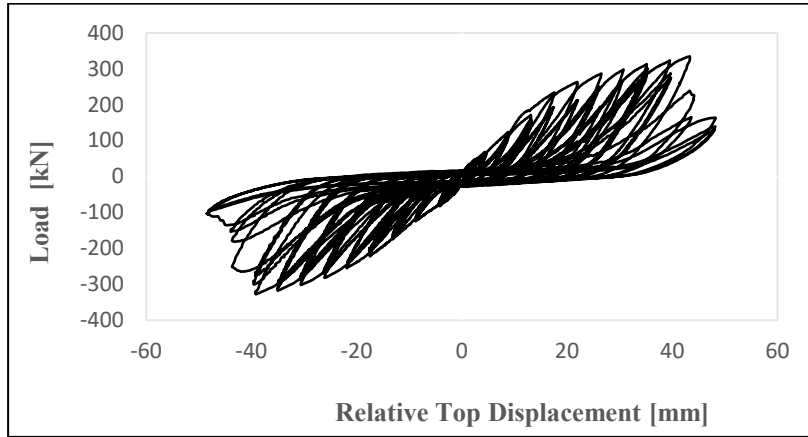


Figure 7. Cyclic load graph of the CLB specimen (double layer steel plate shear wall with CFRP)

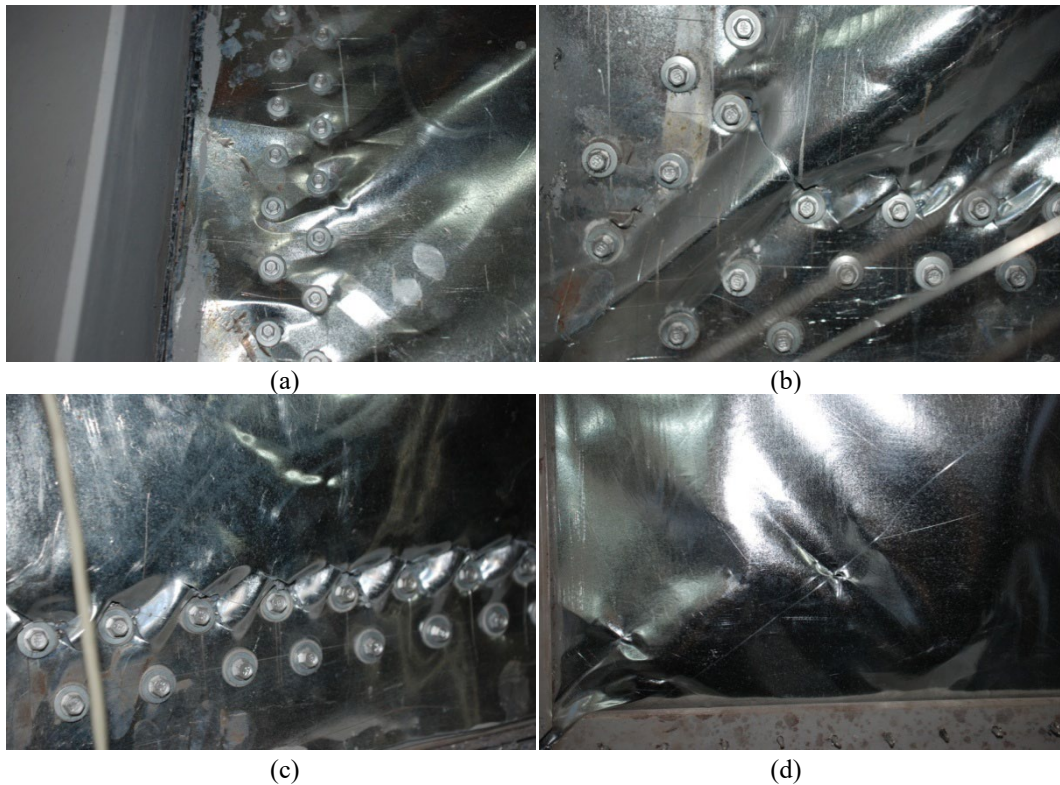


Figure 8. CLB specimen (+9\* $\delta_y$ ) step (a) tears around the lower left bolt connection (10mm) (b) merging tearing around the lower left bolt 50 mm (c) tears around the lower bolt edge (20mm) (d) tears from the lower left plate



Figure 9. CLB specimen ( $+10\delta y$ ) step (a) 80 mm tearing from the lower left edge (b) no tearing at the lower right edge



Figure 10. General view of the TL specimen at the  $+5\delta y$  displacement step (30.13 mm)

## 5. Result's Comparison and Discussion

The data obtained as a result of the experimental study were compared with the analysis results obtained from the analytical study. The cyclic load-displacement envelope curves of the 1.00 mm thin single-plate TL specimen [23], which was the control specimen, and the specimen with two 0.5 mm thin steel plates, in which a carbon fiber reinforced polymer textile (CFRP) was placed, are compared in Figure 11. It was seen that it acted similarly to the single plate TL, which was the control specimen. For all displacement steps, similar stiffness and load values were obtained, following close paths in both directions. The load values obtained in the first cycles of each displacement step for the CLB specimen are given in Table 5. In the CLB sample, 0.5 mm thin plates yielded around the bolt at lower load values than 1.00 mm thin single plates. For this reason, they lost their maximum load capacity from very early values.

As a result of this comparison, it was concluded that the contribution of the CFRP test specimen to the initial stiffness and load values remained limited when compared with the single steel-plate specimen following the cyclic loading. The infill plate of the control specimen failed at a larger displacement than the specimen with CFRP. Therefore, in this study, it was concluded that the addition

of fiber polymer textile did not increase the base shear capacity of the steel plate shear wall. If better combination is achieved, fiber polymer fabrics can be used. The maximum load capacity of the specimen under the load applied is given in the table created for certain drift ratio values, comparing it with the control specimen (Table 6).

The cyclic envelope curve of the push directions of the CLB specimen obtained as a result of the experimental study and the curve obtained from the analytical study are shown in Figure 12 on the same graph. Experimental and analytical curves of load-displacement relationships were very close to each other, and the analytical model curve remained below the experimental curve after  $5\delta y$  displacement value. It can be concluded that the analytical results for this model were congruent with the experimental results within sufficient approximation. The load, where the system lost its load capacity, was obtained at a degree of 3% closeness in the analytical solution.

The graphs of the energy absorbed by the composite plate shear wall, which was the area scanned by the cyclic load-drift graph, were drawn. The energy dissipation capacity of buildings under lateral loads is the basis of performance-based design [18]. Hence, energy dissipation

amounts under cyclic lateral loads, which were administered in accordance with the loading protocol of the test specimens, were one of the most important parameters used in the comparison of the results. Along with the control specimen of the test result, the cumulative

dissipated energy of the first cycles is presented in Figure 13 according to the drift ratios. A significant increase in the dissipated energy was observed after the 9th cycle when yielding began. Yielding by tearing the plates around the bolt connections, energy was consumed.

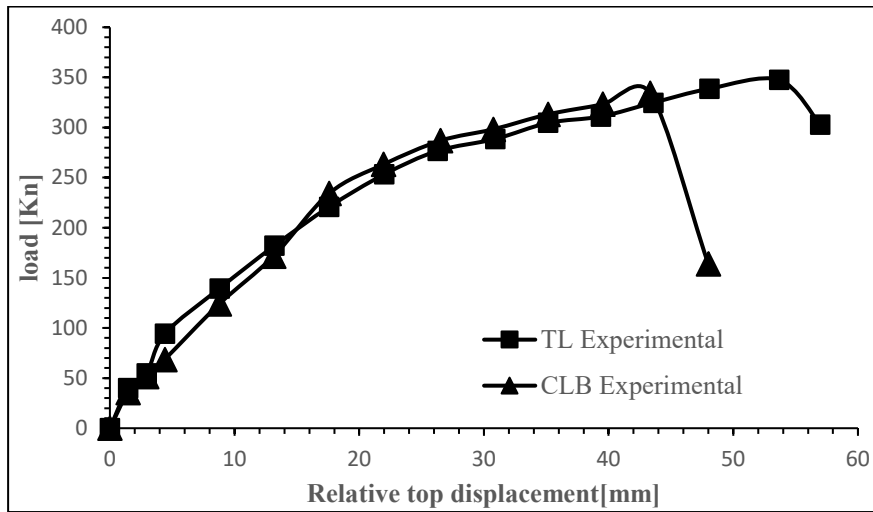


Figure 11. Comparison of push direction cyclic envelope curves of TL and CLB test specimens

Table 5. Displacement – load values of the CLB specimen in the push direction

Drift (%)	Relative Displacement[mm]	Load [kN]
0.00	0.00	0.00
0.11	1.45	35.44
0.22	2.93	51.42
0.32	4.39	68.57
0.65	8.77	123.96
0.97	13.13	171.71
1.29	17.57	234.13
1.61	21.95	263.22
1.95	26.52	286.89
2.26	30.74	298.21
2.58	35.14	313.14
2.91	39.53	323.15
3.19	43.33	334.13
3.53	48.00	163.85

Table 6. Load values by drift ratio (kN)

Drift [%]	Specimen TL	Specimen CLB
0.25	67,02	56.90
0.50	118.89	99.01
0.75	153.09	139.59
1.00	185.64	178.29
1.25	215.66	226.08
1.50	241.48	252.92
1.75	263.10	272.80
2.00	279.06	288.71
2.25	287.75	297.83
2.50	300.27	309.27
3.00	315.65	326.80
3.50	337.21	
4.00	344.67	

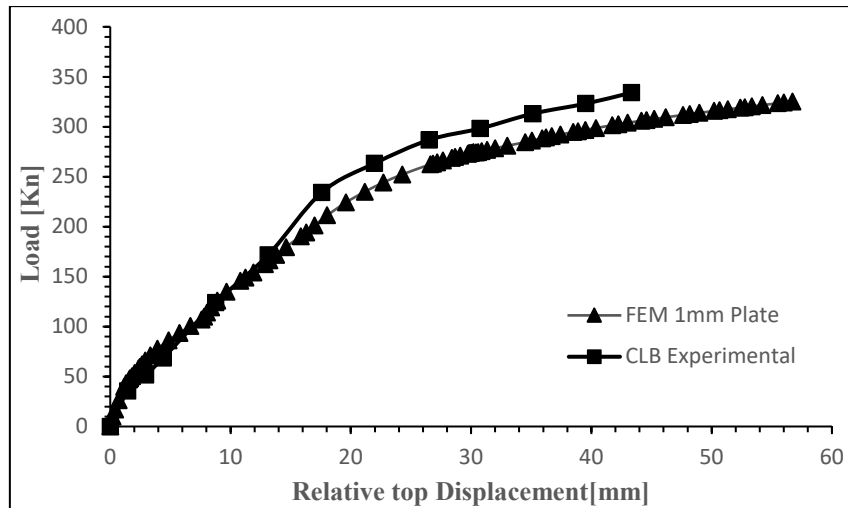


Figure12. Comparison of experimental envelope curves of the specimen with analytical results

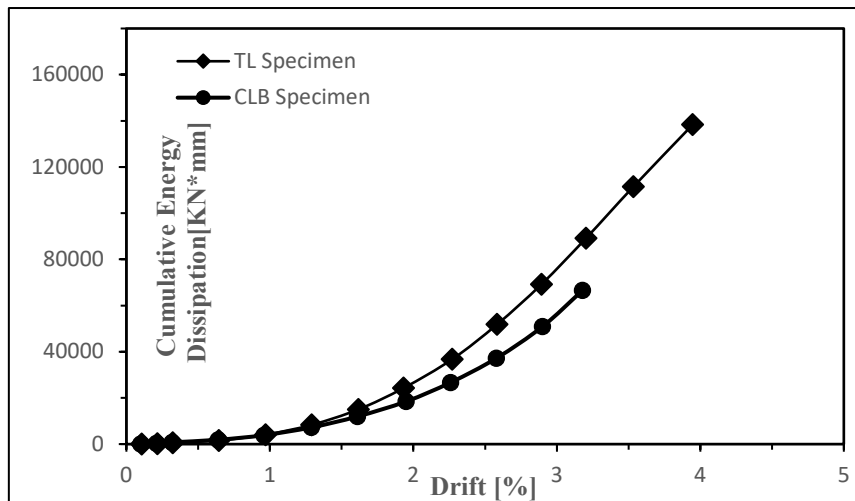


Figure 13. Comparison of the cumulative dissipated energy

## 6. Conclusions

In this study, a double plate with the same total thickness as the control specimen and a bidirectional CFRP textile bonded between the two plates was used. In the event that the CFRP textiles were used together with steel plate share walls, the effect of the CFRP on the system behavior by moving in the same direction while the steel plate acted as a tension strip was investigated. The stiffness, maximum load capacity, dissipated energy amount and other outputs obtained from the experimental studies were compared with the analytical study results, and in the light of the data, the system behavior during the experiment phase was evaluated. A consistency was found between the FEM analysis results and the experimental results. In the CLB specimen, a double plate with the same total thickness as the other specimens, and on which bi-directional CFRP textile was placed by epoxy bonding between the two plates, was used. In this way, in the event that the CFRP

textiles were used together with steel plate share walls, the effect of the fibers on the system behavior by moving in the same direction while the steel plate acted as a tension strip was investigated. According to the load displacement graph obtained, for the same drift ratio compared to the 1.00 mm single-plate specimen, the failure load was reached earlier, and it was observed that the fibre-reinforced polymer was delaminated from the plate surface and its contribution to the system behavior remained limited. The control specimen and the specimen using CFRP were compared in terms of initial stiffness, load and dissipated energy. The control specimen carried 315 kN for 3% drift, while the specimen using CFRP carried 326 kN. While the maximum load capacity of the control specimen was 347 kN, 334 kN was obtained in the specimen using CFRP. While the initial stiffness of the control specimen was 27,43 kN/mm, it was calculated as 24,50 kN/mm for the specimen using CFRP. While the cumulative energy dissipated at 3.2% drift in the control specimen was 89.230 kNmm, it was found to be 66.627 kNmm in the specimen using CFRP. The similarity of



these values showed that the effect of CFRP addition on the system behavior was limited. The reason for the low values is that the thin steel plates of the CLB specimen is torn at a lower load. Here, as in the single-plate specimen, the failure mode of the system was realized as the screw edge crushed at the plate-to-frame connection and torn from the screw connection net section. In conclusion, the important findings obtained from our study can be summarized as follows: carbon fiber polymer or similar reinforced textiles with higher tensile strength can be used to provide the behavior of tension strip adjacent to the plates, but very high base shear strengths can be obtained by improving the connection conditions to the plate and the frame.

To summarize, this study was carried out to increase the energy absorption and load carrying capacity of steel plate shear walls. For this purpose, it was desired to benefit from the high tensile strength of carbon fibers. These carbon fibers are added to the steel plates in the steel frame with a strong adhesive between the two plates. When the steel plate shear wall specimen was subjected to cyclic loading, the adhesive failed and from then on the steel plate and carbon fibers behaved independently of each other. Based on the data and analysis results obtained from the experimental study, the infill plate could not be strengthened by gluing. By developing different combination conditions in steel plate shear walls, the high tensile strength of carbon fibers can be utilized.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank the friendly staff of Boğaziçi University Structure and Materials Laboratory, where we carried out the experimental studies. We would like to thank ArcelorMittal RZK for providing all steel profiles free of charge and Çağla Mühendislik for manufacturing the samples. The authors would like to thank Sakarya University Scientific Research Projects Unit for the project support numbered 2007-50-02-022.

#### References

- [1] Wagner, H., 1931. Flat sheet metal girders with very thin metal webs, part I-General theories and assumptions, Technical Memorandum, No. 604, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC.
- [2] Mimura, H. and Akiyama, H., 1977. Load-deflection relationship of earthquake resistant steel shear walls with a developed diagonal tension field, *Trans., Arch. Inst. Of Japan*, Tokyo, Japan, 109-114.
- [3] M. K. Poul and F. N. Alahi, "Theoretical and numerical study on the strengthened steel plate shear walls by FRP laminates," *IJE Transactions C*, vol. 25, No. 1, 2012.
- [4] Elgaaly, M., and Liu, Y., 1997, Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls, *Journal of Structural Engineering*, ASCE Vol. 123 No. 11 pp. 1487-1496, November
- [5] Driver, R.G., 1997, Seismic behavior of steel plate shear walls. Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada
- [6] Thorburn, L. J. and Kulak, G. L., 1983, Analysis of steel plate shear walls, *Structural Engineering Report*, 107, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada
- [7] Arafa El-Helloty. "Free Vibration Response of Laminated Composite Plate Shear Walls." *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 13, no. 09, 2017, pp. 28–38.
- [8] Rahai A.R. and Alipour M., 2011, Behavior and Characteristics of Innovative Composite Plate Shear Walls, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, *Procedia Engineering*, 14, 3205–3212
- [9] Nateghi-Alahi F. and Khazaei-Poul M., 2013, Analytical Study on the Strengthened Steel Plate Shear Walls by FRP Laminate, *The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*, *Procedia Engineering*, 54, 377 – 386
- [10] M. K. Poul and F. N. Alahi, "Finite element investigation of steel plate shear walls with infill plates strengthened by GFRP laminate," *JSEE*, vol. 14, No. 3, 2012.
- [11] AISC (2005b). Specifications for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL., USA.
- [12] Alipour, Mohamad & Rahai, Alireza. (2011). Perforated Steel Shear Walls With Frp Reinforcement Of Opening Edges. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5.
- [13] Maali M., Kılıç M., Yaman Z., Ağcakoca E., Aydın A.C., Buckling and post-buckling behavior of various dented cylindrical shells using CFRP strips subjected to uniform external pressure: Comparison of theoretical and experimental data, *Thin-Walled Structures*, Volume 137, 2019, Pages 29-39, ISSN 0263-8231, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.042>.
- [14] Aydın A.C., Yaman Z., Ağcakoca E., Kılıç M., Maali M., Aghazadeh Dizaji A., CFRP effect on the buckling behavior of dented cylindrical shells, *International Journal of Steel Structures* 20, 425-435,
- [15] Seddighi, M., Barkhordari, M.A. & Hosseinzadeh, S.A.A. The Wall-Frame Interaction in Composite FRP-Steel Plate Shear Walls. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* 46, 133–156 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00592-0>
- [16] Seddighi, M., Barkhordari, M. A., & Hosseinzadeh, S. A. A. (2019). Behavior of FRP-reinforced steel plate shear walls with various reinforcement designs. *Steel and Composite Structures*, 33(5), 729–746. <https://doi.org/10.12989/SCS.2019.33.5.729>
- [17] Ülger T., Tension Field Performance of GFRP Plate Shear Walls, *Celal Bayar University Journal of Science*, Volume 18, Issue 2, 2022, p 149-160. [Doi:10.18466/cbayarfbe.1015437](https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.1015437)

- [18] Vatansever C. and Yardimci N., 2011, Experimental investigation of thin steel plate shear walls with different infill-to-boundary frame connections, *Steel and Composite Structures*, Vol. 11, No. 3, 251-271
- [19] Hibbit, Karlsson, Sorenson, Inc., (HKS), ABAQUS / Standard Theory Manual, Student Edition 6.13. Pawtucket, R.I.
- [20] SAP2000 V14, Computers and Structures, Inc. 1995 University Ave. Berkeley, CA.
- [21] Timler, P. A. and Kulak, G. L., 1983. Experimental study of steel plate shear walls, *Structural Engineering Report*, 114, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada.
- [22] Dusak, S., Yalçın, C., Yelgin, A. N. "Experimental Investigation of Using Sandwich Panels as Infill Plate in a Steel Plate Shear Wall". *Technical Journal* 31 (2020): 10413-10439
- [23] ATC-24, (1992). "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures." Applied Technology Council, California.



## Hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansı ve izolasyon etkisi

### *Seismic performance and isolation effect of air traffic control towers*

Alper BOZTEPE<sup>1\*</sup>, Gültekin AKTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [boztepealper@hotmail.com](mailto:boztepealper@hotmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1788-1513>

<sup>2</sup> Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [gaktas@dicle.edu.tr](mailto:gaktas@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5113-2738>

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*

Geliş 11 Eylül 2023  
Revizyon 09 Kasım 2023  
Kabul 15 Kasım 2023  
Online 31 Aralık 2023

*Anahtar Kelimeler:*

*Hava trafik kontrol kulesi,  
Deprem performansı,  
Deprem yalıtımı*

#### ÖZ

Ülkemiz deprem felaketleri sebebiyle ciddi boyutlarda can ve mal kayıplarına maruz kalmıştır. Deprem sonrası hemen kullanılacak olan binalardan olan hava trafik kontrol kulelerinin deprem esnasında hasar görmesi halinde bazı aksaklıklar meydana gelmesi muhtemeldir. Deprem sonrasında havalimanlarındaki hava trafik kontrol kulelerinde hasar oluşması durumunda; piste yardım malzemesi veya insanların intikallerinin sağlanması amacıyla uçak, helikopter gibi hava araçlarının iniş ve kalkışının sağlanamayacağı, bölgeye ulaşımın en kısa süre içerisinde gerçekleştirilemeyeceği bilinmektedir. Bu çalışmada, havaalanlarındaki hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansı ile deprem yalıtım etkisine ait literatür incelemesi amaçlanmıştır. Ülkemizde hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansının incelenmesine yönelik çalışmanın olmadığı, uluslararası yayınlarda ise son yıllarda bu konunun ele alındığı dikkat çekmektedir. Literatür incelemesinde; hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansına yönelik ülkemizde sadece 2021 yılında yürürlüğe giren Türkiye Hava Meydanı Yapıları Deprem Yönetmeliğinde mevcut ve yeni yapılar için kriterler belirlenmiştir. Uluslararası yayınlarda ise hava trafik kontrol kulesi için özel sismik tasarım klavuzunun oluşturulmasının gerektiği dikkat çekmektedir. Deprem yalıtım etkisinde ise yapılarda deprem performansı açısından olumlu sonuçlar alınmasına rağmen, havalimanlarında öneme sahip hava trafik kontrol kulesine yönelik çalışmanın bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle, ülkemizde kritik öneme sahip mevcut veya yeni yapılacak hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansı ve yalıtım etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesine yönelik yeni araştırmalara ihtiyaç bulunduğu öngörülmektedir.

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received 11 September 2023  
Received in revised form 09 November 2023  
Accepted 15 November 2023  
Available online 31 December 2023

*Keywords:*

*Air traffic control tower,  
Earthquake performance,  
Earthquake isolation*

*Doi: 10.24012/dumf.1358505*

\* Sorumlu Yazar

#### ABSTRACT

Our country has suffered serious losses of life and property due to earthquake disasters. If the air traffic control towers, which are among the buildings to be used immediately after the earthquake, are damaged during the earthquake, some disruptions are likely to occur. In case of damage to the air traffic control towers at the airports after the earthquake, it is known that the landing and take-off of aircrafts such as airplanes and helicopters cannot be ensured in order to ensure the transfer of aid materials or people to the runway, and transportation to the region cannot be realized as soon as possible. In this study, it is aimed to review the literature on the earthquake performance and earthquake isolation effect of air traffic control towers at airports. It is noteworthy that there are no studies on the earthquake performance of air traffic control towers in our country, while international publications have addressed this issue in recent years. In the literature review, criteria for the seismic performance of air traffic control towers for existing and new structures were determined only in the Turkish Airfield Structures Earthquake Regulation, which entered into force in 2021. In international publications, it is noteworthy that a special seismic design guideline should be established for the air traffic control tower. Although positive results have been obtained in terms of earthquake performance in earthquake isolation effect, it is seen that there is no study on the air traffic control tower, which is important in airports. Therefore, it is foreseen that new researches are needed to investigate in detail the earthquake performance and isolation effect of existing or new air traffic control towers which have critical importance in our country.

## 1.Giriş

Türkiye depremlerin etkin olduğu bir konumda yer almaktadır. Yaşanan deprem felaketleri sebebiyle ciddi boyutlarda can ve mal kayıplarına maruz kalmıştır. Deprem sonrası hemen kullanılacak olan binalardan (haberleşme ve ulaşım istasyonları) hava trafik kontrol kulelerinin deprem esnasında hasar görmesi halinde bazı aksaklıklar meydana gelmesi muhtemeldir. Deprem sonrasında havalimanlarındaki hava trafik kontrol kulelerin de hasar oluşması durumunda; piste yardım malzemesi veya insanların intikallerinin sağlanması amacıyla uçak, helikopter gibi hava araçlarının iniş ve kalkışının sağlanamayacağı, bölgeye ulaşımın en kısa süre içerisinde gerçekleştirilemeyeceği bilinmektedir.

Ülkemizde ve dünyada meydana gelen depremlerden dolayı havalimanlarındaki hasar veya aksaklıklara ait basında yer alan haberler aşağıda derlenmiştir.

12 Ocak 2010 tarihli Haiti depreminde Toussaint Louverture Uluslararası Havalimanındaki kontrol kulesi büyük ölçüde hasar gördüğünden telsiz iletişimi sağlanamamıştır [1].

22 Şubat 2011 tarihinde Yeni Zelanda da 6.3 büyüklüğünde oluşan depremde Christchurch Havaalanı'nın kontrol kulesinin hasar alması sonucu, uçuşlar bir süreliğine askıya alınmıştır [2].

23 Ekim 2011 tarihinde Van'da 7.2 büyüklüğünde oluşan depremde Ferit Melen Havaalanı kontrol kulesi hasara uğradığı için havaalanı uçuşa kapatıldığından, Erzurum ve Muş Havaalanlarının kullanılması yönünde planlamalar yapılmıştır [3].

16 Nisan 2016 tarihinde Ekvador'da oluşan 7.8 büyüklüğündeki depremde Eloy Alfaro uluslararası havaalanındaki hava trafik kontrol kulesi yıkılmıştır [4].

28 Eylül 2018 tarihinde Endonezya da meydana gelen 7.5 büyüklüğündeki depremde Palu'daki Mutiara Sis Al Juft Havalimanı'nın kontrol kulesinin hasar alması sonucu hava trafik kontrolörü son uçağın kalkış iznini verirken, yıkılan kuleden atlamıştır [5].

08 Ağustos 2019 tarihinde Denizli'nin Bozkurt ilçesinde 6.0 büyüklüğündeki deprem ile Denizli Çardak Havalimanı kontrol kulesinin hasara uğradığı için kapatılmış, kente olan seferler iptal edilmiştir [6].

26 Eylül 2019 tarihinde İstanbul'da oluşan 5.7 büyüklüğündeki depremde Sabiha Gökçen Havalimanında hava trafiğini olumsuz etkileyip, kısa süreliğine uçak inişleri sağlanamamıştır [7].

29 Aralık 2020 tarihli Petrinja depreminde Zagreb Havalimanı kontrol kulesi hasar görmüş, hava trafik kontrol hizmetleri askıya alınmıştır [8].

06 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki depremlerde Hatay ve Malatya Erhaç Havalimanlarında hasarlar oluşması nedeniyle, pist kullanılamaz hale gelmiştir [9],[10].

ATC kulelerinde deprem etkisiyle oluşan hasar veya aksaklıklar nedeniyle [1]-[10], mevcut veya yeni tasarlanacak kulelerin deprem performanslarının araştırılması ve çözüm önerilerinin sunulması gerekmektedir.

Bu çalışmada, deprem kuşağı etkisinde bulunan ülkemizde deprem sonrası hemen kullanılacak olan ulaşım ve

haberleşme tesislerinden havaalanlarındaki hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansı ile deprem yalıtımlı etkisine ait literatür incelemesi amaçlanmıştır.

## 2.Hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansına yönelik yapılan çalışmalar

Yapılarda deprem performans düzeyine yönelik birçok araştırma konusu betonarme konut, çelik yapılar, köprü, isale hatlarının vb. tez, makale yayınları bulunmaktadır. Ancak; ülkemizde hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansının incelenmesine yönelik çalışmanın olmadığı, uluslararası yayınlarda ise son yıllarda bu konunun ele alındığı dikkat çekmektedir.

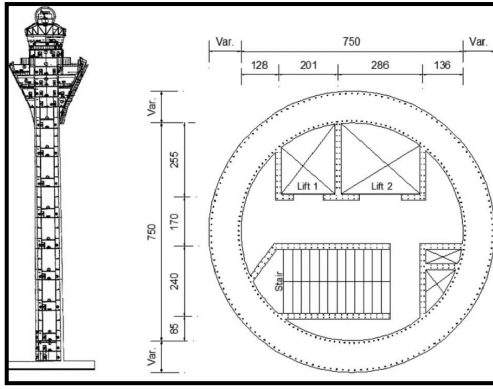
Wilcoski ve Heymsfield (2002) yaptığı çalışmada; bir adet Hava Trafik Kontrol (ATC) kulesinin yüksekliği 15 m., diğer iki adet ATC kulelerinin yüksekliği ise 9 m. olan, toplam 3 adet ATC kulelerinin deprem performansı incelenmiştir. Taşıyıcı elemanları dört adet ters L şeklinde olup (Şekil 1), sonlu elemanlar metodu ile SAP 2000 programında yapı analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmadaki amaç; can güvenliği performansını gösterip/gösterilemeyeceğini belirlemek, gösterilemeyecek durumda ise bir performans yükseltme yaklaşımı geliştirmektir [11].



Şekil 1. L tipi kule (1969, San Carlos, California) [11].

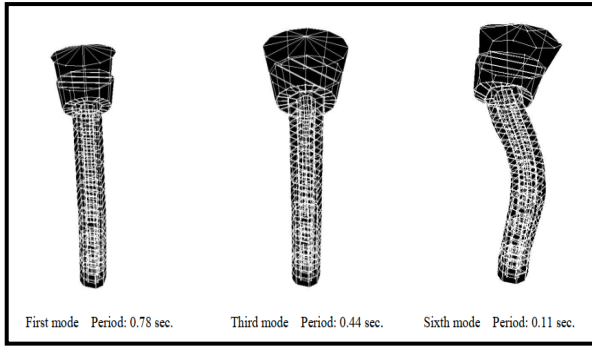
Deprem performansı sonucunda; en kritik sonuçlar 9 m. yüksekliğindeki San Carlos ATC kulesinde gözlenmiştir. San Carlos ATC kule kabinindeki aşırı kat ötelenmeleri, taşıyıcı elemanlarda çok düşük yer hareketinde bile yapısal mafsallaşmalar olduğunu tespit etmişlerdir. Yapısal sapmaları azaltan performans yükseltme yaklaşımı gerçekleştirilerek, beşgen biçimdeki kule kabineye çelik elemanlarla güçlendirme yapılmıştır.

Yapı sağlık sistemi konusunda optimal sensör yerleşimi, sensör adedi ve hangi konumlara kurulması gerektiğini bilmek zor bir konudur. Vafaei ve Adnan (2011), İran-Kirman Havalimanındaki ATC kulesinin (34 m. yüksekliğindeki) deprem anındaki yapısal sağlık durumunu incelemek üzere bir çalışma yapmıştır (Şekil 2). ATC kulesine sensörler yerleştirilerek, sismik performans seviyesi ele alınan Kirman ATC kulesine doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinde altı adet deprem ivme kaydı seçilmiştir [12].



Şekil 2. Kirman havalimanı kulesi (İran) [12].

FEMA 356'ya göre Hemen Kullanım (IO) ve Göçme Önleme (CP) performans seviyeleri dikkate alınan çalışmada, kulenin ilk 20 modu analizde incelenmiştir. Belirli mod durumlarındaki periyot değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir [13].



Şekil 3. Kulenin 1, 3 ve 6'ncı mod ve periyot değerleri [12].

Sensör yerleştirmeler ise yapısal eleman türleri ve konumlarına göre gruplandırma yapılarak (Tablo 1), maksimum (Tablo 2) ve minimum (Tablo 3) kullanım oranlarına göre IO ve CP performans seviye grupları belirlenmiştir.

Tablo 1. Yapısal eleman türleri ve konumlarına göre sensör gruplandırması [12].

Grup 1	34.0 m. seviyesinde dairesel çelik kirişler
Grup 2	30.1 m. seviyesinde dairesel çelik kirişler
Grup 3	Çatı seviyesinde eğimli çelik kirişler
Grup 4	26.4 m. seviyesinde dairesel çelik kirişler
Grup 5	26.4 m. ile 30.1 m. arası çelik kolonlar
Grup 6	30.1 m. ile 34.0 m. arası çelik kolonlar
Grup 7	Dış beton şaftı
Grup 8	İç beton şaftı
Grup 9	Betonarme döşemeler
Grup 10	-1.50 m. ve 26.4 m. arasındaki betonarme kirişler

Tablo 2. Grupların maksimum kullanım oranına göre IO ve CP performans seviyesi [12].

	GRUP ADI									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IO	10.20	9.90	0.40	1.85	42.00	18.00	37.50	18.10	7.50	4.70
CP	0.80	1.10	0.04	0.40	4.80	3.80	12.10	9.40	4.20	0.60

Tablo 3. Grupların minimum kullanım oranına göre IO ve CP performans seviyesi [12].

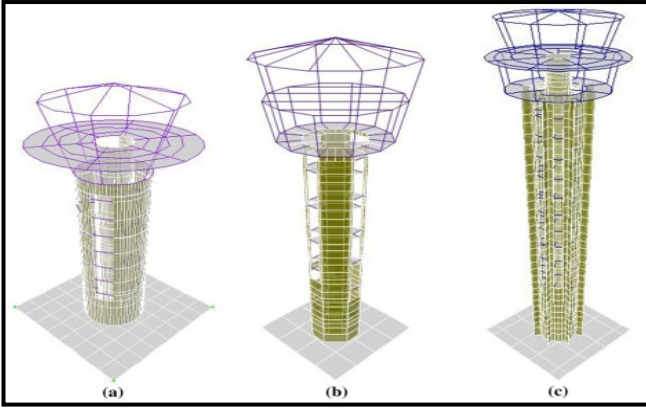
	GRUP ADI									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IO	0.45	0.77	0.12	0.08	3.60	0.33	2.32	1.40	3.70	0.28
CP	0.20	0.25	0.02	0.15	1.90	0.07	0.35	0.27	1.90	0.29

Tablo 2 ve Tablo 3'te elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde sensör yerleştirmede başlıca ele alınacak hususlar kısaca şu şekilde belirtilmektedir;

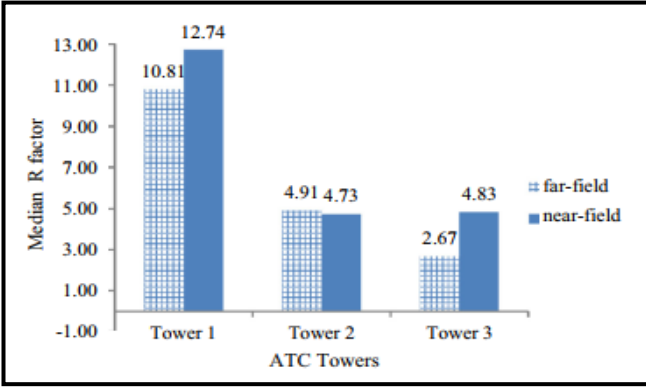
- Grup 5 ve 6, diğer gruplara kıyasla sensör için en kritik gruplardır. Önceliğin bu gruplara verilmesi gerektiği belirlenmiştir.
- CP seviyesi için elde edilen sonuçlara göre, 1. ve 10. gruplar orta düzeyde hasar göreceği,
- Grup 4 için; IO seviyesini karşılama da, CP seviyelerinde çok az hasar göreceği bu çalışmada belirtilmiştir.

Sonuç olarak yapılan çalışmada; mevcut kulenin yapı sağlığını izlemek için sismik performans seviyesine bağlı kalımp, gruplandırma yöntemi ile adım adım bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yöntemin doğruluğu da Kirman Havalimanı ATC kulesi modellemesine uygulanarak teyit edildiği çalışmada vurgulanmıştır.

Vafaei ve Alih (2016), İran'da mevcut 3 (üç) adet ATC kulelerinin sismik tasarım tepki spektrum faktörlerinin hesaplanması incelenmiştir. 23.7 m, 39.3 m. ve 51.7 m. yüksekliğinde olan mevcut ATC kuleleri için doğrusal olmayan analiz yönteminde yakın ve uzak alan sismik olayları temsil eden iki doğal deprem kayıt seti uygulanmıştır. Perform 3D programın da oluşturulan modellemelerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde; kulelere uygulanan ters üçgen yükün, yanal yük durumuna göre daha hâkim olduğu görülmüştür (Şekil 4-5). Kulelerin yüksekliği arttıkça tepki spektrum faktörlerinin önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir [14].

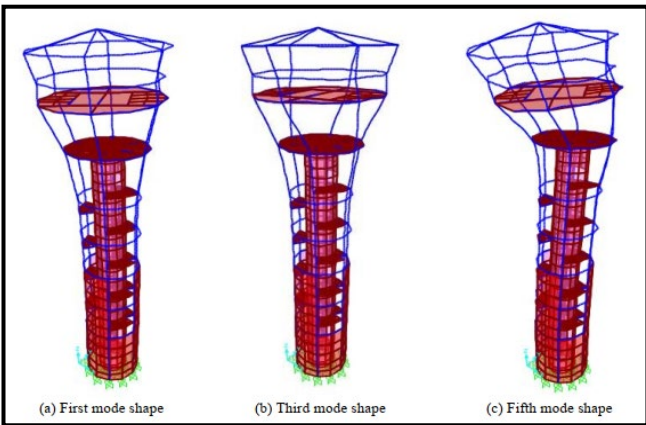


Şekil 4. 23.7 m, 39.3 m. ve 51.7 m. yüksekliğindeki kuleler [14].



Şekil 5. Kulelere ait tepki spektrum faktörleri [14].

Moravej vd., (2016) yaptığı çalışmada; İran'ın Urmiye Uluslararası Havalimanı ATC kulesinin sismik performansını incelenmiştir. (Şekil 6) ATC kulesi modellemesine doğrusal olmayan zaman tanım analizi uygulanmıştır. 30.17 m. yüksekliğinde olan mevcut ATC kulesine 14 adet ivme kaydı kullanılan analizde; bu kulenin tasarımı için kullanılan doğrusal statik ve dinamik analizlerin yetersiz olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, kulenin deprem analiz performansında CP seviyesini karşılayamamıştır [15].

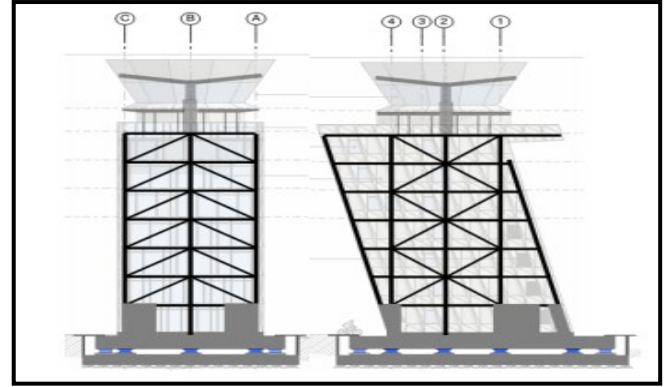


Şekil 6. Urmiye uluslararası havalimanı kulesinin 1,3 ve 5'nci mod durumları [15].

Sullivan vd., (2017) yaptığı çalışmada; Wellington Havayolları kontrol kulesinin yapısal dayanıklılığı için bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bölgenin doğal tehlikelerini (özellikle Tsunami ve Deprem) ele alan benzersiz bir yapı özelliği ile (Şekil 7) bir dönüm nokta yapısı olması amaçlanmıştır. ATC kulesi; 9 katlı olup, 12.5 derece eğimli

ve kolonsuz kule kabini şeklindedir. Ayrıca, taban izolasyonu da bulunmaktadır. (Radye temel ile üst yapı arasında 1020 mm çapında 13 adet kurşun kauçuk mesnet ile izole edilmiş sistem) doğrusal olmayan dinamik analizi ile incelenen modelleme de ilk başta 3 adet deprem ivme kaydı seçilmiş olup, ileriki aşamada yeterli olmayacağı öngörülmüştür.

7 adet ilave ivme kaydı ile birlikte toplam 10 adet deprem ivme kaydı seçilmiştir. Rüzgâr, tsunami ve deprem yüklerinin etkisindeki tasarım zorluğuna dikkat çekilen yapının, 2017 yılında yapım sürecinin devam ettiği ve hem işlevsel hem de verimli yapı özelliğini taşıdığı belirtilmektedir. Ayrıca, yalıtılmış taban ile sismik devrilme taleplerinde önemli derece de azalma olacağını öngörüldüğü çalışmada belirtilmiştir [16].



Şekil 7. ATC kulesi (Wellington- Yeni Zelanda) [16].

Vafaei ve Alih (2018) yaptığı çalışmada; ATC Kulelerinin sismik etkisi ve güvenlik açığının belirlenmesi amaçlanmıştır. İnceleme 9 m. yüksekliğinde bir kule, 23.7 m ile 51.7 m arasında olan diğer kulelerde sismik analizler gerçekleştirilmiştir. ATC kulelerine 14 adet doğal ivme kaydı uygulanmış, tepki spektrum faktörleri (R) incelenmiştir. R faktörünün; ATC kulelerinin yüksekliğinde büyük bir etkisi olduğunu göstermiş, yükseklik arttıkça kırılma da arttığı çalışmada belirtilmiştir [17].

Ayrıca yapılan çalışma da ATC kuleleri için Sismik Tasarım Kılavuzu oluşturulmalı ve aşağıdaki konular ilerideki çalışmalarda ele alınması önerilmektedir.

- ATC kuleleri için uygun sürüklenme (ötelenme) sınırı nedir?
- Doğal durumu tahmin etmek için uygun ampirik denklem nedir?
- Etkili kaymayı tahmin etmek için uygun katsayılar nelerdir ve ATC kulelerinin eğilme sertliği nedir?
- Zemin-kazık-temel etkileşiminin etkisinin ne zaman dahil edilmesi gerektiği?
- ATC kulelerinin yüksekliği boyunca kesme kuvveti dağılımını tahmin etmek için uygun denklem nedir?
- Uygun performans hedefleri ve kabulleri nelerdir? ATC kulelerinin sismik tasarımı için kriterler nelerdir?

Vafaei vd., (2018) yaptığı çalışmada ise; ATC kulelerinde sismik taban kesme kuvvetinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. 23.7 m, 39.3 m. ve 51.7 m. yüksekliğinde olan mevcut ATC kuleleri için düşük, orta ve yüksek alan grupları için (her bir grup için 15'er adet) toplam 45 adet deprem ivme kaydı kullanılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında



analiz uygulanmıştır. Yapılan çalışmada; taban kesme kuvvetinin ortalamasını hesaplayan 3 denklem elde edilmiştir [18].

$$\lambda = 2.03T^2 - 7.29T + 9.83 \quad (1)$$

$$\lambda = 5.11T^2 - 16.53T + 18.48 \quad (2)$$

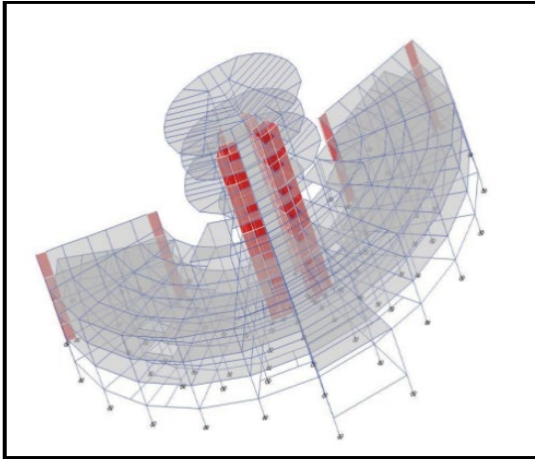
$$\lambda = 6.06T^2 - 18.13T + 21.54 \quad (3)$$

Burada;  $\lambda$ : Taban Kesme Katsayısı, T: 1'nci Mod Doğal Periyot'dur.

Çalışma sonucunda; en büyük taban kesme kuvveti Düşük Grup kayıtlarında, en küçük taban kesme kuvveti Yüksek Grup kayıtlarında gözlemlendiği belirlenmiştir. Deprem kaydı türünün (Yüksek, Orta veya Düşük Grup) kulelerin yüksekliği boyunca kesme kuvveti dağılımı üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Kesme kuvveti talebinde kulelerin üst seviyelerinde ani artışlar yaşandığı vurgulanmıştır.

Moravej ve Vafaei (2019) yaptığı çalışmada; bir ATC Kulesinin itme analizi yöntemi ile sismik performansın değerlendirilmesi amaçlanmıştır. 30.17 m. yüksekliğindeki ATC kulesine itme analizi uygulanmış ve iki kat yer değiştirme talebiyle sonuçlandırılmış gözlenmiştir. Üst seviyelerde performans seviyesi çelik sistemde IO gereksinimlerini karşılarken betonarme sistemde karşılamadığı belirtilmiştir [19].

Rakesh Sharma (2019) yılında yaptığı çalışma da ise; Hindistan standart koduna göre IV. bölgede bulunan ATC kulesinin tasarım kriterlerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 8). Zemin kat dahil toplam 7 kata sahip ATC kulesinin tasarımında dikkat çeken hususlar; yerin coğrafik konumu, kat adedi, kat yüksekliği, zemin durumu, yük durumları (zati, hareketli, deprem, rüzgâr vb.) ve temel tasarımı ele alınarak modelleme yapılmıştır [20].



Şekil 8. ATC kulesinin tasarım modellemesi [20].

Yapılan modelleme sonucunda; tasarım zorluğuna dikkat çekilmiştir. Proje ekibiyle yakın iş birliği içerisinde bu zorlukların ele alınması ve çözülmesinin çok önemli olduğu belirtilmiştir.

Amrutkar vd., (2021) yaptıkları çalışmada 55 m. yüksekliği sahip farklı yapısal şekillerdeki (kare, beşgen, altıgen ve sekizgen) ATC kulesinin deprem performansını incelemiştir. Altıgen ve sekizgen biçimdeki kulelerin kat ötelenmesi, yer değiştirme ve periyotları açısından kare ve beşgen biçimdeki kulelere göre daha etkin sonuçlar verdiğini

gözlemlemiştir. Ayrıca, sekizgen şekilde tasarlanan kulenin yer değiştirme ve ötelenme miktarının diğer konfigürasyonlara göre en az olduğu belirtilmektedir [21].

Literatür incelemelerinde; mevcut ATC kulelerin [11],[12],[14],[15],[17],[18],[19] deprem performansını etkileyen hususlardan; kule yüksekliği ile birlikte taşıyıcı sistem eleman (betonarme elemanlar ile çelik yapı) davranışlarının deprem performansını etkilediği ve analiz sonuçlarında olumsuz durumun belirlendiği görülmektedir.

Yeni yapılacak ATC kule [16]-[20] tasarımlarında ise deprem yükünün yanı sıra rüzgâr, tsunami yük değerlerinin de ele alınarak, kat yüksekliği, kat adedi, zemin durumu, yerin coğrafik konumuna önem verilmesi gerekmektedir. Tasarım aşamasında ATC kulelerine deprem yalıtımı yapılmasının ise deprem esnasında olumlu etki sağlayacağı öngörülmektedir.

Ülkemizde yayınlanan son iki deprem yönetmeliklerinden; Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007) ile yürürlükte olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) ise hava trafik kontrol kule yapısının deprem performansına yönelik özel herhangi bir kriter bulunmamaktadır [22],[23].

6 Ekim 2020 tarihinde 31266 mükerrer sayılı Resmî Gazete de yayımlanan “Türkiye Hava Meydanı Yapıları Deprem Yönetmeliği (THMYDY 2020)” ile yeni yapılacak hava meydanı yapılarının deprem etkisi altında tasarımı ile mevcut hava meydanı yapılarının deprem etkisi altındaki performanslarının değerlendirilmesi ve güçlendirme tasarımı için gerekli koşullar belirlenmiştir [24].

ATC yapıları THMYDY 2020’de taşıyıcı sistem davranışı kritik yapılardan “Hava Trafik Kontrol Yapısı” olarak belirlenmiştir.

❖ Önem sınıfı “1” olarak belirlenen, hava trafik kontrol yapılarında tasarım performans hedefi;

1.Aşama için; DD-2a Deprem Yer Hareket Düzeyine göre “Kesintisiz Kullanım Performans Düzeyi”;

2.Aşama için; DD-1 Deprem Yer Hareket Düzeyine göre “Kontrollü Hasar Performans Düzeyi” sağlanması, depremden sonra acil müdahale operasyonlarına imkân verilmesi hedeflenmektedir.

❖ Deprem Yer Hareket Düzeyi (DD-2a); spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %30 (100 yılda %50) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 144 yıl olduğu sıkça deprem yer hareketini nitelendirmektedir. DD-2a deprem yer hareket düzeyine göre spektral büyüklükler ilk kez yönetmeliklerde tanımlanmıştır.

❖ DD-1 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 (100 yılda %4) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketini nitelendirmektedir.

❖ Deprem Etkisi Altında Hesap ve Değerlendirme Yöntemlerinde ise;

1.Aşama için; DD-2a Deprem Yer Hareket Düzeyine göre “Doğrusal Hesap / Dayanıma Göre Değerlendirme”;

2.Aşama için; DD-1 Deprem Yer Hareket Düzeyine göre “Doğrusal Olmayan Hesap (Zaman Tanım Alanı) / Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme” yapılması belirtilmektedir [24].

Ülkemizde yürürlükte olan TBDY 2018’de ise; performans hedefi ve deprem etkisi altında hesap ve değerlendirme yöntemlerine göre incelendiğinde;

❖ Bina kullanım amacı “deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar” olarak tanımlanan ATC yapıları deprem sonrası hemen kullanılacak olan yapılar sınıfında olup, Bina Önem Katsayısı (I) “1” ve Bina Kullanım Sınıfı (BKS) “1” olarak tanımlanabilmektedir [23].

❖ Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) olarak buna göre; DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı ile DTS: 1a, 2a, 3a, 4a olarak seçilmektedir [23].

❖ Bina yükseklik sınıfları ve deprem tasarım sınıflarına göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları Tablo 4’te verilmiştir [23].

Tablo 4. Bina yükseklik sınıfları ve bina yükseklik aralıkları [23].

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları (m)		
	DTS= 1, 1a, 2, 2a		
	DTS= 3, 3a	DTS= 4, 4a	
BYS= 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS= 2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS= 3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS= 4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS= 5	$17.5 < H_N \leq 28$		$28 < H_N \leq 42$
BYS= 6	$10.5 < H_N \leq 17.5$	$17.5 < H_N \leq 28$	
BYS= 7	$7 < H_N \leq 10.5$	$10.5 < H_N \leq 17.5$	
BYS= 8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10.5$	

❖ Deprem tasarım sınıflarına göre yeni yapılacak veya mevcut binalar için performans hedefleri ve uygulanacak değerlendirme/tasarım yaklaşımları Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 5. Yeni yapılacak yerinde dökme betonarme ve çelik binalar [23].

Deprem Yer Hareket Düzeyi	DTS= 1, 1a, 2, 2a, 3, 3a, 4, 4a		DTS= 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/ Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/ Tasarım Yaklaşımı
DD-2	KH	DGT	KH	DGT
DD-1	-	-	KH	ŞGDT

Tablo 6. Yeni yapılacak veya mevcut yüksek binalar (BYS=1) [23].

Deprem Yer Hareket Düzeyi	DTS= 1, 1a, 2, 2a, 3, 3a, 4, 4a		DTS= 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/ Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/ Tasarım Yaklaşımı
DD-3	-	-	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT	KH	DGT
DD-1	GÖ	ŞGDT	KH	ŞGDT

Tablo 7. Mevcut yerinde dökme betonarme ve çelik binalar [23].

Deprem Yer Hareket Düzeyi	DTS= 1, 1a, 2, 2a, 3, 3a, 4, 4a		DTS= 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/ Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/ Tasarım Yaklaşımı
DD-2	KH	ŞGDT	-	-
DD-1	-	-	KH	ŞGDT

THMYDY 2020 ile TBDY 2018 yönetmelikleri karşılaştırıldığında; iki yönetmelik arasında performans hedefleri ve deprem etkisi altındaki hesap ve değerlendirme yöntemlerinin farklı olduğu görülmektedir.

Mevcut yönetmelikler kapsamında deprem yer hareket düzeylerine göre tasarımda kullanılacak PGA, PGV, kısa ve 1 sn periyot değerlerinin Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen bazı havalimanlarında ve hava trafik kontrol kulelerinde farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir [25],[26].

### 3. Deprem yalıtımlı yapıların deprem performansına yönelik son yıllarda yapılan araştırmalar

Deprem yalıtımı binaların depremden zarar görmesini azaltan bir teknolojidir. Deprem yalıtımı; deprem esnasında yapıya etki eden yatay yüklerin (deprem, rüzgâr vb.) azaltılarak, tüm deplasmanların temel ile üst yapı arasında olmasını sağlamaktır. Ülkemizde deprem yalıtımlı yapıların uygulanması ise yaklaşık 10-15 yıl öncesine dayanmaktadır [27].

Sağlık Bakanlığı 2013 yılında yayınladığı genelge ile 100'den fazla yataklı, birinci ve ikinci derece deprem riski bulunan bölgelerde tüm hastanelerin deprem yalıtımlı olarak tasarlanmasını zorunlu hale getirmiştir [28].

Deprem yalıtımlı yapıların deprem performansına olumlu etkisine ait son yıllarda yapılan çalışmalar aşağıda derlenmiştir.

Yanık vd., (2009) yaptıkları çalışma da; Erzincan depremine dayanamayan 12 katlı binanın taban yalıtımı ve kütle sönümleyiciler ile elastik sınırlar içinde kaldığı tespit edilmiş, şekil değiştirme enerjisinin ise belirgin şekilde azaldığını belirlemiştir [29].

Pauzi N.N.M., (2012) yaptığı çalışmada ATC kulesi Kuala Lumpur Uluslararası Havaalanı'nın sarkaç ayarlı kütle sönümleyici ile deprem performans etkinliğini karşılaştırmıştır. Kütle sönümleyiciler ile kulenin tepkisini azaltabildiği görülmektedir. 4 sarkaçlı kütle sönümleyicilerin, 2 sarkaçlı kütle sönümleyicilere kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir [30].

Pegkökgöz ve Taş, (2016) çalışmalarında betonarme bir minareye Ayarlı Kütle Sönümleyici (AKS) yerleştirilerek dinamik davranışını araştırmışlardır. Yerleştirilen AKS'ler ile titreşimin daha az sürede sönümlenmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir [31].

Polat H.İ., (2017) yaptığı çalışmada; 3 katlı mevcut okul binası için 1999 Marmara deprem ivme kaydı ile model oluşturulmuş ve analiz sonuçları elde edilmiştir. Analiz sonucunda; izolasyon sistemli yapının periyotlarında artışın meydana geldiği, yapıya gelen kesme kuvvetinin ise azaldığı görülmüştür [32].

Kan vd., (2017) yaptıkları çalışmada; yapılarda sismik izolasyon kullanılması ile deprem etkilerinin azaltılması sağlanırken, ayrıca yapının taşıyıcı sistem eleman kesitlerinin küçük boyutlarda tasarlanmasını da olanaklı hale getirdiği belirtilmiştir [33].

Edinçliler ve Çalikoğlu, (2017) yaptıkları çalışmada; az katlı binalarda yalıtım sisteminin sarsma masası testleri ile incelenmesi amaçlanmıştır. Sonuçta; yapıya etkiyen deprem

ivmelerinin azalımı eğilimi gösterdiği, kat ötelemelerinde ise maksimum azalımın görüldüğünü tespit etmişlerdir [34].

Yıldırım vd., (2019) yaptıkları çalışmada sismik izolasyon ile ilgili mevcut uluslararası yönetmelikleri incelemiş, uygulamalarda tasarım esasını teşkil eden ana unsurlar belirlemiştir. Çalışmada ASCE 7, ASCE 41, EN 1998, EN 15129 ve JSSI Manual yönetmelik ve klavuzlar seçilmiştir. Sonuç olarak; ASCE 41 yönetmeliğinin mevcut yapılar için daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir [35]-[40].

Severcan ve Şen, (2019) çalışmalarında sismik izolatörün bina kat adedine bağlı olarak yapısal etkilerini araştırmışlardır. 10 ve daha az kat adedine sahip binalarda izolatörün deprem esnasında iyi bir performans sergilediği belirlemiştir. İzolatör sayesinde binada can güvenliğinin sağlanacağı belirtilmiştir [41].

Dönmez B., (2019) yaptığı çalışmada; hastane binasında 3 farklı izolatör tiplerine göre sismik tepkimeyi büyük ölçüde azalttığı belirlenmiştir [42].

Türk H.A., (2019) yaptığı çalışmada; sismik izolatör mesnetli sağlık merkez binasının deprem performans analizinde olumlu sonuçlar elde edildiğini tespit etmiştir. [43].

Dongmei L., (2019) yaptığı çalışmada; Çin'de 50 katlı bir ofis binasında yalıtım sisteminin, deformasyon gereksinimleri ve performans analizinde iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir [44].

İlerisoy vd., (2019) yaptıkları çalışmada sismik izolasyon sistemlerinin kullanımı ile ilgili olarak; özel sektör ve kamuda bu konuda yeterli bilincin oluşması, gerekli standartların geliştirilmesi ve yönetmeliklerle bunların zorunlu tutulmasının sağlanması belirtilmiştir [45].

Takva ve İlerisoy, (2021) yaptıkları araştırmada; sismik izolatörün gelişmiş ülkelerde yaygın kullanıldığı, gelişmekte olan ülkelerde ise kritik öneme sahip yapılarda öncelik verildiği vurgulanmıştır [46].

Özer ve İnel, (2021) yaptıkları çalışmada ise sismik izolatörlü tipik bir betonarme konut binasının performans analizinde, izolatörün ortalama görece kat ötelemeleri ile taban kesme kuvvetinde azalma olduğu belirlenmiştir [47].

Literatür incelemelerinde [29],[30],[31],[32],[33],[41],[42],[43],[44],[47]; binalarda deprem yalıtımı ile deprem enerjisinin sönümlendiği, şekil değiştirme enerjisinde belirgin düzeyde azalmanın olduğu ve yapıya gelen taban kesme kuvveti değerinin ise azaldığı görülmektedir. Deprem performansı nedeniyle, uygulamanın yaygınlaşması ve standartların geliştirilmesi gerekmektedir.

### 4. Sonuç ve öneriler

Yapılan çalışmada hava trafik kontrol kulelerinin deprem performans durumu ile yalıtım etkileri incelenmiştir.

Sonuç olarak, hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansına yönelik ülkemizde sadece 2021 yılında yürürlüğe giren Türkiye Hava Meydanı Yapıları Deprem Yönetmeliğinde mevcut ve yeni yapılar için kriterler

belirlenmiştir. 2 aşamalı olan tasarımda ilk aşama için DD-2a deprem yer hareket düzeyi, ikinci aşama için ise DD-1 deprem hareket düzeyine göre hesaplama yöntemi belirlenmiştir. THMYDY 2020'nin, TBDY 2018 performans analiz sonuçlarına göre daha etkin olacağı öngörülmektedir. Uluslararası yayınlarda ise hava trafik kontrol kulesi için özel sismik tasarım klavuzunun oluşturulmasının gerektiği dikkat çekmektedir.

Ancak, kritik öneme sahip yapıların tek aşamalı DD-1 deprem yer hareket düzeyine göre yapılacak ileri düzey analizler (doğrusal olmayan hesap yöntemi) ile sonuçların karşılaştırılması, literatüre katkı açısından fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Deprem yalıtım etkisinde ise yapılarda deprem performansı açısından olumlu sonuçlar alınmasına rağmen, havalimanlarında öneme sahip hava trafik kontrol kulesine yönelik ülkemizde çalışmanın bulunmadığı görülmektedir.

Bu nedenle, ülkemizde kritik öneme sahip mevcut veya yeni yapılacak hava trafik kontrol kulelerinin deprem performansı ve yalıtım etkisinin ayrıntılı olarak incelenmesine yönelik yeni araştırmalara ihtiyaç bulunduğu öngörülmektedir.

Ayrıca, yürürlükte olan yönetmeliklere göre tasarım parametrelerinden PGA, PGV, kısa ve 1 sn periyot ivme değerlerinde gerçek duruma yakın sonuçlar elde etmek amacıyla, AFAD'a ait "Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması" üzerindeki değerlerin güncellenmesi önerilmektedir.

## 5.Kaynakça

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Damage\\_to\\_infrastructure\\_in\\_the\\_2010\\_Haiti\\_earthquake](https://en.wikipedia.org/wiki/Damage_to_infrastructure_in_the_2010_Haiti_earthquake) [Son Erişim: 25.06.2023]
- [2] <https://www.hurriyet.com.tr/dunya/yeni-zelandada-6-3lu-k-deprem-en-az-75-olu-17087087> [Son Erişim: 25.06.2023]
- [3] <https://www.iha.com.tr/haber-van-ferit-melen-havaalanin-in-kulesi-onariliyor-203980/> [Son Erişim: 15.05.2023]
- [4] <https://dialogo-americas.com/articles/united-states-install-s-mobile-control-tower-at-ecuador-airport-destroyed-by-earthquake/> [Son Erişim: 15.05.2023]
- [5] <https://www.trthaber.com/haber/dunya/endonezyada-depremin-yaralari-sarilmaya-calisiliyor-388105.html> [Son Erişim: 20.06.2023]
- [6] <https://www.airporthaber.com/havacilik-haberleri-denizli-cardak-havalimani-kulesi-savas-alanina-dondu.html> [Son Erişim: 26.06.2023]
- [7] <https://www.haberler.com/guncel/istanbul-deprem-inisya-pacak-ucaklari-da-etkiledi-12467114-haberi/> [Son Erişim: 26.06.2023]
- [8] <https://www.thedubrovniktimes.com/news/croatia/item/10586-zagreb-airport-control-tower-suspended-after-earthquake> [Son Erişim:26.06.2023]
- [9] <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/iga-ekipleri-depremden-hasar-goren-hatay-havalimanini-onarmaya-basladi/2810992> [Son Erişim: 24.06.2023]

[10] <https://www.cumhuriyet.com.tr/turkiye/malatya-havali-maninda-hasar-meydana-geldi-2048789> [Son Erişim: 24.06.2023]

[11] J. Wilcoski and E. Heymsfield, "Performance and Rehabilitation of Type L FAA Airport Traffic Control Tower at San Carlos, California, for Seismic Loading" *Journal of Performance of Constructed Facilities.*, 16:85-93, 2002.

[12] M. Vafaei and B.A. Adnan, "Sensors Placement in Airport Traffic Control Towers for Seismic Health Monitoring", *First Middle East Conference on Smarth Monitoring, Assesment and Rehabilitation of Civil Structures*, 2011.

[13] FEMA-356, Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, USA, 2000.

[14] M. Vafaei and S.C. Alih, "Assessment of Seismic Design Response Factors of Air Traffic Control Towers", *Bull Earthquake Eng.*, 14:3441-3461, 2016.

[15] H. Moravej, M. Vafaei and S.A. Bakar, "Seismic Performance of A Wall-Frame Air Traffic Control Tower", *Earthquakes and Structures.*, Vol. 10, No. 2, 463-482, 2016.

[16] B.J. Sullivan, H. S. McKenzie and A.E. Philpott "Wellington Airways Control Tower – Structural Design for Resilience, Case Study", *NZSEE Conference*, 2017.

[17] M. Vafaei and S.C. Alih, "Seismic Vulnerability of Air Traffic Control Towers", *Nat Hazards*, 90:803-822, 2018.

[18] M. Vafaei *et al.*, "Estimation of Design Base Shear in Concrete Wall Air Traffic Control Towers", *16th European Conference on Earthquake Engineering*, June 2018.

[19] H. Moravej and M. Vafaei, "Seismic Performance Evaluation of an ATC Tower Through Pushover Analysis", *Structural Engineering International*, 29:1, 144-149, 2019.

[20] R. Sharma, "Analysis and Design of Air Traffic Control (ATC) Tower", *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, Volume 6, Issue 5, 619-637, 2019.

[21] S. Amrutkar, A. Sarvade and M. Waghmare, "Effect of Structural Shape on Seismic Response of Air Traffic Control Tower", *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Volume 10, Issue V, 2022.

[22] DBYBHY 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.

[23] TBDY 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

[24] THMYDY 2020. Türkiye Hava Meydanı Yapıları Deprem Yönetmeliği. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Ankara.

[25] A. Boztepe ve G. Aktaş, "Kahramanmaraş Depremlerinden Etkilenen Havalimanlarında Yer İvmesi ile Yer Hızı Değerlerinin İncelenmesi", *II. International Conference on Engineering Sciences*, Gence, Azerbaycan, 21-22 Eylül, 2023.

- [26] A. Boztepe ve M.E. Öncü, “Kahramanmaraş Depremlerinden Etkilenen Uçuş Kontrol Kulelerinde Spektral İvme Değerlerinin Mevcut Yönetmeliklere Göre Karşılaştırılması”, *II. International Conference on Engineering Sciences*, Gence, Azerbaycan, 21-22 Eylül, 2023.
- [27] A. Boztepe ve G. Aktaş, “Ülkemizde Sismik İzolasyonlu Yapıların Yaygınlaşmasına Yönelik Mevcut Durumun Analizi”, *9th International Zeugma Conference on Scientific Research*, Gaziantep, Türkiye, 19-21 Şubat, 2023.
- [28] 2013/3 Sayılı Genelge, T.C. Sağlık Bakanlığı, Deprem Yalıtımlı Olarak İnşa Edilecek Yapılara Ait Proje ve Yapım İşlerinde Uyulması Gereken Asgari Standartlar.
- [29] A. Yanık, Ü. Aldemir ve M. Bakioğlu, “Taban İzolasyonlu ve İzolasyonsuz Yapılarda Sismik Enerjinin Dağılımı”, *XVI. Ulusal Mekanik Kongresi*, 2009.
- [30] N.N.M. Pauzi, “Response of Air Traffic Control Tower with Pendulum Tuned Mass Damper Under Earthquake Loading”, M.S. thesis, Dept. Civil Eng., University Technology Malaysia, Malaysia, 2012.
- [31] R.K. Pekgökgöz ve G. Taş, “Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Betonarme Yüksek Minarelerin Dinamik Analizi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32:1, 265-282, 2017.
- [32] H. İ. Polat, “Betonarme Bir Yapıda Geleneksel Yöntem ve Taban İzolatörü Kullanımının Karşılaştırmalı Analizi”, *7. Geoteknik Sempozyumu*, 2017.
- [33] Ö. Kan vd., “Türkiye'deki Depreme Dayanıklı Yapıların Sismik İzolasyon Tiplerinin İncelenmesi”, *Munzur Üniversitesi Bilim ve Gençlik Dergisi*, ISSN: 2148-0273, Cilt 5, Sayı 1, 82-100, 2017.
- [34] A. Edinçliler ve M. Çalikoğlu, “Az Katlı Binalarda Sismik Hasarların Azaltılması İçin Geosentetiklerin Kullanılması”, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 2017.
- [35] S. Yıldırım vd., “Sönümleyicili Yapıların Deprem Tasarımı, Bölüm I: Uluslararası Yönetmeliklerin İncelenmesi”, *5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2019.
- [36] ASCE 7-16 (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7- 16. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- [37] ASCE 41-17 (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-17. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- [38] EN 1998-1 (2004). Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee For Standardization. Brussels, Belgium.
- [39] EN 15129 (2018). Anti-seismic Devices. European Committee For Standardization. Brussels, Belgium.
- [40] JSSI Manual, (2003) Design and Construction Manual for Passively Controlled Buildings, Japan Society of Seismic Isolation (JSSI), Japan.
- [41] M. H. Severcan ve P. Şen, “Sismik İzolatörlü Binalarda Kat Adedi Etkisi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 8, Sayı 2, 922-935, 2019.
- [42] B. Dönmez, “İnşaat Teknolojisinde Deprem İzolatör Sistemlerinin Planlanması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [43] H. A. Türk, “Çok Katlı Betonarme Yapılarda Farklı Sismik İzolatör Sistemlerin ve Kat Adetinin Deprem Davranışına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2019.
- [44] L. Dongmei, “Preliminary Evaluation Of Seismic Performance of Engineering Structures With Perform 3D”, *Scienco*, Vol. LXV, Issue:4, 2019.
- [45] Z. Y. İlerisoy vd., “Sismik Taban İzolasyonu Sistemlerinin Konutlarda Kullanımının İncelenmesi”, *VI. Uluslararası Deprem Sempozyumu*, pp. 611-618, Kocaeli, Türkiye, 2019.
- [46] Y. Takva ve Z. Y. İlerisoy, “Müze Yapılarının Sismik Tasarımı ve Taban İzolasyon Uygulamalarının İncelenmesi”, *Middle East International Conference on Contemporary Scientific Studies-V*, Vol. III, pp. 374-385, March 27-28, 2021.
- [47] E. Özer ve M. İnel, “Sismik İzolatörlerin Betonarme Konut Binasının Performansı Üzerindeki Etkileri”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 27, sayı. 3, ss. 303-311, Haz. 2021.



## Time Series Analysis Methodology for Damage Detection in Civil Structures

Burcu GÜNEŞ<sup>1\*</sup>, Oğuz GÜNEŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, bgunes@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3768-3530

<sup>2</sup> Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, ogunes@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4365-6256

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 22 September 2023  
Received in revised form 8 December 2023  
Accepted 8 December 2023  
Available online 31 December 2023

#### Keywords:

Structural health monitoring, autoregressive models, singular value decomposition, damage localization, residual analysis, impact testing

Doi: 10.24012/dumf.1364693

\* Corresponding author

### ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) methodologies employing data-driven techniques are becoming increasingly popular for detection of structural damage at the earliest stage possible. With measured vibration signals from the structure, time series modeling methods provide quantitative means for extracting such features that can be utilized for damage diagnosis. In this study, one-step prediction error of an autoregressive (AR) model over a data set is used as damage indicator. In particular, the difference between the prediction of the AR model that is fit to the measured acceleration signal obtained from the intact structure and actual measured signals collected for different damage states of the structure are interrogated for diagnosis purposes. More specifically, the standard deviation of the residual error is employed to locate the damaged region. Singular-value decomposition (SVD) is employed to find the optimal order for an AR model created using the impulse responses of the system. Numerical simulations are carried out using the impulse responses acquired from a four-story frame structure contaminated with additive noise including single and multiple damaged elements. The results of the simulations demonstrate that the method can be effectively employed to detect and locate damage. The performance of the proposed procedure are further demonstrated using the impact data acquired from a reinforced concrete frame for real applications.

## Introduction

The symptoms of deterioration or damage manifest themselves with the changes in the dynamic state of the structural system and are reflected as discrepancies in its anticipated vibration response. This is the fundamental principle upon which any vibration-based method is based. Vibration-based damage detection is a field of study within the general framework of structural health monitoring (SHM) that primarily focuses on extracting damage-sensitive features from the vibration measurements and developing approaches that can be employed for damage detection and localization purposes [1-4].

Within this context, time series analysis is involved with analyzing a sequence of response signals collected over a time period to extract the pattern in the data and develop an appropriate model to describe it accurately. With their potential to process high volumes of sensor data in an efficient and easily automated manner and to produce robust and reliable results without the requirement of physics based models, time series analysis methods lend themselves quite suitable for SHM applications [5-10] especially when they are cast in conjunction with a statistical pattern recognition framework such as novelty or outlier detection.

Autoregressive models (AR) are among the parametric methods used for time-series representations of stationary signals that are regularly sampled and acquired from a dynamic system assuming that the structure is subjected to random excitation. Methods based on the time series representations have received increased attention for SHM purposes and the corresponding model coefficients as well as the residual signals have been explored as damage detection measures [8-14.]

Selection of the model order and the sensitivity of the model to measurement noise are the among the critical issues that must be dealt with for robust and reliable application of the model as well as the success of the damage detection methodology. Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC) and final prediction error (FPE) are the most widely used conventional approaches to select model order. However, these methods usually cannot guarantee the correct model order [15] and furthermore, for a transient signal, the applicability of these criteria is questionable.

In this study, singular value decomposition (SVD) of the response matrix obtained with a unit delay time is utilized for finding the optimal order of the model. With the effective singular values and the associated vectors, the SVD-based low-rank approximation is obtained to



reconstruct the signal from the reduced number of components. The SVD allows for the correct estimation of the model order as well as to help reduce the measurement noise. AR model is then fit to this 'filtered' version of the data acquired at the baseline state of the structure. The proposed method uses this AR model to predict the response measurements acquired at different damaged states of the system. The difference between the predicted response and the measured responses are utilized for detecting and locating damage.

The remainder of the paper is organized as follows: Next section reviews the basic principles of the AR time series modeling and the singular value decomposition. The proposed approach implemented for detection and localization based on the damage index is discussed next. The results of the investigation carried out with numerically simulated data on a four-story frame structure and the experimental implementation on a reinforced concrete test frame is presented in the following section. The final discussion on the proposed methodology and the concluding remarks are summarized in the last section of the manuscript.

## Theoretical Background

### Autoregressive (AR) Models

An AR model is in the form of stochastic difference equation regresses the output variable based on its own previous values and are used in the analysis of stationary time series processes. A univariate AR model of order  $p$  is represented as AR( $p$ ) and can be written as

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_p x_{t-p} + e_t \quad (1)$$

where  $x_t, \dots, x_{t-p}$  are the current and previous values of the time series,  $\varphi_1, \dots, \varphi_p$  are the unknown AR coefficients and  $e_t$  is the error term with zero mean and constant variance. The values of  $\varphi_i$  are estimated by fitting the AR model to the time history data using Burg's method. The method estimates the coefficients recursively up to the selected order  $p$  by minimizing forward and backward predictions as  $p$ -linear least squares problem. It is computationally simple and the estimated coefficients are guaranteed to be stable [16].

### Singular Value Decomposition (SVD) and Model Order Determination

The decomposition schemes with the fundamental idea of decomposing a complicated signal into simpler yet similar components provides insight into the data and the underlying system by revealing which components are the most important for describing the original data. This allows for major data compression as well as facilitating removal of measurement noise and extraction of features.

Singular value decomposition has been used effectively in a variety of applications, including, signal denoising, data compression and fault diagnosis. The first step to decompose a one-dimensional signal is transforming it into a trajectory matrix form through the so called 'embedding process' [17, 18]. One of the most widely used form of matrix transformation is the Hankel matrix due to its zero phase shift characteristic [19].

For a discrete signal  $x = [x(1), x(2), \dots, x(n)]$  a Hankel matrix can be formed as

$$A = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(m) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(m+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(k) & x(k+1) & \dots & x(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

The SVD of matrix  $A \in R^{k \times m}$  leads to the following factorization:

$$A = U \Sigma V^T \quad (3)$$

where the two orthogonal matrices  $U = [u_1, u_2, \dots, u_m] \in R^{k \times k}$  and  $V = [v_1, v_2, \dots, v_m] \in R^{m \times m}$  are the left and the right singular vectors, and each of these column vectors are the eigenvectors of the covariance matrix,  $AA^T$  and  $A^T A$ , respectively.  $\Sigma$  is a diagonal matrix of size  $k \times m$  in which the entries of the leading diagonal are the singular values of  $A$ . The diagonal entries,  $[s_1, s_2, \dots, s_p]$  where  $p = \min(k, m)$ , are the non-negative square roots of the eigenvalues of the covariance matrix,  $A^T A$ .

It is possible to rewrite eqn.3 using summation as :

$$A = \sum_{i=1}^p s_i u_i v_i^T \quad (4)$$

As expected, the number of non-zero singular values coincides with the rank of  $[A]$ . Since zero singular values can be interpreted as 'small' values, smaller than a certain tolerance, due to the noise effects in the measurements, the number of significant singular values can be used to determine the model order.

One can obtain low-rank approximation of matrix  $A$ ,  $\tilde{A}$ , by truncating the contributions of the small singular values and the associated singular vectors in order to remove the noise and unrelated components from the measured signal. With the truncated matrix  $\tilde{A}$  in Hankel form, the associated time-series signal  $\tilde{X}$  can be reconstructed using reverse Hankel construction approach which essentially takes the first row of the matrix and pads it with the values in the last column starting from the second row. More specifically if:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{x}(1) & \tilde{x}(2) & \dots & \tilde{x}(m) \\ \tilde{x}(2) & \tilde{x}(3) & \dots & \tilde{x}(m+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}(k) & \tilde{x}(k+1) & \dots & \tilde{x}(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

then the reconstructed time series is:

$$\tilde{X}_t = [\tilde{x}(1) \ \tilde{x}(2) \ \dots \ \tilde{x}(m) \ \tilde{x}(m+1) \ \dots \ \tilde{x}(n)] \quad (6)$$

An important issue that requires clarification regarding the Hankel matrix representation is number of rows and columns to be included in the matrix. Based on [20], the optimal number of matrix columns should be selected based on the maximum energy of the singular values since the energy of the singular values are inherently related to the

information richness of the trajectory matrix. It is proven in [36] that the Hankel matrix is square or close to square, the corresponding energy in the singular values is maximized. This means that if the signal length  $n$  is even, selecting the number of columns,  $m = n/2$  and the number of rows,  $k = n/2 + 1$  will maximize the energy of the singular values. If  $n$  is odd, the energy can be maximized by selecting  $m = (n + 1)/2$  and  $k = m$ .

**Damage Localization Methodology**

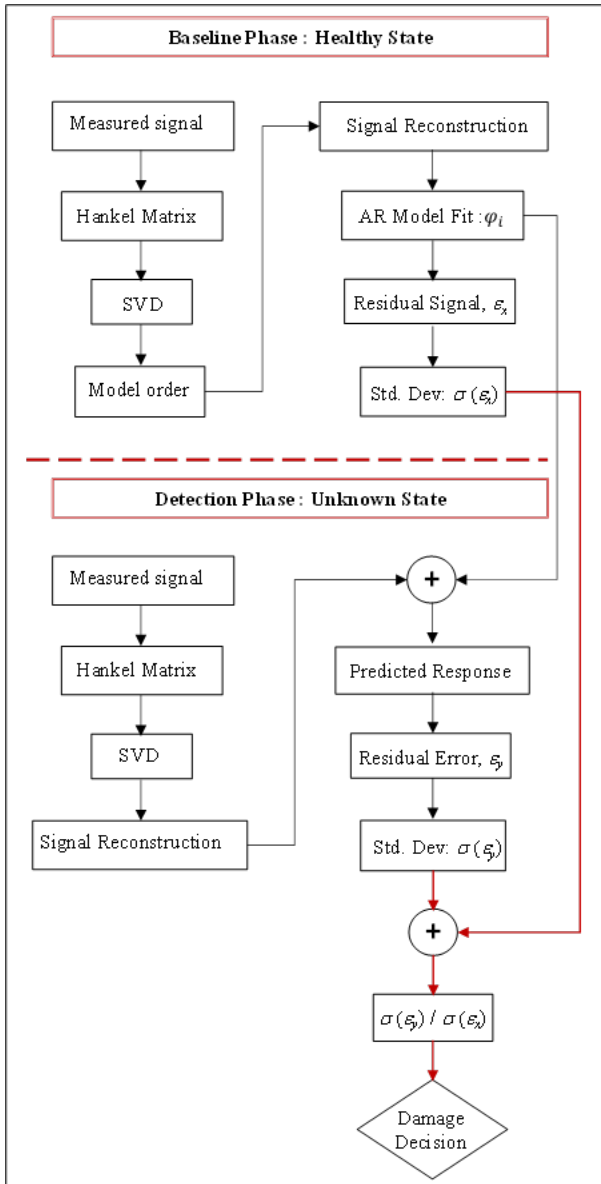


Figure 1. Extraction of damage sensitive features

Fig 1. illustrates the steps of the methodology employed to extract the damage-sensitive features. The initial processing of the sensor data from the structural system at any state is identical. The data is transformed into the Hankel form and using SVD the optimal order for the AR model is determined. Once the system order is decided based on the

response signal obtained at the baseline state, it is assumed as set for the system at any state. Using the respective singular values and vectors corresponding to the system order, the signal is reconstructed following equations (3)-(5). The residual error defined as the difference between the predicted signal using the AR-model established for the baseline state and the reconstructed signal of the unknown state. The ratio of the standard deviation of the residual errors, the unknown state to that of the baseline state,  $\sigma(\varepsilon_y)/\sigma(\varepsilon_x)$ , is exploited as the damage-sensitive feature. Clearly, in order to arrive at a decision regarding the existence of damage, some threshold value for this ratio should be specified. This can be achieved by acquiring sensor data under different operating conditions and carrying out a statistical analysis.

Among various statistical tools for detecting anomalies in the data, an outlier detection algorithm which essentially classifies a value that is more than three scaled median absolute deviations (MAD) from the median as an anomaly is implemented in this study. Proven to be a resilient statistical tool for outliers, MAD, for a vector  $x$  of length  $N$ , is defined as:

$$MAD = \text{median}(|x_i - \text{median}(x)|) \quad i = 1:N \quad (7)$$

It should be noted that damage detection step can be implemented at the sensor level; that is each sensor information can be processed individually. However, localization of damage requires fusing the information collected from all sensor positions. In this regard, the same index can be used to locate damage with the assumption that the residual errors are maximized at the sensors closest to the damaged region.

**Numerical Simulations**

This section presents the numerical simulations conducted on a frame structure to investigate the performance of the proposed algorithm and the damage index. The 4-story moment resisting frame with 24 degrees-of-freedom (DOF) is depicted in Figure 2. The parameters of the model are arbitrarily chosen so that the fundamental period of corresponding to the first translational mode is 1 sec. Mass of the system is assumed to be lumped along the translational DOF and 2% proportional damping is assigned for all the modes. The damage scenarios including single and multiple damaged elements in the form of plastic hinge formations are also depicted in the same figure. The analytically computed natural frequencies corresponding to the translational modes for all the simulation cases are listed in Table 1. It is assumed that a total of four acceleration sensors, one in each floor measuring in the lateral direction, are deployed through the structure to measure the output signals. At each different health state of the structure, a total of 50 simulations are performed and impact data is generated. To simulate the variations during normal operating conditions, sensor noise is contemplated using a random number generator with a level ranging 5-10% of the root-mean-square (RMS) of the response measured at the

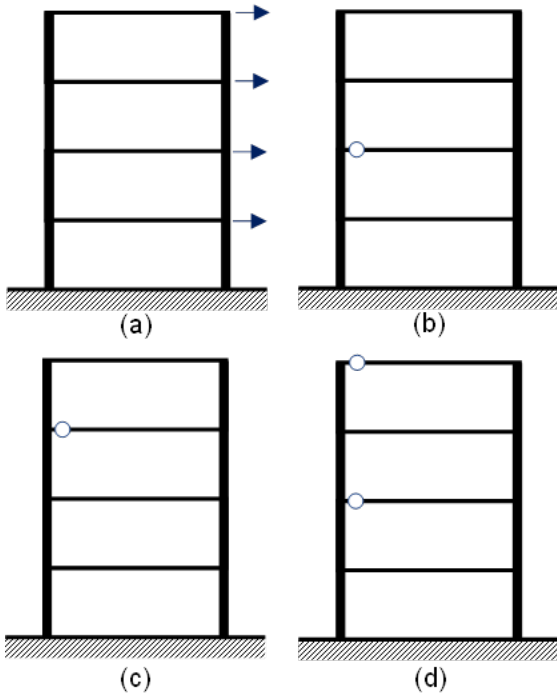


Figure 2. (a) Healthy State, (b) Damage Case 1, (c) Damage Case 2, (d) Damage Case 3

associated sensor such that signal-to-noise ratio is defined as

$$SNR = \sigma_{noise}^2 / \sigma_{signal}^2 \tag{8}$$

where  $\sigma_{noise}^2$  and  $\sigma_{signal}^2$  are the variance of the noise and response signals.

Following the data acquisition stage, extraction of damage sensitive features has to take place. To achieve that, the first task is to estimate the order and the parameters of the AR-model using the data acquired at the baseline state. Following the proposed procedure shown in the flowchart of Fig.1, each of the simulated signals is transformed into Hankel matrix form and SVD is carried out. Examination of the singular values reveals that the suitable model order for the system can be selected as eight. A sample singular value plot is provided in Fig. 3.

Table 1. Natural frequencies corresponding to the translational modes

Mode	Healthy	DC 1	DC 2	DC3
1	1.00	0.88	0.93	0.86
2	3.42	3.42	3.14	3.12
3	6.44	6.08	6.43	5.74
4	8.96	8.96	8.90	8.86

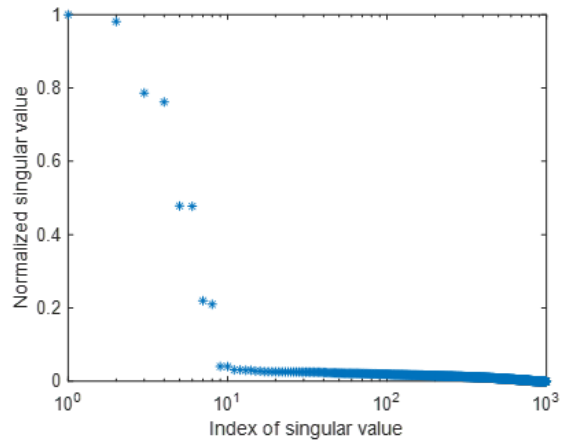


Figure 3. SV plot for a sample signal

With the model order determined, the signal is reconstructed using these eight singular values and vectors. AR model is then fit to this reconstructed signal and eight AR coefficients are extracted. Using these parameters, the predicted signal is computed and the difference between the predicted and the original signal is stored as the residual error. The standard deviation of this residual error constitutes the first part of the damage-sensitive feature. The same process is repeated for all the sensor data and all the simulations and the statistics of the residual error and the fit model are recorded for later use in the damage detection and localization stages.

Next stage starts with data processing at an unknown health state of the structural system. Using the order of the system determined for the baseline state, first SVD process is utilized and the signals are reconstructed with the determined number of singular values and vectors. based. Using the AR-model created at the baseline state, response signal is predicted. The discrepancy between the predicted response and the actual response gives the residual error for the unknown state.

At this stage detection algorithm can be invoked for the SHM activity. Using the three scaled MADs from the median as the threshold for the classification, all the simulation cases are successfully classified as ‘novelty’. For these cases proven to be ‘not-belonging’ to the baseline state, damage localization must be carried out. The ratio of the standard deviation of the residual error obtained for the unknown state to that of the baseline state,  $\sigma(\epsilon_y) / \sigma(\epsilon_x)$ , is defined as the damage index and the normalized value of this index for all the simulation cases are presented in the form of a box-plot for damage cases 1-3 in Fig. 4 (a)-(c), respectively. On each box in these figures, the central mark indicates the median value and the bottom and top edges of the box indicate the 25th and 75th percentiles, respectively. The outliers are plotted individually with circle markers. It follows that for the single member damages at second and third floors, damage cases 1 and 2, damage index successfully isolates the damaged region. For damage case 3 involving multiple damaged elements on second and fourth floors, damage index in descending order arrives at

correct ranking list, however, cannot single out the damaged floors.

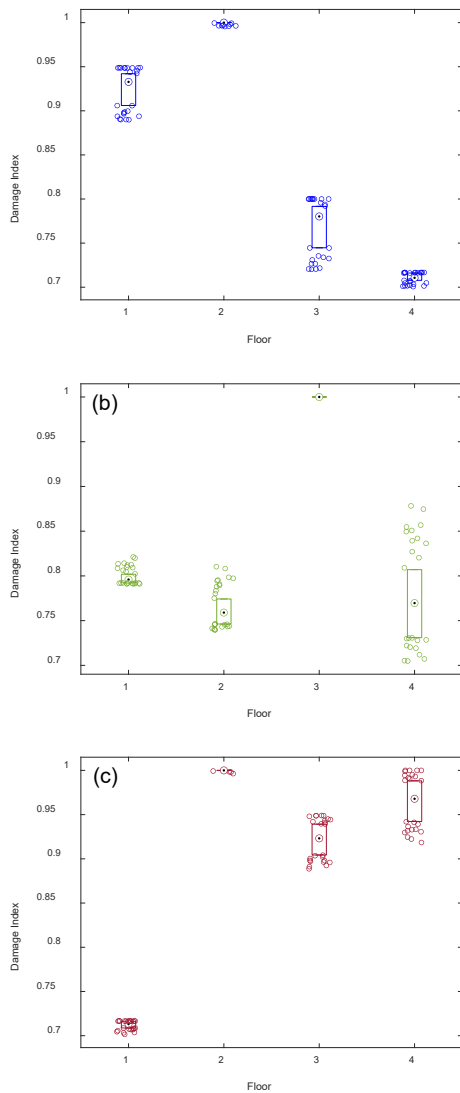


Figure 4. Box plot of damage index: (a) Damage case 1, (b) Damage case 2, (c) Damage Case 3.

### Experimental Verification

A one-story one bay reinforced concrete frame with a height of 1.5m. and a span length of 2m. shown in Fig. 5 is subjected to lateral loading at the top level of the column in a quasi-static cyclic manner. The loads were applied in a displacement-controlled manner in sets of three cycles and damage is inflicted on the system. The completion of the load test at the predetermined drift levels is followed by vibration tests using impact hammer and accelerometer data is acquired at seven different locations with a sampling frequency of 500 Hz ( $dt=0.002s$ ). The impact locations are chosen to coincide with these accelerometer locations. Further details of the experimental procedure can be found in [20]. In this study, the associated vibration data corresponding to the baseline state before any lateral loads

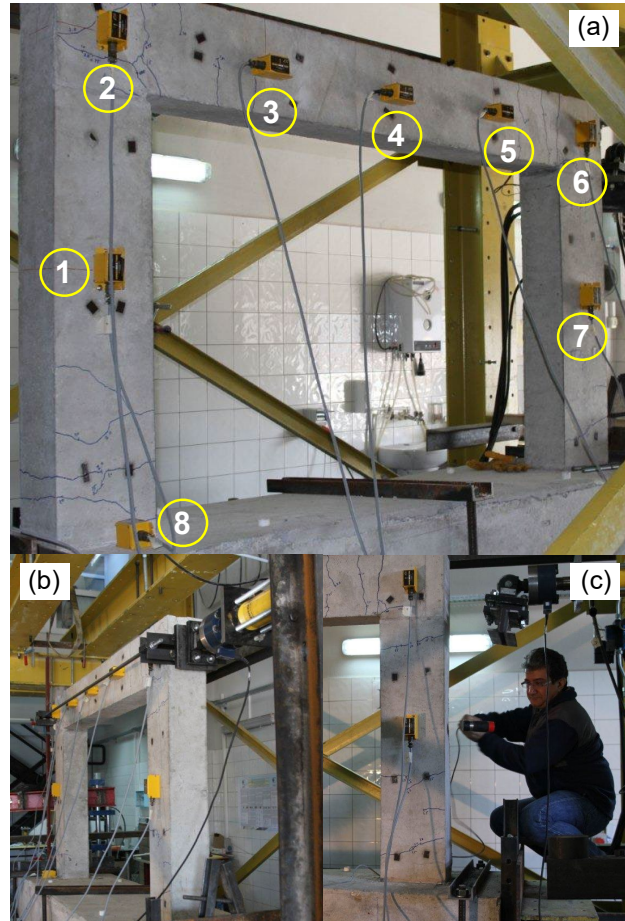


Figure 5. (a) Test-specimen and accelerometer locations (b) load test set-up (c) impact testing

are applied and the one after the structure is pushed to a drift level of 2%, are processed to investigate the applicability of the proposed approach for localizing the damaged region.

Following the flowchart presented in Fig. 1, the first stage of data processing involves fitting an AR model to the sensor data recorded at the baseline state of the structure.

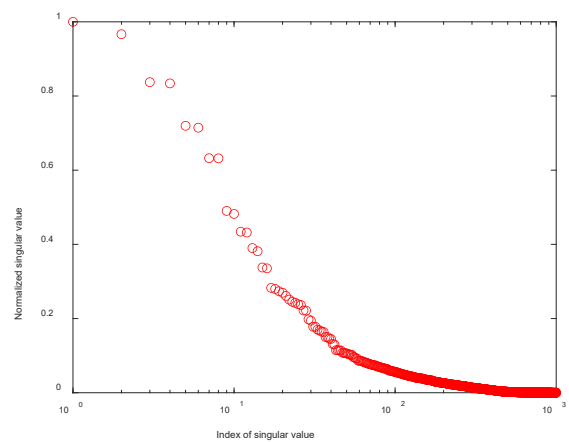


Figure 6. Singular value plot for a sample acceleration record

Interrogation of the singular values, shown in Fig. 6, the system order is selected as 16. With the associated singular values and vectors, data is reconstructed and AR model fit is obtained. The difference between the predicted response based on this model and measured response defines the residual signal. The ratio of standard deviations of the residuals, damaged state with respect to the baseline state, as damage index computed at all seven sensor locations is presented in Fig. 7.

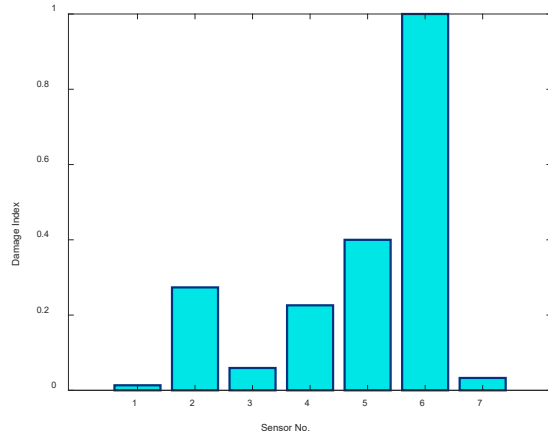


Figure 7. Damage localization index

Region around accelerometer 6, which is the beam column connection is identified as the potential damage location. This is in fact consistent with the observed damage at this drift level. The visual inspections however, also revealed damage infliction in the proximity of sensor 2. Examining the ranking of the members based on the damage index, sensor 2, although is among the top three potential damage locations, it does not distinctly stand out from two of the remaining six locations.

## Concluding Remarks

A methodology to detect and locate damage that using the measured vibration data, that can operate on noisy transient signals is presented. The method has been shown to be successfully applied on simulated acceleration data from a frame type structure subjected to impact type unmeasured excitation. The experimental work on the reinforced concrete frame demonstrated that although a truly damaged region is successfully located, multiple damage locations represents a challenge with the current form of the methodology.

Selection of appropriate model order and the sensitivity of the AR model parameters, the two critical issues effecting the reliability of the model, are overcome through the SVD approach. The singular values defining the system order although form a clearly separable cluster with the simulated data; they are not as well separated for the measured data from the test specimen.

As for the damage index, the standard deviations of the residual error between the measured and predicted signals, more specifically the ratio between the unknown state and that of the baseline state as damage sensitive feature has proven its potential to localize damage for the simulated

damage cases. With several advantages it offers, such as; detection of damage being carried out in an unsupervised learning mode and in a decentralized manner where data processing takes place individually at each sensor, requiring only the output signals and its robustness in the presence of noise, the proposed methodology appears to be a promising signal-based approach for damage diagnosis. The improvement in the efficiency of the methodology when dealing with multiple damage locations from a real structure is required which is reserved for future work.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

## Authors' Contributions

-Study conception and design: BG, OG

-Acquisition of data: OG, BG

-Analysis and interpretation of data: BG, OG

-Drafting of manuscript: BG

-Critical revision: OG

## References

- [1] C. R. Farrar, S.W. Doebling, and D. A. Nix, "Vibration-based structural damage identification," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 359.1778 (2001): 131-149.
- [2] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review," United States: N. p., 1996. Web. doi:10.2172/249299.
- [3] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods," *Shock and vibration digest* 30.2 (1998): 91-105. W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA, USA: Wadsworth, 1993, pp. 123-135.
- [4] D. Montalvao, N. M. M. Maia, and A. M. R. Ribeiro, "A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials," *Shock and vibration digest* 38, no. 4 (2006): 295-324.
- [5] H. Sohn, J. A. Czarnecki, and C. R. Farrar, "Structural health monitoring using statistical process control,"



- Journal of structural engineering* 126, no. 11, 2000, 1356-1363.
- [6] H. Sohn, C. Farrar, N. Hunter, and K. Worden, *Applying the LANL statistical pattern recognition paradigm for structural health monitoring to data from a surface-effect fast patrol boat*. No. LA-13761-MS. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2001.
- [7] M. Gul, F. N. Catbas, and M. Georgiopoulos, "Application of pattern recognition techniques to identify structural change in a laboratory specimen," In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 6529, 2007, pp. 556-565. SPIE.
- [8] P. Omenzetter, and J. M. W. Brownjohn, "Application of time series analysis for bridge monitoring," *Smart Materials and Structures* 15, no. 1, 2006, 129-138,
- [9] K. K. Nair, A. S. Kiremidjian, and K. H. Law, "Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure," *Journal of Sound and Vibration* 291, no. 1-2, 2006, 349-368.
- [10] K. K. Nair, and A. S. Kiremidjian, "Time Series Based Structural Damage Detection Algorithm Using Gaussian Mixtures Modeling," *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, May 2007; 129(3), 285-293. <https://doi.org/10.1115/1.2718241>
- [11] A. Entezami, H. Shariatmadar, and A. Karamodin, "Data-driven damage diagnosis under environmental and operational variability by novel statistical pattern recognition methods," *Structural Health Monitoring* 18, no. 5-6, 2019, 1416-1443.
- [12] F. P. Kopsaftopoulos, and S. D. Fassois, "Vibration based health monitoring for a lightweight truss structure: experimental assessment of several statistical time series methods," *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, no. 7, 2010, 1977-1997.
- [13] E. Carden, J. Brownjohn, "ARMA modelled time-series classification for structural health monitoring of civil infrastructure," *Mechanical Systems and Signal Processing* 22 (2), 2008, 295-314.
- [14] P. J. Brockwell and R. A. Davis, "Time series: Theory and methods," Springer, New York, 1991.
- [15] M. B. Priestley, "Spectral Analysis and Time Series," New York: Academic Press Limited, 1981, pp. 501-612.
- [16] D. S. Broomhead and G. P. King, "Extracting qualitative dynamics from experimental data," *Physica D*, 20, 1986, 217-236.
- [17] F. Takens, "Detecting strange attractors in turbulence," *Lecture Notes in Mathematics*, 898, 1981, 365-381.
- [18] Q. He, X. Wang, Q. Zhou, "Vibration sensor data denoising using a time-frequency manifold for machinery fault diagnosis," *Sensors*, 2014, 14, 382-402.
- [19] Y. Geng, and X. Zhao, "Optimization of Morlet wavelet scale based on energy spectrum of singular values," *J. Vib. Shock*, 2015, 34, 133-139.
- [20] B. Gunes and O. Gunes, "Vibration-based damage evaluation of a reinforced concrete frame subjected to cyclic pushover testing," *Shock and Vibration*, 2021, 1-16.





# Variation of Dynamic Elasticity Modulus with Experimentally Determined Concrete Compressive Strength

Esra TUĞRUL TUNÇ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Firat University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, esratugrul@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-9071-774X

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 24 September 2023  
Received in revised form 09  
October 2023  
Accepted 15 December 2023  
Available online 31 December 2023

### Keywords:

concrete specimens, compressive  
strength, dynamic elasticity  
modulus, concrete quality

## ABSTRACT

In reinforced concrete structures, one of the most important factors for structural safety is the quality of concrete. The first thing that comes to mind for concrete quality is the compressive strength of concrete. However, properties such as elasticity modulus are also among the properties that determine concrete quality. Since concrete is a brittle material, different methods are used to determine dynamic elasticity modulus. In practice, dynamic elasticity modulus of concrete can be identified by utilizing concrete compressive strength value. In this context; compressive strength tests were performed on a series of concretes accordingly relevant standards. Since it is difficult to determine elasticity modulus from the stress and strain relationship, the dynamic elasticity modulus values in this study was calculated using empirical formulas according to TS 500-2000, ACI 318-95 and CEB-FIP 1978 on the basis of experimental data in this study. The relationship between the calculated dynamic elasticity modulus values and concrete compressive strength was analyzed. From the study, it is concluded that as concrete compressive strength increases, dynamic elasticity modulus increases for the concrete specimens.

Doi: 10.24012/dumf.1365518

\* Corresponding author

## Introduction

In classical terms, concrete is a building material obtained by mixing sand, aggregate, cement, water and additives when necessary. When the aforementioned materials are mixed in a certain proportion, a plastic material that can take the desired shape in molds is obtained. One of most important characteristics of concrete that makes it superior to other building materials is its plastic consistency that allows it to be given the desired shape [1].

It can be said that cement and aggregate are the most important materials that constitute concrete [2]. Cement binds aggregate grains by entering into a chemical reaction with water. Aggregate constitutes approximately 75% of concrete [3]. Depending on the grain size, aggregate is named as coarse and fine. The most important point to be considered in aggregates is that they should be free from harmful substances. In addition, the aggregate must also meet other criteria stipulated by the standards [4,5].

Concrete is produced by adding cement, aggregate and water, as well as some additives when necessary. Additives can increase the workability and durability of concrete. It also plays an important role in hardening time. Thermal expansion and permeability can also be controlled with additives [6].

The properties of concrete are divided into fresh and hardened properties. Fresh concrete should be easy to mix, transport, place, compact and smooth the surface. During these processes, there should be no segregation between aggregates and cement mortar. Hardened concrete should not show a strength less than the minimum strength for any age such as 7, 14 and 28 days targeted by the standards [7]. The main criterion for defining concrete, in other words, for its classification, is its compressive strength value. It is known that the other concrete properties with high compressive strength are also positively affected [8,9].

Concrete compressive strength is characterized as concrete strength under axial compressive load in order not to break [10]. Among the mechanical properties of concrete, compressive strength is the most important [11,12]. In this regard, it can be said that compressive strength is a function of composition for a given state of the composition. In addition, it is important to remember that concrete compressive strength is a function of time and that it gains its final strength after a long time [13]. The properties of the constituent materials and mixing ratios affect concrete compressive strength. Therefore, it is essential to know the characteristics of the constituent materials [14].

In Şengül's (2000) study, it is stated that while there is a difference of four times between the compressive strengths

of the highest and lowest concrete classes, the difference between the elasticity modulus is not even two times. This indicates that the elasticity modulus is not as sensitive as the compressive strength to changes in the internal structure caused by a decrease in the water-cement ratio [15]. Türkel (2002) reported that the elasticity modulus increases with decreasing water cement ratio in concretes [16]. Felekoğlu and Türkel (2004) stated in their study that samples of the same strength class show different stress-strain behavior with the change in loading rate, in parallel with this, the elasticity modulus is also affected by the loading rate and the elasticity modulus increases as the loading rate increases [17].

The purpose of present study is to investigate experimentally and statistically the relationship between concrete compressive strength and concrete dynamic elasticity modulus. To this end, the compressive strength of a series of concrete specimens was determined experimentally. Then, it was compared with the dynamic elasticity modulus values calculated in accordance with international regulations. As it is known, the dynamic elasticity modulus is characterized as the ratio of stress to deformation in the region where Hooke's law is valid. As can be seen from this definition, dynamic elasticity modulus is a concept related to compressive strength. However, in addition to the known definitions and concepts, the relationship between concrete compressive strength and concrete dynamic elasticity modulus was analyzed based on the experiments and the findings of these experiments, and it was aimed to calculate concrete dynamic elasticity modulus using concrete compressive strength by different methods.

## Materials and method

In the present study, limestone aggregate from Elazığ in Turkey was used for the production of concrete specimens (Figure 1). The granulometry curve for the aggregate mixture to be used in the calculation of concrete mix design according to TS 802 [18] for aggregate mixtures with the largest grain diameter of 31.5 mm is shown in Figure 2. With the curve graph of the mixture falling in the A-B region, maximum capacity was achieved.

CEM I 42.5 N Portland cement produced in Elazığ Cement Factory was used in the experimental studies. The present study was carried out at Fırat University, Engineering Faculty, Building Materials Laboratory (Figure 3).



Figure 1. A view of the laboratory of limestone aggregates.

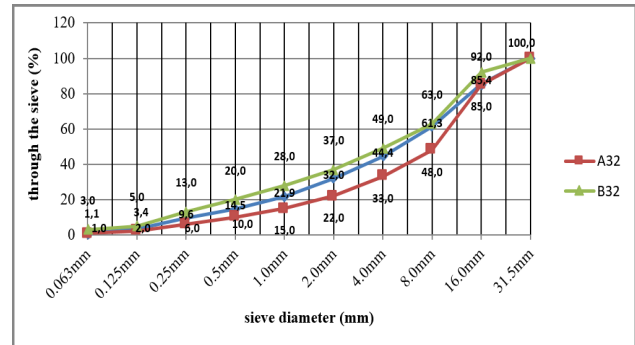


Figure 2. Granulometry of the mixture aggregate prepared according to TS 802.



Figure 3. Fırat University Faculty of Engineering Building Materials Laboratory.

## Concrete compressive strength test

The specimens removed from the curing pool at the end of the 28th day. Concrete compressive strength tests were performed on 150×150×150 mm sized concrete cubic specimens with dry surface according to TS EN 12390-3 standard [19]. The same compressive strength apparatus with constant loading rate was used for the crushing of the concrete specimens obtained (Figure 4).

According to TS EN 12390-3 standard, P (kN) fracture loads and  $f_c$  (N/mm<sup>2</sup>) compressive strengths obtained by dividing the load by the cross-sectional area A (mm<sup>2</sup>) were calculated using Equation (1).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$



Figure 4. Concrete compressive strength test.

### Dynamic elasticity modulus

Since the stress-strain curve ( $\sigma - \epsilon$ ) of concrete, a brittle composite material, does not contain a line, two types of elasticity modulus are defined. One of them is the static elasticity modulus and the other is the dynamic elasticity modulus. If the stress applied to the concrete is much smaller than the compressive strength, these two moduli are close to each other [20,21]. Since it is difficult to determine the elasticity modulus from the  $\sigma - \epsilon$  relationship, concrete dynamic elasticity modulus of the specimens manufactured in the present study was calculated using empirical formulas according to TS 500-2000 - ACI 318-95 and CEB-FIP 1978 [22-24] based on the experimental data in this study (Equation 2-4).

$E_c$  for TS 500;

$$E_c = 3250 \times \sqrt{f_c} + 14000 \quad (2)$$

$E_c$  for ACI 318-95;

$$E_c = 4730 \times \sqrt{f_c} \quad (3)$$

$E_c$  for CEB-FIP;

$$E_c = 9500 \times (f_c + 8)^{1/3} \quad (4)$$

In Equation (2-4);  $f_c$  = 28-day compressive strength (GPa) and  $E_c$  = dynamic elasticity modulus (GPa).

### Results and discussion

Within the scope of the present study, the compressive strengths of a total series of concrete specimens produced for different cement dosages (300, 350 and 400 kg/m<sup>3</sup>) using limestone aggregate were determined. Using these experimental compressive strength values, the dynamic

elasticity modulus was calculated accordingly relevant regulations TS 500-2000, ACI 318-95 and CEB-FIP 1978. The relevant data used and obtained in the present study are presented in Table 1.

Cement content (kg/m <sup>3</sup> )	w/c (-)	$f_c$ (MPa)	$E_c$ (GPa)		
			TS 500	ACI 318-95	CEB-FIP
300	0.25	26.9	30.86	24.53	31.05
300	0.25	24.2	29.99	23.27	30.22
300	0.25	27.3	30.98	24.71	31.16
300	0.30	22.4	29.38	22.39	29.65
300	0.30	23.8	29.86	23.08	30.10
300	0.30	22.9	29.55	22.63	29.81
350	0.25	34.3	33.03	27.70	33.10
350	0.25	32.1	32.41	26.80	32.52
350	0.25	31.3	32.18	26.46	32.30
350	0.30	30.8	32.04	26.25	32.16
350	0.30	29.1	31.53	25.52	31.68
350	0.30	30.2	31.86	25.99	31.99
400	0.25	41.6	34.96	30.51	34.90
400	0.25	38.1	34.06	29.20	34.06
400	0.25	42.8	35.26	30.94	35.18
400	0.30	37.1	33.80	28.81	33.82
400	0.30	34.3	33.03	27.70	33.10
400	0.30	35.5	33.36	28.18	33.41

Figure 5 shows the change of compressive strength of concrete specimens tested in the present study with water cement ratio. Accordingly, it was determined that the compressive strength decreased by approximately 10% on average as the water cement ratio increased from 0.25 to 0.30. For  $C=300$  kg/m<sup>3</sup> and  $w/c=0.25$ , the average compressive strength of concrete was 26.1 MPa; for  $C=300$  kg/m<sup>3</sup> and  $w/c=0.30$ , the average compressive strength of concrete was 23.0 MPa. The average compressive strength of concrete for  $C=350$  kg/m<sup>3</sup> and  $w/c=0.25$  was 32.6 MPa; the average compressive strength of concrete for  $C=350$  kg/m<sup>3</sup> and  $w/c=0.30$  was 30.0 MPa. The average compressive strength of concrete for  $C=400$  kg/m<sup>3</sup> and  $w/c=0.25$  was 40.8 MPa; the average compressive strength of concrete for  $C=400$  kg/m<sup>3</sup> and  $w/c=0.30$  was 35.6 MPa. With the increase in the  $w/c$  ratio from 0.25 to 0.30; an average decrease of approximately 12% for  $C=300$  kg/m<sup>3</sup>, an average decrease of approximately 8% for  $C=350$  kg/m<sup>3</sup> and an average decrease of approximately 13% for  $C=400$  kg/m<sup>3</sup> was determined in concrete compressive strengths.

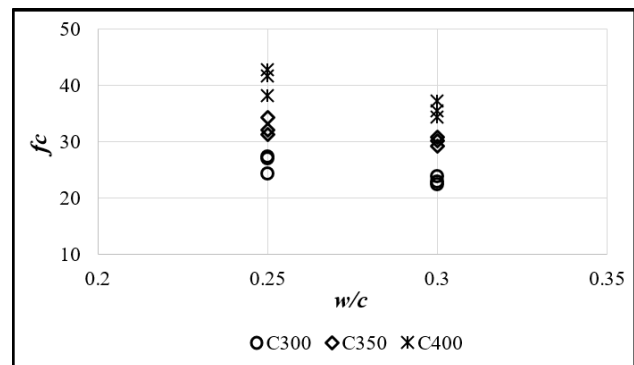


Figure 5. Variation of concrete compressive strength with water-cement ratio

In Figure 6, the variation of dynamic elasticity modulus ( $E_c$ ) with water-cement ratio ( $w/c$ ). Accordingly, it is calculated that when  $w/c$  increases from 0.25 to 0.30,  $E_c$  value decreases approximately 3.2% for TS500, 5.6% for ACI 318-95 and 3% for CEB-FIP. Considering all three regulations, it was determined that  $E_c$  value decreased with the increase in the  $w/c$ .

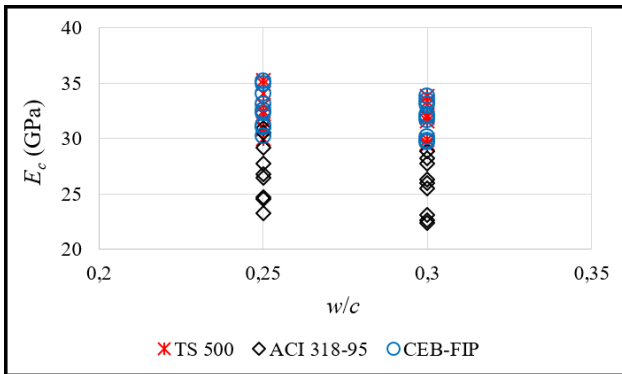


Figure 6. Variation of dynamic elasticity modulus of concrete with water-cement ratio

In Figure 7, it is observed that the dynamic elasticity modulus values, calculated in accordance with the calculations and rules in TS500 (2000) regulation, vary between 29.38 GPa and 35.26 GPa for concrete compressive strength values ranging between 22.4 and 42.8 MPa. Thus, it is seen that there is an increase of approximately 20% in the dynamic elasticity modulus values in response to approximately 91% increase in concrete compressive strength.

In Figure 8, it is observed that the dynamic elasticity modulus values calculated in accordance with the calculations and rules in the ACI 318 (1995) regulation vary between 22.39 GPa and 30.94 GPa for concrete compressive strength values ranging between 22.4 and 42.8 MPa. Thus, it is seen that there is an increase of approximately 38% in the dynamic elasticity modulus values against approximately 91% increase in concrete compressive strength.

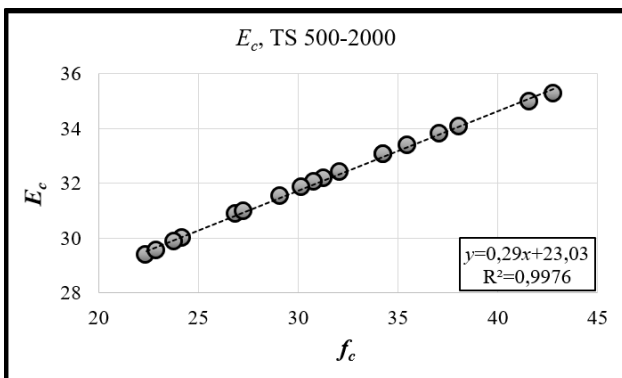


Figure 7. Variation of dynamic elasticity modulus calculated from TS 500-2000 with compressive strength.

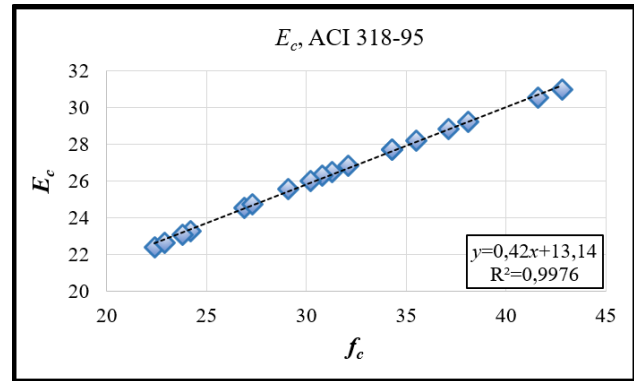


Figure 8. Variation of dynamic elasticity modulus calculated from ACI 318-95 with compressive strength.

In Figure 9, it is observed that the dynamic elasticity modulus values calculated in accordance with the calculations and rules in the CEB-FIP (1978) regulations range between 29.65 GPa and 35.18 GPa for concrete compressive strength values ranging between 22.4 and 42.8 MPa. Thus, it is seen that there is an increase of approximately 19% in the dynamic elasticity modulus values against approximately 91% increase in concrete compressive strength.

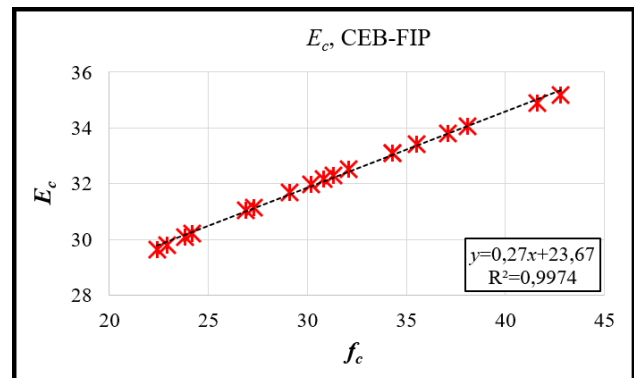


Figure 9. Variation of dynamic elasticity modulus calculated from CEB-FIP with compressive strength.

The fact that the coefficients of determination  $R^2 \approx 0.998$ , i.e. very close to 1, shows that the curves fitted in the graphs are close to the line of perfection. Thus, it can be said that a very good fit has been achieved.

Figure 10 shows that the dynamic elasticity modulus ( $E_c$ ) values calculated by TS500 (2000) and CEB-FIP (1978) almost coincide with each other. However, the  $E_c$  values calculated by ACI 318 (1995) were found to be approximately 18% lower on average. It was observed that the dynamic elasticity modulus increased with increasing concrete compressive strength. It was determined that the rate of increase in concrete compressive strength was higher than the rate of increase in dynamic elasticity modulus.



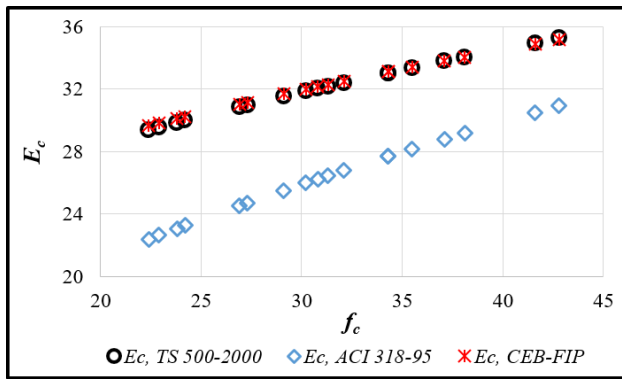


Figure 10. Variation of calculated dynamic elasticity modulus values with compressive strength values.

## Conclusions

The main conclusions are listed below:

- ✓ As the water cement ratio increased from 0.25 to 0.30, the compressive strength of concrete decreased by approximately 12% for  $C=300 \text{ kg/m}^3$ , 8% for  $C=350 \text{ kg/m}^3$  and 13% for  $C=400 \text{ kg/m}^3$ .
- ✓ The mean compressive strength of concrete for  $C=300 \text{ kg/m}^3$  and  $w/c=0.25$  was 26.1 MPa; the mean compressive strength of concrete for  $C=300 \text{ kg/m}^3$  and  $w/c=0.30$  was 23.0 MPa.
- ✓ The mean compressive strength of concrete for  $C=350 \text{ kg/m}^3$  and  $w/c=0.25$  was 32.6 MPa; the mean compressive strength of concrete for  $C=350 \text{ kg/m}^3$  and  $w/c=0.30$  was 30.0 MPa.
- ✓ The mean compressive strength of concrete for  $C=400 \text{ kg/m}^3$  and  $w/c=0.25$  was 40.8 MPa; the mean compressive strength of concrete for  $C=400 \text{ kg/m}^3$  and  $w/c=0.30$  was 35.6 MPa.
- ✓ It is seen that there is about 91% increase in the compressive strength of concrete, about 20% increase in the dynamic elasticity modulus ( $E_c$ ) values calculated according to TS500 (2000), about 38% increase in  $E_c$  values calculated according to ACI 318 (1995) and about 19% increase in  $E_c$  values calculated according to CEB-FIP (1978).
- ✓ It is seen that the dynamic elasticity modulus ( $E_c$ ) values calculated by TS 500 (2000) and CEB-FIP (1978) almost coincide with each other.
- ✓ The  $E_c$  values calculated with ACI 318 (1995) are approximately 18% lower than the  $E_c$  values calculated with other regulations.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

## Authors' Contributions

Tuğrul Tunç E: Study conception and design, visualization, analysis, and interpretation of data, drafting of manuscript

## References

- [1] Ersoy U, "Reinforced Concrete Basic Principles and Bearing Strength Calculation" Volume-1 Evrim Publishing House, 643 pp, 1985, Ankara (in Turkish).
- [2] Tuğrul Tunç, E, "Strength properties of hardened concrete produced with natural aggregates for different water/cement ratios" Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (14), 2018a, 280-287.
- [3] Tuğrul Tunç, E, "Effects of basalt aggregates on concrete properties" Qualitative Studies, 13(2), 2018b, 68-79.
- [4] Özden, A. V, "A Research on the Relationship Between Compressive and Tensile Strength of Concrete with Modulus of Elasticity" Master's thesis, Namık Kemal University, 2010 (in Turkish).
- [5] Tuğrul Tunç, E, "An experimental investigation on the abrasion strength of aggregate: Elazığ province calcareous aggregate" Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, 8(2), 2018c, 75-80.
- [6] Tuğrul Tunç, E, "An Experimental Study Based on the Strength Properties of Concrete Containing Chemical Admixture" European Journal of Science and Technology, (17), 2019, 901-908.
- [7] Shah, H. A., Yuan, Q., & Zuo, S, "Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete-a review" Construction and Building Materials, 274, 2021, 121835.
- [8] Mata, R., Ruiz, R. O., & Nuñez, E, "Correlation between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse velocity: A case of study and a new correlation method" Construction and Building Materials, 369, 2023, 130569.
- [9] Ince, R., & Çetin, S. Y, "Effect of grading type of aggregate on fracture parameters of concrete" Magazine of Concrete Research, 71(16), 2019, 860-868.
- [10] Tang, Y., Xiao, J., Zhang, H., Duan, Z., Xia, B, "Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete" Construction and Building Materials, 323, 2022, 126546.
- [11] Shangguan, M., Xie, Y., Xu, S., Gao, C., Long, G., Wang, F., & Liu, M, "Mechanical properties characteristics of high strength concrete exposed to low vacuum environment" Journal of Building Engineering, 63, 2023, 105438.

- [12] Wei, C., Sun, X., Yu, Z., & Zhang, P, “*Experimental study and mechanism analysis on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete*” *Structural Concrete*, 24(3), 2023, 4199-4226.
- [13] Mardani-Aghabaglou, A., Karakuzu, K., Kobya, V., & Hatungimana, D, “*Durability performance and dimensional stability of road concrete containing dry-shake surface hardener admixture*” *Construction and Building Materials*, 274, 2021, 121789.
- [14] Görgün, H., Kaya, D., Öncü, M. E., & Çetin, S. Y, “*On performance-based seismic assessment method for medium-rise RC buildings*” *Gravevinar*, 71(08.), 2019, 663-672.
- [15] Şengül Ö, “*The Influence of Aggregate Type on the Mechanical Behaviour of Normal and High Strength Concrete*” Master’s Thesis, Istanbul Technical University, 2000, İstanbul (in Turkish).
- [16] Türkel B, “*The Relation Between Compressive Strength and Modulus of Elasticity in Concrete*” Master’s Thesis, Istanbul Technical University, 2002, İstanbul (in Turkish).
- [17] Felekoğlu, B., & Türkel, S, “*The Effect of Loading Rate on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Concrete*” *Dokuz Eylul University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 6(1), 2004, 65-75 (in Turkish).
- [18] TS 802, “*Calculation principles of concrete mix design*” Turkish Standards Institute, 2016, Ankara.
- [19] TS EN 12390-3, “*Concrete-Hardened Concrete Tests-Part 3: Determination of Compressive Strength in Test Specimens*” Turkish Standards Institute, 2003, Ankara.
- [20] Neville, A. M, “*Properties of Concrete*” Jhon Wiley and Sons.inc. Fourth edition, 800p., 1994, New York.
- [21] Aitcin, P. C, “*High-Performance Concrete*” E and FN SPON, 650p., 1998, London and Newyork. doi: 10.4324/9780203475034.
- [22] T. S., “*Design and Construction Rules of Reinforced Concrete Structures*” (TS 500-2000), Turkish Standards Institute, Ankara,2000.
- [23] ACI Committee 318, “*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (318R-95)*,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995, 369 pp.
- [24] Du Beton, C. E. I., & de la Précontrainte, F, CEB-FIP model code for concrete structures. CEB Bulletin, 1978, (124/125).