

TÜRK MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA VE EĞİTİMİ DERGİSİ

2025 - Cilt: 4 Sayı: 1

ISSN: 2822-3454
E-ISSN: 2980-213X

Turkish Journal of Engineering
Research and Education

2025 - Vol: 4 No: 1

Bu dergi Türk Eğitim-Sen tarafından yayınlanmaktadır.

This journal is published by Türk Eğitim-Sen.



İmtiyaz Sahibi/ Owner	Talip GEYLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKANI
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü /Director	Cengiz KOCAKAPLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKAN YARDIMCISI
Yazışma Adresi / Correspondence Address	Erzurum Mahallesi Talatpaşa Bulvarı No:160 Kat:6 Cebeci/ANKARA
İnternet Adresi / Web Address	https://www.tmaed.org
Yayın Türü /Publication Type	Sürelî / Periodical Yılda iki sayı yayımlanır: Mayıs, Kasım Published two issues per year: May, November
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Murat Erhan BALCI – Balıkesir Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Nuray GEDİK – Balıkesir Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Ali Hakan IŞIK – Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Prof. Dr. Baybars Ali FİL- Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. İlker TEKİN - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU - İstanbul Ticaret Üniversitesi Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Osman KOLA - Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Prof. Dr. Şenol GÜRSOY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ – Düzce Üniversitesi Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ - Karadeniz Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Mustafa Selman AYDOĞAN - Balıkesir Üniversitesi Doç. Dr. Nihat DÖNGEL- Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Osman ÖZKARACA - Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Doç. Dr. Tuba GÖZEL - Gebze Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN -Gebze Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Tülay Çivici – Balıkesir Üniversitesi
Editör Kurulu / Editorial Board	Prof. Dr. Abid ABU-TAIR - British University in Dubai Prof. Dr. Adil EL-KORDI - Beirut Arab University Prof. Dr. Ahmed F. ZOBAA-Brunel University Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Ali Fuat BOZ – Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Behnam MOHAMMADI-IVATLOO - University of Tabriz Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU– Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Çetin ELMAS - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Engin Cemal Mengüç – Kayseri Üniversitesi Prof. Dr. F. P. Garcia MARQUEZ - University of Castilla-La Mancha Prof. Dr. Feray KÖÇKAR - Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN – İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. İgbal BABAYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. İsmail ŞAHİN - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Jamal KHATIB - Beirut Arab University Prof. Dr. John KINUTHIA - University of South Wales Prof. Dr. Maksud BOBOJANOV - Tashkent State Technical University Prof. Dr. Mehmet Fatih IŞIK – Hitit Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa GÜNAY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Mürsel ERDAL - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Nurali YUSUFBEYLİ - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Ömer EYERCİOĞLU - Gaziantep Üniversitesi Prof. Dr. Recep BİRGÜL – Carroll College Prof. Dr. Sergey BUSHİYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Seyhan FIRAT - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Tuncay YİĞİT – Süleyman Demirel Üniversitesi Prof. Dr. Vilayet VELİYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Yakup KAYA- Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Z. ABDUL-MALEK - Universiti Teknologi Malaysia Doç. Dr. Adem TEKEREK - Gazi Üniversitesi Assoc. Prof. Dr. S. H. E. Abdel ALEEM- Valley High Institute of Eng. and Tech. Doç. Dr. Zeynep HASIRCI TUĞCU - Karadeniz Teknik Üniversitesi Dr. Abbas RABİEE - University of Zanjan Dr. Ali AHMADIAN - University of Bonab Dr. Amin Mohammadpour SHOTORBANI - University of British Columbia Dr. D. R. ALMALYK - The Islam Karimov Tashkent State Technical University Dr. Öğr. Üyesi Fehmi ÇİVİCİ -Balıkesir Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA – Gazi Üniversitesi Dr. Morteza Zare OSKOEI - Qatar University Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Dr. Mehmet Serkan YILDIRIM – Gazi Üniversitesi

Editor Kurulu / Editorial Board	Dr. Pouya IFAEİ - Kyung Hee University Dr. Saeed PEYGHAMI - Aalborg University Dr. Vahid VAHIDINASAB - Nottingham Trent University
---------------------------------	--

Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Öğr. Gör. Dr. Oktay KARAKAYA – Balıkesir Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Şevket CANTÜRK – Balıkesir Üniversitesi Dr. Erva PARILDI – Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Dil Editörleri / Language Editors	Türkçe: Doç. Dr. Ünsal Yılmaz YEŞİLDAL-Akdeniz Üniversitesi İngilizce: Doç. Dr. Erkan YÜCE – Aksaray Üniversitesi
Teknik Editörler / Technical Editors	Dr. Öğr. Üyesi Mert Bekir ATSEVER -Milli Savunma Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Öğr. Gör. Mehmet GÜLSÜN – Gazi Üniversitesi

Bu Sayının Hakemleri/ Reviewers for the Current Issue	Prof. Dr. Baki ÖZTÜRK – Hacettepe Üniversitesi Prof. Dr. Gülgün YILMAZ – Eskişehir Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU – İstanbul Ticaret Üniversitesi Prof. Dr. Mürsel ERDAL - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Seyhan FIRAT - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Kemal SAPLIOĞLU – Süleyman Demirel Üniversitesi Doç. Dr. Latif Onur UÇUR – Düzce Üniversitesi Doç. Dr. Nuray GEDİK – Balıkesir Üniversitesi Doç. Dr. Serdar BİROĞUL – Düzce Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Hasan Selim ŞENGEL – Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Melek AKGÜL – Munzur Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Mert Bekir ATSEVER – Milli Savunma Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt ERSOY – Süleyman Demirel Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI – Düzce Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Ramazan ACAR – Munzur Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Şevki EREN – Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Tolga YILMAZ – Konya Teknik Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN – Gazi Üniversitesi Araş. Gör. Yük. Müh. Yunus Emre KEBELİ – Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
--	--

HAKKINDA

Türk Eğitim-Sen'in bilimsel yayın organı olan Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, mühendislik alanında hazırlanan güncel, özgün ve nitelikli çalışmaları yayımlayan uluslararası hakemli bilimsel bir dergidir. Bu dergi, ilk sayısı 15 Haziran 2014 tarihinde yayımlanan "21. Yüzyılda Fen ve Teknik" dergisinin bölünmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, Mayıs ve Kasım aylarında yılda iki sayı olarak yayımlanmaktadır. Açık erişim bir dergidir ve makaleler için herhangi bir değerlendirme ve başvuru ücreti talep etmez.

ABOUT

Turkish Journal of Engineering Research and Education, the scientific publication of Türk Eğitim-Sen, is an international peer-reviewed scientific journal that publishes current, original and qualified studies in the field of engineering. This journal emerged as a result of the division of the "Science and Technology in 21st Century" journal, the first issue of which was published on June 15, 2014. Turkish Journal of Engineering Research and Education is published twice a year, in May and November. It is an open access journal and does not charge any evaluation and submission fee for manuscripts.

AMAÇ ve KAPSAM

Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitim Dergisi, mühendislik alanında güncel, özgün ve nitelikli çalışmaları yayımlayarak, mühendislik öğrencilerinin eğitimlerini ve mühendislerin yaşam boyu mesleki gelişimlerini desteklemeyi, ayrıca mühendislik alan yazınına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu dergi, tüm mühendislik disiplinlerinden özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler ve editöre mektupları yayımlamak üzere kabul eder.

AIMS and SCOPE

Turkish Journal of Engineering Research and Education aims to support the education of engineering students and the lifelong professional development of engineers, and also to contribute to the engineering literature, by publishing current, original and qualified studies in the field of engineering. This journal welcomes original research articles, reviews, short articles and letters to editor from all engineering disciplines for publication.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

Jeomanyetik Olayların Senkron Generatörlerin Termal Kapasitesi ve Performansı Üzerindeki Etkilerinin Analizi <i>Analysis of the Effects of Geomagnetic Events on the Thermal Capacity and Performance of Synchronous Generators</i> Şevket Cantürk, Oktay Karakaya	1
Türk Yapı Denetim Sisteminde Denetçinin Rolü ve Almanya'daki Uygulama ile Karşılaştırılması <i>The Role of the Inspector in the Turkish Building Inspection System and Comparison with the Practice in Germany</i> İbrahim Elveren, Mürsel Erdal	14
Pandemi Süreçlerinin İnşaat Sektöründeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Covid-19 Örneği <i>Evaluation of the Impact of Pandemic Processes on the Construction Industry: Covid-19 Example</i> Fehmi Çivici, Ümmügülsüm Kılıç	25
Sosyal Örümcek Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Düzlem Çelik Çerçevelerin Optimum Boyutlandırılması <i>Optimum Design of Plane Steel Frame Using the Social Spider Optimization Algorithm</i> Perihan Efe, Metin Yetkin	32
Perde Duvar ile Güçlendirmede Ankraj Çapı ve Lokasyonunun Betonarme Çerçevenin Performansına Etkileri <i>Effects of Anchor Diameter and Location on the Performance of Reinforced Concrete Frame in Reinforcement with Shear Wall</i> Orkun Çelik, Orhan Doğan	45
Riskli Yapı Tespitinde AURAP Yöntemi ile P25 Yönteminin Karşılaştırılması: Düzce İli Örneği <i>Comparison of AURAP Method and P25 Method in Risky Structure Detection: Example of Düzce Province</i> Serdar Sert, Hüseyin Bayraktar	60
Makine Öğrenmesi Tabanlı Hematolojik Bozukluk Tespiti <i>Machine Learning Based Hematologic Disorder Detection</i> Öznur Suçeken, Tuğçe Güzle	70
Derin Kazılarda 2B ve 3B Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması <i>Investigation of 2D and 3D Analysis of Deep Excavation by Finite Element Method</i> Göksu Tunç, Seyhan Fırat	82

**Deprem Kaynaklı Şev Kayması: 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri Sırasında
Adıyaman Gölbaşı Gölü Örneği**

*Seismically Induced Landslide: The Case of Golbasi Lake in Adiyaman During the February 6th
Kahramanmaraş Earthquakes*

92

Nazmi Cenik, Seyhan Fırat, Nihat Sinan Işık

**İzmit Körfezi Güncel Ekstrem Dalga İklimi Analizi ve Yakın Kıyı Dalga
Transformasyonu Modellemesi**

*İzmit Bay Recent Extreme Wave Climate Analysis and Nearshore Wave Transformation
Modelling*

102

Yavuz Selim Güçlü, Selman Baysal, Veysel Şadan Özgür Kırca

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Jeomanyetik Olayların Senkron Generatörlerin Termal Kapasitesi ve Performansı Üzerindeki Etkilerinin Analizi

Analysis of the Effects of Geomagnetic Events on the Thermal Capacity and Performance of Synchronous Generators

Şevket Cantürk^{1,*}, Oktay Karakaya²

¹ Balıkesir Üniversitesi, Sındırgı Meslek Yüksek Okulu, Sındırgı, Balıkesir, Türkiye.

² Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksek Okulu, Bigadiç, Balıkesir, Türkiye.

Geliş / Received: 11.12.2024

Kabul / Accepted: 17.12.2024

*Sorumlu Yazar: Şevket Cantürk scanturk@balikesir.edu.tr

ÖZ: Bu çalışmada, jeomanyetik fırtınalar sonucunda enerji iletim sistemlerinde oluşan jeomanyetik indüklenen akımların (JİA), senkron generatörlerin performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan test sistemiyle farklı topraklama direnci ve JİA seviyeleri altında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden, JİA'ların generatör yükseltme transformatörlerinde (GYT'lerinde) doyuma neden olarak mıknatıslanma akımlarının harmonik bileşenlerinde ve reaktif güç talebinde artışa yol açtığı görülmüştür. Bu durumun, senkron generatör rotorlarında aşırı ısınma, alan sargılarında izolasyon bozulması, kayıp artışı gibi termal ve yapısal sorunlara sebep olabileceği ifade edilebilir. Bununla birlikte, düşük topraklama direncinin harmonik bozulmaları ve reaktif güç talebini artırdığı, yüksek topraklama direncinin ise bu etkileri sınırladığı anlaşılmıştır. Ayrıca, zaman gereksinimi olan detaylı simülasyonların yerine Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller ile JİA etkilerinin hızlı, güvenilir ve yüksek doğrulukla öngörülebileceği ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar, eşdeğer negatif sıra akımı (I_{2eq}), toplam harmonik bozulma (THDI_G) ve reaktif güç talebi (Q_1) gibi temel performans parametrelerinin, JİA seviyesi ve topraklama direnci ile olan ilişkilerinin istatistiksel olarak anlamlı biçimde modellenbildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeomanyetik indüklenen akımlar, senkron generatörler, generatör yükseltme transformatörleri, termal kapasite, yanıt yüzeyi yöntemi

ABSTRACT: In this study, the effects of geomagnetically induced currents (GICs), which occur in power transmission systems as a result of geomagnetic storms, on the performance parameters of synchronous generators were investigated. Parametric analyses were carried out under different grounding resistance values and GIC levels using a test system developed in the MATLAB/Simulink environment. The analyses revealed that GICs cause magnetic saturation in generator step-up transformers (GSUs), leading to increased harmonic components of magnetizing currents and elevated reactive power demand. This condition may result in thermal and structural issues such as rotor overheating, insulation degradation in field windings, and increased losses in synchronous generators. Furthermore, it was observed that low grounding resistance significantly amplifies harmonic distortion and reactive power demand, whereas higher resistance values help mitigate these effects. Additionally, instead of time-consuming detailed simulations, mathematical models were developed using the Response Surface Methodology (RSM) to enable fast, reliable, and highly accurate predictions of GIC impacts. The results demonstrated that key performance parameters such as equivalent negative sequence current (I_{2eq}), total harmonic distortion of generator current (THDI_G), and reactive power demand (Q_1) can be statistically modeled with respect to GIC levels and grounding resistance.

Keywords: Geomagnetically induced currents, synchronous generators, generator step-up transformers, thermal capacity, response surface methodology

1. GİRİŞ

Güneş'te meydana gelen şiddetli patlamalar, Dünya'nın jeomanyetik alanında bozulmalara yol açarak güneş fırtınalarına neden olabilir [1, 2]. Bu bozulmalar, enerji nakil hatlarında pratikte doğru akım (DA) kabul edilebilecek kadar düşük frekanslı (0.001 ila 0.1 Hz arasında) gerilimlerin indüklenmesine yol açar [3-4]. Söz konusu gerilimler, iletim hattı tarafındaki transformatörlerin yıldız noktalarının topraklanması durumunda [3, 5], jeomanyetik olarak indüklenen akımlar (JİA) olarak adlandırılan yaklaşık doğru akımların akışına sebep olur [6, 7]. Literatürde yapılan çalışmalar [8-11], JİA etkisi altındaki transformatörlerin, doğru akımın yönüne bağlı olarak pozitif veya negatif alternansta doyumuna girdiklerini göstermektedir. Bu durum, transformatörlerin aşırı uyartım akımları çekmesine, reaktif güç taleplerinin artmasına ve kayıpların yükselmesine neden olmaktadır.

Benzer şekilde, senkron generatörler de JİA'ların olumsuz etkilerine maruz kalmaktadır [12-17]. Üçgen-yıldız bağlı generatör yükseltme transformatörleri (GYT) üzerinden şebekeye bağlanan bu generatörlerde, JİA'ların GYT üzerinde doyumuna neden olması reaktif güç talebini artırmakta ve harmonik bozulmalara yol açmaktadır [12-15]. GYT'nin üçgen bağlı alçak gerilim sargıları sıfır sıra akımlarını engellese de pozitif ve negatif sıra akımları stator sargılarında akmaya devam etmektedir [12, 13]. Bu durum, rotor yüzeyinde girdap akımları oluşması, aşırı ısınma, alan sargılarında yalıtım bozulması ve mekanik hasarlara yol açmaktadır [13, 14]. Ayrıca, artan reaktif güç talebi generatörün reaktif güç üretim sınırına ulaşmasına ve sistem gerilimini düzenleme kapasitesinin azalmasına neden olabilmektedir [14, 16].

JİA'ların doğru akıma (DA) çok yakın yapısı nedeniyle güç şebekelerinde JİA modellemesi üç parametreye dayanır: (i) iletim hatlarının birim uzunluktaki DC dirençleri, (ii) trafo sargılarının DC dirençleri ve (iii) trafo merkezlerinin topraklama dirençleri [18-20]. Trafo merkezi topraklama direnci genellikle kesin olarak bilinmemekle birlikte [21, 22], IEEE 81-1983 [23] ve 81.2-1991 [24] standartlarında açıklanan yöntemlerle hesaplanabilir. Bu direnç, toprak yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [21, 25, 26] ve

literatürde genellikle 0.05 ile 1.5 ohm arasında olduğu belirtilmiştir [22].

1.1 Motivasyon

Önceki bölümde bahsedildiği üzere, transformatörlerin ve senkron generatörlerin JİA etkisi altındaki performansları, güç sistemlerinin güvenilirliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. JİA'lar, GYT'lerin doyumuna ulaşmasına neden olarak senkron generatörlerde hem harmonik bozulmaların artmasına hem de termal kapasite sınırlarının aşılmasına yol açmaktadır [14, 27]. Bu etkilerin temel nedeni, GYT'lerin yüksek gerilim sargılarının doğrudan topraklanmış olmasıdır [3-5]. Bu durum, JİA'ların iletim hattı üzerinden güç sistemine kolayca akmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda, trafo merkezlerindeki topraklama direnci, JİA'ların sistem üzerindeki etkilerini belirlemede kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde, JİA'nın GYT ve senkron generatörler üzerindeki etkileri ele alınmış olsa da, özellikle topraklama direnci gibi sistem parametreleri ile JİA seviyeleri arasındaki etkileşimler kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. Bunun yanı sıra, bu tür etkilerin hızlı ve etkili bir şekilde tahmin edilmesini sağlayacak yöntemlere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu sebeple, çalışmada JİA'nın senkron generatör performansı üzerindeki etkilerinin zaman verimli bir şekilde öngörülmesini sağlamak amacıyla Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak matematiksel bir model önerilmiştir.

1.2 Özgün Değer

Bu çalışma, JİA etkilerinin senkron generatör performansı üzerindeki etkilerini anlamak için kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Çalışmada; JİA'nın GYT üzerinde manyetik doyumuna neden olduğu ve bu durumun generatörlerde harmonik bozulmaları artırarak termal kapasite sınırlarına ulaşılmasına yol açabileceği gösterilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen parametrik analizlerle, farklı topraklama direnci değerleri ve JİA seviyelerinin sistem üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak, JİA ve sistem parametreleri arasındaki karmaşık etkileşimler matematiksel modellerle ifade edilmiş ve JİA

koşullarında generatör performansının hızlı ve yüksek doğrulukla tahmin edilmesi sağlanmıştır.

1.3 Makale İçeriği

Bu makale beş bölümden oluşmaktadır. Bölümlerin içeriği kısaca şu şekilde açıklanabilir: Bölüm II’de, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan test sistemi tanıtılmış ve sistem elemanlarının modellenmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bölüm III’de, generatör yükseltme transformatörlerinin JİA koşullarındaki davranışı analiz edilmiştir. Analizler, GYT’nin manyetik doyuma girerek uyarım akımlarında ve harmonik bozulmalarda artışa neden olduğunu ortaya koymuş, bu etkilerin topraklama direncine bağlı olarak nasıl değiştiği detaylandırılmıştır. Bölüm IV’de, senkron generatörlerin performansı incelenmiştir. JİA’nın, generatör stator akımı harmonik bozulmasını artırarak rotor yüzeyinde aşırı ısınmaya neden olduğu ve termal kapasite sınırlarına ulaştığı tespit edilmiştir. Bu etkiler IEEE Standartları C50.12-2005 [28] ve C50.13-2014 [29] çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bölüm V’de, Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak matematiksel tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, JİA ve topraklama direnci seviyelerine bağlı olarak sistem davranışlarının hızlı ve doğru bir şekilde öngörülmesini sağlamıştır. Son olarak, Bölüm VI’da, çalışmanın temel bulguları özetlenmiştir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi (3Y) kullanılarak, JİA ve sistem parametreleri arasındaki karmaşık etkileşimler matematiksel modellerle ifade edilmiş ve JİA koşullarında generatör performansının hızlı ve yüksek doğrulukla tahmin edilmesi sağlanmıştır.

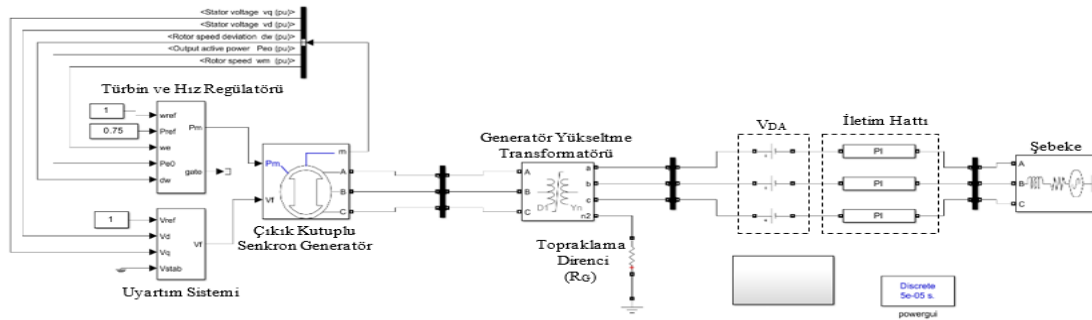
2. TEST SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASI

Analizler sırasında, Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan test sistemi Şekil 1’de sunulmuştur. Bu

test sisteminde, jeomanyetik bozulmalar nedeniyle iletim hattı üzerinde indüklenen DA gerilimlerini temsil etmek için DA gerilim kaynakları kullanılmıştır. Parametrik analizlerde, jeomanyetik bozulmalar sırasında iletim hattında kilometre başına düşen DA gerilim düşümü (VDA) değerinin 0-5 V/km arasında değiştiği ve bu aralığın [30, 31]’de rapor edilen değerlere uygun olduğu belirtilmelidir. Ayrıca, transformatör nötr noktası topraklama direnç değeri (RG) 2 Ω ’a kadar artırılmıştır.

2.1 Senkron Generatörün Modellemesi

Senkron makine bloğu, türbin ve hız regülatörü sisteminden gelen mekanik gücün işaretine bağlı olarak generatör veya motor modunda çalıştırılabilir. Eğer giriş mekanik gücü pozitifse, senkron makine generatör olarak çalışır. Eğer mekanik güç girişi negatifse, senkron makine motor olarak çalışır. Şekil 1’den görüldüğü üzere, senkron makine generatör olarak çalışmaktadır ve bu nedenle makineye pozitif bir mekanik güç sağlanması gerekmektedir. Makinenin elektriksel kısmı, [32]’de gösterilen eşdeğer devreler kullanılarak d-q eksen referans çerçevesinde analiz edilebilir. MATLAB/Simulink tarafından senkron makineyi modellemek için kullanılan eşdeğer devre, IEEE 1110 [33] tarafından önerilene benzer olduğu ifade edilmelidir. Seçilen model bloğunda, rotor tipi çıkık kutuplu (salient-pole) olarak belirlenmiş olup, parametreler menüsünde detaylı olarak sunulmuştur. Uyarım sistemi olarak ise, günümüz modern güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan IEEE Tip-1 uyarım sistemi tercih edilmiştir [34]. Bu uyarım sistemi, sürekli çalışan bir gerilim regülatörüne sahip DC komütatör uyarıcı kullanır ve doyma fonksiyonunu içermemektedir.



Şekil 1: Matlab/Simulink programında oluşturulan test sistemi.

2.2 Güç Transformatörünün Modellenmesi

Test sisteminde 3 fazlı 5 bacaklı transformatör tipi dikkate alınmıştır. MATLAB/Simulink'de üç fazlı transformatör bloğunu kullanmak için belirli parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametreler arasında güç ve gerilim seviyeleri, transformatör sargı empedansı, mıknatıslama direnci ve transformatörün mıknatıslama eğrisi (B-H eğrisi olarak da adlandırılır) bulunmaktadır. Ayrıca, transformatör bağlantı tipi üçgen/yıldız (yüksek gerilim sargıları topraklı) olarak belirlenmiştir. Seçilen transformatör model bloğunun parametreler menüsü, ekler kısmında sunulmuştur.

2.3 İletim Hattının Modellenmesi

Hat uzunluğu, bir güç sisteminde akan JİA seviyesinin belirlenmesinde önemlidir. Bu çalışmada, analiz sistemindeki enerji iletim hattı, Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan hazır bloklar kullanılarak 100 km'lik orta uzunluktan ve π eşdeğer modeli ile modellenmiştir. Tüm fazlar, dengeli bir iletim hattı oluşturacak şekilde aynı direnç ve endüktans değerleriyle modellenmiştir. Seçilen iletim hattının direnç, endüktans ve kapasitans değerleri sırasıyla 0.01273 Ω /km, 933.7 mH/km, 12.74 nF/km olarak belirlenmiştir.

3. JİA AKIŞININ GYT'YE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, 210 MVA güç değerine, 13.8/230 kV dönüşüm oranına ve üç fazlı, beş bacaklı kabuk tipi bir nüveye sahip generatör yükseltme transformatörünün JİA'lar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.1 Uyarım Akımı Harmonik Bozulması

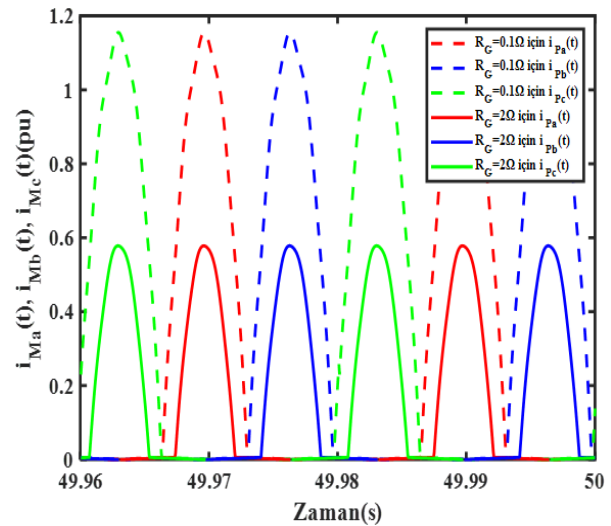
V_{DA} 'nın 5 V/km olduğu durum için GYT mıknatıslama akımlarının ($i_{Ma}(t)$, $i_{Mb}(t)$, $i_{Mc}(t)$) anlık değişimleri Şekil 2'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, uygulanan V_{DA} seviyesinin etkisiyle, transformatörün pozitif alternansta doyuma girmesi nedeniyle mıknatıslama akımlarının tepe değerlerinde belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, aynı grafikten topraklama direnci (R_G) değerindeki artışın uyarım akımları üzerindeki etkisi de açıkça gözlemlenmektedir. R_G değerinin artmasıyla uyarım akımlarının tepe değerlerinde azalma

meydana gelmiştir. R_G 'nin 0.1 Ω olduğu durumda uyarım akımlarının tepe değeri 1.18 pu olarak ölçülürken, R_G 'nin 2 Ω olması durumunda bu değerin 0.58 pu seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, topraklama direncindeki artışın, transformatörün JİA altında doyuma girmesini sınırladığı şeklinde yorumlanabilir.

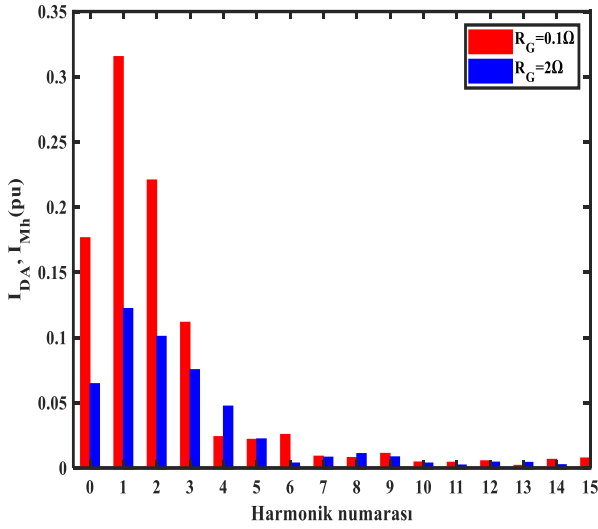
Şekil 3'de, V_{DA} 'nın 5 V/km olduğu durumda, mıknatıslama akımlarının DA ve harmonik bileşenlerinin (I_{PDA} ve I_{Mh}) farklı topraklama direnci değerlerine göre değişimleri sunulmuştur. Grafik, $R_G=0.1 \Omega$ durumunda temel bileşen ve düşük mertebeli harmonik bileşenlerin (özellikle 2. ve 3. harmonikler) oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, $R_G=2 \Omega$ durumunda harmonik genliklerinin genel olarak daha düşük olduğu görülse de, belirli harmoniklerde $R_G=2 \Omega$ 'un $R_G=0.1 \Omega$ 'a kıyasla daha yüksek değerlere sahip olduğu ifade edilebilir (örneğin, 4. ve 8. harmonikler).

3.2 Reaktif Güç Talebi Artışının Hesaplanması

Analizlerde, transformatörün alçak gerilim tarafındaki temel harmonik faz-nötür gerilimlerinin ve temel harmonik faz akımlarının etkin değerleri (V_{Pm1} ve I_{Pm1}) ile bu gerilim ve akımlar arasındaki faz farkı (θ_{Pm1}), denklem (1)'de yer alan ifadelerle göre kullanılarak transformatörün toplam reaktif güç talebi hesaplanmıştır.



Şekil 2: GYT'nin JİA koşulları altında ($V_{DA}=5$ V/km), $R_G=0.1$ ve 2 Ω için mıknatıslama akımlarının dalga şekilleri.



Şekil 3: GYT'nin JİA koşulları altında ($V_{DA}=5$ V/km), $R_G=0.1$ ve 2Ω için mıknatıslanma akımlarının harmonik bileşenleri.

$$Q_{m1} = V_{Pm1} I_{Pm1} \sin(\theta_{Pm1}) \quad m=a,b,c \quad \text{fazları} \quad (1)$$

Transformatörün toplam reaktif güç talebi ise Denklem (2) ile elde edilmiştir:

$$Q_1 = \sum_{m=a,b,c} Q_{m1} \quad (2)$$

Transformatörün alçak gerilim tarafındaki faz akımlarının, temel harmonik ve diğer harmonik bileşenler göz önünde bulundurularak hesaplanan toplam efektif değeri, (3) numaralı denklemde verilmiştir:

$$I_{Pm} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{Pm}^2 dt} \quad (3)$$

Bu denklemde yer alan $i_{Pm(t)}$, alçak gerilim sargı akımlarının anlık değerlerini temsil eder ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$i_{Pm}(t) = I_{PDA} + \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_{ph} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{ph}) \quad (4)$$

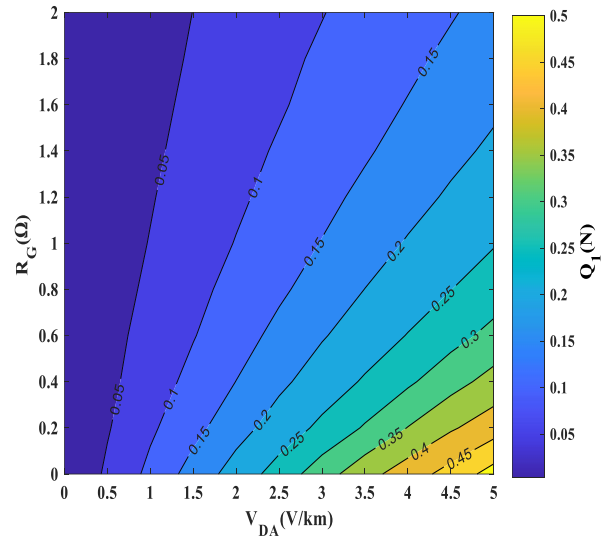
Bu denklemde, T periyot, ω_0 temel açısal frekans, h harmonik numarası, I_{DA} ve I_{ph} sırasıyla alçak gerilim sargı akımının doğru akım ve h . harmonik bileşenlerini, φ_{ph} ise alçak sargı akımının h . harmonik bileşenlerinin faz açılarını temsil eder.

Topraklama direnci (R_G) ve V_{DA} seviyesindeki değişimlerin transformatörün toplam reaktif güç talebi (Q_1) üzerindeki etkileri Şekil 4'te

gösterilmektedir. Düşük topraklama direnci durumunda, V_{DA} 'nın artışı reaktif güç talebinde belirgin bir yükselmeye neden olmaktadır. Örneğin, $V_{DA}=1$ V/km seviyesinde reaktif güç talebi yaklaşık 0.1 pu olarak hesaplanırken, $V_{DA}=5$ V/km seviyesinde bu değer 0.45 pu'ya ulaşmıştır.

Bunun aksine, yüksek topraklama direnci ($R_G=2 \Omega$) durumunda aynı V_{DA} seviyeleri için Q_1 'de önemli bir azalma gözlemlenmiştir. $V_{DA}=5$ V/km seviyesinde reaktif güç talebi yaklaşık 0.15 pu'ya düşmüş ve bu, düşük dirençli duruma kıyasla yaklaşık %66'lık bir azalmayı ifade etmektedir.

Öte yandan, topraklama direncindeki artışın düşük V_{DA} seviyelerinde reaktif güç talebine olan etkisi sınırlı kalırken, V_{DA} 'nın artışıyla birlikte bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Başka bir ifadeyle, yüksek R_G değerleri, V_{DA} 'ya bağlı olarak oluşan reaktif güç talebindeki artışı sınırlamakta ve sistemin daha kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 4: Transformör reaktif güç talebinin V_{DA} ve R_G ile değişimi.

4. JİA KOŞULLARINDA GENERATÖR TERMAL KAPASİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Senkron generatörlerde stator harmonik akımlarının artışının, rotorun aşırı ısınmasına neden olabileceği daha önce açıklanmıştır. Bu tür bir aşırı ısınma, generatörün rotor bileşenlerinde yapısal hasara yol açarak sistem performansı ve güvenilirliği açısından ciddi bir risk oluşturabilir.

Bu nedenle, harmonik akımların generatör üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, bu bölümde öncelikle JİA'ların etkisiyle stator akımında meydana gelen harmonik bozulmalar analiz edilecektir. Ardından, elde edilen sonuçlar IEEE Standartları C50.12-2005 [28] ve C50.13-2014'e [29] göre değerlendirilecek; harmonik akımların rotor ısınmasına olan etkileri detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Bu standartlar, generatörlerin belirli negatif dizilim akımlarına ve harmonik bileşenlere dayanma kapasitelerini tanımlar. Ayrıca, ekipman ömrünün korunması ve sistem güvenliğinin sağlanması açısından kritik bir rehber sunar.

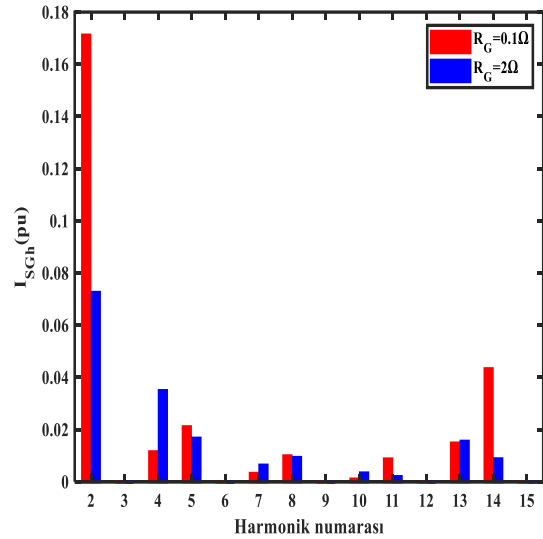
4.1 Stator Akımı Harmonik Bozulması

Farklı topraklama direnci değerleri için, V_{DA} 'nın 5 V/km olduğu durumda senkron generatörün stator sargılarındaki harmonik bileşenler Şekil 5'te sunulmuştur. Topraklama direnci $R_G=0.1 \Omega$ olduğunda, 2. ve 3. harmoniklerin oldukça yüksek genliklere ulaştığı görülmektedir. Öte yandan, $R_G=2 \Omega$ durumunda, harmonik genliklerinin genel olarak daha düşük olduğu, ancak pozitif sıra harmoniklerinin (örneğin, 4. ve 7. harmonikler) $R_G=0.1 \Omega$ durumuna kıyasla daha yüksek seviyelere ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum, topraklama direncindeki artışın tüm harmonikleri bastırmadığını, bazı harmonik bileşenlerin genliğini artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, üçgen bağlı GYT alçak gerilim sargılarının sıfır sıra akımlarını engellemesine rağmen pozitif ve negatif sıra akımlarının stator sargılarında akmaya devam ettiği anlaşılmıştır. Bu akımların rotor yüzeyinde girdap akımları oluşturarak aşırı ısınmaya yol açabileceği ifade edilebilir.

Farklı ekipman türleri üzerindeki harmonik etkilerin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi genellikle, elde edilmesi zor olan ekipman verilerini gerektirir. Bu nedenle [27]'de, farklı ekipman türleri için mümkün olduğunca basitleştirilmiş ön tarama kriterleri sunulmuştur. Bu klavuzda belirtilen eşik değerlerini aşan harmonik seviyeleri, ilgili ekipmanın aşırı yük altında çalışacağını veya arızalanacağını kesin olarak göstermese de, bu durum ekipmanın daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Bu bağlamda, [27]'de generatör stator akımındaki toplam harmonik bozulmaya (THD) dayalı olarak geliştirilen basitleştirilmiş termal ön tarama kriterleri Tablo 1'de sunulmuştur. Bu Tablo'daki eşik değerlerin aşılması durumunda rotor bileşenlerinde hasar riskinin artabileceği belirtilmiştir. Bu durumda, generatörün daha ayrıntılı bir analize tabi tutulması gerektiği vurgulanmaktadır.

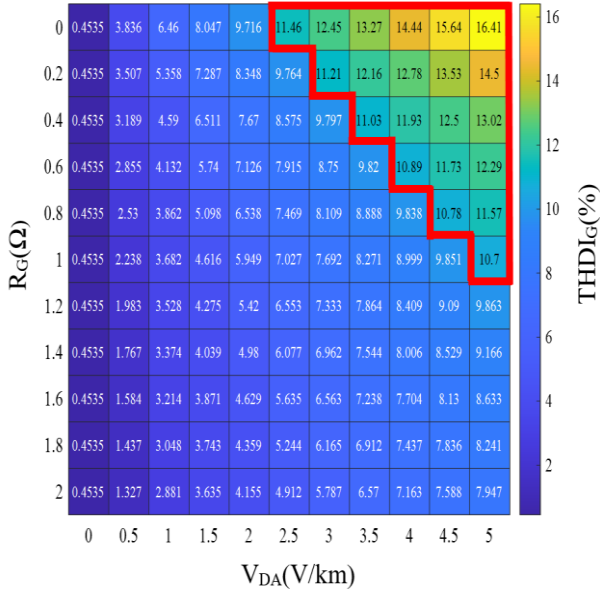
Topraklama direnci (R_G) ve jeomanyetik bozulmalar nedeniyle iletim hattı üzerinde indüklenen gerilim (V_{DA}) değişimine bağlı olarak senkron generatör stator akımının toplam harmonik bozulma (THD_I) değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Kırmızı çizgilerle işaretlenen bölgeler, THD_I değerinin %10.7 sınırını aştığı noktaları göstermektedir. Başka bir ifadeyle, düşük R_G ve yüksek V_{DA} kombinasyonlarının, generatör stator akımında harmonik bozulmayı artırarak rotorun aşırı ısınmasına, sargı izolasyonlarının bozulmasına ve diğer bileşenlerde potansiyel hasara yol açabileceği ifade edilebilir.



Şekil 5: Senkron generatörün JİA koşulları altında ($V_{DA}=5$ V/km), $R_G=0.1$ ve 2Ω için stator akımlarının harmonik bileşenleri.

Tablo 1: Senkron generatörler için basitleştirilmiş ön tarama kriterleri [27].

Generatör Gücü	Stator akımının THD'si eşik değeri
< 350 MVA	> 0.107 pu
350-1250 MVA	> 0.107-0.00447*(MVA-350)
> 1250 MVA	> 0.067pu



Şekil 6: Senkron generatör stator akımının toplam harmonik bozulma değerinin V_{DA} ve R_G 'ye bağlı değişimi.

4.2 Harmoniklerden Kaynaklanan Rotor Isınması

IEEE Std. C50.12-2005 ve C50.13-2014, senkron generatörlerin sürekli negatif dizi akımı (I_2) taşıma kapasitesini (limitlerini), makine tipi, gücü ve soğutma mekanizmasına bağlı olarak tanımlar. Bu bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Generatör tipine göre izin verilen I_2 (%) değerleri [28, 29].

Generatör Tipi	İzin verilen I_2 (%)
Çıkık kutuplu	
Amortisör sargıları bağlı	10
Amortisör sargıları bağlı	5
Silindirik rotorlu	
Dolaylı soğutmalı	10
Doğrudan soğutmalı	
• 350 MVA'ya kadar	8
• 351-1250 MVA	$8 - (MVA - 350)/300$
• 1251-1600 MVA	5
• 1600 MVA	Anlaşmaya göre

Generatörler genellikle dengesizliklere ve harmonik akımlara karşı negatif sıralı akım koruma röleleriyle korunur. Bu röleler, generatörün sıcaklığının belirlenen maksimum I^2t termal kapasite sınırlarının altında kalmasını sağlamak amacıyla, negatif sıralı akıma bağlı olarak zaman sınırlı bir şekilde çalışır. Böylece, olası termal

hasarlar önlenerek generatörün güvenli ve verimli bir şekilde çalışması sağlanır.

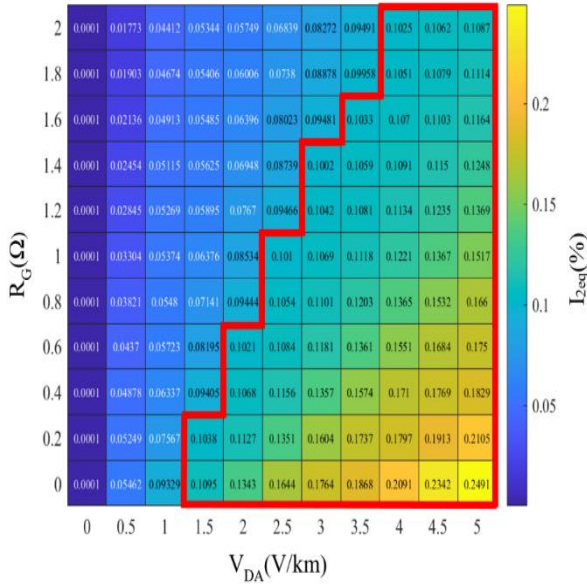
Bu standartlar, stator harmonik akımlarının rotor üzerindeki ısıtma etkilerini değerlendirmek için bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem, gerçek negatif sıra akımı ve tüm harmoniklerin oluşturduğu toplam ısınma etkisini, eşdeğer bir negatif sıra akımı ile ifade etmektedir. Bu standartlara göre, hesaplanan bu eşdeğer negatif sıra akımı, Tablo 2'de belirtilen izin verilen sınırı aşmamalıdır. Eğer eşdeğer akım, bu sınırın %25'ini geçerse, generatörün harmonik ısınmaya dayanıklılığını değerlendirmek veya tasarım aşamasında beklenen harmonikler konusunda üreticiye bilgi vermek gereklidir. Eşdeğer negatif sıra akımı (I_{2eq}), aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir [28, 29].

$$I_{2eq} = \sqrt{I_2^2 + \sum_{n=1,2,3,\dots} \sqrt{\frac{n+1}{2}} I_n^2} \quad (5)$$

Burada, $i=+1$ pozitif sıra harmonik bileşenleri için, $i=-1$ negatif sıra harmonik bileşenleri için kabul edilir. I_n , n . harmonikteki stator akımı genliğini ifade eder. n , temel bileşen ($n=1$) dahil olmak üzere önemli akım değerine sahip tüm harmonik numaralarını kapsar. I_2 , negatif sıra temel akımını ifade eder.

Denklem (5), yalnızca tek sayılı harmonikler için i endeksini tanımlamakta ve harmoniklerin her zaman klasik bir sıraya göre dağıldığını varsaymaktadır (örneğin, 5. harmonik negatif sırada, 7. harmonik pozitif sıradadır). Ancak, jeomanyetik bozucu olaylar sırasında hem çift hem de tek sayılı harmonikler önemli miktarlarda ortaya çıkabilir [12, 13]. Bu nedenle, harmonik sıralarını dikkate almak yerine i indeksinin, sıra bileşenlerine dayalı olarak tanımlanması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu yeni tanımlama, formülün hem çift hem de tek sayılı harmonikleri kapsayacak şekilde geliştirilmesini sağlayacaktır [14, 27]. Bununla birlikte, standartlarda yer alan Denklem (5), I_2 'yi negatif sıra temel akımı olarak tanımlarken, bu geliştirme yapıldığında I_2 aynı zamanda ikinci harmonik stator akımlarını ifade edebilir ve bu durum karışıklığa yol açabilir. Bu potansiyel karışıklığı önlemek adına, Denklem (6) daha açıklayıcı ve geliştirilmiş bir şekilde aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir [27]:

$$I_{2eq} = \sqrt{\sum_{n=1,2,3...} \sqrt{\frac{n+1}{2}} I_n^2} \quad (6)$$



Şekil 7: Eşdeğer negatif sıra akımı değerinin V_{DA} ve R_G 'ye bağlı değişimi.

Şekil 7, topraklama direnci (R_G) ile jeomanyetik bozulmalar sebebiyle iletim hattı üzerinde indüklenen gerilim (V_{DA}) seviyelerinin eşdeğer negatif sıra akımı (I_{2eq}) üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde göstermektedir. Kırmızı çizgiyle işaretlenen bölge, çalışılan generatör için I_{2eq} 'nin limit değerinin aşıldığı alanları ifade etmektedir. Grafik, V_{DA} seviyesinin belirli bir eşik değeri aştığında ($V_{DA} \geq 4$ V/km), tüm topraklama direnci değerleri için I_{2eq} 'nin limit değerini aştığını ortaya koymaktadır. Jeomanyetik bozulmalar sırasında iletim hattında kilometre başına düşen DA gerilim düşümü seviyesi 16 V/km olarak düşünüldüğünde [18], generatörün orta JİA seviyelerinde termal kapasite sınırına ulaşabileceği ifade edilebilir. Özellikle, düşük topraklama direnci değerlerinde, V_{DA} seviyesi düşük olsa bile I_{2eq} 'nin hızla arttığı ve sınır değeri aştığı gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük topraklama direncinin, JİA etkilerinin daha belirgin hale gelmesine ve eşdeğer negatif sıra akımının kritik seviyelere ulaşmasına neden olduğunu göstermektedir. Öte yandan, V_{DA} seviyesinin düşük olduğu durumlarda, topraklama

direncindeki artış, I_{2eq} 'yi düşürmektedir. Bu da, topraklama direncinin, jeomanyetik fırtınaların etkilerini sınırlamak için önemli bir parametre olduğunu vurgulamaktadır.

5. ZAMAN ETKİN TAHMİN MODELİ

Bu çalışmada, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan test sisteminde gerçekleştirilen analizler yüksek doğrulukta sonuçlar sunmakla birlikte, karmaşık hesaplama süreçleri nedeniyle önemli ölçüde zaman alabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan sistemde her bir analiz yaklaşık 8 dakika sürmektedir. Bu süre, çok sayıda parametrik analiz üzerinde çalışıldığında toplam hesaplama süresini oldukça artırmaktadır. Simülasyonlar ve modelleme işlemleri, aşağıdaki teknik özelliklere sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir:

- İşlemci: 13th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900HX 2.20 GHz
- Bellek: 64 GB DDR4 RAM
- İşletim Sistemi: Windows 11 Pro
- MATLAB ve Simulink Sürümü: MATLAB R2024a

Bu problemi çözmek ve süreci hızlandırmak amacıyla Yanıt Yüzeyi Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) kullanılmıştır. Bu yöntemde, bağımsız değişkenler (faktörler) (X_1 ve X_2) ile bağımlı değişkenler (yanıtlar) (Y) arasındaki ilişkiler, matematiksel modellerle Denklem 7'deki gibi ifade edilebilir [35, 36]. Böylece, sistemin davranışı hızlı ve etkili bir şekilde öngörülebilir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (7)$$

Problemin çözümüne yönelik olarak, yanıt değişkenleri (I_{2eq} , $THDI_G$, Q_1) ile faktörler (V_{DA} , R_G) arasındaki matematiksel ilişkileri belirlemek amacıyla Minitab 18 istatistiksel yazılımı kullanılarak 3Y analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu ilişkilerin elde edilmesi için, hazırlanan deney tasarımı kapsamında, Tablo 3'te verilen V_{DA} ve R_G 'nin gerçek ve kodlanmış değerleri kullanılarak ilk deneyler yapılmıştır.

Tablo 3: 3Y analizi için hazırlanan deney tasarım tablosu.

Kodlanmış V_{DA}	Kodlanmış R_G	Gerçek V_{DA}	Gerçek R_G	Tahmin Edilen $I_{2eq}(pu)$	Tahmin Edilen $THDI_G(\%)$	Tahmin Edilen $Q_1(pu)$
-1	-1	0	0	0.009134	1.1326	0.020289
1	-1	5	0	0.249068	16.5963	0.481989
-1	1	0	2	0.000531	0.3605	0.017856
1	1	5	2	0.100064	7.3611	0.141556
-1	0	0	1	0.009366	0.1326	0.027944
1	0	5	1	0.160368	11.0996	0.264756
0	-1	2,5	0	0.155398	10.5946	0.253922
0	1	2,5	2	0.076594	5.5909	0.082489
0	0	2,5	1	0.101798	7.2136	0.121189

Yanıt yüzeyi yöntemi kapsamında, deneysel tasarım için tam ikinci derece (full quadratic) model kullanılmıştır. İlk deneylerin sonuçlarına göre, 3Y'ye dayalı matematiksel modeller %95 güvenilirlikle oluşturulmuştur ve aşağıdaki regresyon denklemlerinde (8)–(10) sırasıyla R^2 değeri %99.21, %98.98 ve %98.66 olarak bulunmuş olup, modellerin mevcut verilere uyumunun oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

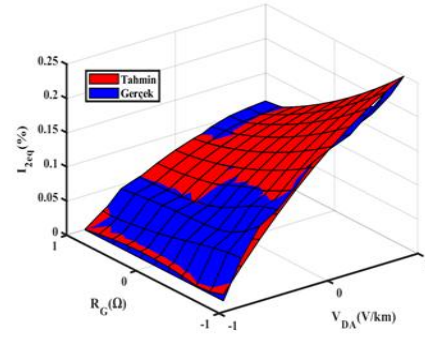
$$I_{2eq} = 0.0091 + 0.06902 * V_{DA} - 0.0327 * R_G - 0.00421 * V_{DA}^2 + 0.01420 * R_G^2 - 0.01404 * V_{DA} * R_G \quad (8)$$

$$THDI_G = 1.133 + 4.477 * V_{DA} - 2.14 * R_G - 0.277 * V_{DA}^2 + 0.879 * R_G^2 - 0.846 * V_{DA} * R_G \quad (9)$$

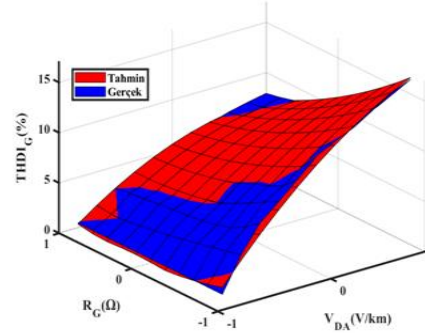
$$Q_1 = 0.0203 + 0.0946 * V_{DA} - 0.0952 * R_G - 0.00045 * V_{DA}^2 + 0.0470 * R_G^2 - 0.03380 * V_{DA} * R_G \quad (10)$$

Şekil 8, I_{2eq} , $THDI_G$ ve Q_1 'in gerçek değerleri ile 3Y tabanlı model tarafından tahmin edilen değerlerin karşılaştırılmasını sunmaktadır. Bu şekil, modelin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar ürettiğini ve tahminlerin güvenilir olduğunu açıkça göstermektedir.

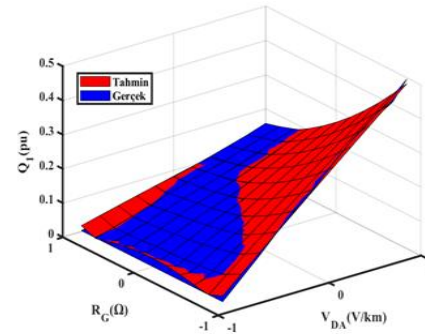
3Y tabanlı modelin performansını değerlendiren RMS hata (RMSE) değerleri, modelin doğruluğunu daha ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. I_{2eq} için %1.1, $THDI_G$ için %0.51 ve Q_1 için %1.44'lük RMSE değerleri, modelin oldukça yüksek bir tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Bu da modelin enerji sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8: (a) I_{2eq} , (b) $THDI_G$ ve (c) Q_1 için tahmin edilen değerler ile gerçek değerlerin karşılaştırılması.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, jeomanyetik olayların generatör yükseltme transformatörleri (GYT) ve senkron generatörler üzerindeki etkileri incelenmiş ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Jeomanyetik olarak indüklenen akımlar, GYT'lerde manyetik doyuma neden olarak mıknatıslanma akımlarını ve harmonik bozulmaları artırmaktadır.
- Düşük topraklama direnci, GYT ve generatör üzerinde jeomanyetik indüklenen akımların (JİA) olumsuz etkilerini artırmaktadır. Buna karşılık, daha yüksek topraklama dirençleri, harmonik bozulmaların ve reaktif güç taleplerinin azalmasına katkı sağlamaktadır.
- MATLAB/Simulink modeline dayalı analizler, orta seviyelerdeki JİA koşullarının dahi senkron generatörlerin termal kapasite sınırlarına ulaşabileceğini göstermiştir.
- Yanıt yüzeyi yöntemiyle geliştirilen matematiksel modeller, JİA etkilerinin hızlı ve etkin bir şekilde tahmin edilmesini sağlamış ve model doğruluğu yüksek bulunmuştur.

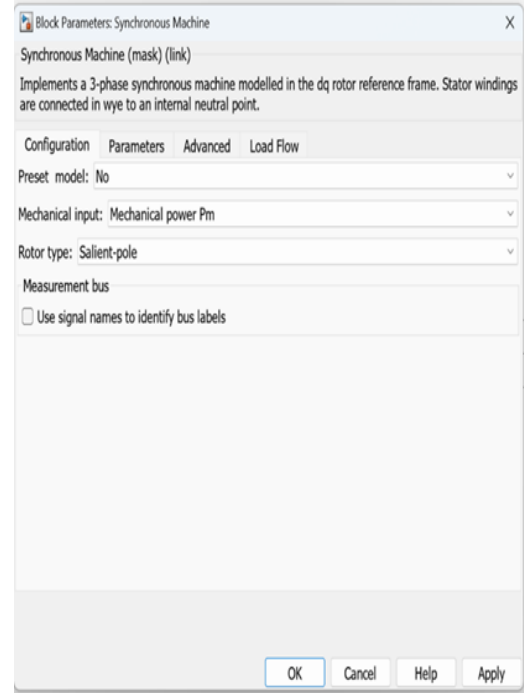
Yazarların gelecekteki çalışmalarında, generatörlerin reaktans üzerinden topraklanmasının JİA etkileri üzerindeki rolü kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

Yazar Katkıları: Her iki yazar, literatür taraması, araştırma fikrini geliştirme, makale yazımı ve düzenlemesi süreçlerine ortak katkı sağlamıştır.

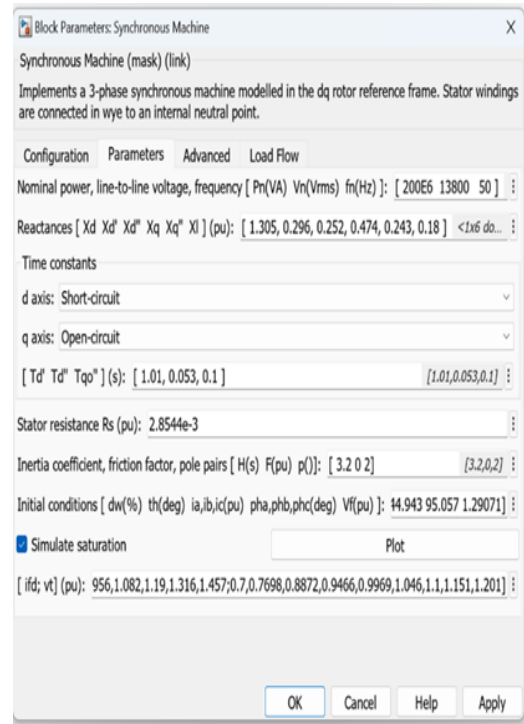
Teşekkür: Bu çalışma, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen 2024/045 numaralı proje kapsamında yürütülmüş olup, ilgili projenin bir çıktısıdır.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmiştir.

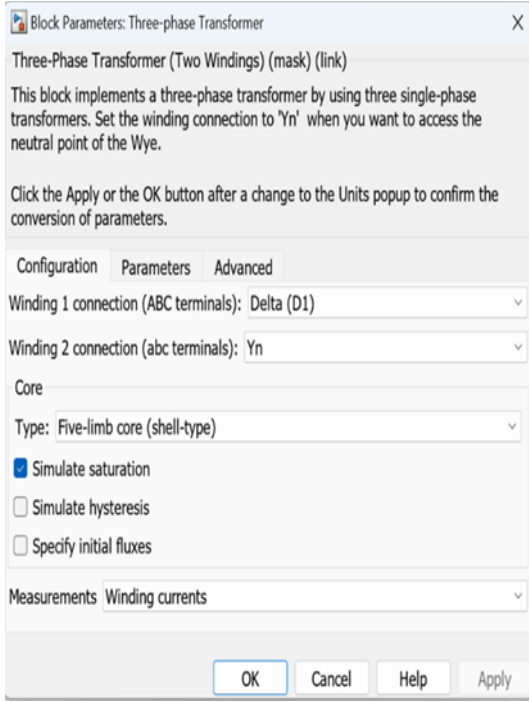
7. EKLER



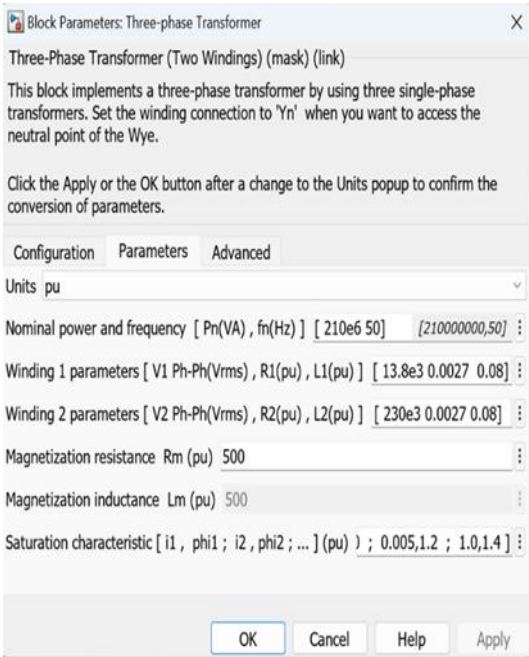
Şekil A.1: Senkron generatör ara yüzünün konfigürasyonu.



Şekil A.2: Senkron generatör ara yüzünün menüsü.



Şekil A.3: Transformatör ara yüzünün konfigürasyonu.



Şekil A.4: Transformatör ara yüzünün parametreler menüsü.

8. KAYNAKLAR

[1] S. Shetye and T. J. Overbye, "Modeling and analysis of GMD effects on power systems: An overview of the impact on large-scale power systems," *IEEE Electr. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 13–21, 2015.

[2] F. R. Faxvog *et al.*, "Power grid protection against geomagnetic disturbances (GMD)," in *Proc. IEEE Electr. Power Energy Conf. (EPEC)*, Halifax, NS, Canada, 2013, pp. 1–13.

[3] P. R. Price, "Geomagnetically induced current effects on transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 4, pp. 1002–1008, 2002.

[4] R. Langella, A. Testa, and A. E. Emanuel, "On the effects of subsynchronous interharmonic voltages on power transformers: Three-phase units," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2461–2471, 2008.

[5] A. Rezaei-Zare, L. Marti, A. Narang, and A. Yan, "Analysis of three-phase transformer response due to GIC using an advanced duality-based model," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 5, pp. 2342–2350, 2016.

[6] M. Lahtinen and J. Elovaara, "GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 2, pp. 555–561, 2002.

[7] A. Rezaei-Zare, "Behavior of single-phase transformers under geomagnetically induced current conditions," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 916–925, 2014.

[8] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, and A. K. Koseoglu, "Investigation of the effects of DC bias on single-phase shell type transformers using frequency-dependent reluctance-based model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 9, pp. 1–10, 2021.

[9] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu, and A. K. Koseoglu, "Performance analysis of three-phase five-leg transformers under DC bias using a new frequency-dependent reluctance-based model," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 16, no. 12, pp. 2455–2465, 2022.

[10] R. Girgis and K. Vedante, "Effects of GIC on power transformers and power systems," in *Proc. IEEE PES T&D Conf. Expo.*, Orlando, FL, USA, 2012.

[11] O. Samuelsson, "Geomagnetic disturbances and their impact on power systems," *Industrial Electrical Engineering and Automation Status Report*, Lund University, 2013.

[12] V. D. Albertson *et al.*, "Geomagnetic disturbance effects on power systems. Discussion," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 3, pp. 1206–1216, 1993.

[13] W. B. Gish, W. E. Feero, and G. D. Rockefeller, "Rotor heating effects from geomagnetic

- induced currents," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 2, pp. 712–719, 1994.
- [14] A. Rezaei-Zare and L. Marti, "Generator thermal stress during a geomagnetic disturbance," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1–5.
- [15] P. Jankee, D. T. O. Oyedokun, and H. Chisepo, "Harmonic sequences affecting synchronous generator response to GIC," in *Proc. IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Kigali, Rwanda, 2022, pp. 1–5.
- [16] P. Jankee, D. T. O. Oyedokun, and H. K. Chisepo, "Dynamic response of power systems with real GICs: Impact on generator excitation control," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 37, no. 6, pp. 4911–4922, 2022.
- [17] P. Jankee, D. T. O. Oyedokun, and H. Chisepo, "Synchronous generator modelling and excitation voltage control for GIC studies," in *Proc. 13th IEEE PES APPEEC*, Thiruvananthapuram, India, 2021, pp. 1–6.
- [18] A. H. Etemadi and A. Rezaei-Zare, "Optimal placement of GIC blocking devices for geomagnetic disturbance mitigation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2753–2762, 2014.
- [19] K. Zheng *et al.*, "Effects of system characteristics on geomagnetically induced currents," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 890–898, 2014.
- [20] Z. M. K. Abda, N. F. Ab Aziz, M. Z. Ab Kadir, and Z. A. Rhazali, "A review of geomagnetically induced current effects on electrical power system: Principles and theory," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200237–200258, 2020.
- [21] M. Kazerooni, H. Zhu, and T. J. Overbye, "Improved modeling of geomagnetically induced currents utilizing derivation techniques for substation grounding resistance," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 5, pp. 2320–2328, 2017.
- [22] U. Bui, T. J. Overbye, K. Shetye, H. Zhu, and J. Weber, "Geomagnetically induced current sensitivity to assumed substation grounding resistance," in *Proc. North Amer. Power Symp. (NAPS)*, Manhattan, KS, USA, 2013, pp. 1–6.
- [23] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System Part 1: Normal Measurements*, IEEE Std 81-1983, pp. 1–44, Mar. 11, 1983.
- [24] *IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems*, IEEE Std 81.2-1991, pp. 1–112, Jun. 25, 1992.
- [25] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std 80-2013 (Rev. IEEE Std 80-2000/Incl. Corrigendum 1-2015), pp. 1–226, May 15, 2015.
- [26] A. L. Kinyon, "Earth resistivity measurements for grounding grids," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng. Power Appar. Syst.*, vol. 80, no. 3, pp. 795–799, 1961.
- [27] Electric Power Research Institute (EPRI), "3002017707 – Assessment guide: Geomagnetic disturbance harmonic impacts and asset withstand capabilities," Tech. Update. [Online]. Available: <https://www.epri.com/research/products/000000003002017707>
- [28] *IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above*, IEEE Std C50.12-2005, pp. 1–45, Feb. 15, 2006.
- [29] *IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above*, IEEE Std C50.13-2014, pp. 1–63, May 9, 2014.
- [30] D. H. Boteler and R. J. Pirjola, "Modeling geomagnetically induced currents," *Space Weather*, vol. 15, no. 1, pp. 258–276, 2017.
- [31] D. H. Boteler, R. Pirjola, C. Blais, and A. Foss, "Development of a GIC simulator," in *Proc. IEEE PES Gen. Meeting Conf. Expo.*, National Harbor, MD, USA, 2014.
- [32] MathWorks, "Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine – Simulink," Nov. 2024. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/sps/power_sys/ref/synchronousmachinesifundamental.html
- [33] *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*, IEEE, vol. 2, Nov. 2002.
- [34] Typhoon HIL, "Typhoon HIL software manual." [Online]. Available: <https://www.typhoon->

hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/References/ieee_type1_exciter.html

- [35] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [36] A. Bonner, et al., "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 1, pp. 452–465, 1996.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Türk Yapı Denetim Sisteminde Denetçinin Rolü ve Almanya'daki Uygulama ile Karşılaştırılması

The Role of the Inspector in the Turkish Building Inspection System and Comparison with the Practice in Germany

İbrahim Elveren^{1,*}, Mürsel Erdal²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye.

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 02.12.2024

Kabul / Accepted: 19.12.2024

*Sorumlu Yazar: İbrahim Elveren ibrahimelveren@gmail.com

ÖZ: Deprem, ülkemizde ağır bedeller ödeyerek tecrübe ettiğimiz en acı gerçeklerden biridir. Nüfusumuzun % 95'i deprem bölgelerinde yaşamakta, % 73'ü üçü ise aktif faylar üzerinde yerleşim göstermektedir. Böyle bir tabloda, ülkede yaşayan herkesin şiddetli bir depremle karşılaşma olasılığı oldukça yüksektir. Nitekim Erzincan, Gölçük, Düzce, Van, İzmir ve yakın zamanda gerçekleşen Kahramanmaraş depremleri bunun en büyük ispatıdır. Şahit olduğumuz bu depremlere rağmen her defasında ağır kayıplar vermemiz, yapıların öngörülen kurallara ve standartlara uygun inşa edilmediğini göstermektedir. Bu yüzden meydana gelen her deprem sonrasında yapıların kalitesi sorgulanmış ve depremlerin vereceği hasarların en aza indirilmesi için çabalar sarf edilmeye başlamıştır. Bu amaçla, 2001 yılında yürürlüğe giren 4708 sayılı Yapı Denetimi Kanunu çıkarılmıştır. Bu kanunun amacı; can ve mal güvenliğini sağlamak, imar plânına, fen, sanat ve sağlık kurallarına, standartlara uygun kaliteli yapı yapılması için proje ve yapı denetimini sağlamaktır. Her ne kadar yapılan düzenlemeler değerli olsa da, yapı denetiminin başarıya ulaşması için en önemli parametre yapı denetim kuruluşlarında görev alan denetçilerdir. Bu çalışmada, ülkemizde uygulanan yapı denetim sistemi incelenmiştir. Türkiye'de ve Almanya'da yürürlükte olan yapı denetimi mevzuatı bağlamında denetçinin rolü, görev ve sorumlulukları belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı, yapı denetimi, yapı denetim kuruluşları, denetçi, 4708 sayılı kanun

ABSTRACT: Earthquakes are one of the most painful realities that we have experienced in our country by paying a heavy price. 95% of our population lives in earthquake zones, and 73% of them are located on active fault lines. In such a picture, the probability of everyone living in the country encountering a severe earthquake is quite high. In fact, the earthquakes in Erzincan, Gölçük, Düzce, Van, İzmir and the recent Kahramanmaraş are the greatest proof of this. Despite these earthquakes, the fact that we have suffered heavy losses every time shows that the structures were not built in accordance with the foreseen rules and standards. Therefore, the quality of the structures has been questioned after each earthquake and efforts have been made to minimize the damage that earthquakes will cause. For this purpose, the Building Inspection Law No. 4708, which came into force in 2001, was enacted. The purpose of this law is to ensure the safety of life and property, and to provide project and building inspection for the construction of quality structures in accordance with zoning plans, science, art and health rules and standards. Although the regulations made are valuable, the most important parameter for the success of the building inspection is the inspectors working in the building inspection organizations. In this study, the building inspection system applied in our country was examined. The role, duties and responsibilities of the inspector in the context of the building inspection legislation in force in Türkiye and Germany were determined and compared.

Keywords Building, building inspection, building inspection organizations, inspector, Law No. 4708

1. GİRİŞ

Dünya'nın oluşumundan bu yana, doğal afetler insanlık tarihinin ayrılmaz bir parçası olmuştur. Depremler, volkanik patlamalar, sel ve diğer doğal olaylar, hem çevresel dinamiklerin bir sonucu olarak ortaya çıkmış hem de insan toplumları üzerinde derin etkiler bırakmıştır. Uluslararası Acil Durum Veri Tabanı (EM-DAT) rakamlarına göre 1900-2022 yılları arasında dünyada 25.740 adet afet yaşanmıştır [1, 2].

Başka bir ifadeyle dünya yaklaşık olarak her iki günde bir, toplulukların tehdit altında olduğu, genellikle yerel imkânlarla müdahalenin yetersiz kaldığı, ulusal kaynakların seferber edilmesi gerektiği, büyük can ve mal kayıplarına yol açan beklenmedik ve istenmedik durumlar ile karşı karşıya kalmaktadır. Dünyanın bazı bölgeleri diğer bölgelere kıyasla daha çok afeti tecrübe etmektedir [3].

İnsanoğlu her ne kadar afetleri tamamen önleyemese de günün koşulları doğrultusunda bu afetlerle başa çıkma yollarını aramış, gelişen teknoloji ve bilim sayesinde önleyici tedbirler geliştirmiştir. Ancak, her yeni afet dalgası, insanlığın doğayla olan ilişkisini yeniden sorgulamasına ve bu mücadeledeki stratejilerini gözden geçirmesine neden olmuştur.

İnsanoğlunun göçebe hayattan yerleşik hayata geçmesiyle hayatlarının büyük bir kısmını içinde geçirdikleri başta konaklama yerleri olmak üzere iş ve sosyal hayatta kullandıkları yapılar giderek önem kazanmıştır. Elbette bir yapı estetik ve ergonomik olmalıdır ancak aynı zamanda dayanıklı olmalıdır. Bu hususa hem toplum hem de yöneticiler önem vermiştir. Yapıların sağlamlığına verilen önemi, yazılı ilk kanun sayılan Hammurabi Kanunlarında yapıları sağlam şekilde inşa edemeyenlere uygulanmış olan ağır cezalardan anlayabiliriz [4].

İçinde bulunduğumuz 21. yüzyıl itibarıyla, her ne kadar teknolojinin hızla ilerlemesi sonucunda yapılaşmanın kalitesi ve güvenilirliği giderek artmış olsa da tam anlamıyla hedeflenen seviyeye ulaşmadığı söylenebilir. Bunun çeşitli sebepleri bulunmaktadır ve her biri ayrı ayrı araştırma konusudur.

Türkiye’de uygulanan yapı denetim sisteminin geliştirilmesine ve iyileştirilmesine katkı sağlamayı amaçlayan bu çalışmada, mevzuat kapsamında düzenlemeler yapılmasına rağmen binaların sağlamlığının denetlenmesinde kilit rol oynayan denetçiler ve onların yapı denetimine katkıları üzerinde durulmuş, Türk ve Alman yapı denetim sistemlerinde denetçilerin rolü karşılaştırılmıştır.

2. YAPI VE YAPI DENETİMİ

Yapı, inşaat mühendisliği terminolojisinde ulaşım, hidrolik, geoteknik ve yapı anabilim dallarının faaliyet alanı içine giren, genel olarak montaj yöntemiyle değil inşa yöntemiyle oluşturulan bina ve tesislerin tümünün ortak adıdır [4]. 3194 sayılı İmar Kanunu’na göre ise yapı; karada ve suda, daimî veya muvakkat, resmi ve hususi yeraltı ve yerüstü inşaatı ile bunların ilave, değişiklik ve tamirlerini içine alan sabit ve müteharrik tesislerdir [5].

Denetim; bir işin veya sürecin doğru bir şekilde yapıldığının, daha önceden belirlenmiş kural, kriter ve standartlara uygun olup olmadığının gözetlenmesi, kontrol edilmesi ve değerlendirilmesidir [6]. Diğer bir ifadeyle; olasılık ve görelilik ilkeleri çerçevesinde belirlenen hedefler ve standartlar doğrultusunda elde edilen sonuçların verimlilik, etkinlik ve ekonomiklik düzeylerini ölçmek, karşılaştırma yapmak ve değerlendirmek amacıyla yapılan bir süreçtir [7].

Türk Dil Kurumu “denetleme” kavramını, “Bir işin doğru ve yöntemine uygun olarak yapılıp yapılmadığını incelemek, murakabe etmek, teftiş etmek, kontrol etmek” şeklinde tanımlamaktadır.

Yapı denetimi ise; her yapı türünün kendine özgü özellikleri göz önünde bulundurularak, fonksiyonellik, güvenilirlik ve ekonomiklik gibi niteliklerin sağlanması maksadıyla; yapının tüm bileşenleri için ilgili mevzuat, standart, şartname ve talimatlara uygunluğunu kontrol etmeyi içerir. Ayrıca bu süreç; zaman, estetik ve konfor kayıplarını önlemeye yönelik laboratuvar dâhil her türlü teknik ve idari çalışmaları, incelemeleri ve faaliyetleri kapsar [8].

3. YAPI DENETİMİNİN AMACI VE ÖNEMİ

Türkiye Cumhuriyeti Anayasasında; devletin temel amaç ve görevlerinin düzenlendiği 5'inci maddesinde, "Devletin temel amaç ve görevleri, Türk milletinin bağımsızlığını ve bütünlüğünü, ülkenin bölünmezliğini, Cumhuriyeti ve demokrasiyi korumak, kişilerin ve toplumun refah, huzur ve mutluluğunu sağlamak; kişinin temel hak ve hürriyetlerini, sosyal hukuk devleti ve adalet ilkeleriyle bağdaşmayacak surette sınırlayan siyasal, ekonomik ve sosyal engelleri kaldırmaya, insanın maddi ve manevi varlığının gelişmesi için gerekli şartları hazırlamaya çalışmaktır."

Sağlık hizmetleri ve çevrenin korunmasının düzenlendiği 56'ncı maddesinde, "Herkes, sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkına sahiptir."

Konut hakkının düzenlendiği 57'nci maddesinde "Devlet, şehirlerin özelliklerini ve çevre şartlarını gözeterek bir planlama çerçevesinde, konut ihtiyacını karşılayacak tedbirleri alır, ayrıca toplu konut teşebbüslerini destekler." hükümleri bulunmaktadır.

Bu hükümlerin hayata geçirilmesinin ancak belirli bir plan ve program dâhilinde gözetim ve denetim ile mümkün olduğu aşikârdır. Bu kapsamda belirtilen hükümleri yerine getirmek ve yapı denetimine ilişkin usul ve esasları düzenlemek maksadıyla, 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun çıkarılmıştır [9].

Türkiye'de uygulanan yapı denetimi sisteminin amacı, aşağıdaki unsurları içermektedir:

- Mevzuatın Etkinliğini Artırmak: Yapı üretiminde mevcut mevzuatın etkinliğini artırmak.
- Can ve Mal Güvenliği: Yapılarda can ve mal güvenliğini sağlayarak maddi zararları önlemek.
- Yapı Kalitesini Artırmak: Yapı niteliğini artırmak, ekonomik ömrünü uzatmak ve koruma ile tamir maliyetlerini azaltmak.
- Afet Dayanıklılığı: Afetlere dayanıklı ve modern standartlarda yapılar üretmek.
- Yapı Sorumlularına Görev Vermek: Yapı denetim sistemi içerisinde görev alan müteahhitler, şantiye şefleri, proje müellifleri,

laboratuvar görevlileri, yapı denetim kuruluşları, denetçi mühendisler ve mimarlar gibi yapı sorumlularına aktif görevler vermek.

- Uzmanlaşma: Mühendislik ve mimarlık faaliyetlerinin niteliğini artırmak amacıyla uzmanlaşma kavramına vurgu yapmak [10].

Daha genel bir ifadeyle; yapı denetim sisteminin temel amacı, doğal afetler nedeniyle oluşacak zararların önlenmesi veya en aza indirilmesi için, yapıların doğal afetlere karşı daha sağlam ve güvenilir hale getirilmesidir. Bununla birlikte; plansız ve mimari estetikten yoksun yapıların önüne geçerek, insanların daha sağlıklı ve çevre dostu alanlarda güvenli bir yaşam ortamına sahip olmalarını sağlamaktır.

4. TÜRKİYE'DEKİ YAPI DENETİM SİSTEMİNİN GENEL YAPISI

Ülkemizde yapılaşmanın olduğu birçok yerleşim alanı deprem bölgesinde bulunmaktadır. Bu şekilde bir yapılaşmanın ne kadar önemli sorunlar çıkarabileceği 1999 yılında Gölcük ve 2023 yılında Kahramanmaraş merkezli depremlerde görülmüştür. Söz konusu Gölcük depreminde binlerce can kaybı yaşanmış on binlerce binada çeşitli oranlarda hasarlar oluşmuştur. Bu afet, inşaatın proje aşamasından kullanım izninin verilmesine kadar olan süreçte denetim için hukuki bir düzenlemenin kaçınılmaz olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir.

2001 yılında Türkiye'de yürürlüğe giren 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun, yapıların denetlenmesi konusunda önemli değişiklikler getirmiştir.

4708 Sayılı Kanun'da amaç; "can ve mal güvenliğini sağlamanın yanı sıra imar planına, fen, sanat ve sağlık kuralları ile standartlara uygun bir şekilde kaliteli yapıların oluşması için proje ve yapı denetiminin sağlanmasına ilişkin kuralları düzenlemektir. Bu sistemin işleyişi, yapı sahipleri tarafından yaptırılan projelerin incelenmesi ve ardından onay işlemlerinin yapılması, ruhsat alınma aşamaları ve ruhsata aykırı durumda olan yapıların tespiti ile bunlara uygulanacak işlemlerin belirlenmesi olarak tanımlanabilir." Denetim sistemi, projelendirme ve inşaat sürecinin her aşamasında yer alan kapsamlı bir mekanizmadır.

Proje, yapı sahibinin oluşturduğu düşüncenin somut bir hale gelmesiyle tamamlanır [11].

Yapı denetimi, bir sonuç denetimi olmaktan ziyade, süreç ve önleyici denetim niteliğindedir. Bu sistem, projelendirme ve inşaat aşamalarında yapılan uygulamaların, planlanan ile gerçekleştirilen arasında bir karşılaştırma yaparak değerlendirilmesini esas alır. Yapı denetim sisteminin ana teması, sürecin her aşamasında gerekli kontrolleri ve karşılaştırmaları yaparak olası hataları önceden tespit etmek ve bu karşılaştırmalar üzerinden yapıların kalitesini ve güvenliğini artırmaktır [10].

5. YAPI DENETİMİ MEVZUATI

Türkiye’de uygulanan Yapı Denetim Sistemi’nin ana mevzuatı 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun’dur. Söz konusu Kanun 29 Haziran 2001 tarihinde kabul edilmiştir ve 13 Temmuz 2001 tarihinde Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Dokuz yıl kadar bir süre 19 ilde pilot uygulama şeklinde yürütüldükten sonra 3 Temmuz 2010 tarih ve 27640 sayılı Resmî Gazete’de yayınlanan Bakanlar Kurulu Kararı ile 1 Ocak 2011 tarihinden itibaren tüm Türkiye’de uygulanmaya başlanmıştır.

4708 sayılı Yapı Denetimi hakkında Kanun’un birinci maddesinde denetime tabi olacak yapılar, yani Kanun’un kapsamı belirlenmiştir. Şekil 1’de gösterilen yapıların dışında kalan tüm yapılar denetime tabidir.



Şekil 1: 4708 sayılı Yapı Denetimi Yasası Kapsamı Dışındaki Alanlar [12].

5.1 Türkiye’de Yapı Denetimine İlişkin Mevzuat

Türkiye’de Yapı Denetimine İlişkin Mevzuat kapsamında uygulanan Kanun, Yönetmelik ve Tebliğler aşağıda verilmiştir.

Kanunlar

- “3194 Sayılı İmar Kanunu”
- “4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun”
- “6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun”
- “5272 Sayılı Belediyeler Kanunu”

Yönetmelikler

- “Yapı Denetim Uygulama Usul ve Esasları Yönetmeliği”
- “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmelik”
- “Planlı Alanlar Yönetmeliği”
- “Yapı Malzemeleri Yönetmeliği”
- “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”
- “Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği”
- “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik”
- “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği”
- “Sığınak Yönetmeliği”
- “Asansör Yönetmeliği”
- “Binalarda Su Yalıtımı Yönetmeliği”
- “2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”
- “Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği”
- “Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”
- “Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”

Tebliğler

- “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Kapsamında Yapılacak Binalarla İlgili Uygulama Esaslarına Dair Tebliğ”
- “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Kapsamında Yapılacak Tasarım Gözetimi ve Kontrolü Hizmetlerine Dair Tebliğ”
- “Yapı Denetimi İzin Belgesi Almak İçin Yapılan Müracaatların Sıralamaya Alınma Esaslarına Dair Tebliğ”
- “Yapı Denetim Kuruluşları ile Laboratuvarların Faaliyetlerinin Denetlenmesi İdari Müeyyide Uygulanması ve İdari Para Cezalarının

Tahsil Edilmesinin Usul ve Esaslarına Dair Tebliğ”

- “4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun Kapsamında Denetimi Yürütülen Yapılara Ait Taze Betondan Numune Alınması, Deneylerinin Yapılması, Raporlanması Süreçlerinin İzlenmesi ve Denetlenmesine Dair Tebliğ”
- “Yapı Sahipleri ile Yapı Denetimi Hizmet Sözleşmesi İmzalayacak Yapı Denetim Kuruluşlarının Elektronik Ortamda Belirlenmesine İlişkin Usul ve Esaslara Dair Tebliğ [13].”

6. YAPI DENETİM KURULUŞLARI VE DENETÇİLER

6.1 Yapı Denetim Kuruluşları

Yapı denetimi, 4708 sayılı Kanun kapsamında yapı denetim kuruluşları tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu kuruluşlar, inşaatı gerçekleştirecek olan müteahhitlerle bir sözleşme yaparak yapı denetim hizmetlerini yerine getirir. Yapı denetim kuruluşlarının, ortaklarının mühendis veya mimar olması zorunludur ve bu kuruluşlar yalnızca yapı denetimi ile ilgili faaliyetlerde bulunabilirler [14].

Yapı denetim kuruluşları, inşaat sektöründe kalite kontrol ve uyumluluk sağlamak için faaliyet gösteren bağımsız kuruluşlardır. Bu kuruluşların uzman ekipleri; saha denetimleri ve teknik değerlendirmeler yaparak, yapıların planlara uygunluğunu, yapısal güvenliğini ve diğer gereklilikleri kontrol ederler. Ayrıca inşaat projelerinde bağımsız bir üçüncü taraf olarak görev alırlar ve taraflar arasında güvenilirlik ve şeffaflık sağlamalıdır [15].

Yapı denetim firmaları, 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun kapsamında birçok şartı yerine getirebilen, geniş bir teknik kadroya sahip ve bu nedenle Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'ndan bu hizmeti sunma yetkisi almış kuruluşlardır. Yapı denetim kuruluşları, önemli ve büyük sorumluluklar taşımaktadır. Yapının ruhsatına, teknik, sanat ve sağlık kurallarına aykırı, eksik, hatalı veya kusurlu inşa edilmesi durumunda meydana gelen hasarlardan dolayı yapı sahibine ve ilgili idareye karşı, kusur oranında sorumluluk üstlenirler [16].

Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinin “Yetki Sınırı” maddesi uyarınca; “Yapı denetim kuruluşlarının denetleyebilecekleri toplam yapı inşaat alanı 360.000 m²'yi geçemez. Ancak aynı alanda ve aynı proje dâhilinde olmak şartı ile kuruluş ve denetçileri için toplam yapı inşaat alanı sınırı aranmaz. Ayrıca bu kuruluşların üzerinde bulunan işlerin toplamı, denetleme yetki sınırını aşmamış ise alınmak istenen yeni bir işin son iş olması kaydıyla, toplam yapı inşaat alanı sınırı kuruluş ve denetçileri için aşılabılır [8].”

Yapı denetim kuruluşları, 4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun'un 2'nci maddesinde belirtildiği üzere aşağıdaki görevleri yerine getirmekle yükümlüdür;

- “Proje müelliflerince hazırlanan, yapının inşa edileceği arsa veya arazinin zemin ve temel raporları ile uygulama projelerini ilgili mevzuata göre incelemek, proje müelliflerince hazırlanarak doğrudan kendilerine teslim edilen uygulama projesi ve hesaplarını kontrol ederek, ilgili idareler dışında başka bir kurum veya kuruluşun vize veya onayına tabi tutulmadan, ilgili idareye uygunluk görüşünü bildirmek.”
- “Yapı denetimini üstlendiğine dair ilgili idareye taahhütname vermek, yapı ruhsatının ilgili bölümünü imzalamak, bu yapıya ilişkin bilgileri yapı ruhsatı düzenleme tarihinden itibaren yedi gün içinde Bakanlığa bildirmek.”
- “Yapının, ruhsat ve ekleri ile mevzuata uygun olarak yapılmasını denetlemek.”
- “Yapım işlerinde kullanılan malzemeler ile imalatın proje, teknik şartname ve standartlara uygunluğunu kontrol etmek ve sonuçlarını belgelendirmek, malzemeler ve imalatla ilgili deneyleri yaptırmak.”
- “Yapılan tüm denetim hizmetlerine ilişkin belgelerin bir nüshasını ilgili idareye vermek, denetimleri sırasında yapıda kullanılan malzeme ve imalatın teknik şartname ve standartlara aykırı olduklarını belirledikleri takdirde, durumu bir rapor ile ilgili idareye ve il sanayi ve/veya ticaret müdürlüklerine bildirmek.”
- “İşyerinde, çalışmaların, iş sağlığı ve güvenliği mevzuatına göre düzenlenmesi gereken sağlık güvenlik planına uygun

olarak yapıldığını kontrol etmek ve gerekli tedbirlerin alınması için yapı müteahhidini yazılı olarak uyarmak, uyarıya uyulmadığı takdirde durumu ilgili Çalışma ve İş Kurumu il müdürlüğüne bildirmek.”

- “Ruhsat ve eklerine aykırı uygulama yapılması halinde durumu üç iş günü içinde ilgili idareye bildirmek.”
- “Yapının ruhsat eki projelerine uygun olarak kısmen veya tamamen bitirildiğine dair ilgili idareye rapor vermek.”
- “Zemin, malzeme ve imalata ilişkin deneyleri, şartname ve standartlara uygun olarak laboratuvarlarda yaptırmak şeklinde belirtilmiştir” [17].

6.2 Denetçiler

Denetçilik, belirtilen gereksinimleri karşılдықlarından emin olmak için sistemler, süreçler ve ürünler gibi çeşitli yönleri değerlendirmekten ve incelemekten sorumlu olan profesyonel bir roldür. Bu rol, inşaat, kalite kontrol, sağlık ve güvenlik ve devlet kurumları dâhil olmak üzere farklı sektörlerle yayılabilir. Düzenli denetimler yaparak yetki alanlarındaki tüm unsurların belirlenmiş standartları karşılmasını sağlaması, bulguları belgelemesi, yönetmeliklerin uygulanmasını sağlaması ve nihayetinde iyileştirmeler önermesi bir denetçinin önemli rolleridir.

Türkiye’de uygulanan yapı denetim sisteminde denetçi belgesi, aşağıdaki şartları taşıyan mimar ve mühendisler verilir;

- “Türkiye Cumhuriyeti vatandaşı olması.”
- “Denetçi adaylarından; şantiye mahallinde yapının denetim görevini yapacak mimar ve mühendisler 75 yaşını doldurmamış olmalı ve şantiyelerde iş görebileceklerine ilişkin olarak, görevini devamlı olarak yapmaya engel bir durumu olmadığı ilgili sağlık kurum veya kuruluşunca belirlenmeli, diğer mimar ve mühendislerin ise yalnızca görevini devamlı olarak yapmaya engel bir durumu olmadığı ilgili sağlık kurum veya kuruluşunca belirlenmeli.”
- “Mimar veya ilgili mühendis olması.”
- “İlgili meslek odasına kayıtlı olması.”
- “T.C. kimlik numarasına sahip olması.”

- “Devletin güvenliğine karşı suçlar, Anayasal düzene ve bu düzenin işleyişine karşı suçlar, zimmet, irtikâp, rüşvet, hırsızlık, dolandırıcılık, sahtecilik, güveni kötüye kullanma, hileli iflas, ihaleye fesat karıştırma, edimin ifasına fesat karıştırma, suçtan kaynaklanan malvarlığı değerlerini aklama veya kaçakçılık suçlarından adli sicil kaydının bulunmaması.”
- “Mesleğinde fiilen en az beş yıl çalıştığına ilişkin olarak ilgili kurum ve kuruluşlardan alınacak belgeler.”
- “Proje ve uygulama denetçisi inşaat mühendisleri için beş yıllık fiili meslek süresinin en az üç yılında proje hazırlanması ya da incelenmesi konularında fiilen görev yaptığına dair ilgili kurum ve kuruluşlardan alınacak belgeler [18].”

7. ALMANYA’DA UYGULANAN YAPI DENETİM SİSTEMİNDE “DENETÇİLER”

Her ne kadar önceki dönemler için de yapı denetiminden bahsedilebilse de Batı’da ve özellikle Almanya’da yapıya ve yapının denetimine verilen önem 18. Yüzyılın sonlarında ve 19. Yüzyılın hemen başında gerçekleşen Endüstri Devrimi sonrası artmıştır. Her geçen yıl, yaşanan afetlerin de etkisiyle yapı denetimine verilen önemin katlanarak artmasına sebep olmuş ve Almanya’daki yapı denetimi günümüzdeki seviyesine ulaşmıştır.

Endüstri Devrimi ile üretim şekil ve yöntemleri de değişmiş ve eskiye nazaran geniş kapsamda ve çok daha büyük boyutlarda üretim yapılmaya başlanmıştır. Birçok alanda yaşanan bu değişim yapı üretim süreçlerini de oldukça etkilemiştir. Kırsaldan kente şiddetli bir göçün yaşanması gerek konutların gerekse kentsel altyapıların yetersiz oluşu nedeniyle büyük sıkıntıların yaşanmasına neden olmuştur.

Almanya’da 1842 yılında yaşanan büyük Hamburg Yangını ve 1904 yılında meydana gelen Berlin Yangını, kentteki birçok yapının yok olmasına veya ciddi anlamda zarar görmesine neden olmuştur [19]. Meydana gelen afetler halkın yanı sıra yasama organları tarafından kentsel alanlarda yangına karşı alınacak tedbirlerin, yapıların güvenliğinin

sorgulanmasına ve yeni düzenlemelere olan ihtiyacın arttığının anlaşılmasına sebep olmuştur. Başka bir ifadeyle; yaşanan afetlerden elde edilen kazanımlar yapı denetim sisteminin oluşmasına ve gelişmesine önemli katkı sağlamıştır.

Almanya'da 1930'lu yıllardan itibaren yapı üretiminde daha yüksek kalite aranmaya başlanmış ve denetime verilen önem artmıştır. Artık ihtiyacı ve standartları sağlayamayan yapılar için sorumlularının belirlenmesi uygulamasına geçilmiş, 1950'li yıllardan sonra ise birçok denetim sistemi işler hale gelmiştir [20].

Günümüze biraz daha yaklaştığımızda, Avrupa Birliği ülkelerinin 1990 yılında, İngiltere Yapı Denetim Enstitüsünün öncülüğünde Avrupa Yapı Denetimi Ortak Girişimi (The Consortium of European Building Control)'ni kurdukları görülmektedir. Bu ortak girişime üye ülkelerde ağırlıklı olarak iki tip yapı denetim sisteminin uygulandığı görülmektedir,

- Almanya'nın liderliğinde yürütülen katı bir kamu denetimi modeli,
- Fransa'nın öncülüğünde geliştirilen ve uygulanan sigorta odaklı denetim modeli [21].

Almanya'da yapı denetimi uygulamalarına duyulan güven, toplumda oldukça yüksektir. Bu güvenin en önemli nedeni, yapı denetiminin projelerin hazırlanmasından başlayarak yapının tamamlanmasına kadar devam eden birçok sıkı kontrol aşamasını içeren bir süreç olmasıdır. Bu kapsamlı denetim süreci, inşaatın her aşamasında titiz bir kontrol mekanizması sunarak, yapıların güvenli ve kaliteli bir şekilde inşa edilmesini sağlamaktadır.

Almanya'da, özel tip projeler ve yüksek yapıların denetimi, üst denetim kurumu olan "Yüksek İmar ve Yapı Daireleri" ("Oberste Baubehörde") tarafından gerçekleştirilirken; diğer tüm yapıların denetimi alt denetim kurumu olan belediyelerin veya kaza idarelerinin "İmar ve Yapı Müdürlükleri" ("Untere Bauaufsichtsbehörde") yetkisi altındadır. Ruhsat başvurularının incelenmesi ve sonuçlandırılması da bu müdürlüklerin sorumluluğundadır [22].

Alt denetim kurumu olan imar ve yapı müdürlükleri, denetim sorumluluğunu genellikle kendi imkânlarıyla veya özel denetim büroları

vasıtasıyla yerine getirmektedir. Büyük belediyelerde, icra edilecek büyük çaplı projelerin yapı denetiminin sağlanması adına, devlet tarafından da tanınan "Denetim Daireleri" ("Prüfamt") teşkil edilmektedir [23].

Alman yapı denetimi faaliyetlerinde denetçiler "yapı polisi" olarak da adlandırılmaktadır. Bu adlandırmanın nedeni, denetlenen yapı üzerinde polisiye tedbirler alma yetkisine sahip olmalarıdır [23].

Almanya'da "denetim mühendisleri" ("Prüfingenieur"), imar ve yapı müdürlükleri adına kamu görevi ifa etmektedir. Bu mühendisler, yapı sahipleri veya müteahhitlerle doğrudan bir etkileşimde bulunmazlar; dolayısıyla denetim süreci özel hukuk değil, kamu hukuku niteliği taşır. Denetim mühendislerinin, zorunlu denetime tabi yapılarla ilgili sorumlulukları "Almanya Memurlar Kanunu" çerçevesinde belirlenirken, zorunlu olmayan yapılar için bilirkişi veya uzman mühendis olarak taşıdıkları sorumluluk, diğer mühendisler gibi 30 yıl ile sınırlıdır.

Almanya'da yapı denetim faaliyetlerinde denetim mühendislerinin sahip olması gereken belirli yüksek nitelikler bulunmaktadır. Sadece mühendis unvanına sahip olmak, yapı denetiminde denetçi olma yetkisini otomatik olarak sağlamamaktadır [24].

Almanya'da denetim bürolarında çalışan denetim mühendislerinin yetki ve sorumlulukları yasal düzenlemelerle belirlenmiştir. Alman yapı denetim sisteminde denetim mühendisi olabilmek için aranan özel koşullar şunlardır;

1. Başvuru sırasında 35 yaşına ulaşmış olanlar,
2. Final sınavı en az dört yıllık standart bir eğitim programı gerektiren bir teknik üniversite, kolej veya uygulamalı bilimler üniversitesinde veya eşdeğer olarak tanınan bir eğitim kurumunda inşaat mühendisliği alanında lisans derecesini başarıyla tamamlamış olanlar,
3. Başvurunun sunulmasından önceki son on yıl içinde en azından pratik deneyim kazanmış olanlar,

a) En az 7 yılını statik ve inşaat açısından ağırlıklı olarak zor olan inşaat projeleri için yapı

mühendisliği sertifikalarının hazırlanmasında sorumlu bir pozisyonda çalışmış olanlar ve

b) Yapısal ve yapısal olarak zor inşaat projelerinin inşaat yönetimi veya denetiminde yer almış olanlar;

Bu gereklilik, bir Alman üniversitesinde veya yapı mühendisliği alanında eşdeğer olarak tanınan bir eğitim kurumunda tam zamanlı öğretmen olarak ders veren adaylar için geçerli değildir.

4. Hem yazılı hem de sözlü olarak Almanca diline hâkim olanlar [25].

Bir kişi aşağıdaki durumlarda denetçi olamaz;

- Kamu hizmetinde memur olarak çalışan ancak emekli olmayanlar,
- Kamu görevi yapma yeteneğini kaybedenler,
- Mahkeme kararıyla varlıklarının elden çıkarılması kısıtlanmış olanlar,
- İnşaat sektöründe girişimci olarak faaliyet gösterenler,
- İnşaat sektöründe faaliyet gösteren bir şirkette hissesi olanlar veya böyle bir şirketle yakın ekonomik bağlantısı olanlar,
- Tarafsız denetim çalışmasını etkileyebilecek mesleki, mali veya başka bir bağımlılık ilişkisi içinde olanlar.

Denetim mühendisi sahada yaptığı kontrollerde inşaatın onaylı yapı projelerine uygun yapılar yapılmadığını denetler. Aşağıda, görevin eksiksiz yapılması maksadıyla yapı denetim mühendisinden yapılması istenen hususlar belirtilmiştir.

- İtinalı olmak ve vicdani sorumluluk duygusuyla hareket etmek,
- Tarafsız olmak,
- Standart ve yönetmeliklerin eksiksiz gözetimi,
- Yapı sanat ve tekniğinin genel kabul görmüş esaslarına uymak,
- Yeni inşaat yöntemleri ve yapı malzemelerinden istenen yasal taleplerin gözetilmesine dikkat etmek [25],
- Sadece yetkili olduğu dalda denetim yapmak [26].

Alman yapı denetim sistemi, yapı üretim sürecini bütünsel bir şekilde ele alarak, bir yapının tasarım aşamasından anahtar teslimine ve servis ömrünün

bir kısmına kadar devam eden kapsamlı bir süreci içermektedir. Bu sistem, sadece yapı sahibi ve kullanıcıların değil, tüm bireylerin güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. Bu nedenle, özel yapılarda boyut farkı gözetmeksizin en yüksek seviyede güvenilirlik ve mevzuatın gerektirdiği asgari standartların sağlanması zorunlu hale getirilmiştir. Sistemin temel prensibi, yapıların sıkı bir şekilde denetlenmesidir. Bu durum, toplumun denetimlere duyduğu güvenin artmasına ve sigorta boyutunun sınırlı kalmasına neden olmuştur. Ancak sigorta unsuru tamamen sistemin dışında değildir; yapı sahibi ile müteahhit arasında özel bir anlaşma yapılmadığı takdirde, yapının kullanım iznini aldığı tarihten itibaren beş yıl boyunca oluşabilecek hasarların sigortalanması zorunlu kılınmıştır [8].

Alman yapı denetim sisteminin yeterli derecede etkin ve kaliteli olmasının gerekçelerinden önem arz edenler aşağıda sıralanmıştır;

- Denetim mühendisi adaylarında aranan yüksek bilgi düzeyi,
- Yetkili denetim mühendislerinin üstün performans göstermesi,
- Tüketicinin korunması esas faktör olarak belirlenmiş olması,
- Denetim mühendislerinin bağımsız ve tarafsız konumlarının her zaman muhafaza etmeleri,
- Denetim mühendislerinin sadece yetki aldığı disiplinle ilgili denetim yapmaları,
- Mühendisler tarafından; kanun, yönetmelik ve yapı standartlarında yapılan değişikliklerin yakinen takip edilmesidir [26].

Özetle, Almanya'da uygulanan yapı denetim sistemi, yapının projelendirme aşamasından inşaatın tamamlanmasına kadar her aşamada sıkı bir denetime dayanmaktadır. Bu denetim, bürokrasiden arındırılmış, bağımsız özel denetim büroları ve mühendisler tarafından gerçekleştirilmektedir.

8. TÜRK VE ALMAN YAPI DENETİM SİSTEMLERİNDE “DENETÇİ” İŞLEYİŞİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Yapı denetim sistemleri, inşaat sektörünün güvenliğini ve kalitesini sağlamak amacıyla kritik bir rol oynamaktadır.

Almanya ve Türkiye’de yapı denetim sistemleri; yapıların güvenli, sağlıklı ve çevresel etkiler açısından uygun olmasını sağlamak maksadıyla kanunlar ve yönetmeliklerle düzenlenmiştir.

Her iki ülkede de yapı denetim sistemlerinde “denetçi” rolü; yukarıdaki bölümlerde belirtildiği üzere ilgili mevzuatta yer alan şartlar, görevler, sorumluluklar ve yetkilerle tanımlanmıştır.

Alman ve Türk sistemlerinde yapı denetimi yapı izin süreçlerinin zorunlu bir parçasıdır ve inşaat süreçlerinin başından sonuna kadar denetim yapılmaktadır.

Her iki ülkenin denetim sistemlerinde denetçilerde aranan nitelikler bakımından eğitim ve sertifikasyon konularında benzer şartlar aranmaktadır.

Türkiye’de proje ve uygulama denetçisi olmak için 5 yıllık fiili meslek süresinin en az 3 yılında proje hazırlamış ya da incelemiş olması şartı aranırken, Almanya’da en az 10 yıl inşaat mühendisi olarak çalışmış olma, ayrıca en az 2 yıl şantiye şefliği yapmış olma şartı bulunmaktadır.

Türkiye’de denetçiler için alt yaş sınırı bulunmazken, üst yaş sınırı 75 olarak belirlenmiştir. Almanya’da ise denetçilerin en az 35 yaşında olmaları aranmaktadır.

Türkiye’de uygulanan yapı denetim sisteminde denetçiler, gerekli durumlarda inşaatın durdurulması için ilgili makamlara bildirimde bulunmaktadır. Alman yapı denetim mühendisleri ise kamu gücü içeren yetkilere sahiptir. Denetçiler, zaman zaman bireylerin haklarını sınırlandıracak kolluk tedbirlerine de başvurabilir. Yüksek İmar ve Yapı Daireleri ile İmar ve Yapı Müdürlükleri tarafından yürütülen faaliyetlerde denetçiler, ruhsat verme, yapının inşasını durdurma, yapı

denetimden geçmemiş imalatları yıktırma ve para cezası uygulama gibi işlemleri yerine getirebilmektedir.

Sorumluluk konusunda ise, Türkiye’de denetçilerin sorumluluğu yapı kullanma izninin alındığı tarihten itibaren, yapının taşıyıcı sisteminden dolayı 15 yıl, taşıyıcı olmayan diğer kısımlarda ise 2 yıl iken, Almanya’daki denetçilerin sorumlulukları denetledikleri yapılar için yasal olarak 30 yıldır.

Almanya, deprem riski düşük bir ülke olduğu için yapı denetimi daha çok enerji verimliliği, yangın güvenliği ve çevre standartlarına odaklanırken, Türkiye deprem bölgesinde yer aldığı için denetimin büyük kısmı, binaların depreme dayanıklılığı üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Almanya ve Türkiye’deki yapı denetim sistemlerinde “denetçi” rolü birtakım benzerlikler ve önemli farklılıklar göstermektedir. Almanya’da daha sıkı bir eğitim ve deneyim gereksinimi ile bağımsız bir denetim yapısı bulunurken, Türkiye’de son yıllarda denetim sisteminin etkinliği sorgulanmaktadır. Her iki ülkede de yapı güvenliği için denetçilerin rolü kritik olsa da sistemlerin işleyiş biçimleri farklılık göstermektedir.

9. SONUÇLAR

Yapı Denetim Sistemi, yaşam kalitesi ve güvenlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu sistem sayesinde, en son teknolojilerin kullanılmasıyla daha modern, kullanışlı ve güvenilir yapılar inşa edilirken, düzensiz kentleşmenin de önüne geçilmektedir. Ayrıca, yapı denetim sistemi, yapı hasarları nedeniyle zarar gören bireylerin haklarını korur ve olası zararların tazmin edilmesini sağlar.

Kanun koyucular tarafından mevzuatta görülen aksaklıklar düzeltilse ve eskisine göre daha etkin bir denetim mekanizması oluşturulsa bile, yapılarda istenen sağlamlık ve güvenilirliğin tam anlamıyla oluşması için yapı denetim sektöründe yer alan bütün paydaşların görevlerini ahlak, vicdan ve dürüstlük ilkelerine göre yapmaları önem arz etmektedir.

Yapı denetimine ne kadar erken başlanırsa o kadar etkili olmaktadır. Proje ve tasarım aşamasında yapılacak etkili denetim ile daha kaliteli ve maliyet-etkin yapılar ortaya çıkarmak mümkün olmaktadır.

Türkiye ve Almanya'daki yapı denetim sistemleri, her iki ülkenin sosyo-ekonomik ve kültürel yapılarına göre farklılıklar göstermektedir. Türkiye'de yapı denetim sistemi, 1999 Marmara Depremi sonrası oluşturulan yasal çerçevelerle şekillenmiştir. 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun ile başlayan süreç, yapı denetim kuruluşlarının kurulmasıyla devam etmiştir.

Türkiye'de yapı denetim süreci, genellikle özel sektöre dayalı bir model izlerken, denetim mekanizmalarının yeterliliği ve sistemin etkinliği konusunda tartışmalar sürmektedir.

Almanya'da ise yapı denetimi daha merkezi bir yapıya sahiptir. Almanya'daki sistem, mühendislerin ve mimarların sorumluluğunu artırarak, inşaat projelerinin her aşamasında daha sıkı bir denetim sağlamaktadır. Ayrıca, Almanya'da inşaat izinleri ve denetimleri genellikle daha sistematik bir şekilde yürütülmekte ve kamu binaları da dâhil olmak üzere tüm yapılar kapsamlı bir şekilde denetlenmektedir. Türkiye'de ise, yapı denetim sisteminin etkinliği, denetçilerin yeterlilikleri ve bağımsızlıklarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, denetim kuruluşlarının, denetçilerin eğitimini ve sürekli gelişimini sağlaması kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, Türkiye'deki yapı denetim sistemi, geçmişte yaşanan felaketlerden ders alarak gelişmiş olsa da hala uygulamada karşılaşılan problemler bulunmaktadır. Almanya'nın daha merkezi ve sistematik yaklaşımı, Türkiye için örnek teşkil edebilir. Her iki ülke de yapı güvenliğini artırmak için sürekli olarak sistemlerini gözden geçirmeli ve geliştirmelidir. Yapı denetimi alanında uluslararası iş birlikleri ve deneyim paylaşımı, her iki ülkenin de bu alandaki eksikliklerini gidermesine yardımcı olabilir.

Yapı denetim alanında daha önce gerçekleştirilen çalışmaların dikkate alınması, Türkiye'deki yapı denetim sisteminin gelişimi için önemli bir faktör olacaktır ve yapı denetiminin etkinliğini artıracaktır.

Bu makalenin bir sonucu da daha önce yapı denetim alanında yapılan çalışmalarla ilintili olmasıdır. Bu bağlamda, yapı denetim sistemi içinde yer alan kurum ve kuruluşların, geçmişteki

deneyimlerden faydalanılarak uygulamaları hayata geçirmesi Türkiye'de yapı denetiminin gelişimine önemli katkılar sunacaktır.

Yazar Katkısı: Bu makale, İbrahim Elveren'in "Küresel Perspektif ile Yapı Denetim Sistemlerinin Bibliyometrik Analizi ve Türkiye ile Almanya'daki Yapı Denetçilerinin Karşılaştırılması" başlıklı Yüksek Lisans tezinin gelişmesi amaçlanarak Prof. Dr. Mürsel Erdal'ın katkılarıyla hazırlanmıştır.

Teşekkür: Yazarlar Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü ile Yapı Denetim Kuruluşları Birliği Derneği'ne yapılan fikir paylaşımları için teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

10. KAYNAKLAR

- [1] G. Usta, "Dünya'da Meydana Gelen Afetlerin İstatistiksel Olarak Analizi (1900-2022)," *Gümüşhane Üniv. Sos. Bilim. Derg.*, c. 14, sy. 1, ss. 172-186, 2023.
- [2] EM-DAT The International Disaster Database, "Inventorying Hazards and Disasters Worldwide Since 1998," Dec. 2024. [Online]. Available: <https://www.emdat.be/>
- [3] N. Türkoğlu, "Türkiye'nin yüzölçümü ve nüfusunun deprem bölgelerine dağılışı," *Ankara Üniv., Türkiye Coğr. Arş. ve Uyg. Merk. Derg.*, c. 8, ss. 133-148, 2015.
- [4] D. A. Açık, "Yapı denetiminin kalite üzerine etkisi ve Konya örneği," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 1998.
- [5] 3194 Sayılı İmar Kanunu, sy. 18749, 09.05.1985.
- [6] E. Karaoğlu, "4708 Sayılı Yapı Denetim Kanunu'nun Denetimdeki Verimliliği," Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [7] F. Sakallı, "Yapı Denetim Sisteminde Yaşanan Sorunlar, 4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Kanun'daki Eksiklikler ve Çözüm Önerileri," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [8] R. Kural, "İnşaat Sektöründe Yapı Denetimi ve Afyonkarahisar İlindeki Uygulamaların

- Araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2015.
- [9] İ. H. Duman, “100 Soruda Yapı Denetimi,” 3. Baskı, Seçkin Yayınevi, ss. 32, Ankara, 2022.
- [10] V. B. Boysal, “4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun Kapsamındaki Yapı Denetim Sistemi ve Sorunları Üzerine Bir Saha Çalışması Osmaniye İli Örneği,” Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, 2022.
- [11] V. Engin, B. Özbil, “Türkiye’de Uygulanan Yapı Denetim Sisteminin Sorunları ile İlgili Yaklaşımlar,” *Kent Akad.*, c. 15, sy. 4, ss. 1575-1590, 2022.
- [12] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, “4708 Sayılı Yapı Denetimi Kanunu & Uygulamaları,” Seminer Sunumları, 2013.
- [13] Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, Yapı Denetim Daire Başkanlığı Mevzuatı, 2024, yapiisleri.csb.gov.tr/yapi-denetimi-daire-baskanligi-mevzuati-i-90235, (Erişim: 06.12.2024).
- [14] M. Yılmaz, E. Köymen, “Türkiye’de Yapı Denetim Sistemi ve Sorunları Üzerine Teorik Bir İnceleme,” *J. Soc. Humanit. Sci. Res.*, c. 7, sy. 50, ss. 330-339, 2020.
- [15] M. Aslan, “Yapı Denetimi Kanununun Uygulama Problemlerinin Araştırılması ve Çözüm Önerileri Geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce, 2023.
- [16] R. Akbıyıklı, G. Opçin, M. Akdemir Akdemir, E. Gündüz, “Türkiye’de Yapı Denetim Kavramı, Amacı, Yasal Dayanağı ve Uygulamaları Üzerine Bir İnceleme,” *Uluslararası Katılımlı 7. İnşaat Yönetimi Kongresi*, ss.217-229, Samsun, 2017.
- [17] 4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun, sy. 24461, 13.07.2001.
- [18] 26778 Sayılı Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği, sy. 26778, 05.02.2008.
- [19] D. Schubert, “The Great Fire of Hamburg, 1842: From Catastrophe to Reform,” *Hafen City University*, Hamburg, Almanya, 2012.
- [20] M. Güleş, “4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanunun Uygulanmasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri,” Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2019.
- [21] İ. Öztürk, “Yapı Denetimde Uygulama ve Mühendislerin Denetimdeki Sorunları,” EMO İst. Şube 41 Dönem Yapı Denetim Komisyonu Raporu, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İstanbul, 2019.
- [22] F. Meijer, H. Visscher, “Quality Control of Constructions: European Trends and Developments,” *Int. J. Law Built Environ.*, vol.9, no.2, pp. 143-161, 2017.
- [23] İ. Zeyrek, “İdare Hukuku Açısından Yapı Denetimi,” Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2019.
- [24] T. De Decker, “Building Control Systems and Technical Control Activities in Belgium, Germany and The United Kingdom,” Master's thesis, Civil Engineering, Instituto Superior Técnico Lisboa, Portekiz, 2013.
- [25] *Bauprüfverordnung*. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://dejure.org/gesetze/BauPruefVO/10.html>, Erişim tarihi: 04.12.2024.
- [26] M. Ürgüplü, “Almanya’da Yapı Denetimi,” F. Mönnig makalesinden çeviri, *Türkiye Müh. Haber. Derg.*, sy. 373, ss. 49–57, 1994.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Pandemi Süreçlerinin İnşaat Sektöründeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Covid-19 Örneği

Evaluation of the Impact of Pandemic Processes on the Construction Industry: Covid-19 Example

Fehmi Çivici^{1,*}, Ümmügülsüm Kılıç²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye.

²Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, Türkiye.

Geliş / Received: 23.12.2024

Kabul / Accepted: 16.02.2025

*Sorumlu Yazar: Fehmi Çivici fcivici@balikesir.edu.tr

ÖZ: Pandemiler tüm dünyada etkili olmuş ve insanoğlu üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmuştur. Bunların en tipik örneği kısa zaman önce yaşadığımız Covid-19 pandemisidir. Çin kökenli olan pandemi öngörülemez krizlere yol açmıştır. Bu çalışmanın konusunu Covid-19 pandemisinin ülkemiz için ekonomi alanında lokomotif rol oynayan inşaat sektörüne etkilerinin incelenmesini oluşturmaktadır. Bu etkiler, akademik içerikli tez, makale vb. 108 çalışma seçilerek 15 kategoride incelenmiştir. Çalışma sonuçları, maliyet ve fiyat artışları, projelerde kısmi veya tam zamanlı durmalar, işsizlik oranlarında artış ve genel ekonomik gerileme gibi sorunların ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca, müstakil, prefabrik, bahçeli ve bungalov tarzı konutlara olan talebin arttığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, acil durum planlarının hazırlanması, giyilebilir duyuşal cihazların kullanımının artırılması, kredi destek programlarının geliştirilmesi ve düşük faiz oranlarının teşvik edilmesi gibi uygulamaların faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Bu çalışma da elde edilen sonuçların benzer pandemi süreçlerinin tekrar yaşanması halinde eylem planlarının hazırlığı, önlemlerin belirlenmesi ve çözüm yöntemlerinin uygulanması konularında bir yol gösterici olması açısından önemli olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Pandemi, covid-19, inşaat sektörü, maliyet artışı, proje gecikmesi.

ABSTRACT: Pandemics it has had an impact all over the world and has had negative consequences for humankind. The most typical example is the recent Covid-19 pandemic we are experiencing. China origin pandemic has led to unpredictable crises. The subject of this study was the Covid-19 pandemic. construction sector, which plays a locomotive role in the economy for our country effects of the effects of the academic studies. These effects were analyzed by selecting 108 studies such as theses, articles, etc. with academic content and analyzing 15 category. Study results, cost and price increases, partial or full-time stoppages in projects, increased unemployment rates and general problems such as economic decline. Also, increased demand for detached, prefabricated, garden and bungalow-style housing has been determined. In this context, preparation of emergency plans, wearable increasing the use of sensory devices, credit support programs development and the promotion of low interest rates are beneficial. will be the most important factor in the future. The results obtained in this study are similar Preparation of action plans in case pandemic processes occur again, a way forward in identifying measures and implementing solutions will be important in terms of being indicative.

Keywords: Pandemic, covid-19, construction industry, cost increase, project delay.

1. GİRİŞ

Belirli bir bölgede belirli bir insan topluluğundan belirli bir periyotta beklenenden daha fazla vaka

görülmesi salgın olarak tanımlanır. Salgın hastalıklar kişiler ile birlikte tüm çevrelerini sosyal ve ekonomik anlamda etkilemektedir. Salgının dünya genelinde görülmesi olayına pandemi denir.

Dünya Sağlık Örgütü(DSÖ) daha önce toplumlar içerisinde tespit edilmemiş bir hastalık türü olması, bulaşıcı olması ve insanlar arasında çok kolay yayılma hızına sahip olması şeklinde üç şartı sağlaması halinde pandemi olarak tanımlamaktadır [1]. Günümüze kadar 21 farklı pandemi ile mücadele eden insanoğlunu sağlık başta olmak üzere ekonomi ve diğer sektörlerde etkilemiştir [2]. Pandemielerin geçmişte yaşandığı ve gelecekte de yaşanacağı düşünülür. Bugüne kadar yaşanan salgın hastalıklardan veba, kolera, çiçek ve ebola en önemlileri olmasının yanı sıra insanlık üzerinde en büyük etkileri bırakmıştır. Salgına bağlı olarak sosyal temastan uzaklaşan insanlar turizm, ulaşım, otel, restoran vb. sektörleri kullanmamıştır. Dolayısı ile iç ve dış ticaret alanları kısıtlamaya uğramıştır. Çin’de ilk olarak görülen Covid-19 pandemisi DSÖ tarafından 11 Mart 2020 tarihinde ilan edilmiştir. Bu tarihte 114 farklı ülkede 118 000 enfekte vaka olduğu tespit edilmiştir [3]. Dünya genelinde Covid-19 pandemisinin inşaat sektörü paydaşları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok araştırma yürütülmüştür. Birçok makale dünyanın farklı yerlerinde salgının ekonomi ve inşaat sektörüne etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. Wang ve diğerleri, Çin’de inşaat mühendislerine uyguladıkları anket ile sektördeki sorunları ortaya koymuşlardır [4]. Sami Ur Rehman ve diğerleri, BAE ölçeğinde proje gecikmeleri, nakit akışı, seyahat kısıtlamaları, sağlık ve güvenlik sorunları, malzeme ve ekipman temini vb. faktörleri vurgulamışlardır [5]. Kisi ve Sulbaran, ABD inşaat sektöründeki maliyetlere tedarik zinciri sorunlarının nasıl etki ettiğini bir anket ile çalışmışlardır [6]. Pandeminin Ülkemiz özelinde etkisini inceleyen Gümüşburun Ayalp ve Çivici, inşaat sektöründe artan maliyetler ve nakit akışı sorunlarının başlıca etken olduğunu anket yoluyla ölçmüşlerdir [7]. Alboğa ve diğerleri, geniş bir literatür taraması ile pandemi döneminde işgücü sıkıntısı, proje finansman zorlukları, projelerde gecikmeler ve maliyet artışları olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışanların yaşadığı zihinsel ve psikolojik sorunlara bağlı verimliliğin düşmesi ve kalitenin azalması sonuçlarına ulaşmışlardır [8] Bu çalışmada ise, Covid-19 pandemisinin ülkemiz üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Pandeminin etkilediği alanların içerisinde bulunan inşaat sektörünün durumu dünya ve ülkemiz genelinde yapılan 108 çalışma esas alınarak 15 farklı kategoride incelenmiştir.

2. COVID-19 PANDEMİSİNİN TÜRKİYE EKONOMİSİNE ETKİLERİ

Başta sağlık sektörü olmak üzere ekonomi ve birçok sektörde çok sert etkisini gösteren Covid-19 pandemisi ekonomide daralma yaşanmasına neden olmuştur. Alınan önlemlere bağlı olarak ekonomik işleyiş olumsuz etkilenmiş ve birçok işyeri kısa süren veya süresiz olarak işyerlerini kapatmak zorunda kalmıştır. Ülkemize giriş-cıkışların kapatılması, ulaşım ağının kısıtlamaya uğraması, eğitim öğretimin duraksaması sonucu ara verilmesi, vardiyalı çalışma sistemi ve esnek çalışma sistemine geçilmesi ekonomik anlamda olumsuzluklar yaratmıştır [9].

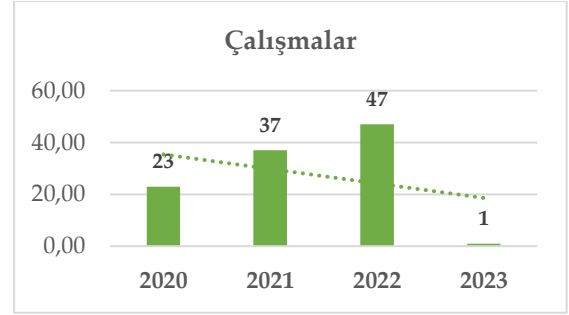
Salgının ekonomik alanda daralmalara yol açması, işgücü piyasasını da olumsuz etkileyerek işsizlik oranlarında artışa neden olmuştur. TÜİK’in 2020 yılı işgücü istatistiklerine göre, Mayıs ayındaki işsizlik oranı %12,9 olarak tespit edilirken, bu oran Haziran ve Temmuz aylarında %13,4 seviyesine yükselmiştir [10]. Mart 2020 tarihinde İstikrar Kalkınma Paketi duyurulmuş, ardından 16 Nisan 2020 tarihinde ekonomik tedbirleri içeren yasa teklifi kabul edilmiştir [3]. Salgın süresince uygulamaya konulan önlemler arasında kısa çalışma ödeneği, kredi teşvikleri, vergi indirimleri, kira sözleşmelerinde düzenlemeler, faiz oranlarında düşüş, sağlık personelinin istihdam edilmesi ve maddi yardımlar gibi çeşitli tedbirler yer almıştır [11]. Aktif vaka sayısındaki bir standart sapma şokunun etkileri üzerine yapılan incelemelerde, elektrik, gıda, hizmet, toptan satış ve perakende ticaret sektörlerinin şokun ilk döneminde pozitif bir tepki verdiği, ancak ikinci dönem itibarıyla bu tepkilerin negatife dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu tepkiler zamanla artış ve azalış dalgalanmaları sergileyerek beşinci dönem itibarıyla etkisini yitirmiştir. Ulaştırma ve teknoloji sektörleri ise şokun ilk üç ve dördüncü dönemine kadar negatif tepki verirken, daha sonraki dönemlerde bu tepkiler pozitif dönüşmüştür. Ancak bu etkiler de dördüncü ve beşinci dönem sonrasında tamamen sona ermiştir. Pandemi süresince en çok etkilenen sektörlerin teknoloji ve ulaştırma sektörleri, en az etkilenen sektörlerin ise toptan satış ve perakende ticaret sektörü olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, Covid-19 pandemisinin sektörlere olan etkilerinin asimetrik olduğunu, yani her sektörün kendi özgün özellikleri doğrultusunda

farklı şekillerde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Pandemi döneminde, teknoloji sektöründeki yazılım ve donanım firmaları, teknoloji ürünlerine yönelik kısıtlamalar nedeniyle önemli bir talep daralması yaşamıştır. Buna karşın, bireylerin belirsizlik ortamında bazı temel ürünleri stoklaması ve firmaların çevrimiçi sipariş alımlarını sürdürmesi, toptan satış ve perakende ticaret sektöründe talep artışına yol açmıştır. Ayrıca, şehirler arası ve ülkeler arası ulaşım kısıtlamaları ile sosyal izolasyon uygulamalarının da ulaştırma sektörü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ifade edilebilir [12].

3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ ve BULGULAR

Bu bölümde; Covid-19 pandemisinin inşaat sektörüne etkilerini temel alan tez, makale ve benzeri çalışmaların ayrıntılı bir analizi yer almaktadır. Araştırmada incelenecek tez ve makalelerin seçimi için tarama süreci, Google Scholar, Web of Science, Connected Papers, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve Dergipark gibi elektronik veri tabanları kullanılarak 2020-2023 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Konuya ilişkin en uygun anahtar kelimeler kullanılarak 1215 çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar arasından 1107 tanesi elenerek 108 çalışma esas alınmıştır. Bu makale çalışması Ümmügülüm KILIÇ'ın "Covid-19 Pandemi Sürecinin İnşaat Sektörüne Etkileri" başlıklı yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir [13]. Şekil 1, değerlendirmeye alınan 108 çalışmanın yıllara göre dağılımını göstermektedir [13].

Covid-19'un inşaat sektörünü etkileyen temel faktörleri 10 kategoride inceleyen Gümüşburun Ayalp ve Çivici [7]'nin çalışması bir sınıflandırma örneği olarak alınmıştır. Çalışmadan yola çıkarak 15 farklı kategori belirlenmiştir.

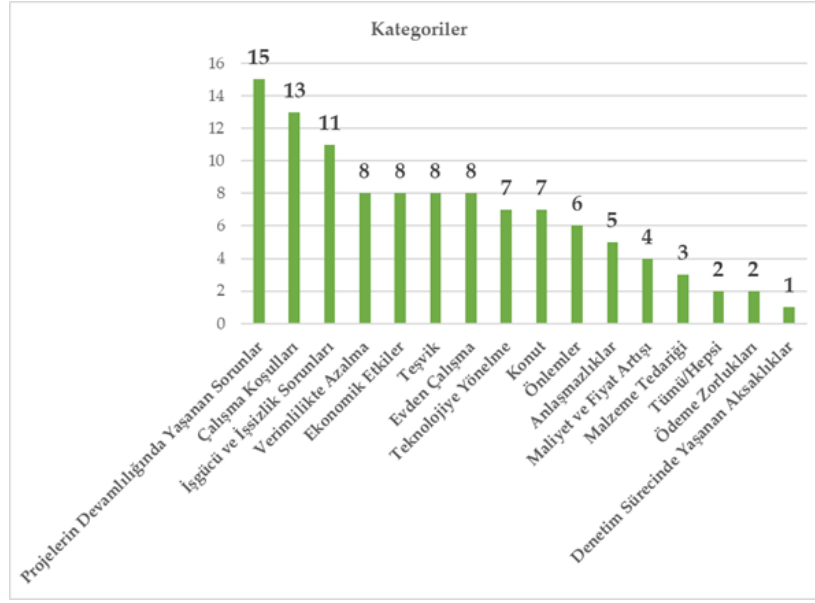


Şekil 1: Çalışmaların yıllara göre dağılımı [13].

Bunlar;

- Maliyet ve fiyat artışları
- Çalışma koşulları
- Evden çalışma
- Ödeme zorlukları
- Projelerin devamlılığında yaşanan sorunlar
- İşgücü ve işsizlik sorunları
- Teknolojiye yönelme
- Verimlilikte azalma
- Anlaşmazlıklar
- Denetim sürecinde yaşanan aksaklıklar
- Konut Sektörü
- Ekonomik etkiler
- Teşvik
- Önlemler
- Malzeme Tedariği dir.

Şekil 2, belirlenmiş olan kategorilere göre çalışmaların dağılımını göstermektedir. Bu dağılıma göre; pandemi sürecinde yaşanan etkiler konusunda "işgücü ve işsizlik sorunları", "çalışma koşulları" ve "projelerin sürekliliğinde yaşanan sorunlar" üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.



Şekil 2: Çalışmaların kategorilere göre dağılımı [13].

Türkiye Odalar ve Borsalar Birliğinin TÜİK tarafından açıklanan şirket, kooperatif ve gerçek kişilere ait işletmeler ile ilgili Kurulan/Kapanan Şirket İstatistiklerinin 5429 sayılı kanun uyarınca Resmi İstatistik kapsamında yayımlanması sonucunda 2018, 2019, 2020, 2021 ve 2022 yılları aralık ayı itibariyle Kurulan/Kapanan Şirket bilgilerinin genel yıllık değerlendirmesi yapılarak Şekil 3’de görüldüğü gibi,

- 2019 yılında 2018 yılına göre kapatılan şirket sayısında %3,36 oranında artış;
- 2020 yılında 2019 yılına göre kapatılan şirket sayısında %13,52 oranında artış;
- 2021 yılında 2020 yılına göre kapatılan şirket sayısında %7,74 oranında artış;
- 2022 yılında 2021 yılına göre kapatılan şirket sayısında %41,43 oranında artış tespit edilmiştir[14].

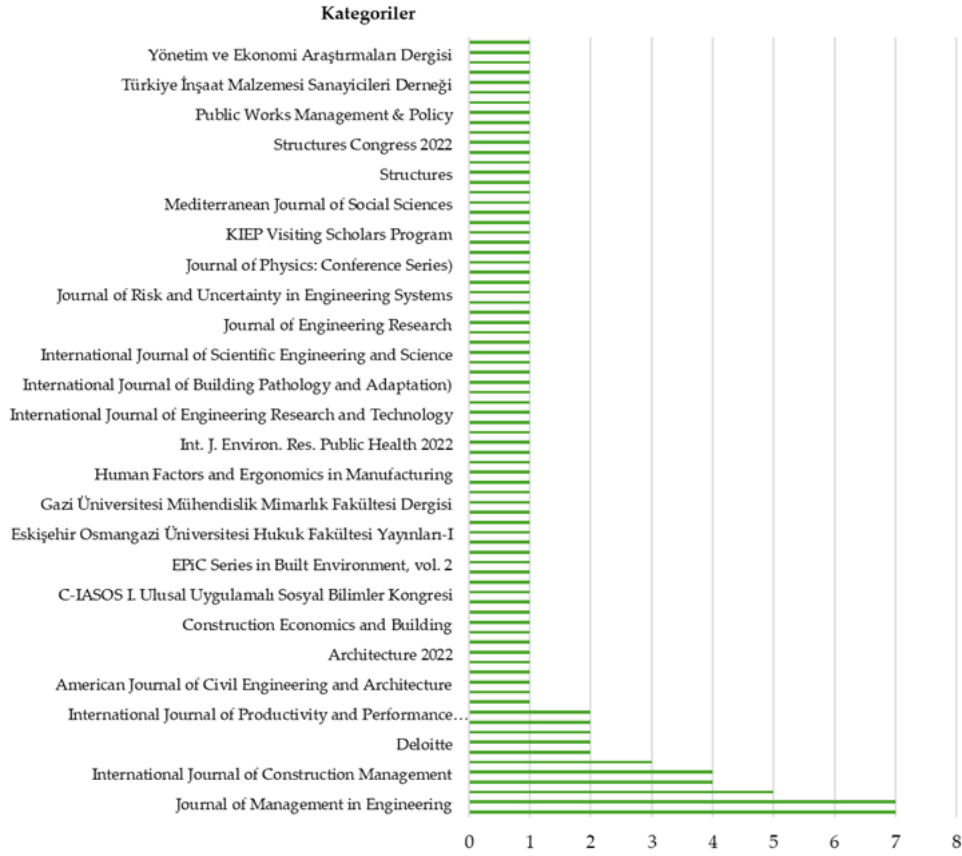
Şekil 4 incelendiği takdirde 2020 yılı ile birlikte dış hat uçuş sayılarında ciddi oranda düşüş yaşanmış olup 2022 yılı itibariye sayıların normal seviyelere ulaştığı görülmüştür[15]. Ayrıca esas alınan çalışmaların yayımlandıkları kuruluşa göre sınıflandırılmasını Şekil 5 vermektedir.



Şekil 3: Kapanan şirket istatistikleri [14].



Şekil 4: Dış hat uçak trafiği istatistikleri [15].



Şekil 5: Çalışmaların yayımlandıkları dergi, kuruluş ve konferanslara göre dağılımları [13].

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Covid-19 pandemisinin inşaat sektörü üzerine etkilerini belirlemek için literatür taraması yapılarak 108 öncül çalışma ele alınmıştır. Covid-19 etkisi 15 farklı kategoriye göre incelenmiştir. İncelemeye bağlı elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

Covid-19 pandemisinin maliyet ve fiyat artışlarına sebep olmakla birlikte işgücü maliyetlerini arttırabileceği öngörülmüştür.

- Çalışma koşulları kategorisinde ise; şantiyelerde koruyucu önlemlerin alınması, çalışanlara hijyen ve temizlik konularında eğitim verilmesi ve acil durum planları yapılması önerilmiştir.
- Pandeminin getirdiği kısıtlamalar doğrultusunda evden çalışma sistemine geçiş yapılmış, bu sistemle şantiye denetim masraflarının azaltılması, kişisel koruyucu ekipmanların temin edilmesi, inşaat alanlarına giriş-çıkışların düzenlenmesi, video konferans uygulamalarının ve giyilebilir teknolojik

cihazların kullanılmasının yararlı olacağı belirtilmiştir.

- Covid-19 pandemisi sebebi ile işlerin yavaşlamasının ödeme zorluklarını doğurabileceği değerlendirilmektedir.
- Projelerin devamlılığında karşılaşılan sorunlar kapsamında, kısmi ya da tam zamanlı duraksamaların olduğu, proje sürelerinde uzlaşmazlıklar yaşandığı tespit edilmiştir.
- Covid-19 kısıtlamalarına bağlı işsizlik oranlarında artış görüldüğü, bu kapsamda alınacak önlemler ile kalifiye eleman yetiştirilmesi, ekonominin canlandırılması sağlanmalıdır denmektedir.
- Pandemiyle birlikte teknoloji kullanımına yönelimin arttığı, seyahat için harcanan zaman ve maliyetlerin azaldığı, devlet desteklerinin bu süreçte faydalı olduğu değerlendirilmiştir.
- İnşaat sektörü verimliliği birçok parametreye bağlı olmakla birlikte Covid-19'un insan üzerindeki etkilerini azaltmak adına motivasyon derecelerini arttırıcı önlemler alınması gerektiği ifade edilmektedir.
- Covid-19 pandemisi ile gelen kısıtlamalar şantiyelerdeki denetim sürelerinin azalması ve

uzaktan denetim yollarının risk oluşturmaması uzaktan denetim yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

- Pandemi ile birlikte sosyal temastan uzaklaşan insanlar müstakil, prefabrik, bahçeli, bungalov ve yazlık türü barınma koşullarına yönelmişlerdir.
- Pandemi ile birlikte dünya genelinde ekonomi alanında şok etkisi yaşanmış ve ülkelerin bu duruma karşı çeşitli önlemler aldıkları belirtilmektedir.
- Teşvik politikaları kapsamında vergilerin düşürülmesi, nakit desteği, kredi destekleri, düşük faizli krediler gibi uygulamaların yanı sıra çalışanlara maddi ve psikolojik destek sağlanmasının faydalı olacağı öngörülmüştür.
- Yeni teknolojilerin uygulanması gerektiği, işletme prosedürlerinin, politikaların ve yönetmeliklerin güncellenmesinin yanı sıra hükümet desteklerinin süreçlerin iyileştirilmesine katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir.
- Pandemi süresince sınırların kapatılmasına bağlı olarak tedarik problemlerinin yaşandığı belirtilmektedir. Bu problemin alternatif kaynaklara yönelim ve teknolojinin kullanımı sayesinde aşılabileceği değerlendirilmektedir.
- Pandeminin olumsuz etkilerinin yanı sıra güncel teknolojilerin gelişimine olumlu katkıları olduğu görülmüştür. Çalışma, eğitim ve sosyal yaşamın dijital platformlara taşınması, e-ticaretin yaygınlaşması gibi faktörler, dijitalleşme sürecini hızlandırmıştır.

Bu sonuçlar, öngörülmesi güç durumlarda yaşanma ihtimali bulunan zorlukların en düşük seviyelere getirilebilmesi için malzeme temin sürecinin alternatif planlarının daha önceden kararlaştırılması, çalışanlara gerekli eğitimlerin verilmesi, proje sürecinde ayrıntı değerlendirme teknoloji kullanımının artırılması, işgücünde kalifiye personelin çalıştırılmasının desteklenmesi, denetimlerin sahada etkin şekilde uygulanmasının, devlet desteklerinin netleştirilmesinin ve birey odaklı müstakil yaşam tarzının tercih edilmesinin süreci kolaylaştıracağı tespit edilmiştir. Bu çalışmada incelenen 108 eser ile belirlenen öngörüler doğrultusunda pandemiler konusunda bilgi birikimimiz artmış olacaktır. Yapılan çalışma benzeri durumlarda pandemi etkilerinin belirlenmesine bağlı

politikaların ve planların güncellenmesinde önemli katkıyı literatüre sunmaktadır.

Not: Bu çalışma, Ümmügülsüm KILIÇ'ın "Covid-19 Pandemi Sürecinin İnşaat Sektörüne Etkileri" başlıklı BAUN, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yaptığı yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Yazar Katkısı: Her iki yazarda literatür taraması, araştırma yönteminin oluşturulması, makale yazım ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışmaları: Yazarlar çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedirler.

5. KAYNAKLAR

- [1] A. Ataç ve M. Uçar, "Önemli Bulaşıcı Hastalıklar ve Yaşam Sürecine Etkileri," *Bilim Tarihi Araşt.*, c. 20, sy. 14, ss. 33-42, 2006.
- [2] İ. Sucu, "Yeni Dünya Düzeninde Dönüşümün İletişim ve Medyadaki İlk Adımları: Covid-19 Sonun Başlangıcında Yeni Bir Dijital Çağ," *İnsan Sos. Bilim. Derg.*, c. 3, sy. 2, ss. 556-566, 2020.
- [3] İ. Arslan ve S. Karagül, "Küresel Bir Tehdit (COVID-19 Salgını) ve Değişime Yolculuk," *Üsküdar Üniv. Sos. Bilim. Derg.*, c. 10, ss. 1-36, 2020.
- [4] Z. Wang, X. Cai, and Z. Liu, "Survival and Revival: Transition Path of the Chinese Construction Industry During the COVID-19 Pandemic," *Eng. Manag. J.*, vol. 35, no. 4, pp. 333-345, 2022.
- [5] M. S. U. Rehman, M. T. Shafiq, and M. Afzal, "Impact of COVID-19 on project performance in the UAE construction industry," *J. Eng., Des. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 245-266, 2022.
- [6] K. P. Kisi and T. Sulbaran, "Construction cost and schedule impacts due to COVID-19," *J. Leg. Aff. Dispute Resolut. Eng. Constr.*, vol. 14, no. 4, pp. 04522024, 2022.
- [7] G. Gumusburun Ayalp and T. Çivici, "Factors affecting the performance of construction industry during the COVID-19 pandemic: a case study in Turkey," *Eng., Constr. Archit. Manag.*, vol. 30, no. 8, pp. 3160-3202, 2023.
- [8] Ö. Alboğa, B. Ün, G. Çelik Tantekin, and S. Aydın, "Impacts of Covid-19 on the construction sector," *8th Int. Proj. Constr. Manag. Conf. (IPCCM)*, Istanbul, Turkey, 2024.

- [9] S. Yücel ve İ. Durak, "COVID-19'un BIST İmalat Sektörü Firmalarına Olan Finansal Etkilerinin Finansal Oranlar ve İstatistiksel Tekniklerle İncelenmesi", *Muhasebe Finansman Derg.*, c. 90, ss. 101-126, April 2021.
- [10] R. Bulut ve Ç. Pınar, "COVID-19 pandemisi döneminde Türkiye'de istihdam ve işsizlik," *Oğuzhan Sos. Bilim. Derg.*, c. 2, sy. 2, ss. 217-225, 2020.
- [11] E. Eroğlu, "Covid-19'un Ekonomik Etkisinin ve Pandemiyle Mücadele Sürecinde Alınan Ekonomik Tedbirlerin Değerlendirilmesi," *Int. J. Public Finance*, c. 5, sy. 2, ss. 211-236, 2020.
- [12] F. Bostan ve M. Karadağ, "COVID-19 pandemi krizinin Türkiye ekonomisi üzerine sektörel etkileri: BIST sektör endeksleri örneği," *Doğuş Üniv. Derg.*, c. 24, sy. 2, ss. 497-512, 2023.
- [13] Ü. Kılıç, "Covid-19 Pandemi Sürecinin İnşaat Sektörüne Etkileri," Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.
- [14] Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (Ocak, 2025). Kurulan/Kapanan Şirket İstatistikleri. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.tobb.org.tr/BilgiErisimMudurlugu/Sayfalar/KurulanKapananSirketistatistikleri.php>
- [15] Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü (Mayıs 2023). Havayolu Sektör Raporu, [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.dhmi.gov.tr/Lists/HavaYoluSektorRaporlari/Attachments/16/2022-Havayolu-Sektor-Raporu.pdf>.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Sosyal Örümcek Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Düzlem Çelik Çerçevelerin Optimum Boyutlandırılması

Optimum Design of Plane Steel Frame Using the Social Spider Optimization Algorithm

Perihan Efe^{1,*}, Metin Yetkin²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

²Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 24.11.2024

Kabul / Accepted: 20.02.2025

*Sorumlu Yazar: Perihan Efe pefe@balikesir.edu.tr

ÖZ: Günümüzde doğa olaylarını taklit ederek geliştirilen algoritmalar araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmektedir. Bu tür algoritmalar birçok mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle de yapı mühendisliğinde çelik yapıların optimum tasarımı konusunda bu tür algoritmalar kullanılarak yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada da, düzlem çelik çerçevelerin minimum ağırlıklı optimum tasarımını gerçekleştirmek için Sosyal Örümcek Optimizasyon (SSO) algoritması geliştirilmiştir. Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması dişi ve erkek örümceklerin doğadaki davranışları göz önüne alınarak geliştirilen bir yöntemdir. Geliştirilen bu algoritma visual basic applications (VBA) programlama dilinde yazılmış ve SAP2000 programıyla entegrasyonu sağlanmıştır. Düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımında Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü-Yük ve Dayanım Faktörü Tasarımı (AISC-LRFD) şartnamesi kullanılmıştır. Optimum tasarımda deplasman, göreceli kat ötelemesi, mukavemet kısıtlayıcıları ve ayrıca uygulanabilirlik açısından kesit boyut kısıtlayıcıları da dikkate alınmıştır. Çalışmada, algoritmanın performansını test etmek için literatürden seçilen ve farklı yöntemlerle optimum tasarımı gerçekleştirilen düzlem çelik çerçeve örnekleri göz önüne alınmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tasarım sonuçları SSO algoritmasının güçlü ve kullanılabilir bir algoritma olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, Optimum tasarım, Düzlem çelik çerçeve, Sosyal örümcek optimizasyonu, Yapı dizaynı

ABSTRACT: Algorithms developed by mimicking natural phenomena have attracted significant attention from researchers in recent years. These types of algorithms are widely used in many engineering. In particular, there are numerous studies in structural engineering where such algorithms are applied to the optimal design of steel structures. In this study, a Social Spider Optimization (SSO) algorithm has been developed to achieve the minimum weight optimal design of plane steel frames. Social spider optimization (SSO) algorithm is a method developed by imitating the behavior of male or female spiders in natural life. The developed SSO algorithm is coded at visual basic application (VBA) programming language and integrated with the SAP2000 program. Plane steel frames are designed according to the American Institute of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design (AISC - LRFD). The parameters as displacement, interstory drift and strength are considered at optimum design. Additionally, dimensions of sections are regarded for adaptedness. In the study, to test the effectiveness of the algorithm, plane steel frame examples selected from the literature and optimally designed with different methods and the results have been compared. These comparisons clearly demonstrate that the SSO is an effective and applicable algorithm for structural design problems.

Keywords: Optimization, Optimum Design, Plane Steel Frame, Social Spider Optimization, Structural Design

1. GİRİŞ

Yapı mühendislerinin en büyük amacı güvenlik şartlarından ödün vermeksizin ve en ekonomik olacak şekilde yapıları boyutlandırmaktır. Son zamanlarda Optimizasyon Yöntemleri bu amaca yönelik olarak çok büyük önem kazanmıştır. Optimizasyon, çok eskiden beri uygulanmakla birlikte, özellikle günümüzde bilgisayar teknolojileri ve yapay zekâ algoritmalarındaki gelişmeler sayesinde çok daha hızlı ve daha verimli çözümler sunmaktadır. Yapı mühendisliği gibi birçok disiplin de bu gelişmelerden faydalanmakta ve optimizasyon tekniklerinin sunduğu olanaklardan yararlanmaktadır [1]. Özellikle de çelik yapıların optimum tasarımında evrimsel optimizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [2-6]. Evrimsel optimizasyon yöntemleri doğada gerçekleşen olayları taklit ederek geliştirilen yöntemlerdir. Doğada gerçekleşen bu olaylar bilgisayarda kodlanmak suretiyle problemin çözümüne ulaşmaya çalışılmaktadır.

Çelik yapıların optimizasyonu konusunda farklı algoritmalar kullanılarak yapılan pek çok çalışma mevcuttur. [7] nolu çalışmada AISC (American Institute of Steel Construction) yönetmeliğinde belirtilen gerilme ve yer değiştirme kısıtlamaları dikkate alınarak, matematiksel bir algoritma ile çelik çerçeve sistemlerin boyutlandırılması yapılmıştır. Bu çalışma, amaç fonksiyonu ve kısıtların tanımlanarak algoritmalarla entegrasyonu konusunda birçok araştırmacıya rehberlik etmiştir. [8] nolu çalışmada TS648 standardı temel alınarak, düzlem çelik çerçeve sistemlerin boyutlandırılması genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. [9] nolu çalışmada genetik algoritma kullanılarak düzlem kafes sistemler optimize edilmiştir. [10] nolu çalışmada Yarı rijit bağlantılara sahip çerçeveler için $P\Delta$ etkisi göz önünde bulundurularak, doğrusal olmayan bir yöntemle boyut optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. [11] nolu çalışmada yarı rijit birleşimli doğrusal olmayan çelik çerçeveler genetik algoritma ile optimize edilmiştir. [12] nolu çalışmada, değişik algoritmalar kullanılarak düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. [13] nolu çalışmada BS-5950 yönetmeliği kullanılarak Harmoni Arama Algoritması ile düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada da düzlem çelik çerçevelerin minimum ağırlıklı olacak şekilde boyutlandırılmaları için bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Bu amaçla yapı analizinde SAP2000 programı kullanılmış ve visual basic applications (VBA) dilinde kodlanan ve örümceklerin doğadaki davranışlarından esinlenerek, onların davranışlarını taklit eden Sosyal Örümcek Optimizasyon (SSO) algoritması geliştirilmiştir. Ağırlık optimizasyonu yapılacak düzlem çelik çerçevelerin tasarım değişkenleri için mevcut olan hazır profiller kullanılmıştır. Boyutlandırma kısıtlamaları olarak, mukavemet, deplasman ve yanal ötelenme değerleri dikkate alınmıştır. Mukavemet ve deplasman kısıtlamaları için Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü - Yük ve Dayanım Faktörü Tasarımı (AISC - LRFD) standardı referans alınmıştır [14]. Yanal ötelenme kısıtlayıcıları Visual Basic Applications (VBA) program dilinde kodlanmıştır. Katlar arası yanal öteleme üst sınırı “kat yüksekliği / 300”, çerçevenin en üst katının maksimum yanal ötelenme değeri ise “çerçeve yüksekliği / 300” alınmıştır.

Geliştirilen SSO algoritmasının etkinliğini göstermek amacıyla, literatürden seçilen iki örnek üzerinde sonuçlar karşılaştırılmış ve SSO algoritmasının güçlü ve kullanılabilir bir optimizasyon yöntemi olduğu gösterilmiştir.

2. SOSYAL ÖRÜMCEK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Sosyal Örümcek Algoritması (SSO), son yıllarda geliştirilmiş sürü temelli bir algoritmadır [15]. Doğada birlikte yaşayan örümcek türlerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir. Doğada ortak örümcek ağını kullanan dişi ve erkek örümceklerden oluşan bir örümcek kolonisi bulunur. Kolonideki her bir örümceğin cinsiyetine bağlı olarak farklı bir görevi vardır. Örümcekler bu görevleri yerine getirmek için hareket, titreşim ve çiftleşme adı verilen operatörleri kullanırlar. Örümcekler birbirleriyle iletişim kurmak için titreşim oluştururlar. Titreşimin şiddeti örümceklerin performansına ve birbirlerine olan uzaklığına bağlıdır. Titreşimin etkisiyle örümceklerin birbirlerine yaklaşması veya uzaklaşması, onların hareket operatörünü tanımlar. Örümcekler titreşimin etkisiyle farklı konumlara hareket ederler [16, 17]. Kolonideki erkek örümcekler performans değerlerine bağlı olarak

baskın ve baskın olmayan erkek örümcekler olarak sınıflandırılmaktadır. Örümceklerin titreşim etkisiyle hareket ettikten sonra, eğer baskın bir erkek örümcek, çiftleşme etki alanında bir dişi örümcek bulursa, çiftleşme operatörü devreye girer. Bu çiftleşme sonucunda yeni bir örümcek dünyaya gelir. Yeni doğan örümceğin koloniyeye katılıp katılmaması, performansına bağlıdır. Eğer bu örümceğin performansı, başlangıçtaki kolonide yer alan en düşük performansa sahip örümceğin performansından daha iyiye, koloniyeye dahil edilir ve en kötü performansa sahip örümcek koloni dışına çıkarılır. Böylece koloni güncellenmiş olur. Yeni doğan örümceğin cinsiyeti ise, koloniden çıkarılan örümceğin cinsiyeti ile aynı olduğu kabul edilir. Böylece kolonideki başlangıçtaki dişi ve erkek örümceklerin sayısı korunmuş olur. Yeni koloni oluşturma işlemi, önceden belirlenmiş bir sayıda tekrarlanır. Nihai olarak, güncellenen koloni içinde en yüksek performansa sahip örümcek, optimizasyon probleminin en iyi çözümü olarak kabul edilir.

Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması başlangıçta örümcek sayısını belirleyerek işe başlar. Bu algoritmaya göre dişi örümceklerin sayısı, kolonideki toplam örümcek sayısının %65 ile %90'ı arasında değişmektedir [3, 4]. Örümcek sayısı belirlendikten sonra dişi ve erkek örümceklerin sayısı "1" ve "2" denklemleri ile hesaplanır;

$$N_f = N(0.90 - \text{rand } 0.25) \quad (1)$$

$$N_m = N - N_f \quad (2)$$

Denklemlerde, "N" kolonideki toplam örümcek sayısını, "N_f" dişi örümcek sayısını, "N_m" erkek örümcek sayısını, "rand" değeri ise 0 ile 1 arasında rastgele belirlenen bir sayıyı göstermektedir. Algoritma çalışmaya başladıktan sonra örümceklerin başlangıç pozisyonları belirlenir,

$$f_{ij}^0 = p_j^{\text{low}} + \text{rand}(0.1) (p_j^{\text{high}} - p_j^{\text{low}}) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_f \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Denklemden, "i" indisi i. dişi örümceği, "j" indisi i. dişi örümceğin tasarım değişkenini, " f_{ij}^0 " i. dişi örümceğin başlangıç pozisyonunu, " p_j^{low} " j. tasarım değişkeninin en küçük değerini, " p_j^{high} " j. tasarım değişkeninin en büyük değerini göstermektedir.

$$m_{kj}^0 = p_j^{\text{low}} + \text{rand}(0.1) (p_j^{\text{high}} - p_j^{\text{low}}) \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Denklemden, "k" indisi k. erkek örümceği, "j" indisi k. erkek örümceğin tasarım değişkenini, " m_{kj}^0 " k. erkek örümceğin başlangıç pozisyonunu göstermektedir.

Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması tüm işlemleri üç esas operatör kullanarak yapar.

2.1 Titreşim operatörü

Koloni üyeleri, birbirlerine bilgi aktarımı için titreşimler gönderirler. Bu titreşimlerin büyüklüğü, örümceklerin performansına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Birbirine yakın olan örümcekler, uzak olanlara göre daha güçlü titreşimler oluşturur. Bu titreşimler sayesinde örümcekler birbirlerini harekete geçirirler [16, 17]. Ayrıca, bir örümcek, öncekinden farklı bir pozisyona geçtiğinde yeni bir titreşim meydana getirir [18].

Sosyal Örümcek Optimizasyonunda titreşimin şiddeti "5" denklemi ile hesaplanır.

$$\text{Vib}_{ij} = w_j \cdot e^{-d_{ij}^2} \quad (5)$$

Denklemden "Vib_{ij}" i ve j örümcekleri arasındaki titreşimin şiddetini, "i" titreşimi oluşturan örümceği, "j" titreşimden etkilenen örümceği, "w_j" j numaralı örümceğin performansını, "d_{ij}" i ve j örümcekleri arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bu mesafe "6" denklemi ile hesaplanır;

$$d_{ij} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (S_{1j} - S_{2j})^2}}{d_{\text{max}}} \quad (6)$$

Denklemden, "s_{1j}" titreşimi oluşturan örümceğin j. tasarım değişkenini, "s_{2j}" titreşimden etkilenen örümceğin j. tasarım değişkenini, "n" tasarım değişkeni sayısını ifade etmektedir. "d_{max}" ise iki örümcek arasında olabilecek en uzun mesafe olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$d_{\text{max}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_j^{\text{high}} - p_j^{\text{low}})^2} \quad (7)$$

Denklemde, p_j^{high} j. tasarım değişkeninin en yüksek değeri, p_j^{low} ise j. tasarım değişkeninin en düşük değeridir.

Performans değeri örümceğin optimizasyon probleminin çözümü olabilme potansiyelini gösterir ve şu şekilde hesaplanır;

$$w_j = \frac{1}{W_j} \quad (8)$$

Burada " w_j " j. örümceğin performans değeri, " W_j " ise j. örümceğin amaç fonksiyonudur.

Sosyal örümcek optimizasyonu dişi ve erkek örümcekler için farklı titreşim modelleri belirlemektedir. Bu modeller aşağıda verilmektedir.

2.1.1 Dişi örümcekler için titreşim modeli

2.1.1.1 "Vibc_i" Titreşim modeli

Bu modellemelerde performansı en yüksek olan dişi örümcek dikkate alınmaksızın, diğer dişi örümceklerin birbirlerine titreşim gönderdikleri kabul edilir. Her bir dişi örümcek ile bu örümceğe en yakın pozisyonda olan diğer dişi örümcek arasında titreşim şiddeti hesaplanır. Bu titreşim modelinde diğerlerinden farklı olarak titreşim şiddeti hesaplanırken performansı en iyi olan örümceğin performans değeri kullanılır [16, 17].

$$\text{Vibc}_i = w_c \cdot e^{-d^2_{ic}} \quad (9)$$

2.1.1.2 "Vibb_i" Titreşim modeli

$$f_{ij}^{k+1} = \begin{cases} f_{ij}^k + \alpha \cdot \text{Vibc}_i (s_c - f_{ij}^k) + \beta \cdot \text{Vibb}_i (s_b - f_{ij}^k) + \delta \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right) 0 < \text{rand} \leq \text{PF} \\ f_{ij}^k - \alpha \cdot \text{Vibc}_i (s_c - f_{ij}^k) - \beta \cdot \text{Vibb}_i (s_b - f_{ij}^k) + \delta \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right) \text{PF} < \text{rand} < 1 \end{cases} \quad (12)$$

Burada, " f_{ij}^{k+1} " i. dişi örümceğin j. tasarım değişkeninin (k+1). konumunu, α , β , δ ve rand değerleri 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir sayıyı, " s_c ", Vibc_i titreşim modelinde titreşimden etkilenen dişi örümceğin j. tasarım değişkenini, " s_b " ise Vibb_i titreşim modelinde titreşimden etkilenen dişi örümceğin j. tasarım değişkenini göstermektedir

Bu modellemelerde kolonideki en yüksek performanslı dişi örümcek ile diğer dişi örümcekler arasında titreşim şiddeti hesaplanır.

$$\text{Vibb}_i = w_b \cdot e^{-d^2_{ib}} \quad (10)$$

2.1.2 Erkek örümcekler için Vibf_i titreşim modeli

Bu modellemelerde kolonide bulunan her bir erkek örümcek ile bu örümceğe en yakın olan dişi örümcek arasında titreşim şiddeti hesaplanır.

$$\text{Vibf}_i = w_f \cdot e^{-d^2_{if}} \quad (11)$$

2.2 Hareket operatörleri

2.2.1 Dişi örümceklerin hareket operatörü

Dişi örümcekler belirli bir çekiciliğe sahiptir ve cinsiyetleri ne olursa olsun diğer örümcekler üzerinde etkili olurlar. Dişi örümceklerin iş birliği davranışını simüle etmek için bir hareket operatörü tanımlanmıştır. Bu operatör, her dişi örümceğin konumunu dikkate alarak her "i." örümcek için tekrarlanır. Dişi örümcekler, yaydıkları titreşimler sayesinde diğer örümcekleri kendilerine çekebilir ya da uzaklaştırabilir. Örümceklerin birbirine yaklaşmasını veya uzaklaşmasını belirlemek amacıyla "PF" adlı bir parametre kullanılır. Örümcekler, bu parametreye dayanarak hareket ederler. "PF" değeri 0 ile 1 arasında değişen bir değer olup, problemin çözümüne geçmeden önce tanımlanması gerekmektedir [16].

2.2.2 Erkek örümceklerin hareket operatörü

Sosyal Örümcek Optimizasyonunda erkek örümceklerin hareket operatörleri baskın ve baskın olmayan örümcekler için farklı şekilde hesaplanmaktadır.

$$m_{ij}^{k+1} = \begin{cases} m_{ij}^k + \alpha \cdot \text{Vibf}_i(s_f - m_{ij}^k) + \delta(\text{rand} - \frac{1}{2}) & \text{if } w_{Nf+i} > w_{Nf+m} \\ m_{ij}^k - \alpha \cdot \left(\frac{\sum_{h=1}^{N_m} m_h^k \cdot w_{Nf+h}}{\sum_{h=1}^{N_m} w_{Nf+h}} - m_{ij}^k \right) & \text{if } w_{Nf+i} \leq w_{Nf+m} \end{cases} \quad (13)$$

Burada, " m_{ij}^{k+1} " i. erkek örümceğin j. tasarım değişkeninin ($k+1$). konumunu, α , δ ve rand değerleri 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir sayıyı, " s_f " Vibf_i titreşim modelinde titreşimden etkilenen dişi örümceğin j. tasarım değişkenini, " w_{Nf+i} " i. erkek örümceğin performansını, " w_{Nf+m} " ortanca performanslı erkek örümceği ifade etmektedir.

2.3 Çiftleşme operatörleri

Sosyal örümcek kolonisinde çiftleşme, baskın erkek örümcekler ile dişi örümcekler arasında gerçekleşir. Şayet baskın karakterli erkek bir örümceğin etki alanında en az bir dişi örümcek bulunuyorsa, çiftleşme operatörü devreye girerek yeni bir örümcek dünyaya gelir. Yeni doğan örümceğin performans değeri hesaplanır ve yeni doğan örümceğin performansı ile başlangıçtaki en düşük performansa sahip örümceğin performansları karşılaştırılır. Eğer yeni doğan örümceğin performansı daha iyiye, en düşük performansa sahip örümcek koloniden çıkarılarak, onun yerine yeni doğan örümcek koloniye eklenir. Yeni örümceğin cinsiyeti, çıkarılan örümcekle aynı kabul edilir, böylece başlangıçtaki erkek ve dişi örümceklerin sayısı korunmuş olur. Baskın erkek örümceğin etki alanında birden fazla dişi örümcek bulunuyorsa, çiftleşme operatörü rulet yöntemiyle uygulanır.

Örümceklerin çiftleşme etki alanı "14" denklemi ile hesaplanır;

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (p_j^{\text{high}} - p_j^{\text{low}})}{2n} \quad (14)$$

Burada, " r " çiftleşme etki alanını, " n " tasarım değişkeni sayısını, " p_j^{high} " j. tasarım değişkeninin en yüksek değerini, " p_j^{low} " j. tasarım değişkeninin en düşük değerini göstermektedir.

3. DÜZLEM ÇELİK ÇERÇEVELERİN OPTİMUM TASARIMI

Düzlem çelik çerçevelerin optimum boyutlandırma problemi LRFD-AISC Amerikan Şartnamesine göre "15" denklemi ile tanımlanmıştır.

Minimize edilecek fonksiyon:

$$W = \sum_{r=1}^{ng} m_r \sum_{s=1}^{tr} l_s \quad (15)$$

Burada " W " çerçevenin toplam ağırlığını göstermektedir. " m_r ", r çubuk grubu için "Standart Çelik Profilleri Tablosundan" seçilen profilin birim boyunun ağırlığıdır. " tr "; r grubundaki toplam çubuk sayısını, " ng " ise çerçevedeki toplam grup sayısını göstermektedir. " l_s " r grubuna ait s çubuğunun boyunun uzunluğunu ifade etmektedir.

Optimum tasarımda kullanılan kısıtlayıcı fonksiyonlar aşağıda verilmiştir.

Katlar arası yanal öteleme kısıtlayıcısı:

$$k_j = \frac{(\delta_j - \delta_{j-1})}{\delta_{ju}} - 1 \leq 0 \quad j = 1, \dots, ns \quad (16)$$

Denklemden, " δ_j " ve " δ_{j-1} " ardışık iki katın yanal öteleme değerleridir. " δ_{ju} " ise izin verilen yanal öteleme üst sınırı olup değeri "kat yüksekliği/300" olarak alınmıştır. " ns " çerçevedeki toplam kat sayıdır.

Maksimum katlar arası yanal öteleme kısıtlayıcısı:

$$k_t = \frac{\delta_t}{\delta_{tu}} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

Denklemden, " δ_t " en üst katın maksimum yanal öteleme değeri, " δ_{tu} " ise izin verilen yanal öteleme üst sınırı olup değeri "çerçeve yüksekliği/300" olarak alınmıştır.

Mukavemet kısıtlayıcıları:

$$\frac{P_{uk}}{\phi P_{nk}} \geq 0,2 \text{ ise } k_k = \frac{P_{uk}}{\phi P_{nk}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{uxk}}{\phi_b M_{nxk}} \right) - 1 \leq 0 \quad k = 1, \dots, nc \quad (18)$$

$$\frac{P_{uk}}{\phi P_{nk}} < 0,2 \text{ ise } k_k = \frac{P_{uk}}{2\phi P_{nk}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{uxk}}{\phi_b M_{nxk}} \right) - 1 \leq 0 \quad k = 1, \dots, nc \quad (19)$$

(18) ve (19) no'lu denklemler LRFD-AISC şartnamesinden alınan mukavemet kısıtlayıcılarını göstermektedir. Her bir eleman eksenel kuvvet ve eğilme momentinin etkisi altındadır.

" P_{uk} " gereken kuvvet (çekme veya basınç), " P_{nk} " nominal kuvvet (çekme veya basınç), " ϕ " dayanım azaltma katsayısı olup, çekme durumunda " ϕ_t " olarak gösterilir ve değeri 0,90, basınç durumunda " ϕ_c " olarak gösterilir ve değeri 0,85 alınır. " ϕ_b " eğilme için dayanım azaltma katsayısı olup değeri 0,90 'dır. " M_{uxk} " ikinci mertebeden etkileri içeren kuvvetli eksenindeki eğilme dayanımı, " M_{nxk} " kuvvetli eksenindeki nominal eğilme dayanımıdır.

Kesit boyut kısıtlayıcıları:

$$k_b = \frac{B_{sc}}{B_{sb}} - 1 \leq 0 \quad b = 1, \dots, nu \quad (20)$$

$$k_d = \frac{D_s}{D_{s-1}} - 1 \leq 0 \quad d = 1, \dots, nu \quad (21)$$

$$k_m = \frac{m_s}{m_{s-1}} - 1 \leq 0 \quad m = 1, \dots, nu \quad (22)$$

Denklemlerde " B_{sc} ", çerçevenin s. katındaki kolonun profil başlık genişliği, " B_{sb} " aynı kattaki kolona bağlanan kirişin profil başlık genişliği, " D_s " s. kattaki kolonun profil yüksekliği, " D_{s-1} " (s-1). kattaki kolonun profil yüksekliği, " m_s " s. kattaki kolonun profil birim boy ağırlığı, " m_{s-1} " (s-1). kattaki kolonun profil birim boy ağırlığı olarak ifade edilmektedir.

Cezalandırılmış amaç fonksiyonu şu şekilde tanımlanmıştır:

$$W_p = W (1 + P)^2 \quad (23)$$

$$P = \sum_{i=1}^m p_i \quad (24)$$

Denklem (24)' deki " p_i " ihlal etme katsayısı olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} \text{Eğer } k_i > 0 \text{ ise } p_i &= k_i \\ \text{Eğer } k_i \leq 0 \text{ ise } p_i &= 0 \end{aligned}$$

4. SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde Sosyal Örumcek Optimizasyon (SSO) algoritmasının etkinliğini göstermek amacıyla literatürde mevcut olan ve değişik optimizasyon yöntemleri ile optimum tasarımları yapılmış düzlem çelik çerçeveler göz önüne alınmıştır [3, 18-20]. Bu çalışmada da bu çerçevelerden farklı kat ve açıklığa sahip iki adet düzlem çelik çerçeve incelenmiştir. Bu çerçeveler için SSO algoritması, Visual Basic Applications (VBA) programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Oluşturulan program kodları, SAP2000 yazılımını çağırarak problem için belirlenen kesit özelliklerini ve sistem geometrisine dair bilgileri alır. Böylece yapının deplasman ve mukavemet değerleri hesaplanır. Yanal ötelenme sınırları ise VBA dili ile kodlanmıştır. Ayrıca görelî kat öteleme değerlerinin sağlanıp sağlanmadığı algoritma tarafından kontrol edilmektedir. Tablo 1 de sayısal uygulamada göz önüne alınan düzlem çelik çerçeveler için SSO parametreleri verilmektedir.

Tablo 1: Sayısal uygulamada kullanılan düzlem çelik çerçeveler için SSO parametreleri [22]

Göz önüne alınan düzlem çelik çerçeve	Örumcek Sayısı	PF	Max İterasyon
2 Açıklıklı 6 Katlı Çerçeve	50	0,125	2000
3 Açıklıklı 15 Katlı Çerçeve	50	0,100	6000

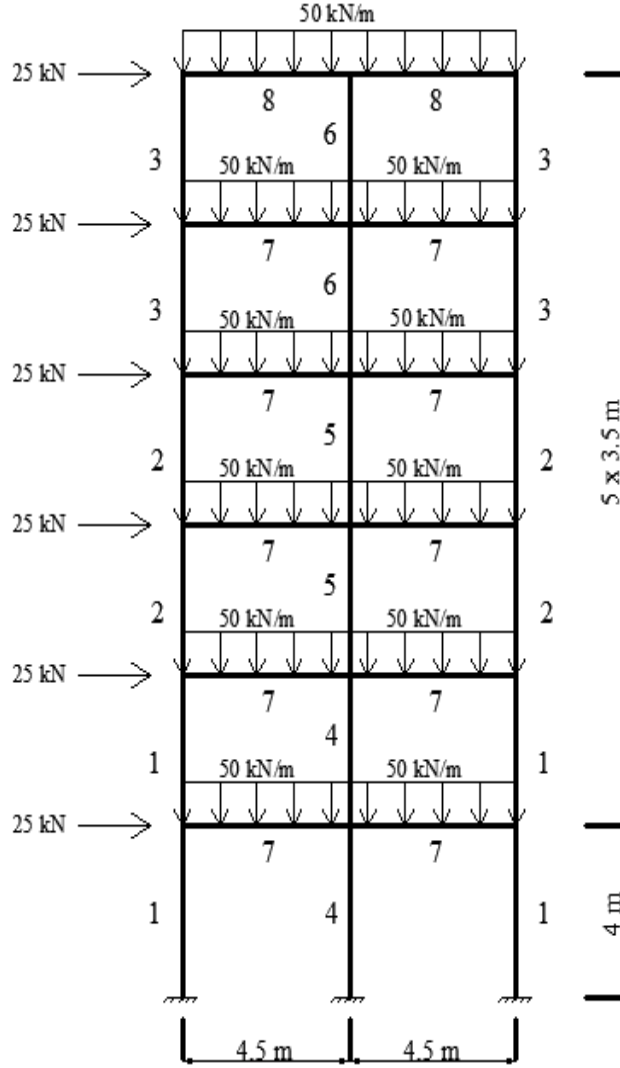
4.1 İki açıklıklı altı katlı çerçeve

Şekil 1' de otuz elemandan oluşan iki açıklıklı ve altı katlı düzlem çelik çerçevenin boyutları, yükleme durumu ve elemanların grup numaraları gösterilmektedir.

Çerçevenin mukavemet ve deplasman kısıtlayıcıları (AISC-LRFD) şartnamesinden alınmıştır. Katlar arası yanal öteleme üst sınırı ise

“kat yüksekliği/300” olarak sınırlandırılmıştır. Kullanılan malzemenin Elastisite Modülü 200000 N/mm², Akma Dayanımı 248,2 N/mm² dir. Kiriş ve kolon elemanları AISC-LRFD’ de yer alan standart 267 adet “W” kesitlerinden seçilmiştir.

Referans [4] de bu düzlem çelik çerçeve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Harmoni Arama (HS) algoritması kullanılarak boyutlandırılmıştır. Bu çalışmada ise aynı çerçeve Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması kullanılarak optimize edilmiş ve sonuçlar Tablo 2’ de gösterilmiştir.



Şekil 1: İki açıklıklı altı katlı çerçevenin boyutları, yükleme durumu ve elemanların grup numaraları [22]

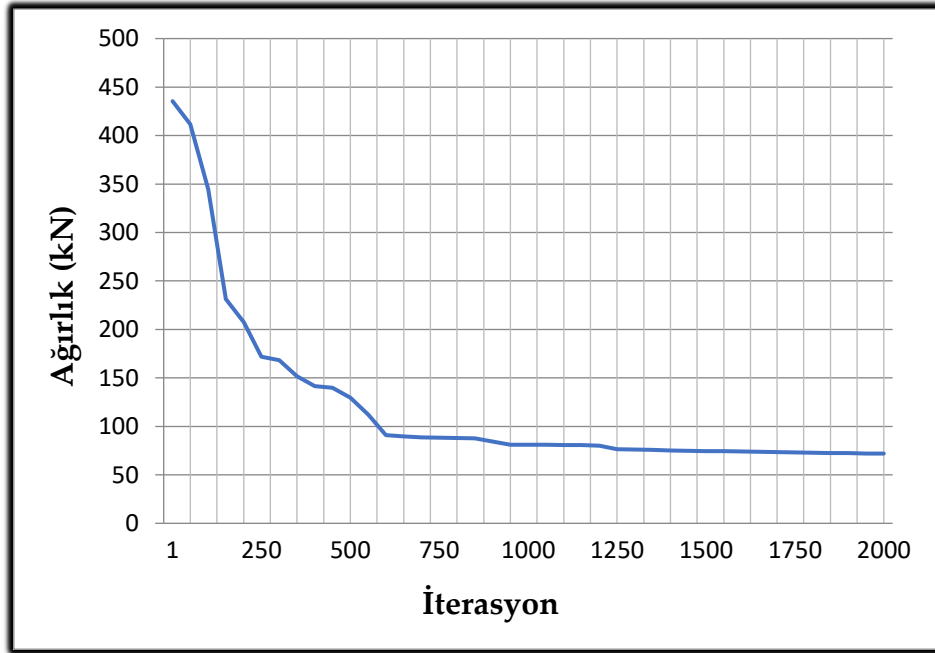
Şekil 1’de verilen iki açıklıklı altı katlı çerçevenin optimum tasarımı Sosyal Örümcek Optimizasyon (SSO) algoritması kullanılarak yapılmıştır [22]. Optimum tasarım sonuçları literatürde mevcut olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Harmoni Arama (HS) algoritması adı verilen optimizasyon yöntemleriyle yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tablo 2’de görüldüğü üzere göz önüne alınan çerçevenin

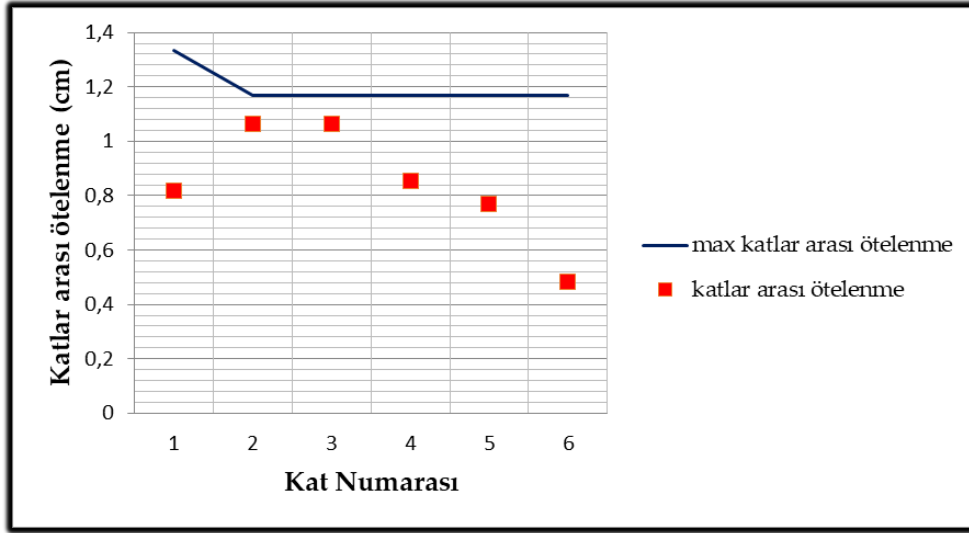
diğer çalışmalara nazaran daha az iterasyonla optimum boyutlandırılması yapılmış ve çerçevenin toplam ağırlığının [4] nolu referansta verilen Harmoni Arama (HS) algoritmasından %8,80, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) algoritmasından ise %4,68 daha hafif olduğu gözlenmiştir. Çerçeveye ait ağırlık iterasyon ilişkisi Şekil 2 de, katlar arası yanal ötelenmeler ise Şekil 3’de gösterilmektedir.

Tablo 2: İki açıklıklı altı katlı çerçevenin SSO algoritmasına göre optimum sonuçları

Grup No	Grup Adı	HS	PSO	Bu çalışma (SSO)
1	Kolon	W18x55	W16x57	W16x57
2	Kolon	W12x50	W16x40	W16x36
3	Kolon	W8x31	W10x39	W12x35
4	Kolon	W21x73	W24x62	W21x83
5	Kolon	W18x65	W24x62	W16x77
6	Kolon	W12x40	W8x40	W12x40
7	Kiriş	W16x40	W14x30	W16x31
8	Kiriş	W14x22	W18x65	W14x26
Ağırlık (kN)		76,78	73,87	70,57
En üst kat yanal ötelenme (cm)		*	5,521	5,056
Maksimum katlar arası yanal ötelenme (cm)		*	1,153	0,821
Maksimum gerilme oranı		*	0,96	0,93
Maksimum iterasyon sayısı		*	6500	2000

* Değerler önceki çalışmalarda verilmemiştir.

**Şekil 2:** İki açıklıklı altı katlı çerçevenin ağırlık iterasyon ilişkisi



Şekil 3: İki açıklıklı altı katlı çerçevenin x doğrultusundaki yanal ötelenmeleri

4.2 Üç açıklıklı onbeş katlı çerçeve

Şekil 4' de doksan elemandan oluşan üç açıklıklı ve on beş katlı düzlem çelik çerçevenin boyutları, yükleme durumu ve elemanların grup numaraları gösterilmektedir.

Çerçevenin mukavemet ve deplasman kısıtlayıcıları (AISC-LRFD) şartnamesinden alınmıştır. Çerçevenin en üst katının yanal ötelemesi 23,5 cm ile sınırlandırılmıştır. Kiriş ve kolon elemanları AISC-LRFD' de yer alan standart 267 adet "W" kesitlerinden seçilmiştir.

[19-21] nolu referanslarda bu düzlem çelik çerçeve Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması (PSO), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Pasif Toplanma Algoritması (PSOPC), Büyük Patlama-Büyük Çatırdama Algoritması (BB-BC) ve Heuristik Parçacık Sürüsü Karınca Kolonisi Optimasyonu

(HPSACO) Algoritması olmak üzere farklı algoritmalar kullanılarak boyutlandırılmıştır. Bu çalışmada ise aynı çerçevenin optimum tasarımı Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması kullanılarak yapılmıştır [22]. Sonuçlar farklı optimizasyon yöntemleri göz önüne alınarak yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak Tablo 3' de gösterilmiştir.

Tablo 3' de görüldüğü üzere göz önüne alınan çerçevenin diğer çalışmalara nazaran daha az iterasyonla optimum boyutlandırılması yapılmıştır. SSO algoritması ile optimum tasarımı yapılan çerçevenin ağırlığı PSO algoritmasından %18,73, PSOPC algoritmasından %7,52, BB-BC algoritmasından %3,88 ve HPSACO algoritmasından ise %1,92 daha az bulunmuştur.

Tablo 3: İki açıklıklı onbeş katlı çerçevenin SSO algoritmasına göre optimum sonuçları

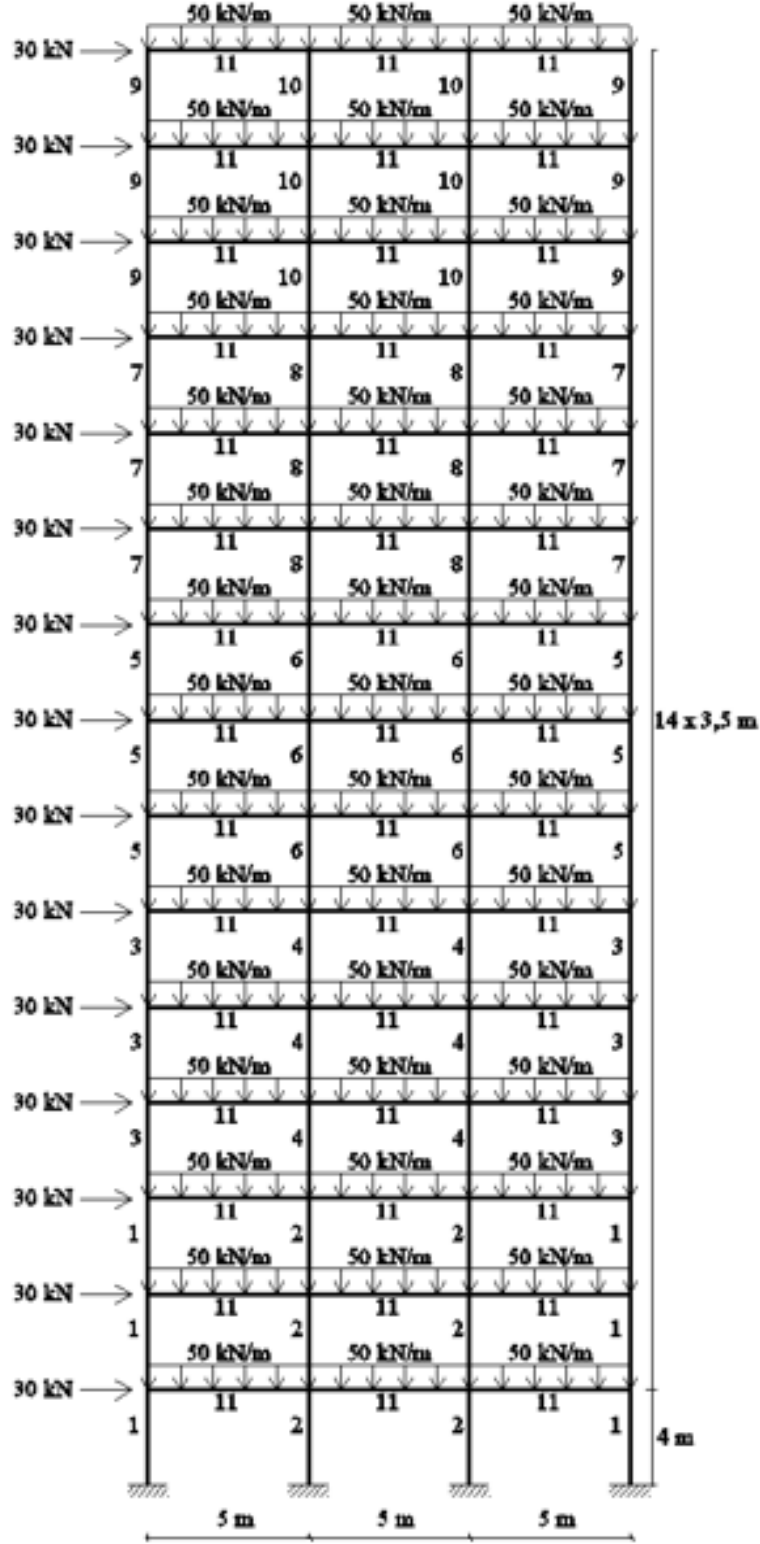
A. Kayeş & S. Talatahari						
Grup No	Grup Adı					Bu Çalışma
		PSO	PSOPC	BB-BC	HPSACO	(SSO)
1	Kolon	W33x118	W26x129	W24x117	W21x111	W14x120
2	Kolon	W33x263	W24x131	W21x132	W18x158	W14x159
3	Kolon	W24x76	W24x103	W12x95	W10x88	W33x118
4	Kolon	W36x256	W33x141	W18x119	W30x116	W21x111
5	Kolon	W21x73	W24x104	W21x93	W21x83	W16x67
6	Kolon	W18x86	W10x88	W18x97	W24x103	W18x86
7	Kolon	W18x65	W14x74	W18x76	W21x55	W18x60
8	Kolon	W21x68	W26x94	W18x65	W26x114	W12x65
9	Kolon	W18x60	W21x57	W18x60	W10x33	W8x28
10	Kolon	W18x65	W18x71	W10x39	W18x46	W24x62
11	Kiriş	W21x44	W21x44	W21x48	W21x44	W21x44
Ağırlık (kN)		496,68	452,34	434,54	426,36	418,32
En üst kat Yanal ötelenme (cm)		10,42	11,36	11,63	11,57	14,61
Maksimum gerilme oranı		*	*	*	*	0,986
Maksimum iterasyon		*	*	9500	*	6000

* Değerler önceki çalışmalarda verilmemiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ayırık değişkenli düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımı için sosyal örümcek optimizasyon (SSO) algoritması geliştirilmiştir. SSO algoritması, dişi ve erkek örümceklerin doğal yaşamdaki davranışları göz önüne alınarak geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, Visual Basic Applications (VBA) dilinde kodlanmış ve SAP2000 yazılımı ile entegre edilmiştir. Çerçevelerin mukavemet ve deplasman değerleri SAP2000 programıyla hesaplanırken, yanal ötelenme değerleri hazırlanan algoritma içinde kodlanmıştır. Çalışmada; literatürde mevcut olan ve değişik optimizasyon yöntemleri ile boyutlandırılan, ilki iki açıklıklı ve altı katlı diğeri ise üç açıklıklı ve onbeş katlı olan iki farklı düzlem çelik çerçeve göz önüne alınmıştır. Bu çerçeveler, çalışmada sunulan Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması ile boyutlandırılmış ve elde edilen

sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda diğer optimizasyon yöntemlerine nazaran Sosyal Örümcek Optimizasyon algoritması ile boyutlandırılan düzlem çelik çerçevelerin daha az iterasyon ile daha kısa sürede ve daha ekonomik olacak şekilde boyutlandırılabilceği görülmüştür. Yapılan çalışmadan elde edilen tecrübeler göre dişi örümceklerin sayısının fazla olması ve iterasyon sayısının artması SSO algoritmasının performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca 0 ile 1 arasında değişen PF parametresinin 0,1 ve 0,125 değerlerinde daha iyi sonuçlar alındığı gözlenmiştir. Düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımında kullanılan SSO algoritmasının rekabetçi ve güçlü bir algoritma olduğu söylenebilir. Ayrıca bu algoritma ile literatürde mevcut olmayan farklı tipteki çelik çerçevelerin de en ekonomik olacak şekilde optimum boyutlandırılmaları mümkün olabilecektir.



Şekil 4: Üç açıklıklı onbeş katlı çerçevenin boyutları, yükleme durumu ve elemanların grup numaraları [22].

Yazarların Katkıları: Her iki yazar, literatür taraması, araştırma fikrini geliştirme, makale yazımı ve düzenlenmesi süreçlerine ortak katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışmaları: Bu çalışmanın yazarları herhangi bir kurum/kuruluş veya kişi ile çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

6. KAYNAKLAR

- [1] S. Sezer and M. Hiçyılmaz, "Çelik yapıların kaynaklı birleşimlerinin metasezgisel yöntemlerle optimum tasarımı," *Dokuz Eylül Üniv. Müh. Fak. Fen ve Müh. Derg.*, vol. 24, no. 70, pp. 277–290, 2021.
- [2] S. O. Degertekin, "Optimum design of geometrically non-linear steel frames using artificial bee colony algorithm," *Steel Compos. Struct.*, vol. 12, no. 6, pp. 505–522, 2012.
- [3] M. P. Saka and E. Dogan, "Optimum design of unbraced steel frames to LRFD–AISC using particle swarm optimization," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 46, no. 1, pp. 27–34, 2012.
- [4] S. Talatahari, E. Khalili, and S. M. Alavizadeh, "Accelerated particle swarm for optimum design of frame structures," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–6, 2013.
- [5] M. R. Maheri and M. M. Narimani, "An enhanced harmony search algorithm for optimum design of side sway steel frames," *Comput. Struct.*, vol. 136, pp. 78–89, 2014.
- [6] P. Murren and K. Khandelwal, "Design-driven harmony search (DDHS) in steel frame optimization," *Eng. Struct.*, vol. 59, pp. 798–808, 2014.
- [7] M. P. Saka, "Optimum design of steel frames with stability constraints," *Comput. Struct.*, vol. 41, no. 6, pp. 1365–1377, 1991.
- [8] A. Daloğlu and M. Armutçu, "Genetik algoritma ile düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımı," *Teknik Dergi*, vol. 9, no. 42, pp. 1601–1615, 1998.
- [9] A. Daloğlu and Z. Aydın, "Kafes sistemlerin uygulamaya yönelik optimum tasarımı," *Pamukkale Üniv. Müh. Fak. Müh. Bil. Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 951–957, 1999.
- [10] E. S. Kameshki and M. P. Saka, "Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm," *Comput. Struct.*, vol. 79, no. 17, pp. 1593–1604, 2001.
- [11] M. S. Hayalioğlu and S. Ö. Değertekin, "Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization," *Comput. Struct.*, vol. 83, no. 21–22, pp. 1849–1863, 2005.
- [12] A. Kaveh and S. A. Talatahari, "Discrete particle swarm ant colony optimization for design of steel frames," *Asian J. Civ. Eng. (Build. Hous.)*, vol. 9, pp. 563–575, 2007.
- [13] M. P. Saka, "Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 36–43, 2009.
- [14] LRFD-AISC, *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design*, vol. 1, American Institute of Steel Construction, 1994.
- [15] E. Baş, "Sosyal örümcek algoritmasının sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerinde performans iyileştirmeleri," Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Konya, 2020.
- [16] E. Cuevas and M. Cienfuegos, "A new algorithm inspired in the behavior of the social-spider for constrained optimization," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 412–425, 2014.
- [17] E. Cuevas, M. Cienfuegos, D. Zaldivar, and M. Perez-Cisneros, "A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 16, pp. 6374–6384, 2013.
- [18] J. J. Q. Yu and V. O. K. Li, "A social spider algorithm for global optimization," *Appl. Soft Comput.*, vol. 30, pp. 614–627, 2015.
- [19] A. Kaveh and S. Talatahari, "Hybrid algorithm search, particle swarm and colony for structural design optimization," *Stud. Comput. Intell.*, vol. 239, pp. 159–198, 2009.
- [20] A. Kaveh and S. Talatahari, "An efficient hybrid algorithm based on harmony search, particle swarm and colony strategies for optimal design of structures," in *Harmony Search Algorithms for Structural Design Optimization*, pp. 159–198, 2009.
- [21] A. Kaveh and S. Talatahari, "A discrete big bang-big crunch algorithm for optimal design of skeletal structures," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 103–122, 2010.
- [22] M. Yetkin, "Düzlem çelik çerçevelerin sosyal örümcek optimizasyonuna göre boyutlandırılması," Yüksek Lisans Tezi,

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Balıkesir, 2015.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Perde Duvar ile Güçlendirmede Ankraj Çapı ve Lokasyonunun Betonarme Çerçevenin Performansına Etkileri

Effects of Anchor Diameter and Location on the Performance of Reinforced Concrete Frame in Reinforcement with Shear Wall

Orkun Çelik^{1,*} Orhan Doğan¹

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale, Türkiye.

Geliş / Received: 20.02.2025

Kabul / Accepted: 07.04.2025

*Sorumlu Yazar: Orkun Çelik orkuncelik@msn.com

ÖZ: Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY-2018)'e uygun olarak binaların güçlendirilmesine ilişkin kriterlerden beton dayanımına bağlı ankraj çapı ve ankraj lokasyonu konusunda belirtilen standartlara ilave edilebilecek detayların belirlenmesi, güçlendirmenin maliyet, iş gücü, zaman ve malzeme kullanımı açısından ekonomiklik sağlayacak standartlar ortaya koyulması amaçlanmıştır. Yatay ve düşey yüklerin etkisine maruz bırakılmak üzere 1/2 ölçekli, 150 cm x 150 cm ebatlarında iki boyutlu toplam dört adet betonarme çerçeve deney için hazırlanmıştır. TBDY-2018'e uygun olarak bu çerçevelerin iki tanesine 6Ø12 diğer iki tanesine ise 11Ø8 ankraj uygulaması ile perde ilavesi yapılmıştır. Bu dört çerçeve için göçme seviyesine ulaştıktan sonra 0,95 P_{max}'a kadar yapılan yüklemeler ile toplam dört adet deney yapılmıştır. İlk deney grubu için 11Ø8 ile yapılan ankrajların 6Ø12 ile yapılan ankraj alanına göre %19 azalmasına rağmen göre enerji tüketim kapasitesi ve maksimum enerji taşıma kapasitesinde artış olduğu görülmüştür. 11Ø8 ile yapılan ankrajların farklı döşeme ve giriş bağlantı lokasyonları dikkate alınarak tamamlanan diğer deney grubunda ise ankraj lokasyonunun, ankrajların enerji tüketim kapasitesine, rijitliğe ve enerji taşıma kapasitesine katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ankraj donatısı, ankraj çapı, ankraj lokasyonu, güçlendirme, perde duvar.

ABSTRACT: This study aims to determine supplementary details to the existing standards specified in TBDY-2018 (Turkish Building Earthquake Code-2018) regarding anchor diameter and anchor location based on concrete strength for building retrofitting, as well as to propose cost-effective retrofitting standards in terms of cost, labor, time, and material usage. For this purpose, four two-dimensional reinforced concrete frames at a 1/2 scale (150 cm x 150 cm) were prepared and subjected to horizontal and vertical loads. In compliance with TBDY-2018, two of these frames were retrofitted with shear walls using 6Ø12 anchors, while the other two were retrofitted using 11Ø8 anchors. After reaching the collapse level, a total of four experiments were conducted on these frames by applying loads up to 0.95 P_{max}. For the first experimental group, despite a 19% reduction in anchor area for the 11Ø8 anchors compared to the 6Ø12 anchors, an increase in energy dissipation capacity and maximum energy load-bearing capacity was observed. In the second experimental group, which considered different slab and beam connection locations for the 11Ø8 anchors, it was concluded that anchor location significantly contributes to energy dissipation capacity, stiffness, and energy load-bearing capacity.

Keywords: Anchorage, anchorage location, diameter, reinforced concrete, shearwall.

1. GİRİŞ

Betonarmenin tarihçesine bakıldığında, betonarmenin bulunması ile yapı teknikleri ve yapısal tasarımların beraber geliştiği

görülmektedir. Bununla birlikte, betonarmenin gelişim süreci içerisinde imalat ve tasarımdan kaynaklanan eksikliklerin önüne geçilmesi, yapının ilk halinin korunması, restorasyonu ve sağlamlaştırılması amacıyla yapıların

güçlendirilmesinde de farklı görüş ve yöntemler gelişmiştir [1].

1800'lü yıllardan itibaren beton ve betonarme ile ilgili keşfedilen her yeni gelişme ile birlikte yapılarda tespit edilen tasarım hataları ve çevresel etkenlerin birlikte değerlendirilmesiyle yeni metotların geliştirilmesine yol açmıştır [2]. Bu amaçla yapılan birçok çalışmada, yeni ürün ve tasarım arayışı olduğu gözlemlenmektedir [3].

Özellikle önemli fay hatlarının geçtiği ülkelerde, depremin yıkıcı ve can alıcı etkilerinin en aza indirmek büyük önem taşır. Bu amaçla yapılmış bilimsel çalışmalar, ülkelerin depreme yönelik yeni stratejiler ve standartlar geliştirmesine ışık tutmaktadır [4], [5], [6], [7]. Bunun yanı sıra depreme dayanıklı yapı tasarımı ve hasarlı yapıların güçlendirilmesine yönelik mevzuat ve uygulama esasları özellikle yıkım gücü büyük depremler sonrası yapılan tespitlere dayanmaktadır [8], [9], [10]. Ancak, Türkiye'nin bir deprem ülkesi olmasına rağmen yapıların güçlendirilmesi konusunda şekil, yöntem ve standartlar ilk olarak 2007 yılında yayımlanan "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)"te yer almıştır[2].

DBYBHY-2007'nin yürürlüğe girmesi ile birlikte kamu kurumları dışında diğer binaların güçlendirilmesine yeterince önemin verilmediği görülmektedir. Güçlendirmeye önem verilmemesinin detaylarına bakıldığında, kentsel dönüşüm ile ilgili teşviklerin ve finansal kolaylıkların sağlanması nedeniyle kentsel dönüşüme daha çok önem verildiği, buna bağlı olarak depreme dayanıksız yapıların yıkıldığı, ayrıca yapıların güçlendirilmesi konusunda yeterli devlet politikası oluşturulamadığı görülmektedir.

Ülkemizde mevcut konut stoğunun korunması, geçmişi olan yapılan gelecek nesillere aktarılması, değişken piyasa koşullarından dolayı inşaat maliyetlerinin artmasından dolayı kentsel dönüşüm yerine alternatif arayışları sebebiyle, 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile birlikte kamu kurumları dışındaki yapılar için de güçlendirme konusu ön plana çıkmaya başlamıştır[11].

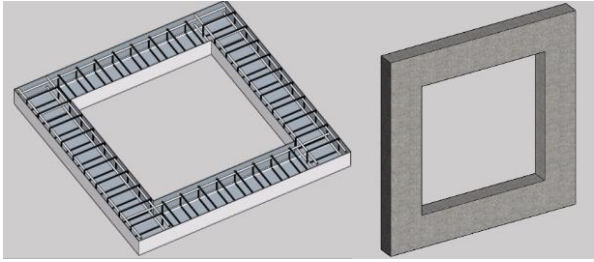
DBYBHY-2007'de "Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi" başlıklı yedinci bölümde güçlendirme tekniklerinin genel hatlarından bahsedilmiş, TBDY-2018'de "Deprem Etkisi Altında Mevcut Bina Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Güçlendirme Tasarımı İçin Özel Kurallar" başlıklı 15.bölümde, DBYBHY-2007'de belirtilen tekniklerin teknik detaylarına ve standartlarına aynı şekilde yer verilerek yeniden düzenlenmiştir.

Çalışmamızda, TBDY-2018'de "Deprem Etkisi Altında Mevcut Bina Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Güçlendirme Tasarımı İçin Özel Kurallar" başlıklı 15'inci bölümünde belirtilen güçlendirmeye ilişkin kriterlerden beton dayanımına bağlı ankraj çapı, ankraj lokasyonu, ankraj ve bindirme boyu ile kimyasal ankraj kullanımı konusunda belirtilen standartlara ilave edilebilecek detayların belirlenmesi, güçlendirmenin maliyet, iş gücü, zaman ve malzeme kullanımı açısından ekonomiklik sağlayacak standartlar ortaya koyulması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda Kale (2004) tarafından yapılan çalışmada kullandığı yatay ve düşey yüke maruz bırakılmış 150 x 150 cm ebadındaki çerçevelerden, farklı deney grupları oluşturulmuş ve oluşturulan deney gruplarındaki numunelere ankraj ekimi yapılmıştır. Numunelere, ankraj ekimi sonrasında perde duvar imalatı ile güçlendirme yapılmış, yatay ve düşey yüklere maruz bırakılarak kayıt altına alınan yük ve deformasyon verileri değerlendirilmiştir [12].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Kale [12] tarafından yapılan çalışmada, yatay ve düşey yüklere maruz bırakılmış orta hasarlı 150 cm x 150 cm ebatlarında, sahada hazır brüt beton kullanılarak üretilmiş (C16/20) 1/2 ölçekli, tek açıklıklı ve tek katlı betonarme çerçeveyi temsil eden altı adet numune kullanılmıştır (Şekil 1). Deneyler laboratuvar ortamında, Şekil 2'deki deney düzeneğinde yapılmıştır.



Şekil 1: Numuneleri üç boyutlu çizimleri.

2.1 Deney Hazırlığının Yapılması

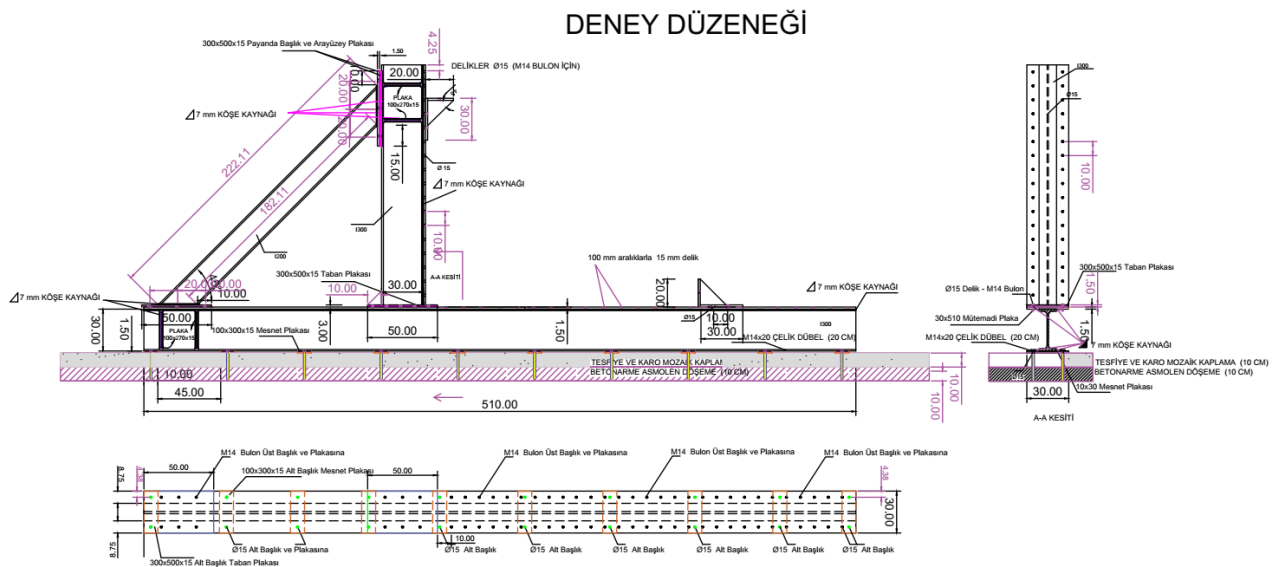
Kale[12] tarafından deneyde kullanılmış olan altı adet numune, hasar düzeyine ve deneyde elde edilmiş deformasyon ve maksimum yük değerlerine bakılmaksızın gruplara ayrılmıştır [12]. Deney grupları ve grup özellikleri, ulusal ve uluslararası yayınlardaki çalışmalara göre belirlenmiştir.

Chrysostomou ve ark. tarafından yapılan çalışmada, İspanya/İTALYA’da Avrupa Birliği Ortak Araştırma Merkezi (JRC-Joint Research Center) bünyesinde bulunan Avrupa Yapısal Değerlendirme Laboratuvarı (ELSA- The European Laboratory for Structural Assessment)’nda çok katlı ve çok açıklıklı betonarme çerçeve binaların sismik

güçlendirilmesinin etkinliği, 3B tam ölçekli bir numune üzerinde deneysel olarak incelemiştir. [13].

Bu güçlendirme, seçilen açıklıkların betonarme ile doldurularak yeni duvarlara dönüştürülmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Modelin temel parametreleri, betonarme dolgu ile çevreleyen betonarme çerçeve arasındaki bağlantı detayları ve dolgudaki donatı yüzdesi olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin etkisi, deney sırasında iki doldurulmuş çerçeve için farklı bağlantı detayları ve donatı yüzdeleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Çelik yaptığı çalışmada, kesme ve çekme performanslarının belirlenmesi için yeni iki farklı kesme levhası ve çekme levhası tasarımı yapılarak hazırlanmış levhalar yardımıyla 3 farklı yığma binada 21 adet kesme ve 36 adet çekme testi yapmıştır. Duvar yüzeyi ile kuvvet kaynağı hidrolik krik o arasına tasarlanan levhalar yerleştirilerek düzenekler hazırlanmış, ankraj çapı ve gömme derinliğine bağlı olarak ankrajların maksimum kesme ve çekme kuvvetleri ve ayrıca aralarındaki bağıntı belirlenmiştir. Ankrajların gömme çapı ve derinliği ile kesme ve çekme performansı arasındaki ilişki belirlenmiştir[14].



Şekil 2: Deney Düzenneği.

Tekeli ve ark. yaptıkları çalışmada, dolgu duvarların hasır çelik donatılı özel sıva ile güçlendirilmesi yöntemini incelenmiş, dört adet aynı yapısal özelliklere sahip betonarme çerçeve üretmişlerdir. Bu numunelerden bir tanesi yalın halde bırakılırken, diğer üçünün açıklığı dolgu duvar ile örülmüştür. Tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerden iki tanesi, duvar yüzeyine tek taraflı olarak uygulanan hasır donatılı sıva ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilen iki numunede ankraj aralığı ve işçiliği değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yapılan güçlendirmenin elemanın yük taşıma kapasitesi yanında enerji tüketme kapasitesini de artırdığı görülmüştür. Yanal yük taşıma kapasitesi açısından dolgu duvarlı numunede %120, seyrek ankraj ile güçlendirmede %160 ve sık ankraj ile güçlendirmede %180 yalın numuneye göre artış sağlanmıştır. Ankraj işçiliği kötü olan numunede güçlendirme yüzeyinin deney sırasında dolgu duvardan ayrıldığı görülmüştür. Güçlendirmenin tek taraflı yapılması nedeniyle güçlendirme uygulanmayan yüzeyde hasar X şeklinde ortaya çıkmıştır [15].

Anıl ve Altın tarafından yapılan çalışmada, kısmi dolgular eklenerek güçlendirilen sünek betonarme çerçevelerin döngüsel yatay yükleme altındaki davranışını araştırmıştır. Tek gözlü, tek katlı, 1/3 ölçekli dokuz test numunesi oluşturularak ters döngüsel yükleme altında test edilmiştir. Sonuç olarak, kısmi dolgulu betonarme çerçevelerin, dolgusuz çerçeveye göre önemli ölçüde daha yüksek nihai mukavemet ve daha yüksek başlangıç rijitliği sergilediğini göstermiştir. Dolgu duvarının en-boy oranı arttıkça, yatay mukavemet ve rijitliğinin önemli ölçüde arttığı ve çerçeveler ile dolgular arasındaki bağlantının da dolgulu çerçevelerin davranışını etkilediği görülmüştür. Kolona ve çerçevenin kirişlerine bağlı kısmi dolgu duvarlarına sahip numuneler ise en başarılı davranışı göstermiştir [16].

Redwan ve ark. çalışmasında, merkez ve köşe perde duvarlar oluşturularak betonarme simetrik binalarının deplasman ve deformasyon kontrolünü araştırmak amacıyla Bangladeş'teki dört farklı sismik bölgede, en-boy oranı ve önerilen genişlik-boy oranı temelinde farklı sınırlayıcı kriterler belirleyerek ETABS programında eşdeğer statik analiz yöntemi ile yapmış olduğu analizler neticesinde köşe perdelerinin bina içlerindeki

perdelere göre daha iyi performans gösterdiğini bildirmiştir[17].

Nishtala ve Radke, perde duvar ve çelik destek sistemlerinin uygulanması yoluyla yüksek binaların sismik direncini araştırarak güçlendirmede perde duvarın çelik çaprazlara göre daha başarılı olduğunu bildirmişlerdir[18].

Rao ve Rajasekhar tarafından yapılan çalışmada, perde duvarlı ve belirli özgün tasarım özelliklerine sahip altı katlı bir betonarme bina için yapmış oldukları itme analizinin sonuçları ile orijinal standart tabanlı tasarımda bazı değişiklikler yaparak can güvenliği sağlanabileceği performans hedefine ulaşılması beklendiğini bildirmişlerdir [19].

Zıvrallı tarafından yapılan çalışmada, mevcut bir betonarme binanın kolonlarında kimyasal dübel ile ankrajlanan 72 adet donatının çekme deneylerini gerçekleştirmiş; 4 farklı kalınlıkta (Ø10,12,14,16) ve 3 farklı derinlikte (5, 10 ve 15 cm) ankrajlar altılı gruplar halinde ekilmiştir. Her gruptaki altı numuneden üç adedi tam sıyrılmalı, üç adedi kısmi sıyrılmalı ankraj çekme deneyine tabi tutulmuştur. Mevcut yapının beton dayanımını belirlemek için kolonlarından 11 adet beton karot örneği alınmıştır. Ankraj çapı ve gömme derinliği ile ankrajların maksimum çekme kuvvetleri arasındaki bağıntı mevcut beton dayanımı için belirlenmiştir [20].

Karadağlı tarafından yapılan çalışmada, DBYBHY-2007'ye göre betonarme güçlendirme elemanlarının donatı ankraj çapı Ø12 ve kimyasal dübel ankraj derinliği 15 cm olarak uygulanırken, 2018 yılı itibarıyla yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 ile betonarme güçlendirme elemanlarının donatı ankraj çapı Ø16 olarak uygulanmaya başlandığı, Türkiye'de yapı stokunun beton basınç dayanımının oldukça düşük ve sahada uygulamadaki başarısızlıklarla daha fazla düştüğü düşünüldüğünde karakteristik dayanımı (fck) 4.51, 10, 15, 20 MPa olan 4 ayrı beton blokta kimyasal yapıştırıcı kullanılarak 192 adet donatı ekilerek çekme deneyleri yapılmıştır. 4 farklı çapta (Ø8, Ø10, Ø12, Ø14) ve 3 farklı derinlikte (8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm) ankraj donatısı ekilmiştir. Tüm numuneler tam sıyrılmalı çekip-çıkarma (çekme) deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonunda ankraj çapının, ankraj derinliğinin ve

beton dayanımının ayrı ayrı artmasıyla çekme performansının da arttığı görülmüştür. Ayrıca çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depreminde güçlendirmesi yapılmış bazı binaların betonarme perdelerinin düzlem dışı devrildiğini ve görevini yerine getiremediğini bildirmiştir [21].

Hakim ve Masri tarafından yapılan çalışmada, eski binaların durumunun nasıl değerlendirileceğine ve uygun sismik güçlendirme yöntemlerinin nasıl tasarlanıp uygulanacağına odaklanılarak değerlendirme sürecini ve tasarım önerilerini uygulamak için bir vaka çalışması seçilmiştir. Geleneksel sismik iyileştirme yöntemleri ve daha yenilikçi bir yaklaşım olan çelik çapraz bağlantı sistemlerinin kurulumu değerlendirilmiştir. Önerilen güçlendirme yöntemleri, teknik, ekonomik ve sosyal boyutların ideal bir uyumunu hedeflemiştir. ETABS yazılımı ile üç yapısal sistemin (mevcut durum, perde duvarlı modifiye edilmiş ve çapraz bağlantılı sistem) statik eşdeğer, dinamik ve push-over analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, perde duvar sistemi ile çelik çapraz bağlantı sisteminin karşılaştırıldığında, her ikisinin de istenen sismik performansı sağladığını gösterdiği, ancak mevcut yapıya çelik çapraz bağlantılar eklenmesinin, perde duvar ekleme sistemine kıyasla daha iyi bir süneklik sağladığı ve temelde daha az bir değişiklik gerektirdiği bildirilmiştir [22].

İncelenen literatür kapsamında yapılan değerlendirme sonucunda, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yayımlandığından itibaren düzlem içi yerinde inşa edilen perde duvar güçlendirmesi ile ilgili güçlendirme perdesinin çerçeve sisteme katkısını ve perde ankrajların performansını yansıtan doğrudan alakalı literatür çalışmasının yapılmadığı görülmüştür.

Çalışmamızda, özellikle Chrysostomou ve ark., Karadağlı, Zıvrallı, Çelik, Anıl ve Altın tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında, TBDY-2018’de belirlenmiş ankraj çapı ve boyunu temsilen iki adet numune, çalışmamız için modellenmiş ankraj çapı ve boyunu temsilen iki adet numune ve ankrajların yerleşim lokasyonunu temsilen iki adet numune oluşturulmuştur. Deney gruplarının beton dayanımına göre, önceki

deneydeki hasar durumlarına bakılmaksızın deney grupları belirlenmiştir.

2.1.1 Deney Gruplarının Belirlenmesi

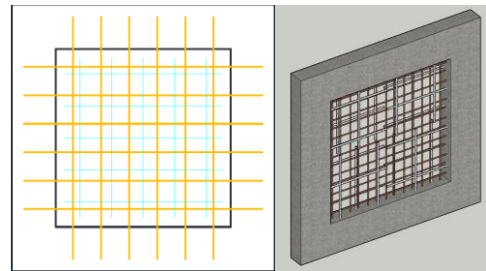
İncelenen literatür çerçevesinde, A ve B grubu olmak üzere iki adet deney grubu oluşturulmuştur. A grubu da kendi içerisinde, mevcut Yönetmelik kriterleri ile deney için belirlenmiş ankraj çapı olmak üzere iki grup oluşturulmuştur. Her bir grup için iki adet numune olacak şekilde toplam altı adet numuneye ilişkin bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1: Deney gruplarına ilişkin bilgiler.

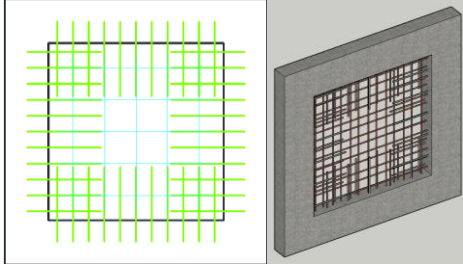
Grubu	Grup Notasyonu	Numune Sayısı	Beton Dayanımı	Ankraj Delik Derinliği (cm)	Ankraj Bindirme Uzunluğu (cm)	Kolon ve Kirişlerde Kullanılan Ankraj Çapı ve Sayısı
Ankraj çapı	A ₁	2	C16/20	18	50	6Ø12
	A ₂	2	C16/20	12	30	11Ø8
Ankraj lokasyonu	B	2	C16/20	12	30	11Ø8
Toplam Numune Sayısı	6					

2.1.2 Numunelerin Hazırlanması

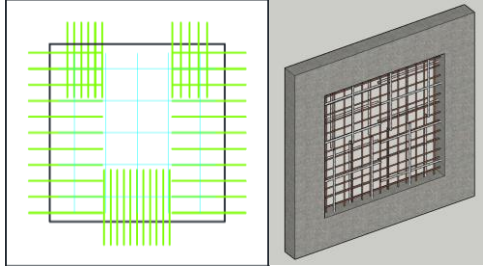
A₁, A₂ ve B deney gruplarında kullanılan numuneler, Kale’nin çalışmasında boş çerçeve grubundan seçilen numunelerdir. Çerçevelerin, perde imalatı amacıyla beton dökülmeden önceki durumlarını gösteren çizimler Şekil 3-5’te gösterilmiştir.



Şekil 3: A₁ grubu numunelerin ankraj çizimleri.



Şekil 4: A2 grubu numunelerin ankraj çizimleri.

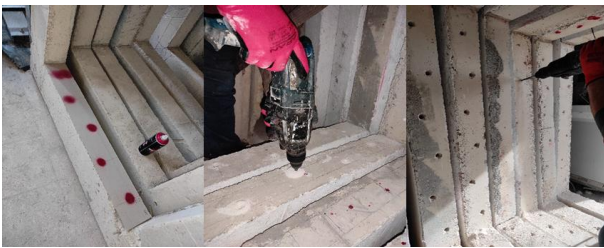


Şekil 5: B grubu numunelerin ankraj çizimleri.

Çerçevelerde beton tutuculuğunu arttırmak için ankrajların orta akslarına gelecek şekilde Q131/131 mm tipinde, 15 cm x 15 cm göz aralığında, 5 mm çapında ve yaklaşık 90 cm x 90 cm ebadında çelik hasır kullanılmıştır.

Numunelerin hazırlanması ile ilgili olarak elektrikli el matkabı yardımıyla;

- A₁ grubunda Ø12 ankraj çubukları için 15 mm çapında uç ile 18 cm derinliğinde, her bir kolonda altı adet, her bir kirişte altı adet olmak üzere 24 adet,
- A₂ grubunda Ø8 ankraj çubukları için 12 mm çapında uç ile 12 cm derinliğinde, her bir kolonda 11 adet, her bir kirişte 11 adet olmak üzere 44 adet,



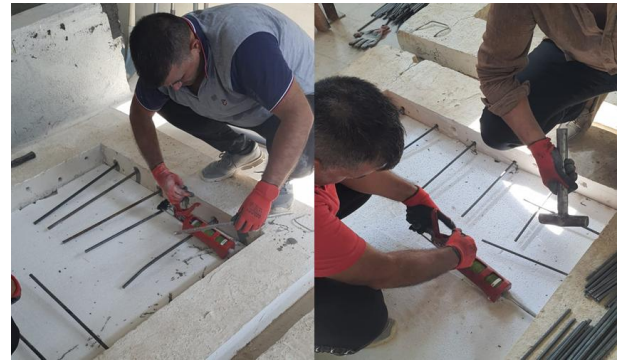
Şekil 6: Numunelere deliklerin delinmesi.

- B grubunda Ø8 ankraj çubukları için 12 mm çapında uç ile 12 cm derinliğinde, her bir kolonda 11 adet, her bir kirişte 11 adet olmak üzere 44 adet delik delinmiştir.

Numuneler delinmeden önce, belirlenen tasarıma göre mukavva üzerinde delik yerleri belirlenerek şablon hazırlanmış, şablon ve kırmızı sprey boya

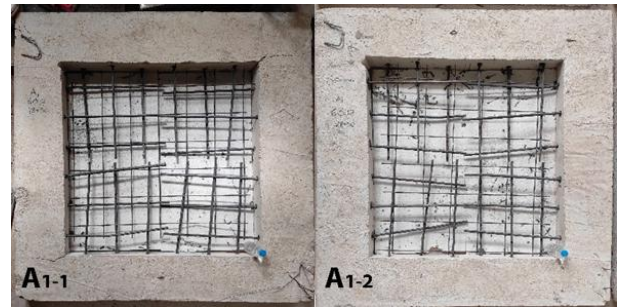
yardımla delik yerleri işaretlenmiştir (Şekil 6). Açılan delikler, tek bir sıra yerine çapraz ve şaşırtmalı olarak delinmiştir. Daha sonra numuneler, ankrajların ekilmesi için laboratuvar ortamında zemine yerleştirilmiştir.

Ankraj ekimi öncesinde, perde duvarın modellenen perde duvara uygun olarak imal edilmesi için ankraj ekimi öncesinde 50 cm x 100 cm ebadında 25 mm kalınlığında iki adet ekspande polistiren (EPS) yerleştirilmiştir. Şekil 7'de görülen ankraj ekimi işleminde MEMOCHEM STE-410 ve NORTHFIX 410 kimyasal dübel (epoksi) kullanılmıştır [23].

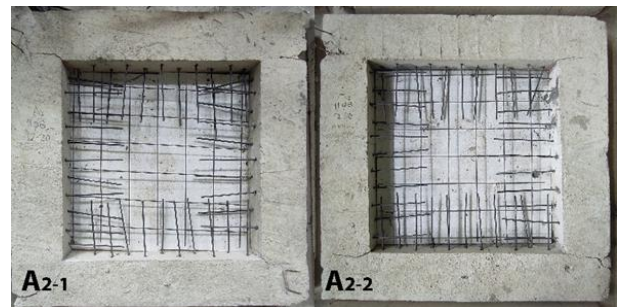


Şekil 7: Ankrajların ekilmesi.

Perde beton imalatı öncesinde, deney düzeneğinde çerçeveye sabitleme parçasını takmak için numunelerin uygun köşesine 0,5 lt. içi dolu su şişesi bırakılmıştır (Şekil 8-10).



Şekil 8: Ankraj ekimi tamamlanan A₁ grubu.



Şekil 9: Ankraj ekimi tamamlanan A₂ grubu.



Şekil 10: Ankraj ekimi tamamlanan B grubu.

Çerçevelerin ankraj ekimi ve hasır yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra C30/37 hazır beton dökülerek çerçevelerin perde beton imalatı tamamlanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11: Perde duvar imalatlarının tamamlanması.

Perde için dökülen betonun basınç dayanımlarının tespiti için beton dökülme aşamasında hazır beton, 150 x 150 x 150 mm'lik küplere TS EN 12390-2 (2019)'ye uygun olarak dayanım tespiti amacıyla 12 adet beton numunesi alınmıştır. Alınan küp numunelerinden 9 adedi deney gününe kadar laboratuvar ortamında diğer numuneler ile birlikte muhafaza edilmiştir. Diğer üç küp numune ise beton dökümünün ardından bir gün sonra prizini aldıktan sonra küp kalıplardan çıkarılarak TS EN 12390-2 (2019)'e göre 28 gün boyunca 20±2 °C kür havuzunda küre tabi tutulmuştur. Hazır betonun 1 m³ beton için karışım oranları, beton üretim tesisinden temin edilerek Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Deney elemanlarında kullanılan 1 m³ beton için karışım oranları

Betonda Kullanılan Malzemeler	Ağırlık (kg)	Oranı (%)
Çimento (CEM II/A-LL 42,5R)	365,00	15,51
Kırma Kum	988,00	41,98
İri Agrega (5-11 mm)	812,00	34,41
Su	185,00	7,87
Katkı	5,11	0,23
Toplam	2.355,00	100,00

28. gün sonunda kür havuzundan çıkarılan numuneler, kuruduktan sonra TS EN 12390-3 (2019)'e uygun olarak Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ABD Malzeme Laboratuvarında bilgisayar kontrollü pres makinası yardımıyla sabit yükleme altında tek eksenli basınç dayanım testine tabii tutulmuştur. 28 gün boyunca suda bekletilen küp numunelerinin küp dayanım testi sonuçlarının ortalaması ve silindirik basınç dayanımına dönüştürülmesi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: 28 gün suda bekletilmiş numunelerin basınç dayanım değerleri

Küp Numuneleri	Basınç Dayanımı, f_{ck} (MPa)		
	28 Günlük Suda Bekletilmiş (Küp)	28 Günlük Suda Bekletilmiş Küp (Ortalama)	28 Günlük Suda Bekletilmiş Silindir (Ortalama) $0,85.f_{ck}$
1	35,17		
2	34,55	34,91	29,67
3	35,01		

Deney gününe kadar (64.gün) laboratuvar ortamında deney numuneleri ile aynı koşullarda muhafaza edilen küp numunelerinin küp dayanım testi sonuçlarının ortalaması ve silindirik basınç dayanımına dönüştürülmesi Tablo 4'te verilmiştir. Laboratuvar ortamında muhafaza edilen küp numunelerinin silindirik basınç dayanımları, yapılan betonarme hesaplarda tasarım basınç dayanımı olarak kullanılmıştır.

Tablo 4: Küp numunelerinin basınç dayanım değerleri ve elastisite modülü

Küp Numuneleri	Basınç Dayanımı, f_{cd} (MPa)			Deney Günü Elastisite Modülü, E_c (MPa)
	Deney Günü, 64. Gün (Küp)	Deney Günü, 64. Gün, Küp (Ortalama)	Deney Günü, 64. Gün, Silindir (Ortalama)	
1	32,18			
2	31,43			
3	33,31			
4	31,95			
5	31,57	32,31	27,47	32.474,88
6	32,44			
7	31,81			
8	33,45			
9	32,69			

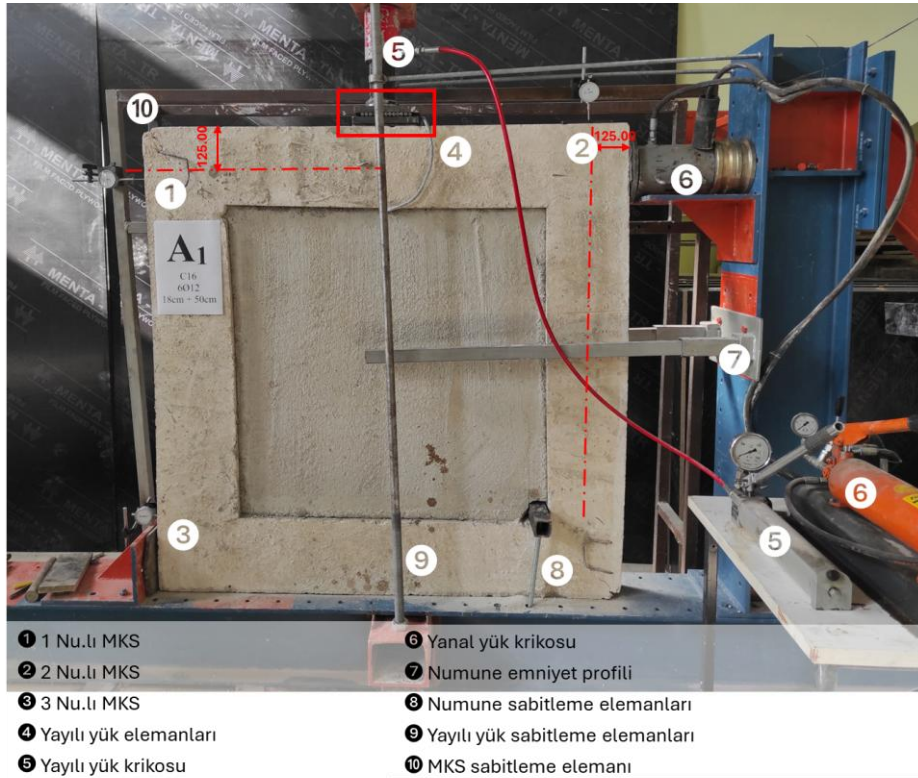
2.1.3 Deney Düzeneklerinin Hazırlanması

Şekil 2’de çizimi gösterilen deney düzeneği, Şekil 12’de gösterilen ekipmanlarla birlikte deney için hazırlanmıştır.

Çalışmada betonarme çerçevede yatay ve düşey yükleme sonucunda oluşan deformasyona bağlı yer değiştirmeleri ölçmek için Şekil 12’de 1, 2 ve 3 numara ile belirtilen üç adet mekanik komparatör saati (MKS) kullanılmıştır. Ayrıca, yatay ve düşey yükler için iki adet hidrolik krik o kullanılmıştır. 5 numara ile gösterilen düşey krik o, itme özellikli, el

kontrollü 10 ton kapasitelidir. 6 numara ile gösterilen yatay krik o ise, çift etkili, itme ve çekme özellikli, el kontrollü 40 ton kapasitelidir. İki krikoda da uygulanan kuvvet değerlerinin ölçülmesi, hidrolik krik o üzerinde bulunan basınç ölçen manometreler ile yapılmaktadır.

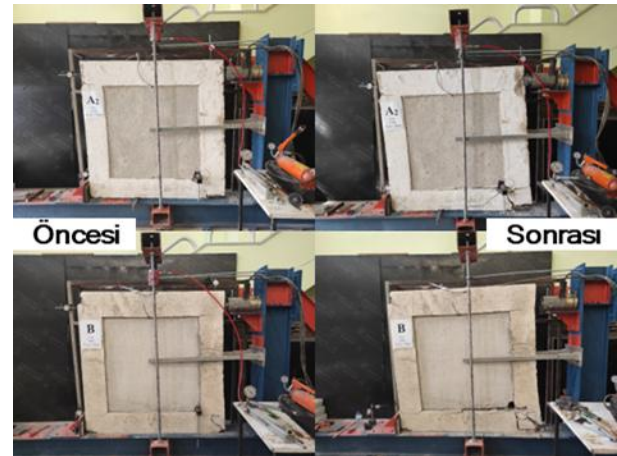
Deney hazırlığında ve deneylerin yapılmasında hazır bulunan katılımcılar, deney boyunca eldiven, baret, gözlük, toz maskesi gibi kişisel koruyucu ekipmanlar kullanarak iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin her türlü ilkeye uyum sağlamıştır.



Şekil 12: Deney düzeneği ekipmanları.

2.2 Deneylerin Yapılması

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, çerçevenin uğradığı ilk deformasyonundan sonra ikinci çalışmada deformasyonun devam ettiği kabul edildiğinden dolayı elde edilen deformasyon verilerine çerçevenin ilk deneydeki maksimum deformasyon verisi eklenerek deformasyon verileri elde edilmiştir. Deneye tabi tutulan numunelerden iki adedinin önceki ve sonraki hali Şekil 13’tedir.



Şekil 13: A2-2 ve B grubu numunelerin deneyleri.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Kale'nin çalışmasında [12] elde ettiği veriler ile çalışma kapsamında yapılan deneylerde elde edilen verilerden rijitlik (K), maksimum taşıma kapasitesi (P_{max}), ve %95 P_{max} değerine göre enerji tüketim kapasitesi (W) değerleri incelenmiştir.

Rijitlik için eğimin hesaplanabilmesi için;

- Kale'nin çalışmasında kullanılan çerçeveler için referans noktası olarak;
 - A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , B_1 , B_2 numuneleri için 8 mm deformasyona karşılık gelen yük miktarı,
- Çalışmada güçlendirilerek kullanılan çerçeveler için referans noktası olarak;
 - A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , B_1 , B_2 numuneleri için 35 mm deformasyona karşılık gelen yük miktarı tespit edilmiştir. Referans noktaları esas alınarak, yük-deformasyon oranı (P/δ_{ref}) ile eğim hesaplanmıştır.

Deneylerde elde edilen veriler, rijitlik (K), maksimum taşıma kapasitesi (P_{max}) ve P_{max} değerinin %95'i için enerji tüketim kapasitesi (W) bakımından karşılaştırmalar yapılarak deney sonuçları değerlendirilmiştir.

A_1 , A_2 ve B deney grupları için yüklemeler, maksimum yüke (P_{max}) ulaştıktan sonra P_{max} 'ın %95'ine kadar devam ettirilmiş ve deneyler sonlandırılmıştır.

3.1 Ankraj Çapı (A) Grubu Numuneleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

A_1 ve A_2 deney grupları, Kale'nin çalışmasında kullandığı boş çerçevelerden oluşturulmuştur.

A_1 deney grubunda TBDY-2018'e uygun olarak ölçeklendirilerek kullanılan 6Ø12 ankrajın toplam alanı 6,78 cm² iken A_2 deney grubunda ölçeklendirilerek kullanılan 11Ø8 ankrajın toplam kesit alanı 5,50 cm²'dir. A_1 grubuna göre A_2 grubundaki ankrajların toplam kesit alanında görülen %19 oranında azalma için, 6Ø12 ankraj verilerinde uygulanan yükleme değerleri (5,5/6,78) oranıyla çarpılarak P değerlerinde düzeltme yapılmıştır.

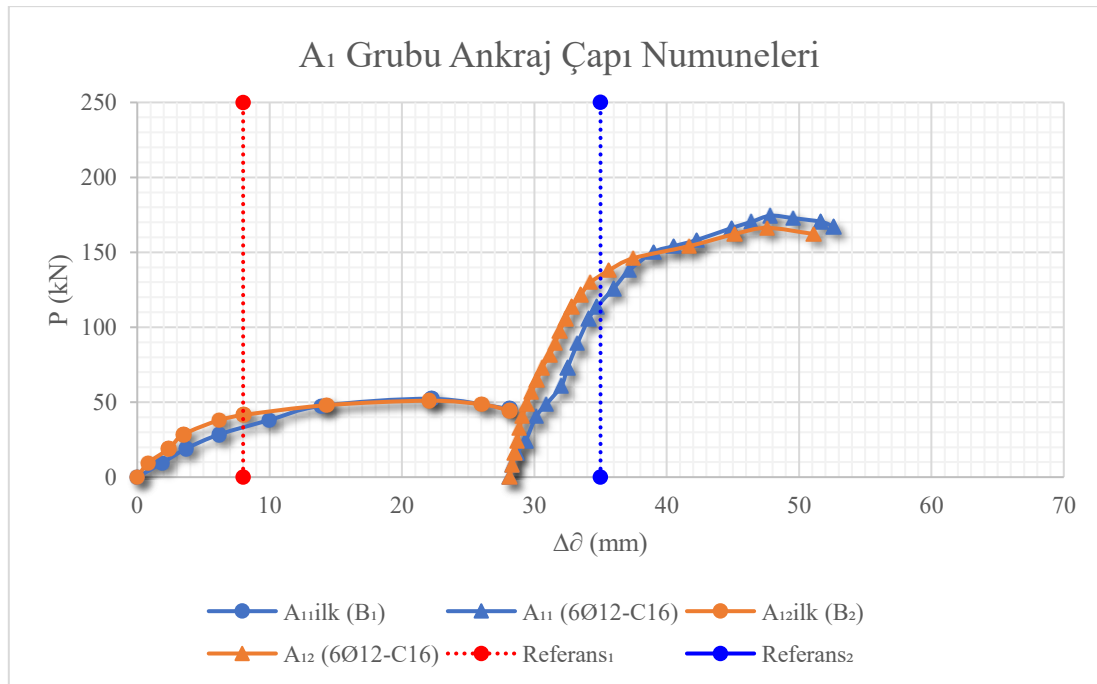
A_1 ve A_2 grubu için, referans noktası olarak belirlenmiş 8 mm ve 35 mm deformasyonlarına karşılık gelen yük miktarı, belirlenen referans değerlerine oranlanarak rijitlik değerine karşılık gelen eğim ($K=P/\delta_{ref}$) hesaplanmıştır.

3.1.1 A_1 Grubu Numunelerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Rijitlik (K) değerlendirmesi için, A_1 grubu numunelerinin verilerinden oluşturulmuş grafik Şekil 14'tedir. Rijitlik (K) bakımından; düzeltilmiş 6Ø12 ankraj değerleri ile Kale'nin çalışmasındaki veriler karşılaştırıldığında, rijitliğin A_{1-1} numunesi için %396,30 oranında arttığı, A_{1-2} numunesi için %359,33 oranında arttığı görülmüştür.

Maksimum taşıma kapasitesi (P_{max}) bakımından; düzeltilmiş 6Ø12 ankraj değerleri ile Kale'nin çalışmasındaki veriler karşılaştırıldığında, maksimum taşıma kapasitesinin A_{1-1} numunesi için %233,80 oranında arttığı, A_{1-2} numunesi için %226,07 oranında arttığı görülmüştür.

Enerji tüketim kapasitesi (W) bakımından; düzeltilmiş 6Ø12 ankraj değerleri ile Kale'nin çalışmasındaki veriler karşılaştırıldığında, maksimum tüketim kapasitesinin A_{1-1} numunesi için %196,97 oranında arttığı, A_{1-2} numunesi için %185,90 oranında arttığı görülmüştür.



Şekil 14: A₁ grubu numuneleri yük-deformasyon grafiği.

3.1.2 A₂ Grubu Numunelerinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Rijitlik (K) değerlendirmesi için, A₁ grubu numunelerinin verilerinden oluşturulmuş grafik Şekil 15'tedir. Rijitlik (K) bakımından; Kale'nin çalışmasındaki veriler ile deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında, rijitliğin A₂₋₁ numunesi için %318,61 oranında arttığı, A₂₋₂ numunesi için %280,93 oranında arttığı görülmüştür.

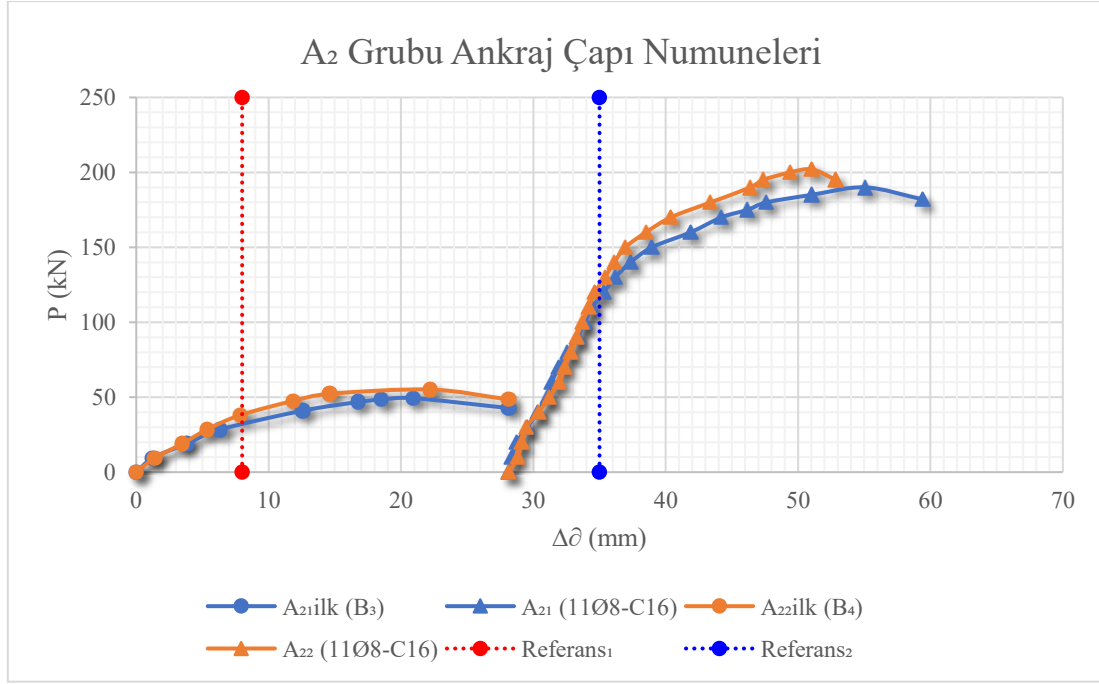
Maksimum taşıma kapasitesi ($P_{\max}$) bakımından; Kale'nin çalışmasındaki veriler ile deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında, maksimum taşıma kapasitesinin A_{2-1} numunesi için %284,62 oranında arttığı, A_{2-2} numunesi için %266,61 oranında arttığı görülmüştür.

Enerji tüketim kapasitesi (W) bakımından; Kale'nin çalışmasındaki veriler ile deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında, maksimum tüketim kapasitesinin A₂₋₁ numunesi için %436,48 oranında arttığı, A₂₋₂ numunesi için %267,78 oranında arttığı görülmüştür.

3.1.3 A Grubunun Karşılaştırılması

Yük ve deformasyon verilerinden oluşturulan A₁ ve A₂ grubu numunelerine ilişkin yük ve deformasyon verilerinden oluşturulan grafik Şekil 16'dadır.

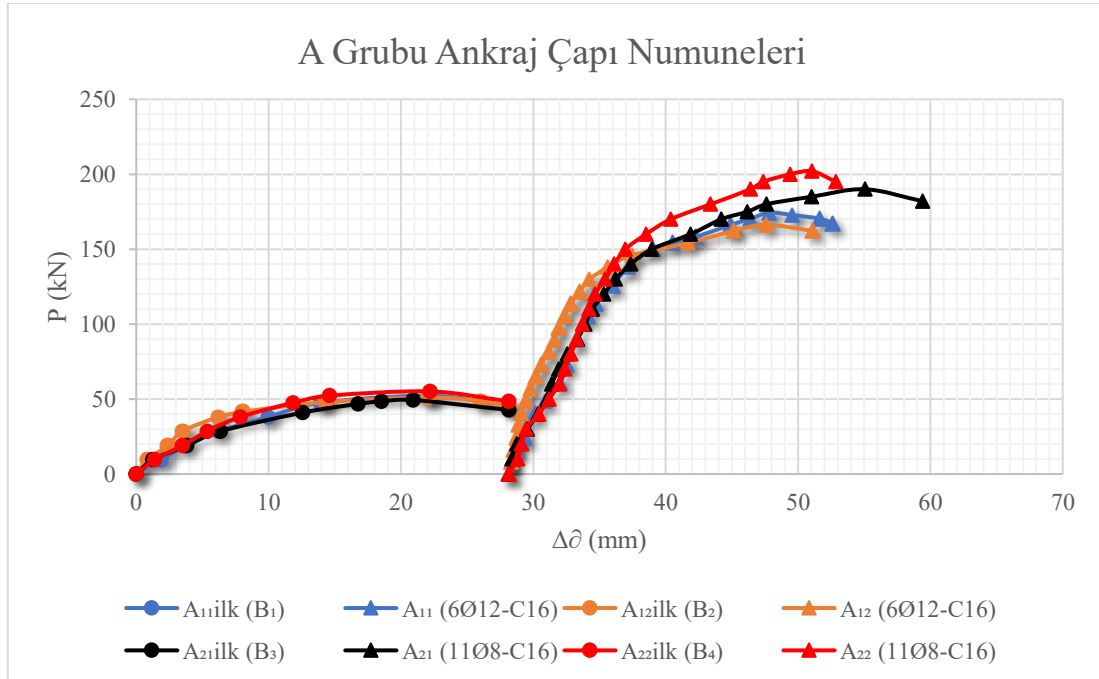
Genel olarak, A grubu numunelerinin çalışma öncesindeki yük-deformasyon grafiğine bakıldığında, numunelerde yapılan deneylerde yük-deformasyon miktarlarının benzer davranış gösterdiği görülmüştür. TBDY-2018'e uygun 6Ø12 olarak tasarlanan A₁ grubu numuneleri ile çalışma için 11Ø8 olarak tasarlanan A₂ grubu numunelerine ilişkin deney sonuçları incelendiğinde rijitlikle ilgili olarak, A₁ grubunun 22,71 kN/mm, A₂ grubunun 18,03 kN/mm rijitlik ortalaması olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, gruplar arası rijitlik karşılaştırıldığında, çalışma için 11Ø8 olarak modellenen A₂ grubunun rijitliğin %20,58 oranında azaldığı görülmektedir. Rijitlik tek başına değerlendirildiğinde, rijitliğin azalması yanal yüklerin etkisi altında deformasyonda artış olarak değerlendirilebilir.



Şekil 15: A2 grubu numuneleri yük-deformasyon grafiği.

Maksimum taşıma kapasitesi bakımından incelendiğinde, A₁ grubunda TBDY-2018'e göre yapılan perde duvar güçlendirmesinde, çerçevelerin ortalama 125,35 kN kadar maksimum taşıma kapasitesinde artış gösterdiği, A₂ grubunda

ise 150,38 kN kadar maksimum taşıma kapasitesinde artış gösterdiği, A₁ ve A₂ grupları karşılaştırıldığında ise çalışma için 11Ø8 olarak modellenen A₂ grubunun maksimum taşıma kapasitesinin %19,96 arttığı görülmektedir.



Şekil 16: A grubu numuneleri yük-deformasyon grafiği.

Enerji tüketim kapasitesi bakımından incelendiğinde, A₁ grubunda yapılan perde duvar güçlendirmesinde, çerçevelerin ortalama 2.448,79 kN.mm enerji tüketim kapasitesinde artış

gösterdiği, A₂ grubunda ise 3.504,44 kN.mm kadar enerji tüketim kapasitesinde artış gösterdiği, A₁ ve A₂ grupları karşılaştırıldığında ise çalışma için 11Ø8 olarak modellenen A₂ grubunun enerji

tüketim kapasitesinin %43,11 oranında arttığı görülmektedir.

A grubu rijitlik, maksimum taşıma kapasitesi ve enerji tüketim kapasitesi ile birlikte değerlendirildiğinde, A₂ grubunun A₁ grubuna göre kullanılan ankraj sayısı ve ankraj çapının maliyet ve tasarım açısından avantaj sağladığı görülmektedir.

3.2 Lokasyon (B) Grubu Numuneleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

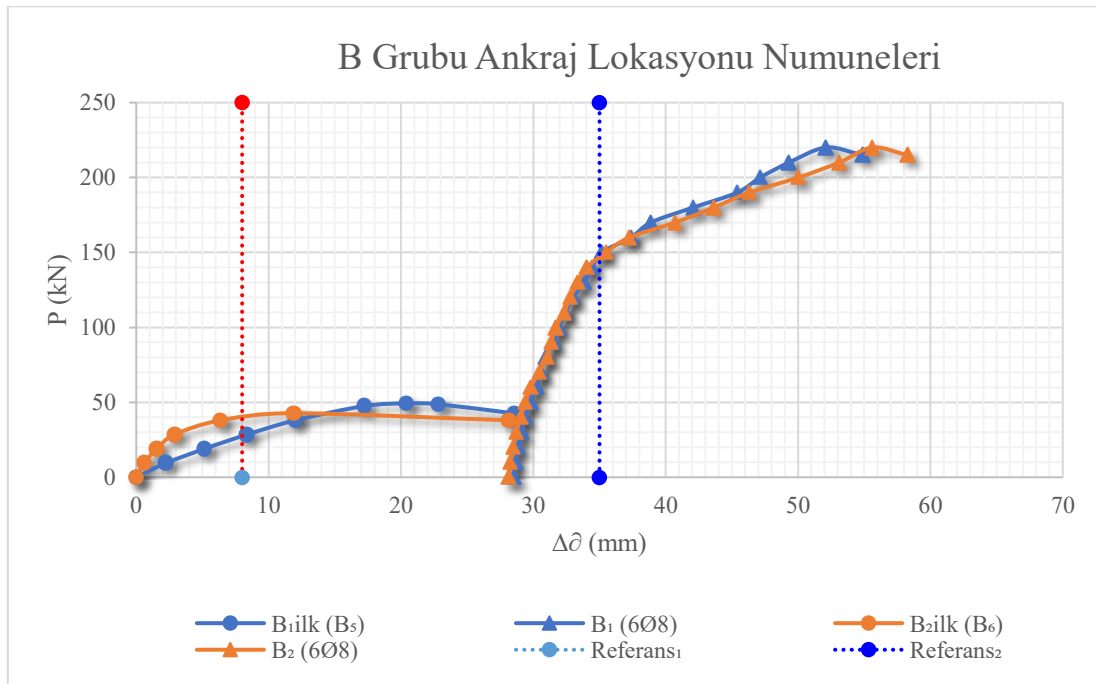
B deney grubu, Kale'nin çalışmasında kullandığı boş çerçevelerden oluşturulmuştur. B deney grubu için yüklemeler, maksimum yüke (P_{max}) ulaştıktan sonra P_{max} 'ın %95'ine kadar devam ettirilmiş ve deneyler sonlandırılmıştır.

Rijitlik (K) değerlendirmesi için, yük ve deformasyon verilerinden oluşturulan B₁ ve B₂ numunelerine ait grafiklerin birleştirilmiş hali Şekil 17'de gösterilmiştir.

B grubu için, referans noktası olarak belirlenmiş 8 mm ve 35 mm deformasyonlarına karşılık gelen yük miktarı, belirlenen referans değerlerine oranlanarak rijitlik değerine karşılık gelen eğim ($K=P/\Delta_{ref}$) hesaplanmıştır.

Rijitlik (K) bakımından; Kale'nin çalışmasındaki veriler ile deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında, rijitliğin B₁ numunesi için %570,60 oranında arttığı, B₂ numunesi için %317,68 oranında arttığı görülmüştür.

Maksimum taşıma kapasitesi (P_{max}) bakımından; Kale'nin çalışmasındaki veriler ile deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında, maksimum taşıma kapasitesinin B₁ numunesi için %355,02 oranında arttığı, B₂ numunesi için %414,62 oranında arttığı görülmüştür.



Şekil 17: B grubu numuneleri yük-deformasyon grafiği.

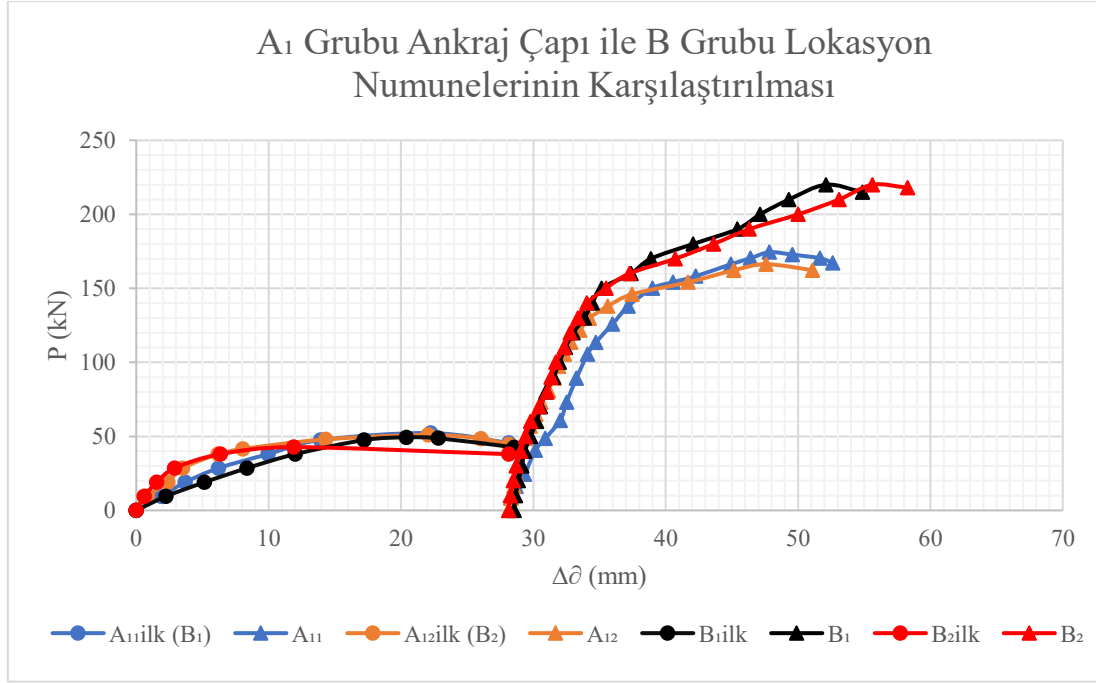
Enerji tüketim kapasitesi (W) bakımından; Kale'nin çalışmasındaki veriler ile deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında, maksimum tüketim kapasitesinin B₁ numunesi için %499,87 oranında arttığı, B₂ numunesi için %1.047,22 oranında arttığı görülmüştür.

3.3 A₁ Grubu Ankraj Çapı ile B Grubu Lokasyon Numunelerinin Karşılaştırılması

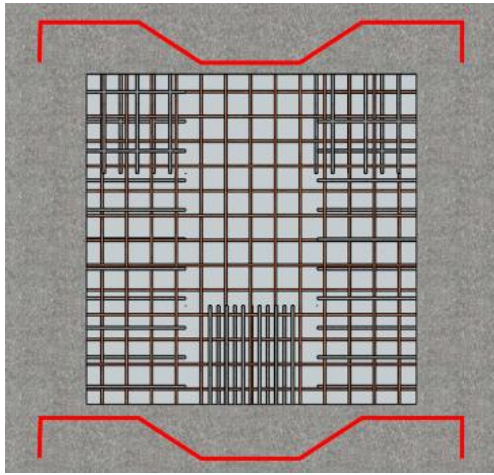
Yük ve deformasyon verilerinden oluşturulan A₁ ve B grubu numunelerine ilişkin yük ve deformasyon verilerinden oluşturulan grafik Şekil 18'dedir.

Genel olarak, TBDY-2018’de belirtilen kriterlerin iyileştirilmesi amacıyla oluşturulan A₁ grubu numuneleri ile ankrajların ekildiği lokasyon durumuna göre yine 11Ø8 olarak tasarlanmış B grubu numuneleri karşılaştırılmıştır. A₁ ve B grubu numunelerinin çalışma öncesindeki yük-

deformasyon grafiğine bakıldığında, yük-deformasyon miktarlarının benzer davranış gösterdiği görülmüştür. B grubunda, kolon-kiriş ve kolon-döşeme basınç bölgeleri dikkate alınarak bir tasarım yapılmıştır (Şekil 19).



Şekil 18: A₁ ve B grubu numuneleri yük-deformasyon grafiği.



Şekil 19: B grubunda ankraj yerleşiminin grafik çizim ile gösterimi.

Rijitlik bakımından, 11Ø8 olarak tasarlanan A₁ grubu numuneleri ile 11Ø8 olarak tasarlanan B grubu numunelerine ilişkin deney sonuçları incelendiğinde, A₁ grubunun rijitlik ortalamasının 22,71 kN/mm, B grubunun rijitlik ortalamasının 22,51 kN/mm olduğu görülmektedir. Bununla

birlikte, gruplar arası rijitlik karşılaştırıldığında, B grubunun rijitliğin A₁ grubuna kıyasla %0,86 oranında azaldığı görülmektedir. Bu azalışın, oran açısından ihmal edilebilecek bir düzeyde olduğu değerlendirilmektedir.

Maksimum taşıma kapasitesi bakımından incelendiğinde, A₁ grubunda yapılan perde duvar güçlendirmesinde, çerçevelerin ortalama 150,38 kN kadar maksimum taşıma kapasitesinde artış gösterdiği, B grubunda ise 179,68 kN kadar maksimum taşıma kapasitesinde artış gösterdiği, A₁ ve B grupları karşılaştırıldığında ise B grubunun A₁ grubuna göre maksimum taşıma kapasitesinin %43,33 oranında arttığı görülmektedir.

Enerji tüketim kapasitesi bakımından incelendiğinde, A₁ grubunda yapılan perde duvar güçlendirmesinde, çerçevelerin ortalama 3.504,44 kN.mm enerji tüketim kapasitesinde artış gösterdiği, B grubunda ise 4.100,02 kN.mm kadar enerji tüketim kapasitesinde artış gösterdiği, A₁ ve B grupları karşılaştırıldığında ise B grubunun A₁

grubuna göre enerji tüketim kapasitesinin %67,43 oranında arttığı görülmektedir.

4. SONUÇ

Yapılan çalışma ile ankraj donatı çap ve yerlerinin güçlendirmeye sağladığı katkılar araştırılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan düşük dayanımlı mevcut betonarme çerçeveler ile güçlendirme ihtiyacı olan 2000 yılı öncesinde hazır beton ile yapılmayan konut stoku hedef alınmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda, TBDY-2018'de verilen güçlendirme hükümlerinin aksine, güçlendirmede kullanılan ankraj çaplarının küçültülerek ankraj sayısının artırılmasının ve ankraj yerleşiminin enerji tüketme kapasitesi bakımından güçlendirmeye katkı sağladığı görülmüştür.

Yazarların Katkıları: Her iki yazar, literatür taraması, deney gruplarının oluşturulması, deneylerin yapılması, elde edilen verilerin değerlendirilmesi, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır

Teşekkür: Yazarlar, Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında 2023-139 numaralı proje ile destekleyen Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğüne teşekkür ederler.

Çıkar Çatışmaları: Yazarlar, sunulan çalışmada herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] İ. B. Topçu ve T. Bahadırılı, "Ferrocementin Gemi ve Teknelerde Kullanımı," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 23, sy. 1, ss. 49–62, Haz. 2010.
- [2] DBYBHY, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, T.C. Resmî Gazete, 2007. [Çevrimiçi]. Erişim: 30 Ekim 2024. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/03/20070306-3.htm>
- [3] S. Etli ve M. Akgül, "TBDY 2018 ile Tasarlanan Kompozit Binaların Ana ve Artçı Depremlerde Davranışı," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Şub. 2023, doi: 10.29137/umagd.1241090.

- [4] M. Akgül ve O. Doğan, "Altındağ/Ankara Özelinde Tipik Yığma Binaların Deprem Risklerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi," *NWSA Academic Journals*, c. 15, sy. 1, ss. 1–14, Oca. 2020, doi: 10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0446.
- [5] M. Akgül ve O. Doğan, "Determination of Reinforcement Adherence Loss by Accelerated Corrosion Test for Normal and 4%NaCl Solubility Cured Flat and Ribbed Reinforced Concretes with Different Strengths," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, c. 14, sy. 2, ss. 691–704, Tem. 2022, doi: 10.29137/umagd.1092523.
- [6] M. Akgül ve S. Etli, "06 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık, Elbistan) Depremleri Sonrasında Malatya Özelindeki Yığma Yapılarda Hasar Oluşumunun Değerlendirmesi," içinde S. A. Ü. Bardak, Ed., *Mühendislikte Güncel Araştırmalar*. Ankara: Gece Publishing, 2023, ss. 1–22.
- [7] M. E. Yıldırım, C. Yeşilyurt, U. Gözün, B. Öztürk ve C. Dönmez, "Structural Performance of R/C Buildings in 2023 Kahramanmaraş Earthquakes Under the Lens of Hassan Index," 2024, ss. 99–114, doi: 10.1007/978-3-031-57659-1_7.
- [8] M. Akgül ve O. Doğan, "Evaluation Of The Effect Of The Elazığ-Sivrice Earthquake Dated 4 April 2019 On Masonry Structures," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, ss. 265–277, Oca. 2020, doi: 10.29137/umagd.621701.
- [9] E. Gültepe, H. G. Çömlekoğlu, B. Öztürk ve C. Dönmez, "Discussion on the Causes of the Observed Damages in the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes," 2024, ss. 81–97, doi: 10.1007/978-3-031-57659-1_6.
- [10] S. Pujol vd., "Quantitative Evaluation of the Damage to RC Buildings Caused by the 2023 Southeast Turkey Earthquake Sequence," *Earthquake Spectra*, c. 40, sy. 1, ss. 505–530, Şub. 2024, doi: 10.1177/87552930231211208.
- [11] TBDY, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Resmî Gazete, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim: 30 Ekim 2024. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>
- [12] F. Kale, "Betonarme çerçevelerin yatay ve düşey yükler altında davranışı ve çapraz çelik profillerle betonarme çerçevelerin

- güçlendirilmesinde ankraj bulonlarının kesme performansının deneysel olarak incelenmesi,” Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2024.
- [13] C. Chrysostomou vd., “Seismic Retrofitting of RC Frames with RC Infilling (SERFIN Project),” *SERIES Transnational Access Report*, Ispra, Oca. 2014. doi: [www.doi.org/10.2788/630](https://doi.org/10.2788/630).
- [14] F. Çelik, “Mevcut Yığma Binalarda Güçlendirme Ankrajlarının Çap ve Ankraj Derinliğine Bağlı Çekme ve Kesme Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2018.
- [15] H. Tekeli vd., “Betonarme Çerçeve Dolgu Duvarların Hasır Çelik Donatılı Sıva ile Güçlendirilmesi,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 3, sy. 2, ss. 179–191, Ara. 2014, doi: 10.17798/beufen.25105.
- [16] Ö. Anıl ve S. Altın, “An Experimental Study on Reinforced Concrete Partially Infilled Frames,” *Engineering Structures*, c. 29, sy. 3, ss. 449–460, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.engstruct.2006.05.011.
- [17] Redwan-Ul-Islam, Z. Fariha, M. A. Bashar Bhuiyan ve R. Islam, “Analysis of RC Buildings Under Seismic Zones in Bangladesh Concerning Shear Wall, Aspect Ratio and Breadth to Length Ratio,” *Journal of Physics: Conference Series*, c. 2521, sy. 1, s. 012005, Haz. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2521/1/012005.
- [18] A. Nishtala ve A. Radke, “Review of Using Shear Walls and Bracings for Seismic Strengthening of High-Rise RC Structures,” *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, c. 2, sy. 03, ss. 574–578, Mar. 2024, doi: 10.47392/IRJAEH.2024.0083.
- [19] J. M. Rao ve K. Rajasekhar, “Seismic Evaluation of RC Framed Building With and Without Shear Walls (Performance Based Design),” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, c. 5, sy. 6, ss. 261–269, Haz. 2016, doi: 10.21275/v5i6.NOV164112.
- [20] İ. Zıvrallı, “Mevcut betonarme binada güçlendirme ankrajlarının çap ve derinliğine bağlı çekme performansının deneysel olarak incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2024.
- [21] T. İ. Karadağlı, “Düşük dayanımlı betonlarda kimyasal ankrajlı çelik çubuğun çap ve gömme derinliğinin deneysel olarak belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2024.
- [22] A. Hakim ve A. Masri, “Case Study of Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Low-Rise Reinforced Concrete Building,” *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, c. 5, sy. 1, Tem. 2018, doi: 10.14455/ISEC.res.2018.13.
- [23] Yoldaş, “MEMOCHEM STE-410 Kimyasal Dübel Teknik Bilgi Formu,” Nisan 2021. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://yoldasgrup.com/wp-content/uploads/TBF-MEMOCHEM-STE-KIMYASAL-DUBEL.pdf>

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Riskli Yapı Tespitinde AURAP Yöntemi ile P25 Yönteminin Karşılaştırılması: Düzce İli Örneği

Comparison of AURAP Method and P25 Method in Risky Structure Detection: Example of Düzce Province

Serdar Sert^{1,*}, Hüseyin Bayraktar²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye.

² Düzce Üniversitesi, Kaynaşlı MYO, Yapı Ressamlığı Programı, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Düzce, Türkiye.

Geliş / Received: 02.03.2025

Kabul / Accepted: 08.04.2025

*Sorumlu Yazar: Serdar Sert serdar88sert@gmail.com

ÖZ: Ülkemizin büyük bir bölümünün deprem bölgesinde yer alması nedeniyle, büyük depremler sonucunda ciddi can kayıpları ve maddi zararlar meydana gelmiştir. Olası depremlerde hangi binaların yıkılma riski taşıdığını belirlemek için yapıların zemin özellikleri ile kullanılan malzeme ve elemanlar detaylı bir şekilde incelenmelidir. Bu özelliklere ilişkin veriler kullanılarak bilgisayar programlarıyla modelleme ve analizler yapılabilir ve binaların risk durumu değerlendirilebilir. Ancak, bu tür detaylı yapı analizleri zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Hızlı değerlendirme yöntemleri ise hızlı sonuçların alınmasında zaman ve maliyet bakımından avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma Türkiye'nin aktif fay hatları üzerinde bulunan ve 12 Kasım 1999 yılında büyük bir deprem yaşamış olan Düzce ilinin merkez ilçesinde yoğunlukla 1999 depremi öncesinde inşa edilmiş binaların bulunduğu mahallede seçilen bina için deprem riskini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle Düzce Merkez İlçesi'nde, ekonomik ömrünü doldurmuş binaların hem 12 Kasım 1999 Düzce depremi (7.2 Mw) hem 23 Kasım 2022 yılında Düzce depremini (5.9 Mw) yaşadığından dolayı risk faktörü yüksektir. Çalışmada, olası riskleri analiz etmek için hızlı değerlendirme yöntemleri AURAP yöntemi ve P25 yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler zemin özellikleri, yapım yılı, kat adedi, temel tipi, etriye sıklaştırması, donatı detayı, kısa kolon, asma kat gibi etkenleri göz önüne alarak risk seviyelerini hesaplamaya olanak tanımaktadır. Çalışma, incelenen binanın iki yöntem ile karşılaştırılmasını sağlayarak, aralarındaki farkları ortaya koymuş ve 1999 yılı öncesi binanın deprem risk durumunu belirlemiştir.

Anahtar Kelimeler: Düzce; AURAP yöntemi; P25 yöntemi; riskli yapılar; hızlı değerlendirme yöntemleri

ABSTRACT: Due to the fact that a large part of our country is located in the earthquake zone, serious loss of life and material damage have occurred as a result of major earthquakes. In order to determine which buildings are at risk of collapse in possible earthquakes, the soil properties of the structures and the materials and elements used should be examined in detail. Modeling and analysis can be performed with computer programs using data related to these characteristics, and the risk status of buildings can be evaluated. However, such detailed structure analysis can be time consuming and costly. Fast evaluation methods, on the other hand, provide advantages in terms of time and cost in obtaining fast results. This study aims to assess the earthquake risk for a building selected in the neighborhood of buildings built before the 1999 earthquake, mainly in the central district of Düzce province, which is located on active fault lines of Turkey and experienced a major earthquake on November 12, 1999. Especially in the Central District of Düzce, the risk factor is high due to the fact that buildings that have completed their economic life have experienced both the 12 November 1999 Düzce earthquake (7.2 Mw) and the 23 November 2022 Düzce earthquake (5.9 Mw). In the study, rapid assessment methods AURAP method and P25 method were used to analyze the possible risks. These methods allow calculating the risk levels by taking into account factors such as floor characteristics, year of construction, number of floors, foundation type, floor tightening, reinforcement detail, short column, mezzanine floor. The study provided a comparison of the examined building with two methods, Deciphered the differences between them and determined the earthquake risk status of the building before 1999.

Keywords: Düzce; AURAP method; P25 method; risky structures; rapid assessment methods

1. GİRİŞ

Ülkemizin %90'ından fazlası deprem kuşağında yer aldığından, yapıların depreme karşı güvenliği hayati önem taşımaktadır. 17 Ağustos 1999 İzmit-Düzce depremi, büyük can ve mal kayıplarına yol açmış, bu da can kayıplarını en aza indirmek için alınan önlemler ve çalışmaların artmasına neden olmuştur. Bu çalışmalar, deprem yönetmeliklerine de yansımış; 2007 yılında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik ve sonra 2018 yılında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [1] yürürlüğe girmiştir.

Kentlerde eski yapı stoğu azımsanmayacak düzeydedir. Bu durum eski yapıların deprem bakımından incelenmesini beraberinde getirmektedir. Yıkıcı bir deprem öncesinde riskli binaların tespit edilmesi gerekmektedir. Ancak, yönetmelik tabanlı değerlendirme yöntemleri hem maliyetli hem de zaman alıcıdır. Bu nedenle, öncelikle daha hızlı ve pratik olan 'Hızlı Sismik Güvenlik Değerlendirme Yöntemleri' tercih edilebilir.

P5 Yöntemi depremde can kaybının önlenmesi için mevcut binaların hızla taranmasını amaç edinen bir değerlendirme yöntemi, birçok konferansta bildiri olarak sunulmuş ve dergilerde yayımlanmıştır. Daha sonra yüksek lisans tezi kapsamı ile İstanbul Teknik Üniversite'nde geliştirilmiş. Deprem sonrasında yıkılmış, orta hasarlı ve hasarsız 23 adet bina taranarak, P24 yöntemi adıyla geliştirmişlerdir. Bu çalışma, başarılı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır [2]. TÜBİTAK'ın 106M278 No.lu projesi çerçevesinde P24 yöntemi, daha geniş bir yapı grubuna uygulanarak kalibre edilmiş ve yeniden düzenlenerek P25 Yöntemi adını almıştır. Bu metot, yapının mevcut kolon, perde ve dolgu duvar ölçüleri, rijitlikleri, taşıyıcı sistem organizasyonu, bina yüksekliği, yönetmelikte belirtilen yapısal düzensizlikler, malzeme ve zemin nitelikleri gibi değişkenler üzerinden bir hesaplama yapmaktadır [3].

Aurap ve P25 gibi yöntemler, yapıların deprem performansını değerlendirmek için kullanılan modern teknikler arasında yer almaktadır. Bu yöntemler sayesinde, mevcut binaların taşıyıcı sistemlerinin ne kadar güvenli olduğu, olası bir depremde nasıl bir tepki vereceği ve güçlendirme

ihtiyacının olup olmadığı belirlenebilmektedir. Düzce'de bu tür bilimsel yöntemlerle yapılacak bir çalışma, yalnızca mevcut yapıların durumunu ortaya koymakla kalmayacak, aynı zamanda ilerleyen süreçlerde benzer risklerin önüne geçilmesi için de bir rehber niteliği taşıyacaktır. Özellikle Düzce merkezinde bugüne kadar bu kapsamda detaylı bir çalışma yapılmamış olması, bu tür projelerin ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Eğer bilimsel ve teknik temellere dayalı bir risk analizi gerçekleştirilirse, hem yerel yönetimler hem de halk, binaların güvenliği hakkında bilinçlenebilir ve gerekli önlemleri alabilir. Bu durum, yalnızca bireysel yapılar için değil, kentsel dönüşüm ve planlama süreçleri için de yol gösterici olacaktır.

Sonuç olarak, Düzce'de eski yapı stokunun fazlalığı, risk değerlendirme yöntemlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Aurap ve P25 gibi teknikler kullanılarak yapılacak bilimsel araştırmalar, kentin depreme karşı daha güvenli hale gelmesine katkı sağlayacak ve bu konuda ilerleyen çalışmalara öncülük edecektir.

2. MATERYAL VE METOT / MATERIALS AND METHODS

Değerlendirme yapılırken Düzce İli Burhaniye Mahallesi'nde bulunan 1999 öncesi bir bina seçilmiştir. Seçilen bina 3 adet deprem (12 Kasım 1999, 17 Ağustos 1999 ve 23 Kasım 2022) gördüğü ve içerisinde ciddi nem bulunduğundan dolayı hasar görmüş kolonlar mevcut olduğu için seçilmiştir. Bina Burhaniye Mahallesi'nde bulunan B+Z+4 kattan oluşmaktadır. Ayrıca binada 1999 depremi sonrasında güçlendirme yapılmamıştır.

Bu çalışmada 2 farklı hızlı değerlendirme yöntemi; P25 Puanlama Yöntemi ve AURAP yöntemi kullanılmış yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır.

2.1 P25 Puanlama Yöntemi

Önerilen hızlı değerlendirme yöntemi, binaların deprem sırasında göçme riskini analiz etmek için kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemde, ilk olarak yapının temel yapısal özelliklerini ve potansiyel göçme modlarını ifade eden yedi farklı puan (P1, P2, ..., P7) hesaplanır. Bu puanlar; kolon,

perde ve dolgu duvar boyutları, rijitlikler, taşıyıcı sistem düzeni, bina yüksekliği, yapısal düzensizlikler, malzeme ve zemin özellikleri gibi parametrelere dayalı olarak belirlenir [5].

Belirlenen P sonuç puanı, yapının az, orta veya yüksek risk grubunda yer aldığını gösterir. Eğer bina finansal olarak belirlenen bir kararsızlık bandında yer alıyorsa, daha kapsamlı bir inceleme yapılması, binanın yıkılması veya güçlendirilmesi önerilir. Bu yöntem, depreme karşı binaların hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Her bir göçme riski puanı (P_i) için tanımlanan ağırlık çarpanları dikkate alınarak, bu puanların birbiriyle etkileşimini gösteren P_w -ağırlıklı ortalama puan hesaplanır. Daha sonra, P_i puanlarından en düşük olan P_{min} değeri ile P_w -ağırlıklı ortalama puanı arasındaki ilişki değerlendirilerek, göçme kriterleri arasındaki etkileşimi temsil eden bir β -çarpanı belirlenir.

Ayrıca, yapının önem derecesi, bölgenin depremsellik düzeyi, hareketli yük katsayısı ve zeminin topoğrafik özellikleri gibi çevresel faktörler göz önünde bulundurularak bir α -çarpanı ile düzeltme yapılır. Tüm bu parametrelerin etkileşimi analiz edilerek bir P-sonuç performans puanı elde edilir [5].

Elde edilen P-sonuç puanı, yapının az, orta veya yüksek risk grubuna dahil olup olmadığını ortaya koyar. Eğer bina, finansal kriterlere bağlı olarak bir kararsızlık bandına düşerse, detaylı bir inceleme yapılması önerilir. Bu incelemenin ardından, yapının yıkılması ya da güçlendirilmesi gibi önlemler alınabilir. Böylece, yapıların göçme riski hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirilebilir ve olası can ve mal kayıplarının önlenmesine önemli bir katkı sağlanabilir. P_1 temel yapısal puanı hesaplanırken, Tablo 1'de belirtilen yapısal düzensizlik katsayıları kullanılmaktadır.

2.1.1 P0-Taşıyıcı Sistem Puanı

Binanın taşıyıcı sistem özelliklerini temsil eden P0-puanı, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$P_0 = (C_A + C_I)/h_0 \quad (1)$$

$$h_0 = -0,6H^2 + 39,6H - 13,4 \quad (2)$$

Burada, h_0 bina yüksekliğiyle ilgili bir düzeltme çarpanıdır ve bu çarpan, binanın toplam yüksekliği

(H) dikkate alınarak aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır:

Tablo 1: Yapısal düzensizlik katsayıları (f_i).

Katsayı	Tanım	Risk Seviyesi		
		Yüksek	Az	Yok
f_1	Burulma Düzensizliği	0,90	0,95	1,00
f_2	Döşeme Süreksizliği	0,90	0,95	1,00
f_3	Düşey Doğrultuda Süreksizlik	0,65-0,75	0,90	1,00
f_4	Kütle Düzensizliği	0,90	0,95	1,00
f_5	Korozyon Mevcudiyeti	0,90	0,95	1,00
f_6	Ağır Cephe Elemanları	0,90	0,95	1,00
f_7	Asma Kat Mevcudiyeti ($\gamma = \text{Asma kat} / \text{Kat alanı}$)	0,90 $\gamma \geq 0,25$	0,95 $0 < \gamma < 0,25$	1,00 $\gamma = 0$
f_8	Katlarda Seviye Farkı veya Kısmi Bodrum	0,80	0,90	1,00
f_9	Beton Kalitesi ⁽¹⁾	$f_9 = (f_c / 20)^{0.5}$		
f_{10}	Zayıf Kolon-Kuvvetli Kiriş ⁽²⁾	$f_{10} = [(I_x + I_y) / 2 I_b]^{0.15} \leq 1,0$		
f_{11}	Etriye Sıklığı ⁽³⁾	$f_{11} = 0,60 \leq (10 / s)^{0.25} \leq 1,0$		
f_{12}	Zemin Sınıfı	(Z4 için) 0,80 – 0,90	(Z3 için) 0,95	(Z2, Z1 için) 1,00
f_{13}	Temel Tipi	Tekil temel 0,90	Sürekli temel 0,95	1,00
f_{14}	Temel Derinliği	1m'den az	1 – 4m arası	4m'den fazla

⁽¹⁾ f_c , binanın MPa cinsinden beton kalitesidir.

⁽²⁾ I_x , I_y değerleri, kritik kat kolonlarının ortalama boyutlarından elde edilen temsili kolonun atalet momenti, I_b değeri ise, yine kritik katta en çok tekrar eden kirişin atalet momentidir.

⁽³⁾ s , cm cinsinden sarılma bölgesindeki etriye aralığıdır.

2.1.2 P1-Temel Yapısal Puanı

Taşıyıcı sistem puanı P0, yapısal düzensizlik katsayıları (f_i) ile çarpılarak Temel Yapısal Puan (P_1) elde edilir. Yapısal düzensizlik katsayıları ve risk seviyeleri Tablo 1'de verilmiş olup, P_1 değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır [6].

$$P_1 = P_0 \left(\prod_{i=1}^{14} f_i \right) \quad (3)$$

2.1.3 P2-Kısa Kolon Puanı

Kısa kolon, yüksekliği kattaki diğer kolonlara kıyasla daha az olup gevrek kayma kırılması riski taşıyan elemanlardır. Önceki araştırmalarda bina performans puanı hesaplanırken kısa kolon etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Ancak, kolonun ne derece kısa olduğu ve katta ne kadar yaygın olduğu da önem arz etmektedir [7].

2.1.4 P3- 'Yumuşak Kat' ve 'Zayıf Kat' Puanı

Giriş kat yüksekliğinin fazla olması veya dolgu duvarların bulunmaması, bu katı zayıf hale getirerek hasar riskini artırır. Bu durumu ifade eden P3 – Yumuşak/Zayıf Kat Puanı, aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$P_3 = 100[r_{ar} \left(\frac{h_{i+1}}{h_i} \right)^3]^{0.6} \quad (4)$$

Burada h_i ve h_{i+1} kritik kat ve üst katın yüksekliklerini gösterir. r_a ve r_r ise kolon, perde ve dolgu duvarlarının efektif alan ve atalet momenti oranlarını belirtir ve x-y yönlerinde ayrı hesaplanarak ortalaması alınır.

2.1.5 P4- Çıkmalar ve Çerçeve Süreksizliği Puanı

Giriş kat üzerindeki ağır çıkmalar, kütle düzensizliği ve deprem moment kolunun yükselmesine yol açarak çerçeve süreksizliği oluşturur [2].

Yapılan çalışmalarda bu düzensizlik binalarda % 4 ila % 54 dayanım kaybına neden olmaktadır.

2.1.6 P5- Çarpışma Puanı

Artan konut ihtiyacı nedeniyle yoğun bölgelerde bitişik ve çok katlı binalar inşa edilmektedir. Ancak, bu yapılar depremde çarpışarak ciddi hasara yol açmaktadır [8].

Yapılan araştırmalar, bitişik düzende yer alan son yapının en riskli olduğunu ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, farklı periyotlara sahip bitişik yapıların da yüksek risk barındırdığı tespit edilmiştir [9].

Bitişik iki yapının ağırlık merkezlerini birleştiren çizgi, çarpışma hattının tam ortasından geçiyorsa 'merkezi', geçmiyorsa 'dış merkezli' çarpışma meydana gelir.

2.1.7 P-6 Sıvılaşma Potansiyeli Puanı

Yer altı su seviyesine (YASS) göre sıvılaşma potansiyeli tespit edilir. Zemin özellikleri belirlenmeden değerlendirme yapılamaz. Sıvılaşma potansiyeli, zemin parametrelerine göre "az", "orta" ve "yüksek" olarak belirlenmelidir [10]:

- YASS < 2,0 m (az)
- YASS = 2,0 m – 10,0 m (orta)
- YASS > 10,0 m (yüksek)

Sıvılaşma riski olmayan zeminlerde P6 = 100 alınır.

2.1.8 P7-Toprak Hareketleri Puanı

Toprak hareketlerini belirlemek için önce zemin parametreleri tespit edilmelidir. Hareketin olup olmayacağı ve türü belirlenmelidir. Zemin hareketleri; istinat duvarı göçmesi, yanal dağılma, heyelan ve büyük oturma olarak sınıflandırılır. Olası hareket, yer altı su seviyesine göre P7 puanı ile değerlendirilir [6].

2.1.9 Düzeltme Çarpanı

En düşük yapı puanı P_{min} , bina ve bölgenin karakteristiklerine bağlı olarak α katsayısı ile revize edilmelidir. α , bina önem faktörü (I), efektif ivme katsayısı (A_0), hareketli yük faktörü (n) ve topoğrafik konum katsayısı (t) kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\alpha = \left(\frac{1}{I} \right) (1,4 - A_0) \left[\frac{1}{0,4n + 0,88} \right] t \quad (5)$$

Topoğrafik katsayı (t), normalde 1,0 olup, bina bir tepe üzerindeyse 0,7, dik yamaçtaysa 0,85 olarak alınır. 1985 Şili depremi sonrası yapılan ölçümler, yüksek bölgelerdeki yapıların daha fazla hasar aldığını göstermiştir [11, 12].

Ancak, topoğrafik etkinin tüm durumlara uygulanamayacağı ve belirsizlikler içerdiği unutulmamalıdır. Yine de bu çalışmalar, P25 yöntemine katkı sağlamıştır.

2.1.10 Sonuç Puanı

Son hesaplamalarla elde edilen P puanı, yapının risk durumunu belirler:

- **P≥35 (Düşük Risk Bölgesi):** Göçme ve can kaybı riski düşüktür, öncelikli ayrıntılı inceleme gerekmez.
- **35>P>25 (Ayrıntılı İnceleme Bölgesi):** Risk durumu belirsizdir, detaylı araştırma önerilir.
- **P≤25 (Yüksek Risk Bölgesi):** Depremde göçme ve can kaybı riski yüksektir, binaların boşaltılması veya güçlendirilmesi gereklidir.

2.2 AURAP Yöntemi

AURAP yöntemi, yapısal ve yapısal olmayan risk faktörlerini bir araya getirerek, binaların deprem performansını değerlendirir ve mahallelerin deprem risk profillerini belirler. AURAP Yönteminde kullanılan matematiksel modelleme ve kalibrasyon teknikleri, bu çalışmada da uygulanmıştır. Bu teknikler, 1999 Kocaeli Depremi'nde yıkılan binaların projeleri üzerinde test edilmiş ve mevcut binaların performans değerlendirmesinde doğrulanmıştır [4].

AURAP yönteminde elde edilen sonuç puanı, 150'den büyük ise yapının az, 50 ve 150 arasında ise orta veya 50'nin altında ise yüksek risk grubunda yer aldığını gösterir. Bu yöntem, depreme karşı binaların hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

AURAP yöntemi iki ana bölümden oluşmaktadır: Yapısal Emniyet Faktörünün (YEF) belirlenmesi ve Göreceli Bina Puanının (GBP) hesaplanması. Binanın Nihai Değerlendirme Puanı (NDP), YEF ile GBP'nin çarpılmasıyla elde edilir. Bina Sonuç Puanı (BSP) aşağıdaki formül ile bulunur.

$$BSP_{x,y} = GBP_{x,y} \times YEF_{x,y} \times SCP_{x,y} \quad (6)$$

$$BSP = \min(BSP_x, BSP_y) \quad (7)$$

Denklem (6)'da yer alan SCP sürekli çerçeve puanını temsil etmektedir.

AURAP yöntemi bina puan sınır düzeyleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: AURAP yöntemi bina puan sınır düzeyleri.

YÜKSEK RİSK	ORTA RİSK	DÜŞÜK RİSK
50	150	

2.2.1 Göreceli Bina Puanı (GBP) Değerlendirilmesi

Göreceli bina puanı (GBP), binadaki çeşitli düzensizlikler ve bina kusurları göz önünde bulundurularak aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$GBP = 100 \left(\prod_{i=1}^N CK_i \right) \quad (8)$$

Denklem (8)'de CK_i ceza katsayılarını ifade etmektedir.

Göreceli bina puanı (GBP) hesap tablosu örneği Tablo 3'te verilmiştir.

2.2.2 Yapısal Güvenlik Faktörünün (YGF) Değerlendirilmesi

Yapısal Emniyet Faktörü (YEF), binanın kritik katındaki kesme kuvveti taşıma kapasitesinin eşdeğer deprem yükü yöntemine [11] göre hesaplanan taban kesme kuvvetine oranını ifade etmektedir.

$$YEF = V_c / V_b \quad (9)$$

2.2.3 Kesme Kuvveti Taşıma Kapasitesi (V_c)

X ve Y yönlerinde taşıma kapasitesi ifadeleri:

$$V_{cx} = 0,65 \times f_{ctk} \times A_{cx} \quad (10)$$

$$V_{cy} = 0,65 \times f_{ctk} \times A_{cy} \quad (11)$$

Denklem (10) ve (11)'deki A_{cx} ve A_{cy} toplam kesit alanlarını ifade etmektedir. En kesit alanlarının toplamı denklem (14) ve (15) ile hesaplanmaktadır.

Denklem (10)'daki f_{ctk} beton karakteristik çekme dayanımıdır:

$$f_{ctk} = f_{ck} / 15 \quad (12)$$

Tablo 3: Göreceli bina puanı (GBP) hesap tablosu örneği.

Düzensizlikler ve Yapısal Kusurlar	Düzensizlik veya Yapısal Kusurların Durumu	Ceza Katsayıları CKi	Kümülatif Puan
Başlangıç Puanı:			100,00
A1-Burulma düzensizliği	Yok	0,95	100,00
A2-Kat süreksizlikleri	Var	0,95	95,00
A3-Planda çıkıntılar bulunması	Yok	0,92	95,00
A4-Taşıyıcı eleman eksenlerinin paralel olmaması	Yok	0,92	95,00
B1-Zayıf kat yada B2-yumuşak kat	Yok	0,90	95,00
B1 ve/veya B2 düzensizliği durumunda etriye sıklaştırması yapılmamış kolon bölgeleri	Yok	0,60	95,00
B3-Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği	Yok	0,95	95,00
Kısa kolon	Var	0,97	92,15
Güçlü kiriş-zayıf kolon	Yok	0,95	92,15
Köşe kolon	Yok	0,99	92,15
Asma kat varlığı	Yok	0,99	92,15
En büyük açıklığın 6,00m'den büyük olması	Yok	0,99	92,15
En büyük açıklığın 7,50m'den büyük olması	Yok	0,99	92,15
Bina projelerinin bulunmaması	Yok	0,98	92,15
Bina yapım yılı (BYY) ≤ 1975	Var	0,94	86,62
1976 ≤ BYY ≤ 1990	Yok	0,97	86,62
1991 ≤ BYY ≤ 2000	Yok	0,99	86,62
Kirişlerde etriye sıklaştırmasının olmaması	Var	0,99	85,75
Kolonlarda etriye sıklaştırmasının olmaması	Var	0,70	60,03
Zemin seviyesinin altında bodrum kat bulunmaması	Yok	0,95	60,03
Tekil temel	Yok	0,95	60,03
Kademeli temel	Yok	0,95	60,03
Farklı katlarda farklı döşeme tiplerinin bulunması	Yok	0,99	60,03
Nervürlü veya asmolen döşeme	Yok	0,99	60,03
Mantar döşeme	Yok	0,98	60,03
Komşu bina ile kat seviyesi farkı (Deprem derzi yetersiz ise)	Var	1-(KSF ^b)/10 1-0,45/10=0,96	GBP=57,33

2.2.4 Taban Kesme Kuvveti (Vb)

Taban kesme kuvveti, deprem yönetmeliğinde de ifade edilmiş olan eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanmaktadır:

$$V_b(WxA(T1))/R \quad (13)$$

Denklem (13)'te W bina ağırlığını, A(T1) spektral ivme katsayısını ve R taşıyıcı sitem davranış katsayısını temsil etmektedir.

2.2.5 X ve Y yönlerinde çalışan düşey taşıyıcı elemanların toplam kesit alanlarının hesabı

X ve Y yönlerinde çalışan düşey taşıyıcı elemanların toplam kesit alan hesap ifadeleri:

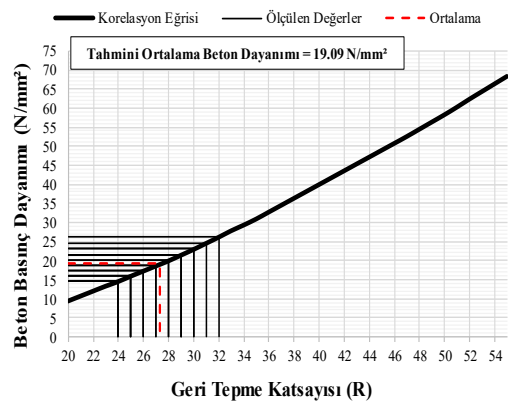
$$A_{cx} = \sum A_c + \sum A_{s_{wx}} \quad (14)$$

$$A_{cy} = \sum A_c + \sum A_{s_{wy}} \quad (15)$$

Bu denklemlerde, A_{cx} X yönünde çalışan düşey taşıyıcı elemanların toplam kesit alanını, A_{cy} Y yönünde çalışan düşey taşıyıcı elemanların toplam kesit alanını, $\sum A_c$ toplam kolon enkesit alanını, $\sum A_{s_{wx}}$ X yönünde çalışan perde elemanların toplam kesit alanını ve $\sum A_{s_{wy}}$ Y yönünde çalışan perde elemanların toplam kesit alanını ifade etmektedir. Tablo 4'te toplam kolon enkesit alanları verilmiştir. Kritik kat olarak ifade edilen zemin kat ya da varsa bodrum kattır. Kritik katta düşey taşıyıcı elemanlar kolonlar ve perdelerdir.

Tablo 4: Kritik kat düşey taşıyıcı eleman boyutları

Sıra No	Kolon / Perde Adı	Eleman Boyutları (cm)		Sıra No	Kolon / Perde Adı	Eleman Boyutları (cm)	
		X	Y			X	Y
1	SZ1	25	50	6	SZ6	25	50
2	SZ2	25	50	7	SZ7	50	25
3	SZ3	25	50	8	SZ8	25	50
4	SZ4	50	25	9	SZ9	50	25
5	SZ5	50	25	10	SZ10	50	25
X yönünde çalışan perdelerin toplam kesit alanı						:1,25 m ²	
Y yönünde çalışan perdelerin toplam kesit alanı						:1,25 m ²	
Toplam kolon eşit alan						:1,25 m ²	

**Şekil 1:** Schmidt çekici ile ortalama beton basınç dayanım grafiği.

2.2.6 Beton karakteristik basınç dayanımı hesabı

Kolonlarda beton basınç dayanımını bulmak için N tipi schmidt çekici kullanılmıştır. Kolonun sıvasız yerinden 10x10 cm birim alandan 10 vuruş

yapılarak ortalama beton dayanımı belirlenir ve ardından schmidt çekici kalibrasyon grafiği ile gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra ortalama beton basınç dayanımı bulunmaktadır (Şekil 1).

2.2.7 Yapı ağırlığının hesaplanması

Yapının ağırlıklarının hesaplanmasında Tablo 5’de yer alan döşeme özelliğine göre birim metrekare başına düşen ağırlıklar bulunmaktadır. İncelenen bina kirişli döşeme tipindedir.

Tablo 5: Döşeme tipine göre birim alandaki kat ağırlıkları.

Döşeme Tipi	Gi (kN/m ²)
Kirişli döşeme	12
Nervürlü döşeme	13
Asmolen döşeme	14
Kaset döşeme	15
Mantar döşeme	17

Yapı ağırlığının hesaplanması (16) nolu denklemde verilmiştir.

$$W = \sum (G_i + nxqi) * A_i \quad (16)$$

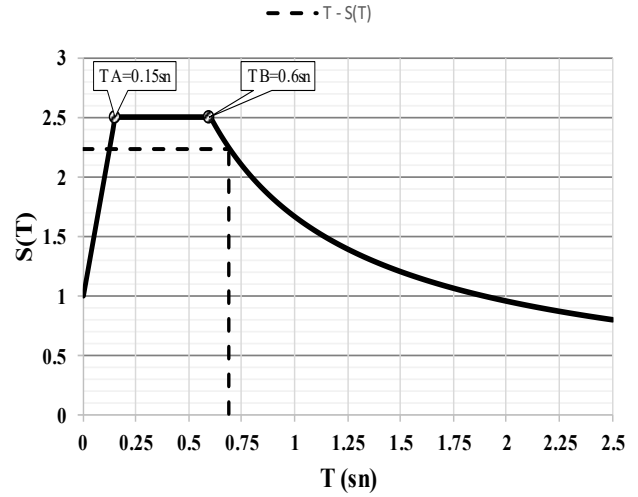
“W” toplam bina ağırlığı, “Gi” i. katta birim alana etkiyen sabit yük, “qi” i. katta birim alana etkiyen hareketli yük, “n” hareketli yük katılım katsayısı, “Ai” i. katın alanıdır. Toplam bina ağırlığı aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır. Tablo 6’da kat ağırlıkları ve toplam bina ağırlıkları verilen formül ve katsayılara göre bulunmaktadır.

Tablo 6: Kat ağırlıkları ve toplam bina ağırlığı.

Kat	Döşeme Tipi	Gi (kN/m ²)	n	Qi (kN/m ²)	Kat Alanı (m ²)	Kat Ağırlığı (kN/m ²)
1. Bodrum	Kirişli döşeme	12	0,3	2	670,00	8442,00
Zemin Kat	Kirişli döşeme	12	0,3	2	426,00	5367,60
1. Kat	Kirişli döşeme	12	0,3	2	400,00	5367,60
2. Kat	Kirişli döşeme	12	0,3	2	400,00	5040,00
3. Kat	Kirişli döşeme	12	0,3	2	400,00	5040,00
4. Kat	Kirişli döşeme	12	0,3	2	400,00	5040,00
W (Toplam Bina Ağırlığı (kN)) :						34297,20

2.2.8 Spektral ivme katsayısının hesaplanması:

2007 Deprem Yönetmeliğine göre yerel zemin sınıfları, bina doğal periyodu, bina önem katsayısı, etkin yer ivmesi katsayısına göre spektrum katsayısı bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2: Spektrum katsayısı (ST).

Spektral ivme katsayısının hesaplanması (17) nolu denklemde verilmiştir.

$$A(T) = A_0 * I * S(T) \quad (17)$$

Denklem (17)’de A₀ etkin yer ivmesi katsayısını (DBYBHY, 2007 Tablo 2.2), I bina önem katsayısını (DBYBHY, 2007 Tablo 2.3) ve S(T) spektrum katsayısını temsil etmektedir.

2.2.9 Sürekli Çerçeve Puanı (SÇP) Değerlendirilmesi

Sürekli çerçeve puanı (SÇP), sürekli çerçeve oranı (SÇO)’ya göre hesaplanmaktadır. SÇO, mevcut sürekli çerçeve sayısının, kat planına göre oluşturulabilecek optimum sürekli çerçeve sayısına oranını ifade etmektedir.

- SÇP = 0,25 (SÇO ≤ 0,25)
- SÇP = SÇO (0,25 < SÇO < 0,50)
- SÇP = 1 (SÇO ≥ 0,50)

3. BULGULAR

Bu bina hızlı tarama yöntemlerinden AURAP ve P25 yöntemleri ile tahribatsız yöntemler ile risk analizleri yapılmıştır.

Tablo 7: P25 hızlı tarama yöntemi sonuç tablosu.

P SONUÇ ($\alpha \times \beta \times P_{min}$)				
19,97370518			GÖÇER!	
0	<	P	≤	24
25	<	P	≤	34
35	<	P	≤	100

Tablo 8: AURAP hızlı tarama yöntemi sonuç tablosu.

Yüksek Risk Orta Risk Düşük Risk		
Düzensizlikler ve Yapısal Kusurlar	Durum	
A1-Burulma düzensizliği	Var	Düzensizlik ve yapısal kusurlara bağlı olarak
A2-Kat süreksizlikleri	Yok	hesaplanan Göreceli Bina Puanı;
A3-Planda çıkıntılar bulunması	Yok	GBP = 56,36
A4-Taşıyıcı eleman eksenlerinin paralel olmaması	Var	Yapısal çerçevelerin sürekliliğine bağlı olarak hesaplanan sürekli çerçeve puanları;
B1-Zayıf kat ya da B2-yumuşak kat	Yok	X Yönü Y Yönü
B1 ve/veya B2 düzensizliğinin varlığı durumunda etriye sıklaştırması yapılmamış kolon bölgeleri	Yok	SÇP=1 SÇP=1
B3-Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği	Yok	Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre binaya etkiyecek taban kesme kuvveti ile binanın kritik katının kesme kuvveti taşıma kapasitesine bağlı olarak hesaplanan yapısal emniyet faktörleri;
Kısa kolon	Yok	X Yönü Y Yönü
Güçlü kiriş-zayıf kolon	Yok	YEF=1,62 YEF=1,62
Köşe kolon	Var	
Asma kat varlığı	Yok	
En büyük açıklığın 6,00m'den büyük olması	Yok	
En büyük açıklığın 7,50m'den büyük olması	Yok	
Bina projelerinin bulunmaması	Yok	GBP, SÇP ve YEF değerlerinin çarpımı ile elde edilen bina sonuç puanları;
Bina yapım yılı (BYY) ≤ 1975	Var	X Yönü Y Yönü
1976 ≤ BYY ≤ 1990	Yok	BSP=91 BSP=91
1991 ≤ BYY ≤ 2000	Yok	
Kirişlerde etriye sıklaştırmasının olmaması	Var	
Kolonlarda etriye sıklaştırmasının olmaması ^a	Var	X ve Y yönleri için hesaplanan BSP puanlarından en küçük olanı, nihai bina sonuç puanını ifade etmektedir.
Zemin seviyesinin altında bodrum kat bulunmaması	Yok	BSP = 91
Tekil temel	Yok	
Kademeli temel	Yok	
Farklı katlarda farklı döşeme tiplerinin bulunması	Yok	
Nervürlü veya asmolen döşeme	Yok	
Mantar döşeme	Yok	
Komşu bina ile kat seviyesi farkı	Var	

Analiz işlem aşamalarına geçilmeden önce incelenecek yapıların mühendislik hizmeti alıp almadıkları denetlenmiş, almışlarsa yapılarla ilgili mühendislik projeleri temin edilmiş, yapıların projelere uygun inşa edilip edilmedikleri, yapı içinde gerçekleştirilen birebir ölçümlerle doğrulanmıştır. Projelerin incelenmesi ve yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler göz önünde bulundurularak yapılar için değerlendirmeye temel teşkil eden nihai puanlar belirlenmiştir. P25 hızlı değerlendirme yöntemi ve AURAP yöntemi esas olan binanın sonuç puanları Tablo 7'de ve Tablo 8'de verilmiştir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Düzce'de konut ve işyeri olarak projelendirilen B+Z+4 katlı bir bina üzerinde AURAP Yöntemi ve P25 Puanlama Yöntemi uygulanarak bina durumu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda, P25 Puanlama Yöntemi ile hesaplanan P sonucu 19.97 olarak bulunmuş ve bina "göçer bina" sınıfına girmiştir. Bu yöntemin, diğer hızlı değerlendirme yöntemlerine kıyasla daha fazla yapısal faktörü dikkate alması nedeniyle uygulama süresi görece daha uzun olmaktadır.

AURAP Yöntemi ile yapılan değerlendirmede ise Bina Sonuç Puanı (BSP) 91 olarak belirlenmiş ve bina "orta düzey riskli" olarak sınıflandırılmıştır. Bu yöntem, binanın daha detaylı incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak bu çalışma ön inceleme niteliğinde olup, nihai kararın 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında performans analizi ile kesinleştirilmesi gerekmektedir. Yöntemin güvenilir sonuçlar verebilmesi için, kullanılan verilerin doğruluğu büyük önem taşımakta olup, kesinliği şüpheli verilerle uygulanmaması önerilmektedir.

İki yöntem arasındaki farklılığın temel nedeni, P1-P7 parametrelerinin P puanı üzerindeki doğrudan etkisidir. Özellikle P7 puanı, bina konumunun Düzce ili Merkez ilçesi Burhaniye Mahallesi'nde olması, zemin sınıfının Z4 olarak belirlenmesi ve yer altı su seviyesinin 5 metreden derinde

bulunması sebebiyle P puanını önemli ölçüde düşürmüştür.

P25 yönteminin, diğer değerlendirme yöntemlerinden ayrılan temel özelliklerinden biri dolgu duvarlarının hesaplamalara dahil edilmesidir. Bazı yöntemler dolgu duvarlarını tamamen göz ardı ederken, bazıları yalnızca kayma rijitliğini dikkate almakta ve eğilme rijitliğini ihmal etmektedir. P25 yöntemi ise her iki rijitliği de değerlendirme sürecine dahil etmektedir.

Buna ek olarak, bina yüksekliği de P25 yönteminin kritik bir değişkenidir. Hassan ve Sözen (1997) tarafından önerilen metot, belirli yükseklikteki yapılarla sınırlıyken, P25 yöntemi farklı sismik bölgeler ve zemin türlerinde parametrik analizler yapılarak geliştirilmiştir [13].

Ayrıca, birçok mevcut metot yalnızca tek bir göçme mekanizmasına dayanarak risk sınıfı belirlerken, P25 yöntemi hem zemin hem de üst yapı koşullarını, öne çıkan zayıflıkları ve bu zayıflıkların birbiriyle etkileşimlerini göz önünde bulunduran istatistiksel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sayede, yapıda en belirgin yapısal zafiyetin tespit edilmesi ve giderilmesi mümkün hale gelmektedir.

Yazar Katkısı: Her iki yazar, kaynak araştırması, risklerin hesaplanması ve analizi yapılması, makale yazımı süreçlerine katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması: Yazarlar tarafından herhangi bir kurum ya da kişi ile çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] TBDY 2019, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2019.
- [2] İ. E. Bal and Z. Özdemir, "The adverse effects of perimeter frame discontinuity on earthquake response of RC buildings," in *Proc. 7th Int. Congr. Advances in Civil Engineering*, Yıldız Technical Univ., İstanbul, Turkey, Oct. 11–13, 2006.
- [3] İ. E. Bal, S. S. Tezcan, and F. G. Gülay, "Betonarme binaların göçme riskinin belirlenmesi için P25 Hızlı Değerlendirme Yöntemi," in *6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Turkey, 2007.
- [4] M. Kaplan *et al.*, "A rapid seismic safety assessment method for mid-rise reinforced concrete buildings," *Bull. Earthq. Eng.*, 2017, doi: 10.1007/s10518-017-0229-0.
- [5] İ. E. Bal, "Deprem etkisindeki betonarme binaların göçme riskinin hızlı değerlendirme yöntemleri ile belirlenmesi," M.S. thesis, İstanbul Teknik Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Turkey, 2005.
- [6] G. Ezgi, "Betonarme yapıların deprem performanslarının belirlenmesi için kullanılan hızlı değerlendirme metotlarının karşılaştırılması," M.S. thesis, Balıkesir Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Balıkesir, Turkey, 2019.
- [7] P. Gülkan and A. Yakut, "An expert system for reinforced concrete structural damage quantification," in *ACI SP-162, Mete A. Sozen Symposium*, pp. 53–71, 1994.
- [8] M. Pala and Z. Şaşmaz, "Kat seviyeleri farklı bitişik nizam yapılarda kat kütlelerinin çarpışma kuvvetine etkisi," *Adıyaman Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 10, pp. 47–63, 2019.
- [9] C. J. Athanassiadou, G. G. Penelis, and A. J. Kappos, "Seismic response of adjacent buildings with similar or different dynamic characteristics," *Earthquake Spectra*, vol. 10, no. 2, pp. 293–317, 1994.
- [10] T. L. Youd *et al.*, "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 127, no. 10, pp. 817–833, 2001.
- [11] S. E. Sholtis and J. P. Stewart, *Topographic effects on seismic ground motions above and below a cut slope in sand*, Univ. of California, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Research Report, 1999.
- [12] M. Çelebi, "Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 77, no. 4, pp. 1147–1167, 1987.
- [13] A. F. Hassan and M. A. Sözen, "Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in

regions with infrequent earthquake," *ACI Struct. J.*, vol. 94, no. 1, pp. 31–39, 1997.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Makine Öğrenmesi Tabanlı Hematolojik Bozukluk Tespiti

Machine Learning Based Hematologic Disorder Detection

Öznur Suçeken^{1*}, Tuğçe Güzle²

¹Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknolojisi Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye.

Geliş / Received: 09.04.2025

Kabul / Accepted: 02.05.2025

***Sorumlu Yazar:** Öznur Suçeken oznursuceken@mu.edu.tr

ÖZ: Hematolojik bozukluklar, kan hücrelerinin üretimi, işlevi veya yapısında meydana gelen anormallikler sonucu ortaya çıkan, ancak erken teşhis ve uygun müdahale ile kontrol altına alınabilen ciddi sağlık problemleridir. Anemi, lösemi, lenfoma, hemofili ve trombositopeni gibi hastalıklar ile kendini gösteren bu anormallikler; bağışıklık sistemi, oksijen taşıma kapasitesi, pıhtılaşma ve doku onarımı gibi hayati fonksiyonları doğrudan etkilemektedir. Bu hastalıkların zamanında tanısı, etkili tedavi planlarının oluşturulması ve komplikasyonların önlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Ancak klinik süreçlerde kalabalık veri takibi ve yorumlama zorlukları, hekim kararlarını zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle yapay zeka destekli dijital sağlık çözümleri, tedavi yönetimlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, hematolojik hastalıkların teşhisini kolaylaştırmak ve bireyselleştirilmiş tedavi önerileri sunmak amacıyla bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. Sistem, hemogram (tam kan sayımı) verilerini temel alarak hastalık teşhisini yüksek doğrulukla gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Teşhis sürecinde Random Forest Algoritma'sı kullanılırken; beslenme, yaşam tarzı ve genel sağlık önerileri karar ağaçları yöntemiyle oluşturulmuştur. Veri setindeki sınıf dengesizliği, model performansını artırmak amacıyla Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) ile dengelenmiştir. Flask ve Node.js destekli backend altyapısı farklı kullanıcı yetkileri için React tabanlı arayüzler ile ayrıştırılarak, veri setleri MongoDB veritabanında depolanmıştır. Hematolojik bozuklukların tespiti için geliştirilen karar destek sisteminde tanı doğruluğunu artırmayı, tedavi sürecini hızlandırmayı ve hasta bakım kalitesini yükseltmeyi amaçlayan, klinik uygulamalara entegre edilebilir ve ölçeklenebilir bir yapay zeka çözümü sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hematolojik bozukluk, hemogram, karar destek sistemi, makine öğrenimi, random forest algoritması.

ABSTRACT: Hematologic disorders are serious health problems caused by abnormalities in the production, function or structure of blood cells that can only be controlled with early diagnosis and appropriate intervention. These abnormalities, which manifest themselves in diseases such as anemia, leukemia, lymphoma, hemophilia and thrombocytopenia, directly affect vital functions such as the immune system, oxygen carrying capacity, clotting and tissue repair. Timely diagnosis of these diseases is critical to establishing effective treatment plans and preventing complications. However, crowded data tracking and interpretation difficulties in clinical processes can make physician decisions difficult. Therefore, AI-supported digital health solutions play an important role in treatment management. In this study, a decision support system was developed to facilitate the diagnosis of hematological diseases and provide individualized treatment recommendations. The system aims to perform disease diagnosis with high accuracy based on hemogram (complete blood count) data. While the Random Forest Algorithm is used in the diagnosis process, nutrition, lifestyle and general health recommendations are generated using decision trees. Class imbalance in the dataset was balanced with Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) to improve model performance. Flask and Node.js supported backend infrastructure is decomposed with React based interfaces for different user authorizations and data sets are stored in MongoDB database. In the decision support system developed for the detection of hematological disorders, a scalable artificial intelligence solution that can be integrated into clinical applications is presented, aiming to increase the accuracy of diagnosis, accelerate the treatment process and improve the quality of patient care.

Keywords: Decision support system, hematologic disorder, hemogram, machine learning, random forest algorithm.

1. GİRİŞ

Sağlık alanındaki teşhis ve tedavi süreçlerinin etkinliği, klinik başarıyı doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Özellikle karmaşık semptomlara sahip, çok faktörlü yapılarıyla tanımlanan hematolojik hastalıkların teşhisi, geleneksel yöntemlerle zaman alıcı ve hata payı yüksek bir süreç olabilir. Bu süreçte laboratuvar testlerinin manuel yorumlanması, uzman deneyimine bağlı olarak değişiklik gösterebilir ve tutarsızlıklar ortaya çıkabilir [1]. Bu gibi nedenlerle, son yıllarda sağlık hizmetlerinde dijitalleşme ve otomasyon ihtiyacı daha da artmış, özellikle yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı karar destek sistemleri (KDS) ön plana çıkmıştır. Yapay zeka ve makine öğrenmesi, büyük miktarda sağlık verisini analiz etme, örüntüleri tanıma ve öngöründe bulunma yeteneği sayesinde, klinik karar verme süreçlerini daha güvenilir ve hızlı hale getirmektedir. Özellikle derin öğrenme modelleri, hematolojik bozuklukların sınıflandırılması, hücresel anormalliklerin tanımlanması ve mikroskobik görüntülerde anomali tespiti gibi uygulamalarda yüksek doğruluk oranlarına ulaşmaktadır [2]. Convolutional Neural Network (CNN) gibi modeller, morfolojik özelliklere dayalı görüntü analizi alanında sıkça kullanılmakta ve tanısal verilerin değerlendirilmesinde etkin çözümler sunmaktadır [3]. KDS'lerin yapay zeka uygulamalarına entegrasyonu ile birlikte tanı süreçlerinde standardizasyon sağlanmakta, insan hatasına dayalı yanlış pozitif veya negatif sonuçların azaltılması mümkün olmaktadır. Klinik uzmanların kararlarını desteklemek amacıyla geliştirilen bu sistemlerin önerdikleri teşhislerin ardındaki nedenleri şeffaf biçimde sunması gerekmektedir [4].

Literatürdeki akademik çalışmalar incelendiğinde makine öğrenimi ve yapay zeka tekniklerinin anemi teşhisi ve tedavisinde ne kadar etkili olabileceğini ortaya koymakta ve sağlık sektöründe bu tür teknolojilerin yaygınlaşması için önemli bir temel oluşturduğu görülmektedir. Noor ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, non-invaziv teşhis yöntemlerine yönelik bir başka çalışmada, göz konjonktiva görüntüleri kullanılarak hemoglobinin seviyelerinin tahmininde %92 doğruluk oranına sahip bir model geliştirmişlerdir. RGB, HSV ve CIE LAB renk uzaylarından özellik çıkarılarak eğitilen

ensemble model, ekonomik ve pratik bir alternatif olarak sunulmuştur [5]. Ponnusamy ve arkadaşları, demir eksikliği anemisi teşhisinde açıklanabilir yapay zeka (XAI) yöntemlerini kullandıkları bir çalışmada, SHAP yöntemiyle hemoglobin, hematokrit ve toplam serum demiri gibi parametrelerin teşhisteki önemi analiz etmişlerdir. Random Forest ve Lojistik Regresyon algoritmaları %93 ile %100 arasında doğruluk oranları sağlamış ve modelin şeffaflığı artırılmıştır [6]. Tummala ve Parvataneni, yaptıkları çalışmada göz konjonktiva görüntüleri ve kan testleri verilerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, kan testlerinde AdaBoost, LGBM ve ExtraTrees algoritmaları %100 doğruluk sağlarken, göz görüntülerinde LGBM ve Perceptron modelleri %97.61 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu çalışma, her iki yöntemin de anemi teşhisinde etkin kullanılabileceğini göstermiştir [7]. Mugdha ve arkadaşları, hemoglobin seviyesinin tahmini ve anemi şiddetinin belirlenmesi için yaptıkları bir araştırmada, Neural Network algoritması hemoglobin tahmininde en yüksek doğruluk oranını sağlarken, Random Forest algoritması anemi şiddeti sınıflandırmasında %99 doğruluğa ulaşmıştır [8]. Rahman ve arkadaşları, anemi teşhisi için yaptıkları bir başka çalışmada, Lojistik Regresyon %95 doğruluk oranıyla en iyi performansı gösterirken, Random Forest, AdaBoost ve XGBoost gibi algoritmalar da yüksek doğruluk elde etmişlerdir [9]. Literatürdeki güncel çalışmalardan görüldüğü üzere anemi ve hematolojik bozuklukların teşhisinde makine öğrenimi algoritmalarının kullanımı sağlık alanında önemli katkılar sağlamıştır.

Bu çalışma, karar destek sistemlerinin sağlık sektöründeki potansiyelini ortaya koymakta ve teşhis-tedavi süreçlerinin nasıl optimize edilebileceğine dair bir çerçeve sunmaktadır. Geliştirilen sistem, tam kan sayımı (hemogram) verilerini analiz ederek hematolojik bozuklukların teşhisini yapmakta ve teşhis sonuçlarına ek olarak vücut kitle indeksi (VKİ) ve cinsiyet gibi parametreleri temel alarak kişiselleştirilmiş öneriler sunmaktadır. Bu yaklaşım, hastaların klinik durumlarına özgü tedavi ve yaşam tarzı önerileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Sistemin teşhis aşamasında yüksek doğruluk oranı ve çok boyutlu veri setlerinde etkin performansı nedeniyle Random Forest Algoritması kullanılmıştır. Öneri mekanizması için Karar Ağaçları yöntemi tercih

edilmiştir. Veri setindeki sınıf dengesizliği, SMOTE yöntemiyle giderilerek modelin tespit yeteneği artırılmıştır. Yazılım altyapısında kullanıcı arayüzü, React kullanılarak geliştirilmiş ve kullanıcı dostu bir deneyim sunmaktadır. Backend tarafında Flask ve Node.js tabanlı API'ler, veri işleme ve analiz süreçlerini yönetmektedir. Veriler, MongoDB veritabanında saklanarak esnek ve dinamik bir veri yönetimi sağlanmıştır. Sistemde, sağlık çalışanları, hastalar ve yöneticiler için farklı kullanıcı rolleriyle özelleştirilmiş arayüzler sunularak teşhis ve öneri süreçleri kolaylaştırılmıştır. Bu tür yapay zeka tabanlı karar destek sistemlerinin yaygınlaşması yalnızca sağlık çalışanlarının iş yükünü azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda hastaların tedavi süreçlerine daha bilinçli ve aktif katılımını da teşvik etmektedir. Bu çalışmada, hematolojik bozuklukların erken ve doğru teşhisini desteklemek amacıyla geliştirilen, makine öğrenimi temelli bir karar destek sistemi sunulmuştur. Önerilen sistem, klinik veriler üzerinden yüksek doğrulukla analiz yaparak teşhis sürecine katkı sağlamayı, açıklanabilir yapay zeka teknikleriyle klinisyenlerin iş yükünü azaltmaya ve mevcut klinik iş akışlarına entegre edilebilir bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

2. ANEMİ TEŞHİS VE TAVSİYE SİSTEMİ

Bu çalışmada kullanılan teşhis verileri, Kaggle veri paylaşım platformunda Aboelnaga tarafından yayımlanan "Anemia Types Classification" veri setinden alınmıştır. Kullanılan veri seti 1.281 gözlem ve 15 değişkenden oluşmaktadır [10]. Tam kan sayımı parametrelerini ve teşhis sınıflarını içermektedir. Veri setindeki bazı parametreler ve açıklamaları Tablo 1'de verilmiştir.

Cinsiyet, VKİ ve teşhis bilgilerine dayalı olarak yapay zeka tabanlı bireyselleştirilmiş beslenme önerileri ve yaşam kalitesini artırarak bireyin tedavi sürecini destekleyecek öneriler sunan bir modül geliştirilmiştir. Modülde her öneri üç parametre kombinasyonuna göre yapılandırılmıştır. Bu önerilerin oluşturulmasında herhangi bir hazır veri seti kullanılmamıştır. Teşhis, cinsiyet ve VKİ parametrelerinin birleşimi temel alınarak, literatür incelemeleri ile elde edilen bilimsel bulgular ve alan yazındaki önerilere dayalı olarak yapılandırılmış öneriler geliştirilmiştir. Her bireyin sağlık durumu, fiziksel özellikleri ve

biyolojik ihtiyaçları farklılık gösterdiğinden, önerilerin etkili ve kişiye özel olabilmesi amacıyla bu üç temel parametre kullanılmıştır.

Tablo 1: Örnek kan sayımı parametreleri

Parametre	Açıklama
WBC	Beyaz kan hücreleri
LYMP	Lenfosit yüzdesi
NEUTP	Nötrofil yüzdesi
LYMN	Lenfosit sayısı
NEUTN	Nötrofil sayısı
RBC	Kırmızı kan hücreleri
HGB	Hemogloblin konsantrasyonu
HCT	Hematokrit yüzdesi
MCV	Ortalama eritrosit hacmi

Demir eksikliği olan bir bireye demir açısından zengin gıdalar (örneğin kırmızı et, ıspanak, mercimek) ve demir emilimini artıran C vitamini kaynakları önerilir. Teşhis dikkate alınmadan yapılan genel öneriler, bireyin durumuna uygun olmayabilir ve sağlık sorunlarının devam etmesine yol açabilir. Kadınlar ve erkekler arasında hem demir eksikliği risk faktörleri hem de ihtiyaçlar bakımından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Kadınlarda özellikle adet dönemlerinde düzenli kan kaybı yaşanmasıyla demir depolarının azalması ve demir eksikliği riskinin artması ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle kadınlara yönelik önerilerde daha yüksek demir alımı önerilir (örneğin kırmızı et, karaciğer, demir takviyeleri). Demir emilimini artırmak için C vitamini kaynakları (örneğin portakal, biber) eklenir. Erkeklerde demir eksikliği genellikle kronik hastalıklar, beslenme yetersizliği veya sindirim sistemi rahatsızlıklarından kaynaklanır. Bu durumda öneriler diyetle demir alımının artırılmasını, ancak kadınlara kıyasla daha düşük dozlarda yapılmasını içerir. Sindirim sistemi sağlığını desteklemek ve demir emilimini artırmak için bağırsak sağlığına yönelik besinleri de içerir [11-14].

VKİ, bireyin kilo durumu hakkında bilgi vererek beslenme önerilerinin yönlendirilmesini sağlar.

VKİ farklılıkları, önerilerin enerji dengesi, demir emilimi ve kilo yönetimi gibi faktörlere göre uyarlanmasını gerektirir. Zayıf bireylerde yetersiz beslenme, demir eksikliğine sıkça eşlik eder. Bu bireylere enerji yoğun ve demir bakımından zengin gıdalar önerilir. Kilo alımını desteklemek için karbonhidrat ve protein kaynaklarının artırılması tavsiye edilir. Normal VKİ' ye sahip bireylerde odak noktası, demir açısından zengin ancak dengeli bir diyet sunmaktır. Bu durumda, bireyin mevcut sağlıklı kiloyu koruması hedeflenir. Obezite, demir eksikliği ile ilişkili metabolik problemlere yol açabilir. Bu bireylere yönelik önerilerde kilo kontrolünü sağlarken demir alımını artıracak düşük kalorili ancak besleyici gıdalar vurgulanır. Özellikle yeşil yapraklı sebzeler, baklagiller ve yağsız protein kaynakları önerilir. VKİ dikkate alınmadığında, öneriler bireyin genel sağlık durumu ve kilo yönetimi ile uyumsuz hale gelebilir. Örneğin, zayıf bir bireye kilo alımını desteklemeyen düşük kalorili öneriler sunmak ya da obez bir bireye enerji yoğun diyet önermek, sağlık sonuçlarını olumsuz etkileyebilir. Bu üç parametrenin birlikte ele alınması öneri sisteminin hem güvenilir hem de bilimsel temellere dayalı olmasını sağlar. Kadın ve erkek bireylerin farklı fizyolojik ihtiyaçları ve VKİ 'nin enerji dengesi üzerindeki etkileri göz önüne alındığında bu parametrelerin kullanımı önerilerin doğruluğunu ve etkinliğini artırır [15-17].

2.2 Veri Ön İşleme

Sınıf dengesizliği, veri setindeki bazı sınıfların diğer sınıflara göre daha az sayıda örneğe sahip olması durumudur. Bazı sınıfların diğerlerine kıyasla daha az örneğe sahip olması, modelin çoğunluk sınıfını öğrenmeye eğilim göstermesine ve azınlık sınıflarını doğru bir şekilde tahmin edememesine yol açar. Model, çoğunluk sınıflarını daha sık tahmin eder ve azınlık sınıfları göz ardı eder. Azınlık sınıflarının tahmin edilememesi, özellikle tıbbi uygulamalarda kritik kararların yanlış alınmasına neden olabilir. Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE), sınıf dengesizliğini gidermek için kullanılan bir veri artırma yöntemidir. Bu teknik, azınlık sınıfındaki her bir veri noktasını temel alarak onun en yakın k komşusunu belirler ve bu komşular arasındaki vektörler üzerinde rastgele noktalar seçerek yeni

sentetik örnekler oluşturur. Böylece veri setine mevcut örneklerin birebir kopyası yerine, çeşitli sentetik örnekler eklenir. Bu işlem azınlık sınıflarını dengeleyerek veri setinin daha dengeli bir hale gelmesini sağlar. Bu sayede performans metriklerinde, özellikle azınlık sınıfları için belirgin iyileşmeler sağlanır [18].

Bu çalışmada, hemogram verilerinde sınıf dengesizliği tespit edilmiş ve bu sorunu gidermek için SMOTE yöntemi uygulanmıştır. Veriler %80 eğitim ve %20 test oranında bölünmüştür. Bölünme sırasında "random-state=42" parametresi kullanılmıştır. Bu parametre bölünmenin rastgele fakat tekrarlanabilir olmasını sağlayarak sonuçların tutarlılığını garanti altına almıştır. Bireyin kişisel bilgilerine uygun öneri veren modülde ise kategorik değişkenler, makine öğrenimi algoritmalarında kullanılabilir hale getirilmek için sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Bu işlem, her bir kategorik değer için benzersiz bir sayısal etikete eşlendiği Label Encoding yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede cinsiyet, VKİ kategorisi ve teşhis gibi değişkenler modeller tarafından işlenebilir hale gelmektedir.

2.3 Yazılım Altyapısı

Sistemin yazılım altyapısında Flask ve Node.js birlikte kullanılmıştır. Flask, Python tabanlı bir web framework olup, API geliştirme ve makine öğrenimi modellerinin entegrasyonu için kullanılmıştır. Flask, veri işleme ve modellerden tahmin sonuçlarının alınması gibi işlemleri yönetir. Node.js ise kullanıcı yönetimi, oturum işlemleri ve veritabanı bağlantıları gibi backend işlevlerini gerçekleştirmek için tercih edilmiştir. Node.js, MongoDB ile entegre edilmiş ve Create, Read, Update, Delete (CRUD) işlemleri başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sistemin arayüzü, kullanıcı dostu bir deneyim sağlamak amacıyla React framework ile geliştirilmiştir. React, dinamik ve modern web uygulamaları oluşturmak için kullanılan bir JavaScript kütüphanesidir. Admin kullanıcıları, sistemdeki tüm kullanıcıları ve verileri yönetebilirken; sağlık çalışanları hasta bilgilerini sisteme ekleyebilir. Hasta kullanıcıları ise kendilerine sunulan teşhis ve önerileri görüntüleyerek sağlık süreçlerini takip edebilir. Bu yapı her kullanıcı rolünün ihtiyaçlarına uygun bir deneyim sunarak sistemin etkinliğini artırmıştır. Backend tarafında Node.js ile yazılmış bir API kullanılmıştır.

Bu API, MongoDB veritabanına erişimi sağlayarak CRUD işlemlerini yönetir. MongoDB veritabanında kullanıcı bilgilerini, VKİ hesaplamasını ve roller içeren "User" tablosu, hastalara ait tahlil sonuçlarını ve teşhis bilgilerini içeren "Test" tablosu bulunmaktadır. JSON Web Token kullanıcı oturumlarını güvenli bir şekilde yönetmek için kullanılır. Middleware kullanıcıların rollerine göre erişim kontrolü sağlar. Örneğin, bir hastanın yalnızca kendi tahlillerine erişebilmesi, adminin tüm verilere erişebilmesi gibi kontrol mekanizmaları uygulanır. Flask Framework ile geliştirilmiş bir Python API, makine öğrenimi modellerinin entegrasyonu için kullanılmaktadır. Bu API; teşhis, genel öneri ve beslenme önerisi gibi farklı sorgular için modellerden gelen sonuçları döndürür. Kullanıcı, giriş yaptığında web token ile kimlik doğrulama yapılır ve rol bazlı yetkilendirme sağlanır. Şifreler bcrypt kullanılarak hashlenmiş şekilde saklandığı için güvenli bir oturum yönetimi gerçekleştirilir. Sağlık çalışanları tarafından girilen tahlil sonuçları, Node.js API üzerinden MongoDB'ye kaydedilir. Python API ile modelden dönen teşhis ve öneriler frontend üzerinden kullanıcıya sunulur.

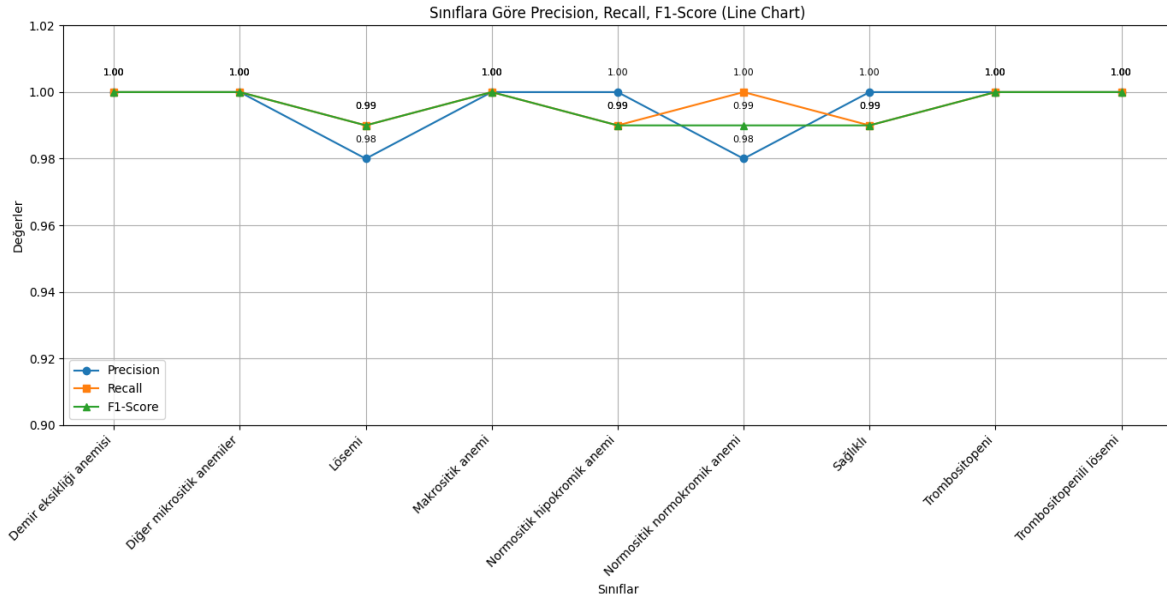
2.4 Random Forest Algoritması

Random Forest Algoritması sınıflandırma temelli tahminlerin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Random Forest, topluluk (ensemble) öğrenme yöntemlerinden biri olup, çok sayıda karar ağacının (decision tree) bir araya getirilmesiyle oluşturulan güçlü ve esnek bir sınıflandırma algoritmasıdır [19]. Her bir ağaç,

eğitim verisinin rastgele seçilmiş alt örnekleme (bootstrap) üzerinde eğitilmekte ve ağaç oluşturulurken her düğümde özniteliklerin rastgele bir alt kümesi dikkate alınmaktadır. Bu çeşitlendirme, modelin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimini azaltırken, genelleme performansını artırmaktadır [20]. Karar ağaçlarının oluşturulmasında Gini indeksi veya bilgi kazancı (entropi) gibi ölçütler kullanılarak veri, homojenliği en üst düzeye çıkaracak şekilde bölünmektedir. Her bir karar ağacı bağımsız olarak tahminde bulunmakta ve son sınıflandırma kararı ise çoğunluk oylaması (majority voting) ile verilmektedir. Bu yapı, özellikle yüksek boyutlu ve dengesiz veri setlerinde öznitelik etkileşimlerini başarılı bir şekilde yakalayarak, kararlı ve yorumlanabilir sonuçlar üretmektedir [21]. Tıbbi veri analizi bağlamında Random Forest algoritmasının tercih edilmesinin temel nedeni, eksik verilerle başa çıkabilme yeteneği, değişken önem düzeylerini belirleyebilme özelliği ve sınıflar arası ayrım gücünün yüksek olmasıdır. Ayrıca bu algoritma azınlık sınıflarının tespiti konusunda da güçlü bir performans sergilemekte olup, dengesiz veri setlerinde uygulanabilirliği oldukça yüksektir [22]. Random Forest Algoritmasının veri seti üzerindeki performansı doğruluk, precision, recall ve F1-score metrikleriyle değerlendirilmiştir (Şekil 1 ve 2). Sistem, Random Forest algoritması kullanarak %99.66 oranında etkin bir teşhis doğruluğu elde etmiş, böylece geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve tutarlı sonuçlar üretebilmiştir.

Sınıflara Göre Precision, Recall ve F1-Score:					
	Class	Precision	Recall	F1-Score	
0	Demir eksikliği anemisi	1.00	1.00	1.00	
1	Diğer mikrositik anemiler	1.00	1.00	1.00	
2	Lösemi	0.98	0.99	0.99	
3	Makrositik anemi	1.00	1.00	1.00	
4	Normositik hipokromik anemi	1.00	0.99	0.99	
5	Normositik normokromik anemi	0.98	1.00	0.99	
6	Sağlıklı	1.00	0.99	0.99	
7	Trombositopeni	1.00	1.00	1.00	
8	Trombositopenili lösemi	1.00	1.00	1.00	

Şekil 1: Random forest algoritmasının sınıflar üzerindeki performansı.



Şekil 2: Random forest performansının grafiği.

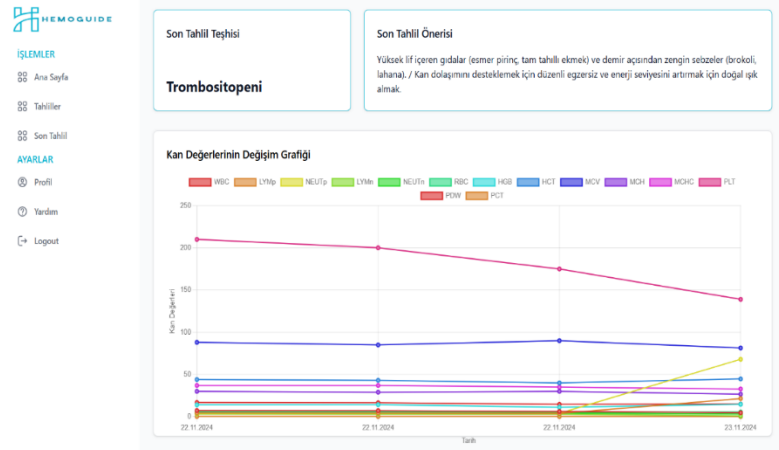
2.5 Hemoguide Uygulaması

Bu çalışmada gerçekleştirilen sistem üç temel kullanıcı rolüne hitap eden admin (Şekil 3), hasta (Şekil 4), ve sağlık çalışanı (Şekil 5), arayüzleri olarak tasarlanmıştır. Yönetici, sistemin genel yönetiminden ve diğer kullanıcıların kontrolünden sorumludur. Anasayfada sistemde kayıtlı toplam hasta sayısı, tahlil sayısı ve sağlık çalışanı sayısı bilgi kutuları şeklinde gösterilmektedir. Tahlil sonuçlarındaki teşhis türlerinin dağılımını ve hastaların cinsiyet ve VKİ kategorilerine göre dağılımlarını gösteren grafikler bulunmaktadır. Tablolar ile sisteme kayıtlı kullanıcıların bilgilerini görüntüleyebilmektedir (Şekil 6). Dinamik bir

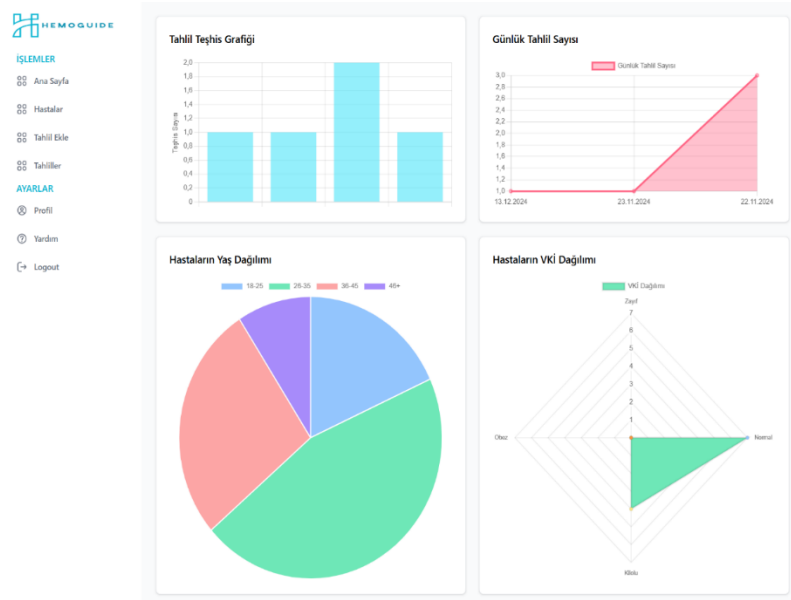
veritabanına bağlı olarak yeni hastalar ve sağlık çalışanları ekleyebilmektedir (Şekil 7). Kullanıcı hastaların geçmiş bilgileri saklanmaktadır. Bu sayede hasta geçmişteki tahlilleriyle güncel tahlillerini kıyaslayabilmektedir (Şekil 8). Güncel tahlilini detaylı olarak ayrı bir sayfada görüntüleyebilmektedir (Şekil 9). Sağlık çalışanları için tasarlanan arayüzde hasta seçimi yapılarak sisteme yeni tahliller eklenebilmektedir (Şekil 10). Hasta seçiminden sonra hastanın bilgilerine göre otomatik olarak teşhis ve öneriler sunmaktadır. Sağlık çalışanı bu öneri ve sonuçları düzenleyebilmektedir.



Şekil 3: Admin arayüzü.



Şekil 4: Hasta arayüzü.



Şekil 5: Sağlık çalışanı arayüzü.

TARİH	DOKTORUN ADI	HASTANIN ADI	TANI	ÖNERİLER
13.12.2024	Ahmet Yılmaz	Tuğçe Güzle	Demir eksikliği anemisi	İspanak, brokoli gibi yeşil yapraklı sebzeler ve meyveler (çilek, kiwi). Dozenli :
23.11.2024	Ahmet Yılmaz	Kemal Yıldız	Trombositopeni	Yüksek lif içeren gıdalar (esmer pirinç, tam tahıllı ekmek) ve demir açısından
22.11.2024	Zeynep Kaya	Meryem Çetin	Sağlıklı	Sebzeler (spanak, kabağı) ve yeterli su alımı. / Haftada en az 150 dakika orta
22.11.2024	Mehmet Aydın	Elif Güneş	İzlemi	Sebzeler (spanak, brokoli) ve antioksidan zengin meyveler (çilek). / Hafif ter
22.11.2024	Mehmet Aydın	Elif Güneş	Normosiler normokromik anemi	Sebzeler (brokoli, spanak) ve narenciye (portakal, mandalina). Yeterli su alı
22.11.2024	Ali Çelik	Elif Şahin	Normosiler normokromik anemi	Yüksek protein (tavuk, hindi) ve lif içeren yüksek sebzeler (brokoli, kabağı) /
22.11.2024	Zeynep Kaya	Meryem Çetin	Normosiler normokromik anemi	Sebzeler (brokoli, spanak) ve narenciye (portakal, mandalina). Yeterli su alı
22.11.2024	Ahmet Yılmaz	Kemal Yıldız	Normosiler normokromik anemi	Protein kaynakları (tavuk, balık) ve lifli gıdalar (tam buğday ürünleri). / Kan d
22.11.2024	Fatma Güneş	Vildan Kaya	Sağlıklı	Sebzeler (spanak, kabağı) ve yeterli su alımı. / Haftada en az 150 dakika orta
22.11.2024	Emine Demir	Elif Yılmaz	Sağlıklı	Sebzeler (spanak, kabağı) ve yeterli su alımı. / Haftada en az 150 dakika orta
22.11.2024	Mustafa Öztürk	Serkan Özdemir	Sağlıklı	Yüksek protein (hindi, balık) ve sebzeler. / Günlük adım hedefi koyarak aktif
22.11.2024	Ahmet Yılmaz	Kemal Yıldız	Sağlıklı	Dengeli protein (tavuk, balık) ve lifli gıdalar. / Fiziksel olarak aktif kalmak için
22.11.2024	Ahmet Yılmaz	Kemal Yıldız	Sağlıklı	Dengeli protein (tavuk, balık) ve lifli gıdalar. / Fiziksel olarak aktif kalmak için

Şekil 6: Yönetici kullanıcı görüntüleme arayüzü.

HEMOGUIDE

İŞLEMLER

- Ana Sayfa
- Hastalar
- Sağlık Çalışanları
- Tahilliler
- Sağlık Çalışanı Ekle
- Hasta Ekle

AYARLAR

- Profil
- Yardım
- Logout

Hasta Ekle

Ad: Soyad:

Doğum Tarihi: Boy (cm):

Ağırlık (kg): Cinsiyet:

Şifre: Email:

Telefon:

Ekle

Şekil 7: Yönetici kullanıcı ekleme arayüzü.

TARİH	TANI	ÖNERİ
22.11.2024	Sağlıklı	Dengeli protein (tavuk, balık) ve lifli gıdalar. / Fiziksel olarak aktif kalmak için düzenli yürüyüşler ve düzenli uyku.
22.11.2024	Sağlıklı	Dengeli protein (tavuk, balık) ve lifli gıdalar. / Fiziksel olarak aktif kalmak için düzenli yürüyüşler ve düzenli uyku.
22.11.2024	Normositer normokromik anemi	Protein kaynaktan (tavuk, balık) ve lifli gıdalar (tam buğday ürünleri). / Kan dolaşımını artırmak için hafif koşu veya yüzme gibi d
23.11.2024	Trombositopeni	Yüksek lif içeren gıdalar (esmer pirinç, tam tahıllı ekmek) ve demir açısından zengin sebzeler (brokoli, lahanası). / Kan dolaşımını d

Şekil 8: Hasta geçmiş tahliller görüntüleme arayüzü.

Son Tahlil Bilgileri			
Doktorun Adı:	Ahmet Yılmaz	Tarih:	23.11.2024
Tanı:	Trombositopeni	Öneri:	Yüksek lif içeren gıdalar (esmer pirinç, tam tahıllı ekmek) ve demir açısından zengin sebzeler (brokoli, lahanası). / Kan dolaşımını desteklemek için düzenli egzersiz ve enerji seviyesini artırmak için doğal ışık almak.
WBC:	4.7	LYM%:	21.5
NEUT%:	68	LYM#:	1
NEUT#:	3.2	RBC:	5.5
HGB:	14.7	HCT:	44.7
MCV:	81.4	MCH:	26.7
MCHC:	32.8	PLT:	139
PDW:	14.9	PCT:	0.14

Şekil 9: Hasta son tahlil görüntüleme arayüzü.

Şekil 10: Sağlık çalışanı tahlil ekleme arayüzü.

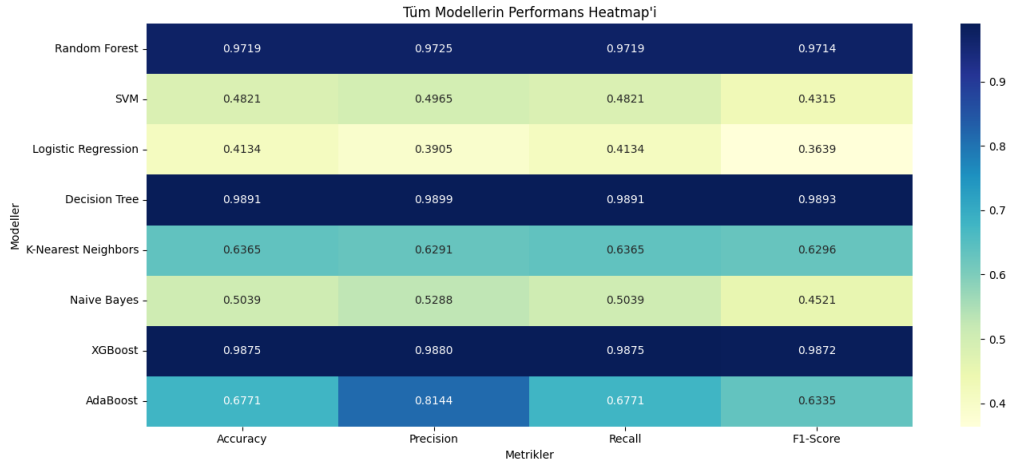
3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada hematolojik bozuklukların teşhisi ve bireyselleştirilmiş tedavi stratejilerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen makine öğrenimi tabanlı karar destek sistemi, hemogram verilerinin analizine dayalı olarak yüksek doğruluk oranıyla tanı koyabilme ve kişiye özgü beslenme ile yaşam tarzı önerileri sunma kapasitesini göstermiştir. SMOTE yöntemi uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları (Random Forest, SVM, Logistic Regression, Decision Tree, K-Nearest Neighbors, Naive Bayes, XGBoost, AdaBoost) uygulanarak performans karşılaştırmaları yapılmıştır (Şekil 11–14). SMOTE yöntemi ile dengelenmiş veri seti kullanılarak elde edilen doğruluk oranları sırasıyla Random Forest için %99,66, SVM için %63,96, Logistic Regression için %66,28, Decision Tree için %99,50, K-Nearest Neighbors için %86,61, Naive Bayes için %63,30, XGBoost için %98,70 ve AdaBoost için %67,70

olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, SMOTE yöntemiyle dengesiz veri probleminin etkili bir şekilde giderildiğini ve özellikle bazı sınıflandırma algoritmalarının performansında iyileşmeler sağlandığını göstermektedir. Özellikle Random Forest ve Decision Tree gibi ağaç tabanlı yöntemlerin SMOTE sonrası belirgin bir şekilde yüksek doğruluk değerlerine ulaşması, bu algoritmaların sınıf dengesizliklerine karşı daha dayanıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Random Forest algoritması, %99,66 doğruluk oranı ile tüm diğer yöntemlere göre en başarılı model olarak öne çıkmıştır. Bu yüksek başarı oranı, modelin karmaşık veri yapılarını öğrenme kapasitesinin yüksekliğini ve SMOTE ile desteklenmiş dengeli veriler üzerinde güçlü bir genelleme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, özellikle sağlık gibi hata toleransının düşük olduğu alanlarda, Random Forest gibi sağlam ve güvenilir modellerin kullanılması önerilmektedir.

Tüm Modellerin Detaylı Performans Tablosu:				
Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Random Forest	0.971919	0.972495	0.971919	0.971386
SVM	0.482059	0.496525	0.482059	0.431502
Logistic Regression	0.413417	0.390540	0.413417	0.363896
Decision Tree	0.989080	0.989898	0.989080	0.989318
K-Nearest Neighbors	0.636505	0.629106	0.636505	0.629648
Naive Bayes	0.503900	0.528845	0.503900	0.452123
XGBoost	0.987520	0.987990	0.987520	0.987234
AdaBoost	0.677067	0.814432	0.677067	0.633539

Şekil 11: SMOTE Yöntemi Öncesi Model Performansları.

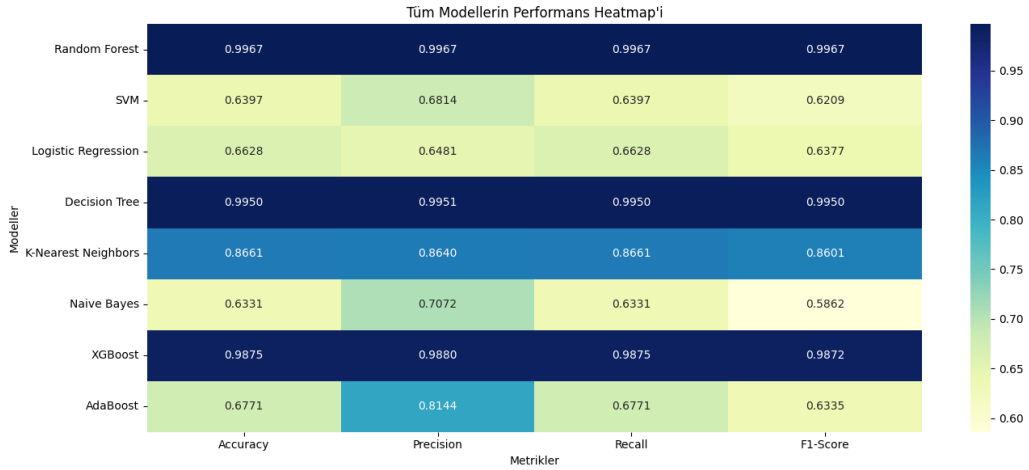


Şekil 12: SMOTE yöntemi öncesi model performanslarının grafiği.

Tüm Modellerin Detaylı Performans Tablosu:

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Random Forest	0.996694	0.996748	0.996694	0.996697
SVM	0.639669	0.681431	0.639669	0.620903
Logistic Regression	0.662810	0.648051	0.662810	0.637733
Decision Tree	0.995041	0.995115	0.995041	0.995041
K-Nearest Neighbors	0.866116	0.863989	0.866116	0.860136
Naive Bayes	0.633058	0.707210	0.633058	0.586197
XGBoost	0.987520	0.987990	0.987520	0.987234
AdaBoost	0.677067	0.814432	0.677067	0.633539

Şekil 13: SMOTE yöntemi sonrası model performansları.



Şekil 14: SMOTE yöntemi sonrası model performanslarının grafiği.

Sistem, hastaların teşhis bilgileri, VKİ ve demografik özelliklerini dikkate alarak kişiselleştirilmiş beslenme ve yaşam tarzı önerileri sunmuş, böylece tedavi süreçlerinin optimizasyonuna önemli katkılar sağlamıştır.

Bununla birlikte, nadir görülen sınıflarda performans düşüklüğü gözlemlenmiş ve modelin daha çeşitli ve kapsamlı veri kümeleriyle geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Uzman görüşlerinin entegrasyonu ve farklı

coğrafi/demografik popülasyonlardan elde edilecek verilerle sistemin güncellenmesi, önerilerin evrensel geçerliliğini artırabilir. Sistemin klinik uygulamalardaki potansiyeli, sağlık çalışanlarının karar verme süreçlerini destekleyerek tanı ve tedavi protokollerini iyileştirmesiyle öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, yapay zeka tabanlı KDS'lerin sağlık sektöründeki dönüştürücü etkisini vurgulamakta olup, veriye dayalı tıbbın gelişimine yönelik önemli bir adım teşkil etmektedir. Sistemin ölçeklenebilirliği ve adaptasyonu, gelecekte daha geniş kullanıcı kitlelerine ulaşmasını ve klinik etkinliğini artırmasını mümkün kılacağı öngörülmektedir.

Yazarların Katkıları: İlk yazar Öznur SUÇEKEN analiz ve yorum, makale yazımı ve denetleme hususlarında, ikinci yazar Tuğçe GÜZLE fikir, literatür taraması, veri toplama ve tasarım hususlarında çalışmaya katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışmaları: Yazarlar çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedirler.

4. KAYNAKLAR

- [1] M. N. Garcia-Casal, O. Dary, M. E. Jefferds, and S. R. Pasricha, "Diagnosing anemia: Challenges selecting methods, addressing underlying causes, and implementing actions at the public health level," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1524, no. 1, pp. 37-50, 2023.
- [2] Y. El Alaoui, A. Elomri, M. Qaraqe, R. Padmanabhan, R. Y. Taha, H. El Omri, and O. Aboumarzouk, "A review of artificial intelligence applications in hematology management: current practices and future prospects," *J. Med. Internet Res.*, vol. 24, no. 7, p. e36490, 2022.
- [3] A. Srisuwananukorn, M. E. Salama, and A. T. Pearson, "Deep learning applications in visual data for benign and malignant hematologic conditions: a systematic review and visual glossary," *Haematologica*, vol. 108, no. 8, p. 1993, 2023.
- [4] Y. Zhang, Y. Weng, and J. Lund, "Applications of explainable artificial intelligence in diagnosis and surgery," *Diagnostics*, vol. 12, no. 2, p. 237, 2022.
- [5] N. B. Noor, U. A. Oyshi, A. Das, and K. Iqbal, "A systematic approach to predict anemia from eye conjunctiva images," in *Proc. 26th Int. Conf. Comput. Inf. Technol. (ICCIT)*, Cox's Bazar, Bangladesh, Dec. 13-15, 2023, pp. 1-5.
- [6] U. Ponnusamy, D. Darshan, and N. Sampathila, "Approaching explainable artificial intelligence methods in the diagnosis of iron deficiency anemia using blood parameters," in *Proc. Int. Conf. Recent Adv. Inf. Technol. Sustain. Dev. (ICRAIS)*, Manipal, India, Nov. 6-7, 2023, pp. 201-206.
- [7] A. Tummala and K. Parvataneni, "Comparative study of AI-based anemia prediction using eye conjunctiva images and blood tests," in *Proc. Int. Workshop Artif. Intell. Image Process. (IWAIIIP)*, Yogyakarta, Indonesia, Dec. 1-2, 2023, pp. 87-91.
- [8] A. G. Mugdha, F. T. Pinki, and S. K. Talukdhar, "Hemoglobin estimation and anemia severity prediction using machine learning algorithms," in *Proc. 5th Int. Conf. Sustain. Technol. Ind. 5.0 (STI)*, Dhaka, Bangladesh, Dec. 9-10, 2023, pp. 1-6.
- [9] M. M. Rahman, M. U. Mojumdar, H. A. Shifa, N. R. Chakraborty, N. P. Stenin, and M. A. Hasan, "Anemia disease prediction using machine learning techniques and performance analysis," in *Proc. 11th Int. Conf. Comput. Sustain. Global Dev. (INDIACom)*, New Delhi, India, Feb. 28-Mar. 1, 2024, pp. 1276-1282.
- [10] E. Aboelnaga, "Anemia types classification," *Kaggle, Dataset*, 2022. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/eboelnaga/anemia-types-classification>
- [11] M. Levi, M. Simonetti, E. Marconi, O. Brignoli, M. Cancian, A. Masotti, and F. Lapi, "Gender differences in determinants of iron-deficiency anemia: a population-based study conducted in four European countries," *Ann. Hematol.*, vol. 98, no. 7, pp. 1573-1582, 2019.
- [12] R. Krisnanda, "Vitamin C helps in the absorption of iron in iron deficiency anemia," *J. Penelit. Perawat. Prof.*, vol. 2, no. 3, pp. 279-286, 2020.
- [13] J. Deng, L. Ramelli, P. Y. Li, A. Eshaghpour, G. E. M. Schuenemann, and M. A. Crowther, "Efficacy of vitamin C with iron supplementation in iron deficiency anemia patients: A systematic review and meta-analysis," *Blood*, vol. 142, p. 1091, 2023.
- [14] J. Deng, L. Ramelli, P. Y. Li, A. Eshaghpour, G. E. M. Schuenemann, and M. A. Crowther, "Efficacy of vitamin C with Fe supplementation

- in patients with iron deficiency anemia: A systematic review and meta-analysis," *Blood Vessels Thromb. Hemost.*, vol. 1, no. 4, p. 100023, 2024.
- [15] Y. Qin, A. Melse-Boonstra, X. Pan, B. Yuan, Y. Dai, J. Zhao, and Z. Shi, "Anemia in relation to body mass index and waist circumference among Chinese women," *Nutr. J.*, vol. 12, no. 10, pp. 1-3, 2013.
- [16] A. C. Cepeda-Lopez, S. J. Osendarp, A. Melse-Boonstra, I. Aeberli, F. Gonzalez-Salazar, E. Feskens, and M. B. Zimmermann, "Sharply higher rates of iron deficiency in obese Mexican women and children are predicted by obesity-related inflammation rather than by differences in dietary iron intake," *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 93, no. 5, pp. 975-983, 2011.
- [17] A. Peña-Fernández, M. Higuera, E. Segura, M. D. Evans, and M. D. L. Á. Peña, "Inadequacies of dietary iron intake in normal- and overweight young university students from Leicester, England," *Biol. Life Sci. Forum*, vol. 38, no. 1, p. 6, 2025.
- [18] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: synthetic minority over-sampling technique," *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 16, pp. 321-357, 2002.
- [19] L. Breiman, "Random forests," *Mach. Learn.*, vol. 45, pp. 5-32, 2001.
- [20] A. Liaw and M. Wiener, "Classification and regression by randomForest," *R News*, vol. 2, no. 3, pp. 18-22, 2002.
- [21] M. Fernández-Delgado, E. Cernadas, S. Barro, and D. Amorim, "Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems?," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 15, no. 1, pp. 3133-3181, 2014.
- [22] H. Chen, et al., "A random forest model based classification scheme for medical diagnosis," *Comput. Math. Methods Med.*, 2017.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Derin Kazılarda 2B ve 3B Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması

Investigation of 2D and 3D Analysis of Deep Excavation by Finite Element Method

Göksu Tunç^{1,*}, Seyhan Fırat²

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 09.04.2025

Kabul / Accepted: 14.05.2025

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Göksu Tunç goksuhizioglu@gmail.com

ÖZ: Büyük şehirlerde ulaşımın yoğunluğu ve mevcut yolların kısıtlı olması nedeniyle, mevcut zemin seviyesinin altında bu durumu çözmeye yönelik ulaşım alternatifleri değerlendirilmektedir. Kazı çevresindeki yapılar, yollar ve diğer yapılarda oluşabilecek etkileri önlemek için kazılar uygun yöntemler ile desteklenmektedir. Bu nedenle mevcut binalara yakın bir yerde derin kazıların yapılması kaçınılmazdır. Seçilecek iksa sistemi zemin yapısına ve bu çevre yapılarına doğrudan bağlıdır. Derin kazılarda oluşacak iksa düşey elemanının tesir kuvvetlerinin ve yatay deplasmanlarını elde etmek amacı ile çoğunlukla iki boyutlu analizleri yapılmaktadır. Ancak, derin kazılarda üç boyutta da bu etkiler oluşur. Bu kazılarda köşe etkisi iki boyutlu programlar kullanılarak modellenemez. Bu durumda iki boyutta yapılan analizlere ek olarak üç boyutlu analizlere ihtiyaç duyulmakta ve sistem davranışı iki durumda da irdelenerek hesaplanan sonuçlar ölçülen sonuçlarla karşılaştırılır. Bu çalışma, sonlu eleman yöntemi ile iki boyutlu ve üç boyutlu analiz yaparak sonuçlarının irdelenmesi ile iki durumun aralarındaki oransal farklılıkların tespit edilmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında bir bölge seçilerek zemin idealize edilip geoteknik parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametre seti Plaxis2D ve Plaxis3D ile modeller oluşturulmuştur. Üç boyutlu modelleme yapılmadan da iki boyutlu analiz yardımı ile elde edilen sonuçların oransal olarak yorumlanabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Derin Kazılar, Kazık, Sonlu Elemanlar Metodu Analizleri, Maliyet Analizi.

ABSTRACT: In big cities, due to the intensity of transportation and limited existing roads, transportation alternatives are being evaluated to solve this situation below the existing ground level. Excavations are supported with appropriate methods to prevent possible effects on existing structures, roads and other structures around the excavation. Therefore, it is inevitable to make deep excavations close to existing buildings. The excavation support system to be selected is directly dependent on the ground structure and these surrounding structures. To obtain the impact forces and horizontal displacements of the vertical excavation support element to be formed in deep excavations, two-dimensional analyses are mostly performed. However, excavations behave in a way defined as three-dimensional. When deep excavations are made, the corner effect on the behavior of the support elements cannot be modeled using two-dimensional programs. In this case, in addition to the analyses made in two dimensions, three-dimensional analyses are needed, and the system behavior is examined in both cases and the calculated results are compared with the measured results. This study aims to determine the proportional differences between the two cases by examining the results by performing two-dimensional and three-dimensional analyses with the finite element method. Within the scope of the study, a region was selected, the ground was idealized, and its geotechnical parameters were determined. The obtained parameter set was used to create models with Plaxis2D and Plaxis3D. It is thought that the results obtained with the help of two-dimensional analysis without three-dimensional modeling can be interpreted proportionally.

Keywords: Deep Excavation, Pile, Finite Element Method (FEM) Analysis, Cost Analysis.

1. GİRİŞ

Kentsel alanlarda temel veya bodrum katları, yeraltı petrol tankları, metrolar veya toplu taşıma sistemlerinin inşasında kazı kaçınılmazdır. Yeraltı alanına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu doğrultuda derin kazılara ihtiyaç artmakta bu durumda kazı aşamaları sırasında bitişik yapılara, yollara daha da dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durumda en önemli etkileri oluşturan durum zemindeki gerilim durumlarının değişmesidir. Kazı davranışı gözlemlerken içinde bulunulan zeminin özellikleri iyi tayin edilmeli bu doğrultuda tedbirler alınmalıdır. Bu sayede bitişik nizam yapılar ile derin kazı yapılan yapının etkileşimi en asgari düzeyde tutulup tedbirler en doğru şekilde nihailendirilmelidir.

Uygun bir kazı destek sisteminin tasarımı, kazı kaynaklı deformasyonları azaltmak için önemlidir. Kazı destek sistemi çok sayıda faktörden etkilenebilir. Derin kazı analizi hem stabilite hem de deformasyon analizini içerir. Kazıların temel çalışma prensibi yapı-zemin etkileşimidir. Zemin doğrusal olmayan, elastik olmayan ve anizotropik bir malzemedir ve su içeriği zemin davranışını etkiler. Dolayısıyla kazı yapılan zeminin içeriği, kohezyonlu, kohezyonsuz ya da kaya olması sistemdeki genel davranışı etkileyerek standardize edilemeyen karmaşık sonuçları doğuracaktır. Derin kazı sistemlerinin analizi, toprağın elasto-plastik davranışının, zemin ile destek sistemindeki iksa elemanının arasındaki arayüz davranışının ve kazı sürecinin simülasyonlarını içerir. Bu nedenle, bu karmaşık yapının çözümlemesi sayısal yöntemleri kullanarak mümkün kılınmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, kısmi diferansiyel denklemler için sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler bulmak için kullanılan bir sayısal tekniktir. Sonlu elemanlar yöntemi içerisinde bulunan her bir tanımlamayı elemana böler ve bu elemanları düğüm noktalarında yeniden birleştirir. Elemanları birbirine bağlayarak, alan niceliği tüm zemin veya yapı üzerinde interpolate edilmiş olur. Bu süreç, eş zamanlı cebirsel denklemlerle sonuçlanır. 2009 yılında Kung tarafından yatay iksa hareketini etkileyen faktörler üç grup altında sınıflandırılmış ve kazının karmaşık bir yapı-zemin etkileşimi olduğu vurgulanmıştır [1]. Bu faktörler incelendiğinde zeminin karakterizasyonu, tasarımı etkileyen genel kabuller ve inşaatın yapımında

sistem davranışını etkileyen faktörler olarak özetlenmektedir.

Literatürde yapılan araştırmalar da göstermektedir ki derin kazılar basit bir problemten ziyade karmaşık bileşenleri olan birden fazla değişken barındıran mekanizmalardır. Zemini doğru tanımak içerisindeki kazı yöntemini bu doğrultuda oluşturmak en temel husustur. Kazı yapılmadan önce öngörülemeyen problemler için nümerik analizler yapılarak gerçeğe en yakın tanımlamalar ile derin kazılar incelenmelidir. Kazı modellemelerinde dikkate alınması gereken en önemli unsurlar kazılacak olan bölgenin gerçeğe en doğru yansıtılmasıdır. Bu doğrultuda kazı çukurunun derinliği, kazının yapılacağı bölgede bulunan tüm çevre yapılar (kat bilgisi, bodrum bilgisi gibi), mevcut altyapılar ile ilişkisi, kazı yapılacak olan bölgenin detaylı arazi bilgisi, zemin/kaya tabakalanması özellikleri, yeraltı suyu koşulları gibi detaylı bilgilere sahip olunmalı ve elde edilen veriler doğrultusunda model gerçeğe en doğru şekilde simüle edilmelidir.

Yapılan literatür araştırmalarında çoğunlukla iksa elemanlarının yatay deplasmanları incelenirken yapılan modellemeler ile saha çalışmaları kıyaslanmaktadır. 2002 yılında yayımlanan okul kazısından elde edilen çalışmada [2] yer alan veriler kazı sırasında oluşan yatay deplasmanların açıl dönme oranları ile kıyasını içermektedir. Diğer bir çalışma ise Kaliforniya, San Francisco şehir merkezindeki kıyı şeridi boyunca yapılan metro kazılarından elde edilen yatay deplasmanları ve elde edilen bitişik binaların tahmini oturumları ile yapım sonrasında oluşan deformasyonların tolere edilebilir sınırları incelemektedir [3]. Literatürde yer alan çalışmalardan bazıları ise sistem davranışının üç boyutlu olarak tanımlanması gerektiğini, bu sayede köşe etkisinin merkeze kıyasla daha az deplasman değerlerine sahip olduğunu ve bu davranışın ise daha kabul edilebilir olduğunu göstermektedir [4]. İksa yatay deplasmanlarına destek olması ve iksa yer değiştirmesini sınırlamak için etkili bir önlem olarak pasif direncini artırma girişiyle jet grouting ile iyileştirme yöntemleri de yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Bu amaçla yapılan çalışmalar da [5] iksa yatay deplasmanlarının iyileştirme yöntemi kullanıldığında ne ölçüde iksa yatay davranışını etkilediği araştırılmıştır [6]. Üç boyut etkisinin incelendiği diğer bir çalışma ise

Bangkok zeminlerinde yapılan bir kazıyı incelemektedir. Bu çalışma temelinde analiz yapmadan tablo yöntemi ile kazı sırasında iksa duvarlarında oluşan yanal maksimum deformasyonu, köşe etkisini de içerecek şekilde yakınsamasını incelemektedir. Yapılan çoğu çalışma iksa yatay deplasmanlarının iki boyutta ve üç boyuttaki deplasmanlarını incelerken bu sonuçları gerçek saha deplasman sonuçları ile kıyaslamakta ve oransal yaklaşım sunmaktadır. Genellikle sonuçlar iksa sistemindeki kazık/diyafram duvar gibi düşey elemanların eğilme davranışını incelemez. Ancak literatürde yer alan [7] çalışma sistem davranışını deplasmanların yanı sıra düzlem içi eğilme ve düzlem dışı eğilme momenti olarak incelemekte ve bu davranışları köşe etkisini de içinde bulunduran tahminlerle sunmaktadır. Bu makale davranış yorumlaması sırasında kazı derinliği ve bu kazının kare/dikdörtgen olması gibi değişkenleri de hesaba katan detaylar içererek yüzdece farkları yansıtmaktadır. Literatür verileri gösteriyor ki derin kazı yapılması basit bir problem olmaktan ziyade zemin davranışının gerçeğe en yakın tanımlanması gerektiği karmaşık bir mekanizmadır. Bu durumun yapılan çalışmalarla, ampirik formüllerle ve en önemlisi gelişen teknoloji ile sonlu elemanlar yardımı ile modellenerek ön çalışmalarının yapılması, sonrasında ise kazı sahasının kontrollü şekilde kazılarak izlenmesi gerekmektedir.

Bu araştırmanın amacı, derin kazılarda 2B ve 3B yöntemi ile sonlu eleman modellemelerinin yapılmasıdır. Üç boyutlu modelleme yapılmadan da iki boyutlu analizlerin yardımı ile elde edilen sonuçların da oransal olarak yorumlanabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

2. SONLU ELEMANLAR ANALİZ KABULLERİ

2.1 Modelleme Bilgileri

Bu çalışmaya konu olan derin kazı bir metro kazısı olup seçilen bölgenin iki cephesinde de yapılar yer almakta ve kazı derinliği yaklaşık 27 m'dir. Modelde kazılması planlanan yapı boyutları 21,80 m eninde 107,80 m boyundadır. Bu kazı düşeyde 120 cm ara ile 100 cm'lik fore kazıklarla desteklenecek olup yatay destek elemanı olarak dört farklı kotta strut (boru eleman) kullanılmıştır.

Kazı derinliği göz önüne alındığında model genişliği ve derinliği yönetmelikte [8] verildiği üzere minimum koşulların üzerinde modellenmiştir. Zemin tabakaları tanımlanırken tasarıma uygun bünye modeli seçilmiş ve her iki analizde de (2B ve 3B Plaxis analizi) aynı metot ve zemin girdileri kullanılmıştır.

Modelleme yapılırken alınan kararlar Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1: Modellemeye dair genel bilgiler.

Tanımlamalar	Detay Bilgisi
Kazı Derinliği	27,05 m
Düşey İksa Elemanı	Ø100/120 cm Kazık
Düşey İksa Eleman Boyu	32,15 m
Düşey İksa Eleman Soket Boyu	6 m
Yatay İksa Elemanı 1.Sıra	812,8 x 15,9 mm Strut
Yatay İksa Elemanı 2.Sıra	1219,2 x 20 mm Strut
Yatay İksa Elemanı 3.Sıra	1219,2 x 20 mm Strut
Yatay İksa Elemanı 4.Sıra	1219,2 x 15,9 mm Strut
Yatay Eleman Yatay Aralığı	5 m
Başlık Kirişi Boyutları	120 x 90 cm Kiriş
1. Sıra Kuşak Kirişi Boyutları	100 x 130 cm Kiriş
2. Sıra Kuşak Kirişi Boyutları	100 x 130 cm Kiriş
3. Sıra Kuşak Kirişi Boyutları	100 x 130 cm Kiriş

2.2 Kazı Aşamaları

Gerçeğe en uygun sonuçların alınabilmesi ancak gerçeğe en doğru modelleme yöntemi ile sağlanabilmektedir. Bu doğrultuda kazı aşamaları sırası ile tariflenmeli, inşaat aşamasında da bu metodoloji doğrultusunda kazılmalıdır. Plaxis sonlu elemanlar yöntemi ile bu aşamaları tanımlayabilen ve verilen sıralama doğrultusunda nihai kazık deplasmanlarını, yüzey oturmalarını ve kazık tesirlerini verebilmektedir. Modelde verilen yapım yöntemi gerçeğe en yakın şekilde Tablo 2'de verilmektedir.

Modelleme yapılırken her adım modelle girilmeli ve elde edilen sonuçların sağlıklı kıyaslanabilmesi için her iki analiz metodunda da aynı kabullerle gidilmelidir.

Tablo 2: Derin kazı aşamaları.

Derin Kazı İmalat Yöntemi
Yüzey yüklerin aktif edilmesi
Kazık imalatının yapılması
Başlık kirişinin imal edilmesi*
1.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi
1.sıra strutın imal edilmesi
2.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi*
2.sıra strutın imal edilmesi
3.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi*
3.sıra strutın imal edilmesi
4.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi*
4.sıra strutın imal edilmesi
Tam kazı kotuna kadar kazılması
Temel imalatının yapılması
4.sıra strutın demontajının yapılması
Ara döşeme imalatının yapılması
3.sıra strutın demontajının yapılması
Ara döşeme imalatının yapılması
2.sıra strutın demontajının yapılması
En üst tabliye betonunun imalatının yapılması
1.sıra strutın demontajının yapılması
Nihai durum güvenlik analizinin yapılması

*Kiriş imalatları 3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır.

3. MODEL İÇİN KULLANILAN ZEMİN BİLGİLERİ

Çalışma kapsamında analizlere konu olan bir metro istasyonu olup kazı için bir bölge seçilmiş, zemin verileri bu bölge üzerinde oluşturulmuş ve yer altı su seviyesi yüzeyden 8 m aşağıda alınmıştır. Bu kapsamda oluşturulan idealize zemin profili yüzeyden itibaren sırası ile kalın bir dolgu tabakası ardından zeminleşmiş kaya ardalanması ve analiz sonuna kadar da orta dayanımlı-zayıf Kireçtaşı-Kiltası-Marn ardalanması (W3-W4) olarak görülmektedir. İdealize zemin profiline ait veriler Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3: İdealize zemin profili ve tasarım parametreleri.

Derinlik (m)	Tabaka Betimlemesi	Birim Hacim Ağırlık γ (kN/m ³)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)	Deformasyon Modülü E' (MPa)
0.0-4.0	Dolgu	18	5	25	15
4.0-18.0	Zeminleşmiş Killi Kireçtaşı-	20	15	27	40
18.0-...	Orta Dayanımlı-Zayıf Kireçtaşı-Kiltası-Marn Ardalanması (W3-W4)	23	70	27	140
18.0-...	Orta Dayanımlı-Zayıf Kireçtaşı-Kiltası-Marn Ardalanması (W3-W4) (D=0.7)	23	40	18	55

Analizlerde kullanılacak tasarım parametreleri kayanın mekanik kazılar sırasında örselenme durumu da göz önüne alınarak kazı bölgesine etkiyen ilk üç metre için örselenme faktörü (D=0.7) olarak alınmış, üç metreden sonraki bölgeler için ise örselenmemiş (D=0) kaya verileri hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu durum Hoek tarafından 2002 tarihli makalesinde [9] detaylıca anlatılmaktadır. Plaxis modelleri içerisinde kullanılan bünye modeli Dolgu ve Zeminleşmiş kaya parametreleri için "Hardening Soil (HS)- Pekleşen Zemin Modeli" kullanılırken, kaya modellemesinde "Mohr-Coulomb Modeli (MC)" kullanılmaktadır.

Zemin verilerine ek olarak model içerisinde derin kazılara çevre yapıların etkisinin de etkisini tespit etmek amacı ile yapı eklenmiş olup bu bina bilgileri Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4: Çevre yapı bilgileri.

Bina/Yapı Konumu	Kat Bilgisi	Bodrum Bilgisi	Temel Derinliği (m)	Kazıktan Merkezin Uzaklığı (m)	Alınan Bina/Yapı Yüklü (kPa)
Planda Kuzeyde Kesitte Kazı Bölgesinin Sağında	6	1	3	4 ile 7 (Değişken)	110
Planda Güneyde Kesitte Kazı Bölgesinin Solunda	9	1	3	3 ile 7.5 (Değişken)	135

Plaxis 2D ve Plaxis 3D sonlu eleman yazılımı ile derin kazılar gerçekle uyumlu şekilde modellenmiş, kazı sırasında yapılan her adım için fazlar iki modelde de aynı kabullerle tamamlanmıştır.

3.1 Hardening Soil (HS)- Pekleşen Zemin Modeli

Pekleşen zemin (Hardening soil) modeli temeli plastisite teorisi olan gelişmiş bir zemin modelidir [10]. Bu model en yaygın olarak bilinen hiperbolik modeli temel alır ancak hiperbolik modelden daha çok gelişmiş bir versiyonudur. Hiperbolik model ile en temel farkı elastik teori yerine plastik teoriyi kullanır [11].

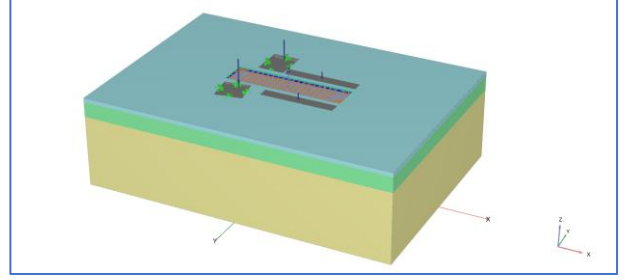
3.2 Mohr-Coulomb Modeli

Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ilk bölgesi elastik, ikinci bölgesinde ise mükemmel plastik bir malzeme olduğu varsayımını temel alan bir çözüm yöntemidir. Bu bünye modeli zeminlerde önerilmemekte olup yükleme ve yük boşaltma durumlarındaki zemin davranışını modelde yansıtamadığı için genelde önerilmediği bilinmektedir [11].

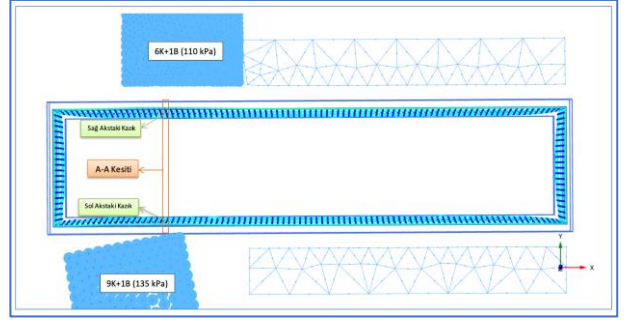
4. 2B VE 3B ANALİZ ÇALIŞMALARI

Plaxis2D olarak adlandırılan 2B Plaxis yazılımı, iki boyutta geoteknik mühendisliğinde zeminde oluşan deformasyon ve stabilite analizi için geliştirilmiş, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir programdır. 3D sonlu elemanlar analizi için PLAXIS 3D yazılımı kullanılır. PLAXIS 3D, Geoteknik mühendisliğinde kazı yaparken oluşan üçüncü boyut etkilerini de dikkate alarak analiz yapabilmektedir. İki modelleme yönteminde de zemin verileri aynı alınmış, bünye modelleri aynı doğrultuda kullanılmıştır. Buna ek olarak kazı aşamaları aynı şekilde tanımlanarak değişkenler minimize edilmiş, sonuçlarda elde edilen farklılıkların yalnızca üçüncü boyut etkisi üzerindeki değişkenliğin incelenmesi amaçlanmıştır [12].

Derin kazılarda incelenen ana unsurlar düşey iksa elemanının deplasman değeri ve buna bağlı oluşan iç tesir kuvvetleridir. Bu doğrultuda sistem çözümünde en olumsuz sonucu veren kesit bölgesi belirlenir ve 2B analizler bu bölgeyi içerecek şekilde oluşturulur. 3B analizlerde ise mevcut yapılar kazılacak olan bölge ile gerçeğe uygun şekilde modellenerek genel davranış incelenebildiği gibi detaylı incelenme gereken bölgelerden kesitler alınarak incelemeler yapılabilir. 2B modelinde alınan kesit çevre yapı etkileşimlerinin de etkisini inceleme amacı ile iki tarafında da mevcut bina tanımlaması olan bölgeden alınmış olup 3B modelde de aynı bölgede yer alan sonuçlarla kıyaslanmıştır. 3B modellemesi Şekil 1’de gösterilmiş olup Şekil 2’de ise ilgili modeldeki plan görünümü verilmektedir. Plan görünümünde analizlerin kıyaslanacağı Kesit A-A olarak adlandırılan kesit yeri gösterilmektedir.

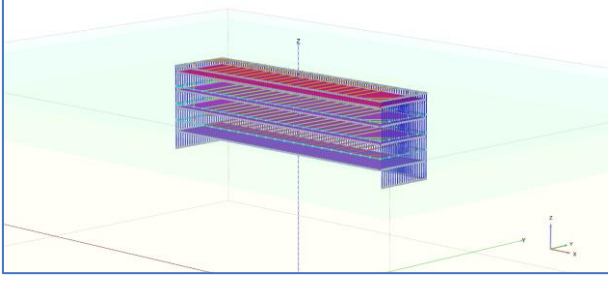


Şekil 1: Plaxis3D modeli.



Şekil 2: Plaxis3D plan kesiti (A-A kesit gösterimi).

Bu çalışma kapsamında kazı sırasında oluşan kazık deplasmanlarına ek olarak kazıklara etkiyen tesir kuvvetleri de incelenmiştir. Bu kazık davranışları ve tesir kuvvetleri incelendiğinde elde edilen maksimum kesme ve moment kuvvetleri mesnet noktalarında olup olmadığına bakılmıştır. Mesnet noktalarında oluşan rijitlik değişiminden kaynaklı noktalar silinmiş, ilgili bölgeler sonuçlara dahil edilmemiştir. Bu mesnet noktaları model içerisinde yer alan strutlar, döşemeler ve temel olarak tanımlanan rijitliklerinin değişken olduğu bölgelerdir. Kıyas yapılırken diğer bir önemli nokta sonuçların aynı birim özelinde değerlendirilmesidir. 2B modelden elde edilen sonuçlar, birim metre için verilmiş olup bu durum 2B modelleme temelinde” plain strain-düzlem gerinim” çözüm yöntemini kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Plain strain-düzlem gerinim çözüm yöntemini düzlem içi gerilmeleri ihmal edip 2 boyutlu olarak modellemeyi mümkün kılmaktadır. Elde edilen sonuçlar bu nedenle birim metre başına verilmekte olup sonuçlar değerlendirilirken 2B analizlerinden alınan tesir kuvvetleri nihai durumda etki aralığı ile çarpılmıştır. Şekil 3’te verilen iç yapı modellenmesinde görüleceği üzere 3B analizde kazıklar aralıklı modellenmiştir.

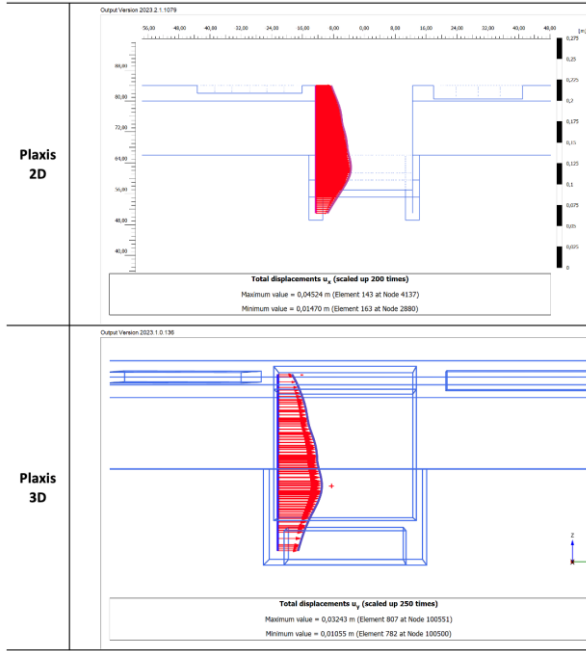


Şekil 3: Plaxis3D analiz iç yapı modellenmesi.

Yapılan çalışmalar sunulurken sırası ile kazık yatay deplasmanları, kazıklarda oluşan kesme kuvveti sonuçları ve eğilme momentleri sonuçları verilmektedir.

4.1 A-A Kesiti Sol Aks Kazık Deplasmanları

2B ve 3B modelleme yapıldığında elde edilen deplasman grafikleri Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4: 2B ve 3B Plaxis kazık deplasman değerleri.

2B analizden elde edilen sonuç 4,52 cm iken; 3B analizden elde edilen aynı bölgedeki kazık deplasmanı 3.24 cm'dir.

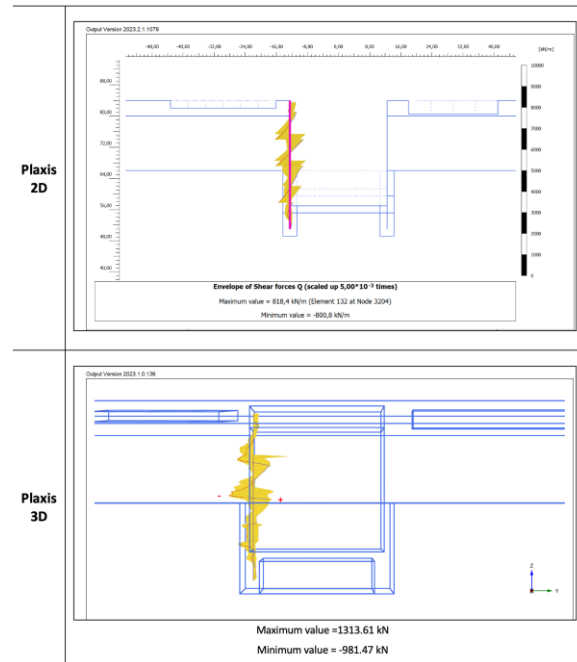
Tablo 5: Kazık deplasman değer özet tablosu.

A-A Kesiti Sol Aks Kazık	
	Deplasman (cm)
Plaxis 2D (Self+Soil)	4,52
Plaxis 3D (Self+Soil)	3,24
Sonuç	28% ↓

Tablo 5 ile sunulan değerler kazıktan elde edilen deplasman değerinin faktörsüz olarak yüzde değişimini vermektedir.

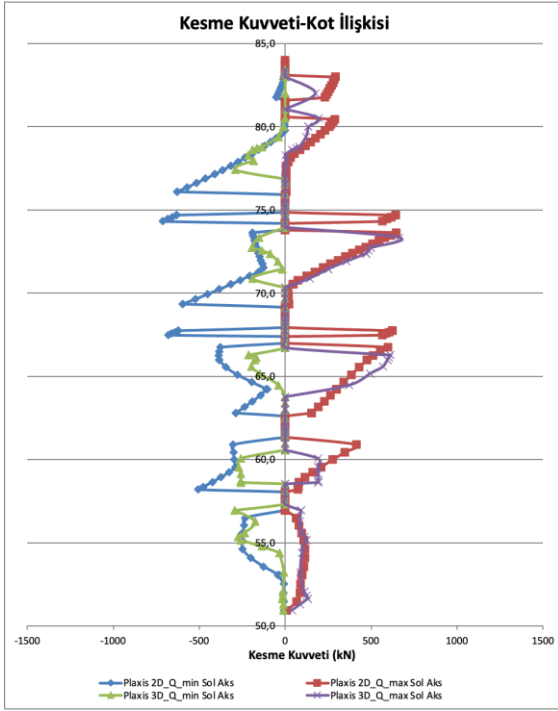
4.2 A-A Kesiti Sol Aks Kazık Kesme Kuvvet Zarfı

2B ve 3B modelleme yapıldığında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5: 2B ve 3B analizleri kazık kesme kuvveti.

2B analizden elde edilen kesme kuvvetleri maksimumunda (kesme kuvveti verileri mutlak değerleri alınarak yazılmıştır) 818.4 kN/m iken; 3B analizden elde edilen aynı bölgedeki kazık kesme kuvveti 1313.61 kN/m'dir. Mesnet noktalarında oluşan tesirler etki zone kadar silinmiş olup elde edilen yeni sonuçlara göre oluşturulan grafik Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6: 2B ve 3B analizleri kazık kesme kuvveti değerleri (Mesnet noktaları silinmiş).

Bu durumda oluşan maksimum kesme değeri 2B analizde 771.19 kN/m iken; 3B analiz sonucunda bu değer 661.08 kN/m olarak görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 2 Boyutlu analizlerde 818.4 kN/m olan kesme kuvveti değeri 771.19 kN/m'ye düşerken, 3 Boyutlu analizlerde bu sonuç 1313.61 kN/m'den 661.08 kN/m'ye inmiştir.

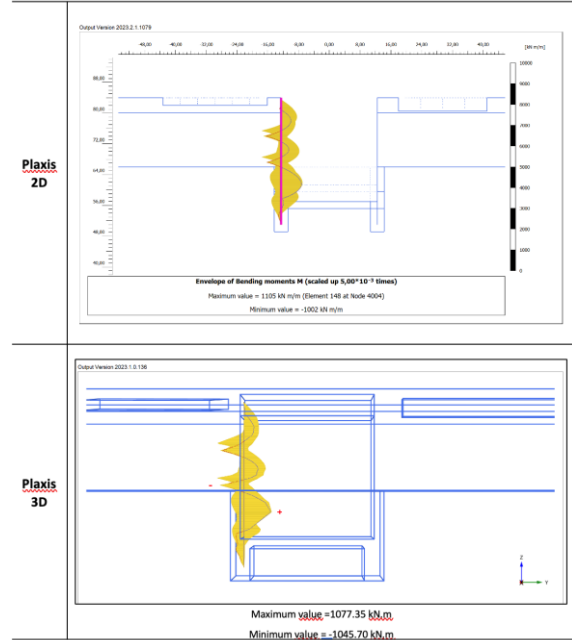
Tablo 6: Kazık kesme kuvveti özet tablosu.

	Kesme (kN/m) (Self+Soil)	Kesme (kN) (Self+Soil)
Plaxis 2D	818	982
Plaxis 3D	-	661
Sonuç		33% ↓

Tablo 6'da verilen ilk sütun 2B analizinin birim metre başına verdiği sonuç olup modellemede kazık aralığı 120 cm olarak tasarlandığı için elde edilen sonuçlar 1.2 ile çarpılmıştır. Kıyas için verilen değerler nihai durumda faktörsüz olarak verilmiştir.

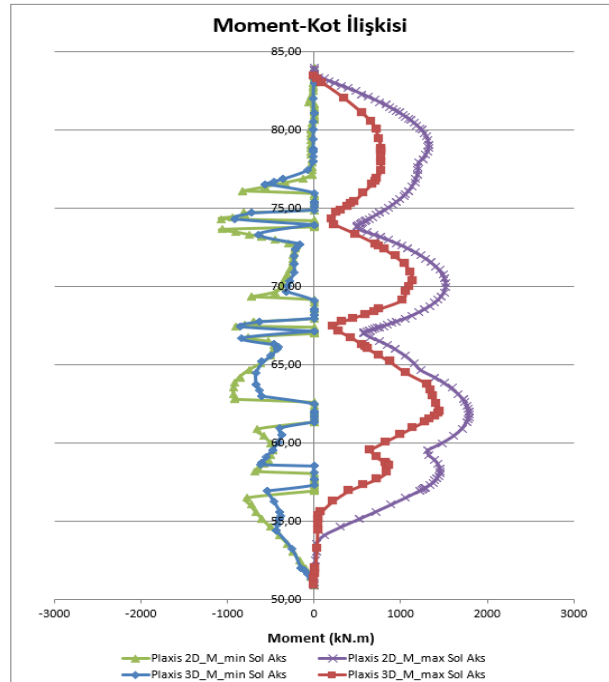
4.3 A-A Kesiti Sol Aks Kazık Eğilme Moment Zarfı

2B ve 3B modelleme yapıldığında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7: 2B ve 3B analizleri kazık moment zarfı.

2B analizden elde edilen moment zarfı 1105 kN.m/m iken; 3B analizden elde edilen aynı bölgedeki kazık momenti 1077.35 kN/m'dir.



Şekil 8: 2B ve 3B analizleri kazık moment zarfı (mesnet noktaları silinmiş).

Mesnet noktaları silindikten sonra oluşan moment diagramı Şekil 8’de sunulmakta olup oluşan maksimum kazık momentleri açıklık momenti olduğu görülmektedir. Diğer bir değişle kesme kuvvetinde olduğu gibi mesnet noktalarındaki pik noktalar moment diyagramlarında olmadığı için elde edilen sonuçlar değişmemiştir.

Tablo 7: Kazık eğilme momenti özet tablosu.

	Moment (kN.m/m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)
Plaxis 2D	1105	1325
Plaxis 3D	-	1077
Sonuç		19% ↓

Tablo 7’de verilen ilk sütun 2B analiz birim metre başına verdiği sonuç olup modellemeye kazık aralığı 120 cm olarak tasarlandığı için elde edilen sonuçlar 1.2 ile çarpılmıştır. Kıyas için verilen değerler nihai durumda faktörsüz olarak verilmiştir.

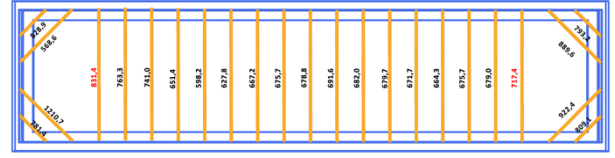
4.4 Çelik Strut Analiz Sonuçları

Kazık davranışına ek olarak yatay destek elemanı olarak kullanılan strutların 2B ve 3B analizlerde ki davranışları da elde edilen sonuçlar kıyaslanmış olup aralarındaki oransal fark verilmektedir.

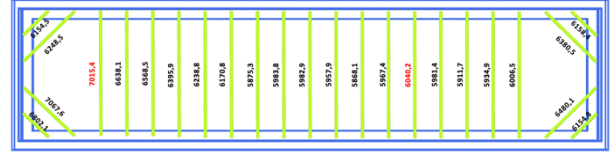
Tablo 8: 2B analiz strut yükleri.

Analiz Kesiti	Yatay İksa Elemanı	Kotu (m)	Tipi	Boru Destek Yüğü Nmax (kN)
Plaxis 2D Kesit A-A	1. Sıra	+83,55	D812.8* 15.9 mm	1581
	2. Sıra	+75,40	D1219.2* 20 mm	7926
	3. Sıra	+68,55	D1219.2* 20 mm	8080
	4. Sıra	+62,05	D1219.2* 15.9 mm	4989

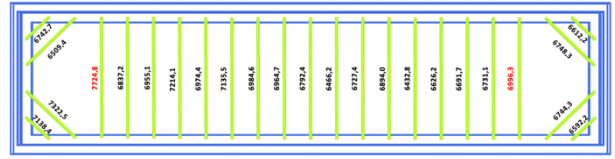
Tablo 8’de 2B analiz sonuçları A-A Kesiti olarak nitelendirilen bölge için yapılmıştır. Aynı bölgeyi temsil eden strutlar 3B analizden de kontrol edilmiştir. 3B modelleme sistemin geneli için yapılmış olup kıyas yapılacak olan bölgenin Kesit A-A olarak nitelendirilen bölge olmasına dikkat edilmiştir.



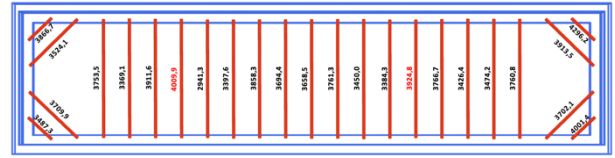
Şekil 9: +83.55 Kotu plaxis3D strut eksenel kuvveti.



Şekil 10: +75.40 kotu plaxis3d strut eksenel kuvveti.



Şekil 11: +68.55 kotu plaxis3d strut eksenel kuvveti.



Şekil 12: +62.05 kotu plaxis3d strut eksenel kuvveti.

Şekiller 9-12’de verilen strut eksenel kuvvetleri Plaxis3D’de sonuçlarından kot bazlı alınmış olup nihai durumdaki maksimum değerleri göstermektedir. Bu değerler iki analiz yönteminde de kot bazında değerlendirilmek üzere Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9: 2b-3b analiz strut yükleri kıyas tablosu.

Kot	+83.55	+75.40	+68.55	+62.05
Plaxis 2D	1580,7	7926,1	8079,5	4988,8
Plaxis 3D	831,4	7015,4	7724,8	4009,9
Sonuç	47% ↓	11% ↓	4% ↓	20% ↓

Kıyas için alınan değerler kesitin geçtiği yere en yakın bölgede bulunan maksimum strut yüküne dikkat edilerek seçilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile bir derin kazıdan elde edilen sonuçların iki boyut ve üç boyut etkisi incelenmiştir.

Yapı-zemin davranışını irdelemek amacı ile 2B ve 3B analiz yöntemi olarak Plaxis2D ve Plaxis3D programı yardımıyla analizler tamamlanmıştır.

Analizi yapılan model için iki cephesinde de yapı yer alan yaklaşık 27 m derinliğinde bir metro kazısı seçilmiştir. Modelde kazılması planlanan yapı boyutları 21,80 m eninde 107,80 m boyundadır. Bu kazı düşeyde 120 cm ara ile 100 cm'lik fore kazıklarla desteklenecek olup yatay destek elemanı olarak dört farklı kotta strut (boru eleman) kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında düşey destek elemanı olarak kullanılan fore kazık ile yatay destek elemanı olarak kullanılan strutlar iki analiz yöntemi ile de irdelenmiştir. Bu doğrultuda kazıklar için yatay deplasmanlar ve kesit tesirler sonuçları kıyaslanırken; çelik strutlar için ise maksimum eksenel kuvvetleri kıyaslanmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki kazık deplasmanları 3B modelde %28 daha az deplasman değeri verirken; kesme kuvveti açısından bu oran %33, eğilme momentine bakıldığında ise %19 daha az kesir tesiri değerleri elde edilmektedir.

Yatay destek elemanı olarak kullanılan çelik strutlar çalışma mekanizmaları gereğince basınç elemanı olarak kullanılmakta olup aldıkları eksenel kuvvetler kat bazında değişkenlik göstermektedir. Bu durumda başlık kirişi kotunda %47, 1.sıra kuşak kirişi kotunda %11, 2.sıra kuşak kirişi kotunda %4 ve son sıra kuşak kirişinde ise %20 fark görülmektedir. Nihai sonuçlar yine 3B analizlerin daha az sonuçlar verdiğini göstermektedir.

2B analiz yapıldığında genel sistem incelenip en riskli görülen bölgeyi içine alacak şekilde analiz kesit yerine karar verilir. Bu kabul geneli temsil etmekle birlikte oluşan maksimum etkileri göz önüne aldığı için en olumsuz sonucu vermektedir. Ancak gerçekte bütün kazı yapılan bölge aynı doğrultuda aynı yatay etkilere maruz kalmamaktadır. Dolayısı ile sistem çözümünden elde edilen sonuçlar bütün kazı bölgesinde aynı şekilde sonuç vermeyecektir. Yapılan analizde

metro istasyon kazısının iki cephesinde de mevcut yapı olan bölge incelenmiştir. Bu durum bu problem özelinde en riskli durum olması nedeni ile makul olarak değerlendirilmiş olsa da yapı etki bölgesinden çıktıktan sonraki kısımlar için oldukça güvenli tasarım sonuçları kullanılmasına neden olacaktır. 3B olarak düşüldüğünde ise çevre yapılar gerçeğe en yakın şekilde modellenerek yapı olmadığı bölgelerde yalnızca geçici durumdaki inşaat aktivitesi yükü ya da trafik yükü gibi görece daha düşük yükler verilerek modellenir. Bu durumda değişken zemin tesirleri oluşur ve model içerisinde yer alan düşey ya da yatay iksa elemanları gerçeğe daha yakın davranış göstererek göreceli etkiler de bu sayede gözlemlenebilmektedir. Bunun yanı sıra alınan kesit sayısı arttıkça 3B etkisine daha çok yaklaşılabılır, 3B modellemede yaşanabilecek etkiler değerlendirilebilir.

Günümüzde yapılan derin kazıların güvenli bir şekilde tamamlanması en önemli konu olsa da bu güvenli tasarımı yaparken mühendislik verilerini doğru yorumlamak, teknoloji ile gelişen programları doğru kullanmak ve en önemlisi bu sonuçları gerçekteki sonuçlarla kıyaslayarak en doğru tasarım yapmak amaçlanmalıdır. Bu çalışmanın nihai durumda üç boyutlu modelleme yapılmadan da iki boyutlu analizle yardımı ile elde edilen sonuçların oransal olarak yorumlanabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Yazar Katkısı: Bu makale, "Derin Kazılarda 2B ve 3B Yöntemi ile Sonlu Eleman Modellemeleri" başlıklı Yüksek Lisans tezinin geliştirerek 2B ve 3B Analizler yardımı ile kazı-zemin etkileşiminin irdelenmesi amacıyla hazırlanmıştır.

Teşekkür: Yazarlar Prota Mühendislik Proje ve Danışmanlık Hizmetleri A.Ş.'ye destekleri için teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

6. KAYNAKLAR

- [1] G. T.-C. Kung, "Comparison of excavation-induced wall deflection using top-down and bottom-up construction methods in Taipei silty

- clay," *Computers and Geotechnics*, vol. 36, no. 9, pp. 373–385, 2009.
- [2] R. J. Finno and L. S. Bryson, "Response of building adjacent to stiff excavation support system in soft clay," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 16, no. 1, 2002.
- [3] P. Frobenius, C. L. Wu, D. Meyersohn and R. Kulesza, "Deformations during cut-and-cover construction of Muni Metro Turnback Project," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 1, pp. 344–359, 2000.
- [4] B. Y. Shiau, I. W. Wang and C.-Y. Ou, "Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 438–448, 2000.
- [5] C. C. Wang, C.-Y. Ou and H. S. Hsieh, "Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129, no. 2, pp. 146–157, 2003.
- [6] T. C. Chung, N. P. Wej and D. G. Lin, "Quantitative evaluation of corner effect on deformation behavior of multi-strutted deep excavation in Bangkok subsoil," *Geotechnical Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 41–57, 2003.
- [7] D. M. Potts, H. D. John and L. Zdravković, "Modelling of a 3D excavation in finite element analysis," *Geotechnique*, vol. 55, no. 7, pp. 497–513, 2005.
- [8] T. C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, *Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları*, Ankara, Türkiye: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022.
- [9] C. C. Torres, B. Corkum and E. Hoek, "Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition," Toronto, 2002.
- [10] P. A. Vermeer, P. G. Bonnier and T. Schanz, "Formulation and verification of the Hardening-Soil Model," in *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Amsterdam, 1999.
- [11] A. A. Bahadır and M. Onur, "Derin kazı destek sistemi tasarımında zemin modeli seçimi: Bir vaka analizi," in *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [12] Bentley Advancing Infrastructure, *PLAXIS 3D 2024.1 3D 2 Reference Manual*, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/721587598/PLAXIS-3D-2024-1-3D-2-Reference-Manual>

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Deprem Kaynaklı Şev Kayması: 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri Sırasında Adıyaman Gölbaşı Gölü Örneği

Seismically Induced Landslide: The Case of Golbasi Lake in Adiyaman During the February 6th Kahramanmaras Earthquakes

Nazmi Cenik^{1,*}, Seyhan Fırat², Nihat Sinan Işık²

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

² Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 08.05.2025

Kabul / Accepted: 16.05.2025

*Sorumlu Yazar: Nazmi Cenik nazmicenik123@gmail.com

ÖZ: 6 Şubat 2023 tarihinde, merkez üssü Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Ekinözü-Elbistan bölgeleri olan 7.7 ve 7.6 Mw büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. Bu depremler 11 ili etkisi altına almış olup çok sayıda can kaybına ve ciddi yapısal hasarlara yol açmıştır. Depremlerden sonra da özellikle Gölbaşı (Adıyaman) ve Hatay'da olmak üzere sıvılaşmanın gerçekleştiğini ifade eden yüzeye fışkırmış kum konileri, yanal yayılma, şev kayması ve oturmalar gözlenmiştir. Bu makale kapsamında, Adıyaman Gölbaşı ilçesi Gölbaşı gölü kenarında meydana gelen şev kaymasının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar sunulmaktadır. Deprem sonrası göl kenarı çevresinde araştırma çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda şev kayması yaşanan bölgenin jeolojik kesiti oluşturulmuş, zemin parametreleri belirlenmiş ve sıvılaşma değerlendirmeleri yapılmıştır. Daha sonra deprem öncesi durum için limit denge analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en düşük güvenlik katsayısı ($GS = 4.050$) deprem öncesi durumun stabil olması ile uyumlu sonuç vermiştir. Ardından sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin kayma dayanımı parametreleri azaltılarak deprem sonrası durumu temsil eden limit denge analizi gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşan zemin tabakaları için drenajsız rezidüel dayanım parametreleri belirlenmiştir. Analiz sonucuna göre en düşük güvenlik katsayısı ($GS = 0.636$) dikkate alındığında, Kahramanmaraş depremleri sonrasında Gölbaşı (Adıyaman) gölü kenarında şev kayması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kahramanmaraş depremleri, sıvılaşma, CPT, Gölbaşı, Adıyaman

ABSTRACT: On February 6, 2023, two earthquakes of moment magnitudes 7.7 and 7.6 occurred with epicentres in Pazarcık and the Ekinözü-Elbistan region of Kahramanmaraş. These earthquakes affected eleven provinces, causing numerous casualties and severe structural damage. In the aftermath especially in Gölbaşı (Adıyaman) and Hatay liquefaction phenomena were observed, including sand boils, lateral spreading, ground settlements and landslides. This study presents an evaluation of a landslide along the shore of Lake Gölbaşı in the Gölbaşı district of Adıyaman. Field investigations were conducted around the lake immediately after the earthquakes. Based on these investigations, a geological cross-section of the landslide area was prepared, in situ soil parameters were determined, and liquefaction susceptibility assessments were performed. A limit equilibrium analysis for the pre-earthquake condition yielded a minimum factor of safety (FS) of 4.050, indicating stability prior to the earthquakes. For soil layers identified as liquefiable, shear strength parameters were reduced to represent post-earthquake conditions, and a second limit equilibrium analysis was carried out. Residual undrained shear strength parameters were assigned to the liquefied soils. The resulting minimum factor of safety ($FS = 0.636$) indicates that a landslide along the shore of Lake Gölbaşı would be expected following the February 6, 2023 seismic events.

Keywords: Kahramanmaras earthquakes, liquefaction, CPT, Golbasi, Adiyaman

1. GİRİŞ

6 Şubat 2023 tarihinde saat 04:17'de Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde moment büyüklüğü (M_w) 7.7 olan ve ardından 13.24'te Kahramanmaraş'ın Ekinözü – Elbistan bölgesinde moment büyüklüğü (M_w) 7.6 olan iki büyük deprem meydana gelmiştir. 7.7 büyüklüğündeki depremin dışmerkez koordinatı 37,236 K - 37,057 D, odak derinliği 8.6 km; 7.6 büyüklüğündeki depremin dışmerkez koordinatı 37,239 K - 38,089 D, odak derinliği 7.0 km olarak hesaplanmıştır [1]. Şekil 1'de Pazarcık ve Elbistan depremleri ve artçı şok aktivitesi gösterilmektedir.

DAF (Doğu Anadolu Fayı) üzerinde gerçekleşen depremlerin dağılımları incelendiğinde ilk değerlendirmelere göre Pazarcık Merkez üslü depremin kuzeydoğuda Çelikhan Pütürge arasından DAF'ın Erkenek, Gölbaşı, Amanos parçalarını içine alan bir hat ile Ölüdeniz Fay sisteminin kuzeyindeki Narlı parçasını kırdığı; Elbistan dış merkezli diğer depremin ise Çardak Fayı ile Doğanşehir Fay Zonu ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir [2].

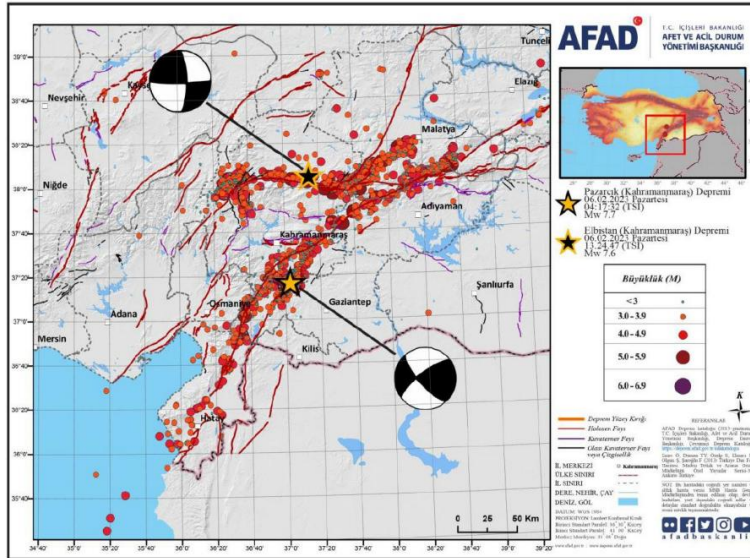
Büyüklüğü 7.7 olan ilk depremde en büyük ivme değeri Hassa (3138) istasyonunda $PGA = 1296.3$

cm/sn² (1.32g); büyüklüğü 7.6 olan ikinci depremde ise en büyük ivme değeri Göksun (4612) istasyonunda $PGA = 635.5$ cm/sn² (0.65g) olarak hesaplanmıştır [2].

Bu depremler Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa illerinde hissedilmiş ve 53537 kişi hayatını kaybederken, 115353 kişi yaralanmıştır [2]. Birçok konut, hastane, yol, köprü, tünel vb., yapıların hasar almasına neden olmuştur.

Yapılarda gözlenen hasarlar; zemin kaynaklı problemler, yumuşak kat etkisi, yapı elemanlarındaki hasarlar, beton dayanımındaki zayıflıklar ve donatı kusurları gibi sebeplerden dolayı meydana gelmiştir [1].

Kahramanmaraş depremleri sonrasında, özellikle suya doygun gevşek olan zeminlerde sıvılaşma etkileri gözlemlenmiştir. Bu sıvılaşma, yapısal hasarlara ve zemin deformasyonlarına yol açmıştır. Alüvyonel ve suya doygun zeminlerin üzerinde bulunan binalarda oturmalar ve yapısal hasarlar meydana gelmiştir.



Şekil 1: Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw: 7.7, Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.6 depremleri ve artçı şok aktivitesi (06.02.2023) [2].

Ayrıca, bu makalenin çalışma alanı olan Adıyaman Gölbaşı ilçesinde kum kaynaması, yanal yayılma, oturma, taşıma gücü yenilmesi ve Gölbaşı gölü çevresinde de zemin sıvılaşmasından kaynaklı göre

doğru hareketler gözlemlenmiştir [3, 4]. Gölbaşı ilçesindeki zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, CPT ve SPT verileri kullanarak değerlendirilmiştir [5].

1976 Haicheng ve Tangshan depremlerine kadar sadece kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşabildiği düşünülüyordu. Ancak bu depremler sonrasında ince taneli zeminler üzerinde de sıvılaşma ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [6, 7]. Adıyaman Gölbaşı ilçesi ve Hatay'dan alınmış olan sıvılaşmış numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre plastisite indislerinin (PI) 16 – 23 arasında olduğu, Hatay'dan alınan numunelerin ise plastisite indislerinin 30'dan yüksek olduğu belirtilmiştir [8].

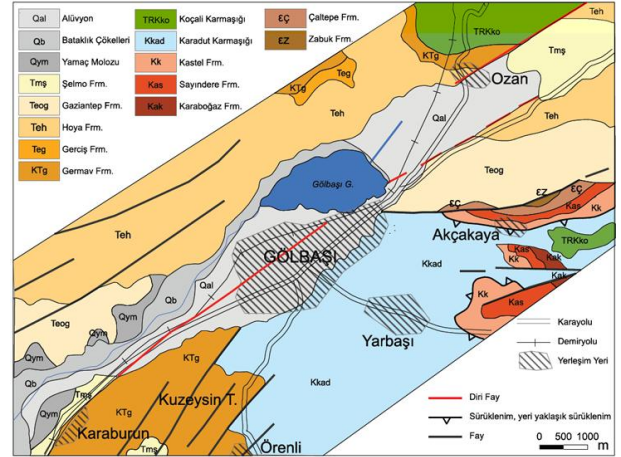
Bu makale, Adıyaman Gölbaşı ilçesi Gölbaşı gölü kenarında gözlemlenen sismik kökenli bir şev kaymasını konu almaktadır. Bu kapsamda, arazi çalışmaları ve arazi içi indeks deneyleri Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Koni Penetrasyon Testi (CPT) sonuçları sunulmuştur. Araştırma çalışmalarının sonuçları, zemin parametrelerinin belirlenmesi, jeolojik kesitin oluşturulması ve sıvılaşma değerlendirmeleri yapılması için kullanılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen veriler yardımı ile limit denge analizleri yapılmıştır. Son olarak, gözlemlenen şev kayması mekanizması ile analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Benzer çalışmada, Kocaeli (İzmit) depremi sonrası Değirmendere Burnu'ndaki heyelanın sıvılaşma ve deprem kuvvetleriyle oluştuğu belirtilmiştir [9].

2. JEOLojİ

Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Neotetis'in kapanmasının sonucu olarak Güneydoğu Anadolu Orojenik kuşağı, Arap Platformu ve Bitlis Zagros Sutr zonuyla ilişkili melanj ve nap grupları olmak üzere güneyden kuzeye doğru uzanan ve farklı tektonik birlikleri barındıran Doğu Toroslar orojenik kuşağı içerisinde yer almaktadır [10, 11]. Bölgedeki en önemli Neotektonizma unsurları çalışma alanının kuzeybatısında yer alan Doğu Anadolu Fayı (DAF) ve güneybatısında yer alan Ölüdeniz Fayı'dır [12, 13].

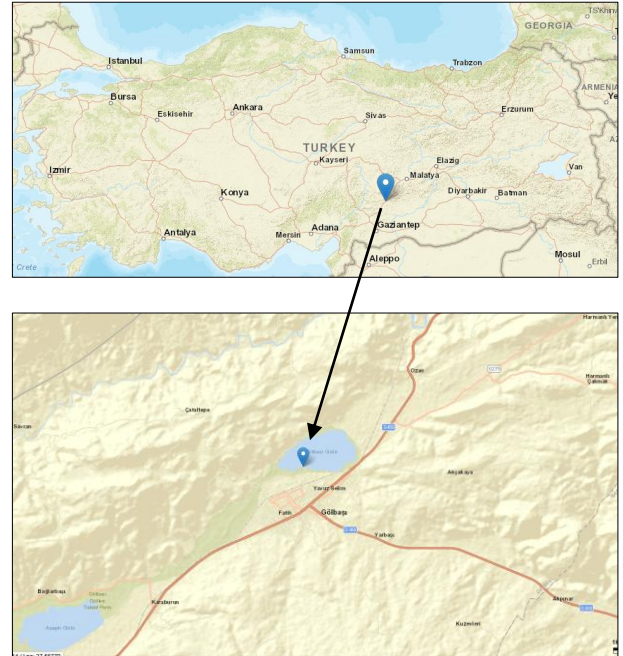
Çalışma alanında jeolojik birimler Jura-Kretase yaşlı Karadut Karmaşığı (Kkad), Paleosen yaşlı Germav Formasyonu (KTg), Eosen yaşlı Hoya Formasyonu (Teh), Eosen-Oligosen yaşlı Gaziantep Formasyonu (Teog) ve Kuvaterner yaşlı çökeller (Alüvyon ve Bataklık çökelleri) olarak sıralanmaktadır [14].



Şekil 2: Çalışma alanı genel jeoloji haritası [14].

3. VAKA ANALİZİ

Gölbaşı gölü, Gölbaşı ilçesinin kuzey doğusunda ve Türkiye'nin güneydoğusunda yer almaktadır (37°47'39.93"K, 37°38'57.59"D). Gölün yüzey alanı yaklaşık 2250 km² ve rakımı 885 metredir. Gölün en derin noktası, yüzeyden 22.0 metre derinlikte ölçülmüştür [15, 16]. Göl kenarı ile göl ortası arasındaki yatay mesafe 600-650 metre arasındadır. Bu mesafe boyunca, göl tabanının ortalama eğimi yaklaşık 2° olarak belirlenmiştir.



Şekil 3: Yer bulduru haritası (Google Earth).

Kahramanmaraş depremleri sonrasında, Gölbaşı (Adıyaman) gölü kenarında depremle tetiklenen bir şev kayması meydana gelmiştir. Şev kayması

kesimine ait deprem öncesi ve sonrası Google Earth görüntüleri Şekil 4’te belirtilmiştir.



Şekil 4: Şev kayması kesimine ait deprem öncesi ve sonrası görüntüler (Google Earth).

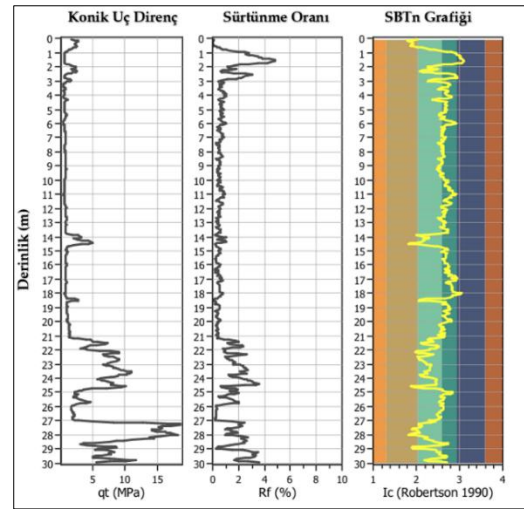
4. ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI

Gölbaşı gölü kenarında, şev kayması yaşanan kesime yakın bölgede 1 adet CPT (CPT-108) ve 1 adet SPT (SK-22) deneyi yapılmıştır.

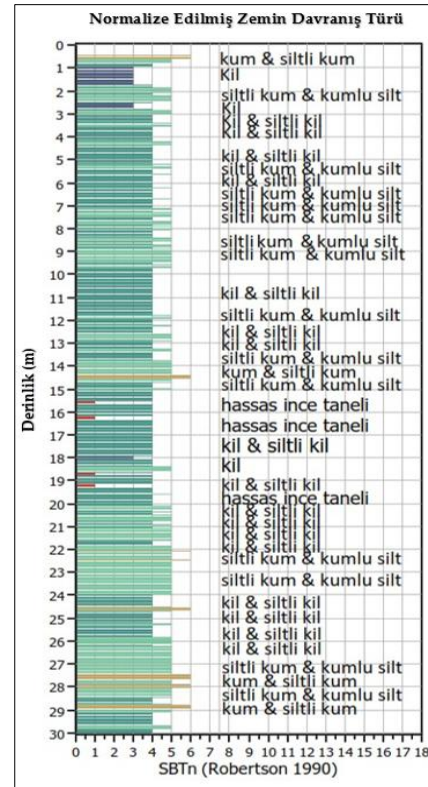
4.1 CPT (Koni Penetrasyon Testi)

Koni penetrasyon deneyi, konik şekle sahip bir ucun kuyu açmaya gerek duyulmadan, hidrolik bir itme kuvvetiyle zemine sabit bir hızla itilmesi için gerekli kuvvetin sürekli olarak ölçülmesini kapsamaktadır. Koni penetrasyon deneyi esnasında numune alınamamaktadır. Ancak SPT deneyine kıyasla daha sık (5 cm aralıklarla) ölçüm yaptığı için, ince tabakaların tespit edebilmesine olanak sağlamakta ve hassas ölçümler gerçekleştirebilmektedir. CPT verileri ile yorumlama yapılmadan önce gerekli düzeltmelerin (Boşluk suyu basıncı etkisi, Filtre lokasyonu etkisi ve Sıcaklık etkisi) uygulanması gerekmektedir [17]. Şekil 5’te CPT-108’e ait ölçüm sonuçları belirtilmiştir. CPT ile numune alınamadığından zemin sınıfının belirlenmesi için Robertson [18] tarafından önerilen zemin davranış tipi katsayısına göre zemin sınıfları belirlenmiştir. Bu sınıflandırma Şekil 6’da sunulmuştur. Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, yüzeyden itibaren ilk 10.0 metre

derinliğe kadar olan kesimde siltli kum ve kumlu silt türü zeminlerin baskın olduğu görülmektedir.

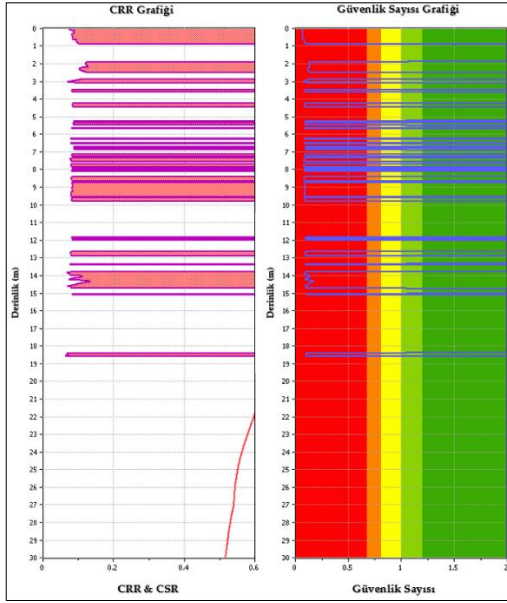


Şekil 5: CPT-108’e ait ölçüm sonuçları



Şekil 6: CPT-108’e ait zemin sınıfları

Ayrıca 0.0 – 10.0m aralığında konik uç direnci değerlerinin 0.0 – 3.0 MPa arasında değişmesi, söz konusu birimlerin görece zayıf ve gevşek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu tarz gevşek zeminlerin yeraltı su seviyesi altında bulunması durumunda, sıvılaşma potansiyeli bulunmaktadır. Sıvılaşma analizleri ise Robertson ve Wride [19] tarafından önerilen çalışmaya göre yapılmıştır.



Şekil 7: CPT-108 sıvılaşma analiz sonucu grafiği.

Sıvılaşma analiz sonucu incelendiğinde, göl kenarına yakın konumda bulunan CPT-108 sondajının sıvılaşmaya karşı hassas olduğu görülmektedir. Ayrıca grafik incelendiğinde 0.0 – 10.0 metre aralığında ağırlıklı olarak sıvılaşma potansiyeline sahip zemin tabakalarının bulunduğu belirlenmiştir.

4.2 SPT (Standart Penetrasyon Testi)

SPT, standart boyutlardaki tüpün 63.5 kg ağırlığındaki şahmerdanın 76.2 cm'den serbest düşmesiyle zemine çakılması esasına dayanır. Deney bir sondaj deliği açılarak gerçekleştirilir. SPT tüpü tijlere bağlanıp zemine indirilir ve her biri 15 cm olmak üzere üç aşamalı ilerleme adımları işaretlenir. Her 15 cm'lik penetrasyon için darbe sayıları kaydedilir. İlk 15 cm'ye ait darbe sayıları dikkate alınmaz. İkinci ve üçüncü 15 cm'lik aşamalardaki darbe sayıları toplanarak SPT-N değeri elde edilir [17]. Deney düzeneğindeki farklılıklar, ölçülen SPT-N değerlerini etkilemektedir. Bu nedenle, SPT-N değerleri üzerinde belli düzeltmeler yapılması gerekmektedir. Yapılan düzeltmeler sonucunda elde edilen değerler kullanılarak, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için literatürde önerilen çeşitli yaklaşımlarla kayma dayanımı parametreleri belirlenebilir. Ayrıca, bu verilerden yararlanılarak sıvılaşma değerlendirmeleri de yapılabilmektedir. SK-22 sondajına ait SPT vuruş sayıları ve laboratuvar deney sonuçları Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1: SK-22 sondajına ait SPT vuruş sayıları.

Sondaj No =		SK-22					
YASS =		0.00 m					
No	Derinlik (m)	Zemin Tipi	γ (kN/m ³)	Birim	σ_v (kPa)	σ'_v (kPa)	SPT-N
SPT-1	1.50	CIH	18.0	Çakıllı, Siltli KUM (Altüvyon)	27	27	6
UD-1	2.50	saCIM	18.0		45	45	-
SPT-2	3.00		18.0		54	54	6
SPT-3	4.50	CIH	18.0		81	81	5
UD-2	5.50	CIH	18.0		99	99	-
SPT-4	6.00		18.0	Siltli KİL (Altüvyon)	108	108	6
SPT-5	7.50		18.0		135	135	5
UD-3	8.50	SiM	18.0		153	153	-
SPT-6	9.00		18.0	Siltli KİL (Altüvyon)	162	162	2
SPT-7	10.50	SiM	18.0		189	189	2
SPT-8	12.00	SiH	18.0	Killi KUM (Altüvyon)	216	216	10
SPT-9	13.50	clSa	18.0	Kumlu SİLT (Altüvyon)	243	243	17
SPT-10	15.00		18.0		270	270	7
SPT-11	16.50		18.0	Çakıllı, Siltli KUM (Altüvyon)	297	297	7
SPT-12	18.00		18.0		324	324	5
SPT-13	19.50	grclSa	18.0		351	351	22
SPT-14	21.00		18.0		378	378	37
SPT-15	22.50		18.0		405	405	26
SPT-16	24.00	grclSa	18.0	Çakıllı, Siltli KUM (Altüvyon)	432	432	14
SPT-17	25.50		18.0		459	459	37
SPT-18	27.00		18.0		486	486	41
SPT-19	28.50	grclSa	18.0		513	513	56
SPT-20	30.00		18.0		540	540	30

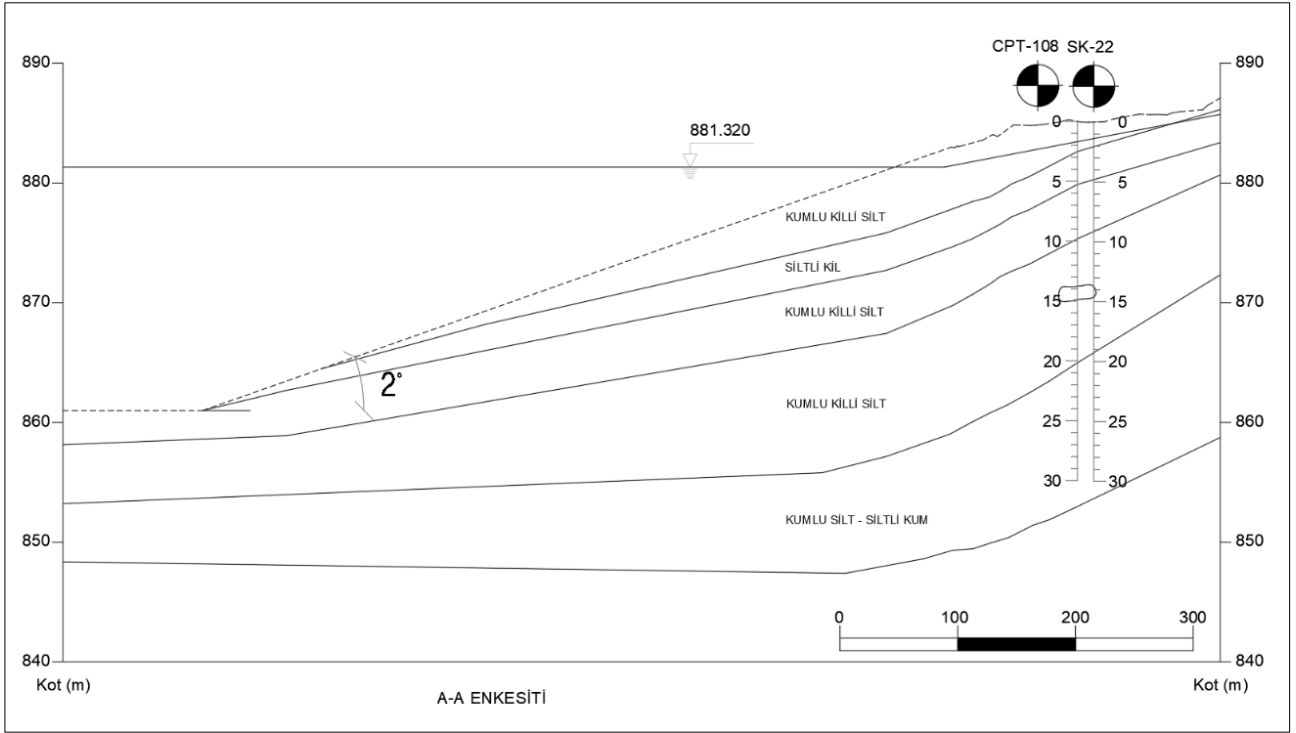
Tablo 2: SK-22 laboratuvar deney sonuçları.

Sondaj No =		SK-22		Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini		Likit Limit -Plastik Limit Tayini			Su İçeriği
YASS =		0.00 m							
No	Derinlik (m)	Zemin Tipi	2 mm Kalan (%)	0.063m Geçen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	wc (%)	
SPT-1	1.50	CIH	6.3	88.4	55.3	27.1	28.2	34.1	
UD-1	2.50	saCIM	4.5	61.1	37.4	22.7	14.7	25.6	
SPT-2	3.00								
SPT-3	4.50	CIH	1.4	92.4	52.5	28.0	24.5	38.5	
UD-2	5.50	CIH	0.0	89.8	58.3	28.6	29.7	36.0	
SPT-4	6.00								
SPT-5	7.50								
UD-3	8.50	SiM	0.0	96.8	45.2	31.8	13.4	51.1	
SPT-6	9.00								
SPT-7	10.50	SiM	2.4	90.8	47.1	29.8	17.3	50.2	
SPT-8	12.00	SiH	0.0	94.9	65.9	35.3	30.6	63.3	
SPT-9	13.50	clSa	13.8	34.1	39.8	22.2	17.6	26.6	
SPT-10	15.00								
SPT-11	16.50								
SPT-12	18.00								
SPT-13	19.50	grclSa	17.0	31.4	37.7	21.6	16.1	21.0	
SPT-14	21.00								
SPT-15	22.50								
SPT-16	24.00	grclSa	18.4	35.8	36.6	21.0	15.6	27.7	
SPT-17	25.50								
SPT-18	27.00								
SPT-19	28.50	grclSa	16.3	34.4	37.1	21.5	15.6	14.8	
SPT-20	30.00								

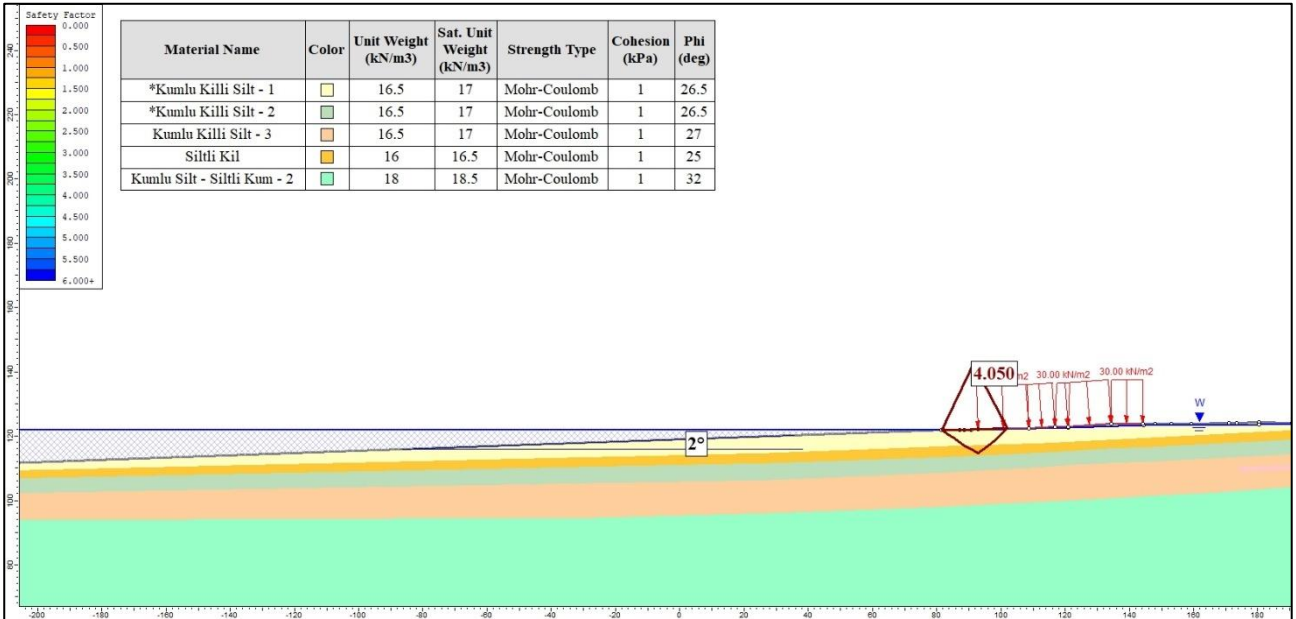
5. LİMİT DENGİ ANALİZLERİ

Göl kenarında eski Gölbaşı Meslek Yüksek Okulu binası bulunmaktaydı. Ancak Kahramanmaraş depremleri sonrasında bina sular altında kalmıştır. Şekil 4, sahanın deprem öncesi ve sonrası durumunu göstermektedir. Meydana gelen zemin göçmesi sismik olarak tetiklenmiş bir yamaç stabilitesizliği ve zeminlerin sıvılaşmasına atfedilmiştir.

Göl tabanı eğimi 2° olarak belirlenmiştir. Sahanın yüzey altı zemin koşulları, Şekil 8 ve 9'da



Şekil 9: A-A enkesiti.



Şekil 10: Deprem öncesi duruma ait limit denge analizi sonucu.

Deprem anında zeminler ani tekrarlı yüklere maruz kalır. Bu sırada, zemin içinde bulunan suyun uzaklaşması için yeterli bir zaman bulunmaz. Bundan dolayı sıvılaştıran zemin drenajsız koşullarda davranış sergiler.

Seed ve Harder [20], drenajsız rezidüel kayma dayanımı (S_r) ile SPT değeri arasındaki ilişkiyi

tanımlayan ampirik bir korelasyon önermiştir. Bu korelasyon yardımı ile sıvılaştıran tabakalar için drenajsız rezidüel kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir.

Sıvılaştıran ilk tabaka için ortalama $(N_1)_{60}$ değeri 7, ikinci tabaka için ortalama $(N_1)_{60}$ değeri 5 olarak hesaplanmıştır. İnce tane oranları ise ortalama %83

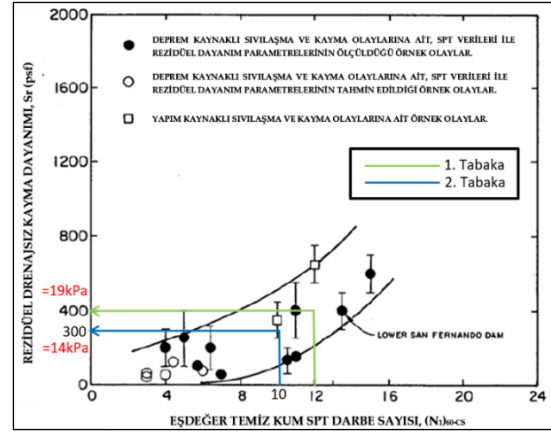
olup $\Delta(N_1)_{60}$ değeri 5 olarak belirlenmiştir. Denklem 1’de belirtilen eşitlik kullanıldığında, ilk tabaka için $(N_1)_{60-CS}$ değeri 12 ikinci tabaka için $(N_1)_{60-CS}$ değeri 10 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3: $\Delta(N_1)_{60}$ – İnce tane oranı arasındaki ilişki [21].

İnce Tane İçeriği (%)	SPT Düzeltmesi, $\Delta(N_1)_{60}$ (darbe sayısı / ft)
0	0
10	1
25	2
50	4
75	5

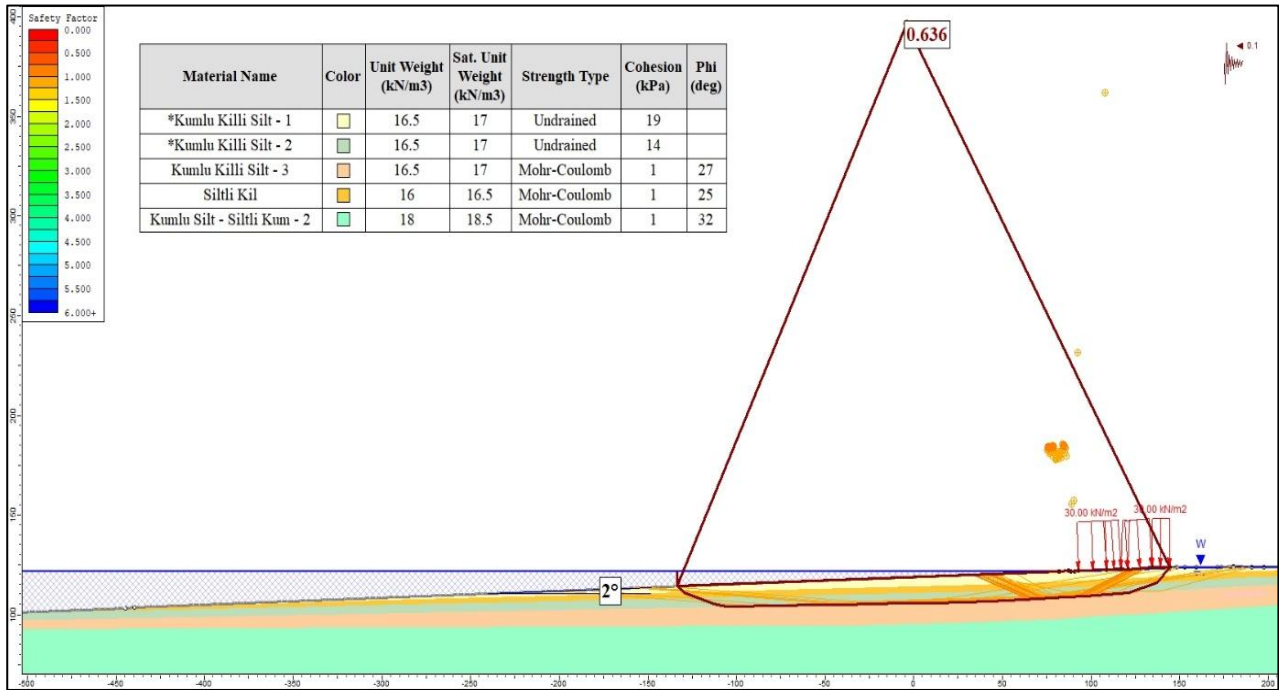
$$(N_1)_{60-CS} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (1)$$

Elde edilen $(N_1)_{60-CS}$ değerleri kullanılarak, Şekil 11’deki abakta alt ve üst sınır eğrilerinin ortasından drenajsız rezidüel kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Buna göre, ilk tabaka için drenajsız rezidüel kayma dayanımı 19kPa, ikinci tabaka için ise 14kPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11: $S_r - (N_1)_{60-CS}$ arasındaki ilişki [20].

Deprem sonrası durum için kullanılan parametreler Şekil 12’de gösterilmiştir. Analiz sonucuna göre en düşük güvenlik katsayısı ($GS = 0.636$) göz önüne alındığında, Kahramanmaraş depremleri sonrası göl kenarında meydana gelen şev kayması ile örtüşmekte olup, bu durum Gölbaşı Meslek Yüksek Okulu binasının sular altında kalmasıyla da doğrulanmaktadır. Şekil 4 ilgili alanın deprem öncesi ve sonrası durumunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 12: Deprem sonrası duruma ait limit denge analizi sonucu.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, Adıyaman Gölbaşı ilçesi Gölbaşı gölü kenarında meydana gelen sismik etki altında kumlu-siltli zeminlerin sıvılaşması ve göle doğru meydana gelen şev kaymasını incelemiştir.

Suya doymuş gevşek olan zeminlerde sismik etki altında aşırı boşluk suyu basıncı artışı gerçekleşir. Bu durum gevşek zeminlerde mukavemet kayıplarına yol açar.

Gölbaşı gölü çevresinde yapılan araştırma çalışmaları sonuçları değerlendirildiğinde, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin bulunduğu belirlenmiştir. Ardından jeolojik kesit oluşturulmuş ve zemin parametreleri belirlenmiştir. Oluşturulan jeolojik kesitler ve zemin parametreleri kullanılarak deprem öncesi durum için limit denge analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucuna göre en düşük güvenlik katsayısı ($GS = 4.050$) deprem öncesi durumun stabil olması ile uyumlu sonuç vermiştir. Daha sonra deprem sonrası durum için limit denge analizi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabakalarının sıvılaştıkları ve mukavemetlerinde azalma meydana geldiği dikkate alınmıştır. Ayrıca bu zeminler için drenajsız rezidüel dayanım parametreleri belirlenmiştir. Analiz sonucuna göre en düşük güvenlik sayısı 0.636 olarak hesaplanmıştır. Bu durum göz önüne alındığında göl tabanında deprem sonrası şev kaymasının gerçekleştiği ve eski Gölbaşı Meslek Yüksek Okulu binasının sular altında kaldığı sonucuna varılmıştır.

Göl kenarlarında doymuş ve gevşek zeminler ile karşılaşılma ihtimali oldukça yüksektir. Dolayısıyla göl kenarına yapılması planlanan yapılar için önce detaylı araştırma çalışmaları yapılması gerekmektedir.

Daha sonra bu araştırma çalışmaları kullanılarak gerekli analizlerin (sıvılaşma, oturma, stabilite analizi vb.) yapılması ve ihtiyaç doğrultusunda zemin iyileştirme uygulamalarının yapılması gerekmektedir. Eğer güvenli bir çözüm elde edilemiyorsa bu tarz kesimlerde yapılaşmadan kaçınılması önerilmektedir.

Yazar Katkısı: Bu makale, Prof. Dr. Seyhan FIRAT ve Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK'ın saha çalışmaları ve Nazmi CENİK 'in "6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde Gölbaşı Gölünde (Adıyaman/Gölbaşı) Depremle Tetiklenen Şev Kayması" başlıklı Yüksek Lisans tez çalışmasının katkıları ile hazırlanmıştır.

Teşekkür: Yazarlar Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile GeoDestek Zamar Zemin Araştırma Proje Müş. Yaz. Lab. Bilg. Sis. Enr. İnş. Tur. İth. İhr. Tic. ve San. Ltd. Şti.'ne yapılan saha çalışmaları için teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması: Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

7. KAYNAKLAR

- [1] T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2023, "06 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık ve Elbistan) Depremleri Saha Çalışmaları Ön Değerlendirme Raporu," Ankara. [Çevrimiçi]. Erişim: deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Arazi_Onrapor_28022023_surum1_revize.pdf.
- [2] AFAD, 2023, "06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw: 7.7 – Mw: 7.6) Depremleri Raporu," 140 s.
- [3] K. O. Cetin, D. Moug, B. Soylemez, B. U. Ayhan, M. Zarzour, A. A. Suhaily, B. Akil, B. Unutmaz, S. Firat, E. Tekin, E. Cakir, D. Frost, J. Macedo, J. Bray, R. Moss, P. Bassal, A. Gurbuz, N. S. Işık, M. Akin, A. Sahin ve E. Duman, "Ground failures and foundation performances in Adıyaman–Gölbaşı following the 6 February 2023 Kahramanmaraş–Türkiye Earthquake Sequence," *Earthquake Spectra*, vol. 41, no. 1, pp. 249-289, 2025.
- [4] A. N. T. Gökdoğan, N. S. Işık ve S. Fırat, "6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde Zemin Davranışları: Vaka Analizi," *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 48-57, 2024.
- [5] H. S. Tezer, S. Fırat, N. S. Işık, B. Unutmaz, A. Gürbüz, K. Ö. Çetin, E. Tekin, N. Kaymakçı, A. Büyüksaraç, B. Uzel, A. Yunatçı, H. T. Bilge ve E. Altıncı, "Gölbaşı (Adıyaman) zeminlerinin CPT ve SPT tabanlı sıvılaşma analizlerinin değerlendirilmesi," *Zemin Mekaniği ve*

- Geoteknik Mühendisliği Ondokuzuncu Ulusal Konferansı, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2024.
- [6] J. D. Bray ve R. B. Sancio, "Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 132, no.9, pp. 1165-1177, 2006.
- [7] A. Önalp, E. Bol, ve N. Ural, "Siltlerin sıvılaştırılabilirliği: Adapazarı kriterinin geliştirilmesi," *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2006.
- [8] K. O. Cetin, B. Soylemez, H. Guzel ve E. Cakir, "Soil liquefaction sites following the February 6, 2023, Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 1-24, 2024.
- [9] K. O. Cetin, N. S. Isik ve B. Unutmaz, "Seismically induced landslide at Degirmendere Nose, Izmit Bay during Kocaeli (Izmit)-Turkey earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 24, no. 3, pp.189-197, 2004.
- [10] Y. Yılmaz, "New evidence and model on the evolution of the southeast Anatolian orogen," *Geological Society of America Bulletin*, vol. 105 no. 2, pp. 251-271, 1993.
- [11] C. Yalçın ve A. Kop, "Kaleköy-Hombur (Çağlayanerit-Kahramanmaraş) civarının tektono-stratigrafik özellikleri," *Geosound*, vol. 55, no. 1, pp. 37-60, 2022.
- [12] D. McKenzie, "The East Anatolian Fault: a major structure in eastern Turkey," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 29, no.1, pp. 189-193, 1976.
- [13] R. W. Girdler, "The Dead Sea transform fault system," *Tectonophysics*, 180(1), 1-13, 1990.
- [14] M. Çoban ve H. Dalkılıç, "1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları," *Şanlıurfa-M39 paftası*, (262), 2018.
- [15] A. K. Cetin, B. Sen ve V. Yildirim, "Seasonal variations of epipelagic diatoms in Gölbaşı lake with relation to physical-chemical variables," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 11, no. 6, pp. 306-311, 2002.
- [16] G. Ekingen, Y. Şahin ve Y. Özdemir, "Gölbaşı (Adıyaman) gölünün limnolojik etüdü (Proje No: VHAG-348)," *Fırat Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Elazığ*, 2022.
- [17] A. O. Erol ve Z. Çekinmez, "Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri," *Yüksel Proje Yayınları*, Ankara, 2014.
- [18] P. K. Robertson, "Soil classification using the cone penetration test," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 151-158, 1990.
- [19] P. K. Robertson ve C. E. Wride, "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 442-459, 1998.
- [20] R. B. Seed ve L. F. Harder, "SPT-based analysis of cyclic pore pressure and undrained residual soil strength," *Proc. H.Boldon Seed Memorial Symposium*, University of California, Berkeley vol. 2, pp. 351-376, 1990.
- [21] H. B. Seed, "Design problems in soil liquefaction," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 113, no. 8, pp. 827-845, 1987.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

İzmit Körfezi Güncel Ekstrem Dalga İklimi Analizi Ve Yakın Kıyı Dalga Transformasyonu Modellemesi

Izmit Bay Recent Extreme Wave Climate Analysis and Nearshore Wave Transformation Modelling

Yavuz Selim Güçlü¹, Selman Baysal^{2*}, Veysel Şadan Özgür Kırca¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye.

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 17020, Çanakkale, Türkiye.

Geliş / Received: 11.05.2025

Kabul / Accepted: 17.05.2025

*Sorumlu Yazar: Selman Baysal selmanbaysal@comu.edu.tr

ÖZ: Rüzgâr dalgaları kıyı yapılarının tasarımı ve işlevselliği açısından en başta gelen çevresel faktörlerdir. Kıyı yapılarının yapısal tasarımlarında belirleyici kuvvetleri ortaya çıkarmalarının yanında, özellikle düzensiz ve asimetrik yapıları nedeniyle deniz tabanındaki katı maddeyi hareketlendirerek kumlanma ve taban aşınması gibi olumsuzluklara neden olarak kıyı tesislerinin işlevselliklerinin azalmasına yol açabilmektedirler. Bu çalışmada İzmit Körfezi'nde planlanan veya mevcut kıyı ve deniz yapılarının tasarım ve analizine taban oluşturması amacıyla, açık deniz ve yakın kıyı ekstrem dalga koşullarının belirlenmesine yönelik sayısal modelleme yapılmıştır. Çalışmada ayrıntılarının tartışıldığı üzere, küresel iklim değişikliği nedeniyle şiddetlenmekte olan rüzgâr ve dalga ikliminde güncel durumu yansıtabilmek amacıyla 1999-2023 yılları arasındaki 25 yıllık saatlik rüzgâr verileri kullanılarak yapılan rüzgâr iklimi analizleri sonucunda, Gumbel dağılımı ile belirlenen 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem rüzgâr hızı kuzey-kuzeydoğu yönünden 31,0 m/s olarak elde edilmiştir. Bu veriler, Marmara Denizi'nden gelen batı yönlü dalgalarla birlikte İzmit Körfezi'nde oluşabilecek açık deniz belirgin dalga yüksekliği ($H_s = 4,43$ m) ve pik dalga periyodu ($T_p = 6,7$ s) gibi tasarım parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar uygulama projeleri için yapılan ayrıntılı analiz sonuçları ile iyi bir uyum içindedir. Hazırlanan dijital batimetri verileriyle desteklenen Körfez modeli ile dokuz farklı yön için yapılan modellemelerle yakın kıyı dalga özelliklerini belirleyen dalga dönüşümü (transformasyonu) gerçekleştirilerek, beklenebileceği üzere batı yönlü dalgaların körfezde en etkili dalgalar olduğu ortaya konulmuştur. Buna karşın doğu yönlü dalgaların, sınırlı fec mesafesi nedeniyle daha düşük enerjiye sahip olacağı görülmüştür. Çalışmada alansal dağılım olarak sunulan bulguların İzmit Körfezi'nde yapılacak kıyı yapıları tasarım ve analizleri için uygulamalara bir altlık oluşturma noktasında faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dalga iklimi, ekstrem rüzgâr hızı, dalga transformasyonu, İzmit Körfezi, iklim değişikliği

ABSTRACT: Wind-generated waves are among the primary environmental factors in the design and functionality of coastal structures. In addition to exerting determining forces on the structural design of coastal facilities, their irregular and asymmetric characteristics can mobilize sediment on the seabed, leading to adverse effects such as sedimentation and seabed erosion (scour), which in turn can reduce the functionality of coastal infrastructure. In this study, numerical modeling was conducted to determine offshore and nearshore extreme wave conditions in order to provide a basis for the design and analysis of planned or existing coastal and marine structures in İzmit Bay. To reflect more recent conditions, wind climate analyses were performed using 25 years of hourly wind data from 1999 to 2023. Based on these analyses, the 100-year return period extreme wind speed was determined to be 31.0 m/s from the north-northeast direction using the Gumbel distribution. These data, together with waves approaching from the west through the Sea of Marmara, were used to calculate design parameters such as the significant offshore wave height ($H_s = 4.43$ m) and peak wave period ($T_p = 6.7$ s) that may occur in İzmit Bay. The results obtained show good agreement with detailed analysis results from applied projects. Wave transformation modeling was conducted using a Gulf model supported by digital bathymetry data, considering nine different directions to determine nearshore wave characteristics. As expected, waves from the west were found to be the most effective within the bay. In contrast, waves from the east were observed

to have lower energy due to their limited fetch distance. It is concluded that the spatial distribution findings presented in the study will provide a useful foundation for practitioners involved in the design and analysis of coastal structures in İzmit Bay.

Keywords: Wave climate, extreme wind velocity, wave transformation, İzmit Bay, climate change

1. GİRİŞ

Deniz ve kıyı yapılarının tasarımında, karada inşa edilen yapılardan farklı olarak, oldukça karmaşık bir fiziğe sahip olan dalgaların etkisi büyük önem arz etmektedir. Düzensiz ekstrem rüzgâr dalgaları gerek yüksek momentum ve orbital hızları gerekse barındırdıkları belirsizlikler ve asimetrik yapıları sebebiyle kıyı yapılarının yapısal bütünlüklerini olduğu kadar katı madde taşınımı, taban aşınması ve kumlanma gibi kıyı hidrodinamiği süreçlerini, dolayısıyla kıyı yapılarının işlevselliklerini de olumsuz anlamda etkileme potansiyeline sahiptirler [1]. Bu sebeple tasarım dalgaları, denizde yapılan mühendislik projelerinde belirlenmesi en kritik olan ve deniz yapılarını en çok etkileyen olgulardan biridir [2].

Denizlerde görülen rüzgâr dalgalarının matematiksel olarak tanımlanmaları ancak 19. yüzyıl başında mümkün olmuştur. Gerstner [3], ilk kez, derin denizde trokoidal dalgalar (Gerstner dalgaları) için matematiksel bir çözüm ortaya koymuştur. Airy [4], doğrusal dalga teorisini (linear wave theory) geliştirerek küçük genlikli dalgaların mühendislik projelerinde pratik hesaplamayı kolaylaştıran doğrusal analizine olanak sağlamıştır. Stokes [5], Stokes teorisi olarak bilinen yüksek mertebeli sonlu genlikli dalga teorisini geliştirmiştir. Böylece doğrusal olmayan etkileşimler de dikkate alınarak mühendislik hesaplamalarında daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Öte yandan Russell [6], gerçekleştirdiği kanal deneyleri sırasında gözlemlediği tekil bir dalga hareketi boyunca hızını ve şeklini koruduğunu raporlayarak soliter dalga (solitary wave) konseptinin temelini atmış, bu sayede özellikle uzun dalgalar ve kırılmak üzere olan dalgaları daha iyi temsil eden bir model geliştirilmiştir.

Tüm bu gelişmelerin yanı sıra, özellikle deniz inşaat projelerinde analizi elzem olan düzensiz dalgalara yönelik olarak, 20. yüzyılın ortalarından itibaren

dalga tahmin yöntemleri ile ilgili önemli çalışmalar yapılmıştır. Sverdrup ve Munk [7], günümüzde en çok kullanılan basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinden biri olan S-M-B yöntemini geliştirmişlerdir. Dalgaların düzensizliği göz önüne alınarak P-N-J yöntemi olarak bilinen ve rüzgâr dalgaları oluşum ve gelişim sürecini ifade eden dalga spektrumu tanımı yapılmış ve bu sayede düzensiz dalgaların frekans tanım kümesinde ölçekler arasındaki enerji dağılımları net biçimde temsil edilebilmiştir [8]. Tam gelişmiş deniz durumu için geliştirilen ve derin denizlerde iyi sonuçlar veren Pierson-Moskowitz (PM) spektrumu [9] ile birlikte kısa feç mesafeli gelişmekte olan deniz durumu için özellikle Kuzey Denizi için geliştirilmiş olan JONSWAP spektrumu da [10] en çok kullanılan spektrum türleridir. Sınırlı feç koşullarında tam gelişmiş rüzgâr dalgası spektrumu için ise Bretschneider-Mitsuyasu spektrumu [11,12] birçok çalışmada tercih edilmektedir.

Dalgalar, oluşum mekanizmalarına, su derinliğine ve periyotlarına göre sınıflandırılmaktadır. Rüzgârların deniz yüzeyi ile etkileşimi sonucu enerji aktarımı ile oluşan ve yukarıda bahsedildiği üzere en yaygın rüzgâr türü olan rüzgâr dalgaları, deniz ve kıyı mühendisliği, oşinografi, iklim bilimi ve yenilenebilir enerji üretimi gibi birçok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Deniz ve kıyı yapılarının tasarımı, katı madde taşınımının belirlenmesi ve kumlanma analizi, fırtına ve ekstrem hava olaylarının incelenmesi, kıyı bölgelerindeki planlama çalışmaları gibi mühendislik çalışmalarında dalga ikliminin doğru bir şekilde belirlenmesi tasarım güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr verileri ile açık denizde oluşan rüzgâr dalgalarının tahmini ve bu dalgaların kıyı bölgelerine kadar geçirdikleri transformasyon süreçlerinin modellenmesi çalışmalarını içeren dalga iklimi analizi, uzun dönemli meteorolojik verilerin istatistiksel analizine ve dalga üretim mekanizmalarının fiziksel modellenmesine dayanmaktadır. Açık

denizdeki rüzgâr hızları, esme süreleri ve fec uzunlukları, dalga yükseklikleri ve periyotlarının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu noktada yukarıda bahsedilen S-M-B yöntemi gibi basitleştirilmiş ampirik yöntemlerin ötesinde, rüzgâr hızlarının deniz yüzeyindeki alansal ve yönsel dağılımı ile zaman değişimini de dikkate alacak şekilde rüzgâr enerjisinin dalga oluşumuna aktarımını ve denizde ilerlemesini “enerjinin korunumu ilkesi” esasına bağlı olarak girilen bir hesap ağı üzerinde sayısal olarak çözümleyebilen, bu sayede ilgili hesap ağının her noktasında dalgaların yönsel spektrumlarını ayrıntılı olarak modelleyebilen spektral modeller son 20 yıllık süreçte araştırma ve mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üçüncü nesil (3rd generation) spektral dalga modelleri dalga oluşumu, gelişimi, rüzgâr-dalga etkileşimi (whitcapping, vb.), dalga-taban etkileşimi (sapma, kırılma, sürtünme, vb.), dalga-dalga etkileşimi (frekanslar arası ve yönler arası etkileşim) gibi süreçleri lâyıkıyla modelleyebildikleri için günümüzde en çok tercih edilen sayısal dalga modelleme yöntemleridir. Ticari (MIKE-SW, CMS-Wave) veya açık kaynak kodlu (TOMAWAC, WAVE-WATCH, SWAN, vb.) birçok üçüncü nesil spektral dalga modeli bulunmakta olup, bu çalışmada da en yaygın kullanımı olan ticari dalga modellerinden biri olan CMS-Wave kullanılmıştır. Detayları bölüm 3’te verilen CMS-Wave modeli, birçok bilimsel çalışmada kullanılarak doğrulanmış bir modeldir [13-15].

Ekstrem dalga tahminleri, genellikle belirli bir dönüş aralığına (örneğin 50 veya 100 yıl) sahip maksimum dalga yüksekliklerine göre yapısal tasarımı gerçekleştirilen deniz ve kıyı yapılarında kullanılmakta olup [16], aynı zamanda kıyılarda katı madde hareketinde, kıyı taşkın risklerinin belirlenmesinde ve gemi tasarımı ve deniz ulaşımı gibi alanlarda güvenilir, sürdürülebilir ve ekonomik açık deniz ve kıyı mühendisliği açısından da büyük öneme sahiptir [17]. Nadir ve görece kısa süreli gerçekleşen ancak yıkıcı etkileri olan büyük dalgaların oluşma olasılığının belirlenmesi için yapılan ekstrem dalga tahminleri [18], özellikle küresel ısınmayla birlikte fırtına şiddetlerinin artması sonucunda uzun süreli iklim modelleri, deniz seviyesi ve dalga rejimi değişikliklerini tahmin etmek için sıklıkla kullanılmaktadır [19].

Ekstrem dalga tahmin yöntemleri arasında istatistiksel analiz, sayısal modelleme ve uydu/ölçüm verileri bulunmaktadır. Goda [18], GEV (Genelleştirilmiş Ekstrem Değer) dağılımının ekstrem dalga yüksekliklerinin modellenmesinde oldukça başarılı olduğunu belirtmektedir. Bu dağılımın özel bir formu olan Gumbel dağılımı, özellikle yıllık maksimum dalga yüksekliklerinin analizinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Holthuijsen [19] ise, yine bir GEV dağılımı varyasyonu olan Weibull dağılımın özellikle dalga yüksekliklerinin uzun kuyruklu dağılımlarını modellemede etkili olduğunu vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, İzmit Körfezi’nde ekstrem rüzgâr dalgası iklimi karakteri güncel verilere dayalı olarak belirlenmiştir. Böylece, hem açık deniz (Körfez girişi) hem de yakın kıyıda (Körfez içi) bölgeye özgü farklı dalga koşullarının kıyılarına ve dolayısıyla mevcut veya yakın gelecekte inşa edilebilecek kıyı ve deniz yapılarına etkilerinin ortaya konması hedeflenmektedir. Bu sayede çalışmada elde edilen bulgular, İzmit Körfezi’nde tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirecek ülkemizdeki araştırmacı ve uygulamacılara ayrıntılı modelleme yapılmasından önce bir ilk değerlendirme yapılabilmesi için altlık teşkil etmiş olacaktır. Bu doğrultuda, NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis, NOAA) tarafından Marmara Denizi’nde 1999-2023 yılları arasında verilen rüzgâr verileri kullanılarak ekstrem rüzgâr ve dalga iklimi analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle uzun dönemli rüzgâr esme yüzdeleri, ortalama ve maksimum rüzgâr hızları hesaplanarak bölge için tipik rüzgâr gülü elde edilmiştir. İzmit Körfezi girişinde belirlenen kuzey-güney doğrultulu gözlem profili için 100 yıl dönüş aralıklı açık deniz ekstrem dalga yükseklikleri ve pik periyot değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak, İzmit Körfezi içerisinde oluşacak ekstrem rüzgâr dalgaları, sayısal dalga transformasyonu modellemesi ile yakın kıyıya taşınarak farklı yönlerden gelen dalga özelliklerinin alansal dağılımı belirlenmiştir. Körfez içerisindeki kıyı yapıları ve tesisleri göz önüne alınarak, bu tür kıyı ve deniz yapıları için şartnamelerde önerilen [20] 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem tasarım dalgası özelliklerini elde etmek amacı ile W (batı) ~ N (kuzey) ~ E (doğu) yön bandından tüm ara yönleri

de kapsayacak şekilde 9 farklı yönden spektral dalga modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışma, İzmit Körfezi genelinde dalga transformasyonu modeli ile yakın kıyıyı da kapsayacak güncel ekstrem dalga verilerinin uygulamacı ve araştırmacılara sunulduğu bir çalışma olarak ortaya çıkmaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI

Körfezler, denizlerin kara içerisine doğru ilerlediği, genellikle dar bir ağızla denizlere bağlanan kara ile çevrili yarı kapalı su kütleleridir. Morfolojik özellikleri sebebiyle, hidrodinamik ve sediment hareketliliği açısından oldukça özgün sistemler oluştururlar [16]. Ayrıca, sınırlı bir feç mesafesine sahip olan körfezlerde, körfez içerisine giren dalgaların yükseklikleri, yönleri ve enerjileri gibi özellikleri önemli ölçüde değişmekte; buna bağlı olarak açık deniz koşullarından farklı bir dalga iklimi gözlemlenmektedir [21]. Bu farklılıklar hidro-morfolojik süreçleri etkilediği için, körfezler içerisinde gerçekleştirilecek olan kıyı ve liman mühendisliği uygulamalarında körfez özelinde değerlendirmeler ve analizler gerektirmektedir.

Bu bağlamda, önemli sanayi, ticaret, lojistik ve yerleşim faaliyetlerinin yoğunlaştığı bir bölge olan İzmit Körfezi, Türkiye’de ayrıntılı kıyı ve liman mühendisliği çalışmalarına ihtiyaç duyulan başlıca örneklerden biridir. Marmara Denizi’nin doğusunda bulunan (Şekil 1) ve dar-uzun bir yapısı olan İzmit Körfezi, yaklaşık 130 km uzunluğunda bir kıyıya ve 300 km²’lik bir alana sahiptir. Karadeniz ve Ege Denizi bağlantısında yer alması ve İstanbul ile Kocaeli gibi yoğun nüfuslu şehirlerin bulunduğu bir coğrafyada konumlanması sebebiyle, körfez içerisinde çok sayıda liman tesisi, endüstriyel altyapı, kıyı yerleşimi vb. bulunmaktadır. Körfezin özgün bir morfolojiye ve dar bir girişe sahip olması sebebiyle, Marmara

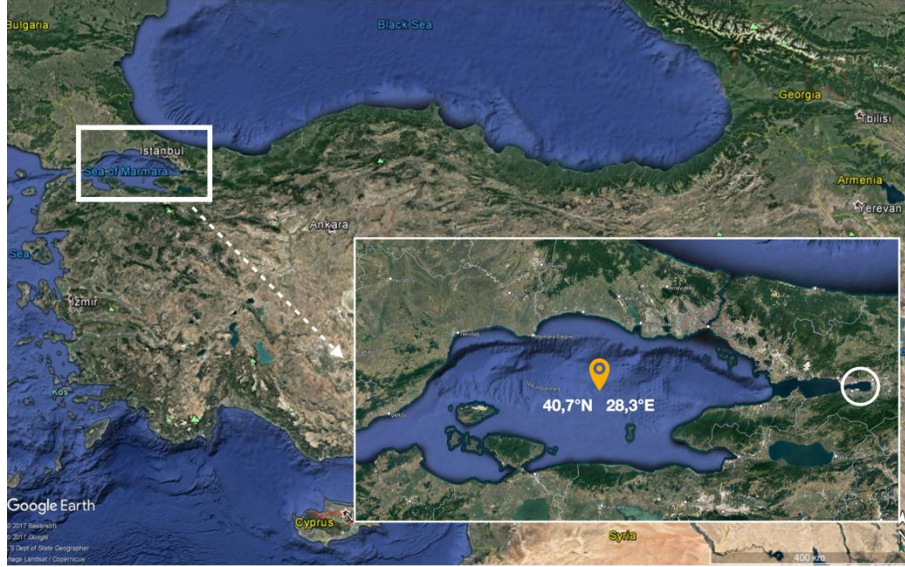
Denizi’nden gelen dalgaların iç kısımlara doğrudan taşınması mümkün değildir. Ayrıca körfez, birinci derece deprem kuşağında yer aldığı için mühendislik ve planlama süreçleri açısından oldukça hassas bir noktadır. Bu nedenlerden ötürü, İzmit Körfezi’nde çok disiplinli (mühendislik, ekolojik vb.) yaklaşımlar ile özellikle uzun dönem ve ekstrem dalga istatistiği, kumlanma analizi, deniz seviyesi değişimleri, kirlilik ve deprem riskleri gibi konulara odaklanan bilimsel çalışmaların gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir.

3. METOT

3.1 Ekstrem Rüzgâr ve Dalga Analizi

Açık denizlerde meydana gelen ekstrem meteorolojik olaylar (fırtınalar, siklonlar vb.) yüksek enerjili dalgaların oluşumunu tetiklemekte, dolayısıyla deniz ve kıyı yapıları üzerinde ciddi yapısal yükler meydana getirmektedir [22]. Mühendislik tasarımlarında, uzun dönemli dalga verilerinin istatistiksel analizinin tasarımın faydalı ömrü de göz önüne alınarak gerçekleştirilmesi, farklı dönüş aralıklarına sahip en büyük dalga yüksekliği ve periyodu ile rüzgâr şiddeti ve yönünün belirlenmesi temel bir adımdır [18]. Elde edilen ekstrem değerler, yapısal tasarım ve yapının kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği riskleri belirlemek için kullanılmaktadır.

Yapısal tasarım için kullanılacak karakteristik rüzgâr hızı ve bu rüzgârın oluşturacağı proje dalgasının seçimi, yapının faydalı ömrü ve tasarım kuvvetleri ile karşılaşma riski değerlendirildiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu değerlendirme, tüm mühendislik projelerinde olduğu gibi kıyı ve deniz mühendisliği projelerinde de yapının tasarım faydalı ömrü ve stratejik önem seviyesi düşünülerek karar verilmesi gereken bir noktadır.



Şekil 1: İzmit Körfezi'nin genel coğrafi konumu ve Marmara Denizi rüzgâr verisinin alındığı ölçüm istasyonunun konumu (Google Earth®).

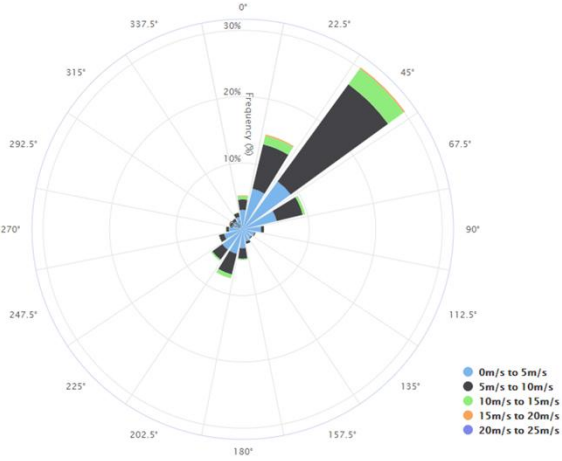
İzmit Körfezi'ndeki kıyı yapıları göz önüne alındığında kıyı tesisleri, deniz dolguları, dalgakıranlar ve iskele/rıhtım gibi yanaşma yapılarının tasarımı için kullanılması önerilen 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem dalga koşullarının incelenmesi, bu çalışma için en uygun kapsam olarak ortaya çıkmaktadır.

3.2 Rüzgâr Verileri ve Ekstrem Rüzgâr İklimi

İzmit Körfezi içerisinde gerçekleştirilecek rüzgâr ve dalga iklimi modellemesi amacı ile öncelikle, Marmara Denizi'nde NCEP (National Centers for Environmental Prediction, NOAA) CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) veri tabanından 40,7°N (kuzey), 28,3°E (doğu) koordinatları (Şekil 1) için temin edilen 1999-2023 yılları arasına ait 25 yıllık saatlik ortalama rüzgâr verileri incelenmiştir. Bu veriler, CFSR veri setindeki rüzgâr hızlarının Marmara'daki ve bölgedeki meteoroloji istasyonlarında (Florya, Gölçük, Derince, Körfez) kaydedilen rüzgâr verileri ile karşılaştırılması neticesinde kalibre edilmiştir. Mevcut ölçümlere ait temel istatistiki bilgiler Tablo 1'de; W (batı) ~ N (kuzey) yön aralığı için yıllık maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları ise Tablo 2'de sunulmuştur. S (güney) yönlü rüzgârların İzmit Körfezi'nde gerçekleştirilen dalga transformasyonundaki etkisi ihmal edilebilir düzeyde olduğundan, bu yönlü rüzgârlar çalışmada dikkate alınmamıştır. Ayrıca, veri grubunun analiz edilmesi ile oluşturulan rüzgâr gülü Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1: NCEP tarafından 1999-2023 yılları arasında verilen rüzgâr verilerine göre esme yüzdeleri, ortalama ve maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları.

Yön	Esme sayısı	Esme oranı (%)	Ortalama hız (m/s)	Maksimum hız (m/s)
N	10883	4,97	6,1	23,9
NNE	31447	14,35	6,8	23,8
NE	68978	31,48	7,5	25,1
ENE	20778	9,48	6,3	21,0
E	6509	2,97	3,9	18,6
ESE	4172	1,90	3,3	12,6
SE	3914	1,79	3,2	13,7
SSE	5030	2,30	3,8	18,0
S	10896	4,97	5,8	21,4
SSW	16864	7,70	6,5	23,5
SW	12315	5,62	5,4	20,0
WSW	7782	3,55	4,3	19,9
W	5387	2,46	3,9	20,0
WNW	4332	1,98	4,0	18,1
NW	4275	1,95	4,2	18,0
NNW	5582	2,55	4,7	21,3
Toplam	219144	100		



Şekil 2: NCEP verileri kullanılarak hazırlanan rüzgâr gülü.

Tablo 2: 1999-2023 yılları için NCEP veri tabanından elde edilen yıllık maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları (W~E).

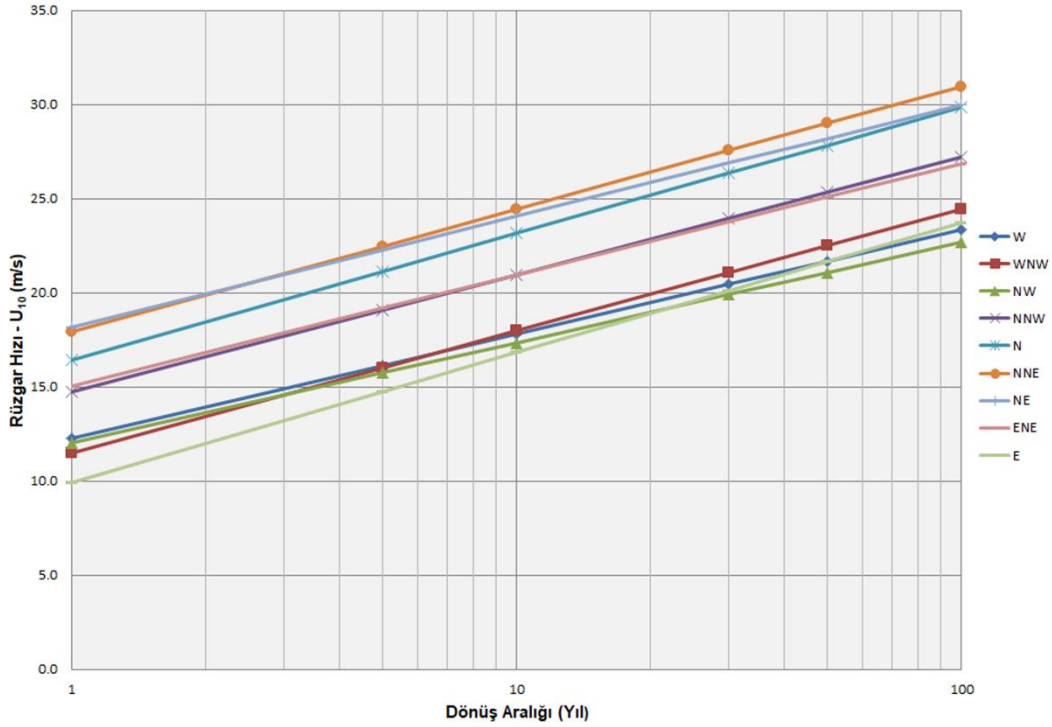
Yıl	Yıllık maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları, U_{10} (m/s)							
	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE
1999	11,8	10,3	12,6	11,7	11,5	16,3	18,7	16,7
2000	14,4	11,9	13,9	12,1	14,5	13,7	13,9	10,9
2001	12,6	12,6	12,6	13,7	15,7	17,7	19,0	16,3
2002	12,2	14,3	11,9	14,1	18,7	18,1	18,2	17,4
2003	15,4	10,0	10,4	16,1	19,1	19,6	17,2	13,7
2004	10,0	9,0	12,5	20,2	19,2	20,2	21,4	16,7
2005	10,8	8,8	8,6	13,5	15,7	14,3	17,1	14,2
2006	11,6	9,9	11,9	9,6	14,3	17,4	19,0	13,6
2007	14,6	16,3	11,1	12,3	12,1	14,6	15,1	12,1
2008	14,6	17,9	16,8	18,2	15,4	18,0	18,4	12,0
2009	11,5	14,0	12,2	15,6	14,5	16,4	16,1	13,1
2010	14,0	8,9	11,9	15,8	17,7	18,7	17,2	13,9
2011	12,6	15,2	13,6	18,5	20,0	23,3	21,6	18,1
2012	14,7	14,3	14,8	17,3	20,1	20,6	19,8	18,6
2013	11,9	14,9	14,0	17,3	18,6	18,0	18,9	18,2
2014	15,7	11,6	16,1	20,8	22,6	21,2	23,7	16,4
2015	9,9	12,3	12,1	15,9	19,2	21,3	21,8	20,2
2016	13,2	14,1	14,8	21,3	22,1	23,7	23,7	18,0
2017	15,7	15,3	15,9	17,5	18,5	20,3	17,6	19,1
2018	19,2	18,1	18,0	19,3	19,7	21,3	20,3	21,0
2019	11,2	8,9	8,4	17,2	21,8	23,8	22,6	18,8
2020	11,8	11,2	10,5	15,6	16,7	23,7	22,4	16,6
2021	20,0	18,0	16,2	17,2	18,6	19,8	18,9	20,5
2022	12,4	10,6	13,3	18,3	19,9	21,6	25,1	17,5
2023	17,1	16,8	17,0	14,8	23,9	23,5	20,9	17,0

Elde edilen veriler ile İzmit Körfezi'nde görülmesi muhtemel ekstrem fırtınaların analiz edilmesi amacıyla bir ekstrem rüzgâr iklimi çalışması yürütülmüştür. Ekstrem değer analizlerinde en çok kullanılan olasılık dağılımlarından biri olan Gumbel dağılımı, özellikle sınırlı veri uzunluğuna sahip denizlerde ekstrem rüzgâr hızlarının ve dalga yüksekliklerinin tahmininde oldukça iyi sonuçlar vermektedir [23-25]. Şekil 3'te, Gumbel dağılımı kullanılarak elde edilen farklı dönüş aralıklarındaki ekstrem saatlik rüzgâr hızı dağılımları verilmiştir. Yukarıda belirtildiği üzere, İzmit Körfezi için gerçekleştirilen dalga iklimi analizinde 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem koşulların göz önüne alınması uygun olacaktır. Bu bağlamda, Şekil 3'te de görüldüğü üzere, en yüksek 100 yıl dönüş aralıklı saatlik ortalama rüzgâr hızı NNE yönünden 31,0 m/s olarak elde edilmiştir.

3.3 Ekstrem Dalga İklimi ve Sayısal Dalga Transformasyonu Modeli

Marmara Denizi'nden gelecek W (batı) yönlü dalgaların etkisini irdeleyebilmek için öncelikle tüm Marmara Denizi'ni kapsayan bir dalga oluşumu ve dalga transformasyonu sayısal (numerik) modeli kurulmuş, W yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına için modelleme çalışması yürütülmüştür.

Rüzgâr dalgası oluşumu, ilerlemesi ve transformasyonunun sayısal olarak modellenmesi için USACE (U.S. Army Corps of Engineers) Coastal and Hydraulics Lab. tarafından geliştirilen CMS-Wave numerik modeli tercih edilmiştir. CMS-Wave, 2 boyutlu bir spektral dalga modeli olup rüzgâr dalgalarının oluşumu, açık deniz dalgalarının yakın kıyı transformasyonu ve inşası planlanan kıyı yapıları için tasarım dalgalarının elde edilmesi gibi amaçlar için kullanılabilir. CMS-Wave 2 sayısal (nümerik) modeli, kararlı (atmosfer ve deniz arasında enerji aktarımının dengeye ulaştığı, zamanla değişmeyen) durum için dalga hareketi denge denklemini kullanıcı tarafından tanımlanan grid sistemli bir hesap alanında sonlu farklar yöntemi ile hesap ederken, batimetri kaynaklı dalga sapması (refraction), sığlaşma (shoaling), akıntı kaynaklı sapma ve sığlaşma, derinlik ve dalga dikliği kaynaklı dalga kırılması (wave breaking), dalga dönmesi



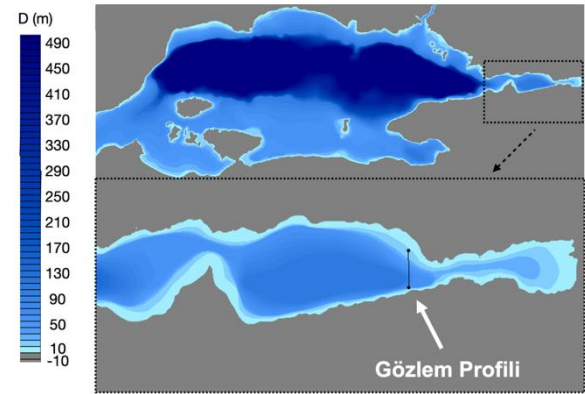
Şekil 3: NCEP veri tabanından temin edilen veriler ile W ~ E (batı ~ doğu) yön aralığı için elde edilen ekstrem saatlik ortalama rüzgâr hızı dağılımları.

(diffraction), dalga yansıması (reflection), dalga kaynaklı ortalama su seviyesindeki artış (wave-induced set-up), rüzgâr kaynaklı dalga oluşumu, düzensiz dalga-dalga etkileşimi ve gelişmekte olan bir dalga alanı içerisinde enerjiyi dağıtan ve yayan “whitecapping” gibi süreçleri dikkate almaktadır.

Dalga oluşumu ve transformasyonu (dönüşümü) için iki aşamalı bir model kurulmuştur: (1) Tüm Marmara Denizi’ni kapsayan genel model ve (2) çalışma bölgesini daha hassas bir hesap ağı ile tanımlayan İzmit Körfezi Modeli.

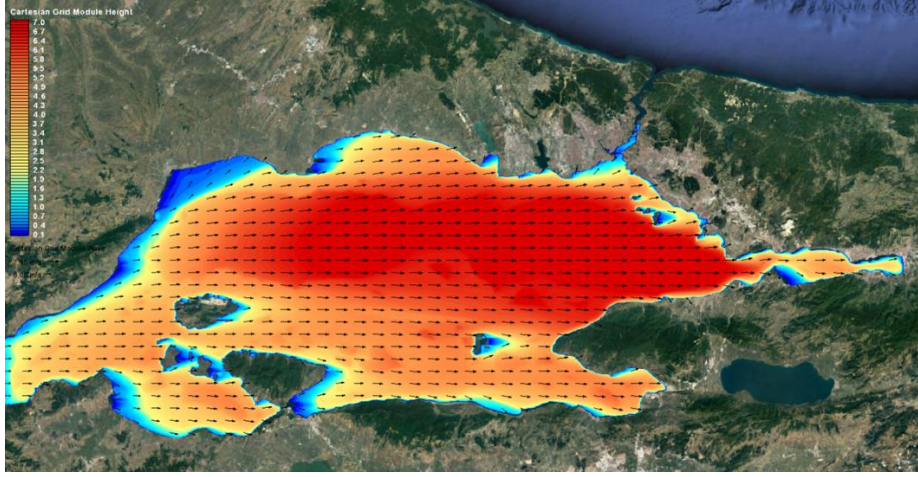
Tüm Marmara Denizi’ni kapsayan dalga modeli için sayısallaştırılan batimetri kullanılarak 400 m x 200 m hücre boyutuna (grid aralığına) sahip bir hesap alanı (grid) tanımlanmıştır (Şekil 4). Model sonuçlarının daha hassas yakın kıyı modeli olan İzmit Körfezi Modeli’nde sınır koşulu olarak kullanılacak olan W yönlü dalga karakteristiklerini belirlemek (bir diğer deyişle, Marmara Denizi’nde elde edilen ekstrem dalgaların İzmit Körfezi girişine taşıyabilmek) için Marmara Denizi ile körfezin birleştiği açık deniz sınırına yakın bir konumda bir gözlem profili tanımlanmıştır (Şekil 4). Her iki model için de deniz seviyesi, fırtına

kabarması dikkate alınarak harita sıfırı üzerinde 1 m şeklinde (+1,00 m CD) tanımlanmıştır.



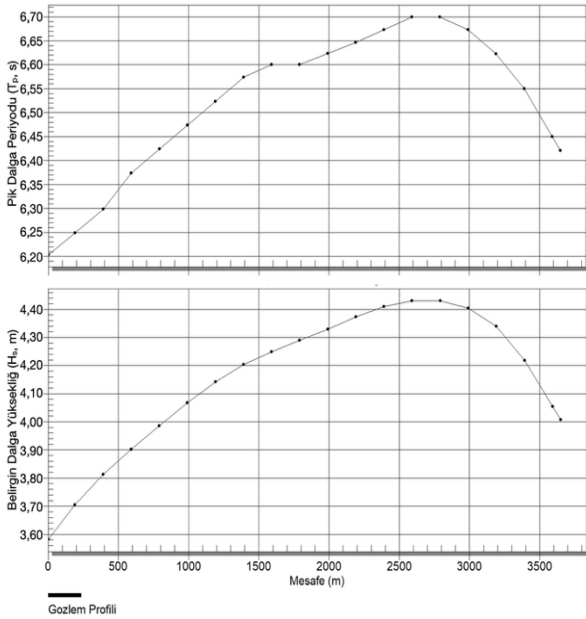
Şekil 4: Marmara Denizi sayısal dalga modeli için hazırlanan model hesap alanı (400 m x 200 m grid aralığı) ve İzmit Körfezi girişinde tanımlanan gözlem profili. D, derinliği ifade etmektedir.

Dalga modeli ile tüm Marmara Denizi üzerinden esmesi öngörülen 100 yıl dönüş aralıklı $U_{10} = 31,0$ m/s saatlik ortalama rüzgâr hızının W yönünden esmesi ile oluşacak belirgin dalga yükseklikleri (H_s) Şekil 5’te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4’teki harita üzerinde gösterilmiş olan gözlem profili boyunca okunan belirgin dalga yükseklikleri ve pik dalga



Şekil 5: W yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için belirgin dalga yükseklikleri 0~7 m renk skalası, $U_{10} = 31,0$ m/s, su seviyesi: CD+1,0 m.

periyodları (T_p) Şekil 6'da ilgili grafikler ile sunulmuştur. Model sonuçlarına göre, gözlem profilinde okunan en büyük belirgin dalga yüksekliği $H_s = 4,43$ m ve pik dalga periyodu $T_p = 6,7$ s olup, İzmit Körfezi Modeli ile W yönlü ve 100 yıl dönüş aralıklı fırtına dalga koşulunun modellenmesi için bu açık deniz tasarım dalgası özellikleri modelin sınır koşulu olarak alınmıştır.



Şekil 6: W yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için Körfez Modeli girişinde tanımlanan gözlem profilinde elde edilen belirgin dalga yükseklikleri (H_s) ve pik dalga periyodları (T_p).

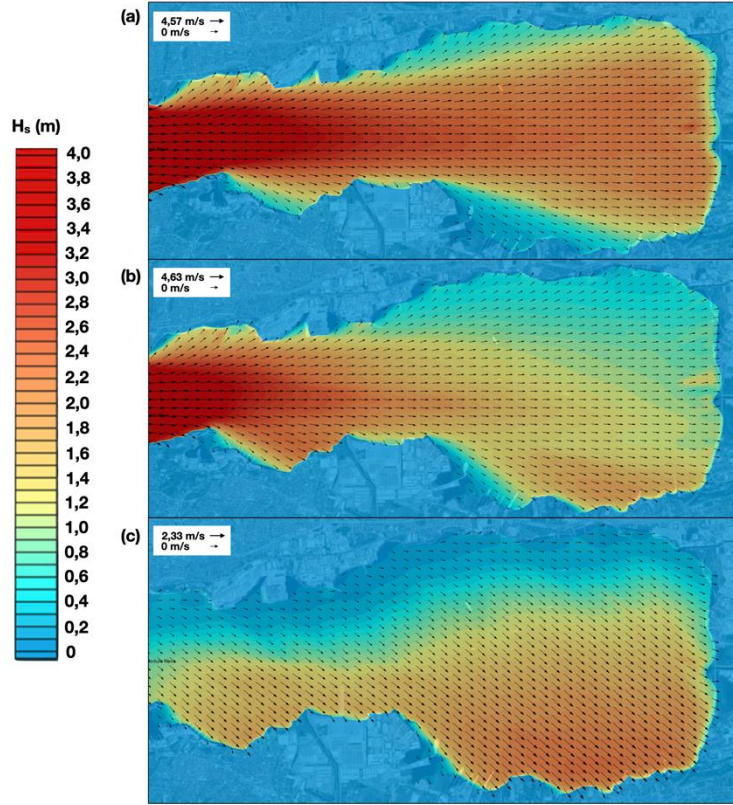
Yatay ekseninde gözlem profili olarak tanımlanan mesafe kuzey-güney istikametindedir. Elde edilen W yönlü ekstrem dalga özellikleriyle birlikte Körfez içerisinde oluşabilecek rüzgâr kaynaklı dalgalar, yakın

kıyıya yukarıda belirtildiği üzere ikinci bir dalga transformasyonu sayısal (numerik) modeli vasıtası ile taşınmıştır. Yakın kıyı modeli (Körfez Modeli) için seyir haritalarından elde edilen batimetrik veriler ile Şekil 7'de görülen dijital batimetri hazırlanmıştır.

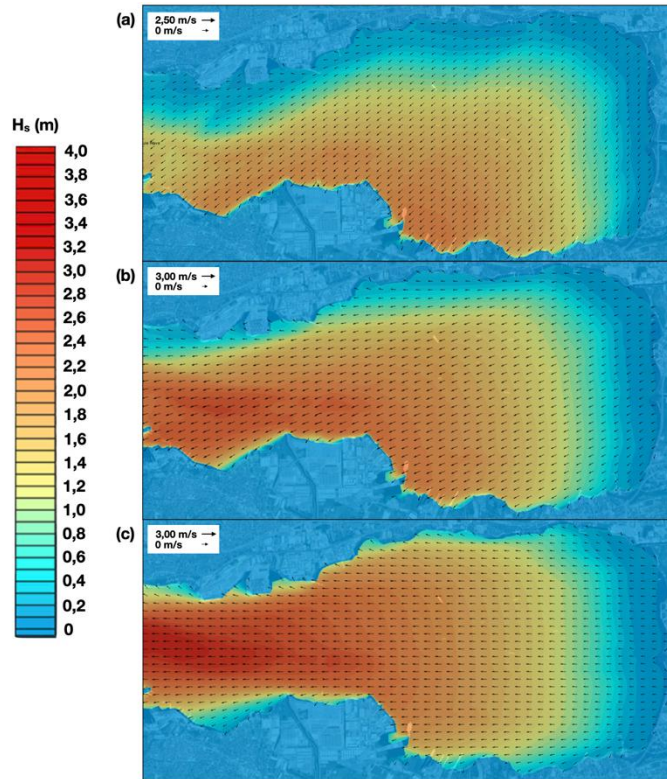


Şekil 7: Yakın kıyı dalga modeli (Körfez Modeli) için sayısallaştırılan batimetri.

Yürütülen dalga transformasyonu sayısal modelleme çalışmasında, W ve WNW (batı-kuzeybatı) yönlü testlerde İzmit Körfezi Modeli girişinde Marmara Denizi Modeli'nden W için elde edilen dalga özellikleri bölgedeki rüzgâr dalgası spektrumuna uygun biçimde sınır şartı olarak kullanılmış, ayrıca ilgili yönden esen 31,0 m/s rüzgâr hızı tanımlanmıştır. NW (kuzeybatı), NNW (kuzey-kuzeybatı), N (kuzey), NNE (kuzey-kuzeydoğu), NE (kuzeydoğu), ENE (doğu-kuzeydoğu) ve E (doğu) yönleri için yürütülen testlerde ise sadece ilgili yönden esen 31,0 m/s rüzgâr hızı tanımlanmıştır. Modelde grid aralıkları, yüksek bir hassasiyet elde edebilmek adına 15 m x 10 m olarak seçilmiştir. İzmit Körfezi Modeli'nden W-N-E hâkim yön bandındaki tüm ara yönler için elde edilen belirgin dalga yüksekliği (H_s) dağılımları Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8: (a) W (batı) yönlü, (b) WNW (batı-kuzeybatı) yönlü, (c) NW (kuzeybatı) yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için belirgin dalga yükseklikleri.



Şekil 9: (a) NE (kuzeydoğu) yönlü, (b) ENE (doğu-kuzeydoğu) yönlü, (c) E (doğu) yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için belirgin dalga yükseklikleri.

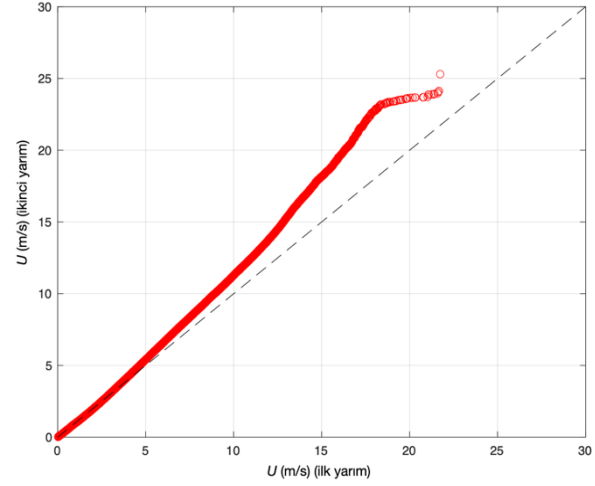
4. TARTIŞMA: EKSTREM DALGA İKLİMİNDE KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİSİ

Bilindiği üzere, küresel iklim değişikliği nedeniyle gerek meteorolojik gerekse hidrolojik ve oşinografik parametrelerin uzun dönemli davranışları zamanla değişmektedir [26]. Yapılan çalışmalar yalnızca deniz seviyeleri, yağışlar ve hava/su sıcaklıklarının değil, aynı zamanda rüzgâr hızı ve dalga yüksekliklerinin ekstrem ve ortalama değerlerinin de kayda değer biçimde değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu itibarla denizlerdeki fırtınaların sıklıkları, süreleri ve şiddetleri de bazı denizlerde dikkate değer biçimde artma eğilimindedir.

Marmara Denizi'nde ve özellikle çalışma bölgesinde (İzmit Körfezi'nde) küresel iklim değişikliğinin eldeki rüzgâr ve dalga verileri üzerinde ne gibi etkilerinin olduğunun daha net anlaşılması için “yenilikçi Şen metodu” kullanılarak 45 yıllık rüzgâr ve dalga verisi üzerinde bir eğilim analizi gerçekleştirilmiştir [27]. Bu yöntem oldukça basit olmakla birlikte, verideki artma veya azalma eğiliminin çok açık biçimde incelenmesini mümkün kılmaktadır. Yöntemin uygulanması için eldeki zaman serisi (veri) kronolojik olarak iki eşit parçaya ayrılmakta, verinin her iki yarısı da küçükten büyüğe sıralanmaktadır. Daha sonra verinin ilk yarısı (geçmiş dönem) ve ikinci yarısı (yakın dönem) sırası ile yatay ve dikey eksenlerde olacak şekilde karşılıklı olarak çizilmektedir. Veri noktalarının aynı grafik üzerinde çizdirilen 1:1 eğim çizgisine göre konumları incelenerek ilgili verinin artış veya azalış eğiliminde olup olmadığı görsel olarak ortaya konabilmektedir.

“Yenilikçi Şen metodu” eğilim analizi uyarınca, rüzgâr hızı ve dalga yüksekliği parametreleri için 1979-2023 yıllarını kapsayan 45 yıllık rüzgâr verisi bu şekilde iki eşit parçaya (22,5 yıl) ayrılarak birbirlerine göre çizdirilmiş ve Şekil 10'da sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere küresel iklim değişikliğinin etkisi özellikle ekstrem rüzgâr hızı verilerinde (fırtına koşullarında) çok belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. Şekildeki rüzgâr hızı değerleri incelendiğinde, 2001-2023 arasındaki değerlerin 1979-2001 arasındaki değerlere göre dikkate değer miktarda yüksek olduğu, bu farkın

rüzgâr hızı değerleri arttıkça daha da arttığı görülmektedir. 2001-2023 arasındaki en yüksek değerler 1979-2001 arasındaki en yüksek değerlere göre %15-%20 mertebesinde artmıştır. Nitekim, bu sonuçlar gözlemlerle de örtüşmektedir.



Şekil 10: 45 yıllık saatlik rüzgâr hızı verisinin iki yarı halinde birbirlerine göre çizdirilmesi sonucu ortaya çıkan “yenilikçi Şen metodu” eğilim grafiği.

Bu durumun somut bir örneği olarak, İzmit Körfezi girişinde 19.11.2023 tarihinde oldukça şiddetli bir fırtına meydana geldiği raporlanmaktadır [28]. Bu fırtına, bölgedeki deniz ve kara ulaşımını olumsuz etkilemekle kalmamış, aynı zamanda bölgedeki kıyı tesislerinde çeşitli maddi hasarlara yol açmıştır. Fırtına öncesinde Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 18 Kasım sabahından itibaren Kocaeli ilinde kuzey ve kuzeybatı yönlerinden fırtına beklendiğini duyurmuş, yapılan duyuruda 19 Kasım Pazar günü ise rüzgârın kuvvetli fırtına (20-25 m/s), yer yer tam fırtına (25-30 m/s) şeklinde eseceği tahmin edilmiştir [29]. Fırtına sırasında Hereke Vapur İskelesi'ndeki yolcu aktarmasında kullanılan 400 metre karelik yüzer iskele yaklaşık 50 metre açığa sürüklenmiş, Körfez ilçesinde ise Tütünçiftlik Balıkçı barınağında bulunan 7 balıkçı teknesi batmıştır [28]. Son 15-20 yıl içinde artarak yaşanan bu ve benzeri olaylar, bölgedeki denizcilik faaliyetlerini ve kıyı altyapısını ciddi şekilde etkilemiş, yetkililer tarafından çeşitli önlemler alınmasına yol açmıştır.

Bu sonuçlar, küresel iklim değişikliğinin Marmara Denizi'ndeki fırtınaların sıklığını ve şiddetini arttırdığını kesin biçimde ortaya koymaktadır. Kıyı yapıları tasarımında küresel iklim değişikliğinin dikkate alınması elzemdir. Dolayısıyla bu çalışmada son 50 yıldan ziyade 25 yılı kapsayan veriler ile çalışılarak ekstrem rüzgâr ve dalga

analizi yapılması tercih edilmiş, bu sayede İzmit Körfezi civarında şiddetlenen fırtına koşullarının (ekstrem rüzgâr ve dalga koşullarının) yapılan analize daha gerçekçi biçimde yansıtılması ve daha güncel bir ekstrem dalga iklimi elde edilmesi sağlanmıştır. 25 yıldan daha kısa sürelerde yapılan ekstrem analizlerde ise belirsizliğin ve saçılımın artacağı görüldüğünden çalışma bu şekilde yürütülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, İzmit Körfezi içerisinde planlanan veya yer alan kıyı ve liman yapılarının tasarım ve analizine esas teşkil edecek ekstrem dalga karakteristiklerinin belirlenmesi ve elde edilen sonuçların ilgili mühendislik çalışmalarına altlık teşkil etmesi amacıyla, önce ekstrem rüzgâr analizi yapılmış ve ardından açık deniz ve yakın kıyı ekstrem dalga analizi sayısal (nümerik) bir model ile gerçekleştirilmiştir.

Bu doğrultuda ilk olarak, seyir haritaları kullanılarak Marmara Denizi ve İzmit Körfezi özelinde dijital batimetri hazırlanmıştır. Marmara Denizi 40,7° N (kuzey), 28,3° E (doğu) koordinatları için NCEP-CFSR (NOAA, USA) veri tabanından 1999-2023 yılları arasına ait 25 tam yılı kapsayan saatlik ortalama rüzgâr hızı ve yönü güncel verileri alınarak küresel iklim değişikliğinin tetiklediği şiddetli rüzgâr ve dalga koşullarının en iyi şekilde temsil edilmesi amaçlanmıştır. İzmit Körfezi içerisindeki çok sayıda mevcut kıyı ve deniz yapıları göz önüne alınarak, dalgakıranlar, iskele ve rıhtım gibi yanaşma yapıları, deniz dolguları gibi tesis ve yapıların tasarım ömrüne yönelik olarak mevcut standartlar [20] tarafından önerilen 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem rüzgâr hızları, kısa feç mesafelerine sahip kapalı denizlerde güvenilir sonuçlar verdiği bilinen Gumbel dağılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda, kuzey-kuzeydoğu yönünden gelen 100 yıl dönüş aralığına sahip ekstrem rüzgâr hızı 31,0 m/s olarak belirlenmiştir.

Spektral dalga modellemesi ise iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiş, önce tüm Marmara Denizi'ni kapsayan genel bir model kurularak, coğrafi konumu nedeniyle Marmara Denizi'nde oluşan batı yönlü dalgaların etkisi altında olan İzmit Körfezi girişindeki dalgalar modellenmiştir. Bu doğrultuda, açık denizde elde edilen 100 yıl dönüş

aralıklı ekstrem rüzgârların oluşturduğu ve İzmit Körfezi girişinde etkili olacak batı yönlü dalgalar modellenerek körfezin açık deniz sınırında tanımlanan "gözlem profilinde" batı hâkim yönlü dalgalar belirlenmiş, bu noktada belirgin dalga yüksekliği $H_s = 4,43$ m ve pik dalga periyodu $T_p = 6,7$ s olarak hesaplanmıştır. Bu tasarım dalgaları, ikinci aşamada yakın kıyıdaki dalga ikliminin incelenmesi için oluşturulan yüksek uzamsal çözünürlüklü İzmit Körfezi Modeli'nde (yakın kıyı modeli) sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

Körfez içerisindeki yakın kıyı ekstrem dalga karakteristiklerini belirlemek amacıyla dijital batimetri verileri kullanılarak hazırlanan ve dalga dönüşümünün (transformasyonun) de göz önüne alındığı İzmit Körfezi Modeli, W (batı) ~ N (kuzey) ~ E (doğu) yön bandından dokuz farklı yön için çalıştırılmıştır. Bu sayede hem Marmara Denizi'nden gelen açık deniz dalgalarının hem de körfez içinde esen ekstrem rüzgârların yerel olarak oluşturduğu dalgalar dikkate alınarak, İzmit Körfezi içindeki 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem dalga iklimi alansal olarak elde edilmiştir.

Beklenebileceği üzere, batı yönlü dalgaların körfez içerisindeki en etkili dalgalar olduğu; buna karşın doğu yönlü dalgaların sınırlı feç mesafesi nedeniyle daha düşük enerjiye sahip oldukları görülmüştür. Dolayısıyla İzmit Körfezi'nde yapılacak olan mühendislik çalışmalarında ve planlamalarda, Marmara Denizi'nde görece daha uzun feç mesafelerinde oluşup körfez içerisine ilerleyen batı hâkim yönlü ekstrem dalga özelliklerinin hassas bir şekilde belirlenmesi ve körfez kıyılarındaki kıyı yapılarına etki edecek tasarım dalgalarının güvenilir yöntemlerle tahmin edilmesinin oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Küresel iklim değişikliğinin etkilerini gözlemek amacıyla 45 yıllık rüzgâr verisi ile eğilim (trend) analizi "Yenilikçi Şen Metodu" ile gerçekleştirilerek özellikle 2001-2023 arasında ekstrem rüzgâr hızlarının son dönemde geçmiş dönemlere göre %15-%20 mertebesinde arttığı görülmüştür. Bu bağlamda, 1999-2023 yılları arasındaki 25 yıllık ölçüm verileri ile gerçekleştirilen bu çalışmada alansal dağılım olarak sunulan bulguların, İzmit Körfezi'nde yapılacak olan kıyı ve deniz yapıları tasarım ve analizlerinde uygulamacılar ve

araştırmacılar için güncel bir altlık oluşturma noktasında faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkıları: Tüm yazarlar literatür taraması, sayısal modelin oluşturulması, sonuçların değerlendirilmesi ve analizlerin yapılması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi süreçlerine katkı sağlamışlardır.

Teşekkür: Bu çalışma 1773 İTÜ Teknopark Teknoloji Transfer Ofisi (1773TTO) A.Ş. bünyesinde yürütülen 202400103 numaralı Ar-Ge projesinin bir çıktısı olarak yayınlanmıştır. Ayrıca, bu makalede bilgi birikiminden faydalandığımız ve modelleme konusunda desteklerini esirgemeyen Sayın Atakan Yüce'ye teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışmaları: Çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

6. KAYNAKLAR

- [1] S. Baysal, "Liman yaklaşım kanallarında kumlanma analizi ve uygulamacılar için basitleştirilmiş bir model," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [2] S. Kabdaşlı, *Kıyı Mühendisliği*, İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1990.
- [3] F. Gerstner, "Theorie der wellen," *Ann. Phys.*, vol. 32, no. 8, pp. 412–445, 1802.
- [4] G. B. Airy, *Tides and Waves: Extracted from the Encyclopaedia Metropolitana*, Chichester, UK: William Clowes and Sons, 1845.
- [5] G. G. Stokes, "On the theory of oscillatory waves," *Trans. Cam. Philos. Soc.*, vol. 8, pp. 441–455, 1847.
- [6] J. S. Russell, *Report on Waves: Made to the Meetings of the British Association in 1842–43*, London, 1845.
- [7] H. U. Sverdrup and W. H. Munk, "Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting," Hydrographic Office, no. 601, 1947.
- [8] W. J. Pierson, G. Neumann, and R. James, "Observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics," *Hydrogr. Off. Publ.*, vol. 603, p. 180, 1955.
- [9] W. J. Pierson Jr and L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii," *J. Geophys. Res.*, vol. 69, no. 24, pp. 5181–5190, 1964.
- [10] K. Hasselmann *et al.*, "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)," *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, Reihe A, Hamburg, 1973.
- [11] C. L. Bretschneider, "Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves," The Board, Tech. Rep. 118, 1959.
- [12] H. Mitsuyasu, "On the growth of the spectrum of wind-generated waves," *Coastal Eng. Japan*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 1970.
- [13] L. Lin, Z. Demirbilek, H. Mase, F. Yamada, and J. Zheng, "CMS-Wave: A nearshore spectral wave processes model for coastal inlets and navigation projects," U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Tech. Rep. ERDC/CHL-TR-08-13, Mississippi, 2008.
- [14] L. Lin, Z. Demirbilek, R. Thomas, and J. Rosati III, "Verification and validation of the coastal modeling system, report 2: CMS-Wave," U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Tech. Rep. ERDC/CHL-TR-11-10, Mississippi, 2011.
- [15] C. Favaretto, L. Martinelli, E. M. P. Vigneron, and P. Ruol, "Wave hindcast in enclosed basins: comparison among SWAN, STWAVE and CMS-Wave models," *Water*, vol. 14, no. 7, p. 1087, 2022.
- [16] Coastal Engineering Manual (CEM), U.S. Army Corps of Engineers, 2002.
- [17] S. Baysal and V. S. O. Kırca, "Prescreening of sedimentation potential in harbor approach channels: a parametric model," *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.*, vol. 151, no. 3, p. 4025009, 2025.
- [18] Y. Goda, *Random Seas and Design of Maritime Structures*, vol. 33, Singapore: World Scientific, 2010.
- [19] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [20] AYGM, *Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları*, T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, 2016.
- [21] R. G. Dean and R. A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, vol. 2, Singapore: World Scientific, 1991.

- [22] I. R. Young, *Wind Generated Ocean Waves*, vol. 2, Elsevier, 1999.
- [23] E. J. Gumbel, *Statistics of Extremes*, New York: Columbia Univ. Press, 1958.
- [24] V. V. Kharin and F. W. Zwiers, "Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM," *J. Clim.*, vol. 13, no. 21, pp. 3760–3788, 2000.
- [25] S. Coles, *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, vol. 208, Springer, 2001.
- [26] IPCC, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2019.
- [27] Z. Şen, "Innovative trend analysis methodology," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 17, no. 9, pp. 1042–1046, 2012.
- [28] Anadolu Ajansı (AA), "Kocaeli, Bartın, Sakarya, Düzce ve Zonguldak'ta sağanak ve kuvvetli rüzgar hayatı olumsuz etkiliyor," Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/kocaeli-bartin-sakarya-duzce-ve-zonguldakta-saganak-ve-kuvvetli-ruzgar-hayati-olumsuz-etkiliyor/3058307>
- [29] Çağdaş Kocaeli Gazetesi, "Kocaeli için fırtına ve sağanak yağış uyarısı," Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.cagdaskocaeli.com.tr/haber/17668246/kocaeli-icin-firtina-ve-saganak-yagis-uyarisi>

