



UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Turkish Journal of Civil Engineering

formerly
Teknik Dergi

Volume 35
Issue 4
July 2024



Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi) Publication Principles

Turkish Journal of Civil Engineering (TJCE), a non-profit, open access scientific and technical periodical of UCTEA Chamber of Civil Engineers, publishes papers reporting original research work and major projects of interest in the area of civil engineering. TJCE annually publishes six issues and is open to papers in English and Turkish. It should be noted that TJCE (formerly, Teknik Dergi/ Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers) is being published regularly for more than 30 years since 1990. Main publication principles of TJCE are summarized below:

1. Articles reporting original scientific research and those reflecting interesting engineering applications are accepted for publication. To be classified as original, the work should either produce new scientific knowledge or add a genuinely new dimension to the existing knowledge or develop a totally new method or substantially improve an existing method.
2. Articles reporting preliminary results of scientific studies and those which do not qualify as full articles but provide useful information for the reader can be considered for publication as technical notes.
3. Discussions received from the readers of the published articles within three months from publication are reviewed by the Editorial Board and then published together with the closing remarks of the author.
4. Manuscripts submitted for publication are evaluated by two or three reviewers unknown to the authors. In the light of their reports, final decision to accept or decline is taken by the Editorial Board. General policy of the Board is to get the insufficient manuscripts improved in line with the reviewers' proposals. Articles that fail to reach the desired level are declined. Reasons behind decisions are not declared.
5. A signed statement is taken from the authors, declaring that the article has not been published as a "journal article or book chapter". In case the Editorial Board is in the opinion that the article has already been published elsewhere with minor changes or suspects plagiarism or a similar violation of ethics, then not only that article, but none of the articles of the same authors are published.
6. Papers reporting works presented as conference papers and developed further may be considered for publication. The conference it was presented to is given as a footnote in the first page.
7. Additionally, a document signed by all authors, transferring the copyright to UCTEA Chamber of Civil Engineers is submitted together with the manuscript.



UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Turkish Journal of Civil Engineering

formerly
Teknik Dergi

Volume 35
Issue 4
July 2024



UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Necatibey St. No: 57, Kızılay 06440 Ankara, Turkey

Tel: +90.312.294 30 00 - Faks: +90.312.294 30 88

E-mail: imo@imo.org.tr - www.imo.org.tr

Publisher (Sahibi):

Nusret SUNA

On behalf of UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers

Administrative Officer (Yazı İşleri Müdürü):

Bülent TATLI

Volume 35 - Issue 4 - July 2024 (*Cilt 35 - Sayı 4 - Temmuz 2024*)

Published bi-monthly. Local periodical. (*İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın*)

Date of Print: July 1, 2024 (*Baskı Tarihi: 1 Temmuz 2024*)

Number of copies: 800 (*800 adet basılmıştır*)

Quotations require written approval of the Editorial Board.

(*Yayın Kurulunun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.*)

ISSN: 2822-6836

Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi) is indexed by

- Science Citation Index Expanded
- Scopus
- Journal Citation Reports / Science Edition
- Engineering Index
- Concrete Abstracts (American Concrete Institute)
- National Technical Information Service (US NTIS)
- CITIS
- Ulrich's International Periodical's Directory
- Google Scholar
- TR Index

Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi) is a peer reviewed open access periodical publishing papers of original research and interesting practice cases. It addresses both the research community and the practicing engineers.

Printed by (Baskı):

Ankamat Matbaacılık San.

İvedik OSB. 1344. Sok. Yenimahalle / Ankara - Tel: 0.312.394 54 64

Sertifika No: 46700

Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi)

Editor-in-Chief:

Alper İLKİ

Editors:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Gürkan Emre GÜRCANLI

Kutay ORAKÇAL

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Tuğrul TANKUT

Kağan TUNCAY

Ufuk YAZGAN

Emine Beyhan YEĞEN

Drafting Language Check:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Polat GÜLKAN

Gürkan Emre GÜRCANLI

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Mehmet UTKU

Emine Beyhan YEĞEN

Editorial Assistant:

Çağlar GÖKSU AKKAYA

Secretary:

Cemal ÇİMEN

Advisory Board:

Prof. M. Aral, USA

Prof. D. Arditi, USA

Prof. A. Aydilek, USA

Prof. K. Beyer, Switzerland

Prof. N. Çatbaş, USA

Prof. M. Çetin, USA

Prof. M. Dewoolkar, USA

Prof. T. Edil, USA

Prof. K. Elwood, New Zealand

Prof. M. Fardis, Greece

Prof. G. Gazetas, Greece

Prof. P. Gülkan, Türkiye

Prof. J. Han, USA

Prof. I. Hansen, Netherlands

Prof. T. Hartmann, Germany

Prof. F. Imamura, Japan

Prof. T. Kang, Korea

Prof. K. Kusunoki, Japan

Prof. S. Lacasse, Norway

Prof. R. Al-Mahaidi, Australia

Prof. K. Özbay, USA

Prof. H. Özer, USA

Prof. S. Pampanin, Italy

Prof. A. J. Puppala, USA

Prof. M. Saatçioğlu, Canada

Prof. C. Santamarina, Saudi Arabia

Prof. S. Sheikh, Canada

Prof. E. C. Shin, South Korea

Prof. J. Smallwood, South Africa

Prof. M. Sümer, Türkiye

Dr. H. A. Şentürk, Türkiye

Dr. S. S. Torisu, Japan

Prof. E. Tutumluer, USA

Prof. M. Tümay, USA

Reviewers:

This list is renewed each year and includes reviewers who served in the last two years of publication.

Şükran AÇIKEL	Ali Fırat ÇABALAR	Saadet Gökçe GÖK	Özgür KURÇ	Haluk SUCUOĞLU
Kamil Bekir AFACAN	Barlas Özden	Tansu GÖKÇE	Hasan KURTARAN	Erol ŞADOĞLU
Bülent AKBAŞ	ÇAĞLAYAN	Serdar GÖKTEPE	Murat KURUOĞLU	Yuşa ŞAHİN
Sami Oğuzhan AKBAŞ	Ferit ÇAKIR	Semih GÖNEN	Akif KUTLU	Zekai ŞEN
Zühal AKBAY ARAMA	Melih ÇALAMAK	Rahmi GÜÇLÜ	Merih KÜÇÜKLER	Burak SENGÖZ
Rıfat AKBİYİKLİ	Gülben ÇALIŞ	Ali GÜL	Abdullah KÜRKCÜ	Gülüm TANIRCAN
Sarven AKCELYAN	Umut ÇALIŞKAN	Fazlı Erol GÜLER	Todd LİTMAN	Serhan TANYEL
Burcu AKÇAY	Süheyla Pelin	İlgin GÜLER	Fağih MAARİF	Mucip TAPAN
ALDANMAZ	ÇALIŞKANELLİ	M. Fethi GÜLLÜ	Müslüm Murat MARAŞ	Ergin TARI
Cihan Taylan AKDAĞ	Mehmet Alper ÇANKAYA	Adil GÜLTEKİN	Halit Cenani MERTOL	Yüksel TAŞDEMİR
Bekir AKGÖZ	Serdar ÇARBAŞ	Fırat GÜMGÜM	Mahmoud MIARI	Ali Şahin TAŞLIGEDİK
Cem AKGÜNER	Dilay ÇELEBİ	Gürkan GÜNAY	Mehmet Murat MONKUL	Hasan TATLI
Fevziye AKÖZ	Tevfik Kutay	Taylan GÜNAY	Nihat MOROVA	Gökmen TAYFUR
Erkan AKPINAR	ÇELEBİOĞLU	Murat GÜNAYDIN	Yetiş Şazi MURAT	Serdal TERZİ
Muhammet Vefa	Ahmet Ozan ÇELİK	Samet GÜNER	Sepanta NAİMİ	Berrak TEYMUR
AKPINAR	Oğuz Cem ÇELİK	Burcu GÜNEŞ	Salih OFLUOĞLU	Hüseyin Onur TEZCAN
Atakan AKSOY	Ozan Cem ÇELİK	Oğuz GÜNEŞ	Fuad OKAY	Mesut TİGDEMİR
Hafzullah AKSOY	Hilmi Berk ÇELİKOĞLU	Mehmet Şükri GÜNEY	Didem OKTAY	Salih TİLEYLİOĞLU
Tülay AKSU ÖZKUL	Kemal Önder ÇETİN	Tuba GÜRBÜZ	Derviş Volkan OKUR	Onur Behzat TOKDEMİR
Uğurhan AKYÜZ	Mecit ÇETİN	BÜYÜKKAYIKÇI	Sezan ORAK	Nabi Kartal TOKER
Alper ALDEMİR	Elif ÇİÇEK	Aslı Pelin GÜRGÜN	Engin ORAKDÖĞEN	Ali TOPAL
Cenk ALHAN	Emin ÇİFTÇİ	Tefarruk HAKTANIR	Şeref ORUÇ	Cem TOPKAYA
Gülşay ALTAY	Hüseyin ÇİLSALAR	Soner HALDENBİLEN	Okan ÖNAL	Kamil TOSUN
Sinan ALTIN	Erdal ÇOKÇA	Murat HAMDERİ	Akin ÖNALP	FELEKOĞLU
Adlen ALTUNBAŞ	Semra ÇOMU	Ingo A. HANSEN	Bihra ÖNÖZ	Gökçe TÖNÜK
Yalçın ALVER	Turgay ÇOŞGUN	Umut HASGÜL	Cihan ÖSER	Erkan TÖRE
Mustafa M. ARAL	Atilla DAMCI	Emre HASPOLAT	Yiğit ÖZÇELİK	Kemal Dingen TÖZER
Davut ARDITI	Yakup DARAMA	Mustafa HATİPOĞLU	Gökhan ÖZDEMİR	Nursu TUNALIOĞLU
Yalın ARICI	Kutlu DARILMAZ	Lucas HOGAN	Zuhal ÖZDEMİR	Gürsoy TURAN
Deniz ARTAN İLTER	Tayfun DEDE	Zeynep İŞİK	Murat ÖZEN	Hasan Nuri
Deepankar Kumar	Cem DEMİR	Sabriye Banu İKİZLER	Pelin ÖZENER	TÜRKMEÑOĞLU
ASHISH	Selçuk DEMİR	Okan İLHAN	Ekin ÖZER	Cüneyt TÜZÜN
Ayşegül ASKAN	Uğur DEMİR	Erol İSKENDER	Hasan ÖZER	Eren UÇKAN
GÜNDOĞAN	Ender DEMİREL	Medine İSPİR ARSLAN	Hakkı Oral ÖZHAN	Latif Onur UĞUR
Ali Osman ATAHAN	Mehmet Cüneyd	Recep İYİŞAN	Mehmet Fatih ÖZKAL	Mehmet Baran ULAK
Hakan Nuri ATAHAN	DEMİREL	Nuray Işık KABDAŞLI	Zeynep Huri ÖZKUL	Dilay UNCÜ
Güzide ATASOY ÖZCAN	Murat DİCLELİ	Volkan KALPAKÇI	BİRGÖREN	Berna UNUTMAZ
Ali Osman ATEŞ	Seyyit Ümit DİKMEN	Muhammet KAMAL	Aşkın ÖZOCAK	Mehmet UTKU
Özgür AVŞAR	Ahmet Anıl DİNDAR	Reza KAMGAR	Sadık ÖZTOPRAK	Volkan Emre UZ
Cem AYDEMİR	Mustafa DOĞAN	Hakan Alper	Turan ÖZTURAN	İbrahim Mert UZUN
Metin AYDOĞDU	Marco DOMANESCHİ	KAMİLOĞLU	Gözde Başak ÖZTÜRK	Deniz ÜLGEN
Ülker Güner BACANLI	Gökhan DÖK	Elif Çağda KANDEMİR	Mustafa ÖZUYSAK	Mehmet Barış Can
Selim BARADAN	Cemalettin DÖNMEZ	Tanay KARADEMİR	Tolga Yılmaz	ÜLKER
Eray BARAN	İsmail DURANYILDIZ	Hüseyin Faruk	ÖZÜDOĞRU	Yurdanur ÜNAL
Özgür Uğraş BARAN	Cengiz DÜNDAR	KARADOĞAN	Atilla ÖZÜTOK	Ali ÜNAY
Türkey BARAN	Nurhan ECEMİŞ ZEREN	Ümit KARADOĞAN	Nilüfer ÖZYURT	Cüneyt VATANSEVER
Efe BARBAROS	Özgür EKİNCİOĞLU	Mustafa Erkan	ZİHNİOĞLU	Ahmet YAKUT
Bekir Oğuz BARTIN	Serkan ENGİN	KARAGÜLER	Erhan Burak PANCAR	Erkut YALÇIN
Zeynep BAŞARAN	Murat Altuğ ERBERİK	Halil KARAHAAN	Seval PINARBAŞI	Aslı YALÇIN
BUNDUR	Ali ERCAN	Oğuz KAYABAŞI	ÇUHADAROĞLU	Mustafa Sinan YARDIM
Mustafa Gökçe	Barış ERDİL	İlker KAZAZ	Elişan Filiz PİROĞLU	Anıl YAZICI
BAYDOĞAN	Sinan Turhan ERDOĞAN	Saeid KAZENZADEH	Bora POLATSU	Shehata E. Abdel
Cüneyt BAYKAL	Şakir ERDOĞDU	AZAD	RAHEEM	Gökhan YAZICI
Mehmet BERİNGEN	Esin ERGEN PEHLEVAN	Mustafa Kubilay	KELEŞOĞLU	Halit YAZICI
Katrin BEYER	Yusuf Çağatay ERŞAN	Elçin KENTEL	Selçuk SAATÇI	Cem YENİDOĞAN
Niyazi Özgür BEZGİN	Kağan ERYÜRÜK	Hadi	Selman SAĞLAM	Mehmet YETMEZ
Ozan BİLAL	Esra Ece ESELLER	KHANBAZADEH	Mehmet SALTAN	İrem Zeynep YILDIRIM
Senem BİLİR	BAYAT	Ufuk KIRBAŞ	Altuğ SAYGILI	Berivan YILMAZER
MAHÇİÇEK	Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ	Serdar SELAMET	Ufuk KIRBAŞ	POLAT
İlknur BOZBEY	Burak FELEKOĞLU	Veyssel Şadan Özgür	Nuri SERTESER	Ercan YÜKSEL
Ali BOZER	Mahmut FIRAT	KIRCA	Halil SEZEN	Yeliz YÜKSELEN
Mehmet Bakır BOZKURT	Onur GEDİK	Mehmet Amil	Alper SEZER	AKSOY
Zafer BOZKUŞ	Abdullah GEDİKLİ	KIZILASLAN	Metin SOYCAN	Ahmet Şahin ZAİMOĞLU
Zekai CELEP	Ergun GEDİZLİOĞLU	Esat Selim KOCAMAN	Kurtuluş SOYLUK	Abdullah Can ZÜLFİKAR
Cihan CENGİZ	Ahmet Talha GEZGİN	Salih KOÇAK	Serdar SOYÖZ	
Halim CEYLAN	Sadık Can GİRGIN	Baha Vural KÖK	Rifat SÖNMEZ	
Joao Ramoa CORREIA	Zehra Canan GİRGIN	Mete KÖKEN	Tayfun Altuğ SÖYLEV	

CONTENTS

OBITUARY - Prof. Dr. GÜNAY ÖZMEN

RESEARCH ARTICLE

Investigation of Rutting and Low Temperature Cracking Behavior of Reactive Ethylene Terpolymer and Waste Cooking Oil Modified Bitumen..... 1
Aytuğ KUMANDAŞ, Erman ÇAVDAR, Neslihan ŞAHAN, Baha Vural KÖK, Erhan Burak PANCAR, Şeref ORUÇ

Effect of Freeze-Thaw on CBR in Soils with Different Gradation and Mineralogy..... 27
Murat GÜLEN, Ayşenur ASLAN FİDAN, Ahmet Serdar KÖŞELİ, Havvanur KILIÇ

Seismic Assessment of Electrical Equipment in Power Substations: A Case Study for Circuit Breakers..... 49
Kaan KAATSIZ, Fırat Soner ALICI, Murat Altuğ ERBERİK

Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazık Davranışının Orijinal Bir Kazık Yükleme Deneyi ve İmalat Yaklaşımı ile İncelenmesi 69
Orhan Esat İNANIR, Aykut ŞENOL, Mehmet M. BERİLGİN

Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi..... 95
Gürçağ ÖZGÜRER

TECHNICAL NOTE

Yapı Üretim Süreçlerinde BIM ve VR Uygulamalarının Entegrasyonunun Değerlendirilmesi..... 117
Gülce BOZKURT, Selahattin ERSOY, Enes YAŞA

OBITUARY - Prof. Dr. GÜNAY ÖZMEN



It is with deepest sorrow that we announce the passing of our dear friend and colleague Prof. Dr. Günay Özmen on April 11, 2024.

Prof. Özmen served on the Editorial Board of the Turkish Journal of Civil Engineering (TJCE, formerly Teknik Dergi) for approximately twenty years and on the TJCE Advisory Board established in 2021. He also served as a reviewer for a number of manuscripts considered for publication and edited

the English abstracts of the Turkish manuscripts accepted for publication for a period.

Prof. Özmen was born in 1934 in İstanbul. After completing his secondary education in Kabataş Boys High School, he studied civil engineering in the Faculty of Civil Engineering at İstanbul Technical University. Following his graduation in 1956, he joined the same faculty as an assistant in the Chair of Structural Mechanics. He received his PhD in 1963, became associate professor in 1968 and full professor in 1973. He was awarded a fellowship by the Research Council of Norway in 1963, upon which he carried out post-doctoral work in Norway and England. He retired from the university in 1984, but despite his intentions to conclude his academic activities, he could never detach himself completely from the academic world. During his period of engineering practice after retirement, he continued his research and publication activities, besides lecturing various courses on computer applications in the Civil Engineering and Architectural programmes of the Graduate School of İstanbul Technical University.

Prof. Özmen authored close to twenty publications, including books, theses, and lecture notes mainly in two areas-structural and dynamic analyses of multistorey building structures and computer applications in engineering-besides dozens of technical papers he published locally and internationally.

While acting as the Coordinator of Computational Activities at Ata İnşaat, a leading construction firm, Prof. Özmen contributed to the successful completion of the Atatürk Dam. Upon completion of the dam, he left Ata İnşaat in 2000 and resumed his software development activities in Bilsar, a pioneering data processing company Prof. Özmen and a few colleagues had founded in 1975.

Besides teaching, Prof. Özmen assumed responsibility in various administrative tasks in İstanbul Technical University, such as Director of the Computer Centre, Deputy Dean of the Faculty of Civil Engineering, Executive Board Member of the İTÜ Development Foundation, Executive Board Member of the İTÜ Athletic Club, and President of the İTÜ Athletic Club Foundation.

Furthermore, he contributed to several activities in the Turkish Chamber of Civil Engineers. Apart from his participation in the TJCE Editorial Board, Prof. Özmen took part in the Professional Engineering Committee and delivered numerous lectures within the framework of continuing education.

Prof. Özmen was a fine gentleman who combined traditional İstanbul manners with a sharp sense of humour. He was one of the very few gentlemen I called “ağabey”, a term which implies respect besides friendliness.

When I first met him in the early seventies, İstanbul Technical University had the traditional “chair system” where head of the chair was a “demigod” while we had rather liberal academic relations in the Middle East Technical University. Before the YÖK (Higher Education Council, founded 1982) era, Turkish universities did not have much interaction with each other, neither academically nor socially. Conference trips were the main occasion for the academia to develop amicable ties. Indeed, I met Günay Ağabey on one of these trips.

The following anecdote is an example of Prof. Özmen’s sense of humour and an indication of the unwritten rules of academic life in Turkey half a century ago. On the occasion of the 1978 European Earthquake Engineering Conference, we had an enjoyable and adventurous coach tour to Dubrovnik. It was Prof. Dr. Rifat Yazar who usually organised these trips where I had a chance to establish a number of valuable friendships. This elderly gentleman was a senior professor, a polite yet influential personality, a kind of godfather of the Turkish earthquake engineering community at the time. He had good contacts with the earthquake engineering circles in Eastern Europe. He was the natural leader of the Turkish delegation in the earthquake engineering conferences. During our trip to Dubrovnik, Prof. Yazar instructed the driver to make a detour and follow a different route (*suggested by his wife Hadiye Hanım, so says gossip*). Displeased with the change, Günay Ağabey told me: “Ask him to stick to the original route, it is shorter and more pleasant.” I was surprised. “Who am I?” I asked. “Merely an outsider, a humble associate professor from another university. Why don’t you tell him yourself?” He replied with a mischievous smile: “That’s the point, mate. He is my senior, I dare not to challenge his decision, but being a stranger, you can very well do it!” Naturally, I turned down the request.

The Editorial Board acknowledge the invaluable contributions of Prof. Dr. Günay Özmen to the Turkish Journal of Civil Engineering and wish to extend their sincerest condolences to his family.

Dr. Tuğrul Tankut, Professor Emeritus
On behalf of the Editorial Board

Investigation of Rutting and Low Temperature Cracking Behavior of Reactive Ethylene Terpolymer and Waste Cooking Oil Modified Bitumen

Aytuğ KUMANDAŞ^{1*}
Erman ÇAVDAR²
Neslihan ŞAHAN³
Baha Vural KÖK⁴
Erhan Burak PANCAR⁵
Şeref ORUÇ⁶



ABSTRACT

With sustainability being the most crucial issue of recent years, the use of waste materials in bitumen modification has been increasing and becoming widespread. In this experimental study, it was aimed to investigate the high- and low-temperature behavior of bitumen samples modified with waste cooking oil (WCO), reactive ethylene terpolymer (RET), and polyphosphoric acid (PPA). Accordingly, the multiple stress creep and recovery (MSCR) test and the bending beam rheometer (BBR) test were conducted. Depending on the increasing WCO ratio, the J_{nr} , $R\%$, ΔT_c , and λ parameters of modified bitumens were examined in detail. It was observed that with increasing WCO ratio, the J_{nr} value increased, and elastic recovery and stiffness decreased. In addition, it was determined that this composite-modified bitumen is resistant to heavy traffic loads and has sufficient flexibility at low temperatures.

Keywords: Reactive ethylene terpolymer, waste cooking oil, bitumen modification, MSCR, BBR.

Note:

- This paper was received on August 1, 2023 and accepted for publication by the Editorial Board on January 30, 2024.
- Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2024.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1335810>

1 Ondokuz Mayıs University, Department of Civil Engineering, Samsun, Türkiye
aytug.kumandas@omu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1765-9963>

2 Karadeniz Technical University, Department of Civil Engineering, Trabzon, Türkiye
ermancavdar@ktu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-0238-5245>

3 Kırşehir Ahi Evran University, Department of Civil Engineering, Kırşehir, Türkiye
neslihan.sahan@ahievran.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3904-6527>

4 Fırat University, Department of Civil Engineering, Elazığ, Türkiye
bvural@firat.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7496-6006>

5 Ondokuz Mayıs University, Department of Civil Engineering, Samsun, Türkiye
epancar@omu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7958-3434>

6 Karadeniz Technical University, Department of Civil Engineering, Trabzon, Türkiye
oruc@ktu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-5788-890X>

* Corresponding author

Nomenclature

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society of Testing and Materials
BBR	: Bending beam rheometer
DSR	: Dynamic shear rheometer
Jnr	: Creep compliance
MSCR	: Multiple stress creep and recovery
m-value	: Creep rate
PAV	: Pressure aging vessel
PG	: Performance grade
PMB	: Polymer-modified bitumen
PPA	: Polyphosphoric acid
R%	: Percent recovery
RET	: Reactive ethylene terpolymer
RTFO	: Rolling thin-film oven
WCO	: Waste cooking oil
G' , G'' , G^*	: Storage modulus, Loss modulus, Complex modulus
$G^* / \sin \delta$: Rutting parameter
$G^* \cdot \sin \delta$: Fatigue parameter
ΔT_c	: Difference between critical temperatures by $S(t)$ and m-value, delta T_c
$S(t)$: Creep stiffness
δ	: Phase angle
λ	: $S(t)$ divided by m-value, lambda

1. INTRODUCTION

Bituminous pavements have been used in flexible pavements for many years. Although bituminous pavements performed adequately in the early years of their use, they were subject to stress over time due to increasing traffic volumes [1, 2]. In other words, population growth and the development of living standards have led to an increase in traffic loads, resulting in pavement deterioration. This has created a need to improve the performance of asphalt pavements. One of the methods used to increase the performance of asphalt pavements is bitumen modification [3]. Polymers are additives frequently used as bitumen modifiers and are generally divided into elastomers and plastomers [4-7].

In some studies, reactive polymers have been included in the polymer additive classification as a third group [8-10]. These polymers contain functional groups that are assumed to bind with bitumen molecules. Maleic anhydride and thermoplastic elastomers functionalized with ethylene-based copolymers containing epoxy rings are examples of this group [10]. The second is commercially available as random terpolymers of ethylene, glycidyl methacrylate, and an ester group. Based on their composition, they are often called reactive ethylene terpolymers (RETs) [10].

A terpolymer is a chemical substance that is produced when a polymer has a molecular structure that is primarily or entirely made up of several bonded or comparable units (such as a complex resin). Terpolymers are created when three distinct monomers are

copolymerized. It has been stated in many studies that RET has good compatibility with bitumen [8-11].

Recently, some researchers have drawn attention to an environmentally friendly approach by using waste materials in bitumen modifications. Accordingly, rubbers [12], plastics [13], oils [14], and various waste materials [15, 16] are used in bitumen modification. Waste cooking oils (WCOs) are used as rejuvenators or softeners of bitumen. Additionally, the low-temperature performance of bitumen increases with the addition of the WCO [17].

As known, the performance of base and modified bitumen in pavement is simulated by experimental methods in the laboratory environment. In this context, dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) tests are widely used to determine the high-temperature and low temperature performance of bitumen, respectively. Additionally, with the data obtained from these tests, the Performance Grade (PG) of bitumen can be determined, which indicates the maximum and minimum temperatures the pavement will serve in the field [18].

Over time, just as there was a need to improve the properties of bitumen, there was also a need to enhance experimental methods used to characterize bitumen. In particular, in studies conducted with accelerated road tests, it has been stated that the rutting parameter obtained from the DSR test has a very low correlation with reality [19]. It is thought that this is because bitumen behaves in the linear elastic region when tested with DSR. On the other hand, rutting is associated with nonlinear behavior. Nevertheless, this parameter was well correlated with the unmodified bitumen. However, with the widespread use of bitumen modification, it has begun to be questioned. Therefore, the AASHTO M 332 [20] standard has been developed to overcome the disadvantages. Accordingly, the multiple stress creep and recovery (MSCR) tests have been added to the PG system to evaluate the rutting behavior of bitumen independent of the modification type.

Similarly, it is also a matter of debate in the literature which of the two different parameters (creep stiffness, $S(t)$ and creep rate, m -value) obtained from the BBR test should be used when determining the low-temperature grade of bitumen in the PG system [21]. In this regard, new parameters such as ΔT_c [22] and λ [23], where both parameters of the BBR test are used together, have been developed. It is thought that evaluating the low temperature behavior of bitumen over these parameters will give more realistic results from the low temperature performance of the PG system.

In a previous study by Kumandaş et al. [24], PG of RET + polyphosphoric acid (PPA) + WCO-modified bitumen was determined according to the Superpave specification. As a result, they stated that both high and low-temperature performance of base bitumen could be improved by adding RET+PPA+WCO additive combination. Furthermore, they observed that the low-temperature performance also increased with increasing WCO ratio in the additive combination. Considering the benefits of this additive combination, it has also been used in this study. On the other hand, it was considered that both low- and high-temperature performance should be examined in detail with different methodologies, considering that the investigation based on the PG system would be insufficient, as stated before. To the best of the authors' knowledge, it is believed that there is no study in which the rutting behavior of RET and WCO-modified bitumen is examined in detail with the MSCR test. Thus, this study was undertaken to fill this gap in the literature. Furthermore, this study gives pavement

engineers an understanding of the impact of the WCO utilization in bitumen modification on pavement performance.

The objective of this research is to examine the impact of varying ratios of WCO addition to 1.5% RET and 0.2% PPA modified bitumen on the rutting behavior at high temperatures and cracking behavior at low temperatures. The study utilized MSCR and BBR tests to evaluate the resistance against rutting and low-temperature cracking, respectively.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Preparation of Modified Bitumen

50/70 penetration-graded bitumen obtained from the Kırıkkale oil refinery was used as the base bitumen. This penetration grade was chosen based on other studies in the literature [25, 26]. Elvaloy® RET 5160 was used as the polymer and supplied by Komsa company in Türkiye. 1.5% RET was used in polymer-modified bitumen (PMB), and this ratio was also chosen based on other studies in the literature [27, 28]. The physical properties of base bitumen and RET are given in Tables 1 and 2, respectively. PPA has been suggested for a quicker reaction between bitumen and RET [9, 29]. Accordingly, PPA was used as a catalyst in PMB, and the added PPA ratio was determined as 0.2% based on the studies in the literature [30, 31]. On the other hand, the WCO used in this study was only filtered and obtained from Degam company in Türkiye. In order to investigate the effect of WCO addition on the PMB, different ratios (2-8%, by 2% increments) of WCO were used.

Table 1 - Physical properties of base bitumen.

Physical Properties	Value	Standard
Penetration	52 dmm	ASTM D5
Softening Point	48 °C	ASTM D36
Ductility	150+ cm	ASTM D113
Elastic Recovery	%10.82	ASTM D6084
Flash Point	332 °C	ASTM D92
Fire Point	370 °C	ASTM D92
Specific Gravity	1.042 g/cm ³	ASTM D70

Table 2 - Physical characteristics of Elvaloy® RET 5160.

Characteristics	Value	Standard
Tensile strength	3653 psi	ASTM D638
Elongation at break	%718	ASTM D638
Density	0.95 g/cm ³	ASTM D792
Melting point (DSC)	80 °C	ASTM D3418
Freezing point (DSC)	55 °C	ASTM D3418
Highest processing temperature	220 °C	-

During the preparation of the modified bitumen, the base bitumen was first heated in an oven at 180°C until it became fluid and then placed on the heater plate of the mechanical mixer. To ensure a uniform distribution of heat and asphaltene-maltene components in the base bitumen, a thorough mixing process was carried out at 180 °C for 1-2 minutes at a speed of 1000 rpm prior to the addition of any additives. Then, RET was added and mixed for 2 hours at 1000 rpm at 180°C. After this period, PPA was added and mixed for 30 minutes under the same conditions. Prepared samples were left in an oven at 180°C for a 90-minute curing process. Thus, the preparation process of the PMB was completed. These PMB preparation conditions were implemented based on other studies in the literature [24, 32].

Once the PMB samples were prepared, composite-modified bitumen samples were prepared by adding WCO to the PMB. Accordingly, to begin with, PMB samples were heated up to 150°C. Subsequently, WCO was added and mixed at 1000 rpm for 30 minutes. Thus, the preparation process of the modified bitumen samples used in the study was completed, and the coding of the related samples is given in Table 3.

Table 3 - Representation of samples.

Sample Content	Code
AC 50/70 bitumen	Base
AC 50/70 bitumen + 1.5% RET + 0.2% PPA	PMB
AC 50/70 bitumen + 1.5% RET + 0.2% PPA + 2% WCO	2W
AC 50/70 bitumen + 1.5% RET + 0.2% PPA + 4% WCO	4W
AC 50/70 bitumen + 1.5% RET + 0.2% PPA + 6% WCO	6W
AC 50/70 bitumen + 1.5% RET + 0.2% PPA + 8% WCO	8W

2.2. Aging of Bitumen Samples

In the construction of asphalt pavements, bitumen is exposed to high temperatures during mixing with aggregates, hauling, paving, and compaction. These high temperatures cause a change in the structure of the bitumen, which is known as short-term aging. On the other hand, during its service life, bitumen is subjected to repeated vehicle loads and climatic conditions. This effect also causes changes in the internal structure of the bitumen and is called long-term aging [18]. Generally, the aging phenomenon has a vital impact on the performance of bitumen. Therefore, short- and long-term aging of bitumen has also been considered in the PG system.

In the PG system, two methods are used to simulate the aging of bitumen: rolling thin-film oven (RTFO) and pressure aging vessel (PAV) tests. In the RTFO test, bitumen weighing 35±0.5 is placed in tubes specified in the ASTM D2872 [33] standard and aged for 85 minutes at 163 °C. Besides, following the ASTM D6521 [34] standard in the PAV test, RTFO-aged bitumen weighing 50±0.5 g placed in test containers is aged for 20 hours at 100°C under 2.10 MPa pressure.

2.3. Dynamic Shear Rheometer (DSR) Test

Bitumen shows viscous behavior at high temperatures and long loading periods, whereas it shows elastic behavior at low temperatures and short loading periods. It shows viscoelastic behavior between low and high temperatures, a combination of these two behaviors. The DSR test, conducted following the AASHTO T 315 [35] standard, is widely used to investigate the viscoelastic behavior of bitumen. This test determines the elastic (storage modulus, G') and viscous (loss modulus, G'') components of bitumen as well as the phase angle (δ), which is a measure of the lag in the response of the material to the applied shear stress (τ). In the PG system, the complex shear modulus (G^*), which is the resultant of elastic and viscous components, and δ were used as the fundamental parameters to evaluate the performance of the bitumen. In fact, the limit values of the specification were determined based on these parameters.

In the PG system, the $G^*/\sin \delta$ value is associated with the rutting of the pavement at high temperatures, and it is specified to be at least 1.0 kPa for unaged bitumen and at least 2.2 kPa for RTFO-aged bitumen. Additionally, $G^* \cdot \sin \delta$ value was associated with the fatigue cracking formed at intermediate temperatures, and it is specified to be at most 5000 kPa for PAV-aged bitumen [36].

2.4. Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Test

The AASHTO M 332 [20] standard, which can be considered as a technically advanced version of the PG system, is believed to better characterize the performance-related properties of bitumen at elevated temperatures than the PG standard [37]. Through the MSCR test, which is the fundamental test of the relevant standard, the behavior of bitumen can be examined both at high strains and under repeated loading. This eliminates the problem of lack of complete activation of the polymer networks of PMBs, which was investigated at low strains in the DSR test [19]. Therefore, more realistic investigations of the behavior of PMB can be performed.

MSCR test is carried out, following the AASHTO T 350 [38] standard, at the high-temperature level that the pavement will be exposed to; in other words, the temperature remains constant. If the high-temperature performance requirement of bitumen is PG 58 according to the Superpave method, tests are carried out at 58 °C. After determining the test temperature, shear stresses are applied to the bitumen, and performance evaluation is made with the stress and strain relations. Stress is applied to the bitumen for 1 second, and strains are allowed to recover for 9 seconds. A total of 10 loading periods, one of which is 10 seconds, are applied (Figure 1). Besides, the effect of stress differences is evaluated by performing the test at two different stress levels: 0.1 and 3.2 kPa. The first ten periods applied at a stress of 0.1 kPa are called the conditioning phase. The evaluation is made by taking the average values obtained from the following ten periods.

In this test, two main parameters are calculated by using Equations (1), (2), (3), and (4). These parameters are nonrecoverable creep compliance (J_{nr}) and percent recovery (R%). Studies conducted in accelerated loading facilities showed that the J_{nr} parameter is highly correlated with rutting in pavements [19]. On the other hand, the R% parameter is an important

parameter related to the elastic response of bitumen and indicates how much of the strain that occurs after loading can be recovered.

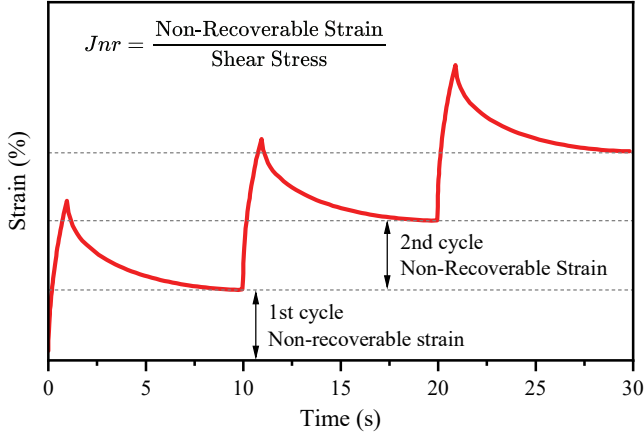


Figure 1 - Strain-time relationship in MSCR test (redrawn based on [39]).

$$Jnr_{0.1} = \frac{\sum_{n=11}^{20} Jnr(0.1, N)}{10} \quad (1)$$

$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_{n=21}^{30} Jnr(3.2, N)}{10} \quad (2)$$

$$R\%_{0.1} = \frac{\sum_{n=11}^{20} R\%(0.1, N)}{10} \quad (3)$$

$$R\%_{3.2} = \frac{\sum_{n=21}^{30} R\%(3.2, N)}{10} \quad (4)$$

where, $Jnr_{0.1}$ is the nonrecoverable creep compliance at 0.1 kPa stress level, $Jnr_{3.2}$ is the nonrecoverable creep compliance at 3.2 kPa stress level, $R\%_{0.1}$ is the percent recovery at 0.1 kPa, and $R\%_{3.2}$ is the percent recovery at 3.2 kPa.

Table 4 - Traffic-related grading in the MSCR system [20].

Grading	Traffic Conditions		Jnr _{3.2} (kPa ⁻¹)
	Volume (ESALs)	Speed (km/h)	
Standard traffic, S	< 3x10 ⁶	> 70	< 4.5
Heavy traffic, H	> 3x10 ⁶	< 70	< 2.0
Very heavy traffic, V	> 10x10 ⁶	< 20	< 1.0
Extremely heavy traffic, E	> 30x10 ⁶	< 20	< 0.5

In the AASHTO M 332 [20] standard, a traffic grade is defined in addition to the temperature grades in the PG system by establishing a relationship between bitumen performance and the traffic conditions to which the pavement is exposed. Four different grades are specified as standard (S), heavy (H), very heavy (V), and extremely heavy (E). Between traffic conditions of these grades and nonrecoverable creep compliance at a stress level of 3.2 kPa ($Jnr_{3.2}$), the relationship given in Table 2 was established. It is clear from Table 2 that the specification limits are set for the $Jnr_{3.2}$ value of the bitumen, and as the $Jnr_{3.2}$ value decreases, the traffic conditions that the pavement can withstand become more severe.

It is possible to evaluate the stress sensitivity of bitumen through MSCR tests conducted at different stress levels. Accordingly, the AASHTO M 332 [20] specification defines the parameter Jnr_{diff} in this regard. Additionally, besides the $Jnr_{3.2}$ limits for traffic classification, an upper value for the Jnr_{diff} parameter has also been set. Therefore, it is stated that the Jnr_{diff} value calculated through Equation (5) can be at most 75%. In this way, the stress sensitivity of the bitumen is intended to be kept below a certain level.

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} \cdot 100 \tag{5}$$

Another characteristic of bitumen that can be examined by the MSCR test is the presence of a polymer network. Based on this aspect, in the AASHTO M 332 [20] standard, a relationship has been established between R% and Jnr values. Accordingly, a curve is defined in the R%-Jnr graph, and the position of the bitumen value with respect to this curve is examined. It was stated that a bitumen value above this curve can indicate the presence of an elastomeric polymer in the bitumen sample [20]. Subsequently, Anderson [40] suggested that R% should be taken as 55% for the part of the curve in the standard where Jnr is less than 0.1. In another study, Salim et al. [41] proposed that the relation between R%-Jnr should be represented by another relation according to the sample set in their study. The curves in the standard and the literature are given together in Figure 2. The presence of a polymer network in the bitumen samples in this study was analyzed using this figure.

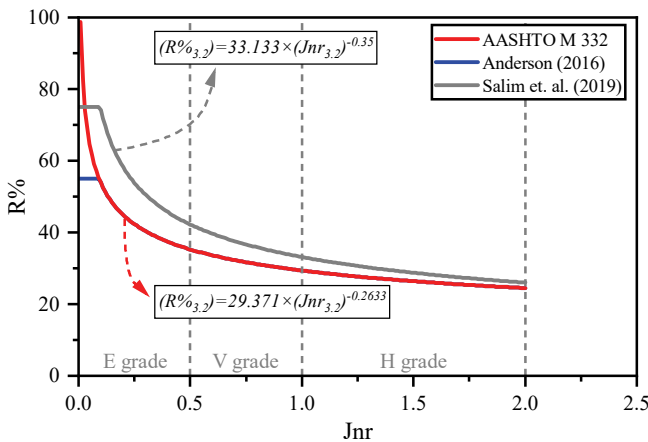


Figure 2 - $R\%_{3.2}$ - $Jnr_{3.2}$ relationship.

2.5. Bending Beam Rheometer (BBR) Test

BBR is a test applied to PAV-aged bitumen samples according to ASTM D6648 [42] standard and is associated with the low temperature performance of asphalt pavements. Two basic bitumen-related parameters are obtained from the test: creep stiffness ($S(t)$) and creep rate (m-value). The deflection of a bitumen beam of a given size at a given time (t) is measured, and the $S(t)$ of the bitumen is calculated using Equation (6) from classic beam theory. On the other hand, the creep rate is related to the change of $S(t)$ with time (t). For practical reasons, the software of the BBR device establishes a logarithmic relationship between $S(t)$ and t in the form of Equation (7). The m-value, which is the slope of the $\log S(t) - \log t$ graph at a given time t , can be calculated using Equation (8), which is the derivative of Equation (7) with respect to $\log t$.

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (6)$$

$$\log S(t) = A + B \log t + C(\log t)^2 \quad (7)$$

$$m(t) = \left| \frac{d[\log S(t)]}{d(\log t)} \right| = B + 2C \log t \quad (8)$$

where: $S(t)$ is the flexural creep stiffness at time t in MPa, $m(t)$ is the creep rate at time t , P is the measured test load in mN, L is the span length in mm, h is the depth of the specimen in mm, $\delta(t)$ is the deflection of test specimen at time t , and A , B , C are regression coefficients.

At low temperatures where the BBR test is conducted, the bitumen stiffens and loses its elasticity. Thus, bitumen with high stiffness at low temperatures is more prone to crack formation [18]. Therefore, in the Superpave bitumen specification, an upper limit of 300 MPa is imposed on the $S(t)$ to keep the bitumen stiffness below a certain level [36]. However, it is not entirely appropriate to evaluate the susceptibility of bitumen to crack formation at low temperatures solely based on its creep stiffness. Because bitumen is a viscoelastic material, it can relax the applied stress [21]. This stress relaxation ability is associated with the m-value in the BBR test. A relatively high m-value means that the stiffness of bitumen changes rather quickly and hence indicates better stress relaxation ability [21]. Considering this fact, a lower limit of 0.300 for the m-value was imposed in the Superpave bitumen specification to ensure that the bitumen has a sufficient stress relaxation feature [36]. Thus, bitumen with an m-value above the limit is assumed to be capable of quickly dissipating the stresses caused by the thermal changes.

When determining the low-temperature PG of the bitumen, the limit values given in the specification for the two parameters obtained from the BBR tests are considered. However, since the PG specification was introduced in the 1990s, it has been a matter of debate whether the low-temperature grade is governed by the $S(t)$ or the m-value [21]. This is related to whether the behavior of the bitumen is $S(t)$ -controlled or m-controlled. $S(t)$ -controlled bitumen reaches the 300 MPa limit at temperatures higher than the m-value limit. Conversely, m-controlled bitumen reaches the 0.300 limit at a higher temperature than the $S(t)$ limit [21]. Based on this information, various studies have been carried out, and different parameters

have been produced in which both $S(t)$ and m-value are considered simultaneously. Among these parameters, ΔT_c and λ , which can be calculated quite practically, have been included in this study. Thus, the behavior of the prepared samples at low temperatures was examined in detail through different parameters.

The λ parameter was first used by Liu et al. in the performance evaluation of crumb rubber-modified bitumen [23]. By simultaneously using the two parameters obtained from the BBR test as $\lambda = S(t)/m\text{-value}$, they performed a low-temperature performance assessment. Accordingly, they stated that as the λ value decreases, the low temperature performance of bitumen increases. Subsequently, Liu et al., in another study [43] on establishing a relationship between low-temperature performance parameters, determined the existence of a physical equation between creep stiffness and m-value in the form of $m\text{-value}/S(t)$. Based on this established relation, they stated that the parameter $m\text{-value}/S(t)$ could be used as a promising material property to evaluate the low temperature performance of bitumen. Furthermore, they noted that this parameter is particularly suitable for bitumen where it is challenging to select a low-temperature performance grade based on the m-value or $S(t)$.

In the two different studies mentioned above, the researchers established two inverse equations, one of which is $S(t)/m\text{-value}$ and the other is $m\text{-value}/S(t)$, between the low-temperature parameters. This situation, which only changes the result numerically, has caused a dilemma among researchers. Therefore, in some studies [12, 44, 45], $S(t)/m\text{-value}$ value was used to evaluate low-temperature performance, while in others [46-48] $m\text{-value}/S(t)$ value was used. Although this preference does not bring any technical differences, the use of the $\lambda = S(t)/m\text{-value}$ parameter is preferred in this study as it expresses the numerically obtained data in a more easily understandable way. Accordingly, a decrease in λ value indicates an increase in the low temperature performance of bitumen.

The ΔT_c concept was introduced in a project conducted by the Airfield Asphalt Pavement Technology Program (AATP) [49]. This project aimed to develop new methods to determine whether asphalt pavements at airports require maintenance. One of the outputs of the project is the ΔT_c parameter. Subsequently, Anderson et al. [22] presented a summary of the project and described how ΔT_c should be calculated. The ΔT_c value can be defined as the difference between the temperature at which $S(t)$ reaches the limit value and the temperature at which the m-value reaches the limit value. Accordingly, Anderson et al. [22] proposed the use of Equation (9) and Equation (10), obtained by interpolating between two different test temperatures, to calculate the critical temperature values. Therefore, the ΔT_c value can be calculated as in Equation (11).

$$T_{c,S(t)} = T_1 + \frac{(T_1 - T_2) \times (\log 300 - \log S_1)}{\log S_1 - \log S_2} \quad (9)$$

$$T_{c,m} = T_1 + \frac{(T_1 - T_2) \times (0.300 - m_1)}{m_1 - m_2} - 10 \quad (10)$$

$$\Delta T_c = T_{c,S(t)} - T_{c,m} \quad (11)$$

where: S_1 is the creep stiffness at T_1 in MPa, S_2 is the creep stiffness at T_2 in MPa, m_1 is the creep rate at T_1 , m_2 is the creep rate at T_2 , T_1 is the temperature in °C at which $S(t)$ and m-value passes, and T_2 is the temperature at which $S(t)$ and m-value fails in °C.

While m-controlled bitumens have lower ΔT_c values, their stress relaxation ability is limited. Therefore, a relatively low ΔT_c means a high cracking potential [50]. Anderson et al. [22] proposed two different critical ΔT_c values for the regional conditions in their study: a warning limit of -2.5°C and a cracking limit of -5.0°C. Furthermore, the ΔT_c value has also been used to evaluate the hardening of bitumen due to reclaimed asphalt pavement (RAP), reclaimed asphalt shingle (RAS), re-refined engine oil bottoms (REOB) and various additives [50]. Such that, the ΔT_c value has also found its place in standards such as AASHTO PP 78 [51]. Understandably, the concept of ΔT_c is a growing concept that continues to be studied.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Rutting Behavior of Bitumen Samples

Within the framework of this study, MSCR tests were carried out at different temperatures, and the J_{nr} and R% data of the modified bitumen were collected. The variation of the J_{nr} values is given in Figure 3. When the results at 0.1 kPa stress level are examined, it is seen that the addition of WCO to PMB causes an increase in $J_{nr_{0.1}}$ values at all temperatures. This increase is more distinct at high temperatures. Consequently, the rise in WCO reduces the permanent deformation resistance of the bitumen at low stress levels. PMB gives the lowest $J_{nr_{0.1}}$ values at all temperatures and has the highest rutting resistance. Also, 2W and 4W outperform the Base at all temperatures. Similarly, at 3.2 kPa stress level, the addition of WCO to PMB causes an increase in $J_{nr_{3.2}}$ values at all temperatures. At 58°C, this increase in $J_{nr_{3.2}}$ values becomes more pronounced after 6% WCO addition, whereas at 64 °C and 70°C, it becomes more pronounced after 4% WCO addition. As a result, it was found that more than 4% WCO addition makes PMB more susceptible to permanent deformations than Base at high temperatures. Besides, even the addition of 2% WCO increases the $J_{nr_{3.2}}$ values of PMB by approximately two times at all temperatures.

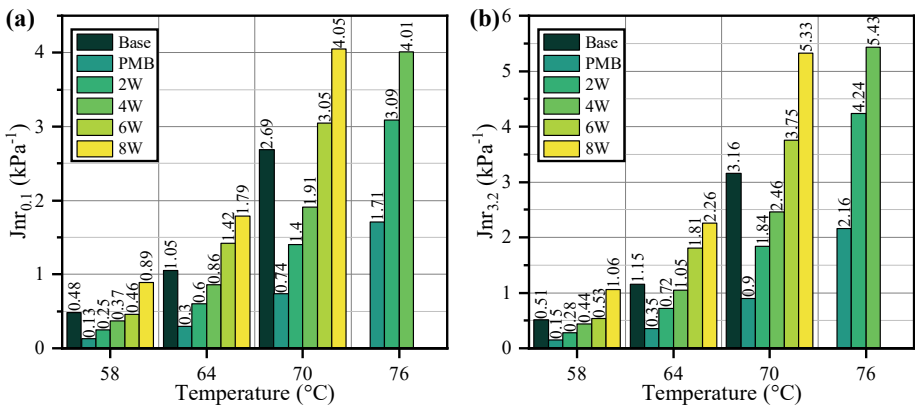


Figure 3 - Change of J_{nr} values with the temperature at different stress levels: (a) 0.1 kPa and (b) 3.2 kPa.

To the authors' knowledge, since MSCR results for RET+WCO modified bitumen cannot be found in the literature, it is impossible to directly compare the results for RET+WCO modified bitumen with any other study in the literature. However, to confirm the compatibility of the findings of this study with the literature, studies with RET-modified bitumen or WCO-modified bitumen were examined separately in the literature, and comparisons were made. Accordingly, it has been shown in the literature that the addition of RET reduces the J_{nr} value of base bitumen [26, 52]. In addition, it has been observed in the literature that the addition of WCO increases the J_{nr} values of both base bitumen and pre-modified bitumen with other additives [53-55].

If the effect of temperature on J_{nr} is examined in Figure 3, it is seen that J_{nr} values increase with increasing temperature, and as expected, the rutting resistance of bitumen decreases. This change in J_{nr} values with the temperature can also be observed in other studies in the literature for RET or WCO-modified binders [26, 52, 56]. Additionally, PMB is least affected by temperature increase. On the other hand, the 2W and 4W samples outperform the Base at all temperatures. Increasing the temperature from 58°C to 70°C increases the J_{nr} values of the samples by 5-6 times.

The variation of the $R\%$ values is given in Figure 4. When the results at 0.1 kPa stress level are examined, it is seen that the addition of WCO to PMB causes a decrease in $R\%_{0.1}$ values at all temperatures. At 58°C, this decrease in $R\%_{0.1}$ values becomes more pronounced after 6% WCO addition, whereas at temperatures higher than 64 °C, it becomes more pronounced after 2% WCO addition. Additionally, the Base gives the lowest $R\%_{0.1}$ values at all temperatures. Besides, the 8W has 2.6, 3.0, and 3.4 times more $R\%_{0.1}$ values than Base at 58°C, 64°C, and 70°C, respectively. Similarly, at 3.2 kPa stress level, the addition of WCO to PMB causes a decrease in $R\%_{3.2}$ values at all temperatures. The $R\%_{3.2}$ of the Base decreases significantly with stress and temperature increase. Also, 8W has approximately four times more $R\%_{3.2}$ value than Base. When the results of the $R\%$ values are compared with the results in the literature, it is seen that the addition of RET increases the $R\%$ [26, 52, 56] of the base bitumen, and the addition of WCO decreases [55]. Therefore, the results obtained from this study are in line with the studies in the literature.

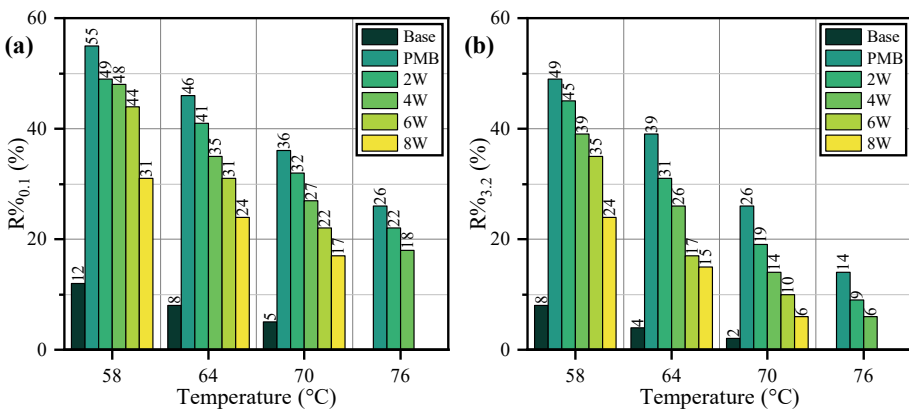


Figure 4 - Change of $R\%$ values with the temperature at different stress levels: (a) 0.1 kPa and (b) 3.2 kPa.

When the effect of temperature on R% is examined in Figure 4, it is seen that the elastic properties of the Base significantly decrease with increasing temperature, similar to the studies in the literature [55]. For bitumen containing WCO, this decrease is not as much as in the Base. The R% values of all binders decrease linearly with increasing temperature. The increase in temperature from 58°C to 76°C causes the R% values of PMB to reduce by 34% and 46% at 0.1 kPa and 3.2 kPa stresses, respectively. These values are 34% and 56% for the 2W. It can be said that the decrease in the elastic properties of bitumen containing WCO with increasing temperature is similar to that of PMB.

With the parameters obtained from the MSCR test, traffic grading of bitumen for different temperatures was done, and the results are given in Table 5. The $G^*/\sin \delta$ values obtained from DSR tests and the corresponding PG are also given in this table. The Base is suitable for very heavy traffic conditions at 58°C and heavy traffic conditions at 64°C. The addition of the RET to the Base makes the bitumen suitable for extremely heavy traffic conditions at 58°C and 64°C, very heavy traffic conditions at 70°C, and standard traffic conditions at 76°C. Adding 2% and 4% WCO to the PMB does not change the traffic grades of the binder at 58°C. Still, adding 2% and 4% WCO to the PMB reduces its traffic grade to very heavy traffic conditions at 64°C. On the other hand, the 6W has the same traffic grade as the Base,

Table 5. High temperature performance grading of the samples.

Sample	Test temp. (°C)	As per AASHTO M 320			As per AASHTO M 332		
		$G^*/\sin \delta$ (kPa)		PG	$Jnr_{3,2}$ (kPa ⁻¹)	Jnr_{diff}	PG
		Unaged	RTFO-Aged				
Base	58	4.854	-	PG64	0.51	6.25	PG58-V
	64	2.090	4.777		1.15	9.52	PG64-H
	70	8.21	-		3.16	17.47	
PMB	58	8.482	-	PG76	0.15	15.38	PG58-E
	64	4.274	-		0.35	16.67	PG64-E
	70	2.214	-		0.9	21.62	PG70-V
	76	1.186	2.268		2.16	26.32	PG76-S
2W	58	5.560	-	PG70	0.28	12.00	PG58-E
	64	2.825	-		0.72	20.00	PG64-V
	70	1.480	2.757		1.84	31.43	PG70-H
4W	58	3.815	-	PG70	0.44	18.92	PG58-E
	64	1.992	-		1.00	22.09	PG64-V
	70	1.087	2.320		2.46	28.80	PG70-S
6W	58	2.631	-	PG64	0.53	15.22	PG58-V
	64	1.425	2.961		1.81	27.46	PG64-H
	70	0.785	-		3.75	22.95	
8W	58	1.555	4.139	PG58	1.06	19.10	PG58-H

while 8W is suitable for traffic conditions one grade lower than the Base. It has been determined that adding more than 6% WCO to PMB falls behind the Base in terms of both high-temperature performance level and traffic grading. In this context, it is recommended that the modification that will withstand very heavy traffic conditions at 64°C and will not adversely affect the performance of the PMB can be obtained by adding 4% WCO to the PMB.

As mentioned in Section 2.4, it is possible to evaluate the stress sensitivity of the bitumen with the MSCR test. The Jnr_{diff} parameter is examined in this regard. From Table 5, it can be checked whether the bitumen samples exceed the specification upper limit of 75%. Accordingly, all the samples in the study were below the specification limit. Therefore, they will exhibit stable behavior by not showing a significant reaction to the stress changes in the traffic. Furthermore, for a relative evaluation of the effect of both temperature and additives on the stress sensitivity of bitumen, Jnr_{diff} data are presented in Figure 5. However, a regular variation between Jnr_{diff} values and additive content was not found. On the other hand, the Base is the most sensitive bitumen to stress changes, and adding WCO to PMB slightly increases the stress sensitivity of the PMB.

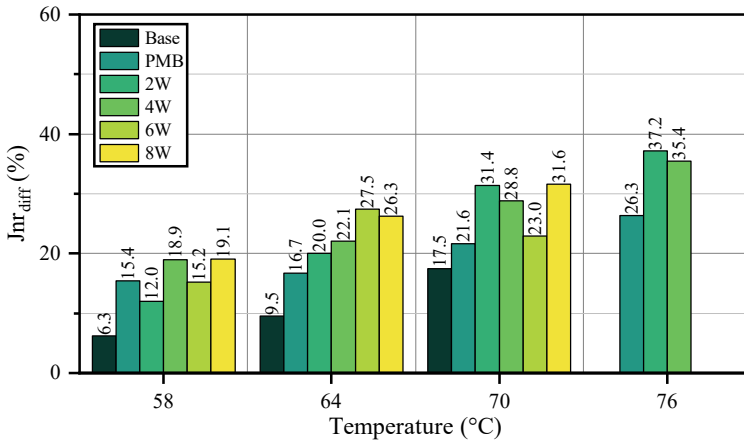


Figure 5 - Change of Jnr_{diff} values at different test temperatures.

As a final evaluation of the data obtained from the MSCR test, the presence of the polymer network was examined. Accordingly, the $Jnr_{3,2}$ and $R\%_{3,2}$ data of bitumen samples at 58°C and 64°C were plotted on two separate graphs for different temperatures. The values for the bitumen samples were compared with the reference curves shown in Figure 2. The graphs of the evaluation are given in Figure 6. When Figure 6 is examined, it is seen that the data of the samples in the study are below the curve proposed by Salim et al. [41] at both temperatures. However, it has been shown in many studies that a polymer network is formed thanks to the chemical interaction of the functional groups in RET with asphaltenes [10, 25, 26]. Therefore, the value of PMB is expected to be above the reference curve. Thus, it is considered that the curve proposed by Salim et al. [41] is not suitable for evaluating the modified bitumen samples in this study. On the other hand, when the data of the bitumen samples are compared with the reference curve proposed by AASHTO M 332 [20] or

Anderson [40], it is seen that the PMB sample remains above the curve for both temperatures. This result meets the expectations and confirms the modification of the bitumen. At 58°C, all the samples except the Base and 8W remained above the curve, indicating good elastic properties. However, it is seen that the polymer network in the binder cannot resist the increase in temperature, and there is a decline in its elastic properties. Adding more than 2% of WCO to the PMB binder in regions with a pavement temperature higher than 58°C will adversely affect the elastic properties. It is expected that adding WCO, which has the effect of softening, to the bitumen will reduce the temperature resistance. As a result, it can be said that the limit temperature value at which the elastic properties begin to deteriorate is 58°C for the WCO-added PMB.

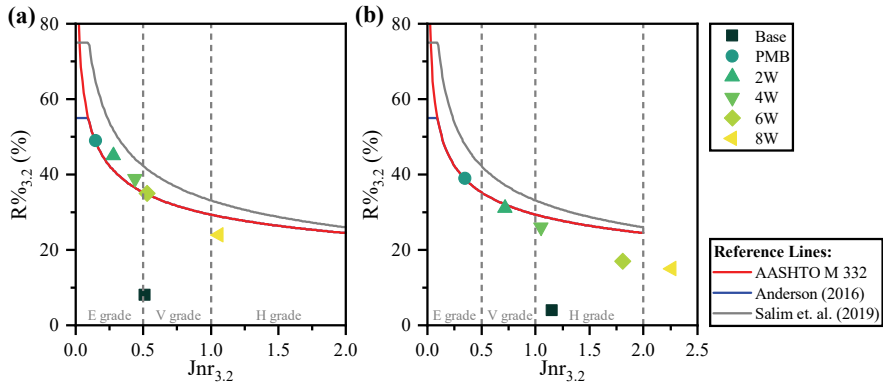


Figure 6 - Comparison of $Jnr_{3,2}$ and $R\%_{3,2}$ values of bitumen samples with reference curves for polymer network detection at different temperatures: (a) 58°C and (b) 64°C.

3.2. Low-temperature Cracking Behavior of Bitumen Samples

The $S(t)$ and m -values of bitumen samples obtained from the BBR test are given in Table 6. When Table 6 is examined, it is seen that the addition of RET to the Base does not significantly affect the low-temperature performance. However, when WCO was added to PMB, the low-temperature performance increased with the increasing amount of WCO. Therefore, WCO-added PMB may be suitable in regions where cold climatic conditions prevail.

In order to investigate the behavior of bitumen at low temperatures in more detail, methods where $S(t)$ and m -value are evaluated simultaneously, are included in this study as mentioned before. Accordingly, at first, the λ values of the bitumen samples at different test temperatures were calculated by dividing the $S(t)$ by the m -value. The results are given in Figure 7. At all the test temperatures, the λ values of the Base decreased with the addition of RET. For a RET-modified PMB, it was impossible to support this behavior with a study in the literature directly. On the other hand, a study for an SBS-modified PMB reported an increase in λ values compared to base bitumen [57]. Based on this result, it can be said that the RET additive will have a more positive effect on the low-temperature performance of the base bitumen than the SBS additive. Besides, when WCO was added to the PMB, a decrease in λ values was observed for all the test temperatures. This decrease in λ values indicates that adding WCO to PMB will contribute to its low-temperature performance.

Table 6 - BBR test results and low-temperature performance grades of the bitumen samples.

Sample	Test temp. (°C)	Creep Stiffness $S(t) \leq 300$ MPa	m-value $m \geq 0.300$	Low-temperature PG As per AASHTO M 320
Base	-12	250.76	0.2996	PG -22
	-18	564.22	0.2089	
	-24	-	-	
PMB	-12	216.67	0.3140	PG -22
	-18	548.45	0.2280	
	-24	-	-	
2W	-12	152.89	0.3404	PG -22
	-18	402.56	0.2626	
	-24	609.10	0.2227	
4W	-12	103.59	0.3884	PG -28
	-18	247.37	0.3252	
	-24	469.14	0.2552	
6W	-12	56.40	0.4112	PG -28
	-18	119.69	0.3450	
	-24	303.98	0.2864	
8W	-12	37.03	0.4240	PG -34
	-18	71.18	0.3213	
	-24	266.98	0.3135	

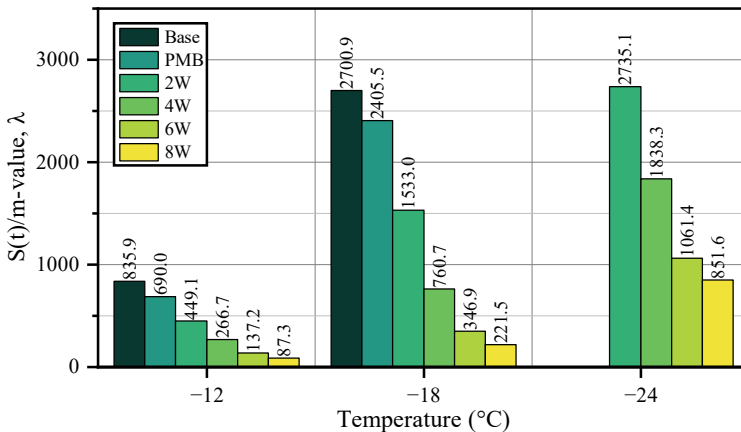


Figure 7 - λ values of the bitumen samples obtained from BBR tests performed at -12, -18, and -22°C.

ΔT_c is the other parameter used in this study to investigate the low temperature behavior of bitumen samples in detail. Accordingly, the ΔT_c values were calculated with the results obtained from the BBR test with the help of Equations (9), (10), and (11). However, unlike the traditional ΔT_c calculation method, in this study, different combinations for T_1 and T_2 temperatures were used at the initial stage while calculating the ΔT_c values. Accordingly, the results obtained are given in Table 7 for different temperature binaries. Since the critical values for Base and PMB samples were reached between -12 and -18°C , BBR tests were not performed at a third test temperature. Therefore, different temperature binaries could not be created for these samples, and ΔT_c calculation was performed by the conventional method. On the other hand, since BBR tests were carried out at three different temperatures for WCO-added PMB samples, it was possible to calculate ΔT_c with different temperature binaries. When Table 7 is examined, it is understood that the selected temperature binary significantly affects the ΔT_c value. In fact, when the 8W sample is evaluated, it exhibits m-controlled behavior between -12°C and -18°C and S(t)-controlled behavior between -18°C and -24°C . When the -12°C and -24°C range is considered as a whole, a result close to a balanced behavior is obtained. Similarly, for the other samples, it is seen that the temperature binary selected in the ΔT_c calculation has a significant effect on the result obtained. Regarding this situation, Anderson et al. [22] stated that to determine the critical temperatures, T_1 and T_2 temperatures should be selected so that one meets the specification limit and the other does not. Subsequently, the critical temperature should be determined by interpolation in this range. They also stated that extrapolation could be used in cases where the critical temperature does not fall between the selected temperature binary. However, they recommended not to use extrapolation as much as possible.

Table 7 - Calculations of the ΔT_c values at two different test temperatures.

Sample	ΔT_c		
	Temperature binaries (T_1, T_2)		
	(-12, -18)	(-18, -24)	(-12, -24)
Base	-1.33	-	-
PMB	-1.13	-	-
2W	-1.06	-1.36	-1.73
4W	1.09	0.35	-0.48
6W	-3.25	-1.31	-1.21
8W	-11.96	9.86	0.76

Given the significant influence of the temperature binary on the ΔT_c calculation, it is thought that this influence may be due to the equations used in the ΔT_c calculation being derived by assuming that the effect of temperature variation on bitumen is linear. Therefore, in this study, different types of curve fitting were applied to the results obtained from BBR tests conducted at three different test temperatures to obtain the curve that simulates the behavior of bitumen with temperature change in the closest way. Accordingly, 32 trend lines with four different types (linear, logarithmic, power, and exponential) were generated for the $S(t)$ and m-values of four samples. The properties of the generated trend lines are given in Table 8.

Table 8 - Determination of trend line type for the calculation of ΔT_c .

Sample	Parameter	Trend Line Properties			Selected Critical Temp.
		Type	Equation	R^2	
2W	$T_{c,S(t)}$	Linear	$y = 0.05 \cdot x + 1.6242$	0.9492	-27.060
		Logarithmic	$y = 0.8773 \cdot \ln x + 0.0234$	0.9833	-26.390
		Power	$y = 0.9108 \cdot x^{0.3558}$	0.9733	-26.640
		Exponential	$y = 1.745 \cdot e^{0.0202 \cdot x}$	0.9327	-27.340
	$T_{c,m}$	Linear	$y = -0.0098 \cdot x + 0.4518$	0.9666	-25.490
		Logarithmic	$y = -0.171 \cdot \ln x + 0.7635$	0.9926	-25.037
		Power	$y = 1.5603 \cdot x^{-0.614}$	0.9992	-24.670
		Exponential	$y = 0.5122 \cdot e^{-0.035 \cdot x}$	0.985	-25.280
4W	$T_{c,S(t)}$	Linear	$y = 0.0547 \cdot x + 1.376$	0.9923	-30.130
		Logarithmic	$y = 0.9455 \cdot \ln x - 0.3356$	0.9999	-29.587
		Power	$y = 0.7332 \cdot x^{0.4077}$	0.9991	-29.808
		Exponential	$y = 1.5362 \cdot e^{0.0235 \cdot x}$	0.9836	-30.331
	$T_{c,m}$	Linear	$y = -0.0111 \cdot x + 0.5227$	0.9991	-30.063
		Logarithmic	$y = -0.19 \cdot \ln x + 0.864$	0.9839	-29.461
		Power	$y = 1.7353 \cdot x^{-0.595}$	0.9668	-29.103
		Exponential	$y = 0.5975 \cdot e^{-0.035 \cdot x}$	0.992	-29.685
6W	$T_{c,S(t)}$	Linear	$y = 0.061x + 1.0067$	0.9962	-34.105
		Logarithmic	$y = 1.0391 \cdot \ln x - 0.8584$	0.9748	-34.779
		Power	$y = 0.5032 \cdot x^{0.4982}$	0.9878	-34.510
		Exponential	$y = 1.2339 \cdot e^{0.0291 \cdot x}$	0.9999	-33.940
	$T_{c,m}$	Linear	$y = -0.0104 \cdot x + 0.5347$	0.9988	-32.567
		Logarithmic	$y = -0.179 \cdot \ln x + 0.8577$	0.9961	-32.548
		Power	$y = 1.4968 \cdot x^{-0.516}$	0.9876	-32.531
		Exponential	$y = 0.5914 \cdot e^{-0.03 \cdot x}$	0.9997	-32.634
8W	$T_{c,S(t)}$	Linear	$y = 0.0715 \cdot x + 0.6622$	0.9632	-35.384
		Logarithmic	$y = 1.2024 \cdot \ln x - 1.4791$	0.9178	-36.850
		Power	$y = 0.332 \cdot x^{0.615}$	0.9477	-36.254
		Exponential	$y = 0.9966 \cdot e^{0.0364 \cdot x}$	0.9831	-35.014
	$T_{c,m}$	Linear	$y = -0.0092 \cdot x + 0.5187$	0.8027	-33.772
		Logarithmic	$y = -0.166 \cdot \ln x + 0.825$	0.8742	-33.633
		Power	$y = 1.2678 \cdot x^{-0.452}$	0.9012	-34.255
		Exponential	$y = 0.5498 \cdot e^{-0.025 \cdot x}$	0.8361	-34.231

Equations were determined for each curve, and the critical temperatures ($T_{c,S(t)}$ and $T_{c,m}$) of the samples were calculated by using these equations. From the four different critical temperatures calculated, the one with the highest R^2 value of the relevant equation, in other words, the one that most closely represents the behavior of bitumen with respect to temperature change, was selected. Table 8 shows that the selected trend line type varies depending on the bitumen sample and the investigated parameter. For example, the 2W sample shows a logarithmic behavior with respect to $S(t)$, while it shows an exponential behavior with respect to the m-value. On the other hand, the 4W sample exhibits logarithmic behavior with respect to the $S(t)$ and linear behavior with respect to the m-value. Hence, the behavior of bitumen with temperature change can be represented by a unique trend line for each sample and parameter. Therefore, the traditional calculation method, in which this behavior is assumed to be linear, is considered unable to reflect the actual behavior of the bitumen sample completely.

After the procedures mentioned above, the selected critical temperatures and the ΔT_c values calculated using Equation (11) are given in Table 9. When the obtained results are compared with Table 7, it is seen that there are significant differences in ΔT_c values especially for WCO-added bitumen. Therefore, when evaluating WCO-added PMBs, using trend lines formulated by utilizing the results of the tests conducted at three different temperatures, as in this study, will provide more realistic results.

Table 9 - The final ΔT_c values obtained according to the calculations made in this study.

Sample	$T_{c,S(t)}$	$T_{c,m}$	ΔT_c
Base	-23.33	-22.00	-1.33
PMB	-24.10	-22.98	-1.13
2W	-26.39	-24.67	-1.72
4W	-29.587	-30.06	0.48
6W	-33.94	-32.63	-1.31
8W	-35.014	-34.26	-0.76

In order to compare the effects of RET and WCO additives on the ΔT_c parameters of bitumen samples, Figure 8 was prepared. When this figure is examined, first of all, it is seen that the addition of the RET to the base bitumen does not significantly affect the ΔT_c parameter. Accordingly, it is possible to say that both base and PMB samples show a behavior close to the balanced behavior in terms of $S(t)$ - or m-controlled behavior. On the other hand, the ΔT_c results from PMBs are controversial. While there are studies in the literature where the ΔT_c values of PMBs are very low [58], there are also studies with similar results [21] as in this study. With the addition of WCO to the PMB, no regular change was observed in ΔT_c values. Generally, it is possible to say that PMBs with WCO addition show a balanced behavior. However, with ΔT_c values, observing the low-temperature performance improvement provided by WCO is not entirely possible, which is clearly seen in the PG system and is well-accepted in the literature. As a result, this may be seen as a disadvantage of the ΔT_c parameter.

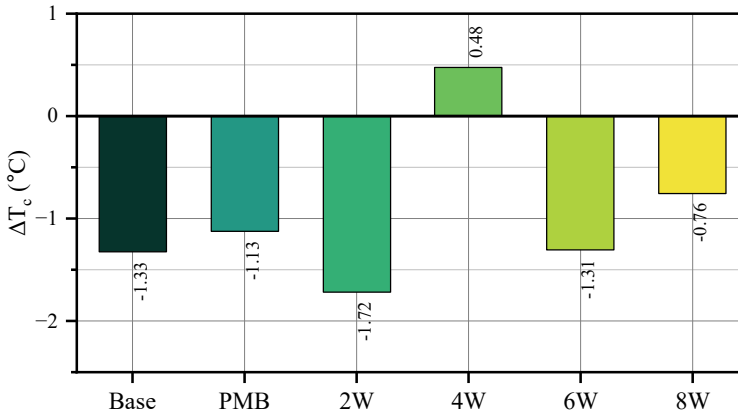


Figure 8 - The difference between the critical temperature found with the m -value and the critical temperature found with the $S(t)$ value; ΔT_c .

4. CONCLUSIONS

In this study, 50/70 penetration grade base bitumen was modified with 1.5% reactive ethylene terpolymer (RET) and 0.2% polyphosphoric acid, and then 2%-8% waste cooking oil (WCO) was added. The effects of using WCO and RET on the high and low-temperature performance of modified bitumen were investigated with the MSCR and BBR tests. The results obtained from the experimental study are listed below:

- The addition of WCO to the PMB adversely affected the rutting resistance. With the addition of 8% WCO to the PMB, the $Jnr_{0.1}$ and $Jnr_{3.2}$ values increased by 586% and 607%, respectively.
- The elastic recovery performance of the PMB decreased with the increase in WCO content. With the addition of 8% WCO to the PMB, the $R\%_{0.1}$ and $R\%_{3.2}$ values decreased by 43.6% and 51%, respectively.
- Adding RET to base bitumen increased the $S(t)$ and decreased the m -value. Accordingly, considering the Superpave performance criteria, the addition of RET negatively affects the low-temperature performance of base bitumen. However, the λ and ΔT_c values of base bitumen decrease with the addition of RET. When these two parameters are evaluated, it can be said that adding RET improves the low-temperature performance of base bitumen by increasing its stress relaxation capacity.
- As mentioned above, the effect of RET addition on the low temperature of base bitumen varies depending on the parameter under consideration. Accordingly, novel parameters such as λ and ΔT_c , rather than Superpave criteria, are considered more appropriate for evaluating the low-temperature performance of RET-modified bitumen.
- In parallel with adding WCO to PMB, $S(t)$ values increased and m -values decreased. Additionally, with the addition of RET to PMB, the λ value decreased at all test

temperatures. These results show that adding WCO has significantly improved the low-temperature performance of PMB.

- When the low-temperature performance of bitumen samples was examined according to the ΔT_c parameter, no apparent trend was observed. All of the prepared samples showed balanced behavior regarding $S(t)$ or m-controlled behavior.

In line with the conclusions obtained from this study, it was determined that adding low amounts of WCO to 50/70 penetration-graded bitumen with 1.5% RET positively affected both the rutting and low-temperature performance of the base bitumen. Therefore, it has been determined that bitumen containing RET and low amounts of WCO can serve well under high and low-temperature conditions that pavements may be exposed to in many parts of Türkiye [59, 60]. In future studies, detailed experimental studies using bitumen containing RET and WCO in mix design will be useful in evaluating the behavior of RET and WCO in the asphalt mixture.

Acknowledgments

This work was supported by the Ondokuz Mayıs University under Grant number PYO.MUH.1904.20.009.

References

- [1] Oruç, Ş., Yılmaz, B., Sancak, K., Characterization and rheological behavior of asphalt binder modified by a novel cyclic borate ester additive. *Constr. Build. Mater.* 348, 128673, 2022.
- [2] Oruç, Ş., Yılmaz, B., Sancak, K., Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. *Constr. Build. Mater.* 17, 4, 810-824, 2016.
- [3] Saedi, S., Oruç, Ş., The Influence of SBS, Viatop Premium and FRP on the Improvement of Stone Mastic Asphalt Performance. *Fibers.* 8, 4, 20, 2020.
- [4] Aksoy, A., İskender, E., Oruç, Ş., Özen, H., SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması. *Teknik Dergi.* 23, 113, 5967-5986, 2012.
- [5] Yeşilçiçek, H., Oruç, Ş., Gülfer Bozdemir, M., Characterization and rheological properties of asphalt binder with a novel tall oil-based boron additive to enhance asphalt performance. *Constr. Build. Mater.* 359, 129510, 2022.
- [6] Airey, G.D., Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Constr. Build. Mater.* 16, 8, 473-487, 2002.
- [7] İskender, E., Aksoy, A., Investigation of the Effects of Nanoclay/Polymer/Bitumen Nanocomposite Preparation Method on Asphalt Mixture Performance. *Teknik Dergi.* 32, 3, 10885-10906, 2021.

- [8] Bulatovic, V.O., Rek, V., Markovic, K.J., Rheological properties of bitumen modified with ethylene butylacrylate glycidylmethacrylate. *Polym. Eng. Sci.* 54, 5, 1056-1065, 2014.
- [9] Gama, D.A., Yan, Y., Rodrigues, J.K.G., Roque, R., Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance. *Constr. Build. Mater.* 169, 522-529, 2018.
- [10] Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z., Zanzotto, L., Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. *J. Colloid Interface Sci.* 280, 2, 366-73, 2004.
- [11] Bulatovic, V.O., Rek, V., Markovic, K.J., Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen. *J. Elastom. Plast.* 46, 5, 448-469, 2014.
- [12] Kök, B.V., Yilmaz, M., Geçkil, A., Evaluation of Low-Temperature and Elastic Properties of Crumb Rubber- and SBS-Modified Bitumen and Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 2, 257-265, 2013.
- [13] Köfteci, S., Gunay, T., Ahmedzade, P., Rheological Analysis of Modified Bitumen by PVC Based Various Recycled Plastics. *J. Transp. Eng. B: Pavements.* 146, 4, 04020063, 2020.
- [14] Eriskin, E., Karahancer, S., Terzi, S., Saltan, M., Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 17, 4, 863-870, 2017.
- [15] Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., Grigoryeva, O., Usage of Recycled Postconsumer Polypropylene in Bituminous Binder. *Teknik Dergi.* 27, 3, 7497-7513, 2016.
- [16] Özdemir, A.M., Yalçın, E., Yılmaz, M., Kök, B.V., Dynamic-Mechanic Analysis and Rheological Modelling of Waste Face Mask Modified Bitumen. *Turkish J. Civ. Eng.* 35, 1, 2023.
- [17] Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., Giustozzi, F., Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. *J. Clean. Prod.* 278, 2021.
- [18] McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., Background of Superpave asphalt binder test methods, Final Report, FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Federal Highway Administration Office of Technology Applications, Lexington, KN, USA, 1994.
- [19] FHWA, The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure, TechBrief, FHWA-HIF-11-038, Office of Pavement Technology, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2011.
- [20] AASHTO M 332, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2023.

- [21] Asphalt Institute, Use of the Delta Tc Parameter to Characterize Asphalt Binder Behavior, State-of-the-Knowledge, IS-240, Asphalt Institute Technical Advisory Committee, Lexington, KN, USA, 2019.
- [22] Anderson, R.M., King, G.N., Hanson, D.I., Blankenship, P.B., Evaluation of the Relationship Between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. *J. Assoc. Asphalt Paving Techn.* 80, 615-664, 2011.
- [23] Liu, S., Cao, W., Fang, J., Shang, S., Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. *Constr. Build. Mater.* 23, 7, 2701-2708, 2009.
- [24] Kumandas, A., Cavdar, E., Oruc, S., Pancar, E.B., Kok, B.V., Effect of WCO addition on high and low-temperature performance of RET modified bitumen. *Constr. Build. Mater.* 323, 126561, 2022.
- [25] Domingos, M.D.I., Faxina, A.L., Accelerated short-term ageing effects on the rheological properties of modified bitumens with similar high PG grades. *Road. Mater. Pavement.* 16, 2, 469-480, 2015.
- [26] Domingos, M.D.I., Faxina, A.L., Bernucci, L.L.B., Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance. *Constr. Build. Mater.* 144, 207-213, 2017.
- [27] Almusawi, A., Sengoz, B., Topal, A., Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures. *Constr. Build. Mater.* 268, 121140, 2021.
- [28] Singh, D., Ashish, P.K., Kataware, A., Habal, A., Effects of WMA additives and hydrated lime on high-stress and high-temperature performance of Elvaloy® - and PPA-modified asphalt binder. *Road. Mater. Pavement.* 20, 6, 1354-1375, 2019.
- [29] Geckil, T., Seloglu, M., Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Constr. Build. Mater.* 173, 262-271, 2018.
- [30] Hampl, R., Vacin, O., Jasso, M., Stastna, J., Zanzotto, L., Modeling of tensile creep and recovery of polymer modified asphalt binders at low temperatures. *Appl. Rheol.* 25, 3, 2015.
- [31] Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J., Zanzotto, L., Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel. Process. Technol.* 140, 172-179, 2015.
- [32] Singh, D., Habal, A., Ashish, P.K., Kataware, A., Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach. *Constr. Build. Mater.* 158, 949-960, 2018.
- [33] ASTM D2872, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2022.

- [34] ASTM D6521, Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [35] AASHTO T 315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2022.
- [36] AASHTO M 320, Standard specification for performance-graded asphalt binder, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2023.
- [37] Asphalt Institute, Guidance on the Use of the MSCR Test with the AASHTO M320 Specification, Guidance Document, Asphalt Institute Technical Advisory Committee, Lexington, KN, USA, 2010.
- [38] AASHTO T 350, Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2019.
- [39] Zeiada, W., Liu, H., Ezzat, H., Al-Khateeb, G.G., Shane Underwood, B., Shanableh, A., Samarai, M., Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization. *Constr. Build. Mater.* 319, 126063, 2022.
- [40] Anderson, R.M., Implementation of the MSCR Test and Specification, Association of Modified Asphalt Producers Annual Meeting, Oklahoma City, USA, 2016.
- [41] Salim, R., Gundla, A., Underwood, B.S., Kaloush, K.E., Effect of MSCR Percent Recovery on Performance of Polymer Modified Asphalt Mixtures. *Transp. Res. Rec.* 2673, 5, 308-319, 2019.
- [42] ASTM D6648, Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [43] Liu, S., Cao, W., Shang, S., Qi, H., Fang, J., Analysis and application of relationships between low-temperature rheological performance parameters of asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* 24, 4, 471-478, 2010.
- [44] Arslan, D., Gürü, M., Kürşat Çubuk, M., Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens. *Fuel.* 102, 766-772, 2012.
- [45] Wei, C., Zhang, H., Duan, H., Effect of catalytic-reactive rejuvenator on structure and properties of aged SBS modified asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* 246, 118531, 2020.
- [46] Li, J., Xiao, F., Amirghanian, S.N., Storage, fatigue and low temperature characteristics of plasma treated rubberized binders. *Constr. Build. Mater.* 209, 454-462, 2019.

- [47] Wang, W., Luo, R., Yan, G., Wang, L., Evaluation on moisture sensitivity induced by dynamic pore water pressure for asphalt mixture and its components using the bending beam rheometer method. *Constr. Build. Mater.* 251, 118942, 2020.
- [48] Xu, N., Wang, H., Chen, Y., Miljković, M., Feng, P., Ding, H., Thermal storage stability and rheological properties of multi-component styrene-butadiene-styrene composite modified bitumen. *Constr. Build. Mater.* 322, 126494, 2022.
- [49] Blankenship, P., Anderson, R.M., King, G.N., Hanson, D.I., A Laboratory and Field Investigation to Develop Test Procedures for Predicting Non-Load Associated Cracking of Airfield HMA Pavements, Final Report, 09-119-00948, Airfield Asphalt Pavement Technology (AAPT) Program, Tempe, AZ, USA, 2010.
- [50] McDaniel, R.S., Shah, A., Investigation of delta Tc for implementation in Indiana, Final Report, FHWA/IN/JTRP-2019/14, Joint Transportation Research Program, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 2019.
- [51] AASHTO PP 78, Standard Practice for Design Considerations When Using Reclaimed Asphalt Shingles (RAS) in Asphalt Mixtures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2017.
- [52] Domingos, M.D.I., Faxina, A.L., Rheological analysis of asphalt binders modified with Elvaloy terpolymer and polyphosphoric acid on the multiple stress creep and recovery test. *Mater. Struct.* 48, 5, 1405-1416, 2015.
- [53] Niu, D., Xie, X., Zhang, Z., Niu, Y., Yang, Z., Influence of binary waste mixtures on road performance of asphalt and asphalt mixture. *J. Clean. Prod.* 298, 126842, 2021.
- [54] Liu, K., Zhang, K., Wu, J., Muhunthan, B., Shi, X., Evaluation of mechanical performance and modification mechanism of asphalt modified with graphene oxide and warm mix additives. *J. Clean. Prod.* 193, 87-96, 2018.
- [55] Saboo, N., Sukhija, M., Singh, G., Effect of Nanoclay on Physical and Rheological Properties of Waste Cooking Oil-Modified Asphalt Binder. *J. Mater. Civ. Eng.* 33, 3, 04020490, 2021.
- [56] Bessa, I.S., Takahashi, M.M., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L.L.B., Characterization of neat and modified asphalt binders and mixtures in relation to permanent deformation. *Sci. Eng. Compos. Mater.* 26, 1, 379-387, 2019.
- [57] Kök, B.V., Erkuş, Y., Yılmaz, M., Evaluation of the Cohesive Properties of SBS-Modified Binders at Low Temperatures. *Slovak J. Civ. Eng.* 29, 1, 27-34, 2021.
- [58] Kluttz, R.Q., Prepared discussion on relationships between mixture fatigue performance and asphalt binder properties. *J. Assoc. Asphalt Paving Techn.* 88, 108-112, 2019.
- [59] Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A.G., Yeni Bitüm Standardı, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 2004.
- [60] Kaya, M., Çelik, O.N., Türkiye Coğrafi Bölgeleri için Performans Dereceli Bitümlü Bağlayıcı Sınıflarının Belirlenmesi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 2009.

Effect of Freeze-Thaw on CBR in Soils with Different Gradation and Mineralogy

Murat GÜLEN^{1*}

Ayşenur ASLAN FİDAN²

Ahmet Serdar KÖŞELİ³

Havvanur KILIÇ⁴



ABSTRACT

Freeze-thaw cycles are prevalent climatic phenomena with substantial effects on soils, leading to alterations in soil strength, stiffness, and hydraulic properties due to disruptions in the soil structure. With the ongoing climate change, weather patterns have grown progressively erratic, resulting in more frequent occurrences of extreme weather events, including heavy snowfall, intense rainfall, and windstorms, even in regions characterized typically with mild climates across the globe. The climate change can potentially threaten man-made infrastructure constructed within or upon local soils, regardless of their susceptibility to freezing in temperate climates. The principal objective of this study is to assess the influence of freeze-thaw cycles on the California Bearing Ratio (CBR %) across 12 distinct soils with variations in granulometry and mineralogy. The freeze-thaw cycles resulted in a notable decrease in CBR (%) within the range of 40% to 70%. A strong inverse correlation with D_{50} was observed regarding the decrease in CBR (%). Nevertheless, it was discerned that the decrease in CBR (%) subsequent to freeze-thaw cycles varied among soil samples sharing identical D_{50} and liquid limit characteristics. The aim of this study is to enhance our comprehension of how freeze-thaw cycles can impact the bearing capacity of these soils, thereby providing essential insights for predicting their behavior and potential influence on infrastructure in the context of climate change.

Keywords: Grain size distribution, mineralogy, liquid limit, freeze and thaw, CBR (%).

Note:

- This paper was received on August 24, 2023 and accepted for publication by the Editorial Board on February 6, 2024.
- Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2024.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1349440>

1 Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye
gulenmurat23@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-4143-9266>

2 Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye
aslana@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-2166-5194>

3 Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye
aserdark34@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-4421-9544>

4 Yıldız Technical University, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye
kiliç@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9455-1687>

* Corresponding author

1. INTRODUCTION

Permafrost and seasonally frozen soils cover about 24% of the Earth's surface, with global climate change linked to deeper active layers and increased thaw thickness in permafrost regions [1-3]. Climate change has led to unpredictable weather patterns, causing more frequent extreme events worldwide. In areas with seasonal freezing, subgrade and foundation soils are significantly affected by recurring freezing and thawing cycles, disrupting the geotechnical properties of compacted soils and potentially causing structural failures [4-6].

Frost-sensitive soils, vulnerable to frost action, exhibit surface heave, influenced by factors like fines content, specific surface area, and mineralogy. Soils with over 6% fine particle content are more susceptible to frost heave [7-14]. Frost action is influenced by internal and external factors, including soil grain size distribution, structure, specific surface area, chemical properties of pore fluids, confining pressure, water source, and temperature variations. Particularly, the relationship between decreasing particle size and increased susceptibility to frost heave is widely acknowledged [15-21].

Numerous studies have explored the impacts of freeze-thaw cycles on soil mechanical properties. Different dry densities result in varying responses to freeze-thaw cycles, with a critical dry unit weight governing soil behavior [22]. Soil cohesion decreases with freeze-thaw cycles, while the internal friction angle shows varying trends [23-24]. Freeze-thaw cycles affect stress-strain curves differently at various freezing temperatures, influencing resilient modulus and ultimate strength [25-26]. Research on specific soil types demonstrates strain-hardening behavior, declines in elastic modulus, cohesion, and peak undrained shear strength, followed by stabilization after a certain number of freeze-thaw cycles [29-32].

The effect of freeze-thaw on the bearing capacity of subgrade soils has indeed been investigated by some researchers. Kawabata et al [27] investigated the effects of freezing and thawing on the CBR (%) and concluded that freeze-thaw cycles can significantly affect the CBR (%), even in air-dried samples. Factors affecting the CBR (%) after freeze-thaw include changes in particle size distribution, void ratio and water content. Similarly, Işık et al. [28] noted a decrease in the CBR (%) ranging from 21% to 86%, with the maximum change in CBR (%) occurring in the soil characterized by the highest liquid limit.

Various studies have conducted freeze-thaw tests, but there are notable differences in the test conditions between different research reports, as shown in Table 1. These conditions include freezing and thawing temperatures, duration, and number of cycles. While freezing temperature has a minor effect, the researchers in Table 1 emphasize the critical role of the number of cycles. It is suggested that soil changes significantly up to a certain number of freeze-thaw cycles, beyond which soil properties stabilize.

This study investigates the impact of freeze-thaw cycles on the CBR (%) for 12 soils with varying granulometry and mineralogy. While subgrade soil freezing sensitivity is typically considered for cold climates, frost-sensitive local materials may also be used in moderate climates, especially beneath large embankments or roadways. However, with climate change inducing unpredictable weather patterns, even mild climates are expected to experience significant freeze-thaw effects. This poses a risk to critical infrastructure in major cities, leading to substantial damage during adverse weather events, which are becoming more frequent. The study aims to enhance our understanding of how freeze-thaw cycles influence

the bearing capacity of these soils. Such insights are crucial for predicting soil behavior and potential impacts on infrastructure in the context of climate change.

Table 1 - Number of freeze-thaw cycles and freezing-thawing temperatures from the literature

References	Temperature (°C)		Duration (h)		Number of test cycles	Threshold cycle
	F	T	F	T		
[22]	-2 to -20	20	until frost heave cease	until thaw settlement cease	1	-
[23]	-5, -15	20	12	12	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12	7
	-10	20	12	12	1, 3, 7, 9, 12	
[25]	-5, -10, -15	25	12	12	0,5,10,20,30	-
[26]	-7	14	18	6	1,3,5,7,10,15,21	7
[30]	-10	10	3	3	1, 3, 5, 9	5
[31]	-40	20	12	12	0,1,3,6,9,12,15	6
[32]	-6, -12	15	12	12	0, 3, 6, 9, 12	4-6
[33]	-4, -18	20	24	24	3,6,9	-
[34]	-23	21	24	23	12	-

2. MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1. Soil Properties

A total of 12 soil compositions were used in this study, formed by adding varying proportions of sand and gravel into three distinct types of fine soil. These fine soils, designated as A, B, and C, exhibited liquid limits determined by fall cone tests as follows: 44%, 78%, and 121.4%, respectively. The corresponding plasticity limits were found to be 26%, 36% and 60% respectively. On the Casagrande plasticity chart, these fine soils are close to the A line (Figure 1). According to the British Soil Classification System (BSCS) [35], the fine soils are classified as CI-MI (A soil), MV (B soil) and ME (C soil).

The mixed soils are identified by the types of fine materials they contain, in addition to varying fine content, which varies from 25% to 75%. The minimum main grain size for all these soils is 0.0009 mm, while the maximum reaches 1.2 mm. The liquid limits of the soils were determined using both the Casagrande test (LL_{CUP}) and the fall cone test (LL_{FC}). The plasticity indexes of the soils range from 13.8% to 63.5%. According to the British Soil Classification System (BSCS), the soil types include MI, CI-MI, MV, CH-MH, MV, ME and SC. In addition, the AASHTO [36] classification identifies the soil types as A-7-6, A-6, A-2-6, and A-2-7. The index properties of the soils are shown in Table 2 and the grain size distribution curves are shown in Figure 2.

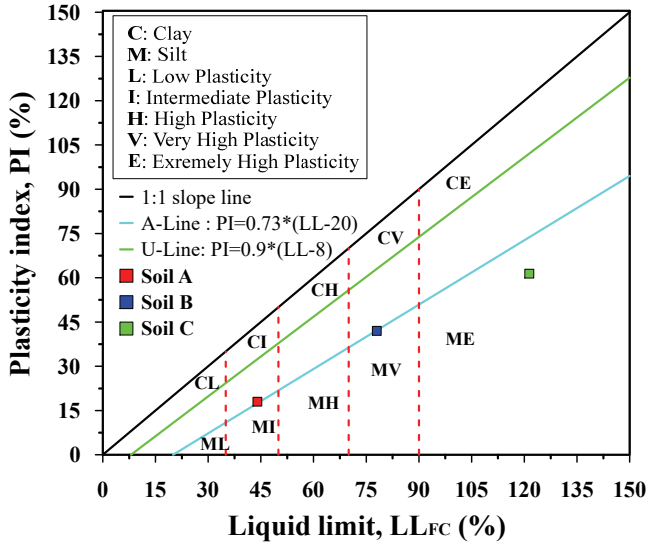


Figure 1 - Locations of soils on Casagrande plasticity chart

Table 2 - Properties of 12 soils

Soil name	Grain-size distribution				Consistency limits					Classifications	
	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Gravel (%)	D ₅₀ (mm)	LL _{CUP} (%)	LL _{FC} (%)	PL (%)	PI (%)	BSCS	AASHTO
A	50.0	50.0	-	-	0.0020	41.0	44.0	26.0	15.0	CI-MI	A-7-6
A1	37.5	37.5	25.0	-	0.0044	37.0	40.0	23.2	13.8	CI-MI	A-6
A2	25.0	25.0	25.0	25	0.0750	33.5	36.5	19.6	13.9	MI	A-6
A3	12.5	12.5	50.0	25	1.2000	33.5	36.5	19.6	13.9	SC	A-2-6
B	45.0	43.0	12.0	-	0.0028	75.0	78.0	36.0	39.0	MV	A-7-6
B1	34.0	33.0	33.0	-	0.0110	69.0	68.0	32.5	36.5	CH-MH	A-7-6
B2	23.0	21.0	31.0	25	0.3200	50.5	51.0	27.8	22.7	SC	A-7-6
B3	12.0	11.0	52.0	25	1.2000	50.5	51.5	27.8	22.7	SC	A-2-7
C	70.0	30.0	-	-	0.0009	123.5	121.4	60.0	63.5	ME	A-7-6
C1	53.0	22.0	25.0	-	0.0013	115.0	113.0	55.1	60.1	ME	A-7-6
C2	35.0	15.0	25.0	25	0.0750	90.0	93.0	44.8	45.2	ME	A-7-6
C3	18.0	7.0	50.0	25	1.2000	90.0	93.0	44.8	45.2	SC	A-2-7

The results of the X-ray diffraction analysis of the soils are visually presented in Figure 3. It shows that soil A is predominantly composed of kaolinite mineral, accompanied by varying quantities of other minerals such as quartz and muscovite. Soil B contains a significant

amount of montmorillonite mineral, along with illite and kaolinite, as well as additional minerals such as quartz, anortite, and muscovite. Soil C has a high concentration of clay minerals from the smectite group (montmorillonite) and variable amounts of other minerals.

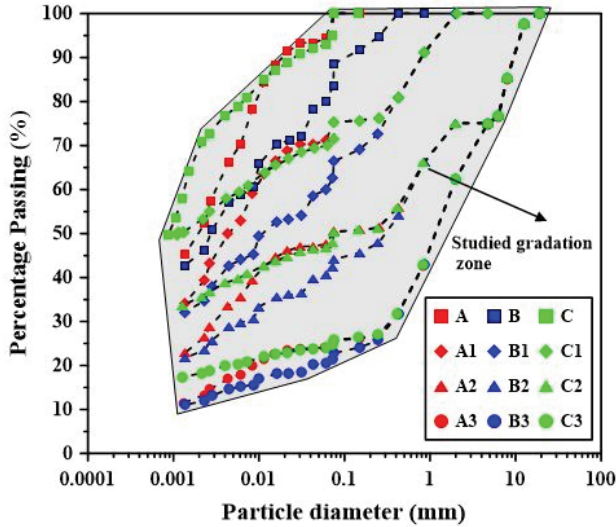


Figure 2 - Grain size distribution curves of soils

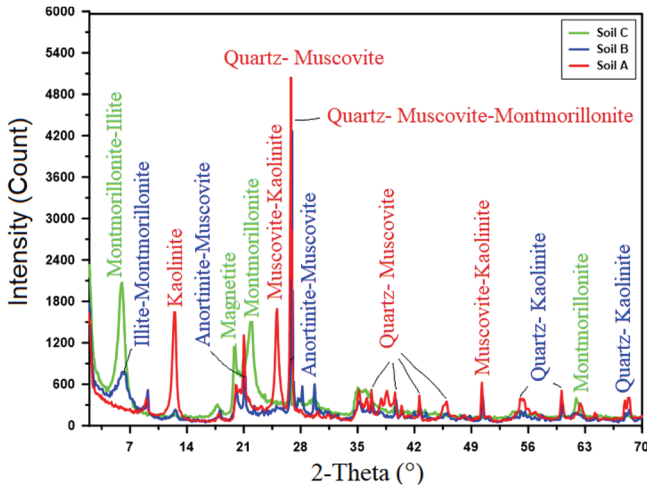


Figure 3 - X-Ray diffraction analysis result of A-B-C soils

Standard Proctor tests were performed on all 12 soils in accordance with ASTM D698 [37]. The results indicated that the maximum dry densities of these soils ranged from 1.2 to 2.2 g/cm³. Among the tested soils, Soil C had the lowest dry density, while soil A3 recorded the

highest dry density. The optimum water contents (w_{opt}) varied between 8.5% and 44.5% as depicted in Figure 4.

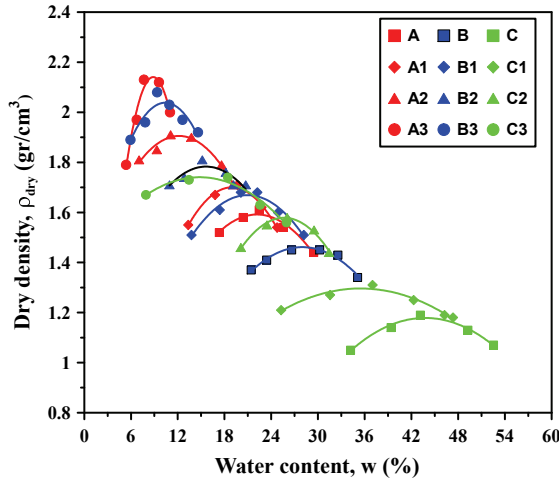


Figure 4 - Standard compaction curves of 12 soils

2.2. Sample Preparation and CBR Test

The specimens were compacted in a CBR mold with a diameter of 152 mm and a height of 178 mm, at the optimum water content and maximum dry density. The volume-mass properties of the compacted soils are shown in Table 3.

The CBR mold was lubricated before compaction to minimize the frictional effect on the movement of the soil mass during saturation and freeze-thaw. Tognom et al. [38] stated that the lubrication process can reduce the angle of friction between the soil and the mold to 5 degrees. It was also observed that the center of the mold exhibited the greatest swelling as it was least affected by friction between the mold and the soil. The displacements measured at this specific point were used for evaluating the extent of swelling and heave.

Table 3 - Volume-mass properties of the compacted soils

Soil	A	A1	A2	A3	B	B1	B2	B3	C	C1	C2	C3
Gs*	2.64	2.65	2.65	2.67	2.63	2.67	2.68	2.71	2.59	2.61	2.62	2.65
w_{opt} (%)	22.5	19.0	13.2	8.6	29.1	21.6	16.3	10.1	44.3	36.5	26.5	16.7
e^{**}	0.63	0.55	0.39	0.22	0.81	0.59	0.48	0.31	1.16	0.99	0.66	0.51
ρ_{dry} gr/cm ³	1.62	1.71	1.91	2.18	1.46	1.69	1.82	2.08	1.20	1.31	1.58	1.76

*Specific Gravity, **Void ratio

According to ASTM D1883-21 [39], following compaction, a surcharge load of 4.5 kg was uniformly applied to all samples, and the samples were then immersed in tap water for 96 hours to ensure complete saturation. At the end of the saturation (96th h), the height of the samples was measured using a dial gauge to determine the axial strain. The initial set of 12 samples, denoted as the control samples, were not subjected to any freeze-thaw cycle. CBR tests were performed on these control samples after saturation. The second set of samples were subjected to freeze-thaw cycles after saturation.

2.3. Freeze-Thaw Test

In this study, 12 saturated samples were placed in a freeze-thaw chamber and subjected to a closed freeze-thaw test. In ASTM5918 [40], the term 'closed system freeze-thaw' refers to the freezing process taking place under conditions where there is no gain or loss of water within the system. For this purpose, the chamber humidity was set at 80% to prevent evaporation from the soil and maintain the desired moisture level. It was also found that the water contents of the control samples and the freeze-thawed samples were highly consistent. Therefore, there was no change in the water content throughout the freeze-thaw process.

The freezing temperature of -20°C was selected for this study, with a freezing duration of 24 hours. The samples were then allowed to thaw at $+20^{\circ}\text{C}$, with a thawing time of 24 hours. Control samples were prepared to measure soil temperature during the freeze-thaw cycles. Temperature measurements were taken using a digital thermocouple placed in the sample. The measurements indicate that the cabin temperature and the control sample temperatures are highly compatible (see Figure 5a).

Many researchers have proposed a critical number of cycles beyond which soil properties tend to be less affected or stabilized (Table 1). Therefore, in this particular study, all 12 soil samples were subjected to a total of 10 freeze-thaw cycles, with sample heights monitored using dial gauges at the end of each cycle. (see Figure 5b).

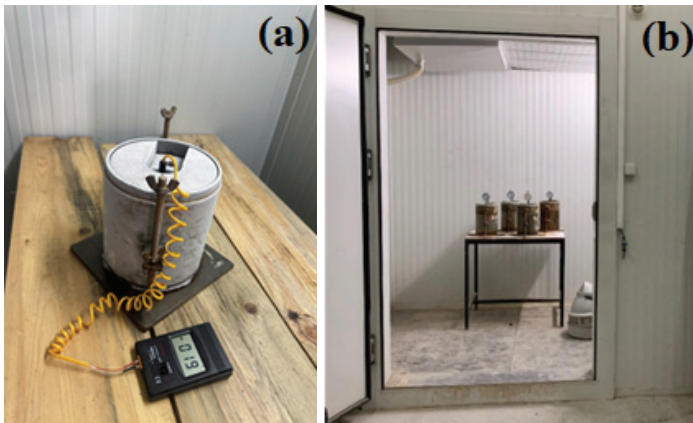


Figure 5 - Freeze-thaw test a) Image showing temperature measurements in control samples using a thermocouple b) images of CBR samples with a dial gauge inside the chamber.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Gradation and Mineralogy Impact on Swelling and Heave

Final swelling measurements were taken for all samples at the end of saturation (at 96 hours). Swelling and final frost heave according to D_{50} and $LL_{FC}(\%)$ are presented in Figure 6. The graphs highlights that soils C, B, and A exhibited the highest swelling with recorded values of 5.11 mm, 4.25 mm, and 3.80 mm, respectively. Similarly, the highest final heave was measured at 3.69 mm in soil C, while it was 1.81 mm and 0.59 mm in soils B and A, respectively. It is seen from Figure 6 both swelling and heave increase with increasing liquid limit and decreasing gradation Figure 6. In addition, there is a high correlation (R^2) between the liquid limit and frost heave.

Fine content increases as D_{50} decreases in soil samples. Swelling and frost heave tend to increase as fine content increases. Therefore, Figure 6 illustrates the inverse relationship between D_{50} and swelling and frost heave behavior for all 12 soil samples. As D_{50} values decrease, indicating an increase in fine content, there is typically a coincident increase in frost heave. The primary soil factor influencing frost heave is grain size, and it serves as the fundamental criterion in most frost susceptibility assessments due to its ease of measurement and correlation with frost heave. Soils lacking particles smaller than 74μ typically do not undergo heaving under natural conditions. This recognition dates back to Taber [41], Taber [42] and Casagrande [43] proposed the use of grain size to define frost-susceptible soil limits. Penner [44] determined that soil texture, serving as a measure of particle size gradation, stands out as the foremost crucial physical characteristic of soil when it comes to identifying its frost susceptibility.

In general, soils with high plasticity exhibit greater water retention, swelling, and heave potential. Holtz and Gibbs [45] emphasized the significance of plasticity index and liquid limit as crucial indicators for describing the swelling characteristics of numerous clays. Seed et al. [46] suggested that plasticity index alone serves as a primary indicator in identifying swelling clays. Peck et al. [47] further supported the relationship between clay swelling and plasticity index. Similar results were observed during saturation and freeze-thaw cycles of the samples (Figure 7). Soil C, characterized by a high liquid limit and containing clay minerals from the smectite group such as montmorillonite, tends to have higher water content and greater swelling after saturation. In contrast, soil A, distinguished by a lower liquid limit and swelling potential, primarily contains the kaolinite mineral. Lambe [48] emphasized the significance of mineralogy, especially for clay particles, noting that the nature of the exchangeable ion profoundly affects frost susceptibility. Further studies by Lambe et al. [49] revealed that clay minerals can both enhance and inhibit frost heave. Even minimal concentrations (0.1% to 1.0%) of montmorillonite fines in silt were found to increase frost heave, while higher concentrations led to a decrease.

The primary mechanism responsible for the modification of soil behavior induced by freezing and thawing cycles is thought to be alterations in soil structures [50-52]. The total volume of water-filled pores in the soil skeleton is a major factor controlling the axial strain of saturated soils during freezing and thawing. Therefore, an increase in soil water content, influenced by the high plasticity of the soils, corresponds to an increase in axial strain, primarily attributed to variations in water volume, which can reach up to 9% during the freezing process [53]. As a result, the frost heave of soil C is the highest among the other soil types

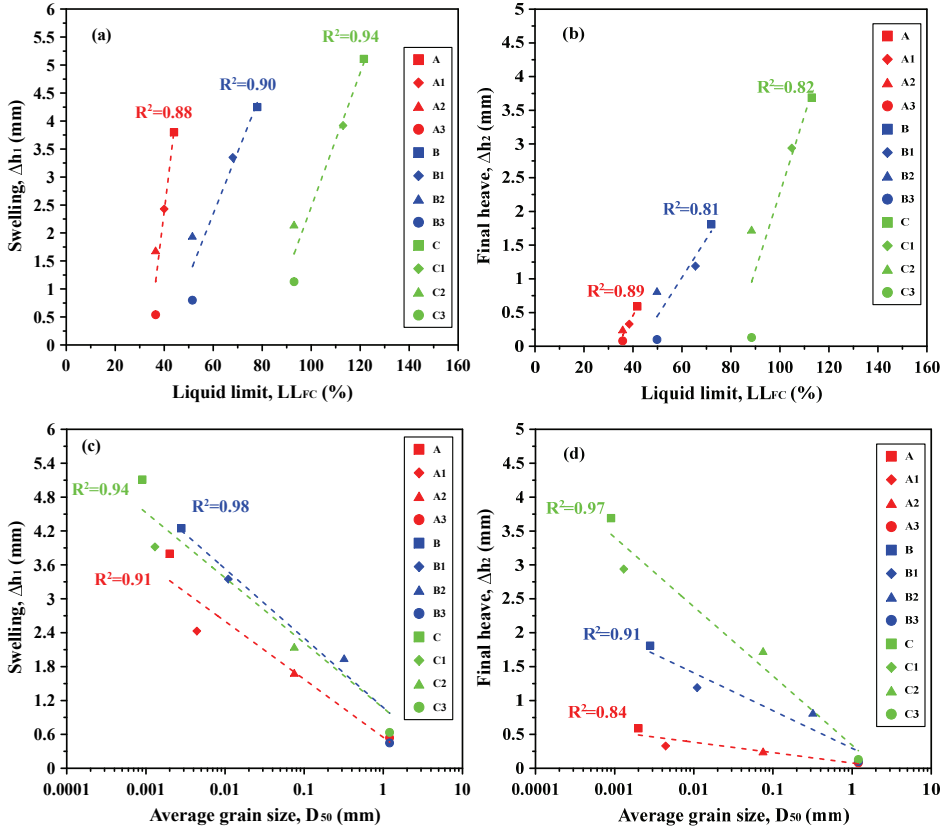


Figure 6 - Swelling and final frost heave according to D_{50} and LL_{FC} (%) a) Swelling- LL_{FC} (%) b) Heave- LL_{FC} (%) c) Swelling- D_{50} d) Heave- D_{50}

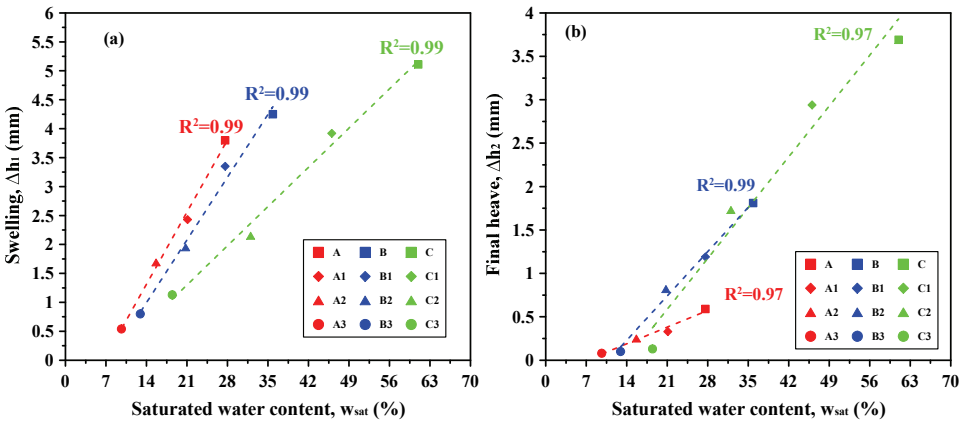


Figure 7 - Swelling and final frost heave according to saturated water content a) Swelling- w_{sat} (%) b) Heave- w_{sat} (%)

The axial strain over 10 freeze-thaw cycles for all soils is shown in Figure 8. To determine the axial strain during the freeze-thaw cycles, the initial height was recalculated taking into account the swelling that occurred during the saturation process. The minimum axial strain recorded was 0.03% for soil A3, while the maximum was 15% for soil C, which indicates a considerable difference in axial strain between these two soil types.

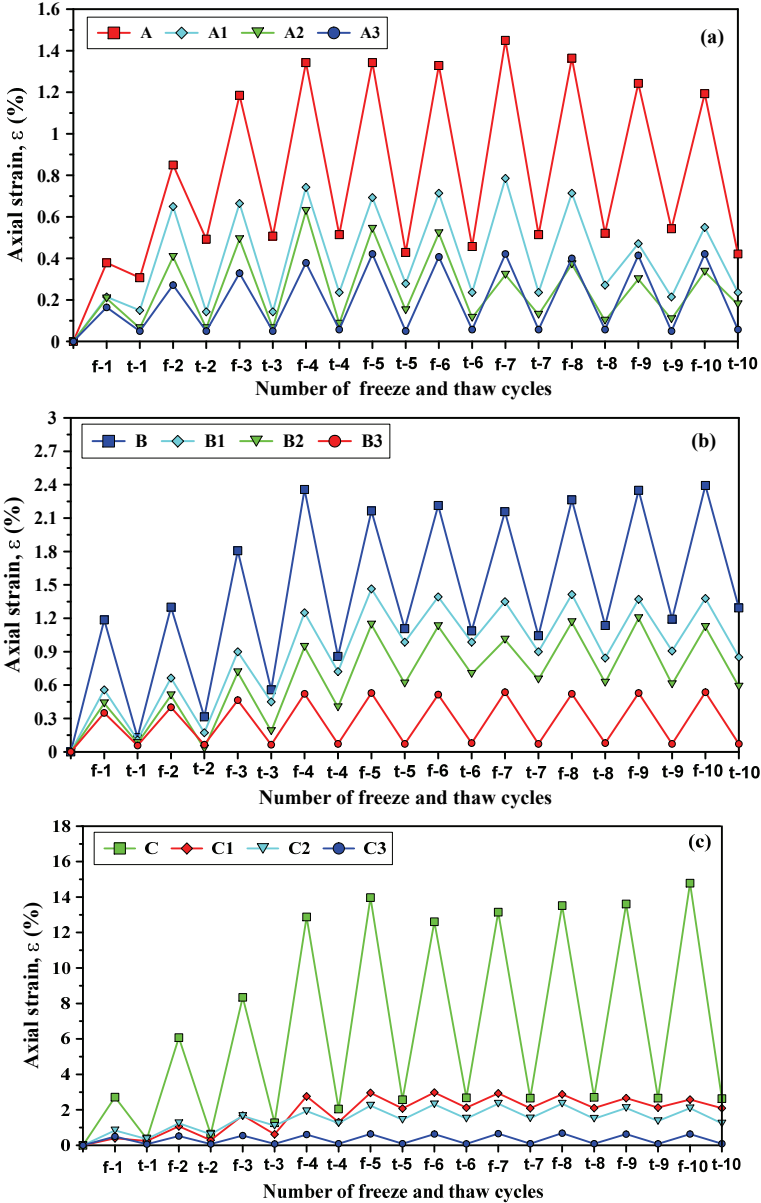


Figure 8 - Axial strains of the 12 soils, during freeze-thaw cycles a) A type soils b) B type soils c) C type soils

For soils A, A1, A2 and A3, the maximum axial strains observed were 1.4%, 0.8%, 0.5% and 0.4% respectively. These soils reached stable axial strains after the 4th freeze-thaw cycle. The coarse material content had a positive effect on the axial strain, with the maximum axial strain decreasing as the coarse material content increased (Figure 8a).

Similarly, the maximum axial strains observed in soils B, B1, B2 and B3 were 2.4%, 1.4%, 1.1% and 0.5% respectively. The reduction in axial strain became more pronounced as the coarseness of the soil increased. After approximately the 5th freeze-thaw cycle, the difference in axial strain between the successive cycles became relatively constant (Figure 8b).

For soils C, C1, C2 and C3 the peak axial strains were 15%, 3% and 2.5% respectively (Figure 8c). The soil skeleton exhibited stabilization after the 5th freeze-thaw cycle as shown in Figure 8c.

As voids within fine-grained soils are exposed to low temperatures, pore-water transforms into ice particles. When the soil is fully frozen (i.e., water within the voids between soil particles are completely frozen), the volume of water increases approximately by 9% resulting in unavoidable cracks in the soil [54]. Freezing water in the soil causes expansion, which exerts significant pressure on pore walls in both soils and rocks, leading to changes in their physical and mechanical properties [31, 55-59]. After thawing, finer particles and fractures attempt to return to their original positions, but complete recovery is difficult, especially for densely compacted soils, and this process repeats with each freeze-thaw cycle [54]. As a result, plastic deformation occurs in the soil.

Figure 9 illustrates the axial strains of soil C, which exhibits the most significant deformation during the freeze-thaw cycles. The highest strain, approximately 14%, occurs during the freezing phase, while the strain during thawing ranges between 2-3%.

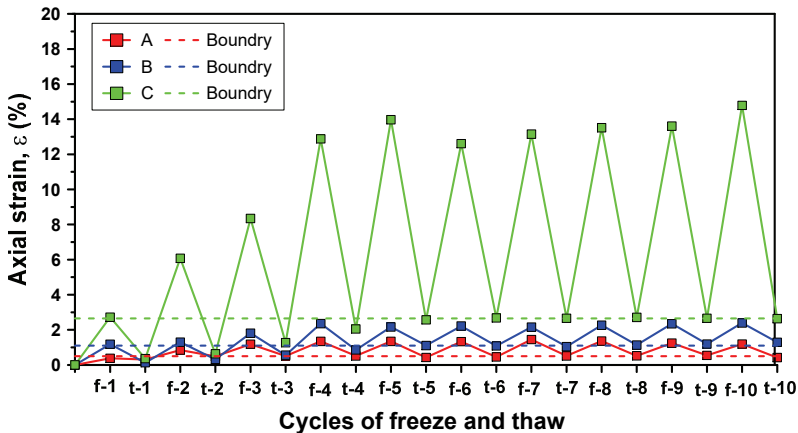


Figure 9 - Plastic deformation boundary for the samples after freeze-thaw cycles

The freeze-thaw process significantly influences the physical-mechanical properties of unfrozen or frozen soils, causing a structural rearrangement of soil particles [32]. This effect persists until a critical number of cycles is reached, beyond which the volume change during freezing no longer significantly affects void volume or particle arrangement [23,26,30-32].

Sherif et al. [60] observed a reduction in frost heave in a silty sand with repeated freeze-thaw cycles, attributing it to diminishing heave potential and compromised continuity of adsorbed water films. This reduction was linked to the loosening and rearranging of particles through successive freeze-thaw cycles.

3.2. Effects of Freeze-Thaw on CBR (%)

CBR tests were conducted on all samples to obtain load-penetration curves. The results, denoted by the symbol ('), represent samples subjected to freeze-thaw (Figure 10). The curves were plotted using the average values derived from the top and bottom test results. The ratio between the CBR (%) values obtained at 2.5mm and 5mm penetration depths was found to be approximately 1.25.

The CBR(%) for groups A, B, and C both prior to and following freeze-thaw cycles are presented in Figure 11. The CBR (%) of Group A soils prior to the freezing and thawing cycles range from 2.28 to 7.2. The A3 sample exhibits the highest CBR (%), while the soil A shows the lowest CBR (%) within this group. Following the freeze-thaw cycles, the CBR (%) for Group A soils are observed to be in the range of 1.15 to 3.98. Similarly, the lowest CBR (%) result is obtained with soil A and the highest with A3 soil. The percentage changes in CBR (%) for the A, A1, A2, and A3 soils are as follows: 59.6%, 55.4%, 44.4%, and 44.7%, respectively (Figure 11a).

Considering the CBR (%) results of the B group soils prior to freezing and thawing; the lowest CBR is obtained from the B3 soil as 2.68, while the highest is 6.64 from the B3 soil. After freezing and thawing, CBR (%) values vary between 1.01-3.48. The percentages of decrease in CBR (%) in B group soils are respectively for B, B1, B2, and B3 soils; 62.3%, 57.3%, 56.9%, 47.6% (Figure 11b).

The CBR (%) values of group C soils were examined before experiencing freezing and thawing. The results showed that C soil had the lowest CBR (%) among all the soils, measured at %2.52. The CBR (%) for C1, C2, and C3 soils were %3.18, %4.05, and %5.95 respectively. After the soils were subjected to the freezing and thawing process, the percentage differences in the CBR (%) were determined. The changes were as follows: 67.1% for C soil, 57.5% for C1 soil, 56.1% for C2 soil, and 48.8% for C3 soil (Figure 11c).

CBR (%) is a significant parameter in assessing the suitability of soils as base, subbase or subgrade material (Table 4). The comparison of the CBR (%) results reveals the adverse effects of freeze-thaw cycles, leading to a substantial reduction in CBR (%), ranging from approximately 40% to 70%. As indicated in Table 4, the CBR (%) results before and after freeze-thaw demonstrate that the reduction in CBR (%) results in a change in the classification of the material. Jessberger and Carbee [61] acknowledged this issue and illustrated through a series of laboratory experiments that freeze-thaw cycling resulted in progressively diminishing CBR (%), especially noticeable in clay soils.

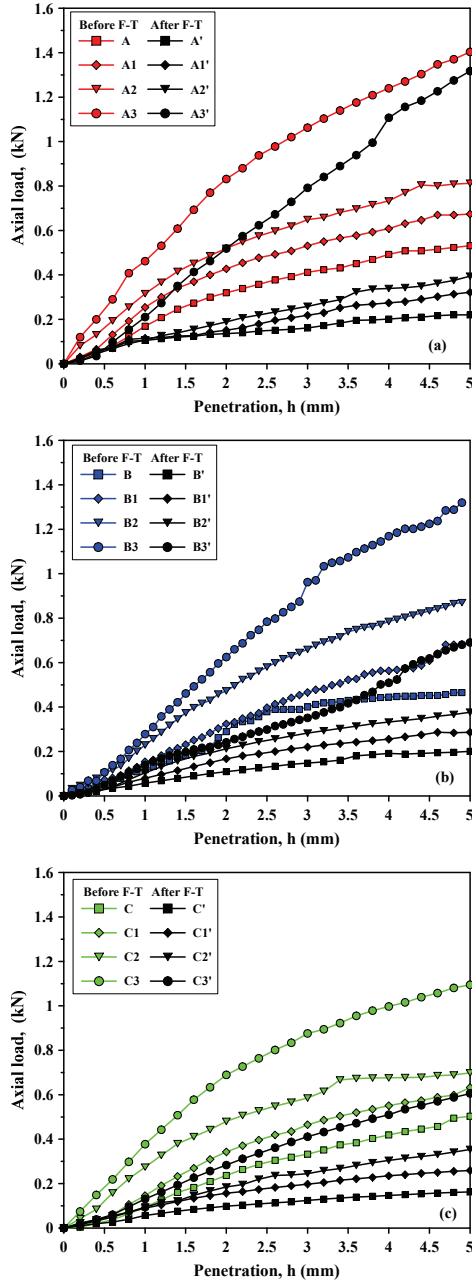


Figure 10 - Load -penetration curves of CBR tests

Effect of Freeze-Thaw on CBR in Soils with Different Gradation and Mineralogy

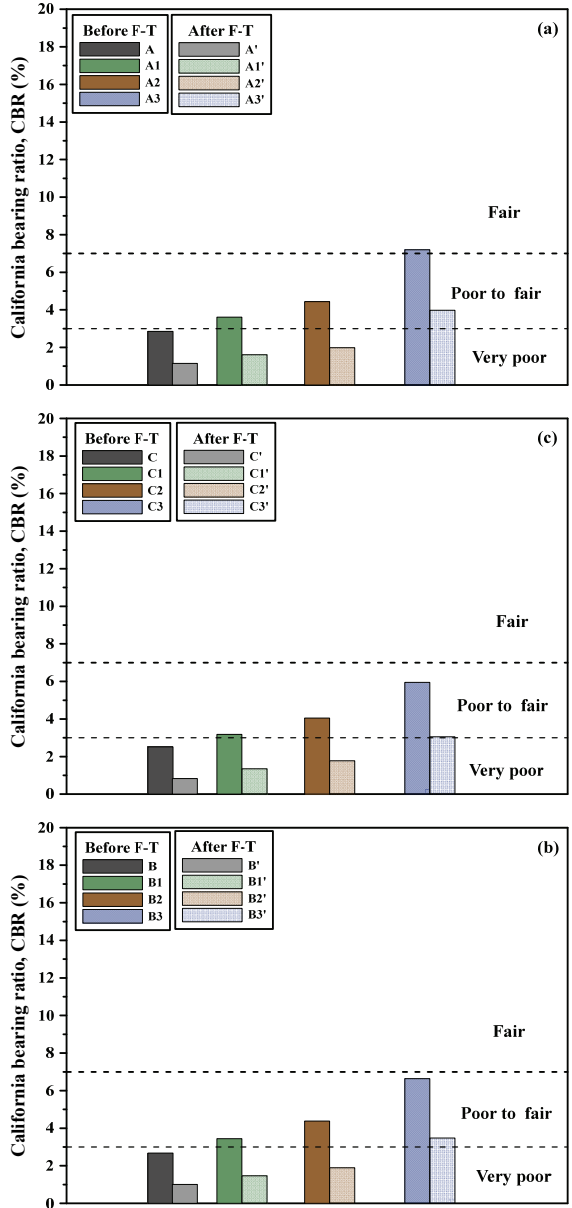


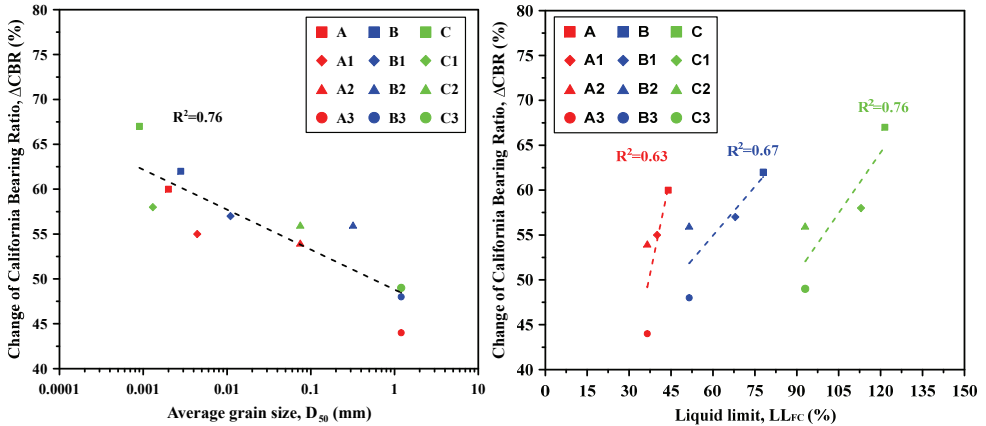
Figure 11 - CBR (%) results before and after freeze-thaw
 a) Group A, b) Group B c) Group C

Table 4 - General ratings of soil to be used as a base, subbase, and subgrade material [56]

CBR (%)	General rating	Uses	Classification System	
			Unified	AASHTO
0-3	Very poor	Subgrade	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Poor to fair	Subgrade	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Fair	Subgrade	OL, ML, CL, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Good	Base, Subgrade	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Excellent	Base	GW-GM	A1a, A2-4, A3

Soils classified as good or poor before freeze-thaw cycles are reclassified as poor or very poor after cycles (Figure 11). Therefore, it is necessary to anticipate the infrastructure challenges that may arise due to climate change in mild or semi-arid regions, taking into account the changes in CBR (%) caused by the freeze-thaw effect.

Frost heave disturbs the integrity of the soil, changing its structure and causing it to become much looser. As a result, the soil becomes unstable and weaker, which adversely affects the stiffness and strength of the soil [22, 24, 31, 32]. In this study, the CBR (%) of the soils before and after freeze-thaw cycles are examined in relation to the gradation and liquid limit (Figure 12).

Figure 12 - Change in CBR (%) according to a) D_{50} b) LL_{FC} (%)

The effect of D_{50} (gradation or coarse particle fraction) on CBR (%) was compared even though water content and mineralogy (liquid limit) varied. Figure 12a shows that there is a remarkable relationship between D_{50} and ΔCBR (%). As D_{50} increases, ΔCBR (%) decreases due to the freeze-thaw cycles. It's clear that the ΔCBR (%) values show a relatively similar trend for soils A3, B3, and C3, all of which share the same D_{50} value. However, there are slight variations which probably result from due to the mineralogy of the soils. Furthermore, the correlation between LL_{FC} and ΔCBR (%) was investigated in Figure 12b. The results

indicated that the losses in bearing capacity within each soil group increased as the LL_{FC} increased.

4. CONCLUSION

Climate change brings about the potential risk that embankments or native soils below freezing depth in temperate and semi-arid climates may be unexpectedly exposed to freeze-thaw cycles. In such climates, frost effects are so underestimated that local soils may be used for large embankments or roads may be built on frost-sensitive local soils. Therefore, it is important to anticipate the potential problems associated with existing infrastructure caused by a changing climate. To address this concern, our study focuses on investigating the loss of bearing capacity due to freeze-thaw of a wide range of soils with different gradation and mineralogy. The outcomes obtained from the experimental study are presented in the following.

During freezing, the water in the voids of the soil structure expands, forcing the soil particles to change position and breaking the interlocks between them. The soil particles move and form a loose soil structure. During thawing, the soil particles are slightly displaced. However, a permanent structural change occurs in the soil. Nevertheless, these deformations, or changes in the volume, continue until a void ratio is reached where the expansion of water during freezing no longer impacts the soil structure. Within the framework of this study, it was noted that the axial strain stabilized after approximately 4-5 cycles for all soils.

The study results suggest that the axial strain of all soils stabilizes after approximately 4-5 freeze-thaw cycles. These freeze-thaw cycles induce volume changes in the soil, leading to a loose and unstable soil structure. Consequently, the soil demonstrates weakened behavior including reduced strength and stiffness. The findings of this study reveal a remarkable decline in CBR (%), ranging from 40% to 70%, due to the effects of freeze-thaw cycles.

In the existing literature, the adverse effects of freezing and thawing on soils are primarily attributed to the amount of fines present. Nevertheless, this study highlights the importance of not only the fine content but also the properties of the fines themselves. While there is a strong correlation between D_{50} and CBR (%) reduction, a degree of variability was observed in ΔCBR (%) values among soils with the same D_{50} . This suggests that the liquid limit plays a significant role in the structural changes that occur during freeze-thaw cycles.

Moreover, the mineral composition has a significant influence on the frost susceptibility of soils, particularly in terms of specific surface area, cation exchange capacity, and the presence of negative charges on the soil surface – all of which collectively influence the soil's water-retention capacity. In the context of the present study, it was observed that soil C, characterized by the presence of clays of the smectite group, exhibited the most pronounced response to freeze-thaw phenomena, demonstrating significant frost heave and loss of bearing capacity. In contrast, soil A, characterized by the predominance of kaolinite mineral, displayed the least susceptibility to the effects of freeze-thaw cycles.

A strong correlation was observed between the D_{50} and ΔCBR (%) values of all samples. However, variations in the ΔCBR (%) values were observed among soil mixtures having equivalent D_{50} size, particularly in relation to their liquid limits. This observation suggests

that soils sharing similar D_{50} values may undergo different change in CBR (%) during freeze-thaw cycles, primarily owing to variations in their mineralogy.

In conclusion, this study underscores the critical impact of freeze-thaw cycles on soil stability, revealing a substantial reduction in CBR (%) ranging from 40% to 70%. The findings emphasize the nuanced influence of factors beyond fine content, highlighting the significance of properties such as liquid limit and mineral composition. The observed correlations between Δ CBR (%) and LL (%) as well as Δ CBR (%) and D_{50} provide valuable insights, emphasizing the need for a comprehensive understanding of soil properties when assessing the effects of climate change on infrastructure stability.

Nevertheless, the outcomes derived from this study are applicable to the designated gradation, mineralogy, and freeze-thaw conditions. To draw more generalized conclusions, additional investigations should be conducted with diverse soils.

Notations and Symbols

CBR: California Bearing Ratio

D_{50} : Average grain size

LL_{CUP} : Liquid limit value by Casagrande Test

LL_{FC} : Liquid limit value by Fall Cone Test

PL: Plasticity limit

PI: Plasticity Index

ML: Low plasticity silt

CL: Low plasticity clay

SC: Clayey sand

MH: High plasticity silt

CH: High plasticity clay

XRD: X-Ray diffraction

w: Water content (%)

ρ_k : Dry unit weight (gr/cm^3)

w_{opt} : Optimum water content (%)

w_{sat} : Saturated water content (%)

w_{ft} : Water content after 10 cycles of freezing and thawing (%)

ϵ : Axial strain (%)

Δh : Axial displacement (mm)

References

- [1] Sutherland Rolim Barbi, P., Tavassoti, P. and Tighe, S. L., Climate Change Impacts on Frost and Thaw Considerations: Case Study of Airport Pavement Design in Canada. *Applied Sciences*, 13(13), 7801, 2023.
- [2] Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I., & Nelson, F. E.,. Global warming and active-layer thickness: Results from transient general circulation models. *Global and Planetary Change*, 15(3–4), 61–77, 1997.
- [3] Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Heikinheimo, M., Kellomäki, S., Peltola, H., Strandman, H., & Väisänen, H., Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research*, 17(1), 63–72, 2001.
- [4] Zhang, F., Jing, R., Feng, D., Lin, B., Mechanical properties and an empirical model of compacted silty clay subjected to freeze-thaw cycles, *Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation Infrastructure*, 2015.
- [5] Alkire, B., Morrison, J., Change in Soil Structure due to Freeze-Thaw and Repeated Loading, *Transportation Research Record*, 918, 15–22, 1982.
- [6] Chamberlain, E., Iskander, I., Hunsiker, S., Effect of Freeze-Thaw on the Permeability and Macrostructure of Soils, Special Report, 90-1: 145–155, Proceedings of the International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, U.S.A, 1990.
- [7] Penner, E., Influence of Freezing Rate on Frost Heaving, *Highway Research Record*, 393, 56-64, 1972.
- [8] Henry, K.S., A Review of the Thermodynamics of Frost Heave, CRREL Technical Report, (TR 00-16): 25, 2000.
- [9] Arenson, L.U., Segó, D.C., A New Hypothesis on Ice Lens Formation in Frost-Susceptible Soils, 9th International Conference on Permafrost, 59-64, 2008.
- [10] Hendry, M.T., Onwude, L.U., Segó, D.C., A laboratory investigation of the frost heave susceptibility of fine-grained soil generated from the abrasion of a diorite aggregate, *Cold Regions Science and Technology*, 123, 91-98, 2016.
- [11] Liu, X., Cheng, H., Chen, H., Guo, L., Fang, Y., Wang, X., Theoretical Study on Freezing Separation Pressure of Clay Particles with Surface Charge Action, *Crystals*, 12, 1304, 2022.
- [12] Bilodeau, J.P., Doré, G., Pierre, P., Gradation influence on frost susceptibility of base granular materials, *International Journal of Pavement Engineering*, 9 (6), 397–411, 2008.
- [13] Konrad, J.M., Lemieux, N., Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material, *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (2), 515–527, 2005.
- [14] Zhang, Y., Michalowski, R.L., Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(7): 04015027, 2015.
- [15] Do, J., Frost Heaving and Induced Pressure of Unsaturated Interfacial Zone between Gravel Ballast and Subgrade, *Applied Sciences*, 12, 2811, 2022.

- [16] Transportation Association of Canada, Pavement design and management guide, Ralph C. G. Haas, Waterloo, Ontario, Canada, 1997.
- [17] Ji, Y., Zhou, G., Hall, M.R., Frost heave and frost heaving-induced pressure under various restraints and thermal gradients during the coupled thermal-hydro processes in freezing soil, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3671–3683, 2019.
- [18] Wu, D., Lai, Y., Zhang, M., Thermo-hydro-salt-mechanical coupled model for saturated porous media based on crystallization kinetics, *Cold Regions Science and Technology*, 133, 94-107, 2017.
- [19] Liu, Z., Liu, J., Li, X., Fang, J., Experimental study on the volume and strength change of an unsaturated silty clay upon freezing, *Cold Regions Science and Technology*, 157, 1–12, 2019.
- [20] Rieke, R., Vinson, T.S., Mageau, D.W., The role of specific surface area and related index properties in the frost heave susceptibility of soils, *Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost*, Fairbanks, Alaska, 1983.
- [21] Tester, R., Gaskin, P., The effect of fines content on the frost susceptibility of a crushed limestone, *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (4), 678–680, 1996.
- [22] Qi, J., Ma, W., Song, C., Influence of freeze–thaw on engineering properties of a silty soil, *Cold Regions Science and Technology*, 53, 397–404, 2008.
- [23] Liu, H., Shan, W., Guo, Y., Yang, L., Sun, Y., The Effect of Freeze-Thaw on Shear Strength of Roadbed Soil in Different States of Water Content and Soil Density, *2nd International Conference on Transportation Engineering*, Chengdu, China, 2009.
- [24] Li, J., Chang, D., Yu, Q., Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand, *Engineering Geology*, 210, 23-32, 2016.
- [25] Yu, Z., Fang, J., Xu, A., Zhou, W., The Study of Influence of Freeze-Thaw Cycles on Silty Sand in Seasonally Frozen Soil Regions, *Geofluids*, 2022.
- [26] Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay, *Cold Regions Science and Technology*, 48, 34–43, 2007.
- [27] Kawabata, S., Ishikawa T., Kameyama, S., Effects of Freeze-Thaw History on Bearing Capacity of Granular Base Course Materials, *Procedia Engineering*, 143, 828-835, 2016.
- [28] Işık, A., Çevikbilen, G., İyisan, R., Freezing and Thawing Behaviour of Compacted Soils, *11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, 2014.
- [29] Han, Y., Wang, Q., Wang, N., Wang, J., Zhang, X., Cheng, S., Kong, Y., Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of saline soil, *Cold Regions Science and Technology*, 154, 42–53, 2018.
- [30] Tang, L., Cong, S., Geng, L., Ling, X., Gan, F., The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils, *Cold Regions Science and Technology*, 145, 197–207, 2018.

- [31] Xie, S., Qu, J., Lai, Y., Zhou, Z., Xu, X., Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau, *Journal of Mountain Science*, 12, 999-1099, 2015.
- [32] Zhou, Z., Ma, W., Zhang, S., Mu, Y., Li, G., Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess, *Cold Regions Science and Technology*, 146, 9–18, 2018.
- [33] Öztaş, T., Fayetorbay, F., Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability, *Catena*, 52, 1 – 8, 2003.
- [34] Aldaood, A., Bouasker, M., Al-Mukhtar, M., Impact of freeze–thaw cycles on mechanical behaviour of lime stabilized gypseous soils, *Cold Regions Science and Technology*, 99, 38–45, 2014.
- [35] British Soil Classification System (BSCS)
- [36] AASHTO classification
- [37] ASTM D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort
- [38] Tognon, A. R. M., Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Evaluation of Side Wall Friction for a Buried Pipe Testing Facility. *Geotext. Geomembr.*,17, 193–212, 1999.
- [39] ASTM D1883-21. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils
- [40] ASTM5918. Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils
- [41] Taber, S., Frost heaving, *Journal of Geology*, 37, 428-461, 1929.
- [42] Taber, S., The mechanics of frost heaving, *Journal of Geology*, 38, 303-317, 1930.
- [43] Casagrande, A., Discussion of frost heaving Highway Research Board, *Proceedings*, vol. 11, p 168-172, 1931.
- [44] Penner, F., Grain size as a basis for frost susceptibility criteria *Proceedings, Second Conference on Soil-Water Problems in Cold Regions*, Edmonton, Alberta, Canada, p 103-109, 1976.
- [45] Holtz, W. G., Gibbs, H. J., Engineering Properties of Expansive Clays, *Transactions Paper* 2814, 121, 641-677, 1956.
- [46] Seed, H. B., Woodward, R. J., Lundgren, R., Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays, *ASCE, Soil Mechanics and Foundations Div.*, 88, 53-87, 1962.
- [47] Peck, R. B., Hanson, W. E. ve Thornburn, T. H.,. *Foundation Engineering*, John Wiley and Sons, Inc, 1974
- [48] Lambe, T.W., Frost investigations, 1952-1953 Cold room studies. Third interim report of investigations. Mineral U.S Army Arctic Construction Frost Effects Laboratory (ACFEL) Technical Report 43/2, 25 p, 1953.

- [49] Lambe, T.W., Effect of mineralogical composition of fines on frost susceptibility of soils. CRREL Technical Report 207, 31 p AD697134, 1969.
- [50] Eigenbrod, K.D., Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal 33, 529–537, 1996.
- [51] Viklander, P., Compaction and thaw deformation of frozen soil, permeability and structural effects due to freezing and thawing. PhD Thesis, Luea University of Technology, Luea, Sweden, 1997.
- [52] Eigenbrod, D., Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing. Cold Regions Science and Technology 31, 151–162, 2000.
- [53] Andersland, O.B., Ladanyi, B., Frozen Ground Engineering, ASCE, Wiley, 2003.
- [54] Guoyu L., Wei M., Shuping Z., Yuncheng M., Yanhu M., Effect of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Behavior of Compacted Fine-Grained Soil, Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development 73 in a Changing Cold Environment © ASCE 2012
- [55] Bing H, He P., Influence of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 31(2): 1958-1962, 2009. (In Chinese)
- [56] Hazirbaba K, Gullu H., California bearing ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. Cold Regions Science and Technology 63 (1-2): 50–60. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.05.006, 2010.
- [57] Gullu H, Hazirbaba K., Unconfined compressive strength and post-freeze–thaw behavior of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. Cold Regions Science and Technology 62 (2-3): 142–150. DOI: 10.1016/j.coldregions. 2010.04.001, 2010.
- [58] Jia-Hao, L.. Influences of freezing-thawing cycles on physico-mechanical properties of rocks of embankment revetments in permafrost regions. Rock and Soil Mechanics. 32(5): 1369-1376, 2011. (In Chinese)
- [59] Gullu H., Khudir A., Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime. Cold Regions Science and Technology 106: 55-65. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.06. 008, 2014.
- [60] Sherif, M.A., Ishibashi, I., Ding, W., Frost heave potential of silty sands Proceedings, Second International Conference on Cold Regions Engineering. University of Alaska, p. 239-251, 1977.
- [61] Jessberger, H.L., Carbee, D.L., Influence of frost action on the bearing capacity of soils Highway Research Record, no 304, p 14-26,1970.

Seismic Assessment of Electrical Equipment in Power Substations: A Case Study for Circuit Breakers

Kaan KAATSIZ^{1*}
Fırat Soner ALICI²
Murat Altuğ ERBERİK³



ABSTRACT

Electric power is essential in post-earthquake periods for the continuous functionality of disaster management and emergency services. In addition, interruption of electric power can cause significant economic losses due to downtime of critical facilities. Therefore, it is very important to maintain seismic safety of electric power systems and components. There are existing seismic regulations and standards regarding electric power systems, especially in the United States of America (USA) and Europe. A similar regulation has been prepared recently in Türkiye, which is a country in a seismically active region. This study focuses on the current state of practice regarding the seismic assessment of electrical equipment in power stations and implementation of the regulations on seismic qualification of these systems. Among many electrical equipment, circuit breakers have been selected for case study. The seismic assessment of the selected high voltage equipment has been performed according to the new regulation under the seismic hazard specifically defined for Türkiye. The case study experiment presents the new methodology in evaluating and classifying the seismic response of high voltage electrical equipment and provides insight to the expected behaviour of circuit breakers under earthquake induced action.

Keywords: seismic assessment, electrical equipment, power station, circuit breaker, seismic qualification

Note:

- This paper was received on January 28, 2023 and accepted for publication by the Editorial Board on March 1, 2024.
- Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2024.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1241107>

1 Başkent University, Department of Civil Engineering, Ankara, Türkiye
kaankaatsiz@baskent.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9842-3607>

2 Başkent University, Department of Civil Engineering, Ankara, Türkiye
fsalici@baskent.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-0938-8692>

3 Middle East Technical University, Department of Civil Engineering, Ankara, Türkiye
altug@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-2123-1647>

* Corresponding author

1. INTRODUCTION

In today's world, economical losses have become more important than the physical losses after major earthquakes, especially in the developed countries. There exist many efforts to cope with financial issues caused by seismic action in post-earthquake periods. Therefore, the focus of earthquake engineering has been shifting to the performance assessment of lifeline systems and industrial facilities in order to avoid downtime and loss of functionality of these critical structures due to earthquake damage.

Electric power stations are essential components of lifeline systems, for which there is no tolerance to seismic damage induced loss of functionality or interruption of the service after a major earthquake. Therefore, it is very important to maintain seismic safety of electric power systems and components for the post-earthquake continuous functionality of disaster management and emergency services. Especially in the last three decades, many major earthquakes that occurred in different parts of the world (including Loma Prieta USA 1989, Northridge USA 1994, Kobe Japan 1995, Chi-Chi Taiwan 1999, Pisco Peru 2007, Wenchuan China 2008, Chile 2010, Port-au-Prince Haiti 2010, New Zealand earthquakes of 2010 and 2011, Tohoku Japan 2011, Lushan China 2013 and Kumamoto Japan 2016) have revealed the seismic vulnerability of numerous electrical substation components to moderate and severe ground shaking, particularly in equipment with 230 kV and above. For example, Schiff [1] states that the economic losses due to structural damage of the electrical substation equipment during the Loma Prieta, USA ($M_w=6.9$, 1989) and the Northridge, USA ($M_w=6.7$, 1994) earthquakes can be approximately estimated as \$283 million. In 1999, the power stations that transmit the power from the south part of the country to the industrialized and populated regions in the northern part were partially collapsed during the Chi-Chi, Taiwan earthquake ($M_w=7.7$) as seen in Figure 1 [2]. Eventually, the nation-wide interruption of electric power caused by this major earthquake resulted in serious economic consequences with a total estimated loss of \$10-\$12 billion.



Figure 1 - Partial collapse in power stations during the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake [2]

During the great earthquake that shook the Wenchuan region of China in 2008 ($M_w=7.9$), the electrical equipment in many of the power stations were severely damaged while some stations experienced total collapse due to the progressive failure of the interconnected system with bus bars as seen in Figure 2 [3]. During the 2010 Chile earthquake ($M_w=8.8$), the strong shaking caused severe damage in tens of electrical equipment (including bushings, insulators, conductors, circuit breakers, disconnect switches, voltage transformers and surge arresters) in different substations all over the country [4]. The earthquake induced liquefaction during the 2011 Christchurch New Zealand earthquake ($M_w = 6.3$) caused failures in the supporting structures of different electrical equipment and excessive displacement that caused stress concentrations on the electrical network connected by rigid buses [5].



Figure 2 - Ertai Shan Switchyard which had experienced total collapse during the Wenchuan China (2008) earthquake [3]

There are also incidents regarding seismic damage in substation equipment and interruption of electrical power during major earthquakes in Türkiye. For instance, after the devastating Kocaeli earthquake ($M_w=7.4$) in 1999, seismic damage at various levels was reported in 9 electrical substations and the electricity was cut off in 7 cities for a considerable period of time ranging between 3 hours and 7 days [6-7]. During the sequential earthquakes in Van Türkiye in 2011 ($M_w = 7.2$ in 23 October and $M_w = 5.6$ in 9 November), 9% of the elevated electric transformers were damaged and 600 km of interconnecting cables were replaced although there was no significant damage in substation equipment in the affected area [8]. Site investigations performed after the 6th February 2023 Kahramanmaraş earthquakes document that high voltage transmission systems suffered damage aftermath of these destructive events [9]. Damage to substation components was also observed by the authors during their site visits to the affected area.

In summary, most of the electrical equipment in substations possess seismic vulnerability due to their inherent characteristics. First, they are generally cantilevered and flexible structures with elevated mass or with unbalanced mass concentration. Hence, they are highly sensitive to amplified vibrational motion caused by earthquakes. Second, they contain many fragile and brittle components like porcelain bushings, oil or gas filled equipment under high

pressure, mechanical bearings, linkages, and electro-mechanical parts with close internal tolerances. These types of materials and components can be easily damaged during severe ground motion shaking. Especially the seismic vulnerability of such equipment becomes more critical as the voltage of the equipment gets higher due to requirements of larger clearances from the ground or between phases and longer dimensions that increase the flexibility of the component. Besides, the failure in a high voltage equipment during an earthquake cannot be tolerated in most of the cases since such equipment are located in critical substations that provide electrical power to large areas of population and industrial facilities. Third, the connectivity of electrical equipment through rigid bus bars or similar conductors is another issue during the excessive and amplified displacements effectuated by the seismic action if there is insufficient slack or tolerance in the connections. Meanwhile excessive slack is also unfeasible since it may lead to violations in electrical clearance requirements, cause instability of the equipment due to excessive lateral movement even under wind loading [3].

The aforementioned seismic vulnerability of electrical equipment in substations has drawn much attention after critical cases of equipment damage and malfunction in several electrical power stations after major earthquakes in urban areas of California in the United States in a period from 1970s (with the San Fernando earthquake of 1971) up to mid-1990s (with the Northridge earthquake of 1994), which initiated the first efforts to develop seismic design standards for such equipment. Accordingly, IEEE-693 Standard was first released in 1984, and then revised in 1997, 2005. The final version of the IEEE-693 Standard was released in 2018 [10]. Hence, due to its continuous development and technical superiority, this IEEE standard has become a worldwide popular document and leading seismic qualification standard for electric equipment.

For seismic qualification of electrical equipment in Europe, the most commonly used standards belong to the International Electrotechnical Commission (IEC). Unlike the IEEE-693 standard as a single document, the IEC standards IEC62271-300 provide a family of seismic qualifications which cover different types of electric equipment or part of the qualification process found in substations. Other than these internationally accepted standard, there are also national guidelines developed in different countries like China (GB standards) and Japan (JEAG standards).

In Türkiye, there have been no seismic regulations for the components of electrical power systems up to a recent time although Türkiye is an earthquake-prone country. The Turkish national seismic code covers only the legislations for building structures. However, the major earthquakes in the last three decades, especially the 1999 earthquakes in highly populated and industrialized Marmara region and the 2023 Kahramanmaraş earthquakes that affected significant percent of the national power system in the South-east region of Türkiye have revealed the significance to mitigate the monetary losses and to manage post-disaster affairs by enhancing the seismic performance of special and critical engineering structures or components other than ordinary buildings. This issue triggered the efforts to develop guidelines for non-building structures, which also include the electrical power systems and their components. Hence a seismic qualification guideline was prepared for electric power transmission systems in Türkiye with the governance of General Directorate of Highways, which is a governmental organization under the Turkish Republic Ministry of Transport and Infrastructure, the guideline has been published in the official gazette and it has been

operative in 2024 as seismic qualification code [11]. The contents of this guideline with emphasis of its interference with other national codes and standards has been discussed by Sucuoglu *et al* [12].

As mentioned in the previous paragraphs, most typical seismic damage types for electrical equipment in the past earthquakes are the failure of the porcelain bushings, derailment of the transformers, poor anchorage, failure of surge arrestors, voltage transformer, circuit breaker, and current transformer due to excessive vibration or interconnectivity effects [3,13]. Among this equipment, the seismic vulnerability of circuit breakers, which are used for electrical load switching and fault current interruption, becomes very critical since they are essential equipment in a power station for continuous service and functionality. Therefore, this paper focuses on the seismic performance assessment of this specific type of electrical equipment, by putting emphasis on the importance of seismic safety evaluation of electrical equipment in a power substation for the purpose of earthquake loss mitigation. The seismic assessment is carried out by using the new Turkish earthquake code for power systems (TEC-PS) [11]. Hence this is a pioneer study in Türkiye to present seismic safety calculations for a case study electrical equipment (i.e. circuit breaker) by introducing and using the new guideline that has been recently under legislation.

2. TURKISH EARTHQUAKE CODE FOR POWER SYSTEMS

Development of a national code for seismic qualification of electric power related systems and equipment was initiated in 2017 as a part of an extensive project to develop a series of guideline documents for lifelines and critical infrastructures in Türkiye. The project was sponsored by the General Directorate of Highways, which is a governmental organization under the Turkish Republic Ministry of Transport and Infrastructure. In 2019, the guideline was completed and submitted to the sponsoring agency for approval. Currently, the guideline has been officially approved as Turkish earthquake code for power systems (TEC-PS) [11] and it has been operative by the start of the year 2024.

Since there have been no such documents in Türkiye before to assess the seismic performance of electrical equipment, TEC-PS [11] had been prepared in accordance with some well-recognized international standards and the national seismic design and construction practice that takes into account seismic qualification of electrical equipment in power substations. This code is mainly divided into three sections labeled as A, B and C.

Section A is the core and the most detailed part of the code. It includes general seismic safety considerations, seismic hazard identification, definition of seismic qualification levels, qualification methods, seismic performance criteria for different equipment and installation requirements for the equipment.

One of the most important parts in Section A is the seismic hazard identification. In TEC-PS [11], seismic hazard is defined in two different levels as high and moderate with the selected seismic hazard parameter as the peak ground acceleration (PGA). In high and moderate seismic hazard levels, the PGA values have been considered as 0.5g and 0.25g respectively. Figure 3 presents the required response spectra for these two different hazard levels for damping ratios of 2%, 5% and 10%. It should be stated that the proposed response spectra in TEC-PS [11] is in accordance with the design spectra in TBSC-18 [14].

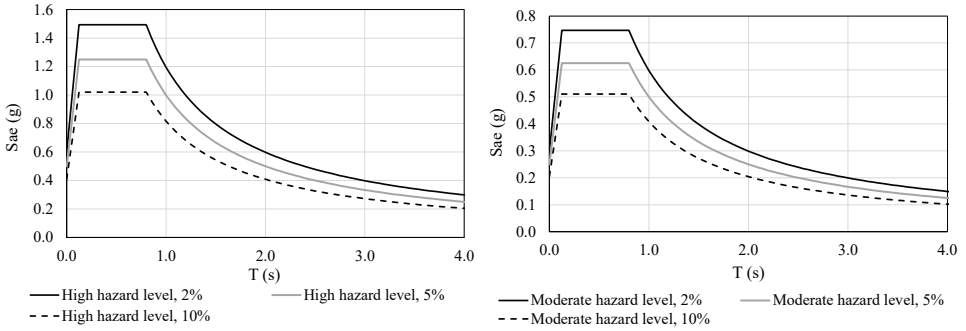


Figure 3 - Required response spectrum for high and moderate hazard levels in terms of 2%, 5% and 10% damping

Another important issue in Section A is the attainment of the seismic qualification levels. In TEC-PS [11], seismic qualification levels for electrical equipment are considered as high, moderate, and low in terms of the PGA value at the considered site (Table 1). The on-site PGA value for the default stiff (rock) site condition can be obtained from the Turkish Seismic Hazard Map (<https://tdth.afad.gov.tr/>) for a seismic hazard level with a return period of 2475 years (DD-1 level in TBSC-18 [14]) and then modified with appropriate coefficients to get the actual value for the local site condition of the substation. For high and moderate seismic qualification levels, the corresponding required response spectra for high and moderate hazard levels (see Figure 3) are employed. In the case of low seismic qualification level, there is no need to examine the seismic safety of the electrical equipment. On the other hand, there exist some technical requirements related with the anchorage of the equipment during installation to satisfy the required level of structural safety for continuous operation.

Table 1 - Seismic qualification levels defined in TEC-PS [11]

PGA intervals	Qualification level
$PGA \geq 0.5g$	High
$0.1g \leq PGA < 0.5g$	Moderate
$PGA < 0.1g$	Low

For seismic qualification of the electrical equipment, TEC-PS [11] offers analytical or experimental methods, which depend on different criteria like the equipment type, its function within the substation and voltage level. The analytical methods that can be used within the context of the code can be listed from simple to complex as static analysis, static coefficient analysis and response spectrum dynamic analysis. The challenges in analytical modeling are the development of numerical models for equipment of complex geometry and with numerous sub-assemblages and the determination of material properties of the parts of the equipment to be used in numerical modeling. The second alternative is experimental

testing, especially in the case of critical equipment with many small parts that are sensitive to vibration and for which numerical modeling is not feasible. TEC-PS [11] recommends static pull test, resonant frequency search test, sine beat test and time history test as the alternatives according to the type of the electrical equipment. Except for the static pull tests, a shake-table facility is required for all the other tests, which is currently a major issue in Türkiye.

The next part in Section A of TEC-PS [11] is devoted to the general seismic qualification requirements for all equipment and specific seismic qualification requirements for each individual electrical equipment. The main criteria for the general seismic qualification requirements are the equipment voltage level, past earthquake performance of the equipment class and the equipment importance.

For instance, since higher voltage means more seismically vulnerable equipment, the general requirements are more stringent for high voltage electrical equipment. Likewise, the past performances of some classes of electrical equipment reflect their damageability potential during seismic action. For instance, cantilever-structured electrical equipment (circuit breaker, instrument transformer, disconnect switch, bushing, insulator, etc.) is more susceptible to seismic damage. In addition, the importance of the electrical equipment within the substation also plays a crucial role as a general seismic qualification requirement.

According to general seismic qualification requirements, the stresses in critical parts of the equipment, which have been calculated by combining dead load, earthquake load from required response spectrum and other service or operating loads, should not exceed the allowable material stresses. In addition, the calculated tip deflections of cantilever-structured equipment should not exceed the allowable deflection limits, which are functions of the voltage level. During shake-table tests, there should be no damage in the equipment body, at the connections or at the support.

Specific seismic qualification requirements are determined according to the type and properties of the equipment. In TEC-PS [11], these specific rules have been defined individually for 15 different electrical equipment that can be installed in a substation, including the circuit breaker. The requirements can be relaxed if a more conservative and reliable seismic qualification approach is to be used for the considered equipment. However, the earthquake loads applied to the equipment are increased by 50% in the case of using a simpler or less reliable seismic qualification approach.

The last part in Section A of the code deals with the installation issues of electrical equipment such as suspended equipment, adjacent equipment interaction, support structures, anchorage, and base isolation. The detailed discussion related to the equipment installation is covered in Sucuoglu *et al.* [12].

Section B of TEC-PS [11] is focused on the seismic design of structural systems in substations. The design rules stated in this part are generally in accordance with the regulations in TBSC-18 [14]. The last part of the code, i.e., Section C, considers the seismic design of transmission and telecommunication towers.

2.1. Comparison of Seismic Hazard Definitions in TEC-PS and International Codes

Dynamic response analysis is a general approach used for seismic qualification of power substation equipment, as included in international codes such as IEEE-693 [10] and IEC62271-300 [15]. IEEE-693 [10] defines two different levels of qualification: performance level and design level. The code specifies that high and moderate-level spectra for performance level are double that of the design level. IEEE-693 only permits dynamic tests for performance level qualification and ensures that the equipment remains functional during and after the test without considerable structural damage. IEEE-693 was last revised in 2018 [10], with the previous version being published in 2005 [16]. Although the definitions of spectra (high and moderate level) for design and performance levels are the same in both versions, the latest version of IEEE-693 [10] extends performance level dynamic testing for most equipment that needs to be qualified by the time history test method. Additionally, it includes some revisions regarding seismic loads for anchorages, test requirements for the qualification of bushings, and conductor seismic load effects for the qualification of certain equipment. IEEE-693 [10] allows dynamic analysis only in design level qualification, similar to the other two codes TEC-PS [11] and IEC62271-300 [15]. These three codes define high and moderate-level acceleration spectra for different damping values for dynamic response analysis. Figure 4 shows comparison of high and moderate-level acceleration spectra as defined in TEC-PS, IEEE-693, and IEC62271-300 for 2% and 5% damping. Unless any other damping value is justified for the electrical component, these three codes suggest to assume 2% damping for dynamic analysis.

Figure 4 shows that the high-level spectral ordinates of TEC-PS and IEEE-693 with 2% and 5% damping are higher than those of IEC62271-300. The period limits of constant acceleration region also show differences among the spectra curves. The constant acceleration region for high and moderate level spectra with 2% and 5% damping are defined within the period range of 0.125 s to 0.9 s, 0.125 s to 0.8 s, and 0.1 s to 0.4 s in IEEE-693, TEC-PS, and IEC62271-300 spectra, respectively. In the constant acceleration region, the high-level 2% damped spectrum of TEC-PS are 8% lower than that of IEEE-693 and 4% higher than that of IEC62271-300. The margins increase to 20% between TEC-PS and IEEE-693, and 30% between TEC-PS and IEC62271-300 in the descending branches of the spectral curves. The 5% high-level TEC-PS spectrum closely matches that of IEEE-693 up to $T = 0.8$ s. However, the TEC-PS spectral ordinates are 14% lower than those of IEEE-693 in the descending branch. These two spectra yield demands almost 2.5 times higher than the spectrum given IEC62271-300 up to $T = 1$ s. On the other hand, it is deduced from Figure 4 that the moderate level spectra of TEC-PS are lower than those of IEEE-693 with the same percentage of difference is attained for their 2% and 5% damped high-level spectra comparison. The 5% percent damped moderate-level spectra of TEC-PS and IEEE-693 yield higher spectral acceleration values than that of IEC62271-300 throughout the whole period range. On the other hand, the moderate-level acceleration spectrum given in IEC62271-300 for 2% damping possesses 16% and 9% higher acceleration values than those of TEC-PS and IEEE-693, respectively for up to 0.6 s. For periods larger than 0.6 s, the trend of three spectra is close to each other. Based on the discussion above, seismic demands given by TEC-PS and IEEE-693 are generally similar, while IEC62271-300 opts for somewhat lower spectral acceleration values for 5% damping.

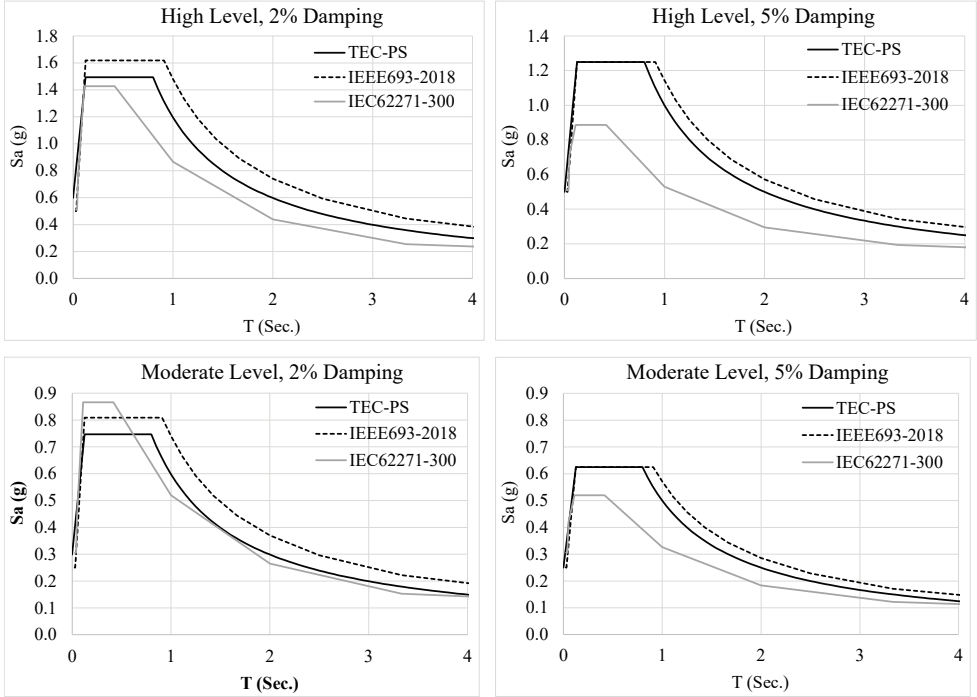


Figure 4 - Comparison of high and moderate seismic hazard level response spectra for 2% and 5% damping

3. SEISMIC SAFETY CALCULATIONS FOR THE CASE STUDY EQUIPMENT

This paper focuses on the seismic safety assessment of electrical equipment in power substations by considering circuit breakers for case study. In other words, similar seismic safety calculations can also be carried out for the other electrical equipment. All the considerations and calculations are conducted in the context of the new Turkish earthquake code for power systems (TEC-PS) [11]. Hence the paper also presents the state of practice for seismic qualification of electrical equipment in Türkiye by applying the new national code for the first time.

Circuit breakers have been used for electrical load switching and fault current interruption in power substations. Therefore, they are one of the critical components in the protection system of a power station for continuous service and functionality. There are two types of circuit breakers according to the chamber that houses the interrupter mechanism: live tank and dead tank. Live tank circuit breakers have their tank at line potential and they are supported by insulating columns (Figure 5, left). Dead tank circuit breakers possess a current transformer at the base of their bushings and the tank is at ground potential (Figure 5, right). Both of these types of circuit breakers are mounted on supporting frames made of steel profiles and they are directly anchored to a rigid foundation [17].

Live tank circuit breakers are more economical and require less space within the station whereas they are more vulnerable to seismic action due to their elevated mass and slender or

cantilevered structure. Seismic fragility of live tank circuit breaker has been verified by the reported cases of damage and failure after past earthquakes [3, 18]. Accordingly, potential modes of failure can be listed as follows: tipping of the equipment due to anchorage failure, buckling or yielding of the members within the supporting frames due to excessive vibration, failure of brittle porcelain breaking unit or support insulator under high internal pressure and leaking of gaskets separating column members.

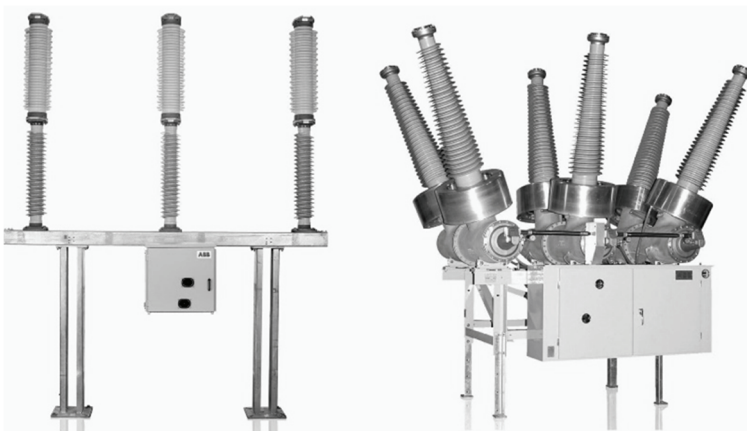


Figure 5 - A typical live tank circuit breaker (left) and a dead tank circuit breaker (right)

The above discussions reveal that seismic design and qualification of circuit breakers is important to ensure the safety of power substations. Hence this section of the paper focuses on the seismic performance evaluation of two different (1-pole and 3-pole) live tank circuit breakers by referring to the Turkish seismic qualification guideline for electrical equipment. The following sub-sections cover seismic qualification requirements, the identification of seismic loads through the related design spectrum, numerical modeling of the selected circuit breakers, the details of seismic analysis and the interpretation of the analysis results.

3.1. General Description of Case Study Equipment

General view of 1-pole type circuit breaker is given in Figure 6, left. The insulator and interrupter mechanism are connected to a steel support structure which is 2.3 meters high. The support structure is composed of four vertical steel angles connected by braces. The vertical elements are L.80.80.8 equal-leg angles while braces are L.65.65.5 equal-leg angles. Horizontal steel plates having dimensions of 60mm × 8mm are placed at top and bottom ends of the support structure connecting the vertical elements. The vertical elements are anchored to reinforced concrete footing at the base via steel anchorage bars. The operation of the circuit breaker is maintained and controlled from a cabinet with a mass of 240 kg. The control cabinet is bolted to the support structure at one side. Total mass of the circuit breaker is 1200 kg including the control cabinet.

3-pole type circuit breaker has an interconnected electromechanical interrupter mechanism between poles which is operated from a single control cabinet. The construction is similar to

that of 1-pole system; however, individual poles and support structures are connected by two structural steel channel section beams in transverse direction. The spacing between poles is 3 meters and the mechanical connections running through the spans enable the circuit breaker equipment in poles perform the opening-closing operation simultaneously. General layout of the 3-pole circuit breaker structure is presented in Figure 6, right. The support structure geometry of the equipment is same as that of one-pole system albeit all members are L.70.70.5. Two NPU320 type channel profile steel beams are connected to three support structures via four M24 bolts per support. NPU320 profiles having 320 mm height, 90 mm flange length with web and flange thickness about 10, and 13 mm, respectively are 6.6 meters long. Three circular holes with 182 mm diameters in beam webs are located at several locations along the span to provide access to the interrupter mechanism located between the beams. Three poles with the same geometry and dimensions to that of 1-pole breaker are bolted to steel beams with M24 bolts as shown in Figure 6, right. The total height of the circuit breaker is 6 meters. The control cabinet is bolted to the steel beams between the second and third poles and has a mass of 600 kg. The system, in total, has a mass of 3200 kg.

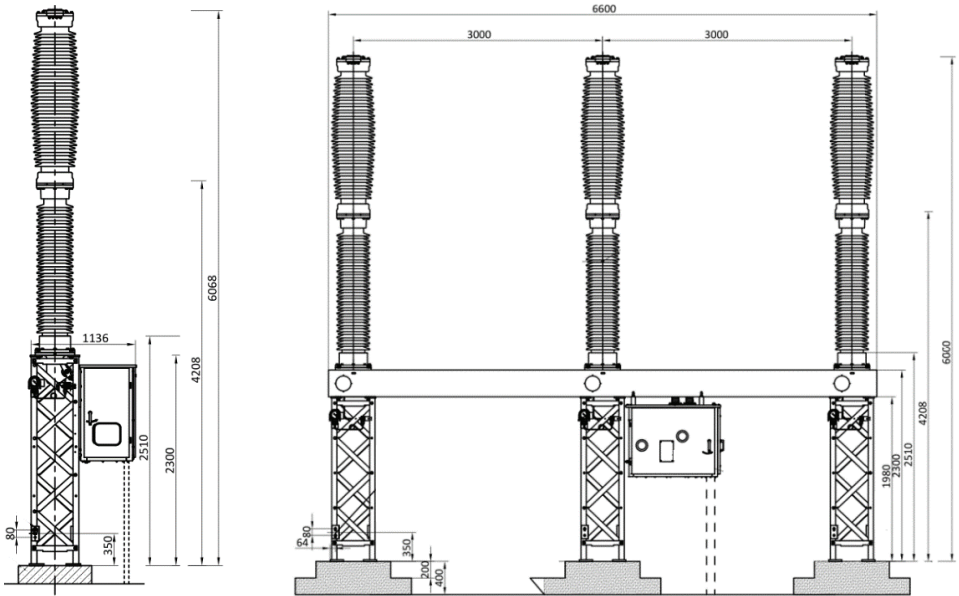


Figure 6 - General views of the 1-pole (left) and 3-pole (right) circuit breakers (units in mm).

The pole structure is composed of an insulator element and an interrupter which contains the circuit breaker mechanism. Both insulator and interrupter elements are made of porcelain with electrical components located inside. The insulator has a tubular profile with an equivalent diameter of 210 mm and 35 mm thickness. The interrupter atop the insulator contains the circuit breaker mechanism and has a tubular section with varying diameter which is largest at 325 mm with 30 mm thickness. Both elements are 1.83 m high. Between two elements as well as at the bottom end of the pole are tubular aluminum connection members

which are 150 mm in height. Material properties of structural steel, aluminum and porcelain elements of circuit breakers are given in Table 2.

Table 2 - Material properties of the elements of the inspected high voltage circuit breakers.

Material	Modulus of Elasticity (GPa)	Unit Weight (kN/m ³)	Strength (MPa)
S235JR Structural Steel	210	77.0	235
Porcelain	124	26.5	55
2014 – T6 Aluminum	73.6	26.6	70

3.2. Seismic Action and Service Loads for the Case Study Equipment

Turkish earthquake code for power systems (TEC-PS) [11] specifies that high voltage circuit breakers should meet high seismic performance level in order to be qualified. As for the qualification method, response spectrum dynamic analysis could be performed under the seismic hazard compatible with the required performance level. The qualification procedure also requires that the circuit breaker equipment should be investigated under the combined action of service and seismic loads.

The high-performance level that circuit breakers should meet requires the use of the high seismic hazard level response spectrum. Modal damping ratios of both circuit breaker types are determined as 2% as specified in the TEC-PS [11]. Consequently, the response spectrum given in Figure 3 for the associated damping ratio is used in the dynamic analyses for horizontal excitation. Vertical excitation is also considered by defining the vertical response spectrum which is obtained by multiplying the selected horizontal design spectrum by a factor of 0.8.

Both allowable stress and load and resistance factor design methods are permitted to be used in evaluation of seismic response obtained by performing dynamic analysis. As allowable stress approach is adopted in this study, associated load combination (Equation 1) specified by the TEC-PS [11] is employed. Vertical seismic loads computed according to vertical response spectrum which is obtained by imposing a scale factor of 0.8 to the horizontal acceleration spectrum, as per TEC-PS [11]. They are incorporated into E_D load case which is included in the load combination given in Equation 1.

$$1.0 G + 1.0 E_D + 1.0 S \tag{1}$$

In Equation 1, G denotes self-weight, S denotes the service loads acting on the circuit breaker during operation. E_D is the earthquake load combined for two horizontal and vertical orthogonal directions as defined in Equation 2.

$$\begin{aligned} E_D &= \pm E_D^X \pm 0.3 E_D^Y \pm E_D^Z \\ E_D &= \pm 0.3 E_D^X \pm E_D^Y \pm E_D^Z \end{aligned} \tag{2}$$

High voltage circuit breakers generate impact loads in their poles during instantaneous opening and closing actions. The opening operation acts compression (downward) loads to the poles. Similarly, closing operation results in a tension (upward) load. According to its specifications, 1-pole circuit breaker generates 44 kN compression and 22 kN tension loads in closing and opening operations, respectively. In the case of 3-pole system, a compression load of 90 kN and a tension load of 40 kN during opening and closing, respectively are applied to all 3-poles simultaneously. These services loads for both types of circuit breakers are taken into account in the load combination given in Equation 1.

In a high voltage circuit breaker, each pole is connected to bus bars or high voltage lines at their two end terminals. Environmental factors cause deformations and movement in connected elements, resulting in point loads acting on terminal ends of circuit breakers. According to Substation Structure Design Guide [17], these loads are determined as 1250 N in direction of bus bars, 750 N in perpendicular direction and 1000 N in direction of gravity. The terminal loads which are the external connection loads are acted in both senses (positive and negative) in the analyses. The service load case, S in Equation 1 represents the result envelope of the analyses performed under terminal loads acting in different directions.

3.3. Numerical Modeling of the Case Study Equipment

Three-dimensional finite element analytical models of high voltage circuit breakers are created using a commercially available structural analysis software. Discrete elements are utilized in modeling all members of 1-pole circuit breaker. In the case of 3-pole system, two steel beams connecting the individual breaker poles are regarded critical members in terms of expected stress demands. Due to this consideration, two steel beams are modeled using a continuum approach while other parts of the equipment are represented as discrete elements. A fine mesh of four-node finite elements has been created for the steel beams of the 3-pole circuit breaker. Pole structures are represented in the model with equivalent diameters and thicknesses of their members. The equivalent thickness of the porcelain insulators was determined according to their bending stiffness. Consequently, the complex cross-sectional geometry of the porcelain members was transformed to a tubular cross section which is more convenient for numerical modeling. The self-mass of the equivalent sections was also modified so that the total mass of the tubular sections is the same as actual porcelain insulators. Hence, the dynamic characteristics of these members, namely stiffness and mass properties, were incorporated into the numerical model with satisfactory accuracy. Discrete elements representing the porcelain insulators are connected to the support structures via massless link members at the actual position of the bolts. By doing so, the force transfer between the insulator and the support structure is attained at the bolt interfaces. The control cabinets, which contribute the total mass, are included in the analytical models as point masses placed at their respected locations and connected with rigid elements to the rest of the models. Analytical model visuals of both systems are presented in Figure 7.

Dynamic properties of two circuit-breaker systems are determined via modal analyses. The first four free vibration periods of 1-pole circuit breaker are computed as $T_1 = 0.153$ s, $T_2 = 0.150$ s, $T_3 = 0.035$ s and $T_4 = 0.034$ respectively. Due to its geometry, 1-pole circuit breaker behaves like a cantilever column. The mode shapes and associated free vibration periods of 3-pole circuit breaker are given in Figure 8.

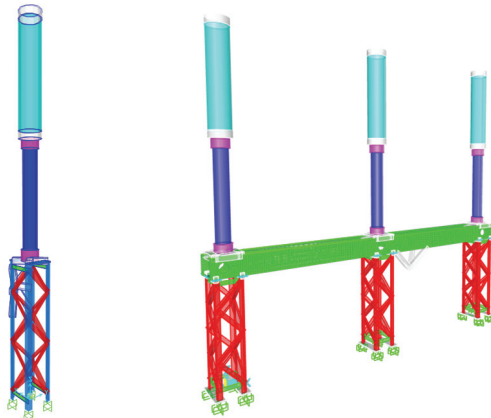


Figure 7 - Analytical model views of the 1-pole (left) and 3-pole (right) circuit breakers

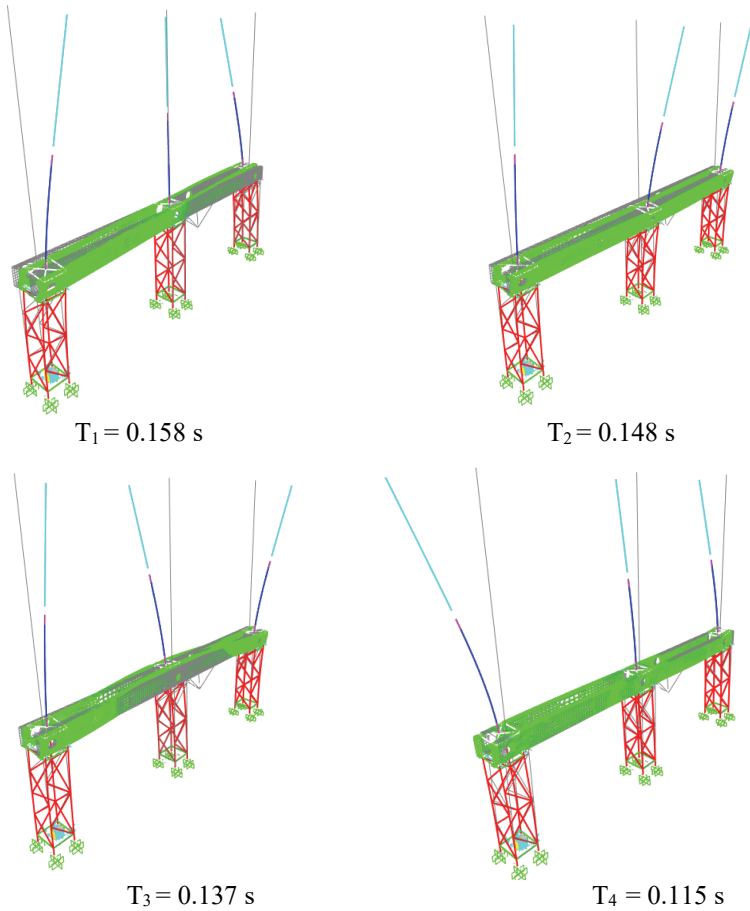


Figure 8 - The first four free vibration modes and their periods of the 3-pole circuit breaker.

3.4. Analysis Results

3.4.1. 1-pole Circuit Breaker

Stress demands on elements of the circuit breaker is compiled from the most unfavorable loading conditions obtained from the load combinations defined in Equation 1. These demands and allowable stress limits for each type of material are given in Table 3. In accordance with the allowable stress approach, a safety factor of 1.67 is used for steel members as defined in Turkish Steel Design Code [19]. Porcelain members are classified as brittle under loading. Therefore, TEC-PS [11] limits the allowable stress by 50% of the strength. Hence, a safety factor of 2 is utilized according to the regulation. In the case of aluminum members, the safety factor is used as 1.65 conforming to Aluminum Design Manual [20].

Table 3 - Computed stress demands and allowable limits for 1-pole circuit breaker (results in MPa).

Element Type	Maximum Stress Demand	Minimum Stress Demand	Allowable Stress
Steel members	115.3	-132.7	140.7
Porcelain insulator and circuit breaker equipment	24.9	-23.7	27.5
Aluminum (2014 – T6) connection members	30.1	-28.5	42.4

Maximum and minimum stresses as well as allowable limits for M24 bolts connecting the pole to the support structure and anchorage bars at the foundation level are given in Table 4. A safety factor of 2 which is required for both type of members according to Turkish Steel Design code [19] is satisfied for the given loading.

Table 4 - Comparison of maximum and minimum stress levels of connection bolts and anchorage bars with allowable limits.

Member	Maximum Tension Force (kN)	Maximum Stress in Tension (MPa)	Strength (MPa)	Computed Safety Factor (SF)
M24 connection bolts	126.4	279.4	640.0	2.30
Foundation anchorage bars	94.2	133.3	640.0	4.80

Results in Tables 3 and 4 indicate that the 1-pole circuit breaker satisfies the seismic qualification requirements defined in the TEC-PS [11] for the high hazard seismic level.

3.4.2. 3-pole Circuit Breaker

Stress demands computed from the seismic analyses are compiled in a similar manner to 1-pole system and evaluated according to allowable stress approach. Results are given in Table 5 for all steel, aluminum, and porcelain components of the 3-pole circuit breaker.

Table 5 - Computed stress demands and allowable limits for 3-pole circuit breaker (results in MPa).

Element Type	Maximum Stress Demand	Minimum Stress Demand	Allowable Stress
Steel members	127.6	-138.6	140.7
Porcelain insulator and circuit breaker equipment	25.3	-26.8	27.5
Aluminum (2014 – T6) connection members	26.1	-28.0	42.4

Finite element results of steel beams connecting 3-poles are processed for the most unfavorable load combination and shown in Figure 9 for two principal axes.

Local stress concentrations are observed in Figure 9 at connections to poles and support structures as well as circular openings as shown in the insets. The maximum and minimum stress demands compiled from these results are shown in Table 6. The safety factor is 1.67 as in the case of other structural steel members.

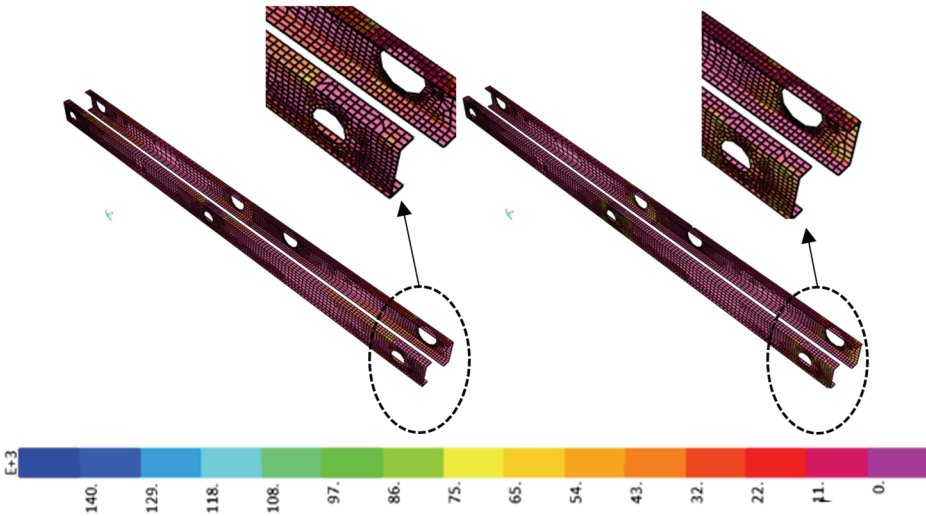


Figure 9 - Stress demands (kPa) obtained from finite element analysis of steel beams for 1-1 (left) and 2-2 (right) principal axes.

Table 6 - Stress demands of NPU320 steel beams and allowable limits (results in MPa).

Load Combination	1-1 principal axis	2-2 principal axis	Allowable Stress
Maximum	92.0	95.2	140.7
Minimum	-90.8	-101.9	140.7

Stress evaluation for M24 bolts connecting the poles, beams and support structures is given along with anchor bars in Table 7. Computed safety factors for these members are higher than the required safety factor of 2.

Table 7 - Comparison of maximum and minimum stress levels of connection bolts and anchorage bars with allowable limits.

Member	Maximum Tension Force (kN)	Allowable Stress in Tension (MPa)	Strength (MPa)	Computed Safety Factor (SF)
M24 connection bolts	99.5	219.9	640.0	2.90
Foundation anchorage bars	66.3	93.8	640.0	6.8

It is determined from the results that 3-pole circuit breaker system also satisfies seismic qualification criteria for high hazard level which is defined by the TEC-PS [11].

3.5. Discussion of the Analysis Results

The 1-pole circuit breaker predominantly behaves as a single mode pendulum under the seismic action due to its geometry. Hence, the highest demands presented in this study are computed at the bottom ends of its components. However, stress concentrations that could implicate a localized area of vulnerability are not observed in any particular part of the circuit breaker.

It has been noted that the dynamic behavior of the 3-pole circuit breaker is different than that of the 1-pole circuit breaker due to more complex geometry. This situation, in turn, causes an increase in seismic demands determined for the 3-pole circuit breaker. The steel beams running along the transverse length of the system play an important role in the out of plane behavior of the circuit breaker in terms of transferring loads between support structures and providing torsional rigidity. Their failure may lead to serious instability of the system. It has been observed that some stress concentrations occur along steel beams in places such as holes or connection regions. Although computed demands are close to allowable stress limit in these members, they perform as required when subjected to code defined seismic hazard.

4. CONCLUSIONS

The seismic safety of non-building structures has become the new focus of earthquake engineering research in the last two decades. This is due to the fact that in today's world it is also important to mitigate economical losses and loss of functionality as well as the physical losses after a major earthquake. This new paradigm turns the spotlights on electrical equipment in power substations, which should continue their functionality in post-earthquake periods. Hence, this study focuses on the seismic safety assessment of the electrical equipment by introducing the recent efforts on national scale regarding their seismic qualification and then by putting the emphasis on a specific electrical equipment within the substation; namely the circuit breaker.

There are reasons for selecting circuit breakers as a case study. First, it is an essential electrical equipment in a power station for continuous service and functionality since it is used for electrical load switching and fault current interruption. Second, like most electrical equipment, it is highly sensitive to amplified vibrational motion caused by the earthquakes due to its cantilevered and flexible nature with elevated mass and fragile components. Hence, the study focuses on the seismic safety calculations of two different types of circuit breakers (1-pole and 3-pole) by using the new Turkish Earthquake Code for Power Systems (TEC-PS). The following conclusions can be drawn based on the obtained results:

- Circuit breakers can be regarded as one of the most critical equipment in a power substation due to their cantilevered structures of the poles which are made of fragile and brittle material. Hence, they should be designed carefully to resist the earthquake loads in the most critical zone with the highest level of seismic action in addition to the other service loads.
- 3-pole circuit breaker seems to be more vulnerable to seismic action than the one-pole circuit breaker due to geometrical complexity that triggers the higher vibration modes. In that case, the critical zones in terms of stress concentration are located at the load transfer sections between different components of the equipment (i.e. insulator-interrupter, insulator-beam, beam-support structure). In the case study equipment, the values seem to be within allowable limits although they are considerable under high hazard level that is dictated by the response spectrum.
- The analysis results show that it is also important to check the seismic safety of the supporting frame and its anchorage to the base plate in order to avoid any premature failure during the vibration of the equipment.

This study is novel in the sense that it presents the new methodology in evaluating and classifying the seismic response of high voltage electrical equipment and provides insight to the expected behavior of circuit breakers under earthquake induced action. It also demonstrates the current state of practice regarding the seismic assessment of electrical equipment in power stations and implementation of the new Turkish Earthquake Code for Power Systems that will be effective very soon. In that respect, the study also serves as a pioneer document for those who will use the new national code for electrical equipment in the near future.

References

- [1] Schiff, A., Guide to improved earthquake performance of electrical power systems, Rep. No. NIST GCR 98-757, National Institute for Standards and Testing, Washington, DC, USA, 1998.
- [2] MCEER. The Chi-Chi, Taiwan earthquake of September 21, 1999: Reconnaissance Report. Rep. No. MCEER 00-0003. Eds: Lee, G.C. and Loh, C.H. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, USA, 2000.
- [3] Fujisaki, E., Takhirov, S., Xie, Q., Mosalam, K.M. Seismic vulnerability of power supply: Lessons learned from recent earthquakes and future horizons research. Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2014), 30 June- 2 July, Porto, Portugal, 2014.
- [4] Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE). Chile Earthquake of 2010: Lifeline Performance, TCLEE Monograph No. 36. Eds: Tang, A.K. and Eidinger, J.M. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2013.
- [5] Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE). Christchurch, New Zealand Earthquake Sequence of Mw 7.1 September 04, 2010, Mw 6.3 February 22, 2011, Mw 6.0 June 13, 2011: Lifeline Performance. TCLEE Monograph No. 40. Eds: Eidinger, J.M. and Tang, A.K. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2012.
- [6] O'Rourke, T.D., Erdogan, F.H., Savage, W.U., Lund, L.V., Tang, A., Water, gas, electric power and telecommunications performance – 1999 Kocaeli earthquake. Earthquake Spectra 16(S1), 377-402, 2000.
- [7] MCEER. The Marmara Turkey Earthquake of August 17, 1999: Reconnaissance Report. Rep. No. MCEER 00-0001, Ed: Scawthorn C. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, USA, 2000.
- [8] Uckan, E. Lifeline Damage Caused in the 23 October (Mw=7.2) 2011 and 9 November (M=5.6) 2011, Van Earthquakes in Eastern Turkey. Sixth China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, 28 May -1 June, Chengdu, China, 2013.
- [9] Huvaj, N., Kalpakçı, V., Öztürk, Ş., Duman, T.Y., Baran, E., Kılıç, B.T., Uysal, A.S., Dalkılıç, E., Dalkılıç, S., Investigation of High Voltage Electricity Transmission Lines for Earthquake and Landslide Aspects Following the February 6, 2023 Earthquakes. TUBİTAK Earthquake Studies Virtual Conference, 30 March, Ankara, Türkiye, 2023.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Recommended practice for seismic design of substations, Standard No: IEEE-693-2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Piscataway, NJ, USA, 2018.
- [11] General Directorate of Highways. Sector B2-B3: Distribution Facilities and Systems. Electricity Power Transmission and Telecommunication Systems. Technical Report prepared by Yuksel Project and submitted to Turkish Republic Ministry of Transport and Infrastructure General Directorate of Highways Department of Structures, Ankara Türkiye, 2019.

- [12] Sucuoğlu, H., Erberik, M.A., Kaatsiz, K., Alici, F.S. Seismic Assessment of Electric Transmission Systems. Sixth International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Gebze, Kocaeli, Türkiye, 2021.
- [13] Eidinger, J. Wenchuan earthquake impact to power systems. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE), 28 June- 1 July, Oakland, California, USA, 2009.
- [14] Disaster and Emergency Management Presidency, AFAD (2018). Turkish Building Seismic Code, TBSC-18. Republic of Türkiye, Ministry of Interior, Ankara Türkiye.
- [15] International Electrotechnical Commission (IEC). High-voltage switchgear and controlgear - Part 300: Seismic qualification of alternating current circuit-breakers, Standard No: IEC62271-300:2006, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2006.
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Recommended practice for seismic design of substations, Standard No: IEEE-693-2005, Institute of Electrical and Electronics Engineers Piscataway, NJ, USA, 2005.
- [17] Structural Engineering Institute (SEI). Substation Structure Design Guide. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 113. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2007.
- [18] Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE). Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 96. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 1999.
- [19] Guideline to Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures. Republic of Türkiye, Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, Ankara, Türkiye, 2018.
- [20] Aluminum Design Manual. The Aluminum Association, Arlington, Washington, 2020

Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazık Davranışının Orijinal Bir Kazık Yükleme Deneyi ve İmalat Yaklaşımı ile İncelenmesi

Orhan Esat İNANIR^{1*}
Aykut ŞENOL²
Mehmet M. BERİLGİN³



ÖZ

Enstrümanlı edilmiş kazık yükleme deneyleri ile kazık boyunca oluşan yük dağılımının belirlenmesi, Performansa Dayalı Kazık Tasarımına (PDK-T) imkan vermekte ve temel kazıklarının tasarımındaki belirsizlikleri asgari düzeye indirmektedir. Ancak, çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda (fore kazık, prekast çakma kazık, yerinde dökme çakma kazık Vibreks, vs.) oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Bu makalede çekme yüküne maruz betonarme kazık davranışının kazıklar ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ara mesafesi yaklaşık 6m olan komşu iki kazık üzerinde eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) gerçekleştirilmiştir. Kazık çekme deneylerinde birinci tip TK-2 (TİP-A) deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi ve ikinci tip ise TK-3 (TİP-B) ise özel bir tertibat ile kazık tabanından çekilecek şekilde imal edilmiştir. Kazık başından çekilmesi durumu (TİP-A) için deneyde uygulanan eksenel çekme yükü altında betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişimi birim deformasyon ölçümlerinde tespit edilmiş ve tahribatsız deney uygulamalarıyla da teyit edilmiştir. Bu durum yaklaşık 70-120 mikroStrain mertebelerinde gözlenmiş olup literatürdeki eksenel yük ve momente maruz beton kesitindeki çatlak gelişimini inceleyen çalışmalar ile uyumludur. Bu menfi etkilerin bertaraf edildiği betonda çekme gerilmesinin oluşmadığı tarzda orijinal bir düzenek tasarlanmıştır. Bu düzenek vasıtası ile aynı şartlardaki komşu kazık, tabandan yukarı istikamette çekilerek betonda basınç gerilmesi mobilize edilerek çekme yükü altında test edilmiştir. Bu geliştirilen orijinal deney ve imalat usulü konvansiyonel olarak kazık

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30 Aralık 2023 günü ulaşmıştır. 13 Mart 2024 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2024 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1412047>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
oinanir@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-7883-5428>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
senol@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1832-3919>

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
berilgen@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-6544-011X>

* Sorumlu yazar

başından çekilerek tatbik edilen çekme yükleme durumundaki problemleri bertaraf ettiği kazığın yük deplasman performansında ve yük transfer ilişkisinde hatırı sayılır bir şekilde performans artışı sağladığı gözlemlenmiştir. TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktasının farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla, kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi Davisson Yöntemi ile kazık başı yükü ve kazık başı deplasmanı için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman için yapılan analizde ise TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir. Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisine göre “Davisson Kazık Kapasitesi Tahmin Yöntemi” ile ~%146 mertebelerinde yine TİP B için kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisi kıyaslamasına göre ise ~%120 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme çekme kazıkları, enstrümente edilmiş kazık yükleme deneyi, aletsel gözlem, çatlak, performansa dayalı kazık tasarımı, kazık süreklilik/bütünlük deneyi.

ABSTRACT

Investigation the Behaviour of Cast In-Situ Piles which are Subjected to Tension / Uplift Load with A Novel Pile Constructing / Testing Approach

Instrumented pile loading tests can give a better understanding of the pile load-transfer mechanism. It also allows for assessing the integrity and durability issues of the bored piles under tension. When a reinforced concrete pile is subjected to high tension forces, it might reach the tensile stress capacity of concrete, and cracking occurs at the weakest section. In this study, the results of an instrumented axial static tensile pile loading test (S-KYD/Ç) were evaluated regarding crack development and propagation. It has been determined that crack development occurs when the tensile deformation capacity of the concrete is reached under the axial tensile load applied during the test. This phenomenon was observed at approximately 70-120 microStrain levels and is consistent with similar studies in the literature. With a novel approach, that prevents tensile stress development in the reinforced concrete body, the problems mentioned above are targeted to be eliminated. Dywidag-made GEWIPlus bars were used to transfer the pile head load to the pile toe. This mechanism ensures the development of compression stresses in the pile during pull-out upward loading. Loading from the pile toe contributes considerably to the load-displacement behavior of the piles that are under tension load. TİP-A and TİP-B different load application points normally don't provide a chance for direct comparison. However, for a general understanding, the comparison might be done with the “Davisson Pile Capacity Estimation Method” for TİP-A and TİP-B pile loading test results as per pile head load - pile head movement relations. 6.1MN for TİP-A and 8.9MN for TİP-B estimated with the Davisson Method as per pile head behavior. These figures represent a ~%146 capacity increase for piles under tension load. Moreover, because the load application point is from the pile toe, comparing pile toe load - pile toe movement for TİP-B might be worthwhile. 7.3MN for TİP-B resulting ~%120 capacity increase.

Keywords: Integrity, crosshole logging, tension, crack, pull-out, instrumented pile loading test.

1. GİRİŞ

Enstrümente edilmiş kazık yükleme deneyleri ile kazık boyunca oluşan yük dağılımının belirlenmesi, Performansa Dayalı Kazık Tasarımına (PDK-T) imkan vermekte ve temel kazıklarının tasarımındaki belirsizlikleri asgari düzeye indirmektedir. Ayrıca, çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi, kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Betonarme kazıklara kazık başından yukarı istikamette yük tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme gerilmesi kapasitesine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Çatlak gelişimi kazığın çekme yükü altında deplasman davranışını etkilemektedir. Bu durum kazık çekme deneylerinde kazık davranışının değerlendirilmesini ve t-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılmasını zora sokmaktadır. Esasen, “Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modeli” sıhhatli bir şekilde oluşturulamamaktadır. Bu durum daha çok araştırmacılar tarafından mobilize olan şaft direncinin istikamete bağlı olması ile açıklanmaya çalışılmıştır. Ancak, literatürde şaft direncinin kazığın hareket istikameti ile değişip değişmediği hususunda farklı görüşler mevcuttur. England [9] ve Fellenius [11] çalışmalarında deplasman doğrultusunun şaft direnci üzerinde bir etkisi olmadığını, diğer bir deyişle kazık şaftında mobilize olan kayma gerilmesinin kazığın basınç veya çekme yüküne maruz kalmasından bağımsız olduğunu raporlamışlardır. Bu görüşe karşılık bazı araştırmacılar çekme yüküne maruz kazıkların şaft dirençlerinin, basınç yüküne maruz kazıklardan daha düşük olduğunu raporlamaktadırlar [16] [17].

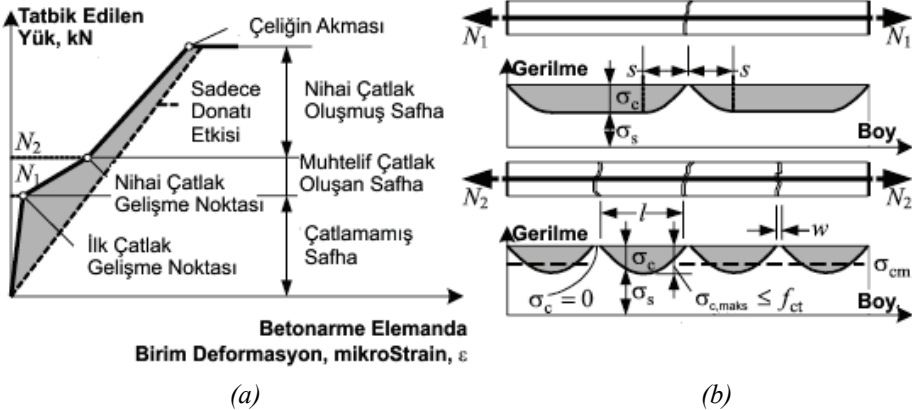
Jardine ve Chow [16] tarafından yapılan çalışmada çekme yüküne maruz kazıklarda şaft etkileyen radyal efektif gerilmelerin ve kazık boyunca etkileyen pik lokal kayma gerilmesinin kum birimlerde basınç yüküne maruz kazıklara nisbeten daha düşük olduğu ancak kilde bir farklılık oluşmadığı belirtilmektedir. Liew vd [17] ise çekme yüküne maruz kazıklarda şaft direncindeki azalmanın kazığın Poisson oranı etkisi sebebiyle geometrik büzülmesinin etkili olduğunu belirtilmektedir. Ayrıca, yaptıkları karşı kuyu ultrason deneyinde statik çekme kazık yükleme deneyi esnasında oluşan çatlak gelişimine bağlı olarak ilk varış zamanında (FAT) gecikme ve sinyal enerjisinde (E) azalma tesbit ettiklerinden de bahsetmektedirler.

Bu çalışma kapsamında enstrümente edilmiş bir aksel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) sonuçları çatlak gelişimi ve yayılımı açısından değerlendirilmiştir. Çekme yüklemesi sonucunda betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişmektedir [7] [8]. Enstrümente edilmiş aksel kazık çekme deneylerinde farklı beton malzemesi karakteristikleri ve donatı miktarları için İnanır [13] tarafından çatlak gelişimi açısından 50-150 mikroStrain sınır değerleri gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bicocchi [7] çalışmasında ise eğilme momentine maruz pasif kazıklarda birim deformasyon ölçer verileri ile çatlak gelişimi sınır değerleri için benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

Beton aderansı ve donatı sıyrılmaya mekanizması Somayaji [20] tarafından incelenmiş ve çekme yüküne maruz bir betonarme elemanın yük-birim deformasyon eğrisinde üç bölge tanımlanmıştır (Şekil 1a). Birinci bölge çatlamamış safhada ilk çatlak gelişme noktasına kadar elemanın elastik davranış sergilediği bölge, ikinci bölge ilk çatlak gelişiminden nihai çatlak gelişimi noktasına kadar olan muhtelif çatlak oluşma safhasındaki deformasyon davranışı sergilediği bölge ve üçüncü bölge ise nihai çatlak gelişimi noktasından donatı akma noktasına kadar olan deformasyon davranışı sergilediği bölgedir.

Fields ve Bischoff [12] ise çekme yüküne maruz betonarme eleman için aksel gerilme ve birim deformasyon dağılımını Şekil 1.b'deki gibi tanımlamaktadır. Çatlak gelişimi betondaki gerilmenin çekme mukavemetine ilk ulaştığı en zayıf kesitte oluşmaktadır. Çatlak gelişimi sonrasında bu noktada betondaki gerilme sifira düşmektedir.

Betondaki gerilme çatlaktan uzaklaştıkça donatı beton aderansı sebebiyle transfer boyu (s) kadar mesafede çatlaktan etkilenmeyen gerilme değerine kadar artar. Çatlayan kesitte donatı ile beton aderansının yitirmeye başlaması, yüksek gerilmelere sebep olur ve çatlak genişler. Nisbeten küçük bir yük artımı bile mevcut çatlağın biraz ilerisinde başka bir çatlak oluşumuna sebebiyet verebilir. Yük artımı ile birlikte betonarme eleman boyunca belirli aralıklarla (nisbeten nizami aralıklarla, $s < l \leq (2 \cdot s)$) ilk çatlak patern gelişimi tamamlanmış olur (Şekil 1.b). Bu çatlak paterninde betondaki çekme gerilmesi her çatlak noktasında sifira düşer, tekrar beton çekme mukavemeti σ_{ct} değerine kadar artar, ancak tabii olarak hiçbir zaman betonun çekme mukavemetini aşamaz. Beton çekme mukavemetini artırıcı tedbir olarak rastgele donatı kullanımının araştırıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur [2].



Şekil 1 - Çekme yüküne maruz betonarme çekme elemanı: (a) çatlak gelişme safhaları [20] (b) aksel gerilme ve birim deformasyon dağılımını [12]

Burada izah edilen davranış aksel statik çekme kazık yükleme deneyinde (S-KYD/Ç) birim deformasyon ölçer (VWSG) verisinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu gözleme ilave olarak çatlak gelişimini doğrulamak için kazık çekme deneyi öncesinde, maksimum deney yükünde ve deney yükü boşaltıldıktan sonra deney kazığında tahribatsız kazık deney yöntemlerinden kazık bütünlük/süreklilik deneyleri, KBD (Sonic Integrity Test-SIT, Pulse Echo Test-PET, Pile Integrity Test-PIT) ve karşı kuyu ultrason deneyleri, K-KUD (CrossHole Sonic Logging-CSL, CrossHole Ultrasonic Method-CHUM) yapılmıştır. Karşılaştırmalı inceleme neticesinde çatlak gelişimi gözlemini destekleyici bulgular elde edilmiştir.

2. ZEMİN VE KAZIK ÖZELLİKLERİ

2.1. Zemin Durumu

Deney yapılan sahada yüzeyden (Kot +2.70) yaklaşık 4m kalınlığında kontrolsüz dolgu tabakası mevcuttur. Kontrolsüz dolgu tabakasını müteakip kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması sondaj sonuna kadar (Kot -24.5) devam etmektedir. Yeraltı su seviyesi yüzeye yakın bulunmaktadır (~+2.5). Deney kazığı -13.10 kotunda teşkil edilen çalışma platformundan imal edilmiş ve yüzeye yakın bulunan yeraltı su seviyesi yaklaşık çalışma platformunun altında kalacak şekilde çalışmalar süresince pompaj yapılmıştır. Zemin tabakalanması ile ilgili özet bilgi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 - Deney lokasyonunda zemin özellikleri

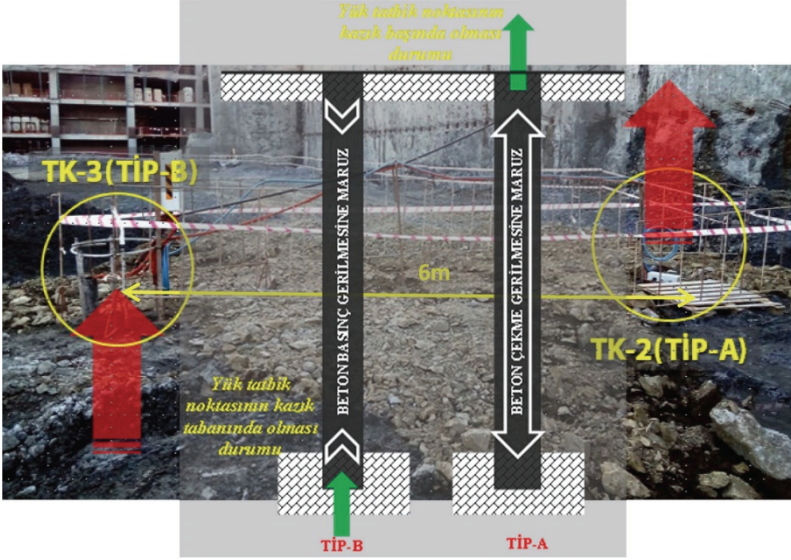
Kot/ [GRS 80]	Zemin Tanımlaması
+02.7 / +00.0	Kontrolsüz Dolgu: İri çakıllı Kum ve Kil
+00.0 / -00.7	Kontrolsüz Dolgu: Kumlu Kil kaya blok parçaları mevcut
-00.7 / -01.2	Kontrolsüz Dolgu: Kaya blokları
-01.2 / -09.6	Kumtaşı
-09.6 / -12.4	Çamurtaşı
-12.4 / -20.2	Kumtaşı
-20.2 / -23.3	Çamurtaşı
-23.3 / -23.8	Konglemera
-23.8 / -24.5	Kumtaşı

2.1. Kazık Özellikleri

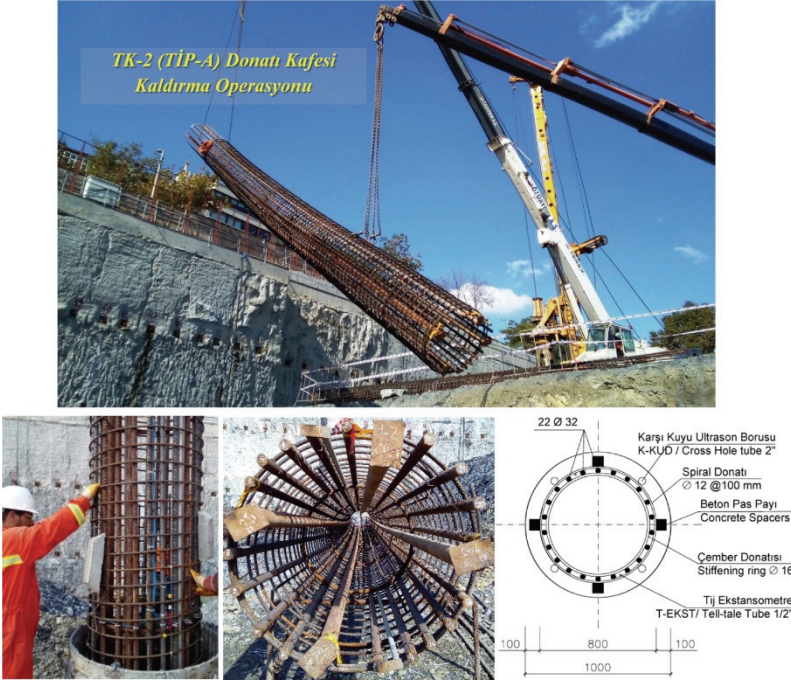
TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), Deney kazıkları OD1000mm dış çapında ve $L_{toplam}=10.4m$ ve $L_{net}=10.1m$ boyunda (Deney Platform Kotu -13.10, Temel Alt Kotu -13.40 ve Kazık Taban Kotu -23.50 olmak üzere) fore kazık tekniği ile kaya augeri kullanılarak ve kuyu stabilitesi için geçici muhafaza borusu (TK-2 için OD1080mm ve boru alt kotu -13.5 olmak üzere, TK-3 için OD1080mm ve boru alt kotu -20.6) kullanılarak imal edilmiştir. Tij tipi ekstansometre ve seyyar ekstansometre yerleştirilmesine yönelik kılıf borular (karşı kuyu ultrason deneyi maksadıyla da kullanılacak olan) ve donatı tipi birim deformasyon ölçerler ile enstrümante edilerek hazırlanan donatı kafesi (22nos Φ 32mm boyuna donatı ve Φ 12/100mm etriye ile teşkil edilerek) tek parça olarak kuyuya indirilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).

Bunun ardından tremi borusu kullanılarak C35/45 sınıfı beton dökülmüş ve muhafaza borusu çekilerek imalat tamamlanmıştır.

TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), Deney kazıkları ara mesafesi 6m olmak üzere kapasitelerinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için “Enstrümante edilmiş eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç)” yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2 - TK-2 Çekme deney kazığı için konvansiyonel olarak kazık başından yükleme durumu (TİP-A), TK-3 Çekme deney kazığı için kazık tabanından yükleme durumu (TİP-B) yerleşimi



Şekil 3 - Enstrümente edilmiş TK-2 deney kazığı (TİP-A) donatı kafesi kaldırma operasyonu, donatı kafesi genel ve detay görünüşü.



Şekil 4 - Enstrümanlı TK-3 deney kazığı (TİP-B) donatı kafesi genel ve detay görünüşü.

3. ENSTRÜMANLI EDİLMİŞ EKSENEL STATİK ÇEKME KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/Ç)

3.1. Ölçüm Ekipmanları

Deney kazığına dört (4) seviyede Titreşen Telli Donatı Tipi Birim Deformasyon Ölçer (VWVG/SB, Vibrating Wire Sister Bar Type Strain Gauge) her seviyede karşılıklı ikişer çiftten dört (4) adet olmak üzere toplam onaltı (16) adet olarak yerleştirilmiştir. Karşılıklı kuvvet çiftlerinin 4 adet SG ile ölçülmesi ölçüm doğruluğu (accuracy) ve yedeklemesi (redundancy) açısından önem arz etmektedir. Birim deformasyon ölçer kodları SG-1/-14.3, SG-2/-16.8, SG-3/-20.0 ve SG-4/-22.5 şeklindedir. Kazık tabanındaki deplasmanların hesaplanabilmesi için tij tipi ekstansometre (T-EKST, Tell-Tale) karşılıklı iki (2) adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Deney esnasında karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD, CSL/CHUM) amacıyla kullanılan 2" çelik borulardan karşılıklı olan 2 adedine 6 ankraj noktalı seyyar ekstansometre (S-EKST, EXT2strain) yerleştirilmiştir. Bu sayede yaklaşık SG derinliklerinde oluşan deplasman doğrudan ölçülmüş ve ankraj noktaları arasında ölçülen

kısalma/uzama değerleri kullanılarak ortalama birim deformasyon hesaplanmıştır. Deney kapsamında kullanılan enstrümantasyon ölçüm sistemleri genel görünüşleri Şekil 5’de, listesi ise Tablo 2’de verilmiştir.

Deneyde kazık imalatı ve deney öncesi rezidüel gerilmeler ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek, deney öncesinde birim deformasyonlar sıfırlanmış ve “Rezidüel Gerilmeler” dikkate alınmamıştır.



Şekil 5 - TK-2 ve TK-3 Deney Kazıklarında (TİP-A ve TİP-B) yükleme deneyinde kullanılan ölçüm aletlerinden genel görünüş

3.2. Kazık Yükleme Deneyi

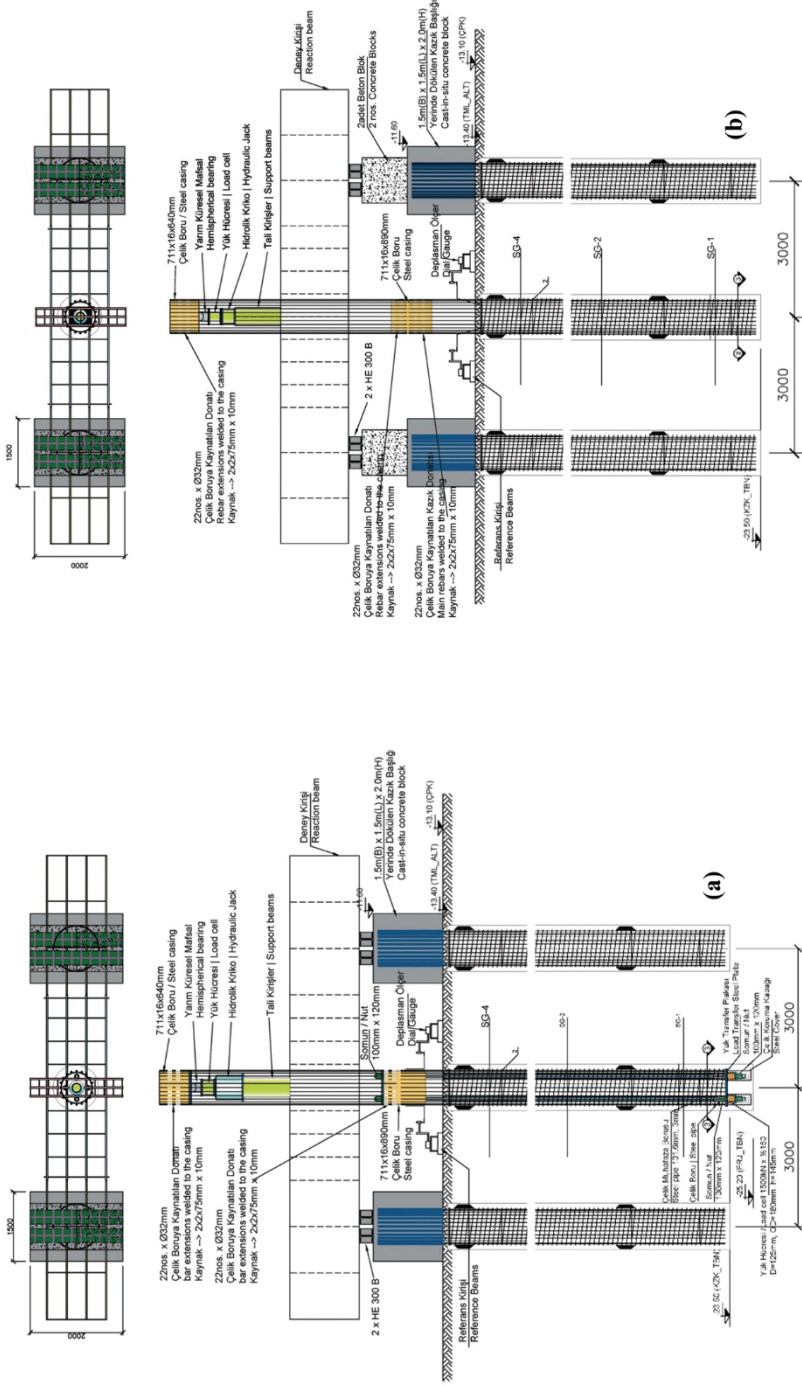
Yükleme deneyinde çekme kazığına yük, TK-2 (TİP-A) deney kazığında kazık ana donatılara kaynaklanan “yük aktarma borusu” ile / TK-3 (TİP-B) de ise yük aktarma borusuna özel tij somunları ile kilitlenen D=63.5mm Dywidag GEWIplus Tijler (akma yükü $F_{yk}=2.122kN$) ile ve iki (2) adet reaksiyon kazığına mesnetlenen deney girişinden faydalınarak hidrolik kriko vasıtası ile tatbik edilmiştir. Deneylerde hidrolik krikolara hava tahrikli hidrolik pompa ile

Tablo 2 - TK-2 ve TK-3 (TİP-A ve TİP-B) deney kazıklarında gerçekleştirilen eksenel statik çekme kazık yüklemeye deneyi (S-KYD/C) özet bilgileri

Açıklama	TK-2 (TİP-A) / TK-3 (TİP-B)
Deney Kazığı	$D=1.000\text{mm}$, $L_{toplam}=10.4\text{m}$
Deney Dizeneği	Eksenel statik çekme kazık yüklemeye deneyi (S-KYD/C) Reaksiyon kazıkları mesnet olarak kullanılacak
Maksimum Deney Yüklü	Planlanan %100 – 6.975 kN (S-KYD/C) Gerçekleşen ~%110 – ~7.6 MN (S-KYD/C) -----TK-2 (TİP-A) Gerçekleşen ~%110 – ~7.6 MN (S-KYD/C) -----TK-3 (TİP-B)
Hidrolik Teçhizat	15.000 kN kapasiteli Hidrolik Kriko
Yük Kontrolü	Oransal Servo Valf ile Hava tahrikli hidrolik pompa kontrolü Encardio-Rite ELC-150S-H High Capacity-Resistive Type Solid Load Cell 1adet x 12.5 MN Dong-A Geovan Co. GV-2409 Vibrating Wire Load Cell 4adet x 1.5 MN
Yük Hücresi	Opkon SLPS100, 100mm stroklu, direnç tipi deplasman ölçer (4 adet deney kazığının başında, 4 yük aktarma borusunda, 2 adet Teiltale başında \ 1 adet brükoda — Toplam 11 adet) Geokon titreşen telli deplasman ölçer (VW-DT) 2.5mm stroklu 2 adet / seviye x 5 seviye =10 adet VW-DT
Deplasman Ölçer	Encardio-Rite EDS-12V titreşen telli donanı tipi birim deformasyon ölçer (Vibrating wire Sister Bar Type Strain Gauge) 4 adet/seviye x 4 seviye = 16 adet Geokon A9 Model “Retrievable Extensometer – EXT2strain” 2 adet/seviye x 6seviye =12 adet ankray noktalı
Birim Deformasyon Ölçer	WiKa S-10 Model 1 adet basınç ölçer
Basınç Ölçer	RST Instruments Flexdaq Model Data Logger 1 adet Campbell Scientific CR6 Otomatik Rasat Cihazı
Veri Kayıt Ekipmanı	60 Santiyer
Veri Kayıt Aralığı	

Tablo 3 - TK-2 ve TK-3 (TİP-A ve TİP-B) KYD için yüklemeye programı

Çevrim	Pompa Basma Yolu (Bar)	Deney Yolu (MN)	Kedeme Yükleme Azami Yükleme Oranı (%)	Yüklemeye Programı		
				Azami Yükleme Süresi (dk)	Kriter	
1	0	0	0	0		
1	1	34	349	5	15	
1	2	69	698	10	15	
1	3	104	1046	15	15	
1	4	138	1395	20	15	
1	5	173	1744	25	15	
1	6	207	2093	30	15	
1	7	242	2443	35	15	
1	8	277	2790	40	15	
1	9	311	3139	45	15	
1	10	346	3488	50	15	
1	11	381	3836	55	15	
1	12	415	4185	60	15	
1	13	450	4534	65	15	
1	14	484	4883	70	15	
1	15	519	5231	75	15	
1	16	554	5580	80	15	
1	17	588	5929	85	15	
1	18	623	6278	90	15	
1	19	658	6626	95	15	
1	20	692	6975	100	15	
1	21	727	7324	105	15	
1	22	761	7673	110	60	
1	U	1	692	6975	100	15
1	U	2	554	5580	80	15
1	U	3	415	4185	60	15
1	U	4	277	2790	40	15
1	U	5	138	1395	20	15
1	U	6	0	0	0	60



Şekil 6 - (a) TK-3 Çekme deney kazığı için kazık tabanından yükleme durumu (TİP-B) ve (b) TK-2 Çekme deney kazığı için konvansiyonel olarak kazık başından yükleme durumu (TİP-A), deney dizeneği şematik gösterimi

basınç uygulanmış ve pompa hattındaki basıncı gözlemlemek için yüksek basınçlı bir manometre (Bourdon gauge) ile yüksek çözünürlüklü ve kalibrasyonlu bir basınç ölçer (pressure transducer) kullanılmıştır. Kazık başında mobilize olan yükler ise elektrik direnç cinsi yük hücresi (Electric resistance type load cell, LC/ER) ile ölçülmüştür. Ayrıca, TK-3 (TİP-B) deney kazığında kazık tabanına aktarılan yükler tabanda yük transfer plakasına kilitlenen Dywidag GEWIPlus noktasına yerleştirilen 4 adet 15 MN (%150 Yük Aşımı) kapasiteli Titreşen Telli Yük Hücresi VWLC kullanılarak ölçülmüştür. Kazık başına transfer edilen yükün eksenelliğinin sağlanabilmesi ve deney boyunca reaksiyon kazıklarının farklı deplasman yapması sebebiyle oluşabilecek potansiyel eksantrisite etkisinin bertaraf edilebilmesi amacıyla yarım küresel mafsallı kullanılmıştır. Ayrıca, referans kirişine sabitlenen deplasman ölçerler, tij tipi (T-EKST / Tell-tale) ve seyyar ekstansometre (S-EKST / EXT2strain) tijlerinin izafi hareketlerini ölçmek için kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve genel görünüş Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Referans kirişi üzerine yerleştirilen “Barkodlu Invar Mira” ile referans kiriş hareketinin belirlenmesi için dış referansa sabitlenen DNA-03 Elektronik Nivo ile diğer sensörlerden alınan ölçümlerle senkronize bir şekilde 0.01mm hassasiyette otomatik olarak okuma alınmıştır. Ayrıca, deney boyunca deney kirişlerinin devrilmeye karşı güvenliği açısından boyuna ve enine istikamette kirişlerde dönme ölçümü yapılmıştır.



Şekil 7 - Deney düzeneği, yük kontrol ve kumanda sistemi ve hidrolik pompa genel görünüşü

TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), deneyleri kapsamında ASTM D3689-07, (2013) Prosedür-A “Hızlı Test” (Procedure A "Quick Test") uyarınca yükleme programı uygulanmıştır (Tanlo 3). Nihai deney yüküne (%100 = 7 MN) %5 kademelerde 15dk bekleme ile 20 adımda tek çevrimde ulaşılması hedeflenmiştir. Ancak, nihai yükte deney sistemi kapasitesinin imkan vereceğine kanaat getirilerek arttırılmış nihai yüke (%110 = 7.6 MN) 2 kademe daha yükleme

yapılarak (1L-22X adımı) 22 adımda çıkmıştır. Artırılmış nihai yükte 60 dk bekleme sonrası 5 adımda yine 15dk bekleme kademeleri ile boşaltılarak ve son aşamada sıfır yükte yine 60dk bekleme ile deney tamamlanmıştır (1U-5X). Deney boyunca deplasman, yük, basınç, birim deformasyon ölçümü verileri ve diğer veriler 60s aralıklarla otomatik veri toplama sistemi ile yedekli olarak kaydedilmiştir.

3.3. Kazık Yükleme Deneyi Sonuçları

3.3.1. Deney Kazığı Yük-Deplasman Davranışı

TİP-A ve TİP-B, aksenal statik çekme kazık yükleme deneyleri (S-KYD/Ç) kazık imalatından yaklaşık 28 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Gerçekleşen nihai deney yükünde (1L-22-X) kazık başı yukarı istikamette ortalama deplasmanı TİP-A için -34.73mm / TİP-B için ise -8.17mm ve kazık tabanı yukarı istikamette ortalama deplasmanı TİP-A için -30.42mm / TİP-B için -9.44mm olarak ölçülmüştür (Şekil 8 (a)-(c)). Kazık Başında Yük - Zaman ve Kazık Başında / Kazık Tabanında Yukarı İstikamette Ortalama Deplasman - Zaman Grafikleri Şekil 8 (b)-(d)'de kıyaslamalı olarak ise (Şekil 9 (a)-(b)) verilmiştir. Kazık tabanında hesaplanan deplasman değerleri, tij tipi ekstansometre ölçümleri kullanılarak ve kazık taban yükü ise doğrudan tabandaki yük hücresi ölçümleri ile elde edilmiştir.

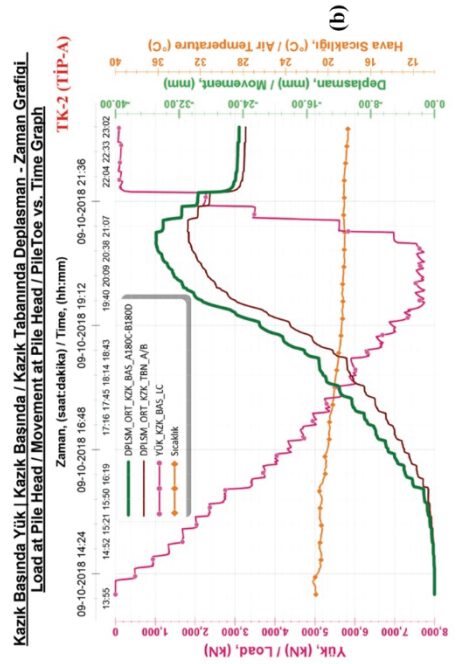
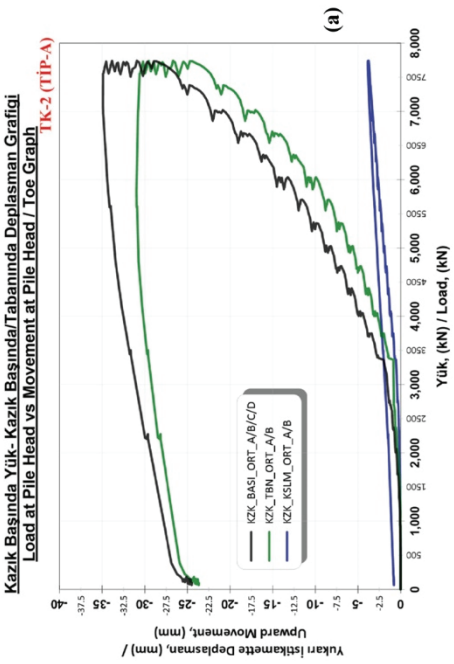
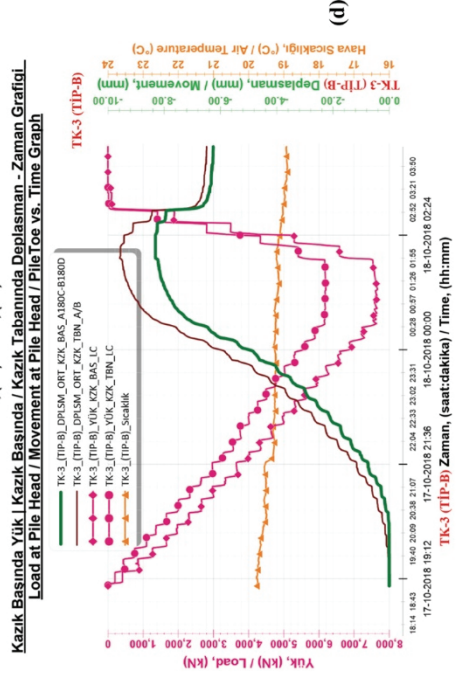
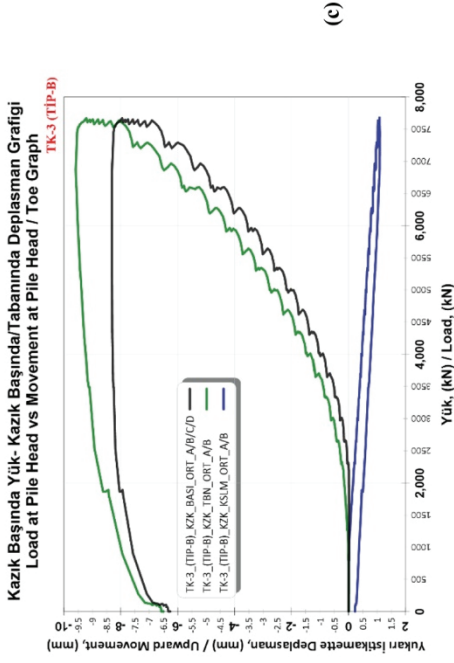
3.3.2. Kazık Boyunca Farklı Seviyelerde Ölçülen Birim Deformasyonlar

Kazık boyunca farklı seviyelerde ölçülen birim deformasyonlar Kazık başına tatbik edilen çekme yükü altında kazık boyunca farklı seviyelerde birim deformasyon ölçerlerden (VWSG/SB) elde edilen ve seygar ekstansometre (EXT2strain) ankraj noktaları arasındaki mesafeler için ortalama birim deformasyon grafikleri Şekil 10 (a) ve (b)'de verilmiştir.

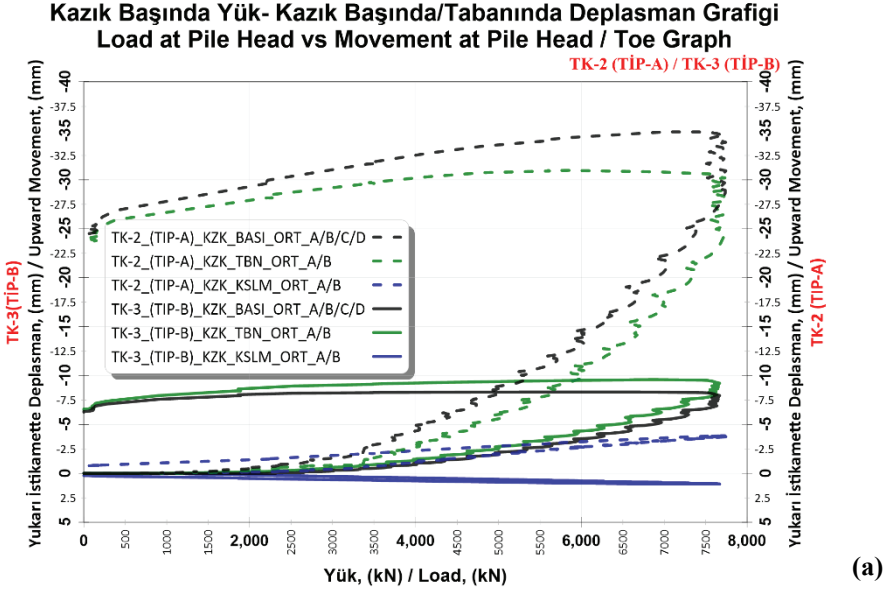
TİP-A ve TİP-B gerek seygar ekstansometre gerekse SG deney birim deformasyon verileri incelendiğinde farklı davranış göstermektedir. Nihai deney yükünde;

- *TK-2 (TİP-A) deneyinde VWSG birim deformasyon değerleri -1.356 mikroStrain (SG-1 A/B_KOT= -14.3), S-EKST ortalama birim deformasyon değerleri maksimum -2.083 mikroStrain (S-EKST_1_A/B_KZK-BAS_KOT=-14.35/-13.10) mertebelerinde*
- *TK-3 (TİP-B) deneyinde VWSG birim deformasyon maksimum değerleri +218 mikroStrain (SG-1 A/B_KOT= -14.3), S-EKST ortalama birim deformasyon maksimum değerleri +212 mikroStrain (S-EKST_1_A/B_KZK-BAS_KOT=-14.35/-13.10) mertebelerinde*

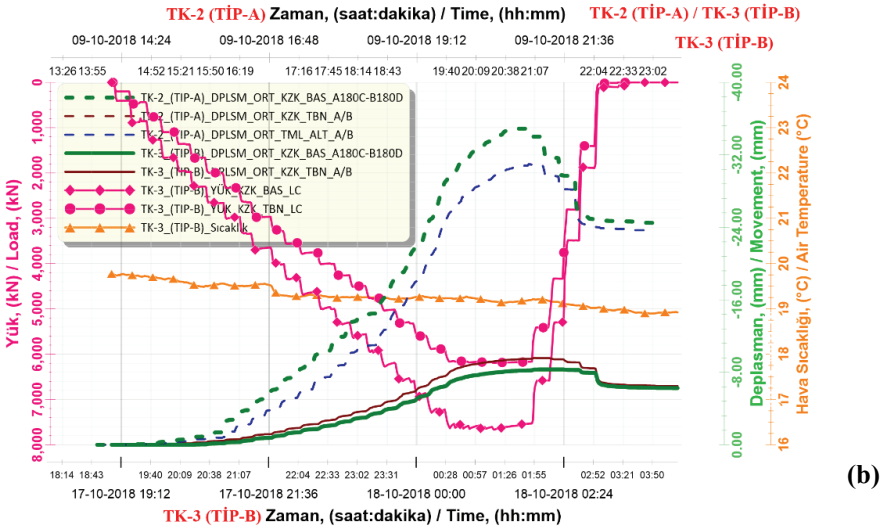
ölçülmüştür Şekil 11 (a)-(b)-(c)-(d). Benzer zemin durumlarında ve yük mertebelerinde ancak farklı yükleme durumunda betonarme kazık elemanının iç gerilmeleri açısından çok farklı davranış sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, TİP-A betonarme kazık elemanın çekmeye çalışıldığı yükleme durumunda VWSG/SB birim deformasyon (birim uzama) verisinde S-EKST ortalama birim deformasyon (birim uzama) verisine kıyasla tabii olarak ani birim uzama değişimi gayet belirgindir ve grafikteki ani sıçrama kazık kesitinde betonun çekme mukametinin aşıldığı kesitteki ilk çatlak gelişimi olarak değerlendirilmektedir. Bu anomali TİP-B betonarme kazık elemanın basınca çalıştırıldığı yükleme durumunda VWSG/SB birim deformasyon (birim kısalma) verisinde ve S-EKST ortalama birim deformasyon (birim kısalma) verisinde görülmemektedir (Şekil 11 (a)-(b)-(c)-(d)).



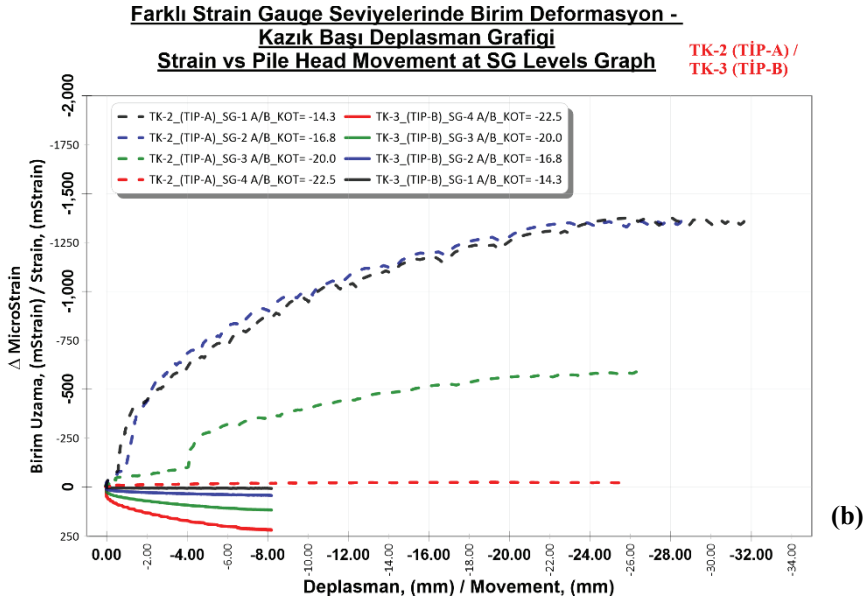
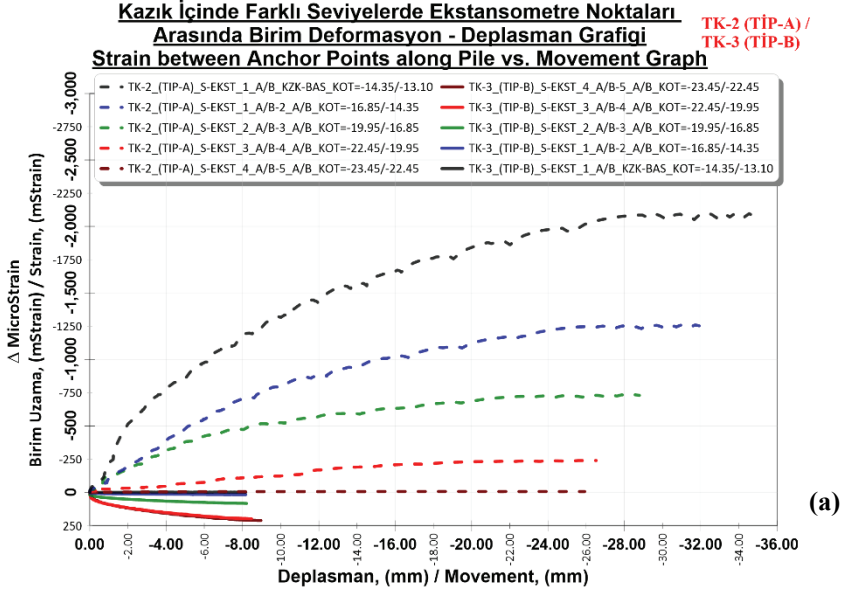
Şekil 8 - TK-2 (TIP-A) için (a) / TK-3 (TIP-B) için (c) Kazık başında yük ve kazık uzaması grafiki TK-2 (TIP-A) için (b) / TK-3 (TIP-B) için (d) Kazık başında yük / kazık başında yük – zaman grafiki.



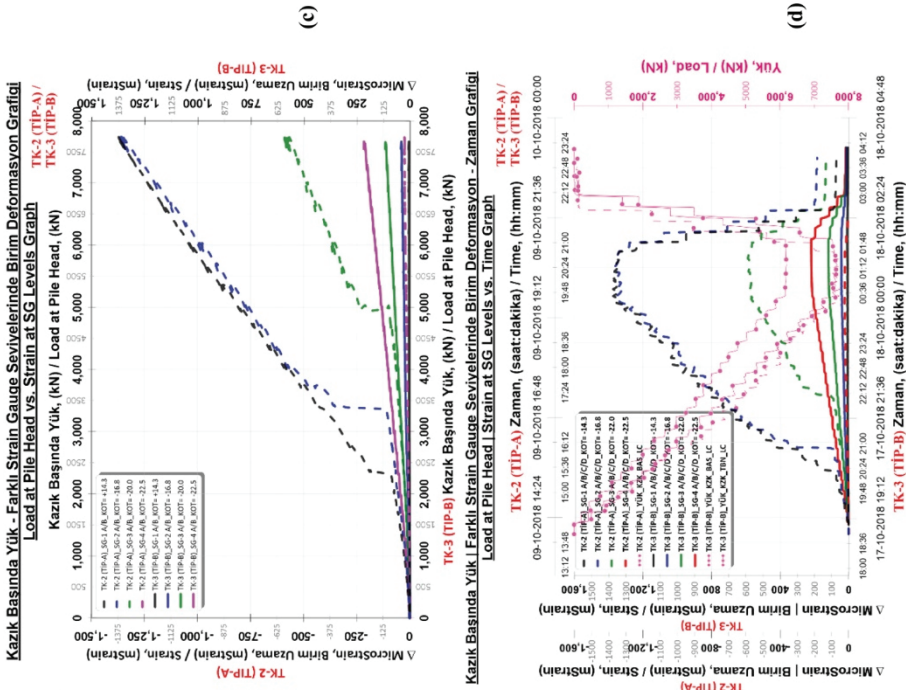
Kazık Başında Yük | Kazık Başında / Kazık Tabanında Deplasman - Zaman Grafiği
Load at Pile Head / Movement at Pile Head / Pile Toe vs. Time Graph



Şekil 9 - TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Kazık başında yük - kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman ve kazık uzaması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman / kazık başında yük - zaman grafiği

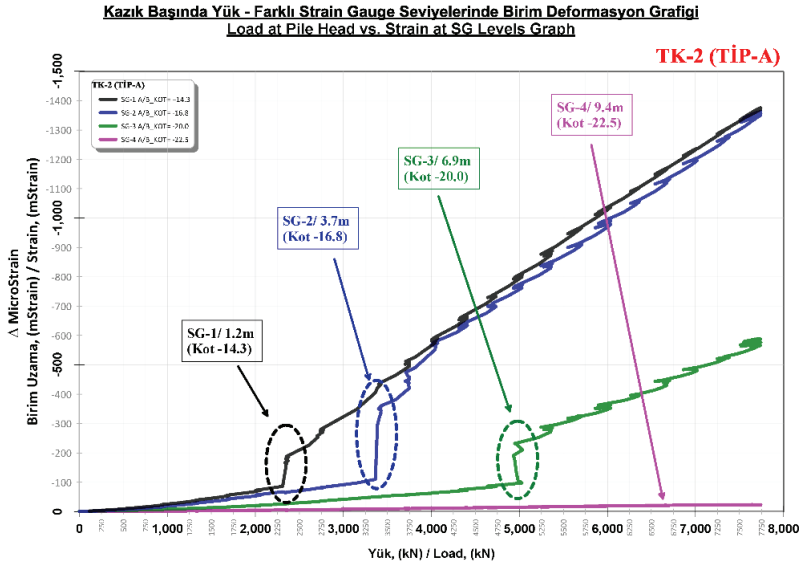


Şekil 10 - TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Ankranj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon (+basınç, -çekme) ve ankranj noktalarındaki deplasman grafiği (b) VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) ve VWSG seviyelerindeki deplasman grafiği



Şekil 11 - TK-2 (TIP-A) / TK-3 (TIP-B) için karşılaştırmalı (a) Kazık başında yük / Ankraj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (b) Kazık başında / tabanında yük / Ankraj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon - zaman grafiği, (c) Kazık başında yük - VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (d) Kazık başında / tabanında yük / VWSG seviyelerindeki birim deformasyon - zaman grafiği.

TİP-A yükleme durumunda SG-1 seviyesinde (1.2m derinlik) ilk çatlak gelişimi kazık başında ~2.3 MN yükleme kademesine ve ~70 mikroStrain çekme birim deformasyon mertebesine tekabül etmektedir. Tahmin edilebileceği üzere en yüksek birim deformasyon SG-1 seviyesinde gözlenmekte ve daha derindeki birim deformasyon ölçer seviyelerinde ise azalarak gözlemlenmektedir. Çatlak gelişiminin SG-2 ve SG-3 seviyelerinde (3.7m ve 6.9m mesafede) yaklaşık sırasıyla ~3.4 MN ve ~5.0 MN kazık başı yükleme kademelerinde ve ~120 ve ~70 mikroStrain çekme birim uzama mertebelerinin gözlemlenmektedir. Bu durum çatlak gelişiminin derinlikle aşağı istikamette ilerlediğinin göstermektedir (Şekil 12). Ancak, bu tespit seygar ekstansometre verisinde çok net olarak ayırt edilememektedir. Çatlayan ve geçiş zonuna yakın kesitte yerleştirilmiş bulunan bir birim deformasyon ölçer (SG) verisinde, seygar ekstansometre (EXT2strain) ankraj noktaları arasındaki mesafede oluşan ortalama birim uzama değerlerine nazaran ani çok daha yüksek birim deformasyon değişim değerlerinin ölçülmesi gayet tabiidir. Çatlak gelişimi maksatlı değerlendirilmelerde, ortalama birim deformasyon verisinden (S-EKST) ziyade noktasal bazda olan birim deformasyon ölçer (SG) verisinin dikkate alınmasının daha sağlıklı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 12 - Kazık başında yük - kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi grafiği

3.3.3. Deney Kazıklarında Tahribatsız Kalite Kontrol Deneyleri

Betonarme deney kazıklarının süreklilik durumu çekme deneyi öncesi, nihai yükte ve deney sonrası Kazık Bütünlük/Süreklilik Deneyi (KBD) ve Karşı Kuyu Ultrason Deneyi (K-KUD) deneyleri yapılmıştır. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) öncesinde gerçekleştirilen kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) kapsamında reflektogram incelendiğinde çekiç darbesinin kazık başında mobilize olan süresinin nisbeten uzun (~2m) olduğu görülmektedir. Daha küçük bir çekiç kullanılarak daha kısa süreli darbe (0.5 - 1m)

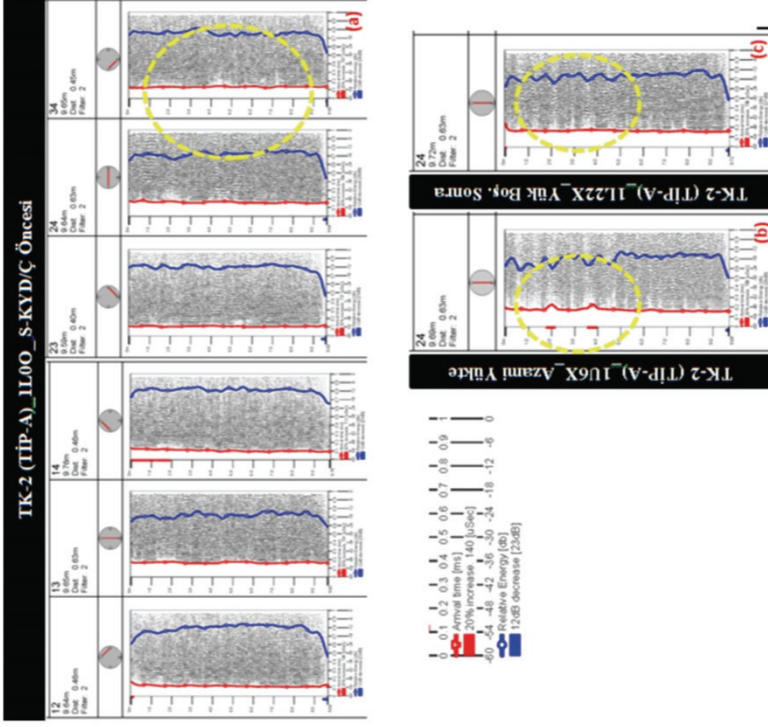
oluşturulabilmesi halinde kazık başına yakın olan çatlakların tesbitinin daha sağlıklı olabileceği [19] çalışmasında da raporlanmıştır.

Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) kapsamında elde edilen reflektogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde 4.000m/sn dalga hızı için yaklaşık 10.5m derinliğinde belirgin bir uç sinyali elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, yaklaşık 5.5m mertebelerindeki bir derinlikte muhafaza borusunun bittiği bölgede anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) sinyali görülmektedir (Şekil 3). Nihai yükte yapılan KBD deneyinde ise mobilize olan yüksek şaft direnci ve mevcut olduğu düşünülen çatlak gelişimi birçok sinyal yansımaya sebebiyet vermekte ve reflektogramın sıhhatli bir şekilde değerlendirilebilmesine mani olmaktadır. Yükün boşaltılması akabinde yapılan KBD deneyinde ise kazık şaftında kilitli kalan bir miktar rezidüel gerilmelerin mevcut olduğu aşikârdır ancak nihai yükteki şaft direnci ile kıyas-ı kabül değildir. Reflektogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde kazık başından yaklaşık 1.5m de “Serbest Uç” yansımaları görülmekte ve takip eden 3.0m, 4.5m vb tekrarlı sinyal tepe noktaları anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) sinyali olarak değerlendirilebileceği ve muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu düşünülmektedir.

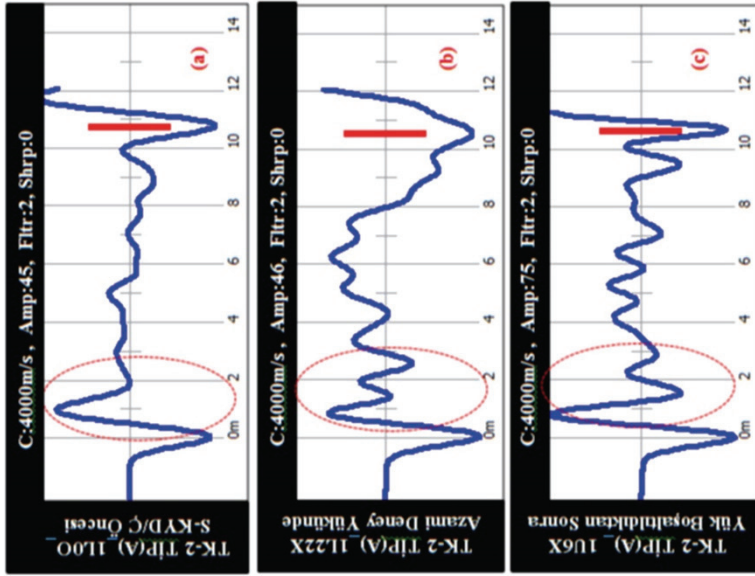
Karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) alıcı ve verici aynı seviyede olacak şekilde “standart tarama usulü” ile yapılmıştır. Alıcı ve vericinin farklı seviyelerde konumlandırılarak “offset tarama usulü” ile veya 3B tomografi yapılması halinde kazıktaki çatlak gelişiminin daha net görülebileceği düşünülmektedir. Buna rağmen çatlak gelişimi olan SG seviyelerinde dalga ilk varış zamanında >%20 gecikme (FAT, First Arrival Time, sinyal genliğine hassas olmayan özel FAT tespit algoritması ile, [3] ve ~7dB ($6\text{dB} < E_{\text{azalımı}} < 9\text{dB}$) Enerji azalımı tespit bu değerler, [18] tarafından tavsiye edilen şaft değerlendirme skalasına göre P/F (zayıf beton/sapma, Poor/Flaw) kategorisine tekabül etmektedir. Bütün bu anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici yöndedir.

3.4. Kazık Yükleme Denei Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çatlak oluşumunun iki ana aşaması bulunmaktadır: (1) ilk çatlak gelişimi ile başlayan “muhtelif çatlak oluşma safhası” ve (2) “nihai çatlak oluşmuş safha” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1). İlk safhada çatlak gelişimi rastgelelik arz ederek betondaki gerilmenin çekme mukavemetine ulaştığı en zayıf kesitte oluşmaktadır. Çatlamış kesitte beton-donatı aderansının yitirmeye başlaması, yüksek gerilmelere ve çatlak genişlemesine sebebiyet vermektedir. Çatlak gelişimi akabinde bu kesitte betondaki gerilme sifıra düşmektedir [8]. Betondaki gerilme çatlaktan uzaklaştıkça beton-donatı aderansı sebebiyle transfer boyu (s) kadar mesafede çatlaktan etkilenmeyen çekme gerilme değerine kadar artış göstermektedir. “Muhtelif çatlak oluşma safha” sında, gelişen çatlaklarda birbirinden bağımsız olarak beton-donatı aderansı ilişkisi geçerli olmaktadır. Yük artışı ile çatlaklar gelişmekte ve ortalama çatlak mesafesi azalmaktadır. “Nihai çatlak oluşmuş safhaya” ulaşıldığında artık ilave yük altında çatlak ara mesafeleri asgari değere ulaştığı için yeni çatlak oluşumu gerçekleşmemekte ve bu safhada artık çatlak ara mesafesi sabit kalmakta ve de ilave yük artışı tamamen çatlak genişliğinin artmasına sebebiyet vermektedir [8]. Bu duruma ilave olarak tatbik edilen bütün çekme gerilmelerinin tamamen donatılar tarafından taşındığı şeklinde de ifade edilebilmektedir.



Şekil 14 - Karşı kıyı ultrason deneyi (K-KUD) grafikleri
(a) S-KYD/Ç öncesi (b) azamî yükte (c) yük boşalıldıktan sonra.



Şekil 13 - TIP A DeneY Kazığı bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) reflektogramları (a) S-KYD/Ç öncesi (b) azamî deneY yükünde (c) yük boşalıldıktan sonra

TİP-A deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumu için birim deformasyon ölçer (SG) verisi çatlak gelişimi hususunda birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) kapsamında tesbit edilen bütün anormallik/garıplik (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Kazık başı yük - birim deformasyon ilişkisinde Şekil 15’de görülebileceği üzere kazıkta ilk çatlak gelişimi yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon değerlerinde oluşmaktadır.

ACI 318-14 Manual [1] uyarınca normal ağırlıkta bir beton için elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi;

$$E_{beton} = 4.700 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

E_{beton} = Beton için elastisite modül

f'_c = Silindir beton numunesi için serbest basınç mukavemeti

formülüyle hesaplanmaktadır. Deney kazık betonu silindir numunesi için raporlanan ortalama serbest basınç mukavemeti (28 günlük) 29.9 MPa’dır. Buradan beton elastisite modülü 25.7 GPa olarak hesaplanmıştır. Kazık net beton kesiti dikkate alındığında beton için eksenel rijitlik, EA_{beton} 19.7 GN elde edilmiştir. Benzer yaklaşımla kazık boyuna donatı alanı dikkate alındığında ($E_{donatı}=210\text{GPa}$, $22\Phi 32\text{mm}$ için $A_{donatı}=17.693\text{mm}^2$ olmak üzere), donatı için eksenel rijitlik $EA_{donatı}=3.7$ GN elde edilmektedir. Kompozit kazık kesiti için toplam kazık eksenel rijitliği (beton ve donatı için) $EA_{kazık}=23.4$ GN olarak hesaplanmaktadır.

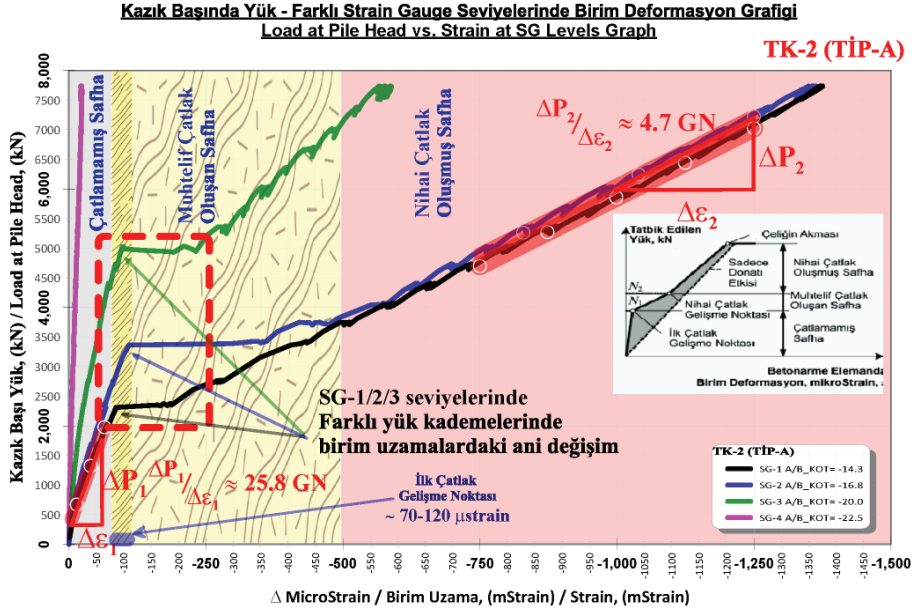
SG-1 seviyesinde (1.2m derinlikte) shaft direnci etkisi ihmal edilerek kazık başı yükünün değişmediği kabul edilmiştir. Kazık başı yükünün kademeli olarak artmasına karşılık benzer şekilde SG seviyelerinde shaft direncine bağlı olarak yük azalarak kazık boyunca transfer edilmektedir. Aktarılan yük kademesinde birim yük artışına bağlı gelişen birim deformasyon artışı kazık eksenel rijitliğine nisbetle artmaktadır. Bu da ilgili kesitteki yük ve birim deformasyon grafiğinin eğimine takabül etmektedir. Bu kapsamda Şekil 15’den takip edilebileceği üzere SG-1 seviyesinde birim kazık başı yükü değişimi - birim deformasyon değişimi grafiğinin çatlama safhadaki eğimi için

$$EA_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta \varepsilon_1} = 25.8 \text{ GN} \text{ (} EA_{kazık} \approx 23.4 \text{ GN)}$$

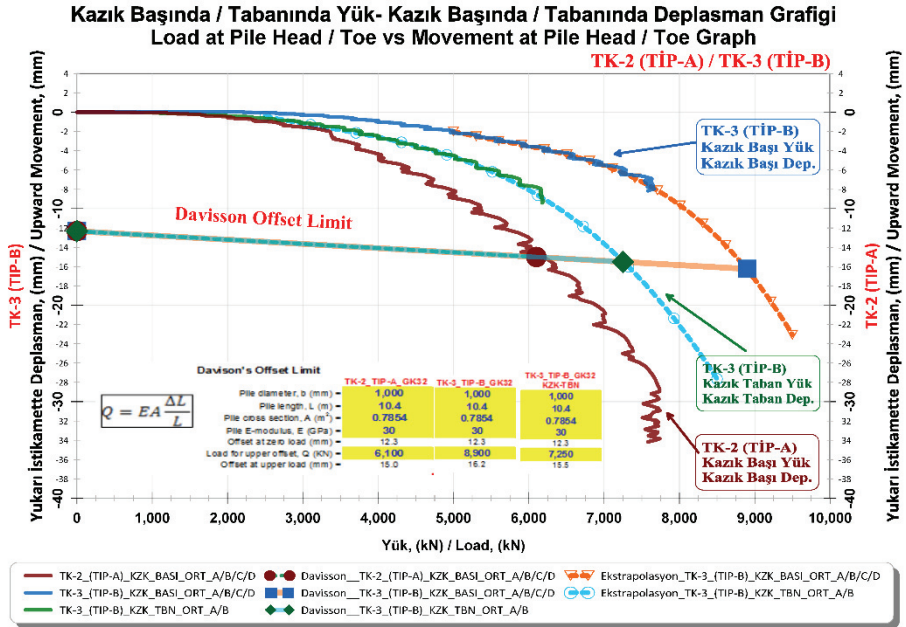
ve nihai çatlak oluşmuş safhadaki eğimi için ise

$$EA_2 = \frac{\Delta P_2}{\Delta \varepsilon_2} = 4.7 \text{ GN} \text{ (} EA_{donatı} \approx 3.7 \text{ GN)}$$

değerleri elde edilmektedir. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyinde (S-KYD/Ç) ölçülen SG verilerinden elde edilen bu değerler kompozit kesit için hesaplanan kazık eksenel rijitlik ve donatı için eksenel rijitlik değerleri ile kıyaslanabilir mertebelerde olduğu görülmektedir. Buradan “çatlama safha” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “nihai çatlak oluşmuş safha” da ise donatı ile taşındığı söylenebileceği düşünülmektedir.



Şekil 15 - Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi - kazık başı yükü grafiği



Şekil 16 - Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi - kazık başı yükü grafiği

Bu mekanizma çekme yüküne maruz betonarme kazıkların deneyde elde edilen yük-deplasman ilişkisinde bir akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir Şekil 16. TİP-A deney kazığında konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisinde yaklaşık 3.250 kN mertebelerinde bu etki görülmektedir. TİP-B deney kazığında kazık tabanından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisinde böyle bir akma etkisi gözlenmemiştir. Bu sebeble deplasman gelişimi sınırlı kalmıştır.

TİP-A deney kazığı malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasite hesaplamalarını şaft direncinden kaynaklı olmamasına rağmen sun'î bir şekilde etkilemektedir. TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktası farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla, kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi Davisson Metodu [11] ile kazık başı yük ve kazık başı deplasman için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kazık tabanı yük ve kazık tabanı deplasman için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir (TİP-B deneyinde kazık deplasmanı sınırlı miktarda olduğundan kazık kapasite tahmini yapılabilmesi için yük-deplasman eğrileri ekstrapole edilmiştir). Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük - kazık başı deplasmanı ilişkisine göre Davisson Metodu ile $> \sim 146$ mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Betonarme kazıklarda konvansiyonel olarak kazık başından çekme yükü tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme mukavemetine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Bu makalede birim deformasyon ölçer verisi çatlak gelişimi için birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi ve karşı kuyu ultrason deneyi kapsamında tesbit edilen bütün anormallik/garıplik (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tespit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilmiştir. Kazık eksenel rijitlik hesapları da bu ölçüm sonuçları ile uyumaktadır. Bu durum değerlendirildiğinde “Çatlamamış safha” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “nihai çatlak oluşmuş safha” da ise donatı ile taşındığı sonucuna ulaşılmaktadır.

TİP-A deney kazığında konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisinde akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir ve bu mekanizma yaklaşık 3.250 kN mertebelerinde görülmektedir. Kazık malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasite hesaplamalarını şaft direncinden kaynaklı olmamasına rağmen etkilemektedir. Yapılmış olan TİP-A deneyinde, bu hadisenin yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon mertebelerinde gözleendiği, literatürdeki muhtelif çalışmalarda ise 50-150 mikroStrain mertebelerinde olduğu rapor edilmiştir [7] [13].

TİP-B deney kazığında kazık tabanından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisinde böyle bir akma etkisi gözlenmemiştir. Bu sebeble deplasman gelişimi sınırlı kalmıştır.

TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktasının farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi Davisson Yöntemi ile kazık başı yükü ve kazık başı deplasmanı için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman için yapılan analizde ise TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir. Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisine göre “Davisson Kazık Kapasitesi Tahmin Yöntemi” ile ~%146 mertebelerinde yine TİP B için kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisi kıyaslamasına göre ise ~%120 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

Konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda elde edilen bu sonuçlara göre çekme yüküne maruz betonarme kazık tasarımında kazık boyunca oluşacak nihai birim deformasyon değeri tahdidi, faydalı bir kazık tasarım sınır şartı olarak tavsiye edilebileceği düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, kazıkta mobilize olan maksimum birim deformasyonun 50-100 mikroStrain metebelerinde sınırlandırılması ile çatlaksız bir kazık tasarımı yapılabilecektir (mevcut şartnamelerdeki çatlamış kesit tasarımı çatlak gelişimine mani olmamaktadır). Ayrıca hesaplanan kazık kapasitesinin daha düşük tahmin edilmesinin önüne geçecek ve malzeme durabilitesini artıracaktır. Ancak, bu kadar düşük birim deformasyon değerlerinin kazık tasarımında esas alınması beton çekme kapasitesi açısından gerekli iken, donatının çekme kapasitesinin çok sınırlı mertebelerde kalmasının ekonomik bir yaklaşım olmadığı dikkate alınmalıdır.

Çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda, “kazık kapasite hesaplarına” ve “kazık çekme deney verilerine göre kazık kapasitesi tahmin yaklaşımlarına” çatlak gelişiminin ve çekme birim deformasyon etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi ve bu probleme çözüm üretilebilmesi için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır.

TİP-B uygulamasında kullanılan özel düzenek ile kazık tabanından çekilmesi durumu uygulama pratiği ve betonarme çekme kazık tasarımı hususunda çekme kapasitesi ve uzun vadede durabiliteye etkisi açısından faydalı bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Semboller

$E_{donatı}$: Donatı için elastisite modül
$A_{donatı}$: Donatı kesit alanı
L_{net}	: Net kazık boyu
L_{toplam}	: Toplam kazık boyu
E_{beton}	: Beton için elastisite modül
A_{beton}	: Beton kesit alanı
f'_c	: Silindirik beton numunesi için serbest basınç mukavemeti
σ_{et}	: Beton çekme mukavemeti
EA	: Eksenel rijitlik

P	: Kazık başı yükü
ϵ	: Birim deformasyon
F_{yk}	: GEWIPlus için akma yükü
TİP-A	: Konvansiyonel olarak kazık başından yukarı istikamette çekilmesi
TİP-B	: Özel bir tertibat ile kazık tabanından yukarı istikamette çekilmesi
PDK-T	: Performansa Dayalı Kazık Tasarımı
KBD	: Kazık bütünlük/süreklilik deneyi
K-KUD	: Karşı kuyu ultrason deneyi (CrossHole Sonic Logging-CSL, CrossHole Ultrasonic Method-CHUM)
FAT	: İlk varış zamanı (First Arrival Time)
S-EKST	: Seyyar ekstansometre (EXT2strain)
T-EKST	: Tij tipi ekstansometre (Tell-tale)
S-KYD/Ç	: Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi
SG	: Birim deformasyon ölçer
VW	: Titreşen telli
VWSG/SB	: Titreşen telli donatı tipi birim deformasyon ölçer

Kaynaklar

- [1] ACI Committee, American Concrete Institute, International Organization for Standardization (2014), “Building Code Requirements for Structural Concrete” (ACI 318-14) and Commentary. American Concrete Institute.
- [2] Akçay Aldanmaz, B. (2020). Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi. Teknik Dergi, 31(1), 9773-9787. <https://doi.org/10.18400/tekderg.419819>
- [3] Amir, E.I and Amir J.M. (1998), “Recent Advances in Ultrasonic Pile Testing”, Proc. 3rd Intl’ Geotechnical Seminar on Deep Foundation On Bored and Auger Piles, Ghent, pp. 181-185
- [4] ASTM D3689/D3689M-07, (2013) e1., “Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [5] ASTM D5882-16, (2016), “Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

- [6] ASTM D6760-16, (2016), “Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [7] Bicocchi, N., (2011), “Structural and Geotechnical Interpretation of Strain Gauge Data from Laterally Loaded Reinforced Concrete Piles”, PhD Thesis, University of Southampton.
- [8] Borosnyoi, G. and Balazs, G. (2005), “Models for flexural cracking in concrete: the state of the art”, *Structural Concrete* 6 No 2: 53-62.
- [9] England, M.G. (2012), “On the Subject of Piles in Tension”. 680-693. 10.1061/9780784412084.0047.
- [10] Fellenius, B.H. (1989), “Tangent Modulus of Piles Determined from Strain Data”. ASCE, Geotechnical Engineering Division, the 1989 Foundation Congress, F.H. Kulhawy, Editor, Vol. 1, pp. 500-510.
- [11] Fellenius, B.H., (2021). “Basics of Foundation Design”, Electronic Edition, www.Fellenius.net.
- [12] Fields, K. and Bischoff, P. H. (2004), “Tension stiffening and cracking of high-strength reinforced concrete tension members”, *ACI Structural Journal* 101(4): 447-456.
- [13] İnanir, O.E. (2018), “Eksenel Yüklü Kazıklarda Yük Transfer İlişkisi ve Çekme Yüküne Maruz Fore Kazıklarda Süreklilik”, FC-TUGM Sempozyumu ‘Prof.Dr. Feyza Çinicioğlu Onuruna Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu’, İstanbul Üniversitesi, 10-05-2018, 92-106.
- [14] İnanır, O.E., İnanır, M. (2022), “Integrity of Bored Piles Under Tension”, 11th International Stress Wave Conference, September 20-23 2022 Rotterdam The Netherlands,
- [15] İnanır, O.E., Berilgen, M.M., Şenol, A. (2022), “Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazıklarda Çatlak Gelişimi”, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı, 29-30 Eylül 2022 Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [16] Jardine, R.J. and Chow, F.C.(1996), “New design methods for offshore piles”, MTD Publication 96/103, MTD, London.
- [17] Liew, S.S., Khoo, C.M. and Tan, S.T. (2011), “Pile Performance in Weathered MetaSedimentary Formation and KL Limestone”, Corpus ID: 198924708, Malaysia.
- [18] Likins, G. E., Rausche, F., Webster, K. and Klesney, A. (2007), “Defect Analysis for CSL Testing”. Geo-Denver 2007 New Peaks in Geotechnics.
- [19] Middendorp, P., Schellingerhout, J., (2006), “Pile Integrity Testing in the Netherlands”, 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, DFI, Amsterdam.
- [20] Somayaji, S. and Shah, S. P. (1981), “Bond stress versus slip relationships and cracking response of tension members”, *ACI Journal Proceedings* 78(3): 217-225.

Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi

Gürçağ ÖZGÜRER¹



ÖZ

Bu çalışma, 2012-2021 yılları arasındaki 10 yıllık sürede Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti (KKTC), inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarını, inşaat sektörünü oluşturan alt sektörlere göre analiz etmek amacıyla hazırlanmıştır. KKTC, Sosyal Sigortalar Dairesinden (SSD) alınan veriler doğrultusunda yapılan analizlerde; Ülke genelinde toplam 2,634 iş kazasının meydana geldiği, bu kazalardan 668 tanesinin inşaat sektöründe olduğu ve 23 tanesinin ölümlü sonuçlandığı görülmektedir. 668 iş kazası içerisinde en fazla kazanın 401 iş kazası ile Lefkoşa ilçesinde meydana geldiği ve bu kazalardan dolayı çalışanlara toplam 55,037 gün geçici iş göremezlik ödeneği verildiği saptanmıştır. En fazla işyeri ve çalışanın bina inşaat ve tamirati, bina yıkımı işleri, taşeronluğu alt sektöründe olduğu, en fazla iş kazasının ise 470 iş kazası ile yine bu alt sektörde gerçekleştiği görülmektedir. KKTC geneli ile kıyaslandığında Kaza Olabilirlik Oranlarının (KOO) inşaat sektöründe 2 katından fazla, Ölümlü Kaza Olabilirlik Oranlarında (ÖKOO) ise 3,5 katından fazla çıktığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İş kazası, inşaat alt sektörleri, ilçe dağılımı, kaza olabilirlik oranı, ölümlü kaza olabilirlik oranı.

ABSTRACT

Analysis of Occupational Accidents Occurring in the Construction Sector in Turkish Republic of Northern Cyprus

This study aims to analyze the occupational accidents in the Turkish Republic of Northern Cyprus (TRNC) construction sector in the ten years between 2012-2021, according to the construction sub-sectors. The data was received from the TRNC Social Insurance Department (SID), and the findings indicate that 2,634 occupational accidents occurred throughout the country; 668 of these accidents were in the construction sector, where there were 23 fatalities in construction-related accidents. The findings highlighted that most accidents occurred in Nicosia, with 401 out of total occupational accidents, where the employees were given a total of 55,037 days of temporary incapacity allowance due to these

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 12 Mayıs 2023 günü ulaşmıştır. 5 Nisan 2024 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2024 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1296335>

1 KKTC, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Lefkoşa, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
gurgagozgurer@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-0600-6756>

accidents. It is seen that the highest number of workplaces and employees are in the sub-sector named building construction and repair, building demolition works, and subcontracting. In parallel, this sub-sector had the highest number of occupational accidents, with 470 cases. In response to the analysis made in this research, it is highlighted that the Occupational Accident Rates (OAR) are more than two times higher, and the Fatal Accident Rates (FAR) are more than 3.5 times higher in the construction sector compared with the other sectors.

Keywords: Occupational accident, construction sub-sectors, district distribution, occupational accident rates, fatal accident rate.

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile yaygınlaşan makineleşme süreci, çalışma hayatının her alanında insanoğlunun kitlesel üretime geçmesini sağlayarak gelişimine katkıda bulunmuş, bir yandan üretimin artmasını sağlarken diğer yandan da ekonominin büyümesine yardımcı olmuştur. Sanayi devriminin tarihsel gelişim süreci incelendiğinde, insan hayatına yaptığı olumlu katkılar yanında bir dizi sorunu da beraberinde getirdiği görülmektedir. Bu sorunların en önemlilerinden biri de iş kazalarıdır.

Ülkemizde yaşanan iş kazaları ülke ekonomisine önemli oranda zarar verirken hem üretim kaybına hem de telafisi mümkün olmayan ölümlere sebep olmaktadır [1]. Üretimin temel noktası olan insanın, iş kazaları sonucu kaybedilmesi yalnızca can kayıpları ve sakatlanmalar şeklinde olmamakta aynı zamanda işletmelerin verimliliğini düşürmekte, maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bunlara ek olarak yaşanan iş kazaları sonucu yapılması gereken tazminat ödemeleri, tedavi ve bakım masrafları ile hem çalışanlar hem işverenler hem de ülke ekonomisi olumsuz yönde etkilenmektedir [2,3].

Uluslararası Çalışma Örgütü'ne (ILO) göre, dünya genelinde yıllık olarak 374 milyon iş kazası meydana gelirken, 2,78 milyondan fazla kişi iş kazaları sonucu yaşamını yitirmekte, meydana gelen iş kazalarının Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın (GSYİH) %3,94'ü tutarında ekonomik kayba neden olduğu tahmin edilmektedir [4]. Dünya'da ve Türkiye'de iş kazalarının meydana geldiği sektörler incelendiği zaman, insan emeğinin fiziksel olarak yoğun olduğu sektörlerde meydana gelen iş kazalarının diğer sektörlerle göre daha fazla olduğu görülmektedir [5]. Hemen hemen tüm ülkelerde iş kazalarının en sık rastlandığı işkollarından biri olan inşaat sektörü, emek yoğun sektörlerin başında gelmektedir.

İnşaat sektörü, tek başına ülke ekonomisine katkı koymanın yanında pek çok farklı üretim sektörünü de desteklemekte ve bu sayede bağlı bulunduğu coğrafyanın gelişimine katkı koymaktadır. İnşaat sektörü yarattığı ekonomik güç ve kullandığı teknolojiye bağlı olarak sürekli olarak gelişim göstermekle birlikte pek çok yaralanma ve ölümlü iş kazasını da beraberinde getirmektedir [6]. İnşaat sektöründe yaşanan iş kazası istatistikleri diğer sektörlerle kıyaslandığı zaman, sektörde yaşanan iş kazası sayılarının diğer sektörlerden yüksek çıktığı ayrıca yüksek ölüm oranlarından dolayı diğer iş kollarını geride bıraktığı görülmektedir [7].

KKTC'de meydana gelen iş kazaları ve bu kazaların neden olduğu olumsuz sonuçların azaltılabilmesi için dünyadaki gelişmelere paralel iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yasal mevzuatlar uygulanmasına rağmen, kazaların hangi sektörlerde ve ilçelerde yoğunlaştığı

üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların eksikliği iş kazalarının yaşandığı sektörler ve ilçeler ile ilgili uzun vadeli planlama yapılabilmesini engellemektedir.

Özgürer [8] KKTC’de, 2015-2020 yıllarını kapsayan 6 yılın istatistiklerini incelemiş ve iş kazalarını sektörlerle ve ilçelere göre analiz etmiştir. İncelenen veriler sonucunda KKTC genelinde toplam 1,492 iş kazasında 32 kişinin öldüğü, en fazla iş kazasının 362 iş kazası ile inşaat sanayinde yaşandığı ve bu kazalardan 15 tanesinin ölümle sonuçlandığı görülmüştür.

Özellikle inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının çok şiddetli ve ağır sonuçlarının olması, bu sektörde yaşanan iş kazalarının alt sektörlerle ve ilçelere göre analiz edilerek, sınıflandırılması ihtiyacını doğurmuştur.

Bu çalışma, 2012-2021 yıllarını kapsayan 10 yıllık süre içerisinde KKTC, İnşaat sektöründe yaşanan iş kazalarını, inşaat sektörünü oluşturan alt sektörlerle göre analiz etmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu noktadan hareketle inşaat sektörü ile birlikte iş kazası kavramının literatürde ve yasalarda nasıl tanımlandığı açıklanmış, 10 yıllık süre içerisinde inşaat sektörü ve ona bağlı alt sektörlerde meydana gelen iş kazalarının detaylı analizi yapılarak, sektörün KOO ve ÖKOO hesaplanmıştır.

2. LİTERATÜR

İnşaat sektörü doğası gereği içerisinde birçok tehlikeyi ve bu tehlikelerin neden olabileceği yüksek riskleri kapsamaktadır. Bu riskleri en aza indirebilmek ve inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının azaltılabilmesine yardımcı olmak amacı ile sektörün durumunun bilinmesine ve analiz edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İnşaat sektöründe meydana gelen kazaların hangi alt sektörlerde yoğunlaştığının tespit edilerek sınıflandırılması, önlem alma sıralaması yapılmasını mümkün kılacak, sistemin iyileştirilmesine yönelik odaklanılması gereken noktaları ortaya koyacaktır.

KKTC özelindeki literatür incelendiğinde bu konuda yapılmış benzer bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışma inşaat sektöründeki durumu ortaya koyarken bir yandan da literatüre katkı niteliği taşımaktadır. İnşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının hangi alt sektörlerde ve ilçelerde yoğunlaştığının incelenmesi ve elde edilen bulguların çalışma hayatı ile ilgili tüm kesimlerle paylaşılması, iş kazalarının azaltılabilmesi açısından önemlidir.

Bayrak ve Telatar’a [9] göre inşaat sektörü; kamu veya özel sektör tarafından yapılan, bir inşaat ile ilgili olan en küçük işlemten en büyük yatırımlara kadar tüm özel veya kamu bina ve altyapılarının inşa, bakım ve onarım işlerini de içerisine alan sermaye faaliyetlerinin tümüdür şeklinde tanımlana bilinir. Sektör temelde inşa etme üzerine kurulu olsa da tüm bina ve altyapıların bakım ve onarımının yanında yıkım işlerini de bünyesinde barındırmaktadır.

İnşaat sektörü gerek finansal büyüklüğü gerekse de ekonomiye sağladığı işgücü imkânlarıyla ülke ekonomisine ciddi katkı sağlamakta, kendisinin yarattığı ekonomik gelişime ek olarak, paydaş pek çok sektörü de destekleyerek, bu sektörlerin gelişimine katkı koymaktadır [10]. İnşaat sektörü hem sağladığı altyapı ile mal ve hizmetlerin üretilmesini sağlamakta hem de üretilen bu mal ve hizmetleri bir girdi olarak kullanabilmektedir. Sektörde yoğun iş gücü kullanılması, istihdama olumlu yönde katkı yaparken; GSYİH’ı etkileyerek ekonomik büyümeyi tetiklemekte ve sosyo-ekonomik refah düzeyini artırarak ülke ekonomileri için ne

kadar önemli olduğunu göstermektedir [11]. İnşaat sektörü, ülke ekonomisine yaptığı katkıların yanında emek yoğun bir sektör olması nedeni ile fiziksel olarak zor ve tehlikeli bir sektördür. İnşaat sektörünün bu tehlikeli yapısı iş kazası sayılarının yüksek olmasına da neden olmaktadır.

Türkiye Cumhuriyeti, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığının hazırladığı Tehlike Sınıfları Yönetmeliği'nde inşaat sektörünün "çok tehlikeli işler" kategorisine dahil edildiği görülmektedir [12]. İnşaat sektörü üzerine yapılan araştırmalar göstermiştir ki, bu sektörde çalışan kişilerin diğer sektörlerle kıyaslandığında iş kazası sonucu iki kat daha fazla sakatlanma ve üç kat daha fazla ölüm riski vardır [13].

Yapılan araştırmalarda inşaat sektöründeki kaza sayılarının yüksek olmasını etkileyen pek çok faktör olduğu görülmektedir. Özellikle inşaat sektörünün emek yoğun bir sektör olması ve sektörde istihdam edilen çalışanların eğitimsiz veya düşük eğitimli olmaları kaza sayılarını artıran etkenlerin başında gelmektedir [5, 14-21].

İnşaat sektörünün çalışma alanlarının dağınık olması, genellikle dışarıda çalışılmasından dolayı değişen hava şartlarının üretimi zorlaştırması, şantiye alanlarının veya çalışma koşullarının bir işyerinden diğerine değişkenlik göstermesi, inşaat alanlarında kullanılan malzemelerin sürekli hareket halinde olması gibi etkenler iş kazalarının diğer nedenleri arasındadır [22-33].

Ülke genelindeki inşaat faaliyetlerinde taşeron işveren uygulamasına sıklıkla başvurulması, sektörde uyulması gereken iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu noktada taşeron işverenlerin iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerini ekonomik yönden maliyeti artırıcı bir faktör olarak görmeleri ve sektörde çalışanların yeterli mesleki ve iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerini almamış olmaları meydana gelen iş kazalarının en önemli nedenleri arasında gelmektedir [17, 27, 28, 34]. Tüm bunlara ek olarak çalışanların kişisel koruyucu malzeme kullanmaması gibi etkenler de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının diğer bir sebebi olarak gösterilebilir [18, 35].

Yapılan literatür taramasında iş kazası kavramının uluslararası kuruluşlar tarafından farklı tanımlarının yapıldığı görülmektedir. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılan Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) tanımıdır. ILO'a göre iş kazası, "*İş veya iş ile bağlantılı olarak oluşan, şiddet eylemleri de dahil, beklenmedik ve planlanmamış etkenlerle bir veya daha fazla işçinin yaralanması, hastalığı veya ölümüyle sonuçlanan olay*" şeklinde tanımlanırken [36], Avrupa İstatistik Ofisi (EUROSTAT) iş kazasını, "*iş sırasında meydana gelen, fiziksel veya zihinsel hasara neden olan olaylar*" şeklinde tanımlamaktadır [37]. Bu makalenin amaçları bakımından ise iş kazası "*Sigortalı çalışanın, yapmakta olduğu iş veya iş ile bağlantılı olarak, dıştan gelen beklenmedik bir etkenle fiziksel veya ruhsal yönden hasara uğraması*" şeklinde tanımlanabilir.

KKTC yasal mevzuatı incelendiğinde, SSD'nin uyguladığı iki farklı yasa olduğu görülmektedir. Her iki yasada da bulunan iş kazası ile ilgili maddeler incelendiğinde, kazaların hangi hallerde iş kazası olarak değerlendirileceğinin belirtildiği ve net bir tanıma yer verilmediği görülmektedir. Çalışma hayatını düzenleyen ilk yasa olarak 01 Haziran 1977 tarihinde uygulamaya giren ve Kıbrıs Türk Sosyal Sigortalar Yasası olarak isimlendirilen 16/1976 sayılı yasanın 13. maddesi 1. fıkrası'nda iş kazası,

- “a) Sigortalının, işyerinde bulunduğu sırada veya yürütülmekte olan iş dolayısıyla,
b) Sigortalının işverenin emri ile başka bir yere gönderildiği sırada,
c) Kadın sigortalının emzikli çocuğuna süt vermek için ayrılan zamanlarda,
ç) Sigortalıların, işverence sağlanan bir taşıtla işin yapıldığı yere götürülüp getirilmeleri sırasında meydana gelen ve sigortalıyı hemen veya sonradan bedence veya ruhça arızaya uğratan olay,” şeklinde tanımlanmıştır.

Aynı maddenin 2. fıkrası’nda ise, “Bir sigortalının Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti sınırları içinde işine giderken veya gelirken kazaya uğraması halinde, sigortalının belli bir yolda ve belli bir araçla gitmesi zorunda olup olmamasına bakılmaksızın o kaza bir iş kazası sayılır. Sigortalının herhangi bir şekilde yaralanmasına neden olacak her türlü olay, türüne, yerine ve zamanına bakılmaksızın, bu Yasa amaçları açısından iş kazası sayılır,” şeklinde tanımlanmıştır.

Sosyal güvenlik sistemlerinin dünya genelinde değişime ve gelişime uğraması, KKTC’de de karşılık bulmuş ve 2000’li yılların başında hazırlanmaya başlanan 73/2007 sayılı Sosyal Güvenlik Yasası, 01 Şubat 2008 tarihinde uygulamaya girmiştir. Bu yasanın 14. maddesi, 1. fıkrası’nda ise iş kazası,

- “a) Sigortalının işyerinde bulunduğu sırada,
b) Sigortalı tarafından işyerinde veya işyeri dışında yürütmekte olduğu iş nedeniyle,
c) Bir işverene bağlı olarak çalışan sigortalının işveren tarafından görev ile işyeri dışında başka bir yere gönderilmesi nedeniyle asıl işini yapmaksızın geçen zamanlarda,
ç) Emzikli kadın sigortalının, çocuğuna süt vermek için ayrılan zamanlarda,
d) Sigortalıların, işe başlama ve işten ayrılma saatleri dikkate alınarak, işe gidiş-gelişi sırasında, meydana gelen ve sigortalıyı hemen veya sonradan bedence veya ruhça arızaya uğratan olay,” şeklinde tanımlanmıştır.

Her iki yasanın iş kazaları ile ilgili maddeleri incelendiğinde; 16/1976 sayılı yasanın, 2. fıkrasının, 73/2007 sayılı yasada uygulamadan kaldırıldığı görülmektedir. Yapılan bu değişiklikle yasa maddesinin kapsamı daraltılmış, sigortalıların işe giderken veya gelirken yaşadığı kazalarda işe başlama ve işten ayrılma saatlerine ek olarak gidilen güzergâh da dikkate alınmaya başlanmıştır. Bu sayede ilgili maddenin daha kolay ve anlaşılabilir olması sağlanarak ortaya çıkabilecek sorunlar önlenmiştir.

Türkiye Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından yayınlanan ve 2013-2021 yıllarını kapsayan iş kazası istatistikleri incelendiğinde, inşaat sektöründe meydana gelen kazaların tüm sektörlerle kıyaslandığında ortalama %14,06 oranında olduğu, meydana gelen kazaların hem çok sık hem de şiddetli ve çok sayıda ölümle sonuçlandığı ortaya çıkmıştır. Yapılan incelemelerde, diğer sektörlerle kıyaslandığında inşaat sektöründe 2013-2021 yılları arasında %33,86 oranında ölümlü iş kazasının meydana geldiği de görülmektedir [38]. Aynı konu üzerine yapılan ve farklı yılları kapsayan çalışmalarda da benzer bulgulara ulaşılmıştır [25, 39-48].

Avrupa İstatistik Ofisi tarafından yayınlanan 2021 yılına ait iş kazası istatistiklerine göre, (AB’ne üye ülkeler arasında) inşaat sektörünün diğer sektörlerle kıyaslandığında %12,9 oran

ile en yüksek 3. sektör olduğu, ölümlü iş kazası istatistiklerinde rakamın %22,5'le en yüksek orana çıktığı ve tüm sektörler arasında en ölümcül iş kazalarının inşaat sektöründe meydana geldiği görülmektedir [49].

Tözer vd.'nin [50, 51] KKTC inşaat sektöründe 1994-2004 yıllarında meydana gelen iş kazalarının sektörel dağılımını incelediği araştırmada, iş kazalarının %26'dan fazlasının inşaat sektöründe meydana geldiği, ölümlü iş kazalarında ise bu oranın %40'a çıktığı saptanmıştır. Bunlara ek olarak sektördeki kazaların yıl, ay ve gün içindeki dağılımları, iş kazası tipleri ve inşaat sektöründeki kazazedelerin meslek gruplarına göre dağılımları incelenmiştir. Çelik ve Tözer [52] 2008-2012 yıllarını kapsayan ve inşaat sektöründeki iş kazalarının analizi ile birlikte çalışanların eğitim ve kültür seviyeleri üzerine yaptıkları çalışmada, KKTC'de yılda ortalama 253 iş kazasının meydana geldiğini, bu kazalardan ortalama 85 tanesinin inşaat sahalarında gerçekleştiğini ve her yıl inşaatlarda yaşanan iş kazalarının yaklaşık %2-3'ünün ölümlü sonuçlandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca meydana gelen iş kazalarının nedenleri ile birlikte çalışanların eğitim ve kültür seviyelerinin iş kazalarına olan etkileri de incelenmiş, çalışanların büyük bir bölümünün eğitimsiz veya yeterli seviyede eğitim almamış kişiler olduğunu tespit etmişlerdir. Tözer vd. [53] KKTC'deki 50 inşaat sahasında yaptıkları ve inşaat sektöründe sektörel eğitim almamış işçilerin yaşadığı iş kazaları üzerine yapılan çalışmalarında, 212 kazazede yaş, cinsiyet ve mesleki tecrübelerine göre incelenirken, kazaların oluş nedenleri üzerine analizler de yapılmıştır. KKTC inşaat sektöründe çalışan sektörel eğitim almamış işçilerin yaşamını yitirdiği iş kazalarının inşaat sektöründeki toplam ölümlü kazaların %30,95'ini ve ülkedeki meslek ölümlerinin %15.12'sini oluşturduğu görülürken, kazalarda yaralanan çalışanların neredeyse yarısının 20-30 yaş aralığındaki genç ve eğitimsiz kişiler olduğu tespit edilmiştir. Özgürer [8] ise KKTC'de gerçekleştirdiği bir diğer çalışmada, 2015-2020 yılları arasındaki 6 yıllık süre içerisinde iş kazalarının sektörlere ve ilçelere göre analizini yapmıştır. Bu çalışmaya göre en çok iş kazası inşaat sektöründe gerçekleşirken, yine en fazla ölümlü iş kazasının bu sektörde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın bir diğer çarpıcı sonucu ise meydana gelen iş kazalarının nerede ise %55'inin Lefkoşa ilçesi sınırları içerisinde olmasıdır.

3. MATERYAL VE METOT

KKTC'de iş kazaları ile ilgili istatistik verilerin ana kaynağı SSD'dir. Ancak SSD'sinin herhangi bir basılı yayınlığının ve/veya istatistik bülteninin olmamasından dolayı çalışmada kullanılan verilere ilgili kurumdan alınan yazılı izinle ulaşılmıştır. Elde edilen veriler üzerinden yapılan incelemede, verilerin iş kazaları ile ilgili kapsamlı bilgiler içerdiği görülmesine rağmen ölümlü iş kazaları ile ilgili detaylı verilere ulaşılamamıştır. Bu soruna çözüm bulmak gâilesi ile öncelikle SSD'de görev yapan müfettişler ile Eylül - Kasım 2022 tarihleri arasında yüz yüze görüşülerek KKTC sınırları içerisinde meydana gelen ölümlü iş kazaları ile ilgili hazırladıkları yazılı raporlar temin edilmiştir. Akabinde, temin edilen tüm raporlar incelenmiştir. Herhangi bir eksiklik olmaması adına, KKTC'de iş kazası istatistiklerini arşivleyen diğer bir kurum olan Çalışma Dairesi'nin istatistik yıllıkları temin edilmiş, SSD'den alınan veriler ile Çalışma Dairesi'nden alınan raporlar karşılaştırılıp, çapraz kontrol yapıldıktan sonra sisteme işlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, nitel analiz yöntemi kullanılmıştır. Araştırma kapsamında KKTC SSD ve KKTC Çalışma Dairesinden temin edilen 2012-2021 yıllarına ait iş kazası verileri ve ölümlü iş kazalarına ait müfettiş rapor sonuçları derlenmiş, Microsoft Excel programı kullanılarak oluşturulan tablolar yardımı ile sonuçlar analiz edilmiştir.

Özellikle Türkiye’de iş kazaları ile ilgili verilerin ana kaynağı Sosyal Sigortalar Kurumu ve yayınlamış olduğu istatistik yıllıklarıdır. Yayımlanan istatistik yıllıkları bu konularda çalışma yürüten araştırmacılar için temel başvuru kaynağı niteliğinde olup, bilgiye erişmenin kolay olması daha fazla çalışma yapılmasına ve yapılan çalışmaların çeşitli alanlara yayılmasına olumlu yönde katkı koymaktadır. KKTC’de SSD’ne ait istatistik yıllığının olmaması gerek akademik çalışma yapan araştırmacıların gerek sektör paydaşlarının araştırma yapmasını güçleştirmekte, meydana gelen iş kazalarının tekrarlanmasını önleyici adımlar atılabilmesi için yapılabilecek çalışmalarda verilere ulaşımı zorlaştırmaktadır. Meydana gelen iş kazaları çeşitli yönlerden analiz edilerek, inşaat sektöründe öncelikli olarak önlem alınması gereken noktalar ortaya kona bilinecektir.

Çalışmada kullanılan istatistiki veriler yalnızca kayıtlı istihdamlara ait bilgileri içermektedir. KKTC’ne turist statüsü altında gelip çalışmaya başlayan veya KKTC’deki üniversitelere eğitim almak için gelip sonrasında çalışmaya başlayan kayıt dışı şahıslara ait verileri içermemektedir. Son yıllarda özellikle inşaat sektöründe yapılan denetim ve teftişlerde bu durumda bulunan kayıt dışı çalışanlara rastlanılmıştır. KKTC’de faaliyet gösteren inşaat şirketleri genellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler olmasına rağmen taşeron işveren uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşeron işletmeler büyük işletmelere kıyasla daha fazla kayıtsız işçi çalıştırmakta ve kayıtsız olarak çalıştırılan işçilerin geçirdikleri kazalar SSD kayıtlarında görülmemektedir. Kayıtsız çalışanların geçirmiş olduğu iş kazalarının SSD kayıtlarında tutulmadığı, bu nedenle mevcut iş kazası sayılarının çok daha fazla olduğu düşünülmektedir.

Araştırma konusunun sınırlandırılması açısından istatistikler; SSD’de sigortalı olarak kayıtlı bulunan ve yaşadığı iş kazası sonucu tüm hakları ödenerek dosyası kapatılan sigortalıların verilerini kapsamaktadır. İş kazası yaşandığına dair başvuru yapıp, eksik bildirim ve/veya eksik evrak ile müracaat edenler, hatalı başvurular ve/veya teftiş ve inceleme sonucu olayın iş kazası olmadığı tespit edilen müracaatlar ile kurum müfettişlerine iş kazası ile ilgili ifade vermeyen kazazedelerin dosyaları kapatılmadığından dolayı çalışmaya dahil edilmemiştir.

Avrupa Birliği (AB) ülkeleri ve Türkiye’de işyeri faaliyet grupları sınıflandırmasında, kısaltması “NACE” olan “Avrupa Topluluğunda Ekonomik Faaliyetlerin İstatistiki Sınıflaması” iktisadi faaliyet kolu sınıflandırması kullanılmaktadır. İnşaat sektörü bu sınıflandırma altında; 41- ‘Bina İnşaatı’, 42- ‘Bina Dışı Yapıların İnşaatı’ ve 43- ‘Özel İnşaat Faaliyetleri’ olmak üzere üç alt gruba ayrılmıştır. Bu sınıflandırma Tablo 1’de görüldüğü gibi kendi içerisinde detaylandırılarak tüm AB ülkeleri ve Türkiye tarafından da kullanılmaktadır [10].

NACE iktisadi faaliyet kolu sınıflandırması KKTC, istatistik kurumu tarafından kullanılmasına rağmen KKTC, SSD’de faaliyet grupları sınıflandırmasında 1976, Kıbrıs Türk Sosyal Sigortalar Yasası, iş kazaları ile meslek hastalıkları primi tarifesini yönetmenliği, tehlike dereceleri ve prim oranları cetveli kullanılmaktadır [54]. Bu sınıflandırmaya göre inşaat sektörü 10 farklı alt sektöre ayrılmıştır.

Tablo 1 - AB ve Türkiye İnşaat Sektörü NACE Sınıflandırması

- 41-Bina İnşaatı
 - 1-İnşaat projelerinin geliştirilmesi
 - 2-İkamet veya ikamet amaçlı olmayan binaların inşaatı
- 42-Bina Dışı Yapıların İnşaatı
 - 1-Kara ve demir yollarının inşaatı
 - 1.1-Kara yolları ve otoyolların inşaatı
 - 1.2-Demir yolları ve metroların inşaatı (demiryolu tünel ve yer altı inşaatı)
 - 1.3-Köprüler ve tünellerin inşaatı
 - 1.4-Demir yolu, tünel ve yer altı tamirâtı
 - 2-Hizmet projelerinin inşaatı
 - 2.1-Sıvılar için hizmet projelerinin inşaatı
 - 2.2-Elektrik ve telekomünikasyon için hizmet projelerinin inşaatı
 - 2.3-Dekovil ve tramvay yolu inşaat ve tamirâtı
 - 3-Bina dışı diğer yapılara ait projelerin inşaatı
 - 3.1-Su projeleri inşaatı
 - 3.2-İskele, Liman, mendirek inşaat ve tamirâtı
 - 3.3-Başka yerde sınıflandırılmamış bina dışı diğer yapılara ait projelerin inşaatı
- 43-Özel İnşaat Faaliyetleri
 - 1- Yıkım ve şantiyenin hazırlanması
 - 1.1-Yıkım işleri
 - 1.2-Şantiyenin hazırlanması
 - 1.3-Test sondajı ve delme
 - 2-Elektrik tesisatı, sıhhi tesisat ve diğer inşaat tesisatı faaliyetleri
 - 2.1-Elektrik tesisatı
 - 2.2-Sıhhi tesisat, ısıtma ve iklimlendirme tesisatı
 - 2.3-Diğer inşaat tesisatı (Asansörlerin, yürüten merdivenlerin vb. kurulum işleri)
 - 3-Binanın tamamlanması ve bitirilmesi
 - 3.1-Sıva işleri
 - 3.2-Doğrama tesisatı
 - 3.3-Yer ve duvar kaplama
 - 3.4-Boya ve cam işleri
 - 3.5-İnşaatlardaki diğer bütünleyici ve tamamlayıcı işler
 - 4- Diğer özel inşaat faaliyetleri
 - 4.1-Çatı işleri
 - 4.2-Başka yerde sınıflandırılmamış diğer özel inşaat faaliyetleri

Gerek AB ülkeleri gerek Türkiye gerekse de KKTC istatistik kurumunun uluslararası NACE iktisadi faaliyet kolu sınıflandırmasını kullandığı görülürken, SSD'nin NACE sınıflandırmasını kullanmaması ülke içerisinde farklı sistemler kullanılmasına neden olmakta, bunun da ülke içerisinde yeknesak bir sistem kullanılmasının önünde engel teşkil ederek, faaliyet kolları üzerinden uluslararası karşılaştırma yapmayı engellediği düşünülmektedir.

Tablo 2 - KKTC, SSD, Tehlike Dereceleri ve Prim Oranları Cetveli

4-İnşaat,

40-İnşaat Sanayi,

400-İnşaat İşleri

4000-İnşaat işinden müstakilen yapılan badanacılık, yağlı boyacılık, binaların parke, muşamba ve ninolyon vs. ile döşenmesi işleri

4001-Köprü, kanalizasyon, baraj, su regülatörü ve varyant su yolu, kuyu ve su işleri ile ilgili inşaat ve tamirati

4002-Dekovil ile tramvay yolu inşaat ve tamirati

4003-Bina inşaatı ve tamirati, bina yıkımı işleri, taşeronluğu

4004-Sıhhi tesisat kalorifer, gaz su elektrik tesisatı (Bina içi tesisatı)

4005-İskele, liman, mendirek inşaat ve tamiri

4006-Demiryolu, tünel ve yeraltı inşaatı

4007-Demiryolu, tünel ve yeraltı tamirati

4008-Bina dışı elektrik, gaz, telgraf, telefon tesisatı ve havai hat payplayn inşaat, tamirat ve bakım işleri

4009-Yol, sporcu ve uçak alanları inşaatı, tamirat ve bakım işleri (yol inşaatı ile ilgili varyant inşaatı dahil)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 3 - KKTC Geneli İşyeri Sayıları, İnşaat Sektörü İşyeri Sayıları, KKTC Geneli Çalışan Sayıları, İnşaat Sektörü Çalışan Sayıları ve Yüzdelerinin Yıllara Göre Dağılımı

Yıl	KKTC İşyeri Sayıları	İnşaat İşyeri Sayıları	%	KKTC Çalışan Sayıları	İnşaat Çalışan Sayıları	%
2012	18,312	1,249	%6,82	107,657	12,559	%11,67
2013	18,217	1,246	%6.84	109,307	11,827	%10.82
2014	18,279	1,238	%6.77	113,590	12,348	%10.87
2015	18,466	1,249	%6.76	120,714	14,555	%12.06
2016	18,850	1,293	%6.86	131,425	15,500	%11.79
2017	19,578	1,418	%7.24	143,200	18,972	%13.25
2018	20,075	1,499	%7.47	152,382	19,875	%13.04
2019	20,323	1,515	%7.45	153,481	17,195	%11.20
2020	20,322	1,495	%7.36	143,170	15,459	%10.80
2021	20,042	1,523	%7.60	143,528	15,767	%10.99
Ortalama	19,246	1,373	%7.13	131,845	15,406	%11.68

Tablo 3'e göre 2012-2021 yılları arasında KKTC'de ortalama 19,246 iş yerinin olduğu, aynı yıllarda inşaat sektöründe ortalama 1,373 işyerinin bulunduğu ve inşaat sektörünün genel iş yeri sayılarına oranının ortalama %7,13 olduğu görülmektedir. 2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde ortalama 131,845 çalışan olduğu görülürken, aynı yıllarda inşaat sektöründe ortalama 15,406 çalışanın olduğu, inşaat sektörü çalışan sayılarının KKTC geneli çalışan sayılarına oranının ise ortalama %11,68 olduğu görülmektedir. KKTC gibi

gelişmekte olan bir ülkede bu oran sadece istihdam potansiyeli olarak değil ekonomiye kattığı değer açısından da önemli ve yüksektir.

KKTC geneli işyeri sayılarına bakıldığı zaman özellikle 2013 yılından 2019 yılına kadar istikrarlı bir büyümenin olduğu görülmektedir. İnşaat sektörü işyeri sayılarına bakıldığı zaman ise ilk 4 yılda durağan bir görüntünün hâkim olduğu 2015 yılından 2019 yılına kadar da hızlı bir büyümenin yaşandığı görülmektedir. KKTC geneli işyeri sayılarında 2019 yılından sonra bir düşüş yaşansa da bu gerilemenin inşaat sektörüne aynı oranda yansımadağı, 2020 yılında az bir gerileme olduktan sonra 2021 yılını yine yükselişle tamamladığı görülmektedir.

10 yıllık süre içerisinde çalışan sayılarına bakıldığı zaman; KKTC geneli çalışan sayılarının 2012 yılından 2019 yılına kadar istikrarlı bir şekilde arttığı ve 2020 yılında düşüşe geçerek, 2021 yılında durağanlaştığı görülmektedir. İnşaat sektörü çalışan sayıları ise 2013 yılından itibaren istikrarlı bir şekilde artmaya başlamış ve 2018 yılına kadar yükselişini sürdürmüş, sonrasında ise 2019-2020 yıllarında büyük bir düşüş yaşayarak istihdam oranlarında %1,84'lük bir gerileme yaşayarak, 2021 yılında durağanlaşmıştır.

Tablo 3'deki veriler incelendiğinde inşaat sektörü iş yeri sayılarında 2019 yılından itibaren bir duraksama olduğu görülürken, çalışan sayılarında ve istihdam oranlarında çok ciddi bir azalma yaşandığı görülmektedir. Bu azalmanın en önemli nedenleri arasında 2019 yılı sonunda Türk Lirasının döviz karşısında değer kaybetmesi ile başlayan ekonomik krizin öncelikli olarak inşaat sektörünü etkilemesi ve inşaat sektörünün yavaşlaması nedeni ile işyerlerinin personel azaltması gösterilebilir. 2019 yılında yaşanan döviz krizinin hemen sonrasında başlayan Covid-19 pandemisinden dolayı KKTC Bakanlar Kurulunun 15/03/2020-04/05/2020 ve 28/01/2021-22/02/2021 tarihleri arasında inşaat sektörü dahil olmak üzere pek çok sektörün faaliyetini durdurması ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ekonomik krizin tüm ülkeyi etkilemesi de bu gerilemenin diğer bir önemli nedeni olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4 - KKTC İnşaat Alt Sektörlerindeki İşyeri Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Yıl - İnşaat Alt Sektör	4000	4001	4002	4003	4004	4005	4007	4008	4009	Genel Toplam
2012	127	34	1	811	241	1	1	18	14	1248
2013	127	36	1	819	227	1	1	20	12	1244
2014	127	36	1	812	224	1	1	23	11	1236
2015	132	34	1	819	223	1	1	26	10	1247
2016	134	32	1	841	240	1	1	29	11	1290
2017	157	36	1	921	259	1	1	29	10	1415
2018	165	36	1	969	281	1	1	29	13	1496
2019	163	36	1	981	286	1	1	31	12	1512
2020	149	34	1	976	290	1	1	29	10	1491
2021	162	36	1	977	302	1	1	28	11	1519
Ortalama	144	35	1	893	257	1	1	26	11	13,698

Tablo 4’de inşaat alt sektörlerinde 2012-2021 yılları arasında faaliyet gösteren iş yerlerinin yıllara göre dağılımı görülmektedir. Tablo 2’ye göre inşaat alt başlığı altında 10 farklı alt sektör bulunmasına rağmen 4006 kodlu alt sektörde faaliyet gösteren herhangi bir işyerinin olmamasından dolayı çalışmanın bu noktadan sonraki bölümü 9 farklı alt sektör üzerinden devam ettirilecektir.

2012-2021 yılları arasında 9 farklı alt sektörde en fazla işyerinin 4003 kodlu alt sektörde olduğu ve 10 yıllık süre içerisinde bu alt sektörde ortalama 893 işyerinin bulunduğu görülmektedir. 2. sırada bulunan 4004 kodlu alt sektörde ortalama 257 işyerinin olduğu, 3. sırada bulunan 4000 kodlu alt sektörde ise ortalama 144 işyerinin olduğu görülmektedir. 4003 kodlu alt sektördeki toplam işyeri sayısının, 10 yıllık süre içerisinde inşaat sektörü toplam işyeri sayısına oranı %65,16 olurken, yukarıda yazılan ilk 3 alt sektörün, inşaat sektörü toplam işyeri sayısına oranının %94,48’ini oluşturduğu, geriye kalan 6 alt sektörün ise genel istatistiğin %5,52’sini oluşturduğu görülmekte ve neredeyse bu 3 alt sektörün tüm inşaat sektörünü oluşturduğu görülmektedir.

Tablo 5 - KKTC İnşaat Alt Sektörlerinde Çalışan Sayılarının Yıllara Göre Dağılımı

Yıl - İnşaat Alt Sektör	4000	4001	4002	4003	4004	4005	4007	4008	4009	Genel Toplam
2012	1114	242	6	9593	1054	13	1	342	364	12729
2013	1161	262	5	8885	1050	7	1	241	469	12081
2014	1150	407	12	9021	1086	7	1	296	557	12537
2015	1272	553	6	10698	1206	7	1	525	448	14716
2016	1514	337	7	11657	1544	9	1	273	387	15729
2017	2149	308	8	13693	2171	12	2	354	489	19186
2018	1949	413	10	14582	2146	10	2	288	698	20098
2019	1621	505	9	12631	1875	2	2	287	459	17391
2020	1417	435	11	11472	1738	1	2	270	251	15597
2021	1432	480	13	11590	1741	1	2	275	378	15912
Ortalama	1,478	394	9	11,382	1,561	7	2	315	450	155,976

Tablo 5’de 2012-2021 yılları arasında inşaat alt sektörlerinde çalışan kişilerin yıllara göre dağılımı görülmektedir. 4006 kodlu alt sektörde faaliyet gösteren herhangi bir işyeri ve çalışan olmamasından dolayı çalışmanın bu noktadan sonraki bölümü 9 farklı alt sektör üzerinden devam ettirilecektir.

2012-2021 yılları arasında 9 farklı alt sektörde en fazla çalışanın 4003 kodlu alt sektörde olduğu ve 10 yıllık süre içerisinde bu alt sektörde ortalama 11,382 çalışanın bulunduğu görülmektedir. 2. sırada bulunan 4004 kodlu alt sektörde ortalama 1,561 çalışanın olduğu, 3. sırada bulunan 4000 kodlu alt sektörde ise ortalama 1,478 çalışanın olduğu görülmektedir. 4003 kodlu alt sektörde toplam çalışan sayısının, 10 yıllık süre içerisinde inşaat sektörü

toplam çalışan sayısına oranı %72,97 olurken, yukarıda yazılan ilk 3 alt sektörün inşaat sektörü genel çalışan sayılarına oranının %92,46'sını tuttuğu, geriye kalan 6 alt sektörün ise genel istatistiğin %7,54'ünü tuttuğu görülmekte ve neredeyse bu 3 alt sektörde çalışanların tüm inşaat sektörünü oluşturduğu görülmektedir.

Tablo 6 - KKTC Genel İş Kazası Sayıları, İnşaat Sektörü İş Kazası Sayıları, KKTC Genel Ölümlü İş Kazası Sayıları, İnşaat Sektörü Ölümlü İş Kazası Sayıları ve Yüzdelerinin Yıllara Göre Dağılımı

Yıl	KKTC Genel İş Kazası Sayıları	İnşaat Sektörü İş Kazası Sayıları	%	KKTC Genel Ölüm Sayıları	İnşaat Sektörü Ölüm Sayıları	%
2012	290	86	%29.66	4	1	%25.00
2013	328	95	%28.96	7	2	%28.57
2014	286	73	%25.52	6	3	%50.00
2015	241	59	%24.48	7	2	%28.57
2016	210	63	%30.00	8	5	%62.50
2017	249	61	%24.50	4	2	%50.00
2018	288	72	%25.00	4	1	%25.00
2019	300	56	%18.67	5	4	%80.00
2020	214	53	%24.77	4	1	%25.00
2021	228	50	%21.93	8	2	%25.00
Toplam	2,634	668	%25.36	57	23	%40.35

Tablo 6'ya göre 2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde toplam 2,634 iş kazası meydana gelirken, bu kazalardan 668 tanesinin (%25,36) inşaat sektöründe yaşandığı görülmektedir. 10 yıllık süre içerisinde gerek K.K.T.C. genelinde (328 iş kazası) gerekse de inşaat sektöründe (95 iş kazası) en çok iş kazasının 2013 yılında meydana geldiği görülmektedir. KKTC genelinde en az iş kazası 2016 yılında (210 iş kazası) meydana gelirken, inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının en düşük olduğu yılın 2021 yılı (50 iş kazası) olduğu görülmektedir. 10 yıllık süre içerisinde ölümlü iş kazası sayıları incelendiğinde toplam 57 ölümlü iş kazasının meydana geldiği, bu ölümlü iş kazalarından 23 tanesinin ise (%40,35) inşaat sektöründe olduğu görülmektedir.

10 yıllık süre içerisinde K.K.T.C. genelinde en az kazanın 2016 yılında meydana geldiği ve bu sayının diğer yıllara göre nispeten düşük olduğu düşünülse de yüzdeler olarak bakıldığında toplam iş kazalarının %30,00'lük kısmını oluşturarak en yüksek iş kazası oranının bu yılda çıktığı görülmektedir. Aynı yıl içerisinde 8 ölümlü iş kazasının olması ve bu 8 ölümlü iş kazasından 5 tanesinin inşaat sektöründe (%62,50) yaşanması diğer dikkat çekici bir istatistik olarak karşımızda durmaktadır. Diğer yandan 2019 yılı içerisinde 5

ölümlü iş kazası meydana gelirken bu kazalardan 4 tanesinin (%80,00) inşaat sektöründe yaşanması çarpıcı bir istatistik olarak karşımıza çıkmaktadır.

2020-2021 yıllarında hem ülke genelinde yaşanan ekonomik krizin hem de Covid-19 pandemisinin etkisi ile çalışan sayılarında büyük bir düşüş yaşanmış olmasının genel iş kazası sayılarında azalmaya etki ettiği düşünülürken, 2020 yılında meydana gelen ölümlü iş kazası sayısında dikkat çekici bir azalma olmadığı, 2021 yılında ise bu sayının 2 kat arttığı görülmektedir. 2021 yılı içerisinde KKTC genelinde ölümlü iş kazası sayısı 2 kat artmasına rağmen, inşaat sektöründe yaşanan ölümlü iş kazası sayısının yüzdelik olarak aynı kaldığı görülmektedir.

Tablo 7 - KKTC İnşaat Sektöründe Yaşanan İş Kazalarının İlçelere ve Yıllara Göre Dağılımı

Yıl - İlçe	Lefkoşa	Girne	Mağusa	İskele	Güzelyurt	Lefke	Toplam
2012	45	15	20	4	2	0	86
2013	58	15	17	4	1	0	95
2014	44	15	10	4	0	0	73
2015	41	6	7	5	0	0	59
2016	39	12	5	5	2	0	63
2017	43	6	7	4	1	0	61
2018	39	15	13	5	0	0	72
2019	33	10	8	4	1	0	56
2020	28	6	15	3	0	1	53
2021	31	7	11	1	0	0	50
Toplam	401	107	113	39	7	1	668
%	60.03	16.02	16.92	5.84	1.05	0.15	100.00

Tablo 7’de 2012-2021 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının ilçelere ve yıllara göre dağılımı görülmektedir. 2012-2021 yılları arasında gerçekleşen ve tüm ilçeleri kapsayan iş kazası istatistikleri incelendiğinde, inşaat sektöründe meydana gelen toplam 668 iş kazasının 401 tanesinin (%60,03) Lefkoşa ilçesinde meydana geldiği, 113 iş kazası (%16,92) ile Mağusa ilçesinin 2. sırada, 107 iş kazası (%16,02) ile Girne ilçesinin 3. sırada, 39 iş kazası (%5,84) ile İskele ilçesinin 4. sırada, 7 iş kazası (%1,05) ile Güzelyurt ilçesinin 5. sırada ve 1 iş kazası (%0,15) ile Lefke ilçesinin son sırada olduğu görülmektedir. Lefkoşa ilçesinde meydana gelen 401 iş kazasının genel istatistiğinin %60,03 gibi büyük bir oranını tuttuğu görülürken diğer 5 ilçede meydana gelen 267 iş kazasının genel istatistiğinin %39,97’sini oluşturduğu görülmektedir.

Bu noktada iş kazalarının nerede ise 2/3’ünün Lefkoşa ilçesinde meydana gelmesi önemli bir detay olarak karşımıza çıkmaktadır. En çok iş kazasının Lefkoşa ilçesinde yaşanmasının en önemli nedenleri arasında KKTC genelinde çalışan iş gücünün yaklaşık %46’lık bir kısmının

Lefkoşa ilçesinde bulunması [55] ve inşaat ve inşaata bağlı yan sanayilerin bulunduğu organize sanayi bölgelerinin Lefkoşa ilçesinde yoğunlaşması olduğu düşünülmektedir. Dikkat çeken diğer bir detay ise 10 yıllık süre içerisinde Lefke ilçesinde sadece tek 1 iş kazasının meydana gelmesidir. Bunun en önemli nedeni, 2012-2019 yılları arasında Lefke bölgesinde hizmet veren SSD'nin, Güzelyurt ilçesindeki SSD'sine bağlı bir büro olarak hizmet vermesi ve bu yıllar arasında meydana gelen iş kazalarının Güzelyurt SSD'nin istatistiklerinde tutulmasıdır. Lefke bölgesinin 2019 yılında ayrı ilçe olmasından sonra bu ilçede meydana gelen iş kazaları Lefke SSD'nin kayıtlarında tutulmaya başlanmıştır. Diğer bir yandan Lefke ilçesinin diğer ilçelere kıyasla nüfusunun az olması, bölgenin kırsal kesim olması ve buna bağlı olarak bölgeye yatırımın az olmasından dolayı inşaat sektöründe 2021 yılında herhangi bir kazanın meydana gelmediği düşünülmektedir.

Tablo 8 - KKTC'de Meydana Gelen İş Kazalarının İnşaat Alt Sektörlerine ve İlçelere Göre Dağılımı

İnşaat Alt Sektör	Lefkoşa	Girne	Mağusa	İskele	Güzelyurt	Lefke	Toplam	%
4000	99	2	2	0	0	1	104	15.57
4001	6	2	2	0	1	0	11	1.64
4003	240	93	95	36	6	0	470	70.36
4004	46	10	14	1	0	0	71	10.63
4008	2	0	0	0	0	0	2	0.30
4009	8	0	0	2	0	0	10	1.50
Toplam	401	107	113	39	7	1	668	100.00

Tablo 8'de inşaat alt sektörlerinde gerçekleşen ve tüm ilçeleri kapsayan iş kazası istatistikleri görülmektedir. 2012-2021 yılları arasında inşaat alt sektörlerinde yaşanan iş kazaları incelendiğinde; 4002, 4005, 4006 ve 4007 kodlu alt sektörlerde herhangi bir iş kazasının olmadığı, geriye kalan 6 farklı alt sektörde ise 668 iş kazasının meydana geldiği görülmektedir. Alt sektörler içerisinde en fazla iş kazasının 470 iş kazası ile (%70,36) 4003 kodlu alt sektörde gerçekleştiği ve bu kazaların 401 tanesinin Lefkoşa ilçesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu istatistikler inşaat sektöründe meydana gelen toplam 668 iş kazasının nerede ise 2/3'ünün Lefkoşa ilçesinde ve 2/3'ünden fazlasının ise "Bina inşaat ve tamiratı, bina yıkımı işleri, taşeronluğu" alt sektöründe meydana geldiğini göstermektedir. Yine aynı verilere göre 104 iş kazası (%15,57) ile 4000 kodlu alt sektörün 2. sırada olduğu ve bu kazalardan 99 tanesinin Lefkoşa ilçesinde gerçekleştiği görülmektedir. 71 iş kazası (%10,63) ile 4004 kodlu alt sektörün 3. sırada olduğu ve bu kazalardan 46 tanesinin Lefkoşa ilçesinde gerçekleştiği görülmektedir. 2012-2021 yılları arasında yaşanan toplam 668 iş kazasından 645 tanesinin (%96,56) yukarıda yazılan ilk 3 alt sektörde olduğu görülürken, geriye kalan 3 alt sektörde 23 iş kazasının (%3,44) olduğu görülmektedir. Yukarıda yazılan ilk 3 alt sektörde bu kadar fazla iş kazası olmasının en önemli nedeni olarak bu alt sektörlerde faaliyet gösteren iş yeri ve çalışan sayılarının diğer alt sektörlerden çok daha fazla olması gösterilebilir.

2012-2021 yılları arasında meydana gelen 668 iş kazasının ilçelere göre dağılımı incelendiğinde Lefkoşa ilçesinin 401 iş kazası (%60,03) ile 1. sırada, 113 iş kazası (%16,92) ile Mağusa ilçesinin 2. sırada, 107 iş kazası (%16,02) ile Girne ilçesinin 3. sırada, 39 iş kazası (%5,84) ile İskele ilçesinin 4. sırada, 7 iş kazası (%1,05) ile Güzelyurt ilçesinin 5. sırada ve 1 iş kazası (%0,15) ile Lefke ilçesinin son sırada olduğu görülmektedir.

Tablo 9 - KKTC İnşaat Alt Sektörlerinde Meydana Gelen Kazalarda, Kazazedelere Ödenen Geçici İş Göremezlik Sürelerinin Yıllara Göre Dağılımı

Yıl – İnşaat Alt Sektör	4000	4001	4003	4004	4008	4009	Genel Toplam
2012	871	0	6,631	698	0	46	8,246
2013	861	30	4,186	181	0	74	5,332
2014	378	0	4,259	279	0	37	4,953
2015	468	42	4,470	517	186	0	5,683
2016	542	15	5,164	222	0	0	5,943
2017	466	116	5,689	430	0	221	6,922
2018	507	199	4,943	511	93	295	6,548
2019	471	113	2,678	424	0	0	3,686
2020	558	0	2,441	274	0	0	3,273
2021	804	29	2,972	578	0	68	4,451
Toplam	5,926	544	43,433	4,114	279	741	55,037
%	10.77	0.99	78.92	7.47	0.51	1.35	100.00

Tablo 9’da 2012-2021 yılları arasında inşaat alt sektörlerinde meydana gelen kazalarda, kazazedelere ödenen geçici iş göremezlik gün sayılarının istatistikleri görülmektedir. 2012-2021 yılları arasında 6 farklı alt sektörde meydana gelen 668 iş kazasından dolayı çalışanlara toplam 55,037 gün geçici iş göremezlik ödeneği verildiği ortaya çıkmaktadır. En fazla iş kazasının meydana geldiği 4003 kodlu alt sektördeki yaralanmalardan dolayı kazazedelerin toplam 43,433 gün geçici iş göremezlik ödeneği aldığı, bunun da toplam geçici iş göremezlik sürelerinin %78,92’sini oluşturduğu görülmektedir. Yine aynı tabloya göre 2. sırada bulunan 4000 kodlu alt sektördeki yaralanmalardan dolayı kazazedelere toplam 5,926 gün (%10,77) geçici iş göremezlik ödeneği verildiği, 3. sırada bulunan 4004 kodlu alt sektördeki yaralanmalardan dolayı ise kazazedelere toplam 4,114 gün (%7,47) geçici iş göremezlik ödeneği verildiği görülmektedir. Yukarıda yazılan ilk 3 alt sektörde ödenen geçici iş göremezlik süreleri (53,473 gün) toplam ödemelerin %97,16’sını oluştururken, geriye kalan diğer 3 alt sektörde (4001, 4008 ve 4009 kodlu) ödenen geçici iş göremezlik sürelerinin (1,564 gün) toplam ödemelerin %2,84’ünü oluşturduğu görülmektedir. 470 iş kazası ile en fazla iş kazasının meydana geldiği 4003 kodlu alt sektörde kazazedelere ödenen 43,433 günlük geçici iş göremezlik süresi hesaplandığında, kaza başına neredeyse 93 günlük geçici iş göremezlik ödemesi yapıldığı ortaya çıkmakta ve bu alt sektörde meydana gelen kazaların

ne kadar şiddetli ve ağır sonuçlar doğurduğu çıkan istatistiki verilerden kolayca anlaşılabilir. SSD'den elde edilen veriler ışığında, yaşanan kazaların gerek kazazedeler gerek şirketler gerekse de ülke ekonomisine olan kayıpları göstermesi açısından önemli bir veri olduğu düşünülmektedir.

Tablo 10 - KKTC Geneli ve İnşaat Sektörü KOO ve ÖKOO'nun Yıllara Göre Dağılımı

Yıl	KKTC KOO	İnşaat KOO	KKTC ÖKOO	İnşaat ÖKOO
2012	26.94	68.48	0.37	0.80
2013	30.01	80.32	0.64	1.69
2014	25.18	59.12	0.53	2.43
2015	19.96	40.54	0.58	1.37
2016	15.98	40.65	0.61	3.23
2017	17.39	32.15	0.28	1.05
2018	18.90	36.23	0.26	0.50
2019	19.55	32.57	0.33	2.33
2020	14.95	34.28	0.28	0.65
2021	15.89	31.71	0.56	1.27
Ortalama	20,47	45,60	0,44	1,53

KOO, temel olarak belirli bir zaman diliminde yaşanan kazaların ne sıklıkla meydana geldiğinin ölçülmesidir [56]. Bu hesaplama yapılırken genel olarak bir takvim yılı içerisinde yaşanan toplam iş kazası sayısının, hesaplama yapılan yıl içerisinde referans alınan toplam işçi sayısına bölünmesiyle elde edilen rakamın 100.000 sayısı ile çarpılmasıyla bulunur [57]. KKTC inşaat sektöründe toplam çalışan sayısının 100.000'den az olması nedeni ile bu hesaplama 10.000 katsayısı ile çarpılarak hesaplanmış ve tablonun daha net ve kolay bir şekilde anlaşılabilmesi için çalışmaya eklenmiştir.

Tablo 10'da 2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde ve inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının her yıl için KOO ve ÖKOO görülmektedir. 10 yıllık süre içerisinde meydana gelen iş kazalarının KKTC geneli ile karşılaştırılması sayesinde inşaat sektörünün durumu daha kolay ve net bir şekilde anlaşılabilir. 2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde 10.000 kişiye düşen ortalama KOO 20,47 olmasına karşın inşaat sektöründe bu oranın 2 katından fazla çıkarak 45,60 olduğu tespit edilmiştir. İlgili yıllarda ÖKOO bakıldığında ise KKTC genelinde 10.000 kişiye düşen ÖKOO 0,44 çıkmasına karşın inşaat sektöründe bu oranın 3,5 kat fazla çıkarak 1,53 olduğu görülmektedir. İnşaat sektörü KKTC ekonomisini ayakta tutan sektörlerin başında gelmesine rağmen KOO ve ÖKOO'na bakıldığında bile diğer tüm sektörlerden daha riskli olduğu ve daha fazla kaza meydana gelme olasılığının bulunduğu görülmektedir. Bu nedenle inşaat sektörüne gereken hassasiyetin gösterilerek kaza sayılarının azaltılması için gerekli çalışmaların yapılmasının önemi tekrar ortaya çıkmaktadır.

5. SONUÇLAR

Tüm dünyada olduğu gibi KKTC çalışma hayatının en önemli sorunları arasında iş kazaları gelmektedir. KKTC’de yaşanan iş kazalarına ait istatistikler incelendiğinde, inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının diğer sektörlerden daha fazla olduğu ve yaşanan iş kazalarının diğer sektörlerle nazaran daha şiddetli ve ölümcül sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Bu ağır sonuçlar sektörde yaşanan iş kazalarının alt sektörler ve ilçelere göre analiz edilerek, sınıflandırılması ihtiyacını doğurmuştur. İnşaat sektöründe yaşanan kazaların hangi alt sektörlerde yoğunlaştığının tespit edilerek sınıflandırılması, önlem alma sıralaması yapılmasını mümkün kılacak, sistemin iyileştirilmesine yönelik odaklanılması gereken noktaları ortaya koyacaktır. Dünya genelinde inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarını çeşitli yönlerden inceleyen pek çok araştırma bulunmasına rağmen, KKTC literatüründe bu konuda daha önce yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma inşaat sektöründeki durumu ortaya koyarken bir yandan da literatüre katkı niteliği taşımaktadır. İnşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının hangi alt sektörlerde ve ilçelerde yoğunlaştığının incelenmesi ve elde edilen bulguların çalışma hayatı ile ilgili tüm kesimlerle paylaşılması, iş kazalarının azaltılabilmesi açısından önemlidir.

SSD’den elde edilen veriler incelendiğinde, 2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde ortalama 19,246 iş yerinin olduğu, aynı yıllarda inşaat sektöründe ortalama 1,373 işyerinin bulunduğu ve inşaat sektörünün genel iş yeri sayılarına oranının ortalama %7,13 olduğu görülmektedir.

2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde ortalama 131,845 çalışan olduğu görülürken, aynı yıllarda inşaat sektöründe ortalama 15,406 çalışanın olduğu, inşaat sektöründe çalışan sayılarının KKTC genelinde çalışan sayılarına oranının ise ortalama %11,68 olduğu görülmektedir.

İnşaat sektörü altında 10 farklı alt sektör bulunmasına rağmen 4006 kodlu alt sektörde faaliyet gösteren herhangi bir işyeri ve çalışan olmamasından dolayı çalışma 9 farklı alt sektör üzerinden hazırlanmıştır.

2012-2021 yılları arasında 9 farklı alt sektörde en fazla işyeri ve çalışanın 4003 kodlu alt sektörde olduğu ve 10 yıllık süre içerisinde bu alt sektörde ortalama 893 işyeri ve 11,382 çalışanın kayıtlı bulunduğu görülmektedir. 4003 kodlu alt sektörün inşaat sektörü toplam işyeri sayılarına oranı %65,16 olurken, çalışanlarda bu oran %72,97’ye çıkmaktadır.

2012-2021 yıllarını kapsayan 10 yıllık süre içerisinde KKTC genelinde toplam 2,634 iş kazası meydana gelirken, bu kazalardan 668 tanesinin (%25,36) inşaat sektöründe yaşandığı görülmektedir. Ölümlü iş kazası sayıları incelendiğinde 10 yıllık süre içerisinde yaşanan toplam 57 ölümlü iş kazasından 23 tanesinin (%40,35) inşaat sektöründe yaşandığı görülmektedir.

İnşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının yıllara ve ilçelere göre dağılımı incelendiğinde 2012-2021 yılları arasında meydana gelen toplam 668 iş kazasından 401 tanesinin (%60,03) Lefkoşa ilçesinde meydana geldiği görülmektedir.

İnşaat alt sektörlerinde gerçekleşen ve KKTC’nin tüm ilçelerini kapsayan iş kazası istatistiklerine göre; 4002, 4005, 4006 ve 4007 kodlu alt sektörlerde herhangi bir iş kazasının olmadığı, geriye kalan 6 farklı alt sektörde ise 668 iş kazasının meydana geldiği

görülmektedir. Alt sektörler içerisinde en fazla iş kazasının 470 iş kazası (%70,36) ile 4003 kodlu alt sektörde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

2012-2021 yılları arasında inşaat alt sektörlerinde meydana gelen kazalarda, kazazedelere ödenen geçici iş göremezlik gün sayıları incelendiğinde 6 farklı alt sektörde meydana gelen 668 iş kazasından dolayı çalışanlara toplam 55,037 gün geçici iş göremezlik ödeneği verildiği, 470 iş kazası ile en fazla kazanın meydana geldiği 4003 kodlu alt sektördeki yaralanmalardan dolayı kazazedelerin toplam 43,433 gün geçici iş göremezlik ödeneği aldığı, bunun da toplam geçici iş göremezlik sürelerinin %78,92'sini oluşturduğu görülmektedir.

2012-2021 yılları arasında KKTC genelinde 10.000 kişiye düşen ortalama KOO 20,47 olmasına karşın inşaat sektöründe bu oranın 2 katından fazla çıkarak 45,60 olduğu tespit edilmiştir. İlgili yıllarda ÖKOO'na bakıldığında ise KKTC genelinde 10.000 kişiye düşen ÖKOO 0,44 çıkmasına karşın inşaat sektöründe bu oranın 3,5 katından fazla çıkarak 1,53 olduğu görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Bayraktar, B., Uyguçgil, H., Konuk, A., Türkiye Madencilik Sektöründe İş Kazalarının İstatistiksel Analizi, Bilimsel Madencilik Dergisi, Özel Sayı, 85-90, 2018.
- [2] Çetinkaya, U., Ege Bölgesi'ndeki İnşaat İş Kazalarının ve Maliyetinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2012.
- [3] Songur, L., Songur, G., Ekonomik Büyümede İş Kazası ve Meslek Hastalıklarının Önemi ve Sosyal Tarafların Sorumluluğu, Akademik Bakış Dergisi, 68(4), 43-55, 2018.
- [4] ILO, International Labour Standards On Occupational Safety And Health, <https://www.ilo.org/>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2022.
- [5] Kazaz, A., Ulubeyli, S., Acıkara, T., Türk İnşaat Sektöründe İş Kazaları ve Nedenleri Üzerine Bir Araştırma, 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, Eskişehir, Türkiye, 2016.
- [6] Akgül, M., Doğan, Y., İnşaat Sektöründeki İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalık Analizi: İç Anadolu ve Marmara Bölgesi Örnekleme, Engineering Sciences (NWSAENS), 15(4), 159-173, 2020.
- [7] Güllüoğlu, E. N., Güllüoğlu, A. N., Türkiye İnşaat Sektöründe İstihdam ve İş Kazalarının Analizi, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 3(2), 61-81, 2019.
- [8] Özgürer, G., Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde 2015-2020 Yılları Arasında Meydana Gelen İş Kazalarının Sektörlere ve İlçelere Göre Analizi, Sosyal Güvenlik Dergisi, 12(1), 131-150, 2022.
- [9] Bayrak, İ. C., Telatar, O. M., İnşaat Sektörü ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye Ekonomisi Üzerine Ampirik Bir Analiz, Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi, 12(3), 1283-1297, 2021.
- [10] Gözüak, M. H., Ceylan, H., Türkiye'de İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının İş Sağlığı ve Güvenliği Bağlamında Analizi: Güncel Eğilimlere Genel Bir Bakış, Sağlık Akademisyenleri Dergisi, 8(2), 133-143, 2021.

- [11] Kaya, V., Yalçinkaya, Ö., Hüseyini, İ., Ekonomik Büyümede İnşaat Sektörünün Rolü: Türkiye Örneği (1987-2010), Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 27(4), 148-167, 2013.
- [12] 27320 Sayılı, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin Tehlike Sınıfları Tebliği, 2009.
- [13] Sousa, V., Almeida, N. M., Dias, L. A., Risk-Based Management of Occupational Safety and Health in the Construction Industry - Part 1: Background Knowledge, Safety Science, 66, 75-86, 2014.
- [14] Aslan, A., Bir İnşaat Şirketinde Meydana Gelen İş Kazalarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [15] Karadeniz, O., Dünya’da ve Türkiye’de İş Kazaları ve Meslek Hastalıkları ve Sosyal Koruma Yetersizliği, Çalışma ve Toplum, 34, 15-71, 2012.
- [16] Baradan, S., Akboğa, Ö., Çetinkaya, U., Usmen, M., Ege Bölgesindeki İnşaat İş Kazalarının Sıklık ve Çapraz Tablolama Analizleri, Teknik Dergi, 27(1), 7345-7370, 2016.
- [17] Polat, B., Polat, A., İnşaat Sektöründe Doğu Anadolu Bölgesi için İş Güvenliği Koşullarının İncelenmesi, International Journal of Pure and Applied Sciences, 3(1), 24-32, 2017.
- [18] Yamak, N., Koçak, S., Samut, S., Türkiye’de İnşaat Sektörünün Kısa ve Uzun Dönem Dinamikleri, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, 7(1), 96-113, 2018.
- [19] Uzdil, O., Güllüoğlu, A. N., Türkiye İnşaat Sektöründe 2016 ve 2017 Yıllarında Meydana Gelen İş Kazalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması, International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32(2), 137-144, 2020.
- [20] Tanyılmaz, K., Karahan, M., Kalkınma ve İnşaat Sektörü: Türkiye Örneği, Ardahan Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(1), 62-68, 2021.
- [21] Zengin, M. A., Türkiye İnşaat Sektörü İş Kazalarının İstatistiksel Analizi, 2011-2020, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 14(2), 492-501, 2022.
- [22] Baradan, S., Türkiye İnşaat Sektöründe İş Güvenliğinin Yeri ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8(1), 87-100, 2006.
- [23] Ercan, A., Türkiye’de Yapı Sektöründe İşçi Sağlığı ve Güvenliğinin Değerlendirilmesi, Politeknik Dergisi, 13(1), 49-53, 2010.
- [24] Pinto, A., Nunes, I. L., Ribeiro, R. A., Occupational Risk Assessment in Construction Industry-Overview and Reflection, Safety Science, 49(5), 616-624, 2011.
- [25] Güranlı, G. E., İnşaat Sektöründe Gerçekleşen Ölüm ve Yaralanmaların Analizi, Türk Tabipleri Birliği Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi, 13(48), 20-29, 2013.
- [26] Ceylan, H., Türkiye’de İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi, International Journal of Engineering Research and Development, 6(1), 1-6, 2014.

- [27] Yıldız, S., Yılmaz, M., Türk İnşaat Sektöründe Çalışanların Güvenlik Kültürü Düzeyinin ve Güvenlik Performansı ile İlişkisinin İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 20(1), 137-149, 2017.
- [28] Yağımlı, M., Hacıbektaşoğlu, S. E., Türkiye'de İnşaat Sektöründe Yaşanan İş Kazaları ve Ölümlü İş Kazası Sayılarının Tahmini, *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Elektronik Dergisi*, 9(22), 142-156, 2018.
- [29] Loosemore, M., Malouf, N., Safety Training and Positive Safety Attitude Formation in the Australian Construction Industry, *Safety Science*, 113, 233-243, 2019.
- [30] Karakaş, D. G., Yusufi, F., Hisarcıklılar, M., Türkiye İnşaat Sanayii Çalışma Standartlarının Sektörel Gelişim Üzerinden Değerlendirilmesi, *Mülkiye Dergisi*, 45(1), 191-230, 2021.
- [31] Yılmaz, F., Tan, O., Bir İnşaat Şantiyesinde İş Kazalarının Neden Olduğu İş Günü Kayıplarının İşverene Maliyetinin Belirlenmesi, *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 14, 143-156, 2015.
- [32] Cañamares, M. S., Escribano, B. M. V., García, M. N. G., Barriuso, A. R., Sáiz, A. R., Occupational Risk-Prevention Diagnosis: A Study of Construction SME's in Spain, *Safety Science*, 92, 104-115, 2017.
- [33] Wang, Q., Mei, Q., Liu, S., Zhou, Q., Zhang, J., Demographic Differences in Safety Proactivity Behaviors and Safety Management in Chinese Small-Scale Enterprises, *Safety Science*, 120, 179-184, 2019.
- [34] Durdu, H. İ., İş Kazalarının Ekonomik Analizi ve Bazı Sektörler Bazında Değerlendirilmesi, *Sosyal Güvence Dergisi*, 0(5), 67-91, 2014.
- [35] Samanta, S., Gochhayat, J., Critique on Occupational Safety and Health in Construction Sector: An Indian Perspective, *Materials Today: Proceedings*, 80, 3016-3021, 2023.
- [36] ILOSTAT, Occupational Safety And Health Statistics (OSH), Occupational Injures, <https://ilostat.ilo.org/>, Son Erişim Tarihi: 02.07.2022.
- [37] Eurostat, European Statistics on Accidents at Work (ESAW), Luxemburg, 2013.
- [38] ÇSGB, İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İnşaat Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği, <https://Guvenliinsaat.Csgb.Gov.Tr/>, Son Erişim Tarihi: 07.07.2022.
- [39] Akboğa, Ö., Baradan, S., İnşaat Sektöründeki Ölümlü İş Kazalarının Karakteristiklerinin İncelenmesi: İzmir Alan Çalışması, 5. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 2015.
- [40] Mahçiçek, S., B., İnşaat Projelerinde Süresel Planlama ile Bütünleşik Aktivite Tabanlı İş Güvenliği Risk Değerlendirme Yöntemi (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015
- [41] Erginel, N., Toptancı, Ş., İş Kazası Verilerinin Olasılık Dağılımları ile Modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 201-212, 2017.

- [42] Bilim, A., Çelik, O. N., Türkiye'deki İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Genel Değerlendirmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(2), 725-731, 2018.
- [43] Hacıbektaşoğlu, S. E., İnşaat Sektöründe Yaşanan İş Kazalarının Analizi ve Bu Kazalara Neden Olan Etkenlerin İncelenmesi, Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2(3), 159-177, 2018.
- [44] Kale, Ö. A., İnşaat Sektöründe İş Kazaları ve Alandaki İyileşmeleri Etkileyen Faktörlerin Analizi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 895-906, 2018.
- [45] Ateş, E., Aytaç, N., Adana'da Bir İnşaat Firmasında İş Kazalarının ve Çalışma Koşulları ile İlişkinin Değerlendirilmesi, Sakarya Tıp Dergisi, 9(4), 661-668, 2019.
- [46] Uzdil, O., Güllüoğlu, A. N., Türkiye İnşaat Sektöründe 2016 ve 2017 Yıllarında Meydana Gelen İş Kazalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması, International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32(2), 137-144, 2020.
- [47] Öztürk, T., Heperkan, H. A., İnşaat İş Kazalarının Şiddetini Etkileyen Faktörlerin Mevsimsel Farklılıklara Göre Değerlendirilmesi, Ergonomi, 4(2), 72-87, 2021.
- [48] Akçay, C., İnşaat Sektöründe İş Kazaları ve İş Güvenliği Maliyetlerinin İncelenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(3), 328-336, 2021.
- [49] Eurostat, Fatal and non-fatal accidents at work by NACE section, EU, 2021. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/>, Son Erişim Tarihi: 25.01.2024
- [50] Tözer, K. D., Çelik, T., Gürcanlı, G. E., KKTC'de İş Kazalarının Sektörel Dağılımı ve 1994-2014 Yılları Arasında İnşaatlarda Yaşanan Kazaların Genel Analizi, 5. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 2015.
- [51] Tözer, K. D., Çelik, T., Gürcanlı, G. E., Classification of Construction Accidents in Northern Part of Cyprus. Teknik Dergi, 29(2), 8295-8316, 2018.
- [52] Çelik, T., Tözer, K. D., KKTC'de İş Kazalarının Genel Analizi ve İnşaat Sektöründe Durum: Çalışanların Eğitim Ve Kültür Seviyelerinin İş Kazalarına Olan Etkileri, 3. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, Antalya, Türkiye, 2014.
- [53] Tözer, K. D., Çelik, T., Gürcanlı, G. E., Kuzey Kıbrıs İnşaat Sektöründe Vasıfsız İşçilerin Yaşadığı İş Kazalarının Sınıflandırılması, 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, Eskişehir, Türkiye, 2016.
- [54] KKTC Meclisi, Kıbrıs Türk Sosyal Sigortalar Yasası, İş Kazaları ile Meslek Hastalıkları Primi Tarifesi Yönetmeliği, Tehlike Dereceleri ve Prim Oranları Cetveli, 1976.
- [55] KKTC, İstatistik Kurumu, İş Kayıtları Sistemi Kapsamındaki Girişimlerin ve Çalışanların İlçelere Göre Dağılımı, <http://www.Stat.Gov.Ct.Tr/>, Son Erişim Tarihi: 02.07.2022.

- [56] Bilim, N., Dünder, S., Bilim, A., Ülkemizdeki Maden Sektöründe Meydana Gelen İş Kazası ve Meslek Hastalıklarının Analizi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 423-432, 2018.
- [57] Balcı, B., Taçkın, E., Balcı, E. Ö., Yerden, A., İş Kazalarında Mali Kayıplar, İstanbul Sosyal Bilimler Dergisi, 6, 66-83, 2013.

Yapı Üretim Süreçlerinde BIM ve VR Uygulamalarının Entegrasyonunun Değerlendirilmesi

Gülce BOZKURT^{1*}
Selahattin ERSOY²
Enes YAŞA³



ÖZ

İnşaat sektörü yeniliğe ve değişikliklere açık bir sektördür. Yapı üretim süreçlerine entegre olabilecek birçok enformasyon teknolojisi geliştirilmiş, yapı üretim süreçlerinin daha hızlı, sistematik ve kontrollü olarak yürütülmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda yapı üretim süreçlerinde kullanılan enformasyon teknolojilerinden Yapı Bilgi Modelleme (BIM) ve Sanal Gerçeklik (VR) teknolojileri yaygın olarak karşımıza çıkmaktadır. BIM süreçleriyle ve VR araçlarıyla yürütülen entegre projelerde yapı üretim süreçlerinde pek çok kolaylık sağlanmaktadır. Çalışmada yapı üretim süreçlerinde BIM ve VR entegrasyonunun kullanımının amaçlarını, güçlü ve zayıf yanlarını tespit etmek ve potansiyel tehdit ve fırsatlar bağlamında bir değerlendirme yapmak amaçlanmıştır. Bu bağlamda literatür taraması ve kullanıcı deneyimlerinin baz alındığı firma araştırması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Üretim Süreci, BIM (Yapı Bilgi Modelleme), VR (Sanal Gerçeklik), inşaat sektörü, BIM-VR Entegrasyonu, kullanıcı deneyimi, firma araştırması.

ABSTRACT

Evaluation of Integration of BIM and Virtual Reality Applications in Building Production Processes

The construction industry is a sector open to innovation and changes. Many information technologies that can be integrated into building production processes have been developed, and it is aimed to carry out building production processes faster, systematically and in a

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 14 Şubat 2023 günü ulaşmıştır. 11 Mart 2024 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2024 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1244122>

1 İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
gulcebozkurt59@hotmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-0758-4219>

2 İstanbul Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul
selahattin.ersoy@istanbul.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9426-9841>

3 İstanbul Üniversitesi, İç Mimarlık Bölümü, İstanbul
enesyasa@istanbul.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-5705-5932>

* Sorumlu yazar

controlled manner. In this context, Building Information Modeling (BIM) and Virtual Reality (VR) technologies, which are information technologies used in building production processes, are widely encountered. Many conveniences are provided in building production processes in integrated projects carried out with BIM processes and VR tools. In the study, it is aimed to determine the aims, strengths and weaknesses of the use of BIM and VR integration in building production processes and to make an evaluation in the context of potential threats and opportunities. In this context, a literature review and a company research based on user experiences were made.

Keywords: Building production process, BIM (Building Information Modeling), virtual reality, Construction Industry, BIM-VR Integration, user experience, company research.

1. GİRİŞ

Yapı üretim süreci, kullanıcının açığa çıkan bir ihtiyacından veya ihtiyacının bir talebe dönüşmesiyle başlar. Yapı üretim sürecinde amaç, fiziksel bir yapının oluşmasıdır. Bu amaçla önce planlama daha sonra tasarım ve uygulama, son olarak kullanım aşamalarından geçilerek hedeflenen yapının oluşturulması sağlanır (Kuzey, 2007).

Günümüzde yapı üretim sürecinde hala geleneksel yöntemler kullanılıyor olmasına karşın, teknolojinin sağladığı üstünlük ve kolaylıklar sebebiyle bilgi yönetimine dayalı enformasyon teknolojileri kullanımı artık bir ihtiyaç haline gelmektedir. BIM (Yapı Bilgi Modelleme)süreçleri ve VR (Sanal Gerçeklik) araçlarıyla entegre şekilde yürütülen yapı üretim süreçleri daha planlı, kontrollü, sistematik ve tasarruflu olacaktır (Eastman ve diğ., 2011 ve Yenigün ve diğ., 2020). Yapı üretim süreçlerinde BIM ve VR teknolojilerinin, mimarlar, mühendisler, müteahhitler ve BIM yöneticileri tarafından yaygın olarak kullanımı, inşaat sektöründe yeni bir dönemin açılmasına sebep olmuştur (Şen, 2021). ABD, Çin ve İngiltere başta olmak üzere dünyanın farklı bölgelerinde geleneksel yöntemler terk edilerek, birçok ülkede yapı üretim süreçlerine standartlar geliştirilmeye başlanmıştır (Genç, 2019).

Bu çalışmanın amacı, inşaat sektöründeki gelişen teknolojiyle birlikte enformasyon teknolojilerinden BIM (Yapı Bilgi Modelleme) ve VR (Sanal Gerçeklik) entegrasyonun yapı üretim süreçlerine etkilerini incelemektir.

Çalışma kapsamında yöntem olarak ilk bölümde sistematik bir literatür taraması yaparak BIM (Yapı Bilgi Modelleme) ve VR (Sanal Gerçeklik) teknolojileri incelenmiş ve BIM-VR teknolojilerinin entegrasyonunun yapı üretim süreçlerinin; tasarım, yapım ve yapımın sonraki aşamalarda kullanım amaçlarına, bu aşamalara sağladığı katkılara erişilmiştir. İkinci bölümde literatürdeki örnek vaka çalışmaları derinlemesine incelenmiş, BIM-VR teknolojilerinin kullanılma amaçlarına ve bu entegrasyonun sağladığı faydalara erişilmiştir. İkinci bölüm literatüre destek olarak seçilen firmalarla yapılan çalışmayla desteklenmiştir. Üçüncü bölümde elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve sonuç bölümünde araştırmacılara ve sektöre yönelik önerilerde bulunulmuştur. Literatüre ve sektöre katkıda bulunmak istenen bu çalışmada, sektörün önde gelen şirketlerinin kullanıcı deneyimlerinin aktarılması bağlamında yapılan firma çalışmasının önemi büyüktür.

2. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, BIM (Yapı Bilgi Modelleme) ve VR (Sanal Gerçeklik) teknolojileri hakkında sistematik bir literatür taraması yapılmış, bu teknolojilerin ne olduğu ne amaçla ve nasıl kullanıldığı yanında kullanım alanları incelenmiştir. Yapılan literatür analizlerinin ardından BIM ve VR entegrasyonunun yapı üretim süreçlerinde; tasarım, kültürel miras, yapım ve yapımdan sonraki aşamalarda kullanımları araştırılmıştır.

Yapılan literatür çalışmasında, konuyla ilgili var olan çalışmalar incelenmiş, erişilen çalışmalardan içerisinde BIM-VR entegrasyonunun örnek bir vaka çalışması üzerinde çalışılan 5 yayın detaylıca incelenmiştir. İncelemeler sonucunda BIM-VR entegrasyonunun kullanım amaçları, güçlü ve zayıf yanları tespit edilmiştir.

Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıracak bir yöntem olarak, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik teknolojilerinin inşaat sektörüne entegrasyonu ile ilgili yazılımları sunan firmaların kullanıcı yorumları ve blogları taranmış. Kullanıcı yorumları ve bloglarında inşaat firmalarıyla yaptıkları röportaj ve söyleşiler incelenmiş, belirtilen yorumlar üzerinden bir inceleme yapılarak BIM-VR entegrasyonu hakkındaki yorumlarına erişilmiştir. Taranan yazılım firmalarının kullanıcı yorumları bölümünden bu entegrasyonu kullanan inşaat firmalarına erişilmiştir. Erişilen inşaat firmalarının web sitelerindeki BIM ve VR ile ilgili örnek vaka çalışmaları, blogları ve yazıları taranmıştır. Erişilen bulgular ışığında, inşaat firmalarının BIM-VR entegrasyonunu hangi amaçla kullandıkları, güçlü ve zayıf bulunduğu yanlar tespit edilmiştir.

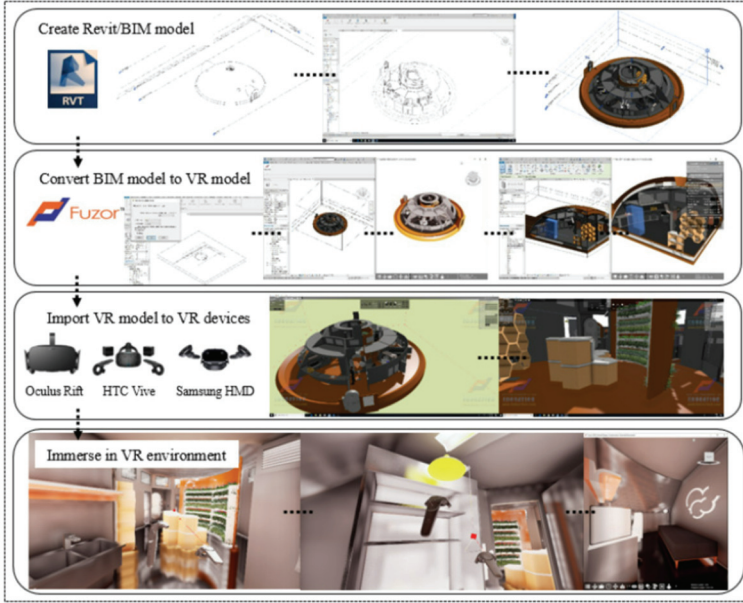
3. BIM VE SANAL GERÇEKLIK TEKNOLOJİLERİNİN YAPI ÜRETİM SÜREÇLERİNDE KULLANIMI

BIM (Yapı Bilgi Modellemesi), çeşitli donanım ve yazılımlarla birlikte oluşturulması hedeflenen projenin tasarım aşamasından yıkım aşamasına kadar, proje katılımcılarıyla iş birliği ve bilgi paylaşımını hedefleyen bir süreç olarak özetle tanımlayabiliriz. BIM'in kullanım alanlarını tasarım süreçlerinde, çevresel analizlerde, bina yapım süreçlerinde ve bina işletim süreçlerinde kullanım şeklinde 4 ana başlıkta toplamak mümkündür (Ofloğlu, 2012).

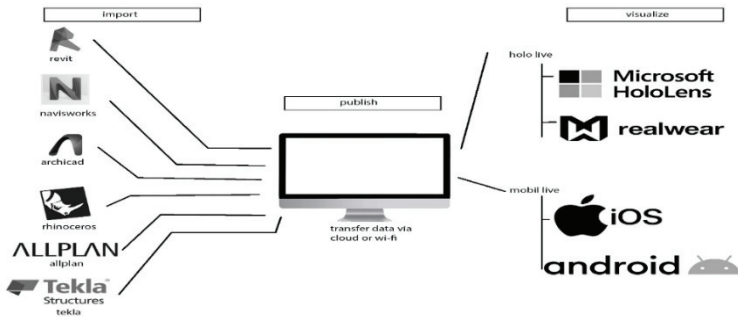
VR (sanal gerçeklik) teknolojisi kullanıcıların hareketlerini algılayarak, onların bu hareketlerine karşılık kullanıcıların hem fiziksel hem de psikolojik olarak geri bildirim alacağı bilgisayar simülasyonlarından oluşan ortamdır.

Günümüzde yaygın olarak masaüstü uygulamalardan gelişmiş sürükleyici deneyimlere kadar pek çok ticari alanda kullanılan VR teknolojisi, simülasyon ve görselleştirme yetenekleri sayesinde farklı disiplinler ve hedefler için inşaat sektöründe yapı üretim süreçlerinin kullanımına sunulmaktadır (Getuli ve ark., 2020). BIM ve VR'ın birlikte çalışabilirliği, BIM verilerinin zenginleştirilmesine ve proje yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarında projenin üretimini, planlanmasını ve BIM modelinin doğruluğunu güçlendirebilmektedir (Halili, 2021). BIM ve VR teknolojilerinin entegrasyonu, yapı üretim süreçlerinde örneğin sorunların önceden tespiti, tasarım kalitesinin iyileştirilmesi, tasarım bileşenlerinin sürükleyici sanal ortamda incelenmesi gibi birçok hususa katkıda bulunmak konusunda büyük bir potansiyele sahiptir (Kim ve ark., 2021).

Alizadehsalehi ve arkadaşları yayınlarında BIM modelini, görüntülenebilir VR modele dönüştürme iş akışını Şekil 1’ deki gibi özetlemişlerdir. Bu iş akışı, bir Revit 2019 yazılımı ile mimar ve mühendislerin bulunduğu proje ekibinin bilgi açısından zengin bir 2D/3D-BIM parametrik modeli oluşturulmasıyla başlar. BIM 360 bulut sunucusu (veritabanı) ile tüm ekip üyelerinin gerçek zamanlı erişim sağlayabildiği bir çevrimiçi depolama alanı sağlamak için kullanılmıştır. Oluşturulan Revit modelini VR modeline dönüştürmek için Revit 2019’daki Fuzor eklentisi kullanılarak, model VR araçları olan Oculus Rift, HTC Vive ve Samsung HMD’ye aktarılmıştır. Böylece sürükleyici bir BIM/VR macerası deneyimlenmiştir (Alizadehsalehi ve ark., 2020).



Şekil 1 - BIM modelinin ve VR araçlarına transferi (Alizadehsalehi ve ark., 2020.)



Şekil 2 - BIM ve VR araçlarının transferi (HoloLens, Realwear ve Unity Web siteleri incelenerek kurgulanmıştır.)

Özetle Şekil 2'deki gibi BIM ile proje ekiplerince oluşturulan model, bir ara yazılım programıyla veya teknoloji şirketlerinin sunmuş olduğu eklentiler sayesinde dışa aktararak VR araçlarına yönlendirilmekte ve yapı üretim süreçlerinde kullanılmaktadır (Halili, 2021).

İnşaat endüstrisinde yapı üretim süreçlerinde kullanılan BIM-VR entegrasyonunu; tasarım, yapım ve yapım sonrasındaki aşamalarda ve kültürel miras yapılarında incelemek mümkündür.

3.1. Tasarım Aşamasında BIM-VR Kullanımı

BIM-VR teknolojileri mimari tasarım aşamalarında; tek bir model üzerinde çalışmak, görselleştirme, tasarım kusurlarının ve çakışmaların önceden tespiti, mekânı deneyimlemek, acil durum planlarına göre uygun tasarımlar yapmak ve daha çok fazla amaçla kullanılabilir.

Tasarım süreçlerinde BIM-VR entegrasyonunun en avantajlı kısmı, aynı model üzerinde tüm proje paydaşlarının birlikte çalışabilmesidir. Bu sayede farklı lokasyonlarda da olsa, proje paydaşları tek model üzerinde tasarım ve projelerin çizimini birlikte yürütebilmekte, projede iş birliği ve iletişim oldukça yüksek seviyede olmaktadır. Şekil 3'teki gibi bir BIM programında çizim yaparken arka planda bir VR gözlüğü ile çizilen projeyi deneyimlemek, proje üzerinde detayları görebilmeyi ve tasarım kusurlarının önceden tespitini yapabilmeyi ve çift taraflı kontrolü sağlamaktadır (Kieferle ve Woessner, 2015).



Şekil 3 - Tasarım aşamasında BIM-VR entegrasyonu ile tasarım denetimi (VECTION Technologies, 2022)

Proje paydaşlarıyla yapılan toplantılarda, yenilenen kısımların anında kaydedilebilmesi ve birden çok tasarımın anında görselleştirilebilmesi, tasarım toplantılarında zamandan tasarrufa ve memnuniyet artışına yardımcı olmaktadır (Woessner, 2015).

Mimari tasarım aşamalarında, tüm proje paydaşlarının tek bir model üzerinde çalışmasıyla statik, elektrik, tesisat, havalandırma gibi MEP projelerinin tek bir proje üzerinde

görülebilmesine yardımcı olmaktadır. Bu sayede, geleneksel sistemlerdeki gibi proje kayması, çakışmaların tespiti, tasarım kusurları gibi pek çok hatanın daha proje aşamasında sistem uyarıları ile fark edilmesine ve VR araçlarıyla bu detayların veya problemlerin 3 boyutlu şekilde görülmesine olanak sağlanır. Böylece, yapı üretim süreçlerinde geri dönüşler, tekrar yapım gibi maliyet ve zaman gerektiren uygulamalar minimuma inmiş olur.

BIM-VR teknolojilerinin tasarım aşamasında farklı bir alanda kullanımı, BIM ortamında oluşturulan bir model içerisinde VR donanımlarıyla örneğin yangın gibi acil bir durum yaratılabilmektedir. Yangın sırasında projelendirilen duman dedektörleri, yangın yağmurlama sistemleri gibi araçların sanal ortamda denenmesiyle eksiklerin belirlenmesi, model üzerinde acil durumlarda en çok hangi alanlara dikkat edilmesi gerektiğinin anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Böylece daha tasarım aşamasındayken, yapının acil durum planlamaları yapılabilmektedir (Park ve diğ., 2018).

Tasarım ekibi ve son kullanıcılar/müşteriler arasındaki ilişkide, müşterileri tasarım süreçlerine dahil ederek yapının iç ve dış mekanlarındaki erişilebilirlik, mekanın işlevselliği konularında müşterinin beklentilerine yönelik tasarım yapılması kolaylaşır. Müşterilerin VR araçlarıyla tasarlananları önceden görebilmesi, geri dönüşleri azaltmakta, zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak ve ilk tasarım aşamalarını kısaltabilmektedir. Ayrıca tasarım ekibi ve müşterilerle olan iş birliği ve iletişim gelişmektedir (Moraru ve Pozanski, 2020). Tüm bunların yanında, proje aşaması bittiğinde anında erişilebilen görseller, derinlik hissinin verilebilmesi ve VR teknolojisiyle çeşitli sunum yöntemleri kullanılarak müşteriler mekanı 3 boyutlu ve etkileşimli şekilde deneyimleyebilmektedir. Bu sayede şantiye sürecine geçmeden satışların yapılabilmesine olanak sağlayacak, hatta satışlarda gözle görülür artış meydana getirecektir.

3.2. Yapı Üretimi Aşamasında BIM-VR Kullanımı

BIM ve VR teknolojilerinin şantiyede kullanımını; yapı üretim sürecinde görselleştirme ve kontrol aşamalarında, saha organizasyonu aşamasında ve iş güvenliği süreçlerinde olacak şekilde 3 aşamada incelemek mümkündür.

BIM ve VR teknolojilerinin şantiyede kullanımında 3 boyutlu görsellere erişebilmenin en büyük avantajı projenin gerçek anlamda anlaşılmasının kolaylığıdır. Bu sayede yapılması hedeflenen yapının farklı bakış açılarından görünümüyle, yapı şantiye ekibi tarafından kolayca algılanabilecektir. Yapım sürecinde 2 boyutlu çizimleri yorumlamak yerine, VR araçlarıyla hedeflenen üretimi 3 boyutlu şekilde görebilmek yanlış anlamaları azaltmakta ve iletişimin güçlenmesine yardımcı olmaktadır. Yapılacak olan imalatı 1/1 ölçeğinde görebilme kolaylığı, geri dönüşleri azaltacaktır. Ayrıca 1/1 ölçekte görüntülenebilen proje, tasarım kusurlarının önceden tespitini kolaylaştıracak, Şekil 4'teki gibi MEP ve çakışma kontrollerinin yapılmasına olanak sağlayacaktır (Johansson ve Roupe, 2019).

BIM-VR teknolojilerinin saha organizasyonunda, şantiyenin yerleşim planının yapılması ve görselleştirilmesi sağlanarak, saha lojistiği planlarının oluşumunda kullanılabilir. Vinç kurulum planları, malzemelerin depo alanı ve saha içerisinde malzemelerin ulaşım planları gibi tüm planlamaların yapılmasına ve 3 boyutlu şekilde simüle edilmesine yardımcı olur. Saha içerisinde gerçekleştirilecek farklı senaryoların ve çakışma testlerinin yapılmasıyla risk planlarının yapılabilmesine olanak verir. Bu şekilde saha organizasyonu,

mevcut durum ve gerçekleşebilecek senaryolara karşı 3 boyutlu şekilde kurgulanmış ve planlanmış olacaktır (Muhammad ve diğerleri, 2020). BIM-VR teknolojisinin proje paydaşları arasında karşılıklı bilgi paylaşımını destekleyici çözümler sunması, bu tür proje paydaşları arasındaki işçiler, planlamacılar ve yöneticiler gibi ekiplerin karşılıklı paylaşımlarıyla bilgilerin ortaya çıkarılmasını, resmileşmesini ve entegrasyonunu sağlar (Getuli ve ark., 2020).



Şekil 4 - Yapı üretimi aşamasında BIM-VR entegrasyonu ile MEP kontrolleri (VisualLive, 2023)



Şekil 5 - Yapı üretimi aşamasında BIM-VR entegrasyonu ile saha eğitimleri (ForgetFx, 2022)

BIM ve VR teknolojilerinin iş güvenliği planlamalarında kullanımı; BIM ile oluşturulan modellerde iş güvenliği planlamalarını yapmak, gerekli iş güvenliği ekipmanlarını hem saha personeli için hem de şantiye için doğru şekilde lojistiğini sağlamada yardımcı olmaktadır. BIM sistemine VR teknolojilerinin eklenmesiyle ise; Şekil 5'deki gibi işçilerin ve saha personelinin eğitiminde ve stajyer öğrencilerin saha eğitiminde görselleştirme araçları kullanılarak güvenli eğitimler verilebilmektedir (Park, Panya ve diğerleri, 2018). Bu durum

da BIM ve VR teknolojilerinin kombinasyonunun, iş sahası güvenlik tehditlerini azaltmaya, güvenlik tehlikelerini önceden belirleyerek saha çalışanlarını eğiterek bilgi paylaşımını artırmaya yardımcı olacağını göstermektedir. Sonuç olarak çok dilli bir ortamda dil engellerinin de kaldırılarak, sahadaki sağlık ve güvenlik ortamının genel olarak iyileşmesine yardımcı olacaktır (Afsal ve Shafiq, 2021).

3.3. Yapı Üretimi Sonrası Aşamada BIM-VR Kullanımı

BIM 'in parametrelerinden 7. Boyut olan tesis yönetimi ve işlemleri, yapının yaşam süreci boyunca işletilmesi ve bakımı konularını ele alır. Ayrıca BIM 'in simülasyon modelleriyle birlikte VR donanımlarıyla entegrasyonu sayesinde anında verilere ulaşım sağlanabilmekte ve tesis ile ilgili alınacak kararlara yardımcı olunabilmektedir. Bir VR aracı yardımıyla tesis içerisindeyken, modele daha önce erişim sağlayan ekibin uyarılarını görebilmekte veya ekibe o alan üzerinde uyarı mesajı gönderilebilmektedir (Şen, 2021). Tadilat gerektiren noktaların tespiti, MEP kontrolleriyle ana hatlara ulaşımında sıkıntı yaşanmadan ve malzeme kayıpları olmaksızın tadilatlar gerçekleştirilebilmekte ve yıkım projeleri planlanıp simülasyonlarla desteklenebilmektedir.

3.4. Kültürel Miras Yapılarında BIM-VR Kullanımı

Bilgisayar teknolojilerindeki gelişim, yapı bilgi modellemesinde HBIM (Heritage BIM) olarak karşımıza çıkan ve özellikle kaybedilmiş kültürel miras yapılarının yeniden canlandırılabilmesini sağlayan bir kavramdır. HBIM gerçeğe dayalı olan, lazer tarama ve fotogrametriden elde edilen 3B bulutu sayesinde kültürel miras yapılarını modellemek, restorasyonunu yapmak ve yapım süreci yöntemi için kullanılmaktadır (Yang ve diğ., 2020).

Sanal gerçeklik teknolojilerinde sanal ortamda kültürel mirasın tespiti ve belgelenmesinin yanında sanal koruma, sanal restitüsyon, sanal rekonstrüksiyon gibi imkanlar da sağlamaktadır. Bu sayede kültürel miras yapıları, özgün kullanım dönemlerine ait çevreleriyle birlikte sanal ortamda canlandırılabilir (Aş, 2019).

Bu iki teknolojiyi birleşimi; fotogrametri veya lazer tarama yöntemleriyle elde edilen bulut verinin BIM programlarına kolayca aktarımı sonrasında, bulut veriyle birlikte BIM içinde kültürel miras yapısının modeli oluşturulmasıyla başlar. Model üzerinde, bilimsel analiz uygulamaları yapılabilir, sanal rekonstrüksiyon veya sanal restorasyon projeleri detaylandırılabilir. Ayrıca yine BIM programlarıyla kültürel mirasın çevresindeki yapıları da oluşturularak VR araçlarıyla birlikte, sanal ortam müzeleri, eğitim ve oyun uygulamaları gibi uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir (Sürücü, 2017).

4. YAPI ÜRETİM SÜRECİNDE BIM VE SANAL GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİNİN İNCELENDİĞİ VAKA VE FİRMA ÇALIŞMALARI

Yapı üretim süreçlerinde BIM ve VR teknolojilerinin kullanımıyla ilgili, varolan akademik çalışmaların vaka çalışmalarına ve yazılım – inşaat firmalarının araştırmasına yönelik iki analiz yöntemi izlenmiştir.

4.1. İncelenen Örnek Vaka Çalışmaları

BIM ve VR Teknolojisinin kullanıldığı 5 adet örnek vaka çalışması incelenmiştir. (Tablo 1)

Tablo 1 - Örnek vaka çalışmaları sınıflandırması

YAYIN	AMAÇ	BIM-VR KULLANMANIN GÜÇLÜ YÖNLERİ	BIM-VR KULLANMANIN ZAYIF YÖNLERİ
Azhar, S. 2017	1- Risk Planlaması 2- Saha Planlaması 3- İş Güvenliği Planlaması 4- Acil Durum Planlaması 5- İş Kazalarının Önlenmesi 6- Potansiyel Tehlikelerin Tespiti	1- Çalışanlarla İletişimin Güçlendirilmesi 2- İş Güvenliği Ekipmanlarını 3 Boyutlu Görebilme 3- Simülasyonların Kurulumu Kolaylaştırması 4- İş Kazalarının Önlenmesi 5- İş Güvenliği Planlaması ve Eğitimi 6- Saha Planlamasının Yapılması 7- Etkili ve Etkileşimli Saha Yönetimi 8- Potansiyel Tehditleri Önceden Görebilmek	1- Kalibrasyon Sıkıntıları 2- Başlangıç Maliyetleri 3- Detaylı Ön Çalışma 4- Motivasyon Eksikliği
Baik, A. 2021	1- Restorasyon Projesi İçin Proje ve Model Oluşturmak 2- Proje Paydaşlarını Tek Bir Modelde Birleştirmek	1- Kültür Turizmin Devamlılığını Sağlamak 2- Tarihi Çalışmaları Belgelemek 3- Çevrimiçi Kültürel Miras Ziyaretleri	1-Detaylı Ön Çalışma
Zaker, R. ve Coloma, E. 2018	1- MEP Kontrollerinin Sağlanması 2- Mimari Tasarımın Gözden Geçirilmesi	1- 360 Derecelik Açılar Sahada Görünmeyen MEP Bağlantılarını Kolayca Görmeyi Sağlaması 2- VR Kullanımının Pratikliği ve Hızlılığı 3- Yapının Gerçekten İçinde Olma Hissini Vermesi 4- Ekipler Arası İletişimin Güçlenmesi 5- Müşteriye Sunumunun Güçlenmesi	1- Alışma Sürecinin Uzunluğu 2- Fizyolojik Zorluklar 3- Yazılım ve Donanım Maliyetleri 4- Teknolojiyle Adaptasyon Süreci 5- Firmaların Değişime Karşı Direnci
Haggard, K.E. 2017	1-İletişimi Güçlendirmek 2-Maliyetleri Azaltmak 3-Projede Yeniden Yapmayı ve Geri Dönüşleri Azaltmak 4- Detayları Yakalamak	1-Ekip Yönetimi. 2-Maliyet Tasarrufu. 3- Tasarım Kusurlarını Önceden Fark Etmek 4- Tesis Yönetiminde Yapılabilecek Tadilatlardaki Kolaylık	1- Uzman İnsan Kaynağının Az Olması 2- Çok Katılımcılı Sistemin Tasarım Sürecini Uzatması 3- Başlangıç Maliyeti
Deniz, G. 2019	1- Proje Paydaşlarını Tek Bir Modelde Birleştirmek 2- Kullanıcılardan Geri Bildirim Almak 3- Yapım Sürecini Önceden İzlemek 4- Proje Koordinasyonu 5- Değişiklikleri Azaltmak 6- Saha Yönetimini ve İş Güvenliği Planlamaları	1- Maliyet ve Zaman Tasarrufu 2- İş Akışını Oluşturmak 3- Kalite Kontrolünün Kolaylıkla Yapılması 4- Proje Paydaşları İçin Tek Projeye Kolay Erişim 5- Tasarım Sürecinin Kısalması 6- Paydaşlar Arası Koordinasyon ve İşbirliğinin Artışı 7- Katılımcı Tasarım Yöntemiyle Müşteri Memnuniyeti	1- Detaylı Ön Çalışma 2- Paydaşlar Arası Kalibrasyon Eksiklikleri 3- İlk Maliyetler 4- Render Alma Problemleri 5- Tüm Detaylarıyla Bitmiş Bir Proje Oluşturma Zorunluluğu

Tablo 2 - Örnek vaka çalışmalarından çıkarılan sonuçlar

BIM – VR TEKNOLOJİSİ KULLANIMININ GÜÇLÜ YÖNLERİ	BIM – VR TEKNOLOJİSİ KULLANIMININ ZAYIF YÖNLERİ
1- İletişiminin Güçlenmesi	1- Başlangıç Maliyetleri
2- Zaman ve Maliyet Tasarrufu	2- Teknolojiye Adaptasyon
3- Maliyetlerin Net Olarak Önceden Bilinmesi	3- Detaylı Ön Çalışma
4- Proje Paydaşlarını Tek Modelde Birleştirebilmek	4- Alışma Sürecinin Uzunluğu
5- Potansiyel Tehlikelerin Önceden Tespiti ve Risk Planlaması	5- Kalibrasyon Sıkıntısı
6- İş Güvenliği, Acil durum Planlaması ve Simülasyonlarla Çalışanların Eğitim Kolaylığı	6- Fizyolojik Zorluklar
7- Saha Planlaması ve Koordinasyonunda Kolaylık	7- Uzman İnsan Kaynağının Az Olması
8-Yeniden Yapımı ve Geri Dönüşleri Azaltması	8- Çok Katılımcı Sistemin Tasarım Sürecini Bir Miktar Uzatması
9- Detayları Önceden Görebilmek	9- Tüm Detaylarıyla Tam Olarak Bitmiş Bir Proje Oluşturma Zorunluluğu
10- Tesis Yönetiminin Kolaylığı	10- Firmaların Değişime Direnci
11- Yapım Sürecinin Önceden Simülasyonlarla İzlenmesi	
12- MEP Kontrolleri ve Çakışma Kontrollerinin Önceden Yapılabilmesi	
13- Restorasyon İçin Rölöve Alımı ve Model Oluşturmada Kolaylık ve Kesinlik	
14- Satışlarda Artış ve Müşteri Memnuniyeti	

4.2. İnşaat Firmaları Üzerinden BIM-VR İncelemesi

Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayırabilecek olan analiz yöntemi, BIM-VR entegrasyonu yapı üretim süreçlerinde yer alan örnek yazılım şirketlerinin ve inşaat firmalarının araştırıldığı çalışmadır.

Çalışmada sektörde öncü 2 adet yazılım firması taranmıştır, bunların ilki oyun sektöründe tekelleşmiş olan Unity firmasıdır. Unity firması oyun, film sektörlerinin yanı sıra otomotiv, enerji, havacılık, mimarlık ve mühendislik sektörlerinde de yer almakta ve dijital ikizler, eğitim ve rehberlik, tasarım, satış ve pazarlama, simülasyon ve insan- makine arayüzü gibi kullanım alanlarıyla küresel olarak tanınmış bir firma olarak çalışmaya katkı vereceği düşünüldüğünden tercih edilmiştir. İncelenen ikinci yazılım firması, inşaat sektörünün bir numaralı VR platformu olarak marka yapmış İrisVr/ Prospect firmasıdır. İrisVr yazılım

firması, 60.000’den fazla inşaat firmasının kullanıcısı olduğu, tasarım ve model incelemesini hızlı, doğru ve iş birliğine dayalı hale getirdiği ve ödüllü bir VR firması olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Belirlenen 2 yazılım firmasının Web sitesinin müşteriler, kullanıcı yorumları ve blogları taranmış, kullanıcısı oldukları VR teknolojisi hakkındaki değerlendirmeleri sistemli şekilde gruplandırılmış, BIM- VR entegrasyonu ile ilgili yorumları, röportajları derlenmiş ve BIM-VR entegrasyonunu hangi amaçla kullandıkları, kullanım deneyimlerine erişilmiştir. Tablo 3’te inşaat şirketlerinin BIM-VR entegrasyonunu kullanma amaçlarına ilişkin görüşleri verilmiştir.

Tablo 3 - İnşaat Şirketlerinin BIM-VR Entegrasyonunu Kullanma Amaçları

Ürün Yorumu, Blog Yazısı, Röportajlar ve Vaka Çalışmalarındaki İfadeler	Karşılığı
1-“Süreçleri kolaylaştırmak ve genel iş birliğini geliştirmek için” <i>YVR Airport-İnovasyon ve Bilişim Direktörü</i> 2-“İş birliğini artırmak amaçlı” <i>Sitowise-Uzman</i> 3-“Alt yüklenicileri ve tasarım ekiplerini sürece dahil edebilmek amacıyla” <i>SPACE-Peyzaj Tasarımcısı</i> 4-“Koordinasyon toplantılarında daha iyi iletişim ve anlayışı güçlendirmek” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i> 5-“İletişim ve iş birliği optimizasyonunu sağlamak amacıyla” <i>Barton Malow-Ekip Üyeleri</i>	İletişim, İş Birliği ve Koordinasyonun Artışı
1-“Geleneksel mekânsal analiz modelini atlamak” <i>Losci-Ceo/Kurucu</i> 2-“Tasarım düzeyinde öngörüler geliştirebilmek” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i> 3-Tasarım kusurlarını erken yakalamak hedefiyle” <i>SHOP-AR/VR Arge Lideri</i> 4-“Her yapı arasındaki ölçek ilişkilerini daha iyi anlamak amacımızdı” <i>StudioMB-Baş Ürün Tasarımcısı</i> 5-“Çizimler ve 3D modellerle geleneksel tasarımı desteklemek, tasarımcıları yaratıcı sürece dahil edebilmek için” <i>SHOP Architects-Ekip Üyeleri</i>	Tasarımı Geliştirebilmek, Detaylara Hakim Olmak
1-“Maliyetleri azaltmak” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i> 2-“Verimli ve uygun maliyetli iş akışlarını sağlayabilmek için” <i>One Alliance-Ekip Üyesi</i>	Maliyeti Düşürmek veya Tasarruf Etmek
1-“Süreyi azaltmak” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i> 2-“Sorunları hızlı çözebilmek ve yapım süresini kısaltmak için” <i>SHOP-AR/VR Arge Lideri</i> 3-“Tasarım değişiklikleri için daha hızlı bir yola ihtiyacımız vardı” <i>BRC-Kreatif Direktör</i>	Zamandan Tasarruf Etmek
1-“Bakım, sürdürülebilirlik ve güvenlik gibi tesis zorluklarını ele almak için” <i>YVR Airport-İnovasyon ve Bilişim Direktörü</i>	Bakım ve Tesis Yönetimlerini Sistematik Yapmak
1-“Konutları bireysel ihtiyaçlara göre özelleştirmek için” <i>House by Urban</i> 2-“Müşteri deneyimini artırmak için” <i>Schnabel Engineering-Şirket Ortağı</i> 3-“Müşteriler ile malzeme ve tasarım seçeneklerini incelemek amaçlı kullanıyoruz” <i>StudioMB-Ekip Üyesi</i> 4-“Görselleştirmenin erken aşamalarını iyileştirmek” <i>Anglian Water-Ekip Üyeleri</i>	Müşteri Memnuniyeti ve Müşteriye Etkili Sunum, Görselleştirme
1-“Sahada değişiklikleri azaltmak hedefi” <i>Anglian Water-Ekip Üyeleri</i> 2-“Saha değişikliklerini azaltmak için” <i>One Alliance-Ekip Üyesi</i> 3-“İş akışlarını geliştirmek” <i>Friis & Moltke-Ekip Üyeleri</i>	Saha Planlaması ve Yönetiminde Kolaylık

1-“Kazaları azaltmak” “İşçilerin şantiyedeki güvenlik faktörleri konusunda farkındalığını artırmak” <i>Skanska-Proje Lideri/Üretim Müdürü/Teknoloji Direktörü</i> 2-“Güvenliği artırmak hedefiyle” <i>Sitowise-Uzman</i> 3-“Riskleri azaltmak hedeflerimizle” <i>Schnabel Engineering-Şirket Ortağı</i> 4-“Kontrollü ortamda güvenlik tehditlerinin belirlenmesi” <i>Barton Malow-Proje/VDC Mühendisi</i> 5-“İş yeri güvenliğini artırmak öncelikli hedefimiz” <i>Balfour Construction-Teknoloji Mükemmelliyet Merkezi Lideri</i>	İş Güvenliği ve Risk Planlamaları
---	-----------------------------------

Yazılım firma araştırmasında, Unity firmasından 16 adet blog yazısı, röportaj ve vaka çalışması incelenmiştir. İncelemeler sonucunda erişilen inşaat firmalarından, küresel anlamda en büyük ve BIM-VR entegrasyonu ile ilgili bloglarının olduğu 3 adet inşaat firması seçilmiştir. Yazılım firma araştırmasında, IrsVR firmasından 7 adedi yorum ve 32 adedi blog yazısı, röportaj ve vaka çalışması olmak üzere toplam 39 adet çalışma incelenmiştir. İncelemeler sonucunda erişilen inşaat firmalarından, küresel anlamda en büyük ve BIM-VR entegrasyonu ile ilgili bloglarının olduğu 7 adet inşaat firması seçilmiştir.

Toplamda incelenen 55 adet kullanıcı deneyimi çıktısı olarak;

BIM-VR entegrasyonunun inşaat firmalarınca güçlü yanları olarak değerlendirilen görüşlerin ifadesi ve karşılıkları Tablo 4’te verilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4 - İnşaat Şirketlerinin BIM-VR Entegrasyonunun Güçlü Yanları Olarak Değerlendirdiği İfadeler ve Karşılığı

Ürün yorumu, blog yazısı, röportajlar ve vaka çalışmalarındaki ifadeler	Karşılığı
1-“Ekibin gerçek zamanlı iş birliği yaptıklarını görmek harika” <i>Mortenson-Gelişen Teknoloji Geliştiricisi ve Proje Çözümleri Teknik Uzmanı</i> 2-“Paydaşlarla etkileşim için zengin bir materyal” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i> 3-“Müşteri ve geliştirici ekibin gerçek zamanlı 3D tasarım incelemelerinde iş birliği yapılmasına olanak tanı” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i> 4-“Kilit paydaşlarla iyi iletişim kurmayı sağlar” <i>SHOP-AR/VR Arge Lideri</i> 5-“Tasarımcıların koordinasyon sorununu çözer” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i> 6-“Karar verme süresinin kısalması, 15 günden 15 dakikaya” <i>Gilbane-VDC Direktör</i> 7-“İyi iş birliği, daha hızlı kararlar, daha az hatayla çalışma” <i>Gilbane-VDC Direktör</i>	İletişim, İş Birliği ve Koordinasyonun Artışı
1-“Zaman ve para tasarrufu yanında tasarım işlevselliği ve paydaşların yapım aşaması öncesinde güvenini sağlamıştır” <i>Losci-Ceo/Kurucu</i> 2-“VR’da koridordaki kolon sorununu yakalamak 500.000 dolardan fazla tasarruf sağladı” “Fiziksel modelde tahmini 45.000\$ tasarruf etmeyi başardık” <i>Mortenson-Gelişen Teknoloji Geliştiricisi ve Proje Çözümleri Teknik Uzmanı</i> 3-“İyi tahminler sayesinde kaynak planlamasına olan güven arttı” <i>YVR Airport-İnovasyon ve Bilişim Direktörü</i> 4-“Fiziksel modellerle ilgili masraf ve teslim süresi olmadan bütçe ve program dahilinde kalabildik” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i> 5-“Daha doğru dokümantasyon ve inşaat yönetimi sayesinde saha az hata ve büyük tasarruf” <i>SHOP-AR/VR Arge Lideri</i> 6-“%15-20 ye varan verimlilik artışı, bazı durumlarda daha yüksek olabilir” <i>Sitowise-Uzman</i> 7-“Tüm katların inşa edilmesi 18 ayı buldu, geleneksel yöntemle bu 2-3 yılı bulurdu” <i>Kane-Dijital İnşaat Başkanı</i>	Maliyet ve Proje Süresinde Kesinlik, Tasarruf ve Verimlilik

<p>8-“Maddi olarak tasarruf sağladık” <i>Barton Malow-Proje/VDC Mühendisi</i> 9-“23.000€’luk yeniden yapım maliyet tasarrufu sağlandı” <i>Anglian Water-Ekip Üyeleri</i> 10-“Maket oluşturmaya gerek olmadığı için zaman ve maliyet tasarrufu sağlıyor” <i>Friis & Moltke-Ekip Üyeleri</i></p>	
<p>1-“Tasarım değişiklikleri üzerinde yineleme yapmamıza, tasarımdaki boşlukları ortaya çıkarıp gidermemizi sağlıyor” <i>Mortenson-Gelişen Teknoloji Geliştiricisi ve Proje Çözümleri Teknik Uzmanı</i> 2-“Tıbbi paydaşların yeni çalışma ortamlarını geniş ölçekte önceden deneyimlemelerine ve ayarlamalarına olanak tanıdı” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i> 3-“Alternatif tasarımları keşfedebilmek” <i>Mortenson-Proje Çözümleri Teknoloji Uzmanı</i> 4-“Mekansal ilişkiler, mekan hacmi ve temel tasarım özellikleri, ölçek tartışılabilir” <i>Mortenson-Proje Çözümleri Teknolojisti</i> 5-“Tasarım incelemesi anlamlı hale geldi, ergonomi ve kullanılabilirlik testleri yapabildik” <i>SHOP Architects-Ekip Üyeleri</i> 6-“Güneş ayarları araçlarıyla tasarımı gerçek hayatta gibi algılayabilmek” <i>BB+C Arch-Ekip Üyesi</i></p>	<p>Tasarımın Detaylarla Geliştirilebilmesi</p>
<p>1-“Herkesin aynı anda VR’da olması karar verme sürecini hızlandırıyor” <i>Mortenson-Gelişen Teknoloji Geliştiricisi ve Proje Çözümleri Teknik Uzmanı</i> 2-“birden fazla paydaşın aynı anda erişebileceği sanal bir model” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i> 3-“Modeli Revit ve Rhino’dan anında buluta aktarabilmek ve birden fazla kullanıcıyla canlı senkronizasyon gerçekleşti. Oldukça etkileyici” <i>Retima-Mimar</i> 4-“Müşteri ve geliştirici ekibin gerçek zamanlı 3D tasarım incelemelerinde iş birliği yapılmasına olanak tanıdı” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i> 5-“Birleşik bir vizyonda hizmet eden herkesin erişimi” <i>Vectuel-CEO/İnovasyon Direktörü</i> 6-“Covid dolayısıyla uzaktan toplantı kolaylığı” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i> 7-“Uzaktan çalışmada başarılı ve aynı odada olma hissini sağlıyor” <i>KPF-VR Uzmanı</i></p>	<p>Ortak Dili Paylaşmak</p>
<p>1-“Alanların nasıl görüneceği ve nasıl hissedileceği konusundaki belirsizlik ortadan kalkıyor” <i>Mortenson-Gelişen Teknoloji Geliştiricisi ve Proje Çözümleri Teknik Uzmanı</i> 2-“Alıcılar 3 boyutlu modelde etkileşim kurup, mekanı ve nesnelere algılayabiliyor” “Gerçekçi detaylar eklenebiliyor” <i>House by Urban</i> 3-“Modeli daha detaylı şekilde deneyimlemek” <i>Schnabel Engineering-Şirket Ortağı</i> 4-“Çıktıyı görselleştirebiliyor” <i>Schnabel Engineering-Şirket Ortağı</i> 5-“Tasarımların tek bir tıkla içine girebilme olanağı” <i>Payette-3D Görselleştirme Yöneticisi</i> 6-“Modeldeki sıkışık ve dar alanları gözlemleyebildik” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i> 7-“Güvenlik için kamera alanlarının tespiti yapılabildi” <i>Barton Malow-Proje/VDC Mühendisi</i> 8-“Tasarımcılar 3D modelde değişiklikler yaptıkça sanal gerçeklik deneyimini tek tıklamayla hızla yeniden yaratabildiler” <i>Miele-Satış Müdürü</i> 9-“Ölçek ve oran anlayışımızı devreye sokarak daha iyi tasarım yapmamıza yardımcı oldu” <i>Deforest-Müdür</i></p>	<p>Daha Detaylı Model ve Detayları 3 Boyutlu Şekilde Görebilmek</p>
<p>1-“Montajın her bileşenin değerlendirilmesine olanak tanıdı” <i>Mortenson-Gelişen Teknoloji Geliştiricisi ve Proje Çözümleri Teknik Uzmanı</i> 2-“Hataları iş sahasından önce dijital olarak yakalamak büyük avantaj” <i>Stuffolk-İnşaat Çözümleri Direktörü</i> 3-“MEP projelerinin koordinasyonunu sağlar” <i>Mortenson-Ekip Üyeleri</i> 4-“Tespit edilmesi zor çakışmalar, tam önünüzde olduğunda hemen fark edilir” <i>Perkins+Wills-Ekip Üyesi</i></p>	<p>Çakışma ve MEP Kontrollerinin Sağlanması</p>
<p>1-“İnşaatı izlemeye, bileşenlerin ne zaman ve nereye monte edilmesi gerektiğine ilişkin planlama rehberliği sağlamaya yardımcı olur” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i> 2-“En üretken ve verimli iş akışları sağlandı.” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i> 3-“Daha doğru dokümantasyon ve inşaat yönetimi sayesinde saha az hata ve büyük tasarruf” <i>SHOP-AR/VR Arge Lideri</i></p>	<p>Saha Planlaması ve Yönetiminde Kolaylık</p>

<p>4-“İnşaatı simüle edebilmek en temel faydası” <i>Vectuel-CEO/İnovasyon Direktörü</i></p> <p>5-“İnşaatin VR modellerini sunabilmesi” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i></p> <p>6-“Saha kısıtlamalarının etkisini azaltır” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i></p> <p>7-“Şantiyeleri dijital dünyaya taşımak için etkili bir yol” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i></p> <p>8-“Saha ekipleriyle iletişim kurabilmeyi sağladı” <i>Barton Malow-Ekip Üyeleri</i></p> <p>9-“Şantiyede çıkan sorunların tespitinde ve çözümünde kolaylık” “<i>Makine operatörlerinin görüş açılarını anlamaya yardımcı</i>” <i>One Alliance-Ekip Üyesi</i></p>	
<p>1-“Ofislerde güvenlik eğitimi için VR çözümlerini kullanıyoruz” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i></p> <p>2-“Çalışanların iş tehlikeleri konusunda farkındalığı arttı” “Daha güvenli çalışma sahaları yaratarak daha az kaza” “Riskleri ortadan kaldırma olanağı sağlıyor” “Geleneksel sınıf ve çevrimiçi eğitimlerde asla yapamayacağınız farkındalığı yaratıyor” <i>Skanska-Proje Lideri/Üretim Müdürü/Teknoloji Direktörü</i></p> <p>3-“Olası tehlikelerin tespiti ve VR güvenlik kontrollerinin yapılmasına yardımcı” <i>Barton Malow-Ekip Üyeleri</i></p>	İş Güvenliği ve Risk Planlamalarının Kolaylığı
<p>1-“Dronelar ile sahadan toplanan verilerle güncellenmiş görselleştirmeler her hafta müşterilere gönderilebiliyor” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i></p> <p>2-“Anında müşteri geri bildirimini sağlıyor” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i></p> <p>3-“Satış sunumlarının en önemli noktası oldu” <i>Mortenson-VR Geliştiricisi</i></p> <p>4-“En önemli parçalardan biri bir bütün olarak kullanıcı deneyimi” <i>House by Urban</i></p> <p>5-“Sanal tur, müşterilerin tasarımdaki ihtiyaçlarına ve taleplerine hızlı bir şekilde uyum sağlamamıza ve hatta bu değişiklikleri test etmemize olanak tanır” <i>Sound Hannam – CEO</i></p> <p>6-“Müşterilerimizi projenin çok erken bir zamanında memnun edebildik” <i>Kane-Dijital İnşaat Başkanı</i></p> <p>7-“Müşteriler tasarımın ilerleyişi konusunda ilgili ve bilgili hissettiler” <i>Reed-Ekip Üyeleri</i></p>	Satışlarda Artış ve Müşteri Memnuniyeti
<p>1-“Daha hızlı ve akıcı bir 3D program aracılığıyla gelişmiş müşteri deneyimi” <i>Marxent-Kurucu</i></p> <p>2-“Proje paydaşlarının ve müşterilerin tasarımları diledikleri kadar etkileşimli olarak görselleştirmelerine, gözden geçirmelerine ve optimize etmelerine olanak tanır” <i>Zutari-İnteraktif Görselleştirme Uzmanı</i></p> <p>3-“Müşterilerin yeni tasarım projelerini gerçek anlamda görselleştirmesine, deneyimlemesine ve onaylamasına yardımcı olur” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i></p> <p>4-“Satış sunumlarının en önemli noktası oldu” <i>Mortenson-VR Geliştiricisi</i></p> <p>5-“Müşterilerin tasarımı anlaması avantajı” <i>Reed Hilderbrand-Kıdemli Üye</i></p> <p>6-“Birincil görselleştirme aracımız” <i>Thornton T.-Kıdemli Proje Mühendisi</i></p> <p>7-“Güçlü bir görsel temsili sağladı” “Kullanıcılar daha duygusal ve heyecanlı bir deneyim yaşadı” <i>SPACE-Peyzaj Tasarımcısı</i></p> <p>8-“Müşteriye renk seçimi ve bitiş modelini göstermemize yardımcı oldu” <i>StudioMB-Baş Ürün Tasarımcısı</i></p>	Müşteriye Etkili Sunum ve Görselleştirme

Buna göre, inşaat firmalarının BIM-VR entegrasyonunda en çok bahsedilen güçlü yan, cevapların %45 inde aktarılmış olan müşteri memnuniyetidir. Bu oranı sırasıyla, ifadelerin %43 ünde zaman tasarrufu, %41 inde 3D model ile ayrıntıları görebilmek ve %40 ile maliyet tasarrufu takip etmektedir. En az bahsedilen güçlü yan ise, ifadelerin %9 unu oluşturan saha planlaması ve yönetiminde sağlanan avantajlar ve çakışma-MEP kontrollerinin sağlanmasına olan faydasıdır.

BIM-VR entegrasyonunun inşaat firmalarınca zayıf yanları olarak değerlendirilen görüşlerin ifadesi ve karşılıkları Tablo 5’te verilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5 - İnşaat Şirketlerinin BIM-VR Entegrasyonunun Zayıf Yanları Olarak Değerlendirdiği İfadeler ve Karşılığı

Ürün yorumu, blog yazısı, röportajlar ve vaka çalışmalarındaki ifadeler	Karşılığı
<p>1-“Teknoloji yatırımı yapıldı” <i>Retima-Mimar</i></p> <p>2-“Saha ekibi için otel arazisinde özel VR odası kuruldu” <i>Kane-Dijital İnşaat Başkanı</i></p> <p>3-“Teknolojik altyapı kurduk” <i>Stuflolk-İnşaat Çözümleri Direktörü</i></p> <p>4-“Geçici VR odasından, kalıcı bir VR odasına geçiş yapmak durumunda kaldık” <i>SPACE-Peyzaj Tasarımcısı</i></p> <p>5-“VR ekibi kuruldu” “Yazılım kurulumu yapıldı” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i></p> <p>6-“Bir teknoloji yatırımı yaptık” <i>Gilbane-VDC Direktör</i></p> <p>7-“Başlangıçta bir kurulum satın aldık” <i>StudioMB-Baş Ürün Tasarımcısı</i></p> <p>8-“Kurulumu satın aldık” <i>Barton Malow-Proje/VDC Mühendisi</i></p> <p>9-“VR ofisinin kurulumuyla başladık, teknik altyapıyı güçlendirdik, fırsat buldukça büyük ekranlar koyuyoruz” <i>SHOP Architects-Ekip Üyeleri</i></p> <p>10-“VR laboratuvarı kuruldu” “Ekip üyeleri ve müşteriler için oda oluşturduk” <i>Deforest-Müdü</i></p> <p>11-“Büyük yatırımcıları bir şekilde etkileyip, projeye yatırım yapmaları için ikna etmeye çalıştık” <i>Agora Architecture-Baş Mimar ve Ekip Üyeleri</i></p> <p>12-“2-3 haftalık deneme boyunca 5.000€ ücret ayırmamız gerekti” <i>One Alliance-Ekip Üyesi</i></p>	Başlangıç Maliyetleri
<p>1-“Geleneksel mekânsal analiz modelini atlamak” <i>Losci-Ceo/Kurucu</i></p> <p>2-“Başkaları izlerken aracı kullanmada isteksizlik fark ettik ve oda değişiklikleri yaptık” <i>StudioMB-Baş Ürün Tasarımcısı</i></p> <p>3-“VR kullanımı için müşterilerden ek komisyon alındı” <i>SHOP Architects-Ekip Üyeleri</i></p> <p>4-“Dışa aktarımlarda Revit’in yeterli olmadığını gördük” <i>Agora Architecture-Baş Mimar ve Ekip Üyeleri</i></p> <p>5-“Yatırımlar müşterilerden ek komisyon almamıza sebep oldu” <i>Reed-Ekip Üyeleri</i></p>	Teknolojiye Adaptasyon
<p>1-“Projelerde aktarma yapmak zorunda kaldık” <i>SPACE-Peyzaj Tasarımcısı</i></p> <p>2-“Modelinizi hazırlamak için harcanan zaman, VR’da geçirilen süre ve ek faydalar için elinizden geleni yapmalısınız” “Tamamlanmamış unsurlar dikkatinizi dağıtmamalıdır” <i>Perkins+Wills-Ekip Üyesi</i></p> <p>3-“Modelleme için zaman harcamanız gerekiyor” <i>Reed-Ekip Üyeleri</i></p>	Uzun Süreli Çalışma
<p>1-“Tüm verileri görselleştirmemize yardımcı olacak çözümleri arıyoruz, şimdilik veri kabuğunu kullanmaktayız” <i>Schnabel Engineering-Şirket Ortağı</i></p> <p>2-“Müşterilere VR yazılımını anlattık” <i>SPACE-Peyzaj Tasarımcısı</i></p> <p>3-“Yeni VR ofisini kurmaya çalışıyoruz” “Müşteriler VR’ın mide bulandırdığını düşünüyorlar bu sebeple deneme konusunda tereddüt ediyorlar” <i>Gilbane-VDC Direktörü</i></p> <p>4-“Çalışanların teknolojiyi etkin şekilde kullanıp kullanmadıklarını sürekli kontrol ettik” <i>Reed-Ekip Üyeleri</i></p>	Aalışma Sürecinin Uzunluğu
<p>1-“Proje ekibi güçlendirildi” <i>Marxent-Kurucu</i></p> <p>2-“Virtual Insight ekibi oluşturduk” <i>Mortenson-Teknoloji Geliştiricileri</i></p> <p>3-“Yeni teknolojiyi geliştirmekle görevli Teknik AR-GE grubu oluşturuldu” <i>Schnabel Engineering-Şirket Ortağı</i></p> <p>4-“Bilgi İş İstasyonları oluşturuldu” <i>Zegradog-Kullanıcı Deneyimi Lideri</i></p>	Teknolojiye Adapte İnsan Kaynağını Sağlamak
<p>1-“Şirket içi gerekli eğitimler aldırıldı” <i>Mortenson-VR Geliştiricisi</i></p> <p>2-“1-3 saatlik eğitimler aldık” <i>SPACE-Peyzaj Tasarımcısı</i></p> <p>3-“Tüm ekibe yeni sistem tanıtıldı” <i>Treehouse-Creative+Design Başkan Yardımcısı</i></p> <p>4-“Çalışanlara eğitim aldırıldı” “Şirket içi eğitimlerimiz yeni gelenler oldukça devam etti” <i>Reed-Ekip Üyeleri</i></p>	Çalışanlara Verilmesi Gereken Eğitimlerin Maliyeti ve Süresi
<p>1-“Çoğu kişi tamamlanmamış modelin faydası olmaz diye VR’a başlama konusunda isteksiz” <i>Perkins+Wills-Ekip Üyesi</i></p> <p>2-“Yalnızca ilk müşteri etkisi dışında etkisi olmayacağını düşündük” <i>Agora Architecture-Baş Mimar ve Ekip Üyeleri</i></p>	Teknolojiye Karşı Duyulan İsteksizlik

Tablo 6 - İncelenen İnşaat Firmaları ve Değerlendirmesi

FİRMA	YAPI TÜRÜ	ÜLKELER	BIM-VR ARAÇLARI	BIM-VR KUL. AMAÇLARI	BIM-VR ENT. GÜÇLÜ YÖNLERİ	BIM-VR ENT. ZAYIF YÖNLERİ
Firma 1	Tünel,Eğitim, Sağlık, Köprü, Konut, Havalimanı, Ofis, Ulaşım, Alışveriş Merkezi	USA, Kanada, Estonya, Danimarka,Finlan diya, Norveç, Polonya, Romanya, Slovakya UK, Çek Cumhuriyeti	Revit - Navisworks - UAS(Drone)	1-Satış Hızlandırmak 2-Etkileşimli Ortamlar 3-Müşteri Deneyimini Geliştirmek 4- Yeni Bakış Açıları Yakalamak 5- Şantiyede Doğru Veriyi Doğru Kişiyi Doğru Zamanda Ulaştırmak	1-Güvenliğin Artması 2-Saha Yönetimi 3-İletişimin Güçlenmesi 4-Satın Alma Verilerinin Doğruluğu 5- İsrافی Azaltma 5-Maliyetleri Azaltma 6- İş birliğinin Artması 7-Bakım ve Tesis Yönetimi Kararlarının Kolaylığı	1- İlk Maliyetler 2- Teknolojiye Adapte Olmak
Firma 2	Endüstri, Eğitim, Sağlık, Ofis	Amerika,Kore,Sin gapur,Atlanta,Hol landa	Revit - BIM 360- Navisworks - Oculus Rift Headset	1- Proje Takibi 2- Tasarım Geliştirme 3- MEP Koordinasyonu 4- Güvenlik ve Saha Planlaması 5- Tesis Yönetimi	1- Proje Paydaşlarının Katılımını Arttırmak 2- İletişimin Güçlenmesi 3- Projedeki Zorlukların Çözümlemesi 4- Maliyet ve Zaman Konularında Kesinlik 5- İş Güvenliği Planlamaları	1- Uzun Süreli Çalışma 2- Teknolojinin Bazen Sadece Ofiste Kalması, Sahaya Adapte Edilmemesi
Firma 3	Endüstri,Ofis, Karma Kullanım, Kimya, Kamusal	Amerika	Laser scanning - Revit	1- Bina Sistemlerini Koordine Etme 2- Tasarımı Geliştirmek 3-Proje Görselleştirme	1- Belirsizliği Azaltmak 2-Çalışmaları Önceden Görebilmek 3- Zorluklara Kolay Çözüm Bulmak 4- İnşaat Öncesi Olası Etkilerin Simüle Edilmesi. 5- Kusursuz Yönetim	1- İlk Maliyetler 2- Çalışanlara Teknolojiler Hakkında Eğitim Verme
Firma 4	Kamusal, Konut, Ofis, Endüstri,Ener ji, Sağlık, Karma Kullanım	Kanada, İngiltere, Türkiye, Irak, İspanya, USA, Japonya, Kore, Meksika, İsrail, Afganistan, İrlanda	Revit - Navisworks - UAC (Drone) - Laser Scanning-VR Headset	1- Üretimde Hızı Yakalamak 2- Proje Görselleştirme 3- Yapım Sırasında Sorunları Azaltmak	1-Tüm Paydaşların Ortak Bir Modelde Çalışması 2- Ekipler Arası Koordinasyonu Sağlaması 3- Kalite Kontrollerini Sağlamak 4- Çıkışma Kontrollerinin Sağlanması 5- Saha Lojistiği ve İş Güvenliği Planlamalarının Hızlı Yapılabilmesi	1- Uzun süreli çalışma 2- Teknolojiye Adapte İnsan Kaynağı

Firma 5	Havaalanı,Kültür Merkezi,Hotel,Endüstri,Kamusal,Ulaşım	Kazakistan,İtalya,Çin,Filipinler,Amerika,İspanya,Hindistan,Japonya,Kanada	HTC VIVE - Revit - Rhino - Grasshopper-Skeich Up- AutoCAD - Ms Project -	1- Tasarımın Sunumunu Etkinleştirme 2- Daha Detaylı Bir Model 3- Detayları Görebilmek	1- Yeniden Çalışmanın Azalması 2- Tüm Paydaşların Tek Bir Model Üzerinde Çalışması 3- Net Bir Maliyet Miktarı 4- Etkileyici, Derinlik Hissi Veren Modeller	1- İlk Maliyetler 2- Çalışanlara Teknolojiler Hakkında Eğitim Vermek
Firma 6	Enerji,Eğitim,Kamusal,Karar alma Kullanım,Endüstri,	Amerika,Kanada	UAS (İnsansız Hava Araçları- Drone) - Laser Scanning - Revit - Navisworks -	1- Hafriyat için Alanın Haritasını Çıkarmak 2- Çakışmaların Kontrolü	1- Zengin 3D Haritalar 2- İş Güvenliğinin Sağlanması 3- Proje Ekiplerinin Koordinasyon ve Verimliliğinin Artması 4- Müşteri Memnuniyetinin Artması 5- Kalite Kontrolünün Sağlanması	1- Uzun Süreli Çalışma 2- İlk Maliyetler
Firma 7	Eğitim, Endüstri,Kamusal,Sağlık,İç Mekan	USA	Revit - Laser scanning	1- Riskleri azaltmak 2- Etkileyici Tasarım	1- Riskleri Ortadan Kaldırmak 2- Tasarımların Geleceğini Görebilmek 3- Kolay Tesis Yönetimi 4- Maliyeti Azaltmak	1-Teknolojik Yatırım
Firma 8	Karma Kullanım,Eğitim,Gökçelen,Kamusal,İç Mekan,Ulaşım	USA, Avustralya, Tayland, Hollanda	Unity Reflect - VIVE - Revit	1-Varlık ve Derinlik Hissi Yaratabilmek 2- Çakışma Kontrolleri Yapabilmek 3- Etkileşimlilik	1- İyi Geri Bildirimler 2- Tasarruf 3- Hataları Ortadan Kaldırma 4- Projeyi Güncelleme Kolaylığı	1-Teknolojik Yatırım
Firma 9	Eğitim, Sağlık, Ulaşım, Ofis, Endüstri,Kamusal	USA, İngiltere	Revit - Rhino - BIM 360 - ArchiCAD - Tekla - Trimble - Navisworks - 3DsMAX	1-Güvenli İş Sahası 2- Ekipman Yönetimini Merkezileştirme 3- Koordinasyon	1- Kaliteyi Arttırmak 2- Verimlilik 3- Memnuniyet 4- Riskleri Ortadan Kaldırmak	1-Teknolojik Yatırım 2- İnsan Kaynağı Sağlamak
Firma 10	Ofis, Havaalanı,İç Mekan, Kültürel ,Ticaret	USA, Birleşik Arap Emirlikleri, Çin	BIM 360 - HTC VIVE Headset	1- Ortak Dili Paylaşmak 2- Müşteriye Etkin Sunum Yapabilmek	1- Zamandan Tasarruf 2- Fazla Çabayı Önlemesi 3- Müşteri İletişimini Arttırması 4- Tamamlayıcı Olması	1- İnsan Kaynağı Sağlamak

Buna göre, inşaat firmalarının BIM-VR entegrasyonunda en çok bahsedilen zayıf yan, cevapların %23 ünü oluşturan başlangıç maliyetleridir. Bunu cevapların %9 unu oluşturan çalışanlara verilmesi gereken eğitimlerin maliyeti, süresi ve bu teknolojilere alışma sürecinin uzunluğu takip etmiştir. En az bahsedilen zayıf yan ise, ifadelerin % 3 ünü oluşturan uzun süreli çalışmadır.

Çalışmanın devamında Unity ve İrisVr yazılım firmalarının müşteriler, kullanıcı yorumları ve bloglarının taranmasıyla ulaşılan inşaat firmalarından küresel anlamda çalışmaları olan 10 adet inşaat firması seçilmiştir. Seçilen inşaat firmalarının çalıştıkları yapı türleri, ülkeler ve kullandıkları BIM-VR araçları incelenmiştir. Ayrıca seçilen 10 inşaat firmasının Web sitelerindeki BIM ve VR teknolojisiyle ilgili blogları, örnek vaka çalışmaları ve bu teknolojilerin kullanımıyla ilgili değerlendirmeleri incelenmiş sonuç olarak inşaat firmalarının bu teknolojileri kullanma amaçlarına, bu teknolojiler hakkındaki deneyimlerine erişilmiştir. (Tablo 6)

Yazılım ve inşaat firmalarının Web sitelerindeki örnek vaka çalışmaları üzerindeki tespitleri, blog yazıları tarandığında, BIM-VR Teknolojisinin kullanıldığı projelerden elde edilen veriler özetle Tablo 7’ de verilmiştir.

Tablo 7 - Örnek Firma Çalışmalarından Çıkarılan Sonuçlar

BIM – VR TEKNOLOJİSİ KULLANIMININ GÜÇLÜ YÖNLERİ	BIM – VR TEKNOLOJİSİ KULLANIMININ ZAYIF YÖNLERİ
1- İletişim, İş Birliği ve Koordinasyonun Artışı	1- Başlangıç Maliyetleri
2- Maliyet ve Proje Süresinde Kesinlik, Tasarruf ve Verimlilik	2- Teknolojiye Adaptasyon
3- Tasarımın Detaylarla Geliştirilebilmesi	3- Uzun Süreli Çalışma
4- Ortak Dili Paylaşabilmek	4- Alışma Sürecinin Uzunluğu
5- Daha Detaylı Model ve Detayları 3 Boyutlu Şekilde Görebilmek	5- Teknolojiye Adapte İnsan Kaynağını Sağlamak
6- Çakışma ve MEP Kontrollerinin Sağlanması	6- Teknolojiye Adaptasyonda Kaybedilen Zaman
7- Saha Planlaması ve Yönetiminde Kolaylık	7- Çalışanlara Verilmesi Gereken Eğitimlerin Maliyeti ve Süresi
8- İş Güvenliği ve Risk Planlamalarının Kolaylığı	8- Teknolojinin Sadece Ofiste Kalması ve Sahaya Entegre Edilememesi
9- Satışlarda Artış ve Müşteri Memnuniyeti	9- Teknolojiye Karşı Duyulan İsteksizlik
10- Müşteriye Etkili Sunum ve Görselleştirme	

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatürde var olan çalışmaların vaka(alan) çalışmalarının incelenmesi ve inşaat firmalarının yapı üretim süreçlerinde BIM-VR entegrasyonunun kullanımına yönelik görüşlerinden çıkarılan verilerin sonucu olarak, yapı üretim süreçlerinde BIM-VR teknolojilerinin kullanım hedeflerini şu şekilde açıklamak mümkündür:

- BIM-VR entegrasyonunun başlıca kullanım amacı, paydaşlarla ortak bir dili paylaşabilmek ve iletişimi güçlendirmektir.
- Mimari tasarım aşamalarında; tasarımı geliştirebilmek, detaylara hakim olabilmek ve restorasyon projelerinde model oluşturmak amacıyla kullanıldığını söylemek mümkündür.
- Yapım sürecinde BIM-VR teknolojilerini; proje takibini kolay yapabilmek, üretimde hızı ve kaliteyi yakalamak, maliyetleri düşürmek, geri dönüş ve değişiklikleri azaltmak, MEP koordinasyonunu sağlamak ve iş güvenliği, risk ve saha planlamalarında sağladığı kolaylıklardan yararlanabilmek amacıyla kullanılmaktadır.
- Yapım sonrası süreçlerde, tesis yönetimini sistematik şekilde yapabilmek amacıyla kullanılmaktadır.
- Satış süreçlerinde ise satışı hızlandırmak ve arttırmak, müşteri deneyimini geliştirmek, yeni bakış açıları sağlayabilmek ve müşterilerden geri bildirim alabilmek hedefleriyle kullanıldığını söylemek mümkündür.

Seçilen 10 inşaat firmasının Web sitelerinin taranması sonucunda;

İncelenen inşaat firmalarının ana merkezlerinin ABD olduğu görülmekte, bu sebeple BIM-VR teknolojilerinin kullanıldığı projelerin yoğunlukla ABD’de olduğu ve ABD’nin yanı sıra Kanada, İngiltere, Çin ve Japonya gibi ülkelerin de bu teknolojileri aktif olarak kullandığı görülmektedir. Bu durumu, ABD, Çin, Japonya ve pek çok Avrupa ülkesinin BIM kullanımı hakkında standartlar getirmiş olmasıyla açıklamak mümkündür. McGraw-Hill’in 2012 senesinde yapmış olduğu araştırmada, 2007 senesinde yapı sektöründe BIM kullanımının benimsenme oranı %28 iken, 2012 senesindeki benimsenme oranı %71’e yükselmiştir. Yine McGraw-Hill’in 2010 senesinde yapmış olduğu araştırmada Avrupa ülkelerinde BIM kullanımının benimsenme oranı %36 olarak belirtilmiştir. (Alizadehsalehi, S. ve ark., 2020, Bernstein, H. M. ve diğerleri, 2012 ve McGraw-Hill Construction Report, 2010) Ülkemizde BIM-VR entegrasyonunun yapı üretim süreçlerinde aktif olarak görülmemesi ise ulusal bir standardın olmayışıdır. Bu teknolojilerin Türk yapı sektöründe kullanımının yaygınlaşmasını hızlandırmak için, tüm ilgili kurumlar aracılığıyla ulusal BIM standartları, kılavuzları hazırlanmalı, kanun ve yönetmelikler düzenlenmeli ve gerekli teşvikler sağlanmalıdır (Erdik ve Gökuç, 2020).

İnşaat firmalarının çalışma alanları ve BIM-VR teknolojilerini kullandıkları yapı türlerinin eğitim, sağlık, kamusal, endüstri, ofis ve kültür merkezi gibi daha komplike sistemleri içeren, MEP kontrollerinin dikkatlice yapılması gereken ve toplu kullanıma hizmet eden büyük projeler olduğu dikkat çekmektedir.

İncelenen inşaat firmalarının kullandıkları yazılım ve programlara bakıldığında, BIM yazılımlarından en çok Revit, sonrasında Navisworks yazılımlarını görülmektedir. VR

teknolojilerini kullandıkları donanım ve araçlara bakıldığında ise, Headsetler, Lazer Tarayıcılar ve Drone ların yoğunlukla kullanıldığını söylemek mümkündür.

Çalışma boyunca incelenen yorumlar, röportajlar, blog yazıları ve örnek vaka çalışmalarına göre BIM- VR entegrasyonunun yapı üretim süreçlerinde kullanımının güçlü ve zayıf yanları çıkarımları yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın sonucu olarak, yapı üretim süreçlerinde BIM-VR teknolojilerinin kullanımının güçlü yanları sistematik şekilde yorumlanırsa:

BIM-VR entegrasyonunun proje ekiplerine sağladığı güçlü yanların en çok bahsedilene yapı üretim sürecinin tüm aşamalarında paydaşlar arasındaki iletişim, koordinasyon ve iş birliğindeki önemli artıştır.

BIM ve VR teknolojisiyle daha tasarım aşamasındayken, çakışma ve MEP kontrollerinin yapılabilmesi, yapım süreci öncesinde sistem seçiminden kaynaklanan hataların önlenmesine, yapım aşamasında değişikliklere sebep olacak çakışmaların, gerekli hacimlerdeki eksiklikleri veya hatalarının önceden tespiti açısından önem arz etmektedir. Üretim aşamasında, çakışma ve MEP kontrollerinin sahada 3 boyutlu şekilde kontrollerinin yapılmasıyla geri dönüşler azalmakta, sistem kontrolleri yapılabilmektedir. Ayrıca restorasyon projelerinde rölöve alımında kolaylık ve kesinlik gibi faydaları da bulunmaktadır.

BIM ve VR teknolojilerinin üretimde öncelikle saha ve risk planlamalarının yapılmasında sağladığı kolaylıklar, iş güvenliği ve acil durum eylem planlamalarının yapımıyla birlikte saha ekibinin iş güvenliği eğitimlerinin simülasyonlarla desteklenmesi gibi güvenlik ve saha yönetimi aşamalarında epey kolaylık sağlamaktadır. Üretim sonrası süreçte BIM-VR entegrasyonu, tesis yönetiminde dokümantasyon ve tadilat-tamirat planlarının yapılmasında kolaylık sağlamaktadır.

BIM-VR entegrasyonunun firma performansına sağladığı güçlü yanlarının ilki tasarım süreçlerinde tüm paydaşların ortak bir dili paylaşarak, tek bir model üzerinde çalışması proje süreçlerine hız kazandırması, böylece daha tasarım aşamasında zamandan tasarruf edilmesidir. Projenin maliyetinin net şekilde çıkarılabilmesiyle proje bütçesi net ve kesin olarak elde edilmektedir.

Ayrıca 1/1 ölçekte ve 3 boyutlu şekilde görüntülenebilir detaylarla üretimde geri dönüşler ve yeniden yapım azalmaktadır. Bu sayede geriye dönüşler, tamirat ve yeniden yapım aşamalarındaki maliyet ve zaman kaybı önlenecektir.

BIM-VR entegrasyonunun müşterilere sağladığı güçlü yanları ise, projenin daha tasarım aşaması sırasında kullanıcının (müşteri) katılabileceği ve herhangi bir değişiklik isteğinin anında 3 boyutlu karşılığını görebileceği çok katılımcı tasarım toplantıları organize edilebilmesiyle, tasarım süreci müşteri memnuniyetiyle sonuçlanabilmektedir. Müşteriler tasarım süreçlerinde aktif olarak rol alabilmektedirler.

Bunun yanında, yapım süreçlerini canlı olarak gözlemleyerek, yapım süreci hakkında daha ilgili ve bilgili olabilirler.

Satış aşamalarında ise, daha projenin tasarım aşamasında 3 boyutlu şekilde, derinlik ve varlık hissiyle proje deneyimlenebilmekte, etkin görselleştirme yöntemleri sayesinde satışlarda ve müşteri memnuniyetinde artış söz konusu olmaktadır.

Yapı üretim süreçlerinde BIM-VR teknolojilerinin kullanımının zayıf yanları sistematik şekilde yorumlanırsa:

BIM-VR entegrasyonunun proje ekiplerince görülen zayıf yanlarının ilki BIM-VR teknolojilerini yapı üretim süreçlerine entegre edebilmek için detaylı bir model oluşturma zorunluluğu bulunmasıdır. Ancak bu detaylı modelin oluşturulmasıyla gerçekçi görsellere, MEP detaylarının ayrıntılarına erişilebilmektedir. Yapı üretim süreçlerinde, gerçekleşecek her aşamayı denetimli, kontrollü ve sistematik olarak ele alabilmek adına, beklenen detayda bir görüntü için sisteme ayrıntılı bir model girişinin yapılması gerekmektedir. Tasarım süreçlerindeki geleneksel yöntemle kıyasla, BIM-VR entegrasyonu yapı üretim süreçlerinin tasarım aşamasında daha uzun süreli çalışmalar gerçekleştirebilmektedir. Bunun sebebi detaylı model oluşturma, proje paydaşlarıyla yapılan toplantılar, analizler ve çakışma kontrol testleri şeklinde örneklenebilir. Tasarım aşamasında yapılan bu çalışmalar yapım sürecinde karşımıza çıkacak problemlerin önceden tespitiyle yapım aşamasında zaman ve maliyet tasarrufu şeklinde geri dönmektedir.

Teknolojiye alışma sürecinin uzun olması ve beraberinde bir süreç gerektirmesi, proje ekiplerinin eğitimlerle desteklenmesini ve denetimlerin sıklaştırılmasını gerektirebilmektedir.

Dosya aktarımlarından kaynaklanan hatalar, fizyolojik problemler gibi kullanıcı kaynaklı bazı aksamalar da BIM-VR teknolojisinin zayıf yönleri olarak değerlendirilmiştir. Bu sistemleri kullandıkça, yaşanılacak aksaklıkların üstesinden kolayca gelinecektir.

BIM-VR entegrasyonunun firma performansınca zayıf yanı BIM-VR teknolojilerinin yatırım maliyetinin bir miktar yüksek oluşudur. BIM ve VR teknolojilerin ilk yatırım maliyetlerinin bir miktar yüksek olması doğrudur ancak bu teknolojilerin kullanımıyla sahadaki geri dönüşlerin ve yeniden yapımın azalması sağlanacak böylece maliyet ve zaman tasarrufu yapılabilecektir.

BIM-VR'nin diğer bir zayıflık olarak görülen yönü, teknolojiye adapte insan kaynağını karşılamaktır. Bunun yanında yeni bir ekip kurulmayacaksa, güncel çalışanlara verilmesi gereken eğitimlerin maliyet ve süresi de BIM-VR entegrasyonuna geçişte zayıf yan olarak değerlendirilmiştir. Zayıf yan olarak değerlendirilen çalışanların teknolojiye adapte oluşu, BIM-VR teknolojisine geçiş sürecinin bir parçasıdır. İlerleyen süreçlerde kazanılan zaman ve tasarruflarla birlikte bu zayıf yanların faydaya dönüşeceği şüphesizdir.

BIM-VR entegrasyonunun müşterilerce zayıf yanı ise, BIM-VR teknolojisine duyulan isteksizlik ve ön yargı şeklinde yorumlanabilir. VR kullanmanın baş döndürücü ve mide bulandırıcı olduğunu düşünen müşteriler, deneyimleri sonrasında bu zayıf yanın aslında bir ön yargı olduğunu fark edeceklerdir. Bu durum yapılan firma çalışmasında görülmüştür.

Çalışma boyunca incelenen yorumlar, röportajlar, blog yazıları ve örnek vaka çalışmalarına göre BIM-VR entegrasyonunun yapı üretim süreçlerinde kullanımının potansiyel fırsat ve olası tehditleri çıkarımları yapılmıştır. BIM-VR teknolojilerinin yapı üretim sürecine entegrasyonunun potansiyel fırsatlarını yorumlamak gerekirse:

- Öncelikle kaynakların kullanımında sağlanabilecek tasarruflar en büyük fırsat olarak dikkat çekmektedir. BIM-VR entegrasyonu ile yapı üretim sürecinin tüm aşamaları planlı ve kontrollü şekilde ilerleyecek, geri dönüşler ve tadilatlar azaltılacaktır. Bu

sayede su, malzeme, enerji gibi tükenen kaynaklar korunacak ve bu kaynakların israfı önlenmiş olacaktır.

- Diğer bir fırsat ise, potansiyel işçilik kalitesindeki artış olabilir. Saha çalışanlarının elinde tüm detaylarıyla bir proje oluşu ve gerektiğinde bu detayları 3 boyutlu ve 1/1 ölçekte görüntüleyebilmek daha estetik, düzgün bitişli ve hatasız işçiliğe yardımcı olacaktır.
- Fırsatlardan bir diğeri ise, teknolojiye adapte insan kaynağı olarak kendini yetiştirmek ve bireysel istihdamını sağlamaktır. Küresel anlamda, inşaat sektörünün bir parçası haline gelen bu teknolojilere adapte olacak şekilde kendini yetiştirerek firmaların dikkatini çekmek, aranan bir uzman haline gelmek ve böylece bireysel istihdamı artırmak önemli bir fırsattır.

BIM ve VR teknolojilerinin yapı üretim sürecinde kullanımının olası tehditleri ise:

- BIM ve VR teknolojilerine adaptasyon için personellere eğitim verme veya aldırma şartıdır. İş verenler bu durumu zaman ve maliyet kaybı olarak düşündüklerinden, teknolojiye adapte insan kaynağı arayışına girebilmektedirler. Bu durum da dijitalleşme sonrası düşük bir miktar olsa da mevcut çalışanlarda istihdam kaybını gündeme getirebilmektedir. Ancak kendini bu teknolojilere adapte eden bireyler, kendi bireysel istihdamını artırabilmektedirler.
- Tehditlerden bir diğeri ise; müşteri ve projenin paydaşlarının da dahil olduğu tasarım toplantılarında çok katılımcı yaklaşımla her bireyin fikrini beyan etmesi ile tasarım sürecinin bir miktar uzaması ihtimalidir. Fakat bu durum, optimal tasarımın sağlandığında üretim sürecinde geri dönüşleri azaltacak, zaman ve maliyet tasarrufu şeklinde geri dönecektir.
- Son potansiyel tehdit, teknolojinin sadece ofiste kalması, sahada bu teknolojilerin kullanılmaması veya saha ekiplerince yeterli donanım eksikliğinden geleneksel yöntemlere devamlılık şeklinde olabilir. Bu durumda teknolojik yatırımın saha bazında da yapılması ve saha çalışanlarının teknolojiye adaptasyon için eğitimi şart hale gelmiştir.

6. SONUÇLAR

Yapı üretim süreci, küresel bağlamda en çok enerji tüketen ve yapılan hatalarla birlikte enerji, zaman, maliyet ve malzeme kaybının en yoğun olduğu süreçtir. Yapı üretim süreçlerinde geleneksel yöntemlerin kullanımı sonucu karşımıza çıkan sorunları; tasarım aşamalarında müşteriye toplantı esnasında bir model verememek, tesisat, elektrik, statik gibi tüm projelerin farklı platformlarda çizilmesi ve bu projelerin bütünlük sağlayamaması, proje maliyetine net şekilde erişememe, kültürel miras yapılarında; yanlış rölöve alımı, yapım aşamalarında; yanlış imalatlarla geri dönüşler yapılması, tesisat projelerinde çakışmalar yaşanması, çalışanlarca istenen detayın tekrar tekrar çizilmesi gerekliliği, imalat kontrollerin insan gözüne ve eline bağlı olması, iş güvenliğine dikkat edilmemesi veya eğitim eksikliği, saha lojistiğinin ve organizasyonun düşünülmemesi ve yapım sonrası süreçlerde; tamirat ve tadilat esnasında yapım aşamasında dikkat edilen noktaların kaybı, tadilat süreci planlamasının yapılmasında zorluklar gibi problemlerle karşılaşılmaktadır. Bahsedilen problemler sektörde

karşılaşılan problemlerin çok küçük bir yüzdesini oluşturmaktadır (Proverbs ve diğ., 2000 ve Jaffar ve diğ., 2011). Yapılan her geri dönüş ve tekrar yapım enerji, zaman, malzeme ve maliyet kaybına sebep olmaktadır. Geleneksel yöntemlerle uzayıp giden yapı üretim süreçleri, daha sistematik ve daha organize bir yapı üretim süreci ihtiyacını ve talebini doğurmuştur. Tüm bunların yanında akademik alanda, mimarlık ve inşaat mühendisliği öğrencilerinin yapı üretim süreçlerine ilişkin eğitimlerinde, geleneksel eğitim yöntemleri devam etmekte, sektör küresel bağlamda değişmeye devam ederken öğrencilere gelişen teknoloji ve yazılımlardan uzak bir eğitim süreci işlemektedir.

İnşaat sektörü her daim yeniliklere açık ve teknolojiye adapte olabilen bir sektör olmuştur. Gelişen teknoloji yapı üretim süreçlerinde yansımaları bulmuş, BIM ve VR teknolojileri yapı üretim süreçlerinde tercih edilen teknolojiler haline gelmiştir. Yeni nesil VR araçlarının çoğunun BIM yazılımları ile çalışması iki teknolojiyi birbirine kenetlemiş ve sektörde giderek yaygınlaşmasına yardımcı olmuştur. Yapı üretim süreçlerine bu iki teknolojinin entegrasyonunun dahil edilmesiyle süreç daha optimize, daha kontrollü ve daha sistematik şekilde ilerlemektedir. Yapı üretim süreçlerinin tasarım, kültürel miras, yapım ve yapım sonrası aşamalarda kullanımının tasarım aşamasında; görselleştirmedeki gerçekçilik ve derinlik hissi, tüm proje paydaşlarının tek model üzerinde çalışabilmesi, tasarım kusurlarının önceden tespiti, analizler ve çakışma testlerini 3 boyutlu olarak deneyimleyebilmek ve müşterilerle ilişkilerin ve iş birliğinin geliştirilebilmesi gibi kolaylıklar dikkat çekmektedir. Kültürel miras yapılarında; yapının rölevelerinin alınmasında kesinlik, restorasyon sonunda sanal ortam müzesi, eğitim ve oyun amaçlı uygulamalara imkan verebilmektedir. Yapı üretim süreçlerinde BIM-VR kullanımıyla ise; çalışanlar arası iletişim ve koordinasyonun artışıyla, proje takibinin ve imalat kontrollerinin kolayca yapılabilmesi, saha organizasyonunun sağlanması ve iş güvenliği planlamalarında sağladığı kolaylık ve kesinlikle, proje yönetimine ciddi avantajlar kazandırmaktadır. Son olarak yapım sonrası süreçte tesis yönetiminde; ön görülen veya ön görülemeyen tadilatlar için planlamaların yapılabilmesi, yapı hakkındaki dokümantasyon kolaylığı gibi birçok dikkat çekici yararları bulunmaktadır. Projenin tasarım aşamasından yıkımına kadarki süreçte BIM ve VR teknolojilerinin entegre kullanımı, yapının yaşam döngüsü boyunca sistematik, kontrollü ve gerçekçi bir yönetim sağlamaktadır. Yapının yaşam döngüsü boyunca BIM-VR teknolojilerini bütünsel şekilde kullanmakla verimlilik, tasarruf ve kaynakların korunumu gibi ana faydaları sağlayacaktır.

Yapılan araştırmalar dünyanın BIM (Yapı Bilgi Modelleme) ve VR (Sanal Gerçeklik) araçlarına son 5-10 yılda entegre olduğunu ve BIM-VR entegrasyonunun yapı üretim süreçlerinde yerini almaya başladığı göstermektedir. Bu ilerleme hızla kendine yeni donanımlar ekleyerek devam etmektedir. Yapılan literatür taramasında BIM-VR entegrasyonu ile ilgili çalışmaların büyük çoğunun yabancı kaynaklardan oluşması, örnek vaka çalışmalarındaki örneklerin yabancı ülkelerde oluşu ve yapılan firma araştırmasında erişilen firmaların hepsinin yabancı olması, ne yazık ki Türkiye'nin BIM-VR teknolojisine hala tam anlamıyla adapte olamadığını göstermektedir. İncelenen çalışmalarda BIM ve VR teknolojilerine farkındalığın oluştuğu, fakat bu teknolojilere geçişte bir tereddütlü davranıldığı görülmüştür. Bu noktada uygulama ve proje süreçlerinin yürütülmesinde referans alınacak standart ve kılavuzların eksikliği dikkat çekmektedir. Gelişmiş ülkelerde bu teknolojilerin kullanımı kamu ihalelerinde zorunlu ve özel sektörde sözleşmelere eklenmektedir. Ülkemizde ise, bu teknolojilerin kullanımı kamu ihalelerinde bir seçenek şeklinde yer almaktadır (Atabay ve Öztürk, 2019 ve Bahçeci ve Polat, 2020).

Bu çalışma sonucunda BIM-VR teknolojilerini kullanmanın faydalarından ve potansiyel fırsatlarından yararlanmak için sektörel bazda; Türkiye'nin bu teknolojiye yatırım yapması, inşaat sektörünü canlandırması ve potansiyel insan kaynağı bu teknolojilere yönelik eğitimlerle desteklenmelidir. Firma sahiplerine, mimarlara, mühendislere hatta tüm sektör çalışanlarının BIM-VR entegrasyonu tanınmaları ve kullanmalarına yönelik fuar, etkinlik, tanıtımlar düzenlenmeli, bu teknolojilerin kullanımıyla ilgili çalıştay, konferans ve atölyeler düzenlenmelidir. Devletin yapı üretim süreçlerine ilişkin teknolojik gelişmeleri desteklemesi, katkıda bulunması ve kullananlara ayrıcalıklar tanınması BIM-VR entegrasyonunu yapı üretim süreçlerinde sıkça görmemize yardımcı olacaktır. Bu konuda dünyada ve ülkemizde yapılan yayınlar, tüm sektör paydaşlarıyla paylaşılmalı ve akademiden sektöre devamlı bilgi akışı sağlanmalıdır.

Bu eksiklerin sadece sektörde değil, akademik alanda da olduğu yapılan literatür taramasında görülmüştür. Yapılan literatür taramasında Türkiye'de yapılan yayınlarda, BIM ve VR teknolojileri hakkında ayrıntılı bilgi verilse de örnek vaka çalışmaları ve farklı yöntemlerle incelenmesi bakımından eksiktir. Küresel bağlamda da tasarım ve inşa edilebilirlik incelemesi, sıralama ve iş planlaması gibi inşaat odaklı bir bağlamda BIM-VR entegrasyonunun yararları ve kullanım durumuyla ilgili araştırmaların sınırlı olduğu ve bir bilgi boşluğu olduğu ortadadır (Johansson ve Roupe, 2024 ve Akbay, 2021). Akademisyenler ve hayatına akademide devam edecek öğrencilerin bu teknolojilerle ilgili çalışmalarında farklı yöntemler ve vaka çalışmalarının kullanımının desteklenmesi gerekmektedir. Ayrıca akademik alanda, mimarlık ve mühendislik meslekleri gibi yapı üretim süreçlerinde başlıca aktörlerinin; gelişen teknolojiye adapte olarak eğitim alması, BIM ve VR teknolojilerini üniversite eğitimleri sürecinde kullanmaları desteklenmelidir. Bu konu özelinde, yapı bilgisi derslerinde VR kullanımı ile ilgili yapılan tez çalışması Z kuşağı bireylerinin yeniliklere ve teknolojiye açık olduğunu ve derslerin algılanması, kavranması ve yapısal öğelerin hayal edilmesine katkılarının olduğunu göstermiştir (Özdoğan, 2021). Ayrıca sektörde bu sistemler ile yapı üretim süreçlerinde bulunan proje aktörlerinin eğitime dahil edilmesi sağlanmalıdır. Bu sayede sektör ve akademik iş birliği sağlanarak, güncel yapı üretim süreçlerine hakim bireyler yetiştirmek mümkün olabilecektir.

Konuyla ilgili gelecekte yapılacak çalışmalara öneriler olarak, yöntem katkıda bulunmak amacıyla sektörde BIM-VR entegrasyonuna geçiş yapan inşaat firmalarıyla mülakatlar yapılabilir. Bu mülakatlarda BIM-VR entegrasyonuna geçiş sonrasında yapı üretim süreçlerinde tespit edebildikleri faydalar ve zararlar sorularak çalışma desteklenebilir. Bunun yanında yapı üretim süreçlerinde BIM-VR entegrasyonunun kullanıldığı gerçek projelerde vaka çalışmaları üzerinden tasarım, yapım, yapım sonrası veya kültürel miras projelerinde kullanımlarının amaçları, fayda ve zararları tespit edilebilir.

Özetle, en büyük kaynak tüketimi yapan inşaat sektörü teknolojiye uyarlanmalı, sektörle ilgili yenilikler takip edilmeli, yapı üretim süreçlerinde BIM-VR entegrasyonu sağlanmalı, BIM-VR entegrasyonu ile ilgili potansiyel fırsatlar gerçek faydalara dönüştürülmelidir. Sektörel bazda yenilikçiliğin yanında akademide de BIM-VR entegrasyonu ile ilgili daha çok analiz, vaka çalışması bazında yayınlar üretilmelidir. Ancak sektör ve akademi birleşip yenilikçi olmak şartıyla inşaat sektörünün içinde taşıdığı potansiyellere erişim sağlanabilir. Bu bağlamdaki çalışmaların devamlılığıyla BIM-VR teknolojilerinin ülkemiz inşaat sektöründe yeni geleneksel sistem olarak kendine yer bulacağı şüphesizdir.

Kaynaklar

- [1] Afzal, M. and Shafiq M. T., Evaluating 4D-BIM and VR for Effective Safety Communication and Training: A Case Study of Multilingual Construction Job-Site Crew, *Buildings* 2021, 11(8), 2021.
- [2] Akbay, R. B. Türk İnşaat Sektöründe Yapı Bilgi Modellemesinin Şantiyede Kullanımına Yönelik Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, 2021.
- [3] Alizadehsalehi, S., Hadavi, A. and Huang, J.C., From BIM to extended reality in AEC industry, *Automation in Construction*, volüme 116, 2020.
- [4] Aş, H. Saran Mimari Yazılım ve Teknolojilerinin Kültürel Mirası Koruma Çalışmalarında Kullanımı. *Tasarım Enformatiği*, 01(02), 92-106, 2019.
- [5] Atabay, Ş., Öztürk M. B. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) Uygulama Planı Üzerine Bir İnceleme, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 418-430, 2019.
- [6] Azhar, S. Role of visualization technologies in safety planning and management at construction jobsites, *Procedia Engineering*, 171(2017), 215-226, 2017.
- [7] Bahçeci, H., Polat H., İnşaat Sektöründe Yüklenici Firma Ölçeğine Göre BIM Kullanımının Araştırılması, *Online Journal of Art and Design*, 8(2), 2020.
- [8] Baik, A. The Use of Interactive Virtual BIM to Boost Virtual Tourism in Heritage Sites, Historic Jeddah. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(9), 577, 2021.
- [9] Bernstein, H. M., Jones, S. A., Russo, M. A., The business value of BIM in North America: Multi-year trend analysis and user rating (2007–2012), McGraw-Hill Construction, Bedford, MA, 1-72, 2012.
- [10] Deniz, G. Expanding applications of virtual reality in construction industry: A multiple case study approach, *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 2(2), 48-66, 2019.
- [11] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons. 2011
- [12] Erdik, M. Ve Gökuç T., Y. Türk Yapı Sektöründe Yapı Bilgi Modellemesinin Adaptasyonu, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 22(1), 159-171, 2020.
- [13] Genç, M. Sanal Gerçeklik Teknolojilerinin, İnşaat Endüstrisinde ve İnşaat Mühendisliğinde Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi ve Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 2019.
- [14] Getuli, V., Capone, P., Bruttini, A. and Isaac, S. BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach, *Automation in Construction*, volüme 114, 2020.
- [15] Haggard K. E. Case Study on Virtual Reality in Construction, 2017.

- [16] Halili, A., An XML-based approach for geo-semantic data exchange from BIM to VR applications, *Automation in Construction*, volüme 121, 2021.
- [17] Jaffar, N., Tharim, A.H., Shuib M.N. Factors of Conflict in Construction Industry: A Literature Review, *The 2nd International Building Control Conference 2011*, 20(2011), 193-202, 2011.
- [18] Johansson M., Roupé M. BIM and Virtual Reality (VR) at the construction site, *Konferans Bildirisi, Chalmers Teknoloji Üniversitesi*, 2020.
- [19] Kieferle, J., Woessner U. BIM Interactive - About combining BIM and Virtual Reality - A Bidirectional Interaction Method for BIM Models in Different Environments. *eCAADe proceedings*, 2015.
- [20] Kim, J. I., Li, S., Chen, X., Keung, C., Suh, M. and Kim, T. W., Evaluation framework for BIM-based VR applications in design phase, *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(3), 910-922, 2021.
- [21] McGraw-Hill Construction Report, *The business value of BIM in Europe, Getting building information modeling to the bottom line in the United Kingdom, France and Germany*, SmartMarket Report, Bedford, MA: McGrawHill Construction, 1-52, 2010.
- [22] Moraru A., Pozanski K. Integrating BIM, Virtual Reality and Serious Gaming for effective collaboration and communication between end-users and the design team, *Yüksek Lisans Tezi, Aalborg Üniversitesi*, 2020.
- [23] Muhammad, A. A., Yitmen, İ., Alizadehsalehi, S., Çelik, T. Adoption of Virtual Reality (VR) for Site Layout Optimization of Construction Projects, *Teknik Dergi*, 31(2), 9833-9850, 2020.
- [24] Ofluoğlu, S. *Yapı Bilgi Modelleme: Yeni Nesil Mimari Yazılımlar*. Mimar Sinan Üniversitesi, 2012.
- [25] Özdoğan, M. *Mimarlık Okullarında Yapı Bilgisi Eğitiminin Sanal Gerçeklik Sistemleri İle Bütünleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, 2021.
- [26] Park, H., Panya, D.S., Goo, H.N., Kim, T., Seo, J. BIM-based Virtual Reality and Human Behavior Simulation For Safety Design, *Corpus ID: 174793816*, 2018.
- [27] Proverbs, D. G., Holt, G. D. ve Cheok, H. Y. Construction industry problems: the views of UK construction directors 16th Annual ARCOM Conference, 6-8 September 2000, Glasgow Caledonian University. *Association of Researchers in Construction Management*, 73-81, 2000.
- [28] Şen, G. AR/VR Destekli BIM Teknolojileri İle Tesis Yönetimi, *Yapı Bilgi Modelleme*, 03(01), 12-22, 2021.
- [29] Sürücü, O. *Sanal Gerçekliğin Kültürel Mirası Korumada Kullanımı Salih Bozok Villası Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2017.
- [30] Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., Landes, T. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques, *Journal Of Cultural Heritage*, 46(2020), 350-360, 2020.

- [31] Yenigün,İ., Yenigün, K. ve Erdoğan, S. Sanal Gerçekliğe Ticari Uygulama Yaklaşımları, GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies (AIST), 3(1), 22-31, 2020.
- [32] Yılmaz, G., Güngör, A. A., Demirörs, O. İnşaat Sektöründe Kullanılan Bilgi ve İletişim Teknolojileri, 562-573, 2016.
- [33] Zaker, R. & Coloma, E. Virtual reality-integrated workflow in BIM-enabled projects collaboration and design review: a case study, Visualization in Engineering, 6(4), 2018.
- [34] Visualization and Virtual Reality. AECOM, Web Sitesi <https://aecom.com/services/visualization-and-virtual-reality-2/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [35] OUR SERVICES. BRASFIELD GORRIE, Web Sitesi <https://www.brasfieldgorrie.com/services/virtual-design-construction/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [36] Virtual Design & Construction. BNBuilders, Web Sitesi <https://www.bnbuilders.com/service/expertise/our-services/virtual-design-and-construction> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [37] Virtual Reality Transforming Design. CORGAN, Web Sitesi <https://www.corgan.com/story/virtual-reality-transforming-design/> Ziyaret Tarihi 29 Kasım 2022.
- [38] How We Build VIRTUAL DESIGN & CONSTRUCTION. DPR Construction, Web Sitesi <https://www.dpr.com/construction/expertise/collaborative-virtual-building-and-bim> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [39] ACCESS EQUIPMENT, VIRTUAL REALITY TRAINING SIMULATORS. FORGETFX, Web Sitesi <https://forgefx.com/clients/access-equipment-operator-training-simulator/access-equipment-aerial-work-platform-training-simulator/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [40] Building for Tomorrow using Virtual Reality. Gilbane Ink, Web Sitesi <https://www.gilbaneco.com/blog/bim/building-for-tomorrow-using-virtual-reality/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [41] Prospect, Virtual Reality for Construction. IRISVR, Web Sitesi <https://irisvr.com/industry/construction/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [42] The Importance Of Virtual Design & Construction. Mortenson, Web Sitesi <https://www.mortenson.com/vdc/study> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [43] V Unity, SHoP Architects: A Unity Reflect case study. SHoP Architects, Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023, Web Sitesi <https://unity.com/case-study/shop-architects#building-right-tool> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [44] VDC / BIM. SKANSKA, Web Sitesi <https://www.usa.skanska.com/what-we-deliver/services/innovation/vdc--bim/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.

- [45] BUILDING INFORMATION MODELLING. TAKENAKA, Web Sitesi <https://www.takenaka.asia/singapore/services/building-information-modelling/> Ziyaret Tarihi 10 Ocak 2023.
- [46] Mimarlık, Mühendislik, İnşaat ve İşletme. Unity, Web Sitesi <https://unity.com/solutions/architecture-engineering-construction> Ziyaret Tarihi 4 Ocak 2024.
- [47] HoloLens2/ Microsoft, Web Sitesi <https://www.microsoft.com/en-us/hololens> Ziyaret Tarihi 05 Ocak 2024.
- [48] RealWear, Web Sitesi <https://www.realwear.com/> Ziyaret Tarihi 05 Ocak 2024.
- [49] VisualLive/ Unity, Web Sitesi <https://unity.com/products/visuallive> Ziyaret Tarihi 05 Ocak 2024.

Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi)

Manuscript Drafting Rules

1. The whole manuscript (text, charts, equations, drawings etc.) should be arranged in Word and submitted in ready to print format. The article should be typed on A4 (210 x 297 mm) size paper using 10 pt (main title 15 pt) Times New Roman font, single spacing. Margins should be 40 mm on the left and right sides and 52.5 mm at the top and bottom of the page.
2. Including drawings and tables, articles should not exceed 25 pages, technical notes 10 pages.
3. Your contributed manuscript must be sent over the DergiPark system. (<http://dergipark.gov.tr/tekderg>)
4. The text must be written in a clear and understandable language, conform to the grammar rules. Third singular person and passive tense must be used, and no inverted sentences should be contained.
5. Title must be short (10 words maximum) and clear, and reflect the content of the paper.
6. Sections should be arranged as: (i) abstract and keywords, (ii) title, abstract and keywords in the other language, (iii) main text, (iv) symbols, (v) acknowledgements (if required) and (vi) references.
7. Both abstracts should briefly describe the object, scope, method and conclusions of the work and should not exceed 100 words. If necessary, abstracts may be re-written without consulting the author. At least three keywords must be given. Titles, abstracts and keywords must be fitted in the first page leaving ten line space at the bottom of the first page and the main text must start in the second page.
8. Section and sub-section titles must be numbered complying with the standard TS1212.
9. Symbols must conform to the international rules; each symbol must be defined where it appears first, additionally, a list of symbols must be given in alphabetic order (first Latin, then Greek alphabets) at the end of the text (before References).
10. Equations must be numbered and these numbers must be shown in brackets at the end of the line.
11. Tables, drawings and photographs must be placed inside the text, each one should have a number and title and titles should be written above the tables and below the drawings and photographs.
12. Only SI units must be used in the manuscripts.
13. Quotes must be given in inverted commas and the source must be indicated with a reference number.
14. Acknowledgement must be short and mention the people/ institutions contributed or assisted the study.
15. References must be numbered (in brackets) in the text referring to the reference list arranged in the order of appearance in the text. References must include the following information:

If the reference is an article: Author's surname, his/her initials, other authors, full title of the article, name of the journal, volume, issue, starting and ending pages, year of publication.

Example : Naghdi, P. M., Kalnins, A., On Vibrations of Elastic Spherical Shells. J. Appl. Mech., 29, 65-72, 1962.

If the reference is a book: Author's surname, his/her initials, other authors, title of the book, volume number, editor if available, place of publication, year of publication.

Example : Kraus. H., Thin Elastic Shells, New York. Wiley, 1967.

If the reference is a conference paper: Author's surname, his/her initials, other authors, title of the paper, title of the conference, location and year.

If the source is a thesis: Author's surname, his/her initials, thesis title, level, university, year.

If the source is a report: Author's surname, his/her initials, other authors, title of the report, type, number, institution it is submitted to, publication place, year.
16. Discussions to an article published in Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi) should not exceed two pages, must briefly express the addressed points, must criticize the content, not the author and must be written in a polite language. Authors' closing remarks must also follow the above rules.
17. A separate note should accompany the manuscript. The note should include, (i) authors' names, business and home addresses and phone numbers, (ii) brief resumes of the authors and (iii) a statement "I declare in honesty that this article is the product of a genuinely original study and that a similar version of the article has not been previously published anywhere else" signed by all authors.
18. Copyright has to be transferred to UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers. The standard copyright form signed by the authorised author should therefore be submitted together with the manuscript.

CONTENTS

OBITUARY - Prof. Dr. GÜNAY ÖZMEN

RESEARCH ARTICLE

Investigation of Rutting and Low Temperature Cracking Behavior of Reactive Ethylene Terpolymer and Waste Cooking Oil Modified Bitumen..... 1
Aytuğ KUMANDAŞ, Erman ÇAVDAR, Neslihan ŞAHAN, Baha Vural KÖK, Erhan Burak PANCAR, Şeref ORUÇ

Effect of Freeze-Thaw on CBR in Soils with Different Gradation and Mineralogy 27
Murat GÜLEN, Ayşenur ASLAN FİDAN, Ahmet Serdar KÖŞELİ, Havvanur KILIÇ

Seismic Assessment of Electrical Equipment in Power Substations: A Case Study for Circuit Breakers 49
Kaan KAATSIZ, Fırat Soner ALICI, Murat Altuğ ERBERİK

Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazık Davranışının Orijinal Bir Kazık Yükleme Deneyi ve İmalat Yaklaşımı ile İncelenmesi 69
Orhan Esat İNANIR, Aykut ŞENOL, Mehmet M. BERİLGİN

Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi 95
Gürçağ ÖZGÜRER

TECHNICAL NOTE

Yapı Üretim Süreçlerinde BIM ve VR Uygulamalarının Entegrasyonunun Değerlendirilmesi 117
Gülce BOZKURT, Selahattin ERSOY, Enes YAŞA



UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Necatibey St. No: 57, Kızılay, Ankara / Türkiye

Tel: +90.312.294 30 00 - Faks: 294 30 88

www.imo.org.tr