



UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers
TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Turkish Journal of Civil Engineering

formerly
Teknik Dergi

Volume 34
Issue 4
July 2023

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 34 Issue 4 July 2023



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):

Taner YÜZGEÇ

On behalf of UCTEA Turkish Chamber of Civil Engineers

Administrative Officer (Yazı İşleri Müdürü):

Özer AKKUŞ

Volume 34 - Issue 4 - July 2023 (*Cilt 34 - Sayı 4 - Temmuz 2023*)

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

Date of Print: July 1, 2023 (*Baskı Tarihi: 1 Temmuz 2023*)

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):

Ziraat Gurup Matbaacılık Ambalaj San. Tic. A.Ş.

Bahçekapı Mah. 2534 Sok. No: 18 Şaşmaz, Etimesgut / Ankara

Tel: 0.312.384 73 44 - Faks: 0.312.384 73 46

Turkish Journal of Civil Engineering (formerly Teknik Dergi)

Editor in Chief:

Alper İLKİ

Co-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 Languge Check:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Polat GÜLKAN

Gürkan Emre GÜRCANLI

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Mehmet UTKU

Emine Beyhan YEĞEN

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. G. Özmen, Türkiye

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. Tümer, USA

Reviewers:

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

Şükran AÇIKEL	Cihan CENGİZ	Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ	Gökhan KIRKİL	Karin ŞEŞETİYAN
Merve AÇIKGENÇ	Halim CEYLAN	Burak FELEKOĞLU	Esat Selim KOCAMAN	Ali Ünal ŞORMAN
ULAŞ	Hüseyin CEYLAN	Mahmut FIRAT	Kasım KOÇAK	Gülüm TANIRCAN
Perviz AHMEDZADE	Ömer CİVALEK	Okan FISTIKOĞLU	Salih KOÇAK	Serhan TANYEL
Bülent AKBAŞ	Joao Ramoa CORREIA	Onur GEDİK	Niyazi Uğur KOÇKAL	Kerem TAŞTAN
Şeref Doğan AKBAŞ	Ayşe COŞKUN BEYAN	Abdullah GEDİKLİ	Baha Vural KÖK	Gökmen TAYFUR
Rifat AKBIYIKLI	Ali Firat ÇABALAR	Ahmet Talha GEZGİN	Mete KÖKEN	Rasim TEMÜR
Özge AKBOĞA KALE	Barlas Özden	Sadık Can GİRĞİN	Hasan KURTARAN	Serdal TERZİ
Sarven AKCELYAN	ÇAĞLAYAN	Zehra Canan GİRĞİN	Murat KURUOĞLU	Berrak TEYMUR
Burcu AKÇAY	Melih ÇALAMAK	İlgin GÖKAŞAR	Akif KUTLU	Hüseyin Onur TEZCAN
ALDANMAZ	Gülben ÇALIŞ	Serdar GÖKTEPE	Abdullah KÜRKCÜ	Mesut TİGDEMİR
Cihan Taylan AKDAĞ	Umut ÇALIŞKAN	Rahmi GÜÇLÜ	Hilmi LUŞ	Salih TİLEYLİOĞLU
Cem AKGÜNER	Süheyra Pelin	Ali GÜL	Kasım MERMERTAŞ	Vedat TOĞAN
Çağlar AKKAYA	ÇALIŞKANELLİ	Fazlı Erol GÜLER	Mahmoud MIARI	Onur Behzat TOKDEMİR
Fevziye AKÖZ	Mehmet Alper	İlgin GÜLER	Yetiş Şazi MURAT	İrem Dikmen Toket
Erkan AKPINAR	ÇANKAYA	Hamza GÜLLÜ	Öcal NECMİOĞLU	TOKER
Muhammet Vefa	Devlay ÇELEBİ	Gürkan GÜNAY	Fuad OKAY	Ali TOPAL
AKPINAR	Tevfik Kutay	Taylan GÜNAY	Umut OKKAN	Cem TOPKAYA
Atakan AKSOY	ÇELEBİOĞLU	Murat GÜNAYDIN	Derviş Volkan OKUR	Kamile TOSUN
Hafzullah AKSOY	Ahmet Ozan ÇELİK	Samet GÜNER	Mehmet Hakkı	FELEKOĞLU
Tulay AKSU ÖZKUL	Oğuz Cem ÇELİK	Oğuz GÜNEŞ	OMURTAG	Erkan TÖRE
Uğurhan AKYÜZ	Semet ÇELİK	Mehmet Şükri GÜNEY	Sezan ORAK	Ülgen Mert TUĞSAL
Sadık ALASHAN	Hilmi Berk ÇELİKOĞLU	Tuba GÜRBÜZ	Engin ORAKDÖĞEN	Gürsur TURAN
Cenk ALHAN	Kemal Önder ÇETİN	BÜYÜKKAYIÇI	Akın ÖNALP	Ö. Tuğrul TURAN
Ayşe Burcu ALTAN	Mahmut ÇETİN	Aslı Pelin GÜRGÜN	Bihart ÖNÖZ	Cüneyt TÜZÜN
SAKARYA	Mecit ÇETİN	Soner HALDENBİLEN	Ali Hakan ÖREN	Eren UÇKAN
Sinan ALTIN	Erdal ÇOKÇA	Murat HAMDERİ	Ceyhan ÖZÇELİK	Latif Onur UĞUR
Adlen ALTUNBAŞ	Semra ÇOMU	Ingo A. HANSEN	Yiğit ÖZÇELİK	Ergin ULUTAŞ
Ahmet Can ALTUNİŞİK	İsmail DABANLI	Umut HASGÜL	Gökhan ÖZDEMİR	Dilay UNCU
Yalçın ALVER	Ömer DABANLI	Bo-Tao HUANG	Murat ÖZEN	Tayfun UYGUNOĞLU
Bahadır ALYAVUZ	Atilla DAMCI	Zeynep İŞİK	Pelin ÖZENER	Volkan Emre UZ
Özgür ANIL	Yakup DARAMA	Sabriye Banu İKİZLER	Hasan ÖZER	İbrahim Mert UZUN
Necati ARAS	Osama M.F. DAWOUD	Erol İSKENDER	Hakkı Oral ÖZHAN	Deniz ÜLGEN
Davut ARDİTİ	Tayfun DEDE	Medine İSPİR ARSLAN	Mehmet Fatih ÖZKAL	Mehmet Barış Can
Yalın ARICI	Abdullah DEMİR	Recep İYİSAN	Zeynep Huri ÖZKUL	ÜLKER
Deniz ARTAN İLTER	Cem DEMİR	Nihat KABAY	BİRGÖREN	Yurdanur ÜNAL
Ali Osman ATAHAN	Emre DEMİR	Mehmet Sedat	Ahmet ÖZTOPAL	Cüneyt VATANSEVER
Hakan Nuri ATAHAN	Uğur DEMİR (İTÜ)	KABDAŞLI	Sadık ÖZTOPRAK	Syed Tanvir WASTI
Ali Osman ATEŞ	Uğur DEMİR (İYTE)	Mehmet Rifat	Turan ÖZTURAN	Ahmet YAKUT
Bekir Özer AY	Munise Didem	KAHYAOĞLU	Mustafa ÖZUYAL	Erkut YALÇIN
Gökçe AYDIN	DEMİRBAŞ	Özkan KALE	Tolga Yılmaz	Mehmet Cem YALÇIN
Metin AYDOĞDU	Ender DEMİREL	Volkan KALPAKÇI	ÖZÜDOĞRU	Aslı YALÇIN
Hakan AYGÖREN	Mehmet Cüneyd	Elif Çağda KANDEMİR	Atilla ÖZÜTOK	DAYIOĞLU
Mustafa Tamer AYVAZ	DEMİREL	Tanay KARADEMİR	Nülfür ÖZYURT	Mustafa Sinan YARDIM
Ülker Güner BACANLI	Seyyit Ümit DİKMEN	Hüseyin Faruk	ZİHNİOĞLU	Mert Yücel YARDIMCI
İhsan Engin BAL	Ali Ersin DİNÇER	KARADOĞAN	Ahmet Onur PEHLİVAN	Anıl YAZICI
Selim BARADAN	İsmail DURANYILDIZ	Ümit KARADOĞAN	Seval PINARBAŞI	Gökhan YAZICI
Eray BARAN	Selim DÜNDAR	Mustafa Erkan	ÇUHADAROĞLU	Halit YAZICI
Özgür Uğraş BARAN	Nurhan ECEMİŞ ZEREN	KARAGÜLER	Elişan Filiz PİROĞLU	Mehmet YETMEZ
Türkay BARAN	Volkan Ş. EDİGER	Halil KARAHAN	Selman SAĞLAM	Tahsin Alper YIKICI
Bekir Oğuz BARTIN	Özgür EKİNCİOĞLU	Zülküf KAYA	Mehmet SALTAN	İrem Zeynep YILDIRIM
Mustafa Gökçe	Murat Altuğ ERBERİK	Oğuz KAYABAŞI	Metin SARIGÖL	Mehmet
BAYDOĞAN	Ali ERCAN	Hasan Ahmed KAZMEE	Altuğ SAYGILI	YILDIRIMOĞLU
Cüneyt BAYKAL	Sinan Turhan ERDOĞAN	Mustafa Kubilay	Serdar SELAMET	Abdülazim YILDIZ
Niyazi Özgür BEZGİN	Şakir ERDOĞDU	KELEŞOĞLU	Osman SİVRİKAYA	Mustafa Tolga YILMAZ
Senem BİLİR	Ramazan Cüneyt	Elçin KENTEL	Behzad SOLTANBEIGI	Berivan YILMAZER
MAHÇİÇEK	ERENOĞLU	Hadi	Serdar SOYÖZ	POLAT
Gökçen BOMBAR	Esin ERGEN	KHANBAZADEH	Rifat SÖNMEZ	İsmail YÜCEL
Burak BOYACI	PEHLEVAN	Havvanur KILIÇ	Tayfun Altuğ SÖYLEV	Yeliz YÜKSELEN
İlknur BOZBEY	Gökmen ERGÜN	Ufuk KIRBAŞ	Erol ŞADOĞLU	AKSOY
Ali BOZER	Bülent ERKMEN	Veysel Şadan Özgür	Olcaş ŞAHİN	Shaban Isamel Albrka Ali
Zafer BOZKUŞ	Barış ERKUŞ	KIRCA	Yuşa ŞAHİN	ZANGENA
Erdem CANBAY	Yusuf Çağtay ERŞAN	Cem KIRLANGIÇOĞLU	Zekai ŞEN	Abdullah Can ZÜLFİKAR
Zekai CELEP	Kağan ERYÜRÜK	Güven KIYMAZ	Burak ŞENGÖZ	

CONTENTS

RESEARCH ARTICLE

- Investigation of Pounding between Two Adjacent Building Models with Experimental Methods..... 1
Çağla ŞEKERCI, Erdem DAMCI
- A Relationship for Effective Thermal Conductivity of Reinforced Concrete Structures..... 27
Bekir Erdem BAS, Seyednavid MARDMOMEN, Guadalupe LEON, Hung-Liang (Roger) CHEN
- Seismic Responses of an Isolated Long-span Bridge using Frequency Domain and Time Dependent Procedures 45
Fevzi SARITAŞ, Zeki HASGÜR
- Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın Entegrasyonu Modeli..... 71
Hüseyin ERYAMAN, Ertan AKÜN
- Işıksız Kavşaklarda Kritik Aralık Kabulü İçin Yeni Bir Yaklaşım..... 105
Sezin HIZARCI, Serhan TANYEL, Selim DÜNDAR, İlgin GÖKAŞAR, Burak ŞENGÖZ, Ali TOPAL

TECHICAL NOTE

- Case Study of Stormwater Control by Permeable Road in Commercial Centre under Equatorial Climate..... 133
Darrien Yau Seng MAH, Norazlina BATENI, Frederik Josep PUTUHENA

Investigation of Pounding between Two Adjacent Building Models with Experimental Methods

Çağla ŞEKERCI¹
Erdem DAMCI²

ABSTRACT

This study investigates the pounding phenomenon by shaking table experiments on two scaled building models. Representing the situation where the seismic gap is insufficient, two building models are adjacently positioned on the shaking table, and pounding was investigated for harmonic and strong ground motion excitations. Displacement and acceleration responses were obtained to observe the pounding effect experimentally from video and accelerometer recordings, respectively. The Kelvin-Voigt Model consisting of spring and damper was used for numerical pounding analysis. The most critical parameters of the Kelvin-Voigt model, which are the spring stiffness (k_s) and the damping calculated according to the coefficient of restitution (r) were investigated and compared with harmonic experimental results. The obtained parameters, compatible with the harmonic experiments, were used to examine structural behavior under earthquake effect for the case where the building models are positioned for an insufficient seismic gap. For comparison, numerous numerical simulations were realized using different spring stiffnesses and coefficients of restitution. The study shows that when the coefficient of restitution is taken as 0.2 or 0.4, and the ratio of spring stiffness to shear stiffness (k_s/k) is 1 or 5, reasonable results in numerical earthquake simulations can be obtained.

Keywords: Pounding, Kelvin-Voigt model, image-processing, shaking table experiments, seismic gap.

1. INTRODUCTION

In countries located in earthquake zones, especially in big cities, as in the past, most buildings constructed today are built adjacently due to subdivisions and city planning works. The width of the seismic gap, which must be provided between existing or new adjacent buildings, is of

Note:

- This paper was received on December 15, 2021 and accepted for publication by the Editorial Board on April 14, 2023.
- Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2023.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1287522>

1 Istanbul University-Cerrahpasa, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey
Dogus University, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey

cagla.sekerici@ogr.iuc.edu.tr - csekerici@dogus.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-7070-1804>

2 Istanbul University-Cerrahpasa, Department of Civil Engineering, Istanbul, Turkey
edamci@iuc.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-2295-1686>

great importance. While designing and analyzing the buildings, the effect on adjacent buildings is generally not considered in cases where the widths foreseen for the seismic gap are insufficient or not available. Modern seismic codes have regulations for seismic gap sizes to overcome this problem. Miari et al. [1], in their review article, summarized the criteria regarding the seismic gap in current seismic codes and investigations on this subject. In addition to these codes, there are restrictions for seismic gaps in the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC 2018) [2]. In this code, it is foreseen that the minimum seismic gap size for buildings up to 6 m in height should be at least 30 mm and at least adding 10 mm for each 3 m height. In addition, an empirical relation is presented over the calculated displacements of adjacent structures, and a limitation is introduced. Pounding, which could occur due to an insufficient seismic gap, is an issue that needs to be examined in terms of structural dynamics and earthquake engineering. For this purpose, there are several numerical but limited experimental studies in the literature on subjects such as the pounding force between two adjacent structures, the number of pounding, the moment of collision, and the determination and investigation of the size of the seismic gap [3-8, 10].

Studies in the literature for simplified structural models, pounding models only include numerical models created by using spring or spring-damper elements together. The main ones of these numeric models are elastic impact element, Kelvin-Voigt (Linear Viscoelastic), Modified Kelvin-Voigt, Non-Linear Viscoelastic, Hertz-damp, and Sears Models. These models are based on determining the force applied to the masses in numerical analysis by controlling the displacement or velocity difference [3, 10–14]. For this purpose, Anagnostopoulos [3] modelled adjacent buildings with single-degree-of-freedom and examined the pounding using spring-damper elements. In some earthquakes, it was revealed that while the damage was minor in the intermediate buildings, the percentage of destruction was higher in the corner buildings. Kumbasar [4] studied adjacent structures which have stories at the same level and considered these structures as shear frames for simplification. Only the spring element is used for the pounding model, and the damping is not taken into consideration. In the established model, the effects of collisions on structures with different periods according to the change in mass ratios were examined under the El Centro earthquake. In order to reduce the effects of a collision, it was suggested to use deformable elements in the earthquake joints. Zhang et al. [5] created a mechanical model with the matrix transfer method and compared the numerical data obtained with different analysis programs. They examined the pounding force, the number of pounding, the moment of pounding, and the structural displacements between two adjacent structures. They concluded that the pounding effects are sensitive to the change in peak ground acceleration and the size of the gap between buildings. Besides the pounding models used in numerical analysis, studies on the effects of seismic gaps between adjacent buildings, considering different parameters, were carried out by Saxena et al. [6]. In addition, Khatami et al. [7, 8], in their studies, investigated the effect of seismic gaps in the presence of lateral stiffness irregularity, soft stories, and regular and irregular adjacent structures using an experimental model of Takabatake et al. [9], which had two frames with single span and four-story. In another study, the adjacent buildings were modelled as multi-degree systems consisting of lumped masses, and the pounding was simulated using five different earthquake motions. Moreover, it was found that the collision caused high stresses when the structures had different heights, periods, or masses to a large extent [10]. In Jankowski's studies [11, 12], using spring and damper, the spring force was calculated using a non-linear viscoelastic pounding model to

simulate structural collision more precisely during earthquakes. The restitution coefficient formulation, which is a parameter related to the damping ratio, was obtained and verified. Miari and Jankowski [15] subjected two single-story steel building models to shaking table tests under scaled earthquakes for different seismic gaps and different soil types according to ASCE 7-10. In the study, they examined the effect of gap size and soil type on pounding by comparing the peak acceleration values in the models under different cases experimentally [15].

Athanassiadou et al. [16] parametrically examined the phase difference and pounding of adjacent single-degree-of-freedom systems with similar or different dynamic properties and revealed that rigid structures, like corner structures, are more affected. Naserkhaki et al. [17] used spring-damper elements for adjacent structures and showed that when the height of buildings differs significantly, the tall building is almost unaffected, while the short building is affected by the collision.

Luo et al. [18] compared the situations where dampers are connected and not connected between two adjacent buildings. As a result of the experiments with the shaking table, it is stated that the distance between the structures can be 30 cm under moderate and strong earthquakes and 24 cm under rare earthquakes in case the adjacent structures are not connected with the damper. In the case of the damper used, it was suggested that the seismic gap could be 10 cm under various performance conditions. Khan et al. [19] studied the seismic response of two adjacent fifteen- and ten-story buildings connected by a viscous damper. As a result of combining the structures of different frequencies with dampers, they showed that the earthquake-induced responses of the two buildings were reduced. In another study, passively controlled viscous dampers were used to reduce the response of explosion-induced vibrations in adjacent structures. It is stated that these dampers are efficient, and in different structures, the peak response is almost equivalent for bounded or unbounded structures [20].

Miari et al. [1], in their review article, studied previous research, including earthquake-induced structural pounding aiming to understand better the pounding phenomenon for the identification of parameters, soil interaction issues, mitigation measures, and recommended directions for future research studies on structural pounding. In one of their recommendations, they emphasized further studies to determine the effect of the impact stiffness and the coefficient of restitution on impact modelling for quantifying the parameters as indicated.

In this study, shake table experiments have been carried out with an innovative approach using the image processing technique to implement and determine pounding parameters. Numerical analyses of two adjacent three-story structure models were performed using the Kelvin–Voigt pounding model, one of the most common numerical pounding models. The numerical and experimental results are compared by performing shaking table tests under harmonic excitation and earthquake loads.

2. NUMERICAL METHOD FOR POUNDING ANALYSIS

In adjacent building models, the pounding effect is generally considered as the force generated in the pressure spring acting on the adjacent structure(s) as a reaction force by

controlling the displacement. Figure 1 shows a schematic representation of two 3-story shear frames and the distribution of Kelvin-Voigt models (Figure 2) between adjacent building models. The equations of motion at the moment of collision for these two shear frames are given separately in Equations (1) and (2).

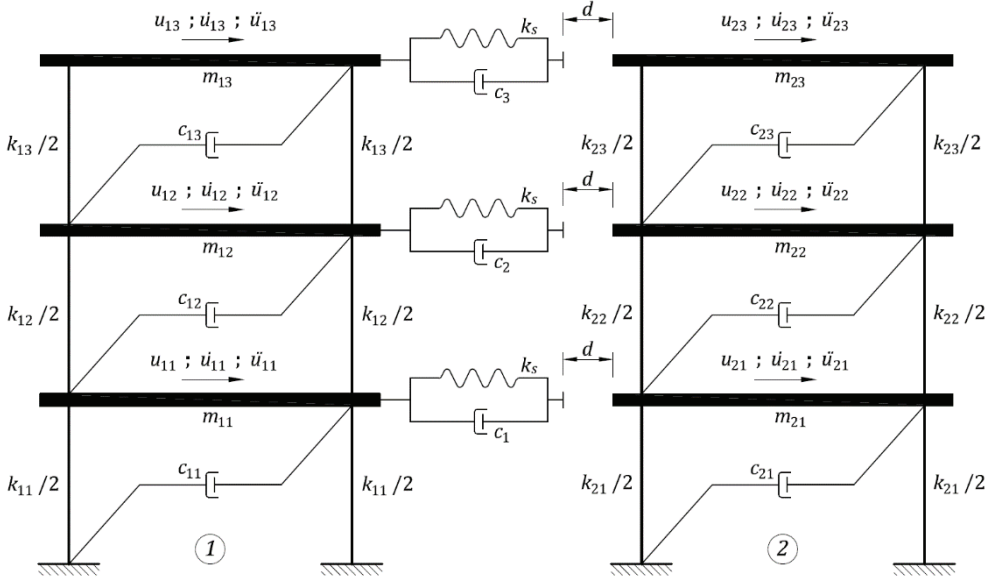


Figure 1 - Schematic representation of 3-story shear frames and distribution of Kelvin-Voigt Models

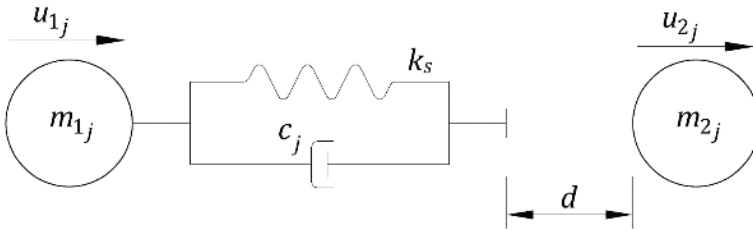


Figure 2 - Kelvin-Voigt Model [13]

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{U}}_1 + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{U}}_1 + \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{F} = -\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{U}}_g \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{U}}_2 + \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{U}}_2 + \mathbf{K}_2 \mathbf{U}_2 + \mathbf{F} = -\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{U}}_g \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{12} & 0 \\ 0 & 0 & m_{13} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{12} & -k_{12} & 0 \\ -k_{12} & k_{12} + k_{13} & -k_{13} \\ 0 & -k_{13} & k_{13} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} a_{10}m_{11} + a_{11}(k_{11} + k_{12}) & -a_{11}k_{12} & 0 \\ -a_{11}k_{12} & a_{10}m_{12} + a_{11}(k_{12} + k_{13}) & -a_{11}k_{13} \\ 0 & -a_{11}k_{13} & a_{10}m_{13} + a_{11}k_{13} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} m_{21} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{23} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} k_{21} + k_{22} & -k_{22} & 0 \\ -k_{22} & k_{22} + k_{23} & -k_{23} \\ 0 & -k_{23} & k_{23} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} a_{20}m_{21} + a_{21}(k_{21} + k_{22}) & -a_{21}k_{22} & 0 \\ -a_{21}k_{22} & a_{20}m_{22} + a_{21}(k_{22} + k_{23}) & -a_{21}k_{23} \\ 0 & -a_{21}k_{23} & a_{20}m_{23} + a_{21}k_{23} \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{11} \\ \ddot{u}_{12} \\ \ddot{u}_{13} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{U}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{11} \\ \dot{u}_{12} \\ \dot{u}_{13} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_2 = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{21} \\ \ddot{u}_{22} \\ \ddot{u}_{23} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{U}}_2 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{21} \\ \dot{u}_{22} \\ \dot{u}_{23} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{22} \\ u_{23} \end{bmatrix} \quad (6)$$

In Equations (1) and (2), \mathbf{M}_1 and \mathbf{M}_2 represent mass matrices, \mathbf{K}_1 and \mathbf{K}_2 stiffness matrices, and \mathbf{C}_1 and \mathbf{C}_2 damping matrices for shear frame models 1 and 2. Mass, damping, and stiffness matrices of the shear frames given by Model-1 and Model-2 are calculated by Equation (3) and Equation (4), respectively. With i representing the model number, the terms a_{i0} and a_{i1} in the damping matrices in Equations (3) and (4) are calculated according to Rayleigh Damping [21]. The vectors of acceleration ($\ddot{\mathbf{U}}_1$ and $\ddot{\mathbf{U}}_2$), velocity ($\dot{\mathbf{U}}_1$ and $\dot{\mathbf{U}}_2$), and displacement (\mathbf{U}_1 and \mathbf{U}_2) in Equations (1) and (2) are given in Equations (5) and (6). $\ddot{\mathbf{U}}_g$ in Equations (1) and (2) represents the ground acceleration.

At the moment of collision, $-\mathbf{F}$ and $+\mathbf{F}$ forces act on the masses m_{1j} and m_{2j} at the floor levels, respectively, with j representing the floor number in both models. The force vector \mathbf{F} given in Equation (7) includes the spring forces acting on the floor levels of the shear frames. The calculation of the pounding forces and the necessary boundary conditions are given in Equation (8). The pounding force to be used in the numerical analysis of the Kelvin-Voigt Model depends on two parameters, spring stiffness (k_s) and damping (c_j), as seen in Equation (8). Anagnostopoulos [3], for the simplified model of several adjacent structure analyses, uses the impact element stiffness as 0.01, 0.1, and 1.0 times the initial stiffness of an idealized

single-degree-of-freedom structure system. As seen in Equation (9), damping c_j varies depending on the spring stiffness k_s , damping ratio ξ_s , and m_{ij} story masses. The damping rate is related to a coefficient of restitution r , given in Equation (10). When $r = 1$, the damping ratio is $\xi_s = 0$, and the Model behaves linearly elastic, and when $r = 0$, the damping ratio takes the value $\xi_s = 1$. Khatiwada et al. [14] showed that the coefficient r could be taken as 0.4.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{1j} = F_{2j} = 0 \\ F_{1j} = F_{2j} = k_s (u_{1j} - u_{2j} - d) + c_j (\dot{u}_{1j} - \dot{u}_{2j}) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} u_{1j} - u_{2j} - d \leq 0 \\ u_{1j} - u_{2j} - d > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$c_j = 2\xi_s \sqrt{k_s \frac{m_{1j}m_{2j}}{m_{1j} + m_{2j}}} \quad (9)$$

$$\xi_s = \frac{-\ln r}{\sqrt{\pi^2 + (\ln r)^2}} \quad (10)$$

In this study, numerical analyses were performed by the Newmark Mean Acceleration Method [21] using Matlab [22] program. Equations (11) and (12) are first calculated using the Newmark Mean Acceleration Method to obtain pounding forces under harmonic excitation and strong ground motion. Then, the spring damping ratio is calculated according to Equation (10) and its damping by Equation (9). At the beginning of the n^{th} time step, pounding forces are taken as $F_{ij} = 0$. The calculations are repeated through Equations (13) - (16) and analyzed in the time history. After calculating Equation (15), a contact check is performed to determine the pounding force at each time step. If any contact exists at any floor level, each floor's pounding force is calculated according to Equation (8), and then Equation (13) is repeated. At this stage, the displacement, velocity, and acceleration calculations are repeated for the $(n+1)^{\text{th}}$ step. The same operations are repeated throughout the time history by moving to the next time step $(n+2)$.

$$\ddot{\mathbf{U}}_{i,0} = \mathbf{M}_i^{-1} (\mathbf{P}_{i,0} - \mathbf{K}_i \mathbf{U}_{i,0} - \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{U}}_{i,0}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{i,1} &= \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M}_i + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \mathbf{C}_i; & \mathbf{a}_{i,2} &= \frac{1}{\beta \Delta t} \mathbf{M}_i + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \mathbf{C}_i; \\ \mathbf{a}_{i,3} &= \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{M}_i + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C}_i; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{i,n+1} = \mathbf{P}_{i,n+1} + \mathbf{a}_{i,1} \mathbf{U}_{i,n+1} + \mathbf{a}_{i,2} \dot{\mathbf{U}}_{i,n} + \mathbf{a}_{i,3} \ddot{\mathbf{U}}_{i,n} \mp \mathbf{F}_{n+1} \quad (13)$$

$$\mathbf{U}_{i,n+1} = \hat{\mathbf{K}}_i^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{i,n+1} \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{i,n+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (\mathbf{U}_{i,n+1} - \mathbf{U}_{i,n}) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{\mathbf{U}}_{i,n} + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{U}}_{i,n} \quad (15)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_{i,n+1} = \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)^2} (\mathbf{U}_{i,n+1} - \mathbf{U}_{i,n}) - \left(1 - \frac{\gamma}{\beta \Delta t}\right) \dot{\mathbf{U}}_{i,n} - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) \ddot{\mathbf{U}}_{i,n} \quad (16)$$

3. EXPERIMENTAL STUDY

Two 3-story building models shown in Figure 1 were built to compare with the results obtained from the numerical analysis. The total height of the two identical building models designed is 1000 mm. 8 mm thick Medium-Density-Fiberboard (MDF) material was used for the floor slabs, and M6 rods were used for the columns. Slab areas are 200x200 mm². The ends of the columns were connected with fiber nuts at the bottom and top points of the slabs, and it was tried to ensure the fixed-end connection between the slab and the column to achieve the ideal shear frame behavior. In order to create a pounding on two identical building models, their periods were changed by adding additional mass to the stories of Model-1.

Within the scope of the study, only the cases where the floor alignments are at the same level were examined (Figure 3). Representing the situation where the seismic gaps are insufficient, the two structural models are positioned adjacently on the shaking table SARSAR [23]. Experimental studies are first carried out under harmonic excitation and then earthquake simulations. For harmonic experiments, free vibration and forced vibration tests with a shaking table were carried out to determine the dynamic characteristics of each structural Model, such as period, mode shape, and damping ratio.

In earthquake simulations, it is necessary to scale the ground motion according to the capacities of the shaking tables in a way that preserves the peak accelerations and spectrum characteristics. Therefore, considering the displacement-time record of the Düzce earthquake used in the experiments and the displacement limit (± 75 mm) of the shaking table SARSAR, the motion data was scaled at 1/15. Scaling was performed with equations 17-19 using the method proposed by Harris and Sabnis [24]. Here λ_L , λ_T , λ_A represent displacement, time, and acceleration scales, respectively. In this scaling, by dividing the earthquake time history by 15^{1/2}, the characteristics of the peak accelerations and response spectrum can be preserved. In another way, this scaling means that considering the positions of the measured periods of the experimental models Model-1 ($T_1= 0.233$ s) and Model-2 ($T_1= 0.138$ s) on the scaled spectrum, they represent actual structures with first periods of $0.233 \times 15^{0.5} = 0.90$ and $0.138 \times 15^{0.5} = 0.53$ seconds.

$$\lambda_A = \frac{\lambda_L}{\lambda_T^2} = 1 \quad (17)$$

$$\lambda_L = \lambda_T^2 \quad (18)$$

$$\lambda_T = \sqrt{\lambda_L} \quad (19)$$

White Light-Emitting-Diode (LED) markers are placed on the stories of each Model and shaking table to obtain motion information with the image processing technique. Each video frame was processed separately to track the white LEDs. In order to distinguish the white LEDs from the other objects in the video frames, the B component of the RGB video frames, considered as the first step, was converted to greyscale and filtered according to the brightness threshold value of $I=0.99$. Pixels above the threshold value were converted to white, and those below the threshold value were converted to black. Different filtering functions in MATLAB [22] were used to convert the unrelated white pixels to black, if any exist in the video frame, except for the LEDs to be tracked. In addition, to determine the coordinates of the center of the LEDs, a median filter was applied to soften the geometry of the white LED pixel areas. By repeating the same operations for each frame, the displacement-time history of the LEDs is obtained.



Figure 3 - General view of the experimental setup (left) and LED markers placed on the floors (right)

The displacements in pixels of the white LEDs, tracked through video recordings, were recorded in the time domain. The obtained pixel-time histories were used to determine the mode shapes and dominant frequencies of the building models with Fast Fourier Transform (FFT). In numerical analyses, the initial lateral stiffness for each story ($4(12EI_c/L^3)$) is calculated using M6 rods' minor thread diameter (4.77 mm) as 6.83 kN/m where the initial flexural stiffness of columns was taken as $EI_c=5.4 \text{ Nm}^2$. By the obtained experimental results, taking into consideration the first mode resonance frequency (f_1) of each structure model, the model update procedure was applied to each numerical Model. Modifying the flexural stiffness of columns ensured that the numerical models and the experimental results were compatible. According to the experimental results, the final lateral stiffness of Model-

1 and Model-2 are calculated as 5.92 kN/m and 5.14 kN/m, respectively. Masses, initial, and final flexural stiffnesses compatible with the test models are given in Table 1. Before each experiment, due to changes in ambient conditions such as temperature and humidity, possible changes in the modal frequencies of the models are checked from video recordings by FFT.

Table 1- Masses and stiffnesses of the test models

Story	Model-1 $f_1= 4.28 \text{ Hz}, \zeta= \%1.05$			Model-2 $f_1= 7.22 \text{ Hz}, \zeta= \%1.07$		
	Mass [kg]	Initial EI_c [Nm ²]	Final EI_c [Nm ²]	Mass [kg]	Initial EI_c [Nm ²]	Final EI_c [Nm ²]
1	1.7	5.4	4.6	0.56	5.4	4.1
2	1.7	5.4	4.6	0.56	5.4	4.1
3	1.6	5.4	4.6	0.45	5.4	4.1

Videos were recorded at 100, 500, and 1000 fps using a Sony RX100M5 camera, and the pounding durations were determined at recording rates of 10, 2, and 1 millisecond, respectively, by image processing to observe dynamic behavior and pounding. Data obtained by these recording rates were compared among each other, and it was concluded that they were compatible. The experimental studies were carried out with a recording rate of 100 fps.

In addition, the accelerations were measured and recorded with ARDUINO-based low-cost accelerometers at the top floor level during simulations under earthquake to observe pounding. These accelerometers are manufactured using a mems type MPU6050 sensor and ARDUINO NANO.

4. COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESULTS

The image processing results obtained by the shaking table experiments were compared with the numerical results of the shear frames, where pounding forces were determined by the Kelvin-Voigt model under the effect of harmonic excitation and strong ground motion. In Figure 4, the displacement responses obtained from the 3rd floor of both models by image processing of the video recordings taken under harmonic excitation with ± 2 mm amplitude and 6 Hz frequency are given. For comparison purposes, cases for the different spring stiffness and damping ratios of the Kelvin-Voigt model are considered in the numerical analyses, and the optimum spring stiffness and damping ratio for both building models are investigated. In numerical simulations, based on the initial shear stiffness ($k= 6.83$ kN/m) of a single story, the cases where the ratio of spring stiffness k_s to shear stiffness k is considered as 10, 5, 1, 0.1 times in the dashpot model and these cases are used for the comparison with the coefficient of restitution r which is taken as 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 and 0.2. Figures 5-8 show comparisons of the numerical analyses to the experimental results using different spring stiffnesses and coefficient of restitution r . Sub-space-plots (SSP) were created to examine the relationship between experimental and numerical results for different spring stiffnesses. In each case, the relationships due to the variation of coefficient of restitution r are given in

Figures 9-12. The errors caused by the amplitude and phase differences can be easily examined in these graphs. In Figure 13, where the spring stiffness of the Kelvin-Voigt Model is taken equal to the initial story shear stiffness, $k_s = k = 6.83 \text{ kN/m}$ and compared to experimental results is interpreted as the most acceptable case for both models. For Model-1 and Model-2, when the r coefficient is taken as 0.2 or 0.4, numerical results were determined to be close to the experimental results. Regarding these findings, variation of k_s according to coefficients of restitution r for 0.2 and 0.4 are given in Figures 13 and 15. When the SSP graphs given in Figures 14 and 16 are examined, it is seen that acceptable results are obtained in cases where the spring stiffness is k , $5k$, or $10k$ according to these coefficients of restitution.

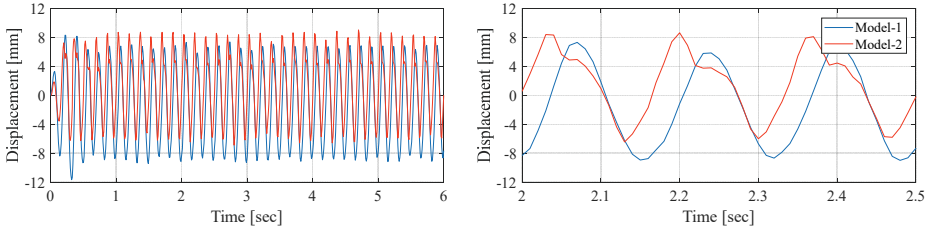
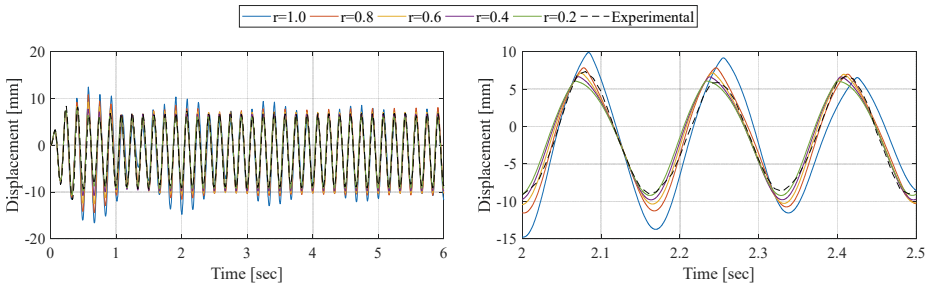
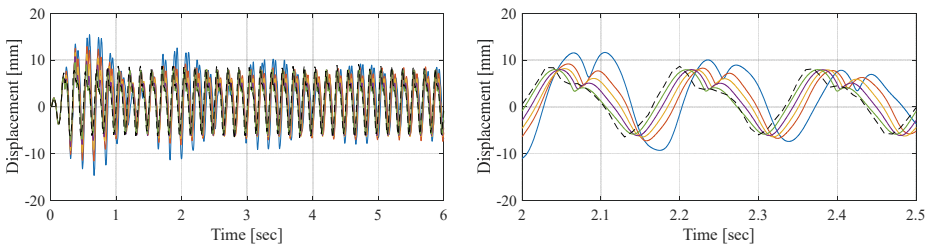


Figure 4 - Relative displacements obtained from the 3rd floor of both models by image processing ($\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz}$). Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).



a) Model-1



b) Model-2

Figure 5 - Relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b) for the case $k_s = 10k$ ($\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz}$). Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

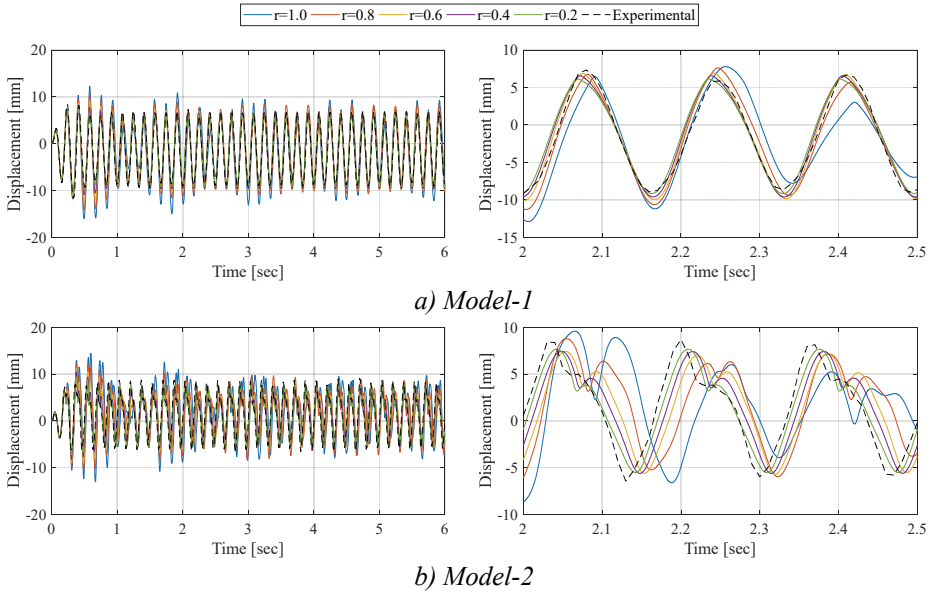


Figure 6 - Relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b) for the case $k_s=5k$ (± 2 mm @ 6 Hz). Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

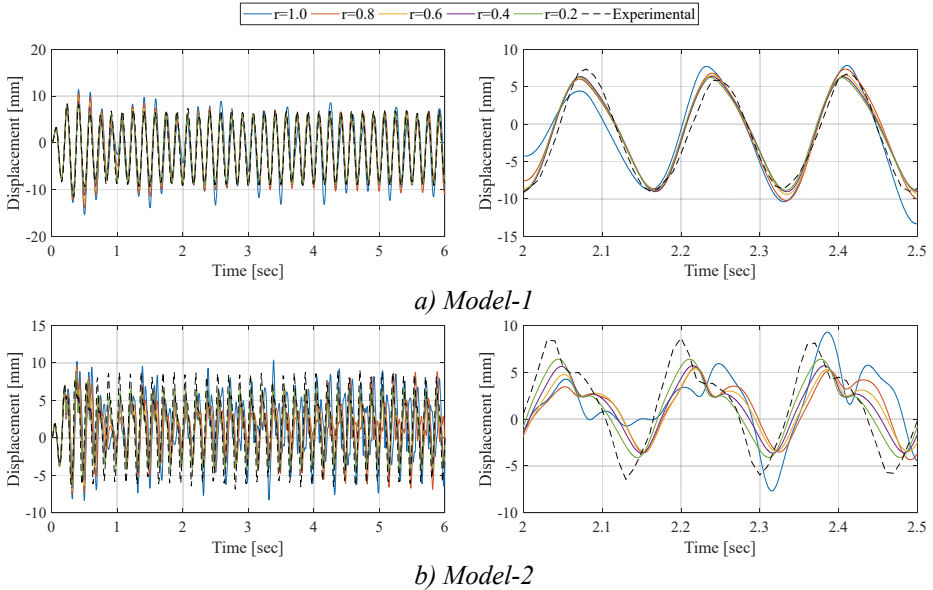
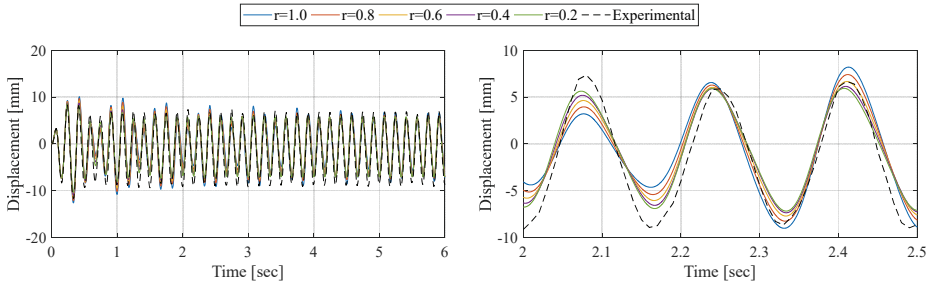
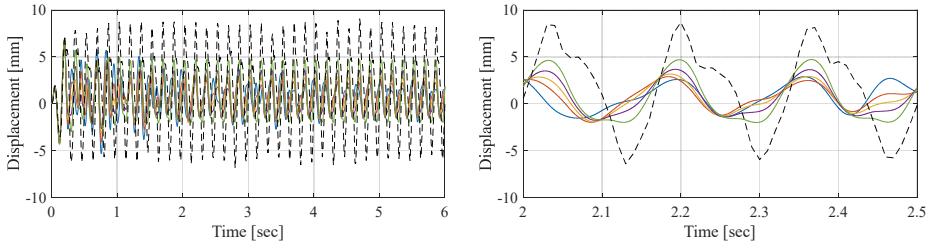


Figure 7 - Relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b) for the case $k_s=k$ (± 2 mm @ 6 Hz). Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

The reasons why the results do not match exactly, even in the most favorable situation, could be explained as; (i) that an ideal shear frame could not be obtained in the experimental structural models, (ii) surface defects in colliding structure stories causing local contact rather than surface contact in pounding, (iii) the contact surface changes during a collision due to possible torsional effects in 3D structural models.



a) Model-1



b) Model-2

Figure 8 - Relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b) for the case $k_s=0.1k$ (± 2 mm @ 6 Hz). Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

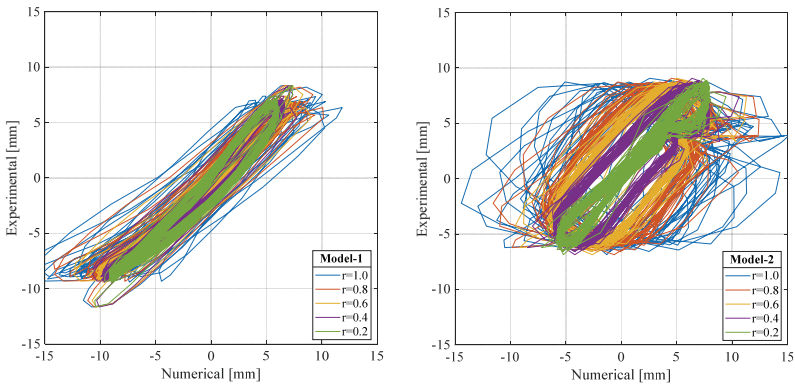


Figure 9 - SSP of experimental and numerical simulations for $k_s=10k$ (± 2 mm @ 6 Hz) with different coefficients of restitution r .

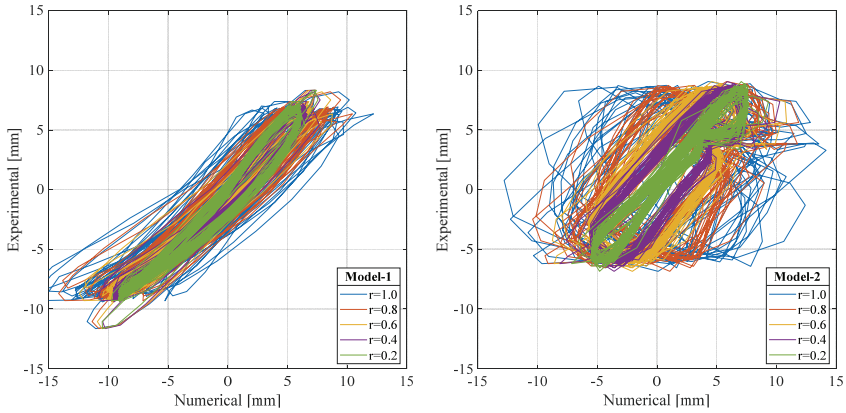


Figure 10 - SSP of experimental and numerical simulations for $k_s=5k$ (± 2 mm @ 6 Hz) with different coefficients of restitution r .

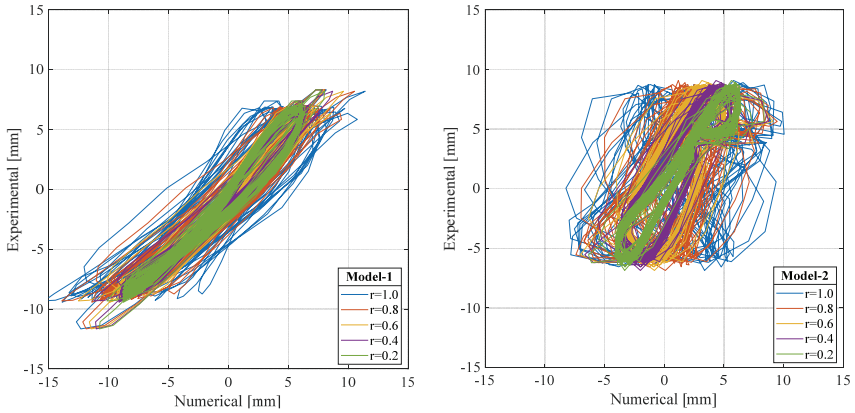


Figure 11 - SSP of experimental and numerical simulations for $k_s=k$ (± 2 mm @ 6 Hz) with different coefficients of restitution r .

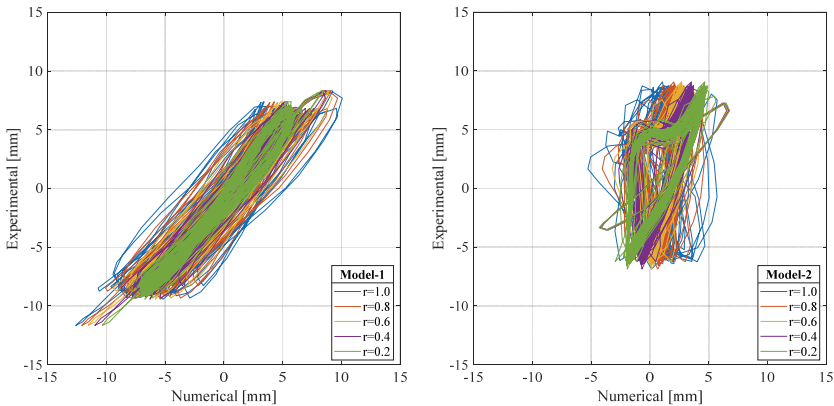


Figure 12 - SSP of experimental and numerical simulations for $k_s=0.1k$ (± 2 mm @ 6 Hz) with different coefficients of restitution r .

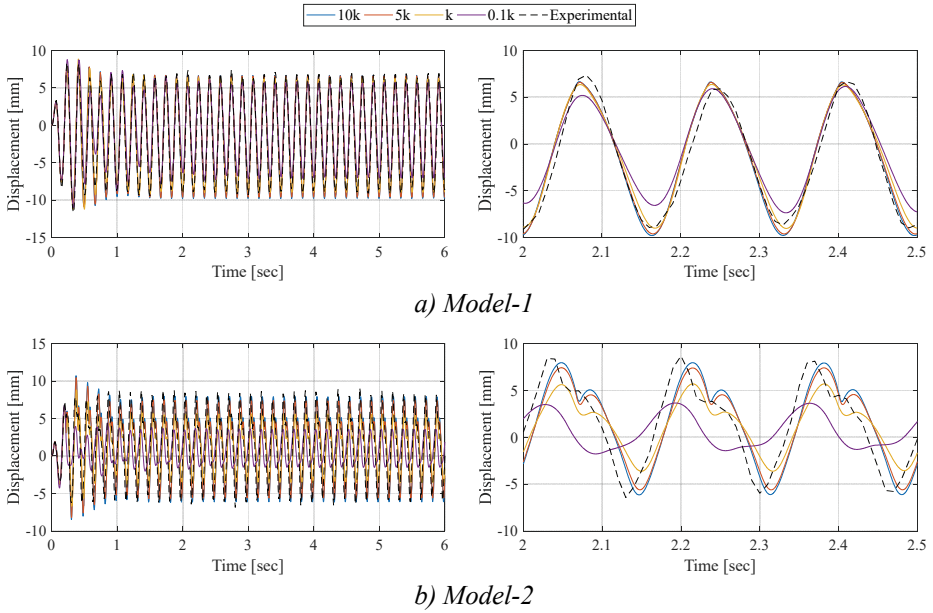


Figure 13 - Comparison of the effect of spring stiffness on relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b), for $r = 0.4 (\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz})$. Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

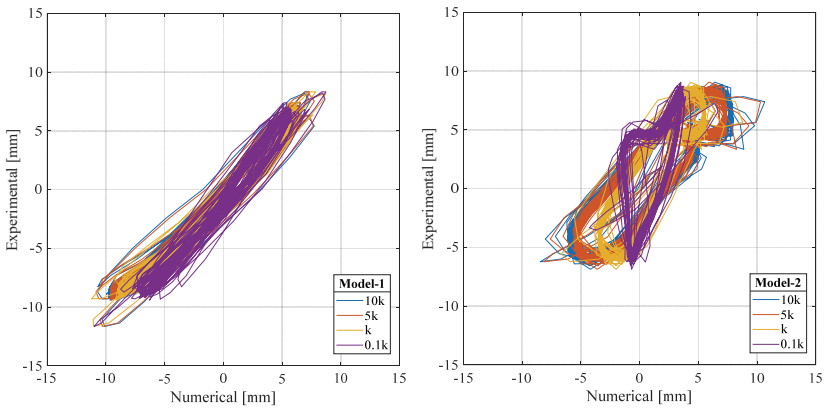


Figure 14 - SSP of experimental and numerical simulations for $r = 0.4 (\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz})$ with different k_s .

In addition, the displacement results obtained by image processing under $\pm 1 \text{ mm}$ harmonic motion at 4.613 Hz , which is the achieved frequency by the shake table for near the resonance frequency of Model-1, are given in Figure 17 for Model-1 and Model-2. Numerical analysis and experimental results examining the spring stiffness by accepting the coefficient of

restitution as $r=0.4$ are given in Figure 18. When the numerical analysis results under harmonic excitation are examined, it is seen that the ideal results are obtained where the ratio of spring stiffness to shear stiffness (k_s/k) is 1, 5, or 10.

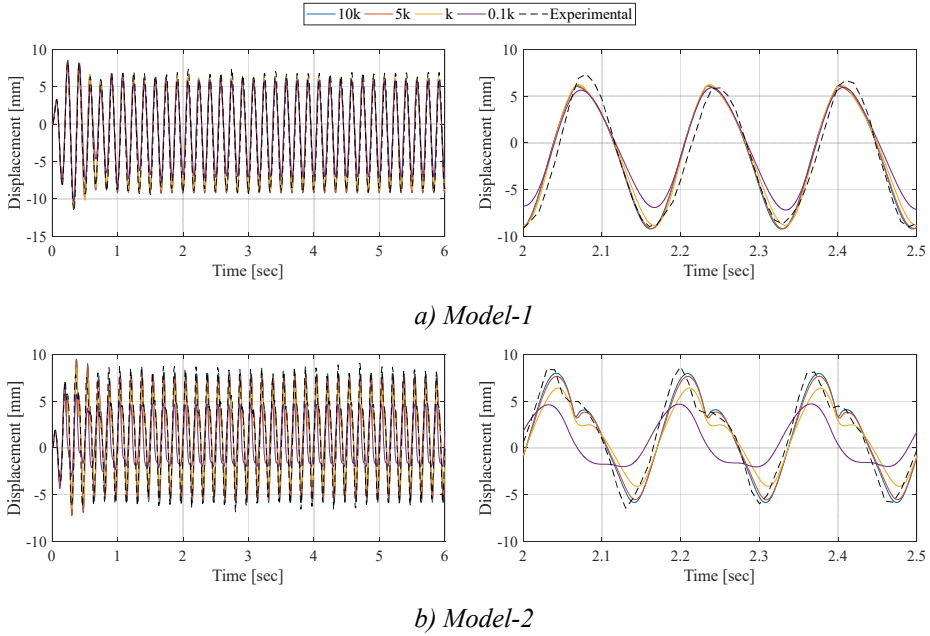


Figure 15 - Comparison of the effect of spring stiffness on relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b), for $r= 0.2 (\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz})$. Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

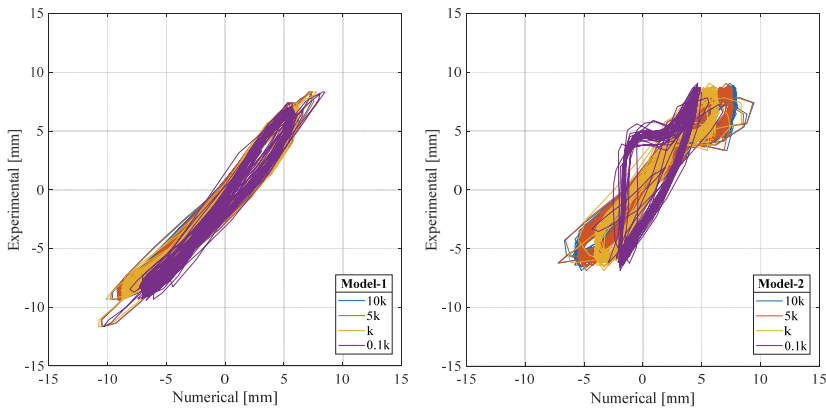


Figure 16 - SSP of experimental and numerical simulations for $r= 0.2 (\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz})$ with different k_s .

In the numerical analysis, the force $F_{13}=F_{23}$, which occurs during pounding between 3rd floor masses, is given in Figure 19, and it is calculated around 28 N at the maximum when $r=0.4$ and the spring stiffness is equal to the shear stiffness ($k_s=k=6.83$ kN/m). It was calculated in numerical studies that the contact time during pounding varies between approximately 20-25 milliseconds, while in experimental studies, this period was observed between 50-60 milliseconds (Figure 4).

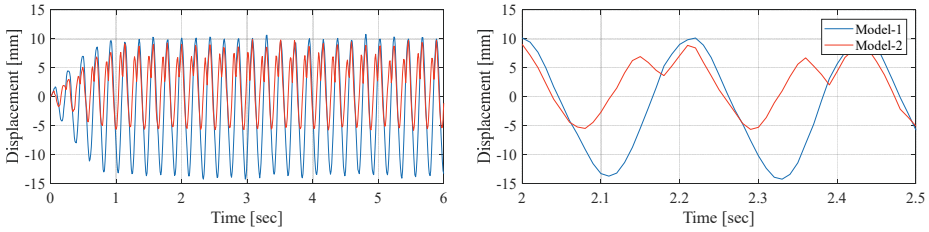
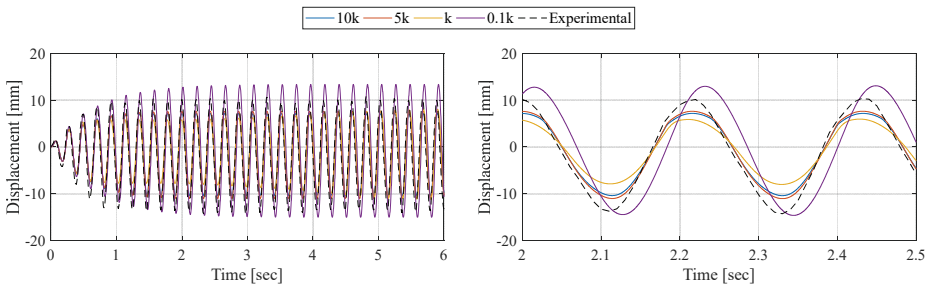
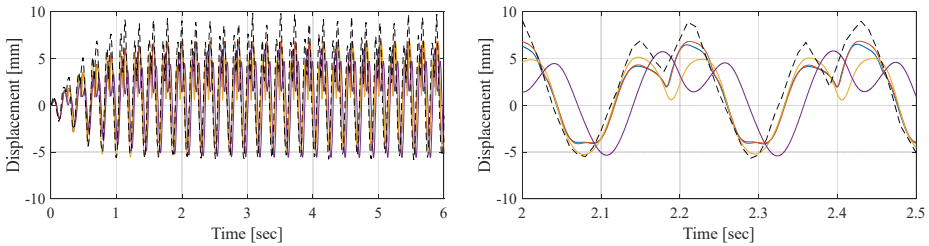


Figure 17 - Relative displacements obtained from the 3rd floor of both models by image processing (± 1 mm @ 4.613 Hz) Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).



a) Model-1



b) Model-2

Figure 18 - Comparison of the effect of spring stiffness on relative displacement-time histories of Model-1 (a) and Model-2 (b), for $r=0.4$ (± 1 mm @ 4.613 Hz). Displacement-time series of both models (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

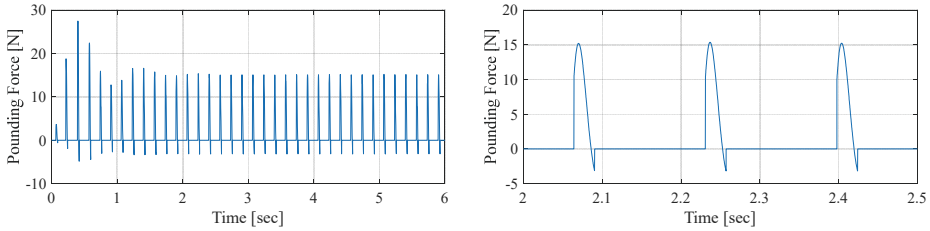
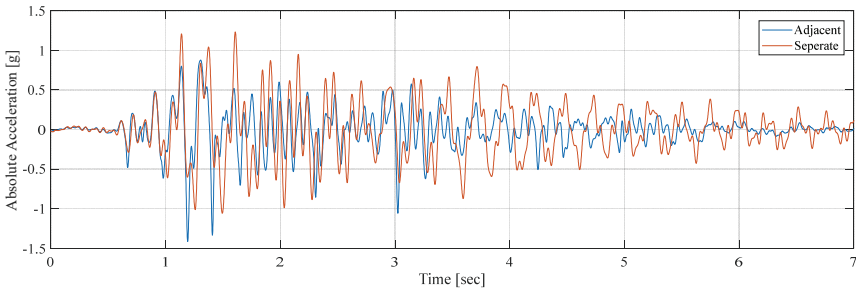
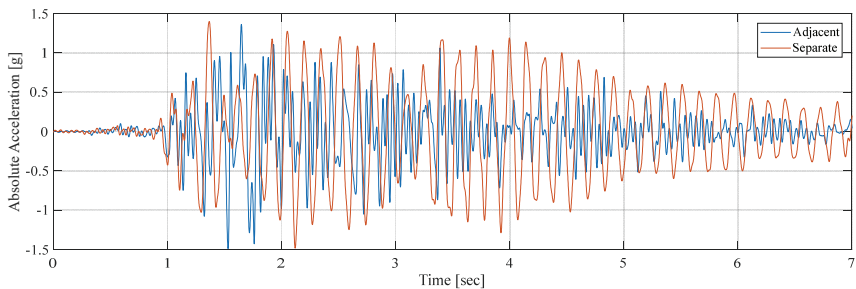


Figure 19 - Pounding forces $F_{13} = F_{23}$ for $r = 0.4$ and $k_s = k (\pm 2 \text{ mm @ } 6 \text{ Hz})$ in time series (left), and the displacements for 2-2.5 seconds time interval (right).

In order to examine the pounding under the earthquake, shaking table tests were carried out using the 1999 Düzce earthquake record. Displacements were scaled to 1/15, and to keep peak accelerations the same, time was scaled to $15^{1/2}$, considering the $\pm 75 \text{ mm}$ displacement capacity of the shaking table [23]. In the earthquake simulation, acceleration and video recording were taken, and the cases where the models are adjacent and separate were examined comparatively. In Figure 20, the filtered acceleration responses of the 3rd floor are given for both models. It was seen that while the pounding increases the acceleration responses for Model-1, the acceleration responses decrease for Model-2 in the time history. The peak acceleration obtained for Model-1 increased from 1.23g to 1.41g by 14.63%. For Model-2, the peak acceleration remained the same at 1.48g.



a) Model-1



b) Model-2

Figure 20 - Comparison of acceleration responses on Model-1 (a) and Model (2) for adjacent and separated cases

Appropriate coefficient of restitution (r) and stiffness ratio (k_s/k) is investigated by relative root-mean-square (RMS) error [25] of numerical and experimental displacement time-histories using Equation (20).

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\sqrt{(1/N)\sum_{n=1}^N (x_d[n] - x_e[n])^2}}{\sqrt{(1/N)\sum_{n=1}^N (x_e[n])^2}} \times 100 \tag{20}$$

The relative RMS errors, ε_{rel} calculated with Equation (20) between the numerical (x_d) and the experimental (x_e) displacements are listed in Tables 2 and 3 for Model-1 and Model-2, respectively. Minimum relative RMS errors of 42.41% and 52.62%, which are the most congruent results, are obtained for $k_s/k = 5$ at $r = 0.2$ and $r = 0.4$. Even though these values represent the best result, considering the SSPs obtained from harmonic tests, earthquake simulations with the combination of 1, 5, and 10 stiffness ratios with 0.2, 0.4, and 0.6 coefficients of restitution are also interpreted as acceptable. For this reason, an investigation is carried out on the peak displacements obtained from experimental results with numerical peak displacements considering these r and k_s/k combinations. The differences in peak displacement for Model-1 and Model-2 are listed in Table 4, where the peak experimental displacement for Model-1 is 13.21 mm at 1.40 sec and for Model-2 is 6.93 mm at 1.29 sec. Considering these comparisons, the most congruent results are obtained for $k_s/k = 1$ and $r = 0.2$. The r and k_s/k combinations, except those given in Table 4, were not taken into consideration because of the incompatible time intervals corresponding to peak displacements in the numerical analysis compared to the actual behavior observed by experiments.

Table 2 - Relative RMS error percentages of experimental and numerical analysis results depending on r and k_s/k ratios for Model-1

$k_s/k \backslash r$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.1	56.34	68.24	89.11	127.65	198.94
1	42.94	45.00	64.66	86.28	161.08
5	43.74	42.41	45.83	73.67	127.07
10	43.76	43.53	55.41	82.97	139.79

Table 3 - Relative RMS error percentages of experimental and numerical analysis results depending on r and k_s/k ratios for Model-2

$k_s/k \backslash r$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.1	80.08	92.07	114.25	150.70	252.73
1	54.63	57.79	82.34	124.31	241.61
5	52.62	54.57	65.62	107.32	198.68
10	53.65	57.21	67.94	104.42	181.04

Table 4 - Comparison of numerical peak displacements with experimental peak displacements for Model-1 and Model-2

k_s/k	Model-1 (13.21 mm, $t = 1.40$ sec)						Model-2 (6.93 mm, $t = 1.29$ sec)					
	$r=0.2$		$r=0.4$		$r=0.6$		$r=0.2$		$r=0.4$		$r=0.6$	
	Disp. [mm]	Diff. [%]	Disp. [mm]	Diff. [%]	Disp. [mm]	Diff. [%]	Disp. [mm]	Diff. [%]	Disp. [mm]	Diff. [%]	Disp. [mm]	Diff. [%]
1	13.31	-0.79	13.52	-2.37	13.59	-2.87	7.48	-7.93	7.89	-13.85	8.41	-21.36
5	13.37	-1.23	13.51	-2.31	14.18	-7.34	7.71	-11.35	8.22	-18.74	8.97	-29.44
10	13.39	-1.39	13.66	-3.41	14.14	-7.04	7.68	-10.90	8.19	-18.30	9.14	-31.89

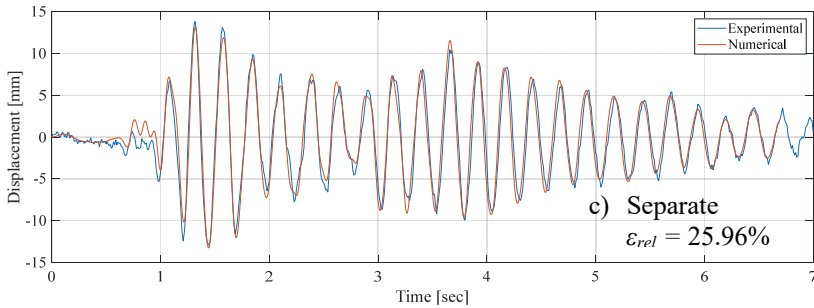
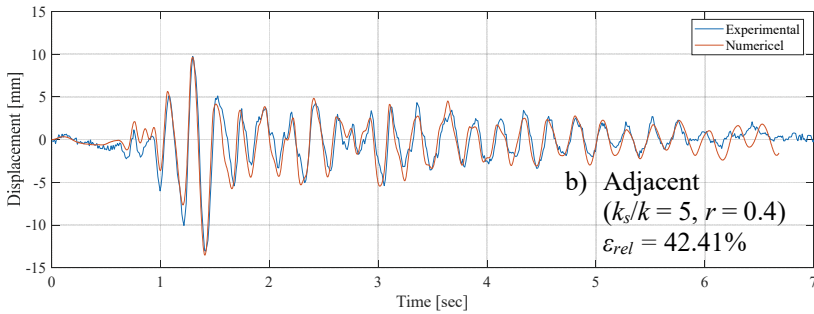
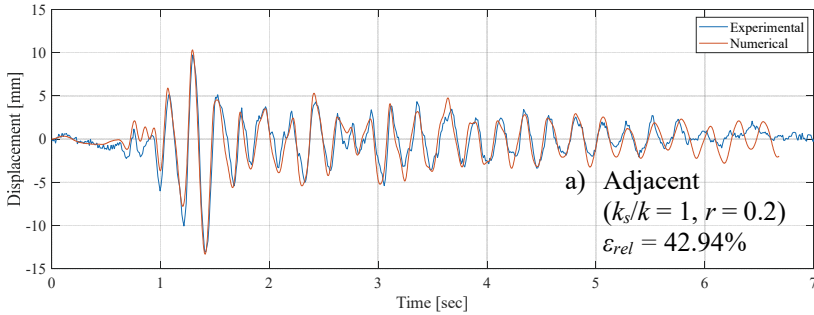


Figure 21 - Comparison of relative displacement-time histories of Model-1 for experimental and numerical results. Adjacent cases (a) and (b), separated case (c).

Time history analysis to observe pounding using the most congruent results plotted with experimental results are given in Figure 21 for Model-1 and Figure 22 for Model-2. Figures 21(a) and 22(a) show the adjacent state for $k_s/k = 1$ and $r = 0.2$ for Model-1 and Model-2, respectively. Figures 21(b) and 22(b) show the adjacent state for $k_s/k = 5$ and $r = 0.4$ for Model-1 and Model-2, respectively. For the case of the sufficient seismic gap, where the building models placed separately, experimental and numerical displacement time-history responses are shown in Figures 21(c) and 22(c). While peak displacements are 13.8 mm for Model-1 and 8.95 mm for Model-2, an apparent change in the time domain for the case of the insufficient seismic gap is observed under earthquake simulation. Peak displacements were decreased by 4.27% for Model-1 and 22.57% for Model-2.

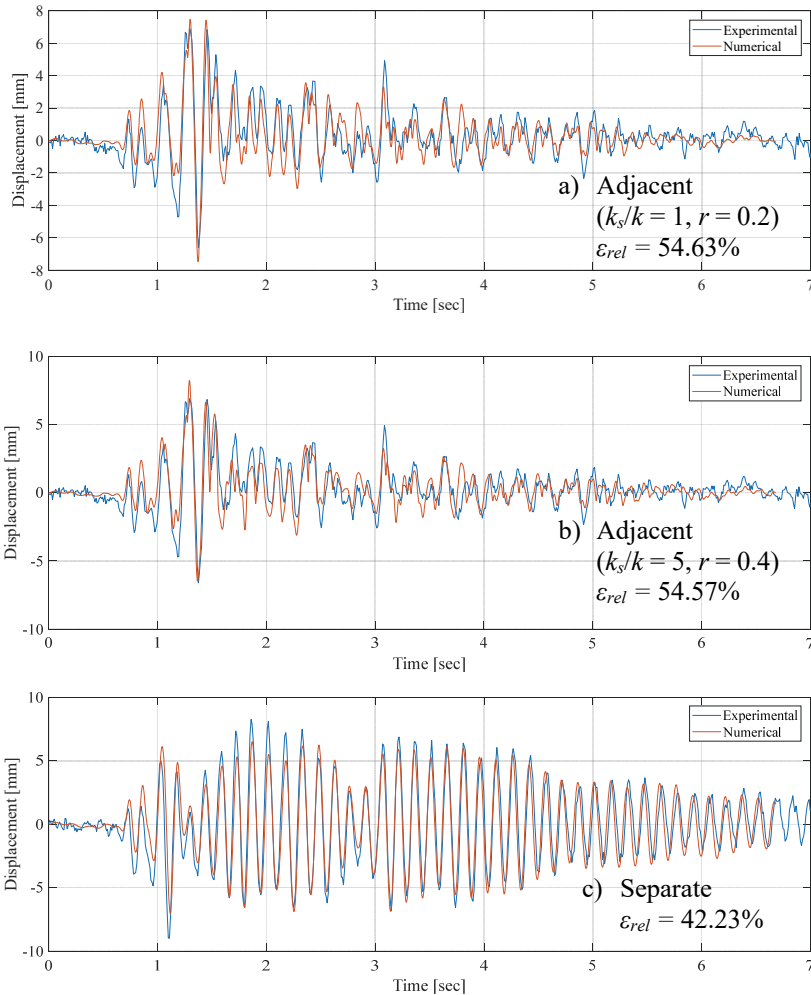


Figure 22 - Comparison of relative displacement-time histories of Model-2 for experimental and numerical results. Adjacent cases (a) and (b), separated case (c).

5. CONCLUSIONS

Performing collision effects with real-scale experiments is very difficult and require significant investments. Therefore, to determine the compatibility of numerical pounding models and parameters with the actual structure behavior, it is necessary to conduct experimental studies on scaled structure models in the laboratory environment.

In this study, numerical analyses using the Kelvin-Voigt pounding model and their comparison with the displacement responses obtained from the experiments carried out by the image processing technique are presented to examine the pounding in adjacent structures. Harmonic excitation tests are evaluated with relative RMS errors of earthquake simulations to investigate the performance of the Kelvin-Voigt pounding model. The results obtained in the study are as follows:

- With the experimental studies, it has been concluded that the pounding phenomena can be observed, and collision durations can be measured by video recordings with a frequency of 100 fps.
- When compared with the experimental results, it is seen that the Kelvin-Voigt pounding model gives relevant results under both harmonic and earthquake effects. Still, experimental studies are needed to determine the spring and damping parameters. It is beneficial to diversify such experimental studies due to the variety of parameters and manufacturing and material defects in the experimental models.
- Considering the complexity of the problem, it is clear that a perfect result in full compliance with the experiments cannot be obtained. Differences between the model analyzed under ideal conditions, and the experimental model also have an effect on the pounding simulations. This situation can also be observed in the time-history graphics obtained from earthquake tests on the models in separate cases. Even without the pounding effect, the relative RMS errors were obtained as 25.96% and 42.23% for Model-1 and Model-2.
- Tests for the cases when the coefficient of restitution is taken as $r = 0.2$ or 0.4 , and the ratio of spring stiffness to shear stiffness (k_s/k) is 1, 5, or 10 in harmonic excitations give the most congruent results with numerical simulations. In earthquake simulations, using the differences in peak displacement and relative RMS errors, it has been experienced that cases for $r = 0.2$ with $k_s/k = 1$, and $r = 0.2$ or $r = 0.4$ with $k_s/k = 5$ are interpreted as the most reasonable results. However, considering relative RMS errors of 42.41% and 52.62% (>30%) shows that the relation between experimental and numerical results has a poor concordance. Therefore, further experimental and numerical research is being recommended better to determine the effectiveness of the numerical pounding models.
- When adjacent and separate states are examined under the effect of the earthquake, it is observed that the peak displacements are decreased by 4.27% for Model-1 and 22.57% for Model-2 in the adjacent state compared to the separate state. Besides the peaks, a significant decrease in displacements is also observed in the time domain.

- In earthquake simulation, pounding phenomena caused an increase in peak acceleration by 14.63% for Model-1, while the peak acceleration on Model-2 remained the same for the adjacent state.
- The results obtained by experiments specific to building models investigated in this study, performed harmonic excitation and earthquake tests, show that the image processing technique is a successful method for examining the pounding phenomena. In particular, this technique can be used practically to update the finite element models of structures and to determine or verify the parameters such as spring stiffness and damping and the collision durations of mathematical pounding models.

Symbols

c_{1j}, c_{2j}	: Damping of the j^{th} story of Model-1 and Model-2
c_j	: Damping of the j^{th} story in Kelvin-Voigt Model
$\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$: Damping matrix of Model-1 and Model-2
E	: Elasticity modulus
EI_c	: Flexural stiffness
f_1	: First mode frequency of models
F_{ij}	: Pounding force for the j^{th} story of Model- i
\mathbf{F}	: Pounding force vector of Kelvin-Voigt Model
I_c	: Moment of inertia for column
I	: Brightness threshold value
i	: Model number index
j	: Model story index
k	: Story shear stiffness
k_s	: Spring stiffness
k_{1j}, k_{2j}	: j^{th} story shear stiffness of Model-1 and Model-2
$\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$: Stiffness matrix of Model-1 and Model-2
L	: Height of story for models
$\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$: Mass matrix of Model-1 and Model-2
m_{1j}, m_{2j}	: j^{th} story lumped masses of Model-1 and Model-2
n	: Step number for Newmark Mean Acceleration Method and time-history
N	: Total number of samples
r	: Coefficient of restitution

T_1	: First mode period of models
u_{1j}, u_{2j}	: j^{th} story displacement of Model-1 and Model-2
$\mathbf{U}_1, \dot{\mathbf{U}}_1, \ddot{\mathbf{U}}_1$: Vectors of displacement, velocity, and acceleration for Model-1
$\mathbf{U}_2, \dot{\mathbf{U}}_2, \ddot{\mathbf{U}}_2$: Vectors of displacement, velocity, and acceleration for Model-2
$\ddot{\mathbf{U}}_g$: Ground acceleration
x_e	: Experimental displacement
x_d	: Numerical displacement
Δt	: Timestep
β	: Parameter in Newmark's method
γ	: Parameter in Newmark's method
ε_{rel}	: Relative root mean square error
ζ	: Damping ratio of Model-1 and Model-2
ζ_s	: Damping ratio of Kelvin-Voigt model
λ_A	: Acceleration scale
λ_L	: Displacement scale
λ_T	: Time scale

References

- [1] Miari, M., Choong, K. K., Jankowski, R., Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 135-150, 2019. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.02.024.
- [2] Turkish Building Earthquake Code (TBEC). Turkish Ministry of Environment and Urbanisation, Ankara, 2018.
- [3] Anagnostopoulos, S. A., Pounding of buildings in series during earthquakes, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16(3), 443-456, 1988. doi: 10.1002/eqe.4290160311.
- [4] Kumbasar, N., Collision Problem of Shear Frames During Earthquakes (in Turkish), *Teknik Dergi*, 4(16), 609-617, 1993.
- [5] Zhang, Y., Ding, J., Zhuang, H., Chang, Y., Chen, P., Zhang, X., Xie, W., Fan, J., Pounding between Adjacent Frame Structures under Earthquake Excitation Based on Transfer Matrix Method of Multibody Systems, *Advances in Civil Engineering*. 2019. doi: 10.1155/2019/5706015.

- [6] Saxena, N., Ghosh, R., Debbarma, R., Analysis of seismic separation gap between two adjacent reinforced concrete buildings, *AIP Conference Proceedings*, 2019: 2158(September). doi: 10.1063/1.5127126.
- [7] Khatami, M., Gerami, M., Kheyroddin, A., Siahpolo, N., The Effect of Irregularity of Lateral Stiffness in Estimating the Separation Gap of Adjacent Frames, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 166–177, 2020. doi: 10.1007/s12205-020-0173-4.
- [8] Khatami, M., Gerami, M., Kheyroddin, A., Siahpolo, N., The Effect of the Mainshock-Aftershock on the Estimation of the Separation Gap of Regular and Irregular Adjacent Structures with the Soft Story, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 14(2), 1–25, 2020. doi: 10.1142/S1793431120500086.
- [9] Takabatake, H., Yasui, M., Nakagawa, Y. and Kishida, A., Relaxation method for pounding action between adjacent buildings at expansion joint, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(9), 1381–1400, 2014. doi: 10.1002/eqe.2402.
- [10] Anagnostopoulos, S.A., Spiliopoulos, K.V., An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21(4), 89–302, 1992. doi: 10.1002/eqe.4290210402.
- [11] Jankowski, R., Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(6), 595–611, 2005. doi: 10.1002/eqe.434.
- [12] Jankowski, R., Analytical expression between the impact damping ratio and the coefficient of restitution in the non-linear viscoelastic model of structural pounding, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(4), 517–524, 2006. doi: 10.1002/eqe.537.
- [13] Kharazian, A., López-Almansa, F., State-of-the-Art of Research on Seismic Pounding Between Buildings with Aligned Slabs, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26(2), 327–345, 2019. doi: 10.1007/s11831-017-9242-3.
- [14] Khatiwada, S., Chouw, N., Butterworth, J.W., Evaluation of numerical pounding models with experimental validation, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 46(3), 117–130, 2013. doi: 10.5459/bnzsee.46.3.117-130.
- [15] Miari, M., Jankowski, R., Shaking table experimental study on pounding between adjacent structures founded on different soil types, *Structures*, 44, 851-879, 2022. doi:10.1016/j.istruc.2022.08.059.
- [16] Athanassiadou, C.J., Penelis, G.G., Kappos, A.J., Seismic Response of Adjacent Buildings with Similar or Different Dynamic Characteristics, *Earthquake Spectra*, 10(2), 293–317, 1994. doi: 10.1193/1.1585775.
- [17] Naserkhaki, S., Abdul Aziz, F.N.A., Pourmohammad, H., Parametric study on earthquake induced pounding between adjacent buildings, *Structural Engineering and Mechanics*, 43(4), 503–526, 2012. doi: 10.12989/sem.2012.43.4.503.
- [18] Luo, H., Wu, Q., Pan, W., Research and Experiment on Optimal Separation Distance of Adjacent Buildings Based on Performance, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. doi: 10.1155/2018/3483401.

- [19] Khan, S., Kumar, C.L.M., Shwetha, K.G., Analytical study on the seismic behavior of two adjacent buildings connected by viscous dampers, *AIP Conference Proceedings*, 2020. doi: 10.1063/1.5141540.
- [20] Kangda, M.Z., Bakre, S., Response control of adjacent structures subjected to blast-induced vibrations, *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 172(12), 2019. doi: 10.1680/jstbu.18.00071.
- [21] Chopra, A.K., *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, 1995.
- [22] Matlab. Versiyon 2017b. Natick: The MathWorks, Inc.
- [23] Damcı, E., Şekerci, Ç., Development of a Low-Cost Single-Axis Shake Table Based on Arduino, *Experimental Techniques*, 43(2), 179–198, 2019. doi: 10.1007/s40799-018-0287-5.
- [24] Harris H.G., Sabnis G.M., *Structural modeling and experimental techniques*, 2nd edn., CRC Press, 1999.
- [25] Luco, J.E., Ozelik, O., Conte, J.P., Acceleration Tracking Performance of the UCSD-NEES Shake Table, *Journal of Structural Engineering*, 136(5), 481-490, 2010. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000137

A Relationship for Effective Thermal Conductivity of Reinforced Concrete Structures

Bekir Erdem BAS¹

Seyednavid MARDMOMEN²

Guadalupe LEON³

Hung-Liang (Roger) CHEN⁴

ABSTRACT

Thermal conductivity is an important parameter in predicting the temperature distribution of large reinforced concrete structures. To accurately predict the temperature gradients, the effect of the steel rebar must be considered. An overall effective thermal conductivity was proposed to account for the steel reinforcement to eliminate the need to consider the complicated geometry of the rebar. In this study, the thermal conductivity of concrete cylinders embedded with 4% and 8% steel reinforcement was measured following industry standards. The effective thermal conductivity was calculated and shown to increase with the reinforcement ratio. Finite-element analysis (FEA) was conducted to model the experimental tests, and an equation was proposed to estimate the effective thermal conductivity. Additionally, FEA was used to model a concrete pier cap using the effective thermal conductivity. It was concluded that the simple effective thermal conductivity could be used to simulate the complicated steel reinforcement in concrete.

Keywords: Thermal conductivity, thermal analysis, reinforced concrete, reinforcement, finite element analysis, pier cap.

Note:

- This paper was received on May 16, 2022 and accepted for publication by the Editorial Board on April 14, 2023.
- Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2023.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1287651>

1 General Directorate of State Hydraulic Works Technical Research and Quality Control Department, Ankara, Türkiye
erdembas@dsi.gov.tr - <https://orcid.org/0000-0002-1596-0579>

2 West Virginia University, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, WV, USA
semardmomen@mix.wvu.edu - <https://orcid.org/0000-0001-7450-1842>

3 Doane University, Department of Engineering and Physics, Crete, NE, USA
guadalupe.leon@doane.edu - <https://orcid.org/0000-0002-7399-0602>

4 West Virginia University, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, WV, USA
roger.chen@mail.wvu.edu - <https://orcid.org/0000-0002-4278-5593>

1. INTRODUCTION

A thermal analysis is a vital task needed to define the thermal stresses and cracking potential of large reinforced concrete structure. One of the most important parameters in the thermal analysis is the material's thermal conductivity. It should be defined precisely to predict the correct temperature distribution within the structure. Often, the steel reinforcement inside concrete is neglected in the thermal analysis of a reinforced concrete structure because of its layout complexity. However, steel rebars can significantly affect the overall thermal conductivity and therefore the temperature and stress distribution. Researchers have studied the effect of different mix properties (water-cement ratio, aggregate volume fraction, moisture conditions, etc.) on concrete's thermal conductivity [1-2].

There are few studies available that studied the effect of different types of inclusions (steel reinforcement, fiber, etc.) on the overall thermal conductivity of a composite. Fraternali et al. [3] investigated the thermal conductivity of recycled PET fiber reinforced concrete. Kanbur et al. [4] studied the thermal conductivity of concrete and reinforced concrete experimentally and numerically using two types of reinforcements with a diameter of 10-mm and 12-mm in three different cross-sectional geometries. Agrawal and Satapathy [5] developed a mathematical model for evaluating the thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers. Noh et al. [6] studied the effective thermal conductivity of reinforced concrete containing multiple layers of reinforcements. The authors developed a mathematical model to calculate the effective thermal conductivity of reinforced concrete and was validated using a finite-volume method, but their numerical simulations were not verified by experimental test. Kim et al. [7] studied the thermal conductivity of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air using a heat flow meter. Yun et al. [8] evaluated the thermal conductivity of lightweight concrete materials with various lightweight aggregate and glass bubbles using a linear and plane heat source methods. To efficiently predict the temperature gradients in a reinforced concrete structure, a simplified effective thermal conductivity model to consider the effect of steel reinforcement inside concrete is needed.

In this study, the CRD-C 36-73 method [9] was used to measure the thermal conductivity of mortar samples with and without steel reinforcement. Then, the experimental results were compared to a 3-D thermal analysis calculation using ABAQUS finite element analysis (FEA) software. Finally, the FEA software was used to simulate reinforced concrete with various volumetric reinforcement ratios and an empirical equation was developed to calculate the effective thermal conductivity. The effective thermal conductivity was used to predict the temperature time history of a reinforced concrete bridge pier cap at the center and side locations.

2. EXPERIMENT

Six 15-cm (6-in) diameter by 30.5-cm (12-in) height cylinder specimens were prepared. Three specimen layouts were prepared: plain mortar, plain mortar plus six steel rebars, and plain mortar plus eleven steel rebars. Each layout had two-cylinder specimens. The steel rebars were all 46-cm (18-in) long and 1.27-cm (0.5-in) in diameter. The mortar mix design is shown in Table 1. The mortar mix was selected to provide more uniform samples in the cylinders since coarse aggregates may segregate due to the steel rebar spacing. The locations of the steel rebars are shown in Figure 1.

Table 1 - Mix design

Material	Weight Density (kg/m ³)
Cement	521.8
Sand	1513.2
Water	256.8

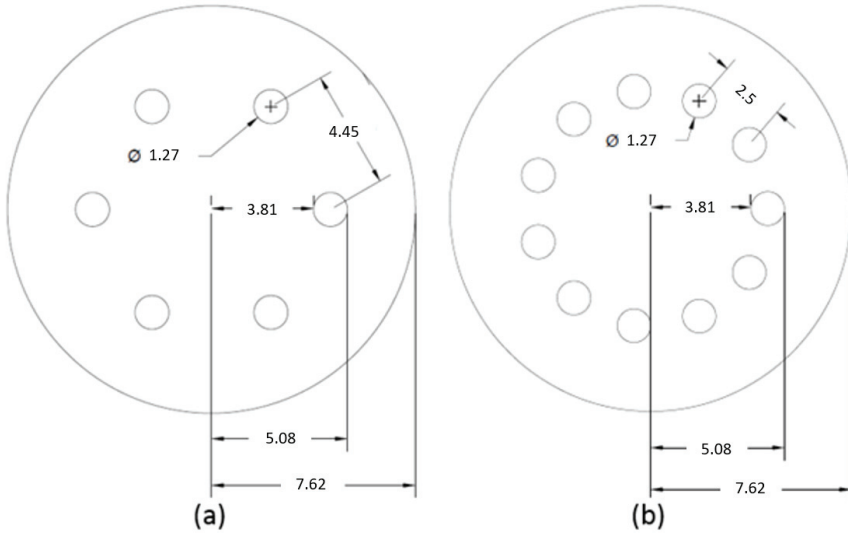


Figure 1 - Specimens' layout of (a) Mortar + 6 steel rebars (b) Mortar + 11 steel rebars (Dimensions are in cm)

Three K-type thermocouples were inserted in each cylinder. They were located at the center, 4.5-cm (1.75-in) from the center and 7-cm (2.75-in) from the center. All the thermocouples were in the middle of the cylinders and fixed with multiple zip ties. The locations of the thermocouples are shown in Figure 2. In order to maintain the location and the spacing of the rebars, two pieces of plywood with holes at the locations of the steel rebar were placed on the top and the bottom of the plastic mold. The specimens were cured for 14-days with a curing temperature of 43 °C which is more than 28-days of curing at a reference temperature of 23 °C. After the curing process was completed, each specimen was placed in a hot water bath with a heating unit to reach 75 °C. Then, each specimen was placed on top of two pieces of plywood and submerged in a cold-water bath. The temperature of the water was kept constant throughout each experiment by circulating the water. The temperature of the water was measured using a thermocouple placed 5-cm from the side of the specimen. The mortar and water temperatures were recorded at an interval of 5-seconds until the concrete's surface temperature reached the water temperature. Each test was repeated two times. The reinforced specimens are shown in Figure 3.

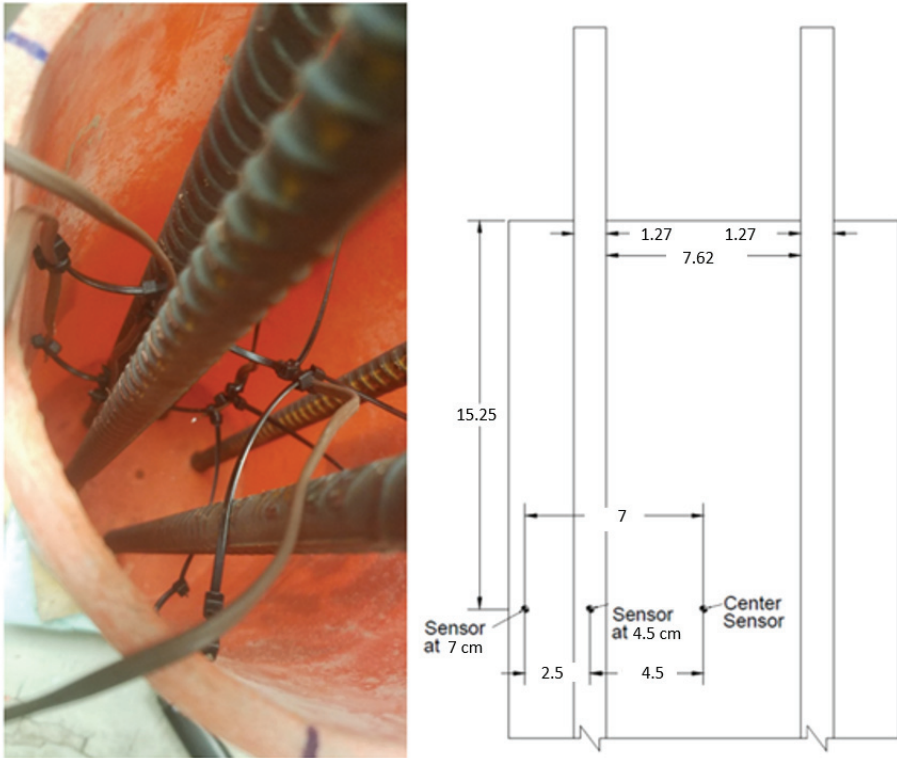


Figure 3 - Reinforced specimens (a) Mortar + 6 steel rebars (b) Mortar + 11 steel rebars

3. ANALYSIS OF RESULTS

The overall thermal conductivity can be calculated using the equations provided by CRD-C 36-73:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} = \frac{M}{(t_2 - t_1)}, \quad M = \frac{60 \text{ Ln}\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\left(\frac{5.783}{r^2} + \frac{\pi^2}{l^2}\right)} \quad (1)$$

where α is the thermal diffusivity (m^2/h), M (m^2) is a factor depending on the size and shape of the specimen, t_1 and t_2 are the times at which the center of the specimen reaches the specified temperature differences (min), T_1 and T_2 are the temperature differences between the specimen and water bath ($^\circ\text{C}$) at times t_1 and t_2 , r is the radius of the cylinder (m), l is the length of the cylinder (m), K is the thermal conductivity ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$), ρ is the weight density (kg/m^3), and C_p is the specific heat capacity ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$). Based on the dimensions of the cylinder and assuming T_1 and T_2 are 33.33 $^\circ\text{C}$ and 11.11 $^\circ\text{C}$, M can be calculated to be 0.0598 (m^2). The specific heat of mortar can be calculated using Equation 2 [10], [11].

$$C_{p\text{-mortar}} = \frac{(740\rho_{cem} + 710\rho_s + 4184\rho_w)}{\rho_{mortar}} \quad (2)$$

where ρ_{cem} , ρ_s , ρ_w are the weight densities (kg/m^3) of the cement, sand, and water in the mortar mix design. $\rho_{mortar} = \rho_{cem} + \rho_s + \rho_w$. The effective thermal conductivities were obtained and are shown in Table 2. As shown in Table 2, the effective thermal conductivities of the cylinders with steel reinforcement increased by 16.9% and 22.3%.

Finite element analysis (FEA) software (ABAQUS) was used to simulate the thermal behavior of the cylinders. For the cylinders with the steel rebar, the reinforcements were bonded with the mortar using a tie constraint (i.e. perfect bond). The three-dimensional thermal transient analysis was performed using hexahedral linear elements (DC3D8). An element size of 1.5-mm (0.06-in) was used for the mortar and steel rebar. An example of the geometry and mesh for a concrete cylinder with 11 steel rebars is shown in Figure 4. A total of 989,400 and 149,600 elements were used in this model for concrete and steel rebars, respectively.

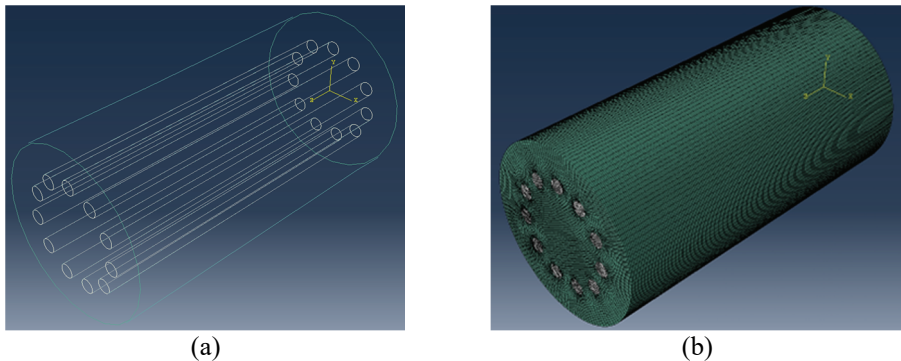


Figure 4 - (a) 3-D Geometry and (b) mesh of the thermal analysis model with 11 steel rebars

The FEA temperature distribution at the middle of the cylinder at 10 minutes is shown in Figure 5. The temperature-time histories were exported and compared with the experimental results in Figure 6. The convection boundary condition had a film coefficient (convection coefficient) of $4500 \text{ W/m}^2/\text{K}$ and was assumed to model the effect of the circulating water. The temperature of the cold-water bath stayed close to 13°C in all the experiments. As shown in Figure 6, the FEA results compare well with the experimental temperatures measured at different locations. The largest variation occurs with the sensors closest to the surface. The measured initial concrete temperature and the water temperature were used as an input for each case. Since the experimental initial temperatures of the 4.5-cm and 7-cm thermocouples are not the same as the center temperature, due to a delay of about 1-minute between taking the cylinders out of the hot water bath and submerging it in the cold-water bath, the FEA initial temperature input at different locations was adjusted accordingly.

Table 2 - Specific heat and thermal conductivity

Material	Mass Density (kg/m^3)	Specific Heat (J/kg/K)	Thermal Conductivity (W/m/K)
Steel	7897.1	502.4	53
Mortar	2291.8	1106	2.253
Mortar + 6 steel rebars	2529.7	1026	2.633
Mortar + 11 steel rebars	2727.9	970	2.755

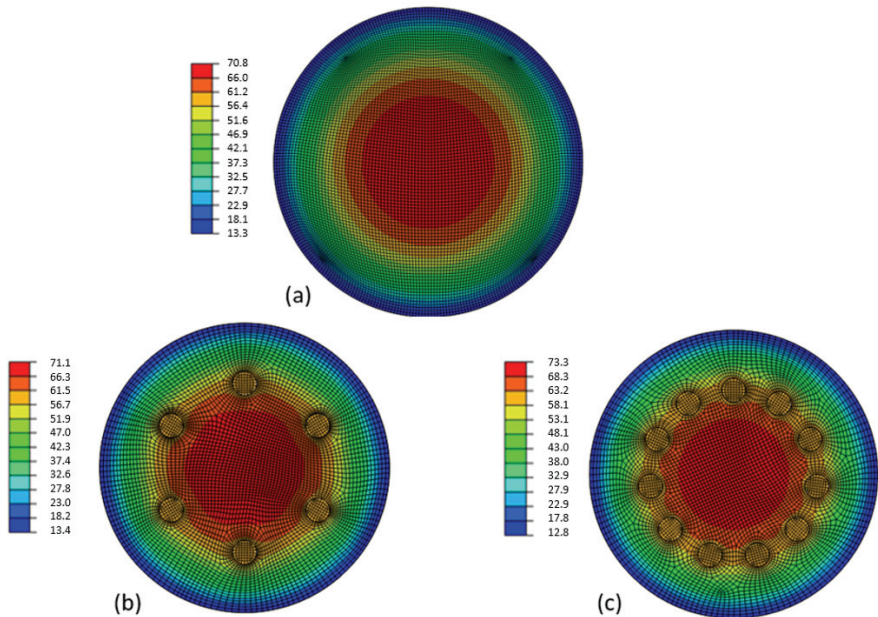
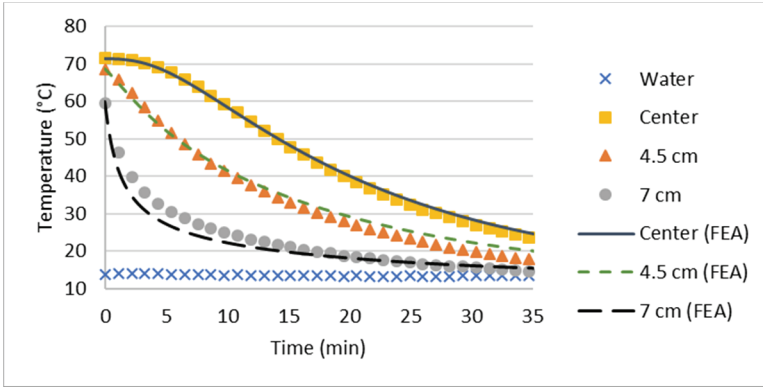
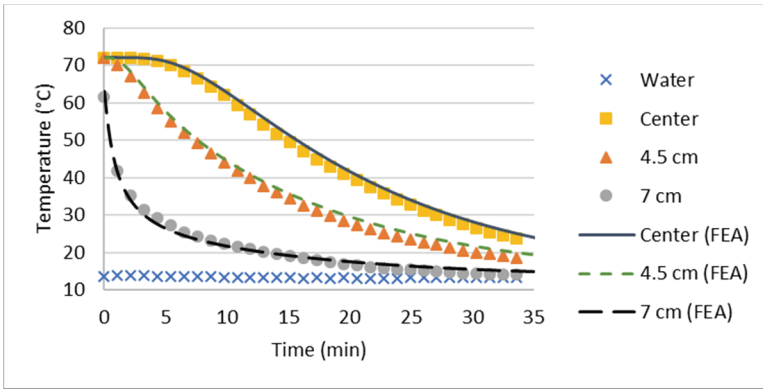


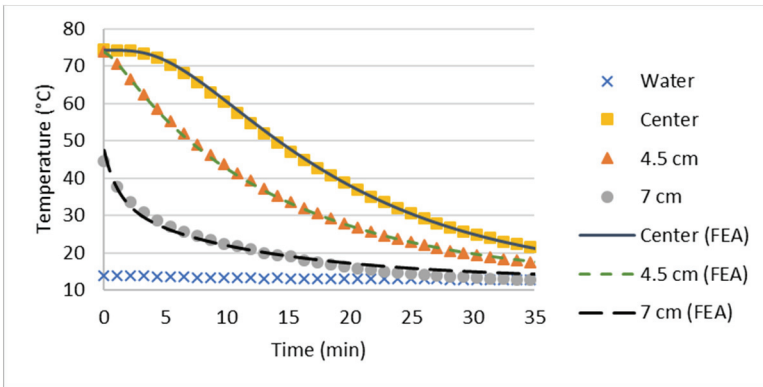
Figure 5 - Temperature distribution at 10 min for (a) mortar (b) mortar + 6 steel rebars (c) mortar + 11 steel rebars (temperatures are in $^\circ\text{C}$) at the middle of the cylinder



(a)



(b)

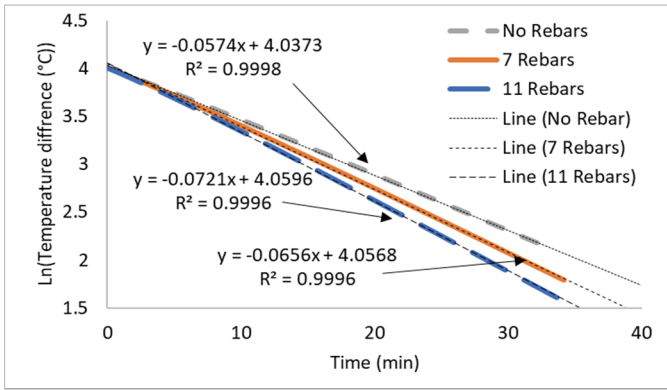


(c)

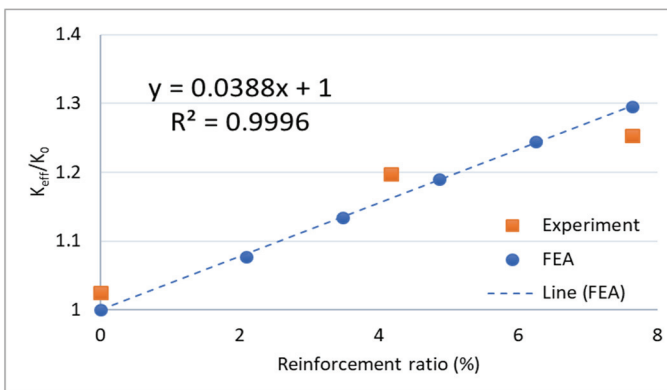
Figure 6 - Temperature time history comparisons of experiment and FEA at different locations: (a) plain mortar (b) mortar + 6 steel rebars (c) mortar + 11 steel rebars

4. EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY

Another set of 3-D FEA models was used to develop an effective thermal conductivity equation. The effective thermal conductivity could be used to estimate the thermal conductivity of concrete with complicated steel reinforcement [12]. In these analyses, the temperature-time history of the cylinders with different reinforcement ratios was calculated using the material properties mentioned in Table 2. The temperature decays were obtained for cylinders with 3, 5, 7, 9 and 11 steel rebars using the same clear cover spacing (1-inch (2.54 cm) from the surface of the cylinder) for all the analyses. An initial concrete temperature of 100 °C and a constant water temperature of 20 °C were chosen to calculate the effective thermal conductivities. The time period it took for the temperature difference between the center location of the cylinder and the water temperature to reach from 44.44 °C to 11.11 °C was used to calculate the effective thermal conductivities. An M of 0.0755 (m²) was calculated based on the mentioned temperature differences and the dimension of the cylinder using Equation 1. The linear relationships of the natural logarithm of the temperature difference versus time (shown in Figure 7 (a)) from FEA calculations indicate



(a)



(b)

Figure 7 - (a) Natural logarithm of temperature difference vs. time, (b) Normalized effective thermal conductivity vs. volumetric reinforcement ratio

that the homogeneous solution in Equation 1 can still be a reasonable estimation in the calculation of the effective thermal conductivity of concrete with rebar. Using the FEA results, the normalized effective thermal conductivity (K_{eff}/K_0) versus the percentage of reinforcements (by volume) can be calculated, and the results are shown in Figure 7 (b). The fitted trendline is shown in Equation 3. The value of K_0 was obtained to be 2.198 W/m/K based on the temperature decay calculated by the FEA calculation, which is about 2.5% difference with the measured value of 2.253 W/m/K. Using the proposed Equation 3, the effective thermal conductivities of the mortar with 6 steel rebars (4.24% reinforcement ratio) and 11 steel rebars (7.78% reinforcement ratio) are 2.546 and 2.846 W/m/K. The calculated values are 3.4% and 3.2% different than the experimental values calculated using Equation 1 as shown in Table 2. A comparison of the calculated thermal conductivities and the measured data is displayed in Figure 7 (b).

It is noted that for a typical reinforced concrete structure, the reinforcement amount in different direction can be different. However, to simplify the calculation, the concrete structure will be assumed to have same K_{eff} along all directions when using Equation 3. Typically, for a mass concrete structure, the heat conduction along one critical direction (smallest dimension direction) will be the highest and can be assumed almost insulated from the other two directions. Therefore, the simplified K_{eff} can be used to estimate the critical temperature gradient with enough accuracy, which will be more efficient than using a complicate reinforcement geometry. An example of this application will be shown in Section 5.

$$\frac{K_{eff}}{K_0} = 0.0388 (\text{reinforcement ratio } (\%)) + 1 \quad (3)$$

5. THERMAL ANALYSIS OF A PIER CAP

The relationship provided in Equation 3 was used to analyze an Ices Ferry bridge's pier cap constructed in Cheat Lake, West Virginia (shown in Figure 8). FEA software using ABAQUS with a user subroutine described previously by Lin and Chen [10] was used to perform the thermal analysis. The details of the thermal analysis parameters and the mix design properties for the concrete pier cap are shown in Table 3 where h_{cv} (W/m²/K) is the convection coefficient between the steel formwork's surface and the ambient environment and h_c (W/m²/K) is the conductance coefficient between the steel formwork's surface and the concrete's surface.

In the thermal analysis, the heat generation rate, $q(t)$ of each concrete element was calculated using Equation 4. In Equation 4, t_e is the equivalent age of concrete which is calculated based on Equation 5 to consider the time shift due to the temperature dependency of chemical reactions between the cementitious materials and water. In addition, the specific heat of concrete, C_{p-con} , and thermal conductivity of concrete, K_c , were considered to be degree of hydration dependent parameters [13], [14] and shown in Equation 6 and Equation 7.

$$q(t) = H_u W_{cem} \alpha_u \exp\left(-\left[\frac{\tau}{t_e}\right]^\beta\right) \left[\frac{\tau}{t_e}\right]^\beta \frac{\beta}{t_e} \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(t)+273} - \frac{1}{23+273}\right)\right) \quad (4)$$

$$t_e = \int_0^t \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(t)+273} - \frac{1}{23+273}\right)\right) dt \quad (5)$$

$$C_{p-con}(\alpha_r, T(t)) = \frac{1}{\rho_c} (W_{cem} \alpha_r (8.4T(t) + 339) + (740P_{cem} + 720P_{FA})W_{cem}(1 - \alpha_r) + 710W_s + 840W_a + 4184W_w) \quad (6)$$

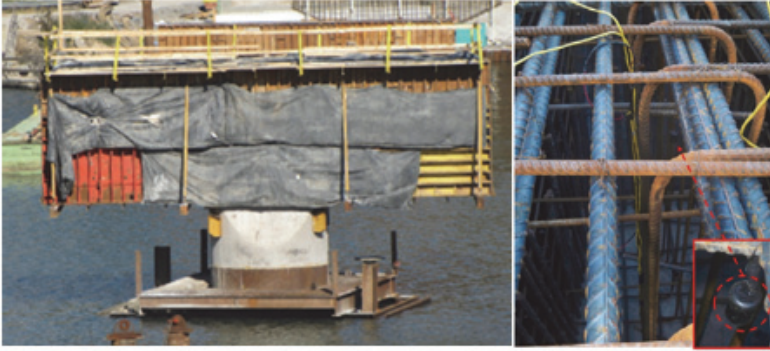
$$K_c(\alpha_r) = K_{uc}(1.33 - 0.33(\alpha_r(t))) \quad (7)$$

where H_u (J/kg) is the ultimate heat of hydration, W_{cem} , W_s , W_a , W_w are the masses of the cementitious materials, sand, coarse aggregate and water per unit volume of concrete (kg/m^3), t_e is the equivalent age of concrete, α_u , τ , β are the hydration parameters, t is the time, $T(t)$ is the temperature of concrete ($^\circ\text{C}$), R is the universal gas constant (8.314 J/mol/K), E_a is the activation energy of concrete (J/mol), $\alpha_r(t) = \alpha'(t)/\alpha_u$, $\alpha'(t)$ is the degree of hydration of the concrete. ρ_c is weight density of concrete (kg/m^3); $\rho_c = W_{cem} + W_s + W_a + W_w$, and P_{cem} , P_{FA} are the mass fractions of cement and fly ash in the cementitious materials. K_{uc} is the thermal conductivity (W/m/K) of the mature concrete (measured after 28 days of curing).

The adiabatic temperature rise of the mix was measured using an adiabatic calorimeter developed from a previous study [10]. The heat loss was minimized by controlling the surrounding water temperature and matching its temperature with the concrete sample. The measured adiabatic temperature rise was fitted to find the hydration parameters shown in Table 3. The ultimate heat of hydration (H_u) was calculated using the cement chemical compositions and fly ash amount in the mix [15]. The ultimate degree of hydration was calculated using an equation based on the water cementitious ratio and the percentage of fly ash [16]. A comparison between the measured and fitted adiabatic temperature rise is shown in Figure 9. The parameter shown in Table 3 was used to calculate the heat generation rate of the concrete, Equation 4, and the heat generation function is shown in Figure 10. The Ices Ferry pier cap geometry is shown in Figure 11(a). By using the concrete parameters in Table 3, the temperature distributions in the pier cap were calculated using ABAQUS, and a typical temperature distribution plot at 20 hours is shown in Figure 11(b).

Table 3 - Mix design and hydration parameters.

Mix Design (kg/m^3)					Thermal Analysis Parameters						
Cement	Fly ash	Water	Coarse Agg.	Fine Agg.	α_u	H_u	τ	β	E_a	h_{cv}	h_c
334.6	44.4	142	1,032	736	0.69	425,520	7.8	0.95	44,000	11.4	358



(a)



(b)

Figure 8 - (a) Ices Ferry Bridge pier cap (b) Pier cap's rebar cage

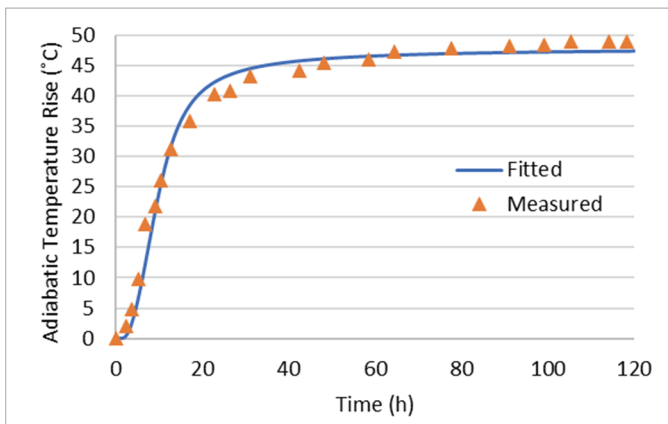


Figure 9 - Adiabatic temperature rise

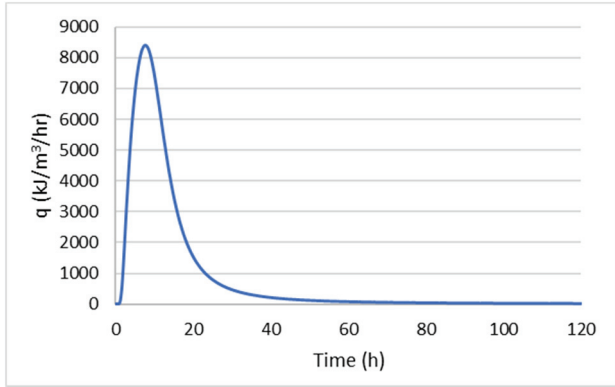


Figure 10 - Input heat generation function

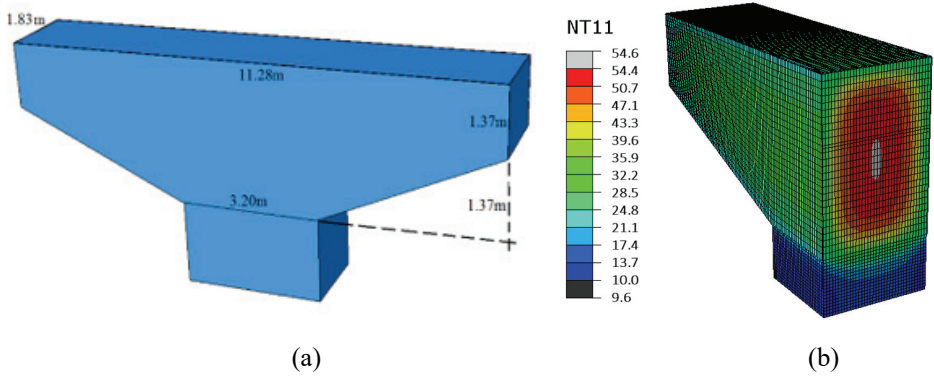


Figure 11 - FEA analysis of Ices Ferry Bridge pier cap (a) Dimensions (b) Temperature distribution in °C at 20 hours (cut at the center)

The pier cap structure was heavily reinforced (Figure 8). Therefore, the effect of the reinforcement needs to be considered in the thermal analysis. The plain concrete thermal conductivity was measured to be 2.1 W/m/K. The effect of different reinforcement ratios on the temperature of the pier cap at the cap center and at the side surface (5 cm away from the front side) are shown in Figure 12 and Figure 13. As shown in these figures, due to a higher reinforcement ratio, a higher temperature decay could be seen on the calculated center temperature after reaching the peak temperature (at around 20 hours) than the temperature decay at the side location. The effect of different reinforcement ratios on the temperature at the side surface is not as severe as at the center. The effective thermal conductivity with an assumed 8% reinforcement ratio was calculated as 2.75 W/m/K using Equation 3. These thermal conductivity values were used as K_{uc} in the thermal analysis calculations. Therefore, the following equation can be replaced by Equation 7:

$$K_c(\alpha_r) = K_{uc}(0.0388 (\text{reinforcement ratio } (\%)) + 1)(1.33 - 0.33(\alpha_r(t))) \quad (8)$$

The temperature-time histories calculated using the FEA at the center of the pier cap and 5 cm away from the front side of the pier cap were compared to the experimental data. The comparison is shown in Figure 14. Results show that when using the plain concrete thermal conductivity, the concrete temperature (orange line) at the center of the pier cap would be overestimated. The temperature predictions improved by considering the steel reinforcement with the calculated effective thermal conductivity (black dashed line) as shown in Figure 14. It can be seen that by considering the effective thermal conductivity, the temperature differential (difference between the center temperature and the side temperature) in the pier cap is also reduced which indicates a reduction of the thermal stress at the side surface. However, further study considering the actual reinforcement cage is recommended in order to have a better estimation of the effect on the thermal stress of the pier cap.

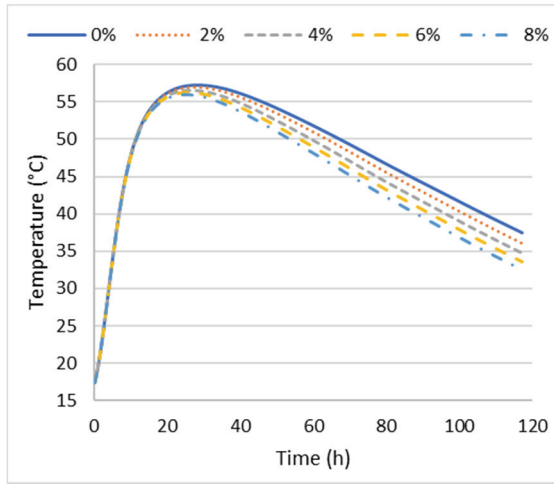


Figure 12 - Effect of reinforcement ratio on center temperature

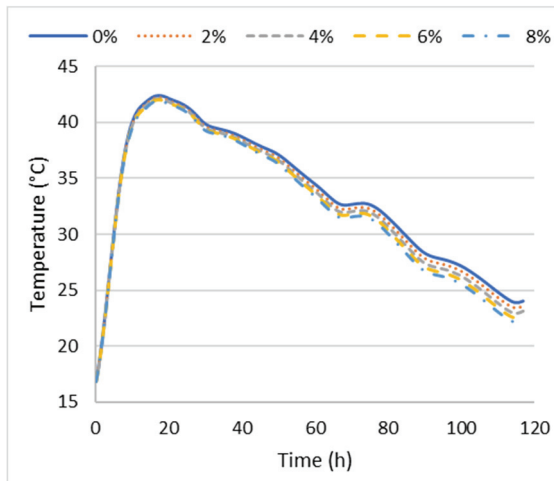
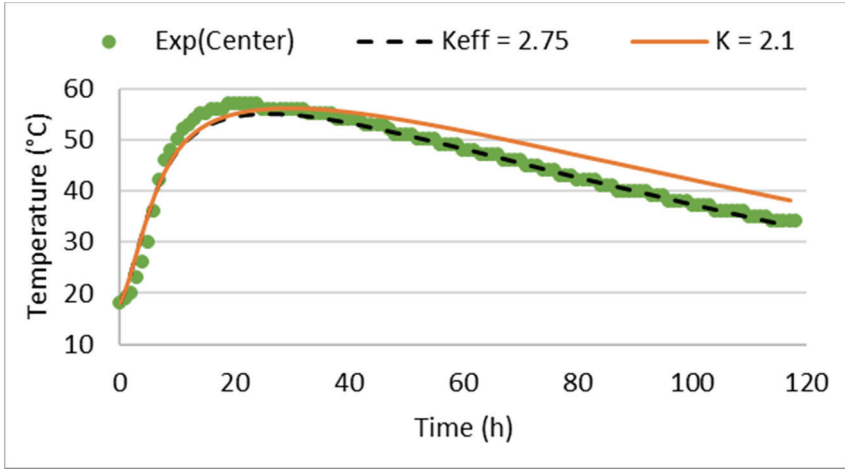
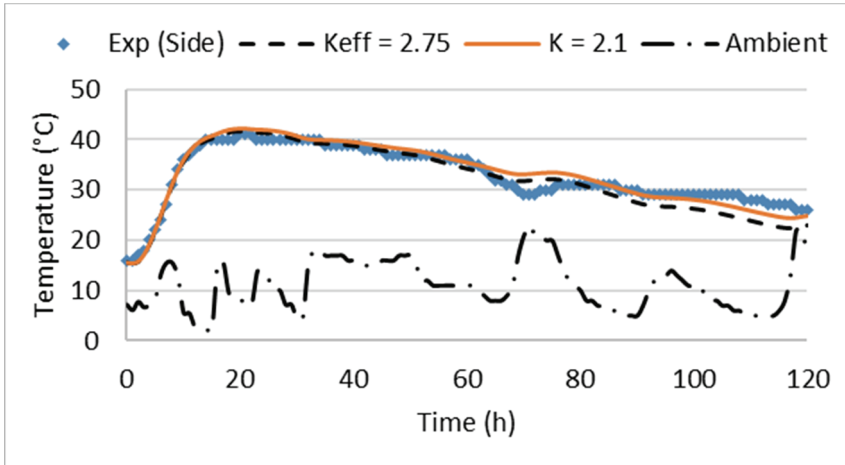


Figure 13 - Effect of reinforcement ratio on front side surface temperature



(a)



(b)

Figure 14 - Concrete temperature time history of the Ices Ferry Bridge pier cap at (a) Center of the pier cap and (b) 5cm from the front side surface (Thermal conductivity, K ($W/m/K$))

6. CONCLUSIONS

In this study, the thermal conductivity of mortar cylinders with 15-cm (6-in) diameter embedded with 6 and 11 steel rebars with 1.27-cm (0.5-in) diameter was experimentally measured. CRD-C 36-73 was used to calculate the thermal conductivities based on the temperature decay of the center. Besides the center temperature, two other locations, 4.5 cm and 7 cm from the center were monitored. FEA was conducted and successfully predicted the experimental measurements. The experimental measurements showed a thermal

conductivity increase of 16.9% and 22.3% by embedding 6 and 11 steel rebars in the cylinders. Then, the FEA was used to develop a linear effective thermal conductivity equation that can be used in the thermal analysis of reinforced concrete elements without complicated rebar modeling. Finally, the proposed equation was used in a finite element temperature analysis of a real bridge pier cap to evaluate the accuracy of the prediction. Results show that the temperature predictions improved at the center location by considering the steel reinforcement with the calculated effective thermal conductivity.

Symbols

C_p	: Specific heat capacity (J/kg/K)
$C_{p-mortar}$: Specific heat capacity of mortar (J/kg/K)
C_{p-con}	: Specific heat capacity of concrete (J/kg/K)
E_a	: Activation energy of concrete (J/mol)
H_u	: Ultimate heat of hydration (J/kg)
K	: Thermal conductivity (W/m/K)
K_c	: Time dependent thermal conductivity of concrete (W/m/K)
K_{uc}	: Thermal conductivity of mature concrete (W/m/K)
K_0	: Thermal conductivity of non-reinforced concrete (W/m/K)
K_{eff}	: Effective thermal conductivity (W/m/K)
l	: Length of the cylinder (m)
r	: Radius of the cylinder (m)
R	: Universal gas constant (8.314 J/mol/K)
t	: Time (h)
T	: Temperature of concrete (°C)
t_1, t_2	: Times at which the center of the specimen reaches the specified temperature
T_1, T_2	: Temperature differences between the specimen and water bath (°C)
t_e	: Equivalent age of concrete (h)
W_{cem}, W_s W_a, W_w	: Mass of the cementitious materials, sand, coarse aggregate, and water per unit volume of concrete (kg/m ³)
α	: Thermal diffusivity (m ² /h)
α'	: Degree of hydration of the concrete
α_r	: Degree of reaction of concrete

- α_u, τ, β : Hydration parameters
- ρ_{mortar} : Weight density of mortar (kg/m^3)
- $\rho_{cem}, \rho_s, \rho_w$: Weight densities of the cement, sand, and water in the mortar mix (kg/m^3)

Acknowledgments

The authors acknowledge the support provided by the West Virginia Transportation Division of Highways (WVDOH) and FHWA for Research Project WVDOH RP#312. Special thanks are extended to our project monitors, Mike Mance, Ryan Arnold and Donald Williams of WVDOH. The authors also appreciate the assistance from Yun Lin, Alper Yikici, the District 4 engineers and the construction crew for the Ices Ferry bridge project.

References

- [1] Kim, K.-H., Jeon, S.-E., Kim, J.-K., and Yang, S., “An experimental study on thermal conductivity of concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 3, pp. 363–371, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00965-1.
- [2] Davraz, M., Koru, M. and Akdağ, A.E., “The Effect of Physical Properties on Thermal Conductivity of Lightweight Aggregate,” *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 15, pp. 85–92, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.022.
- [3] Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., and Incarnato, L., “Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 9, pp. 2368–2374, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.03.025.
- [4] Kanbur, B., Atayilmaz, S., Demir, H., Koca, A., and Gemici, Z., “Investigating the Thermal Conductivity of Different Concrete and Reinforced Concrete Models with Numerical and Experimental Methods,” *Advances in Mechanical Engineering Applications*, 2013.
- [5] Agrawal, A. and Satapathy, A., “Mathematical model for evaluating effective thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 89, pp. 203–209, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.006.
- [6] Noh, H.G., Kang, H.C., Kim, M.H., and Park, H.S., “Estimation Model for Effective Thermal Conductivity of Reinforced Concrete Containing Multiple Round Rebars,” *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 12, no. 1, p. 65, Oct. 2018, doi: 10.1186/s40069-018-0291-2.
- [7] Kim, H.K., Jeon, J.H., and Lee, H.K., “Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air,” *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 193–200, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.067.

- [8] Yun, T.S., Jeong, Y.J., Han, T.S., and Youm, K.S., "Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes," *Energy and Buildings*, vol. 61, pp. 125–132, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.043.
- [9] US Army Corps of Engineers, "CRD-C36-73 Method of Test for Thermal Diffusivity of Concrete," CRD-C36-73, 1973.
- [10] Lin, Y. and Chen, H.-L., "Thermal analysis and adiabatic calorimetry for early-age concrete members," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 122, no. 2, pp. 937–945, Nov. 2015, doi: 10.1007/s10973-015-4843-2.
- [11] Van Breugel, K., "Prediction of temperature development in hardening concrete," *Prevention of thermal cracking in concrete at early ages*, vol. 15, pp. 51–75, 1998.
- [12] Bas, B. E., "Study on The Thermal Properties of Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash and Steel Reinforcement," M.S. Thesis, West Virginia University, 2020.
- [13] Kyle, J., Riding, A., Schindler, A., Juenger, M., and Folliard, K., "Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members," *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 5, Sep. 2006, doi: 10.14359/18158.
- [14] Van Breugel, K., "Artificial cooling of hardening concrete." Report, Delft University of Technology, 1980.
- [15] Chen, H.-L., Mardmomen, S., and Leon, G., "On-site measurement of heat of hydration of delivered mass concrete," *Construction and Building Materials*, p. 121246, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121246.
- [16] Schindler, A. K. and Folliard, K. J., "Heat of Hydration Models for Cementitious Materials," *Materials Journal*, vol. 102, no. 1, Jan. 2005, doi: 10.14359/14246.

Seismic Responses of an Isolated Long-span Bridge using Frequency Domain and Time Dependent Procedures

Fevzi SARITAŞ¹
Zeki HASGÜR²

ABSTRACT

Seismic behavior of an isolated bridge is analyzed in the frequency domain under the effects of non-stationary ground motions. For dynamic solutions, different ground environments are considered by simulating non-stationary quakes that can be represented from bedrock to soft ground level. In the simulations, power spectral functions and filtered white noise model are adopted for spectral densities of the earthquake excitations. Various computer algorithms have been developed for earthquake simulations, establishing the bridge finite element model and stochastic solutions. Twenty simulated ground motions are used for each soil profile and the parameters of Rayleigh dispersion are estimated by evaluating the system responses for each ensemble. A number of peak response factors dependent on soil conditions are presented for seismic responses. In addition, extreme value distributions of the responses are shown with the probability of exceeding functions and tables. The responses are discussed for the specific exceedance level of probabilities used in probabilistic design process. The stochastic analyses generally yielded responses consistent with time domain solutions. Exceedance probability functions of the peak responses were obtained in a close relationship. However, the probability distributions of the responses decomposed for the soft soil case and they displayed a wider dispersion even for low exceedance levels. The peak responses are expressed with some exceedance probabilities. In the estimation of response variations, this study showed the practicality of the frequency domain method and the results revealed higher peak response factors and variances for softer soil conditions. Furthermore, this study indicated that the frequency domain procedure is an effective tool in the obtaining of non-stationary seismic responses.

Keywords: Non-stationary, simulated earthquakes, peak responses, power spectrum, isolator.

Note:

- This paper was received on November 23, 2022 and accepted for publication by the Editorial Board on April 14, 2023.
 - Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2023.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1208867>

1 Darmstadt Technical University, Department of Civil Engineering, Guest Researcher, Germany
saritasfe@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-0605-1450>

2 Altınbaş University, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye
zeki.hasgur@altinbas.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7769-5678>

1. INTRODUCTION

Earthquake motions include wide range of uncertainties such as magnitudes, frequency contents, amplitudes and etc.) and non-uniform characteristics (wave passage effects, site effects, reflections during propagation, and etc.). Due to their non-stationary nature, earthquakes are very complex ground motions and they vibrate structural systems in a non-synchronous form. Therefore, they cause large fluctuations in the seismic structural responses. Spatial variation of an earthquake mainly originates from three sources; loss of coherence effects, wave passage and local soil conditions. Long span bridges are highly sensitive to quake excitations. Due to large variability, dynamic responses develop in non-deterministic manner even for the same seismic zone. Seismic response variations may be determined either by deterministic approaches assuming a set of specific ground motions in a limited number or by stochastic approaches considering random process of the ground motion. Shinzouka and Jan [1] showed that if the cross-spectral and the power spectral density function (PSDF) of a process or an ensemble are known, then its components can be simulated by the sum of trigonometric functions containing random phase angles and frequencies. The earthquake intensity could be an important guideline in estimating the dynamic responses due to an earthquake since the responses of the system increase with the intensity of the earthquake [2]. Pagnini and Solari [3] carried out frequency analysis of bridge piers by assuming stationary Gaussian process and Kanai-Tajimi filtered white noise model. Numerical results showed that the variation of the response is virtually independent of the spectral content of input motion. Der Kiureghian and Neuenhofer [4] developed multi-support response spectrum method for the seismic responses of bridges. Under effects of white noise and filtered white noise excitations, the close-form expressions were derived [5] for spectral moments of the responses. Vrouwenvelder [6] proposed a direct method to analyze bridges in frequency domain for non-uniform seismic motions. This study indicated that the design of bridges subjected to ground motions should be considered as a probabilistic problem together with risk analysis and decision mechanism. Yang and Leung [7] used stochastic finite segment method on box-girder bridges. The analysis point that the method is more effective in terms of the number of unknowns and it has higher accuracy. On the other hand, the frequency analysis may be a strong tool to exhibit larger redistribution of responses in case of non-uniform seismic motions [8].

For a single bridge pier with symmetric cantilevers, stochastic analysis was studied by Hasgür [9] and responses were evaluated in terms of statistical values. On the other hand, spatial variability of earthquakes and soil conditions may quite affect the stochastic responses of the piers of an isolated bridge [10]. Jangid [11] used non-stationary random process for earthquake excitation to obtain frequency responses of bridges by a suitable PSDF. Closed-form solutions were derived for optimum yield strength of bearings by assuming rigid-deck and stationary white-noise motion. In obtaining responses in the frequency domain, hysteretic energy dissipation procedure is also used for isolators by considering the Kanai-Tajimi model [12]. Additionally, the optimum values of the characteristic strength and inelastic stiffness of isolators depend on frequency content of ground motion and consequently depend on soil conditions as well [13]. On the other hand, seismic performance of the considered bridge and pier was evaluated [14,15] under earthquake motions. In obtaining the peak responses, the coupled interactions of restoring forces in isolators have been observed as considerable effects [16]. For peak responses, the models of peak factors suggested by Davenport [17] and Vanmarcke [18] have been commonly used so far. When earthquake damages in bridges are

investigated, pier stiffness, soil conditions and supporting types are seen as important factors. Soil flexibility can quite affect [19] the seismic responses of base-isolated structures and lead rubber isolation system (high damping) can causes to larger peak responses. From the mentioned effects, different soil mediums and support conditions were studied [20] under effect of earthquake accelerations to obtain dynamic responses of a bridge-pier system. Differences in soil conditions induce significant variations in seismic responses of bridges with high piers and more flexible soil can cause the higher seismic responses [21]. Since the seismic responses are dependent on the dynamic characteristic of the bridge and the PSD of input excitations, the model of coherency and the apparent velocity, the spatially varying ground motions play important role in the bridge analyses [22]. In suspension bridges, the response values obtained for the site-response effects alone are larger than the response values obtained for the incoherence and wave passage effects, by themselves [23].

In this study, expected peak responses of a viaduct system subjected to non-stationary earthquakes are predicted in frequency domain for different soil conditions. The spatial variability of the input motion is considered by power spectral density functions. The analyzed viaduct was constructed on a highway and it has multiple-long spans and rubber isolators located between deck and piers. The viaduct was built as a reinforced concrete structure in a high seismic zone (in Istanbul) of Turkey. For the analyses, twenty non-stationary earthquake records are simulated for each soil type by using filtered white noise model and time-varying functions which are modulated with suitable parameters fitting to the considered records. Establishing the 3D finite element model of the viaduct system, generating artificial ground motions and frequency analyses are executed by the algorithms. A range of peak response factors are presented in this paper for various soil conditions and behavior type of bearings. The expected peak responses in frequency domain are evaluated with those of the time domain and it has been shown that the results are in a harmonious relationship. Finally, the expected peak responses are computed for non-stationary earthquake effects in point of probabilistic terms such as mean, variance and etc. By extreme values analysis, exceedance probability distributions are obtained for seismic peak responses. Furthermore, the response quantities corresponding to 2%, 10% and 50% exceedance probabilities to be used in design process are predicted depending upon soil types.

2. BEHAVIOR OF THE VIADUCT IN FREQUENCY DOMAIN

Random behavior of a system can be expressed with statistical quantities and structural safety can be evaluated in terms of probability of exceedance for certain levels. As is well known, linear model of a structural system subjected to random loads is generally sufficient [24] for serviceability assessment in probabilistic sense. Different soil conditions give rise to additional variations in the amplitude and frequency content of the ground motions as the waves propagate from the bedrock to the surface level [25]. In the analysis of a system subjected to loading $p(t)$ involving stochastic character, the main task is to transform the stochastic process of the loading $p(t)$ into the random processes of the response by employing proper mathematical techniques for frequency domain solution as shown by the simplest description given in Figure 1.

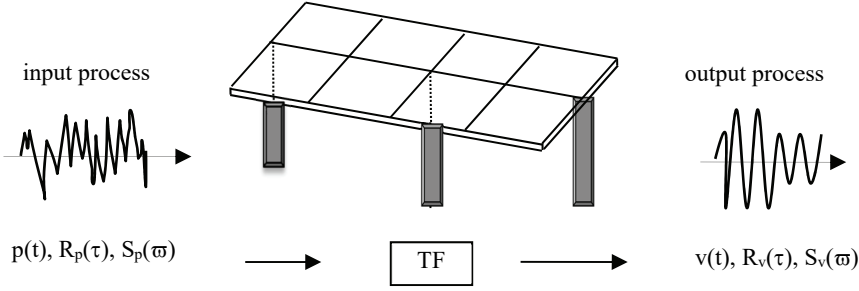


Figure 1 - Input and output in a random process

The stationary process of the loading $p(t)$ can be regarded as an input function provided that one of either the autocorrelation function $R_p(\tau)$ or the PSDF ($S_p(\omega)$) is known. In order to consider the randomness of ground motions, it is assumed that the external load $p(t)$ representing non-stationary random process has a limited frequency band, zero-mean value and a Gaussian distribution with uniform power spectral intensity of S_0 . The response process $v(t)$ can be defined by integration of the multiplication of the transfer functions (TF) and Fourier spectrum of seismic input. Equations of motion for a multi-degree of freedom (MDOF) system are defined for ground motion of by:

$$[m]\{\ddot{v}\} + [c]\{\dot{v}\} + [k]\{v\} = \{p_{eff}(t)\} = -[m]\{1\}\ddot{v}_g \quad (1)$$

The terms $[m]$, $[c]$ and $[k]$ represent the mass, damping and stiffness matrix of the system, respectively. Vectors $\{\ddot{v}\}$, $\{\dot{v}\}$ and $\{v\}$ are the acceleration, velocity and displacement, respectively. By applying inverse Fourier transforms to the frequency-based response of the system, the modal response in its n^{th} normal mode is,

$$Y_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H_n(i\omega) \hat{V}_g(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

where $H_n(i\omega)$ is the complex frequency response function, $n=1,2, \dots, N$ $\hat{V}_g(i\omega)$ and is the Fourier transformation of the input motion. The complex frequency response function for a discrete mode of n is given [26] as follows,

$$H_n(i\omega) = \frac{1}{K_n[1+2i\xi_n(\omega/\omega_n)-(\omega/\omega_n)^2]} \quad (3a)$$

$$H_n(-i\omega) = \frac{1}{K_n[1-2i\xi_n(\omega/\omega_n)-(\omega/\omega_n)^2]} \quad (3b)$$

K_n denotes the generalized stiffness matrix for the n^{th} mode. Modal responses for stationary random ground motions can be expressed by a stochastic process of the generalized discrete forces. Knowing the cross spectral density function ($S_{V_m V_n}(\omega)$) defined for discrete modal forces P_n and P_m , any response of $v(t)$ is obtained by superposing the frequency response functions as follows:

$$\sigma_{v(t)}^2 = \sum_m \sum_n D_m D_n S_{P_m P_n} \int_{-\infty}^{+\infty} H_m(i\omega) H_n(-i\omega) d\omega \quad (4)$$

The above function shows a relationship between the input and the output processes and it states the variance of any response quantity. For zero-mean Gaussian process, the relation in Eq. (2.4) yields the mean-square responses. $H_m(-i\omega)$ and $H_n(-i\omega)$ are the complex conjugate of the $H_m(i\omega)$ and $H_n(i\omega)$, respectively. The coefficients D_m , D_n , E_m and E_n are expressed in terms of the modal parameters and obtained by standard structural analysis. Total behaviour is derived on the basis of modal superposition by using these coefficients (D_m , D_n , E_m , E_n) expressing the contributions of mode shapes. The solution vector associated with normal coordinates is obtained by multiplication of any response quantity with these coefficients. For each mode, these coefficients are obtained by any response dividing to the value of normal coordinate.

When the contribution of the cross terms to the mean-square responses is considered for discrete modal frequencies, the variances of the output process are computed via numerical integrations of Equation (4) by applying the residue integration method. Thus, the variances of response quantities in terms of bending moments and shear forces are given by:

$$\sigma_M^2 = \sum_m \sum_n \frac{4\pi\xi\omega_m^2\omega_n^2 D_m D_n S_{P_m P_n}}{K_m K_n (\omega_m + \omega_n) [(\omega_m - \omega_n)^2 + 4\pi\xi^2 \omega_n \omega_m]} \quad (5)$$

$$\sigma_V^2 = \sum_m \sum_n \frac{4\pi\xi\omega_m^2\omega_n^2 E_m E_n S_{P_m P_n}}{K_m K_n (\omega_m + \omega_n) [(\omega_m - \omega_n)^2 + 4\pi\xi^2 \omega_n \omega_m]} \quad (6)$$

3. DEFINITION OF GROUND MOTION

Ground motions having non-stationary character are assumed to be stochastic processes and the response of the system is defined by the functions between the input and the output process of the system. The power spectrum of Kanai-Tajimi filter functions can be defined [27] as a variation of the characteristics of ground motions arising from the bedrock passing through soil layers. Stochastic approach may be the most suitable procedure for generating artificial accelerograms for the reason of the complex nature of the formation of seismic waves, their travel path before reaching the recording station and local soil conditions at the site. In this regard, different stochastic models, both stationary and non-stationary, have extensively been used in the literature to simulate earthquake ground motions. Firstly, stationary white noise random models were developed for modeling of earthquake ground motions. In this context, stationary filtered white noise model of Kanai-Tajimi ([28], [29]) has been the preferable model for many researchers and engineers. These efforts were followed by introduction of the non-stationary stochastic models for generating earthquake accelerograms ([30], [31]). In the simulation of ground accelerations, stationary white noise type ground motions are necessarily considered together with filter functions to characterize the variations in different soil environments. Kanai-Tajimi filters and later improved/modified by Clough and Penzien [32] are well-known and commonly used functions. The Kanai-Tajimi filter ($|H_g(i\omega)|$) amplifies the high-frequency components and de-amplifies rapidly the low frequencies. The Kanai-Tajimi filter (high-pass) is used to define bedrock ground accelerations and it prevents the transition of very low frequency components

originating from bedrock. This case can yield inappropriate structural responses. Therefore, to eliminate this difficulty, a second filter function, known as Penzien's filter function (low-pass, $|H_f(i\omega)|$), is adopted to enable the transition of very low frequency components. Random process of the earthquake excitations is defined by filtered white noise in the stochastic analyses. PSDF of a sampled random process of $x(t)$ filtered by the transfer functions is considered as,

$$S_x(\omega) = |H_g(i\omega)|^2 |H_f(i\omega)|^2 S_0 \quad -\infty < \omega < +\infty \quad (7)$$

where the constant power spectral intensities (S_0) are evaluated for each soil type in the numerical analyses. The corresponding filter functions of the $|H_g(i\omega)|$ (high pass filter) and $|H_f(i\omega)|$ (low pass filter) are given by

$$|H_g(i\omega)|^2 = \frac{1+4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1-(\omega/\omega_g)^2]^2+4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \quad (8)$$

$$|H_f(i\omega)|^2 = \frac{(\omega/\omega_f)^4}{[1-(\omega/\omega_f)^2]^2+4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2} \quad (9)$$

where ω_g and ξ_g parameters are ground circular frequency and ground damping ratio, respectively. The second filter characteristics of ω_f and ξ_f modify the shape of power spectrum at very low frequency values. Kanai suggested 15.6 rad/sec for the characteristic ground circular frequency and 0.6 damping ratio for hard soil type. For various soil types, the parameters of ξ_g and ω_g used in this study are given by literature study [4]. Other filter parameters are taken into account by $\xi_f=0.60$ and $\omega_f=\omega_g/10$. In this study, the power spectrum of each soil type is calculated by using Parseval theorem [33] and Fast Fourier transforms. The amplitudes of the process are directly obtained for each sample by the area under curve of $S_x(\omega)$. This curve is considered by equal frequency interval of $\Delta\omega$ and the random phase angle of ϕ_{kr} which has uniform probability density function over the range of $0<\phi_{kr}<2\pi$ with intensity of $1/2\pi$. In initial region of records, acceleration amplitudes generally develop with an increase tendency up to a maximum level. After following a region assumed as constant, acceleration traces decrease rapidly and then show little changes in the tail section. In defining of a filtered process with non-stationary character, the duration characteristics of t_1 , t_2 , t_3 , t_4 and the constants of μ and k are studied [34] in detail by Jennings et al. Earthquake response spectra and the power spectral density functions are simulated for the expected earthquakes by applying the given procedure.

4. SIMULATION OF EARTHQUAKE MOTIONS

Almost five decades ago, the pioneers of the earthquake engineering such as Housner and Jennings [35] studied generation of artificial ground motions by using random process. After the generation of earthquake ground motions, response and ductile spectra were studied and investigated with for the purpose of non-stationary amplitudes and frequency content of motion by Hasegür [31]. Şafak et al.[36] presented a model to characterize and to simulate ground motions by including white noise and squared accelerations. Wavelet method is an

alternative technique [37] in generation motions by using variations of amplitudes, frequency content and phase-angle. In this study, the most compatible parameter-values for the time-modulated function $z(t)$ are obtained by using proper approaches. The non-stationary nature of the actual acceleration traces can be seen from a general process. As is discussed above, the acceleration amplitudes that tend to increase up to peak level occur generally within a small range from the beginning of the quake. Following this specific interval, peak amplitudes appear during the effective duration (t_{eff}) and then acceleration traces decrease exponentially in tail part. From this point of view, the filtered process having non-stationary form is obtained by applying an envelope function of $z(t)$ as given in Figure 2a. The curve of $z(t)$ is specified according to the statistical analysis of the real acceleration traces reflecting the seismic zone characteristics. In calculation of the parameters of $z(t)$, t_1 and t_2 , normalized Arias intensity and effective durations (t_1, t_2) are utilized. In the simulation of accelerations, the regression coefficients for the exponential functions are evaluated iteratively by the trial-and error method. In the simulations, $k=2.951$ and $\mu=0.1665$ are computed values for the envelope function. The parameters of t_1 and t_2 are considered as 2.3 sec and 6.5 sec, respectively.

For analyses, twenty ground motions are generated for various soil types (hard, mild and soft) and bedrock level by using recorded motion of the 1992 Erzincan-NS-component which has largest Housner's spectrum intensity ($SI_{0.2}$). For the considered seismic zone, this parameter may be used as an instrumental intensity to define destructiveness of an earthquake.

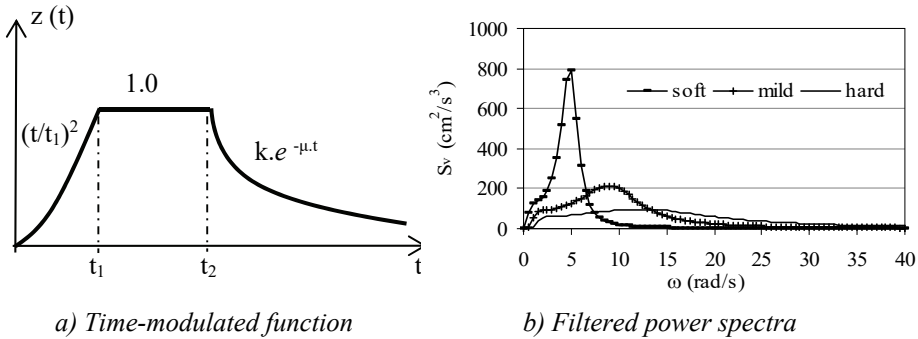


Figure 2 - Time-modulated function and filtered power spectra

The constant power spectrum intensities are computed depending on soil types as well as for the smoothed curves of El Centro NS 1940 record [38]. To compare the parameters of the PSDFs, the same process is implemented for Erzincan NS 1992 earthquake and the results for both records are given in Table 1.

Thus, the smoothing- process has no considerable influence over the power intensities. Numerical integrations of PSDF of the El Centro and Erzincan earthquakes are obtained as $0.4726 \text{ m}^2/\text{s}^4$ and $0.4875 \text{ m}^2/\text{s}^4$, respectively. The product function of $\Phi_i(\omega)$ is introduced here over the frequency limit of s (49.95 Hz) and given for each soil type by the following relation:

Table 1- Constant power spectrum intensities

a) El Centro NS 1940 NS record

Soil type	Φ_i (rad/s)	S_o (cm ² /s ³)	$S_o^{smoothed}$ (cm ² /s ³)
hard	46.08	51.24	51.16
mild	31.50	74.95	74.84
soft	22.57	104.62	104.45

b) Erzincan NS 1992 record

Soil type	Φ_i (rad/s)	S_o (cm ² /s ³)
hard	46.08	52.91
mild	31.50	77.40
soft	22.57	108.04

$$\Phi_i(\omega) = \int_0^s |H_g(\omega)|^2 |H_f(\omega)|^2 d\omega \tag{10}$$

The power spectra of the three soil types are obtained as given in Figure 2b. A high spike is clearly seen in the soft soil in compared to other power spectra. In Figure 3, the response spectra of the 20 simulated accelerations are presented depending upon periods for each soil type. As expected, the peak spectral values are appeared in a wide-interval at higher periods for the soft soil type. To perform an assessment, the simulated 5 percent damped response spectra are also illustrated comparatively with design spectrum given by Turkish earthquake code (TSEC, 2019). There are some differences between the simulated and the design response spectra, because the simulated spectra are generated based on the power spectrum density function of a recorded ground motion and the simulated ground motions are filtered out by different types of filter functions given in the literature as mentioned above.

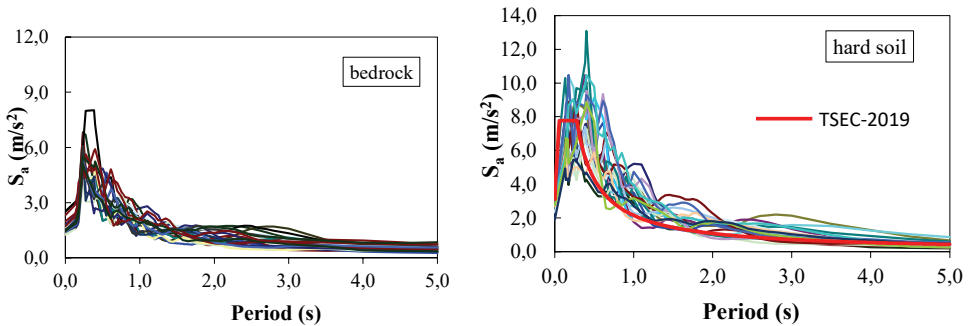


Fig. 3a - Generated response spectra for different soil conditions

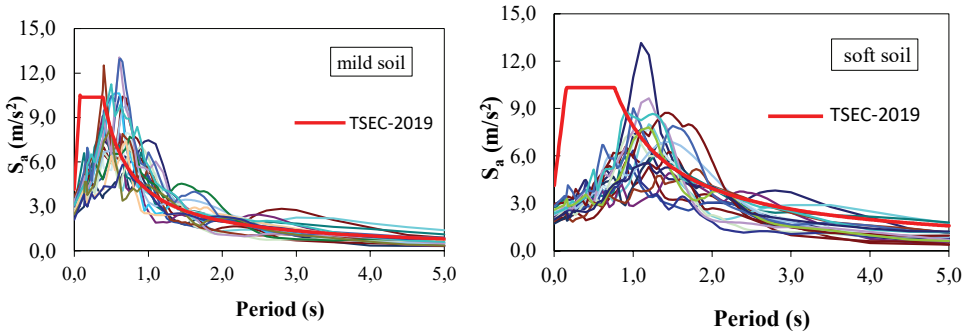


Fig. 3b - Generated response spectra for different soil conditions (5 percent damped)

Furthermore, the response and power spectra are comparatively given in Figure 4 for the recorded (Erzincan NS 1992, 5 percentdamped) and the mean of the simulated motions. When the consistency of the results is investigated, it is seen that the simulated power and the acceleration spectra show good accuracy. It means that the simulated ground motions can represent the expected ground motions for the considered zone. Since the simulated acceleration and the power spectra are close to those of the recorded ones in acceptable level of accuracy, it is decided to employ the simulated records in the stochastic dynamic analyses.

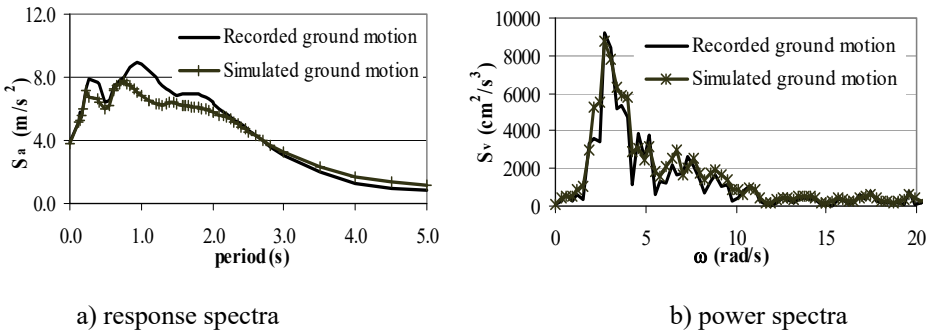


Fig. 4 - Consistency of the simulated and recorded ground motions

5. FINITE ELEMENT MODEL AND VIBRATIONS OF THE VIADUCT SYSTEM

A multi-span viaduct system with total length of 325m is analyzed for stochastic dynamic responses. It consists of continuous deck over box-girder (V-shape), laminated rubber bearings (with steel plates) and pier with a hollow rectangular section. The viaduct has 6 spans and the maximum pier height and span length are 29.1m and 58.2m, respectively. The elevation of the viaduct, the configuration of bearings and the piers having variable cross-sections are given in Figure 5. Discretization over the system in 3D is carried on the nodal points with different mesh intervals by using finite frame elements having 12 degree of freedoms (DOF). In the finite element model (Figure 5), smaller mesh-intervals are selected

in the regions close to the piers where the variation of the cross-section takes place. Distributed mass of the system is lumped on the discrete nodal points. Equations of equilibrium of the viaduct system are formed by considering the nodal forces of the lumped mass system. Establishing finite element model (with desired mesh intervals) and performing analyses are realized by the developed software of Finite Element Analysis (FEA) as well.

Dynamic stiffness matrix corresponding to the whole viaduct system is obtained in dimensions of 786×786 . Static condensation is executed on the dynamic stiffness matrix to get a simplified equivalent system. Depending on DOFs of the selected nodal points, the new reduced dynamic stiffness matrix is found to be of 78×78 . For rubber bearings, bilinearized model is considered for nonlinear hysteretic behavior as given in Figure 6. K_e , K_p , K_{eff} , and

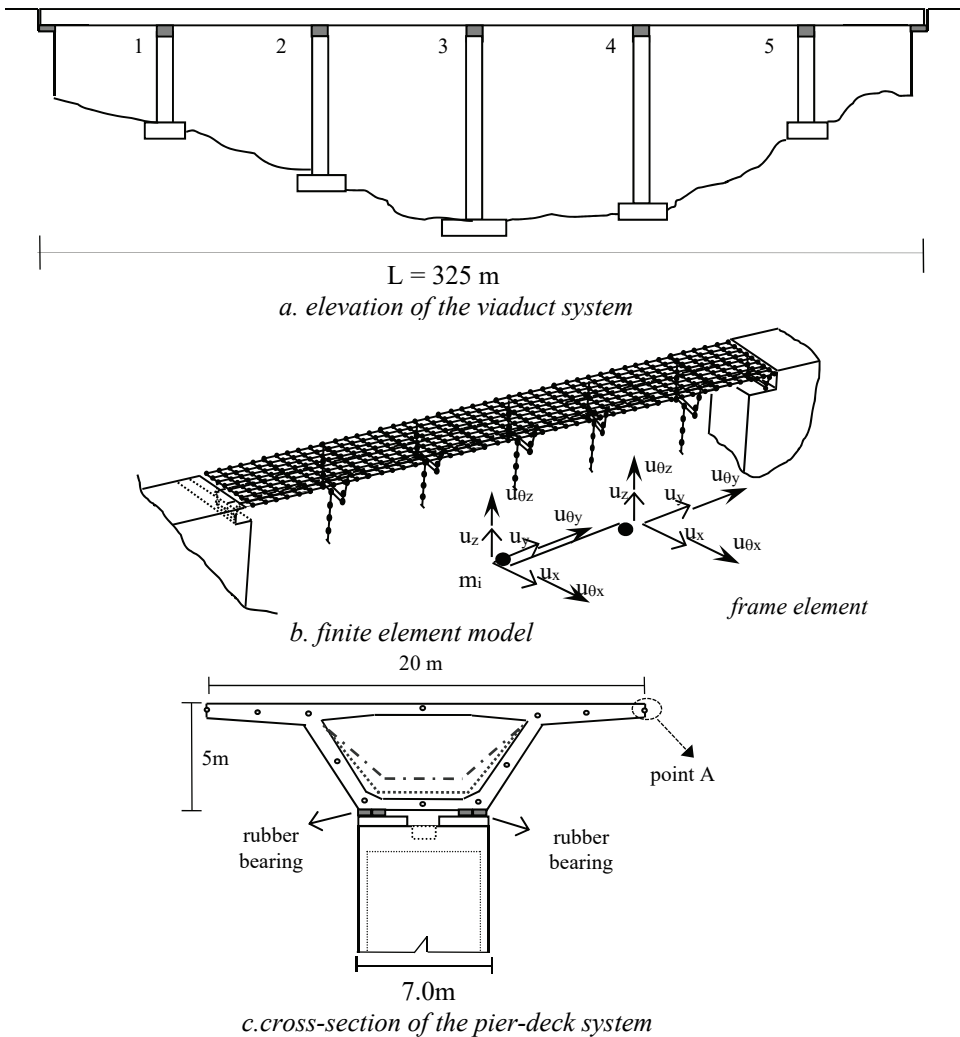


Figure 5 - Elevation and cross-section of the viaduct

F_y are the initial stiffness, post-yield stiffness, effective stiffness and yielding force, respectively. K_{eff} represents hysteretic behavior of the rubber bearing. The bearing stiffness are obtained by following equations:

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{\Delta} \quad (\Delta > \Delta_y) \quad (5.1)$$

$$K_p = G \cdot \frac{A}{\Sigma t_r} \quad (5.2)$$

$$K_v = E_c \cdot \frac{A}{\Sigma t_r} \quad (5.3)$$

where Δ is displacement of rubber bearing and Δ_y is yielding displacement. The parameter Q represents the characteristic strength and K_v is the vertical stiffness. G is the shear modulus of the rubber and A is the area in plan. Σt_r represents the total rubber thickness of a bearing. The lateral, vertical and rotational stiffness of the bearings are taken into consideration in three directions as equivalent linear stiffness. In general, rubber bearings are also designed for shear deformations and these deformations are limited with strain levels up to approximately 200 percent. For the isolator displacement capacity, the shear strains have been restricted by the value of $\gamma=0,70$ [39]. In case of severe dynamic vibrations, the behavior of isolator system may differ from linearity and approximate methods such as linearization techniques can be iteratively used to consider variations in isolator rigidity. The coefficients of stiffness matrices are computed based on the mechanical properties of the installed bearings. For this purpose, the relations as specified in the codes AASHTO [40], DIN 4141-14 [39] and essentials given [41] by Naeim and Kelly are utilized.

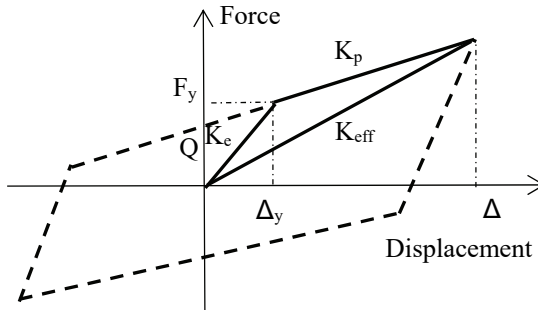


Fig. 6 - Bearing behaviour model

In order to check the validity of the developed algorithm of FEA (Finite Element Analysis), the deck-displacements of the viaduct system are evaluated under effects of seismic loads and verified with the results of a software package [42]. The lateral displacements of some nodal points on the deck are comparatively given in Table 2. From the free vibration analysis, the first four free vibration periods are obtained by FEA for two directions and the results are comparatively given with those of SAP2000 in Table 3. Since the free vibration analyses of the both real and equivalent viaduct system yield acceptable results, dynamic stiffness matrices of the equivalent model and the algorithms mentioned are adopted to use in the stochastic dynamic analyses.

Table 2 - Deck lateral displacements

δ_x (m)		
<u>Node</u>	<u>FEA</u>	<u>SAP2000</u>
5	2.96×10^{-2}	2.98×10^{-2}
119	7.94×10^{-2}	8.14×10^{-2}
253	1.36×10^{-2}	1.40×10^{-2}
387	1.75×10^{-2}	1.81×10^{-2}
521	1.88×10^{-2}	1.93×10^{-2}
655	1.72×10^{-2}	1.75×10^{-2}
775	1.49×10^{-2}	1.50×10^{-2}

Table 3. Free vibration periods of the viaduct system

System matrix	Lateral periods (sec)			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
FEA-786×786	1.865	1.548	1.081	0.622
FEA-78×78	1.903	1.574	1.095	0.620
Sap2000	1.884	1.560	1.090	0.625

System matrix	Vertical periods (sec)			
	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
FEA 786×786	0.330	0.303	0.300	0.285
FEA 78×78	0.379	0.365	0.352	0.341
Sap2000	0.347	0.329	0.308	0.291

6. RESPONSE OF THE VIADUCT SYSTEM

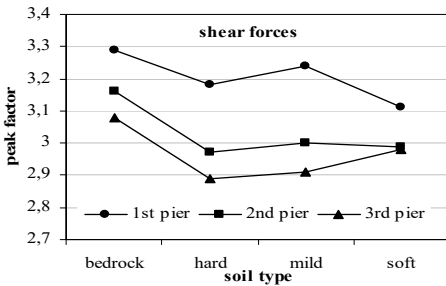
Under effects of the generated non-stationary motions, input excitations and outputs of the structural system are computed on the basis of soil types and rubber behavior model as well. Although the viaduct piers having isolators are assumed as in the elastic range under the considered seismic forces, but influences of the nonlinear behavior of the isolator are only deterministically studied. While an isolation system reduces the earthquake effects, on the other hand it tries to keep [11] the behavior of the structure within elastic limits. Additionally, the statistical parameters of the peak responses are evaluated at the points where may be critical for the system. For a process having zero-mean, root mean square (rms) value yields standard deviation and expected mean peak responses can be obtained by way of maximum response factor which is defined as a ratio of maximum response to standard deviation. Under effect of non-stationary excitations, the peak response factors are calculated for base responses (shear forces, moments) by damping ratio of 5 percent. The variations of these

factors are obtained for the piers situated in half of the system given in Figure 7(a, b) for each soil type. For the responses at the base of piers, the peak factors are obtained in the range of 3.08~3.29 for bedrock, 2.89~3.18 for hard soil, 2.91~3.24 for mild and 2.97~3.11 for soft soil. The peak factors of the abutments develop higher than those of the interior piers. For displacements, these factors appear in range of 2.88~3.04. Generally, the lowest quantities are found for soft soil condition. As it is seen from the figures, the ranges for shear forces and bending moments are almost the same because they are base responses of the same nodal point. For a three-span suspension bridge (770 m in length) considering partially correlated stationary ground motions, peak factors were found⁴² in the range of 2.81~3.22 for span moment, displacement and cable tension. Nonlinear behavior of a system having long spans is expected to occur in most severe earthquakes and it may cause significant effects on the seismic responses. However, elastic behavior, as expected in case of moderate or medium earthquakes, is essentially adopted to overcome the difficulty in the frequency domain solutions.

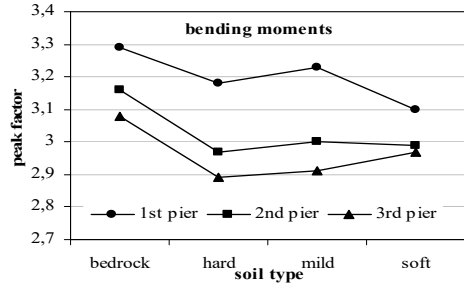
If the response results are examined with regard to soil medium, the stiffer soil condition yields also larger peak factors. Under effect of the simulated motions, the expected peak responses of the middle pier and an interior pier are separately obtained for 5 percentpercent damping ratio. The mean values of peak base responses (shear force and bending moment) are comparatively also presented in Figure 7 for each soil type by considering frequency and time domain solutions. The response comparisons are illustrated for the piers located at mid-span and 2nd pier. The solutions in frequency domain are obtained by assuming an equivalent constant intensity for each power spectrum. From the figures, it is observed that the solutions obtained in frequency domain are lower than those of the time domain for each soil type and therefore the highest mean values for peak responses appear in time domain solutions (especially in spectral solutions). Whereas the stochastic solutions mostly yield compatible results in acceptable level with reference to the time history quantities, large differentiations are observed for the soft soil case.

As the rigidity of the soil medium increases, the differences in response values become larger in terms of the solution methods. For example, the results of hard soil are seen as much more compatible than those of the soft soil. On the other hand, the soft soil condition may cause significant variations in responses and large differences especially for bending moments. It should be noted that while the time domain results are achieved by realizing a great number of solutions for each soil type, the frequency domain results are directly computed by considering PSDF intensities of the motion considered. The reason of the differences between the stochastic and time domain methods mainly arises from theoretical basis of the approaches. Although time domain results are specific for each record, the results of stochastic analysis are obtained as general solutions for the expected earthquake.

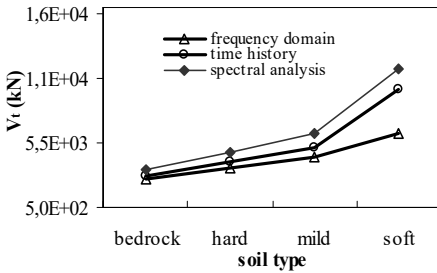
The variations in mean peak values and variances of the pier-base responses are shown for along the viaduct system in Figure 8. Whereas the mean peak responses exhibit similar lines in terms of soil variability, distinct increases in mean values and variances of the responses are observed for soft soil type as shown in figures. While the highest variances of the peak responses are observed in the soft soil for all cases, the lowest variances appear in case of bedrock and hard soil as expected. The soft soil case showed relatively large variations due to its amplifications which depend on filter parameters of the waves in the soil medium.



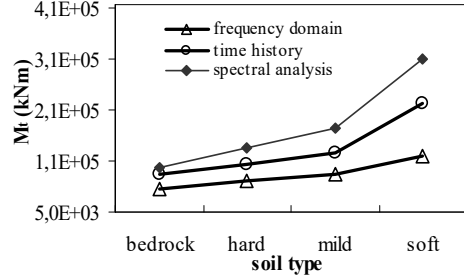
a) peak response factors for shear forces



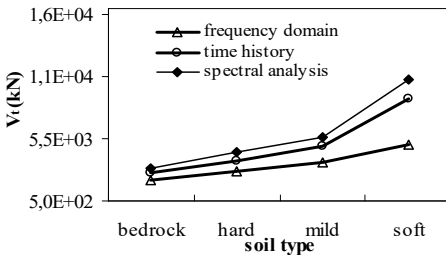
b) peak response factors for bending moments



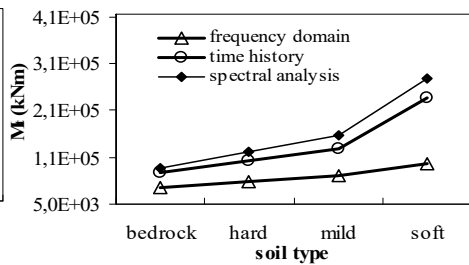
a) expected shear forces (midspan- pier)



b) expected bending moments



c) expected shear forces (2nd-pier)



d) expected bending moments

Figure 7 - Peak response factors and expected mean-peak responses for soil types with solution methods

It is derived that the peak values of the soft soil condition increase up to about 2.4 times and variances increase up to about 7 times with reference to the values of the hard soil. The lowest variances and mean values come into being at the first pier (no:1) which has the highest rubber rigidity and it is one of the shortest piers. It is already known that these are the primary properties to limit of a viaduct system. The deck displacements are studied under the effects of the non-stationary ground motions as well. The expected mean peak displacements and variances at the points of each deck-mid-span and pier upperends are given for various soil conditions in Figure 9. The similar tendencies are observed for deck displacements and variations appear nearly in symmetric shape except for soft soil ones. The soft soil case produces very large scatter for response variations.

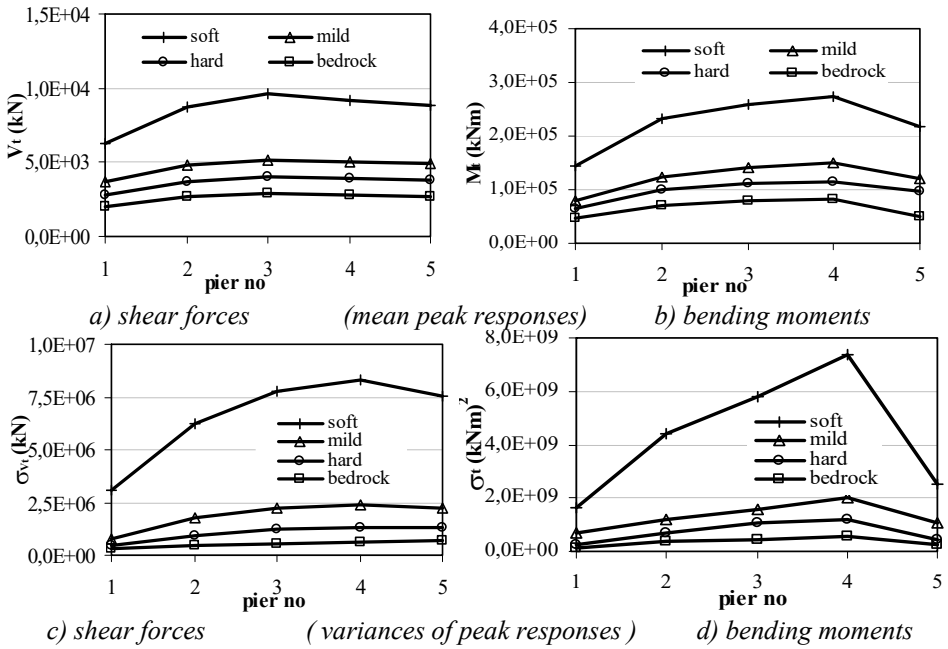


Figure 8 - Peak responses of the viaduct piers

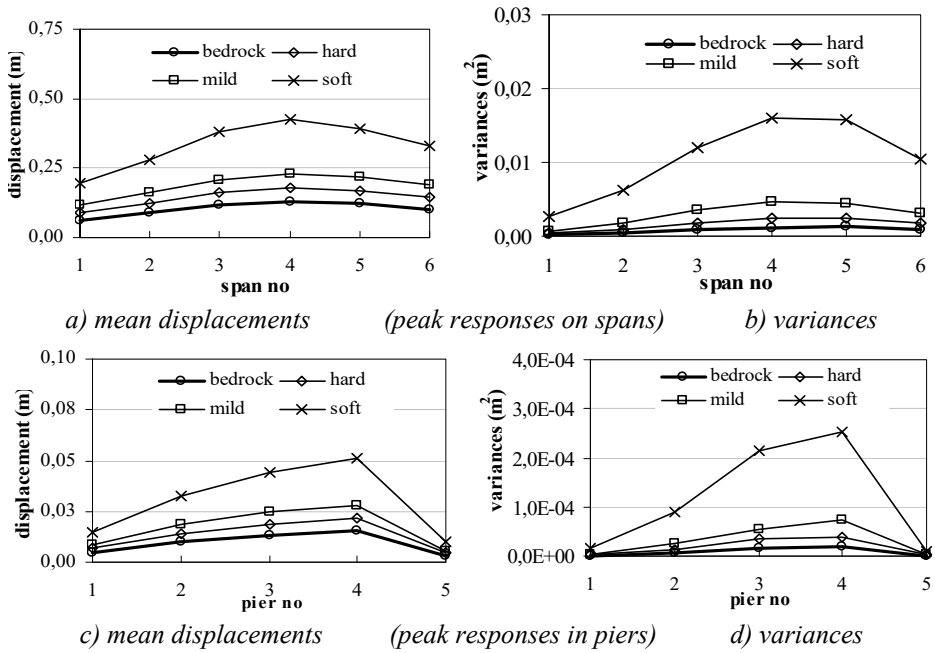


Figure 9 - Expected peak displacements and variances in pier upper-ends along each mid-span

While the highest displacements of the viaduct appear in the neighborhoods of mid-span, the lowest variances are observed in exterior spans for the stiff soil types. Furthermore, the fourth pier, where the highest variances are observed, is the longest column. From the figures, the soft soil condition has much more influence on the displacements than the effects of heights of the piers and bearing stiffness. Large differences between in the response values of the piers and deck indicate that the mechanical properties of the rubber bearings and the pier heights significantly affect the lateral displacement configuration of the bridge. This fact indicates that the peak responses and variances can be limited or controlled by providing soil stiffness, modifying the rigidity of bearings or designating length of piers.

7. EXTREME VALUE ANALYSIS FOR NON-STATIONARY RESPONSES

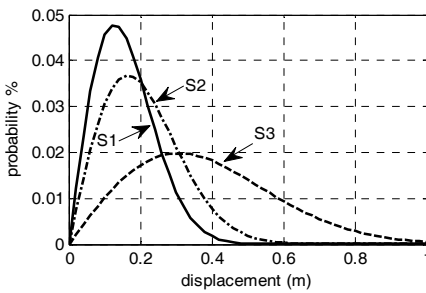
The peak responses obtained in previous sections are handled herein with a distribution model and safety of the response is expressed by exceedance probability functions. For this purpose, the peak responses are assumed to follow the Rayleigh distribution under effects of earthquake excitations. Since the simulated earthquakes are considered in non-stationary form, the responses would appear in a broad interval and their confidence range cannot be easily defined. Therefore, the scatter of the responses obtained from the analyses is relatively large. This fact indicates that when a relatively high safety factor is required for ordinary structures, it cannot be accomplished economically. Deciding on the acceptable level of safety is a reasonable approach but it is an extremely complex-task. However, ductility demand can be used⁴³ as a design parameter in nonlinear behavior by assuming acceptable risk for a certain level of exceedance. In the present study, various exceedance probabilities are considered to evaluate the extreme responses. Since twenty non-stationary earthquakes are used for each soil type, the parameters of the Rayleigh distribution⁴⁴ values are estimated by evaluating of the system responses for each ensemble.

The mean value (\bar{x}), the standard deviations (σ_x) and the distribution parameter (α) of the peak displacements are given in Table 4 for the cantilever-beam end points (Figure 5, point A) on the middle-pier. The probability distributions and the exceedance probability functions derived from the extreme displacements are drawn in Figure 10(a, b) based on the soil types. The shapes of probability functions of hard and mild soil are to be similar due to close standard deviation values are to be similar due to close standard deviation values. However, the probability distributions of the soft soil display larger dispersions over a wide-interval because of quite high standard deviation and scale parameter.

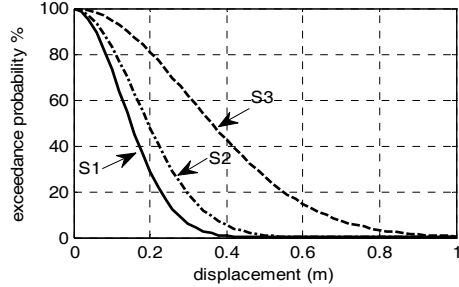
Table 4 - Statistical parameters of the peak displacements

Soil type	\bar{x} (m)	σ_x (m)	α
S1 (hard)	0.173	0.048	0.127
S2 (mild)	0.225	0.064	0.165
S3 (soft)	0.416	0.121	0.306

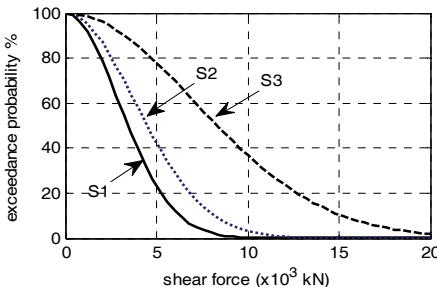
Whereas the highest exceedance probabilities yield the close peak displacement values for all soil types, the response values of the soft soil significantly decompose with larger values in low risk levels. In other words, as the exceedance probabilities decrease, the extreme displacements of soft soil case distinctly increase compared to other soil cases. Likewise, the extreme values of the base shear forces (V_t) and the overturning moments (M_t) are evaluated for some exceedance levels and they are comparatively given in Figure 10 (c, d). From the figures, the expected peak responses of soft soil case are observed with exponentially increasing values as the exceedance probabilities decrease. Namely, the similar behavior is observed for the base responses as well.



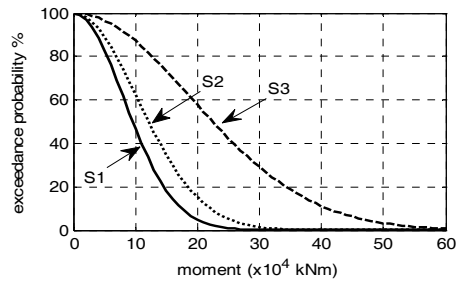
a) probability distribution functions



b) exceedance probability functions



c) exceedance prob. functions for shear force



d) exceedance prob. functions for moment

Figure10 - Probability distributions for peak displacements and forces

Table 5 - Peak displacements (m) for exceedance probabilities

Soil type	Exceedance level		
	2 percent	10 percent	50 percent
S1	0.355	0.272	0.149
S2	0.462	0.354	0.194
S3	0.856	0.657	0.360

The expected peak displacements of the deck are computed depending on various exceedance probability levels (2 percent, 10 percent, 50 percent) that can be used in design codes. The corresponding displacement values are shown in Table 5. The displacements for the soft soil case yield much higher values with decreasing exceedance probabilities. Additionally, corresponding peak base responses (shear forces and moments) are obtained for the considered risk levels as given in Table 6.

Table 6 - Peak base responses for exceedance probabilities

Soil type	V_t (kN×10 ³)			M_t (kNm ×10 ⁴)		
	2%	10%	50%	10%	50%	90%
S1	8183	6278	3444	22,72	17.43	9.56
S2	10649	8170	4483	28,82	22.11	12.13
S3	19774	15170	8323	53.41	40.97	22.48

In case of very strong ground motions corresponding low exceedance probability level (2 percent), the isolation system would most likely yield and then behave in nonlinear form due to changing stiffness characteristics. Therefore, the structural solutions would require inelastic behavior model for isolation system. In this case, the solutions in frequency domain would be more sophisticate and closed-form solutions cannot be applied. Consequently, analytical/approximate techniques or discrete numerical simulations iteratively should be utilized to consider nonlinearity. It should be noted that these complex solutions require numerous and troublesome computations. In order to calculate the 2 percent exceedance probability of the system outputs, it is necessary to obtain the two important parameters (shear force and bending moments) by formulas with the given statistical variances. These values are therefore expressed. For linear behavior, it can be recommended to use the isolators by taking the displacement limits from the relevant codes. In this study, it is assumed that nonlinear behavior of the isolators cannot be allowed.

In order to obtain dimensionless values, the peak responses expressed with some exceedance probabilities are normalized by the values of the hard soil case and mean response. Thereby, the increase ratios in seismic responses are given by deterministic values for each soil conditions and exceedance levels. For the base moments normalized by the values of hard soil (Table 7), the increase ratios in the peak response values are computed as 1.269 for mild soil and 2.351 for soft soil condition. If the peak responses are normalized by expected mean values, the increase ratios are computed as shown by Table 8. The results indicate that when the exceedance probability decreases from 50 percent to 2 percent, the peak displacements increase about 2.38 times. On the other hand, the peak displacements of the exceedance probability of 10 percent increase about 1.82 times with respect to expected mean value. As it is seen from the tables, the increase ratios are independent from soil conditions.

If the peak responses are normalized by expected mean values, the increase ratios are computed as shown by Table 8. The results indicate that when the exceedance probability decreases from 50 percent to 2 percent, the peak displacements increase by a factor of about 2.38. On the other hand, the peak displacements of the exceedance probability of 10 percent

increase about 1.82 times with respect to expected mean value. As it is seen from the tables, the increase ratios are independent from soil conditions. Furthermore, it is observed that the ratios of the peak responses corresponding to any two exceedance levels are virtually same for all type of the responses. This fact yields that when the increase ratios of any soil type are known, then the extreme response values of other soil types can be predicted by using the increase ratios corresponding to any exceedance level.

Table 7 - Ratios normalized by hard soil values

Soil type	Shear force		
	2%	10%	50%
S1	1.000	1.000	1.000
S2	1.301	1.301	1.302
S3	2.416	2.416	2.416

Table 8 - Ratios normalized by median values Rewrite table

Soil type	Displacement	Shear force	Moment
	2%	10%	50%
Hard	2.375	1.823	1.000
Mild	2.376	1.823	1.000
Soft	2.376	1.823	1.000

The soil-structure interaction effect was not considered. Simulated earthquakes are created based on the predominant frequency and damping factors of the ground properties. Since this study focuses on the stochastic earthquake response of the bridge for different ground conditions, the actual foundation and ground contour were not modeled for simulations. The study, which was based on the dimensions of a real viaduct, involves substantial simulations and dynamic analysis calculations that required a lot of computer processing time and memory. Depending on some parameters, a specific research topic that will cover foundation and ground interaction could be addressed in the near future.

Although calculations are made according to linear and nonlinear solution assumptions based on the equality of displacements, nonlinear time history analysis is applied as a solution type, and in the case of plastic behavior; of course, different results are obtained compared to the solution results in the linear elastic frequency domain. In terms of the difference of calculation methods, the same results cannot be expected for the bridge or viaducts due to energy consumption such as the formation of plastic hinges which are very important under nonlinear behavior. Especially in this study, the viaduct, which is considered as an example, is the approach structure to a very important suspension bridge. The performance level in the regulations foreseen as the design philosophy is the possibility of exceedance 2 percent during 100- years of economic life and very limited damage in an earthquake with $M_s \geq 7$. Immediately following the earthquake, it is expected to be opened to service. Therefore, it is

aimed to keep the ductility demand below the ductility capacity. For this reason, bridge behavior is expected in the elastic region by using auxiliary seismic isolation equipment in both design earthquakes and severe ground movements.

8. CONCLUSIONS

The solutions in frequency domain are obtained by applying the linear stochastic method over a bridge under effects of the simulated earthquakes. In order to achieve proper non-stationary ground motions, more compatible parameters of the time dependent functions are considered by using approximate estimates (trial-and-error) to convergence the characteristics of the original record. The main conclusions of this paper can be drawn as:

- Soft soil site affects adversely the peak responses and the highest values develop due to the amplification of earthquakes. The soft soil condition increases the mean-peak responses up to 2.4 times and the variances up to about 7 times according to the values of the hard soil.
- Softer soil condition has produced higher peak response factors. From the analyses, the peak factors are obtained in the range of 2.88-3.29. In Vanmarcke model [17], these factors were computed as 3.45 by the quake duration of $t=20$ sec which is also used in this study and reliability level of 95 percent. Peak responses and variances can be limited or controlled by providing soil stiffness, modifying the rigidity of bearings or designating lengthy of piers.
- Exceedance probability functions of the peak responses are in a close relationship for the soil sets. However, the probability distributions of the soft soil decompose and display a wider dispersion even for low exceedance levels. The extreme response values significantly increase at low exceedance probabilities. Furthermore, as the exceedance probability level increases on soft soil sets, increment in response values become in exponential way like a spike in contrast to other soil types.
- Response values normalized by S1 (hard) soil results also show that the increase ratios of the peak responses corresponding to any soil type is almost constant (Table 8) for all exceedance levels. The peak responses become statistically independent from the soil types when the increase ratios are normalized by the 50 percent exceedance level values for each soil group (Table 9). Thus, if the increase ratios of any type of linear response are known for a soil site, then increase ratios of the peak responses can be predicted for the other soil types by using these known ratios.
- While time domain method requires great numbers of solutions for probabilistic responses, the frequency domain procedures yield directly. The frequency results do not only reflect the characteristics of the simulated records but also represent general solutions for expected earthquakes. Therefore, the frequency analyses can represent expected quakes other than design quake defined by courtesy of damage limitations and predetermined performance levels assigned by seismic codes.
- In case of very strong earthquakes, the isolator would most likely behave in nonlinear range and frequency domain analyses require more complex solutions including iterative procedures to consider nonlinearity.

- The peak response values obtained in this study may be used in design process or risk/reliability-based assessments for the viaduct system. However, a general inference for peak responses would require further analyses including different bridge systems.

Statements and declarations

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Symbols

$p(t)$: load function
$R_p(\tau)$: autocorrelation function
$S_p(\omega)$: spectral density function for load
$v(t)$: response function
TF	: transfer function
$\{\ddot{v}\}$: acceleration
$\{\dot{v}\}$: displacement
$\{v\}$: velocity
$H_n(i\omega)$: frequency response function
K_n	: generalized stiffness
$S_{v_m v_n}(\omega)$: cross-spectral density function
D_m, D_n	: modal parameters
$ H_g(i\omega) , H_f(i\omega) $: filter functions
$S_x(\omega)$: power spectral density function for a random process
ω_g, ξ_g	: ground circular frequency and ground damping ratio
ω_f, ξ_f	: filters for the power spectrum
φ_{kr}	: random phase angle
t_{eff}	: effective duration
$z(t)$: envelope function

$\Phi_i(\overline{\omega})$: product function
K_e, K_p, K_{eff}	: initial stiffness, post-yield stiffness and effective stiffness
F_y, Q	: yielding force and characteristic strength
Δ, Δ_y	: rubber bearing displacement and yielding displacement
K_v	: vertical stiffness.
G, A	: shear modulus and rubber area
$\sum t_r$: total rubber thickness
E_c	: elasticity modulus
(\bar{x})	: mean value
σ_x	: standard deviation
σ_x^2	: variance
α	: distribution parameter
$\ddot{V}_g(\overline{i\omega})$: Fourier transformation

References

- [1] Shinzouka, M., Jan, C.M., Digital Simulation of Random Processes and its Applications, *Journal of Sound and Vibration*, 22(1), 111-128, 1972.
- [2] Zhu, D.Y., Zhang, Y.H., Kennedy, D., Williams, F.W., Stochastic Vibration of The Vehicle–Bridge System Subject to Nonuniform Ground Motions, *Vehicle System Dynamics*. 52(3), 410–428, 2014.
- [3] Pagnini, L.C., Solari, G., Stochastic Analysis of The Linear Equivalent Response of Bridge Piers with Aseismic Devices, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 28, 543-560, 1999.
- [4] Der Kiureghian A., Neuenhofer, A., A Response Spectrum Method for Multiple-Support Seismic Excitations, UCB/EERC-91/08. University of California, Berkeley, 1991.
- [5] Der Kiureghian, A., Structural Response to Stationary Excitation, *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 106(10), 1195-1213, 1980.
- [6] Vrouwenvelder, T., Stochastic Modeling of Extreme Action Events in Structural Engineering, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 15, 109-117, 2000.
- [7] Yang, L.F., Leung, A.Y.T, The Stochastic Finite Segment in the Analysis of the Shear-Lag Effect on Box-Girders, *Engineering Structures*, 23, 1461-1468, 2001.
- [8] Ettouney, M., Hapij, A., Gajer, R., Frequency-Domain Analysis of Long-Span Bridges Subjected to Nonuniform Seismic Motions, *Journal of Bridge Engineering*, 6(6), 577-586, 2001.

- [9] Hasgür, Z., Stochastic Analysis of Bridge Piers with Symmetric Cantilevers under the Base Accelerations, *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, 48(3-4), 657-667, 1995.
- [10] Ates S., Bayraktar. A., Dumanoglu, A.A., The Effect of Spatially Varying Earthquake Ground Motions on the Stochastic Response of Bridges Isolated with Friction Pendulum Systems, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 31-44, 2000.
- [11] Jangid, R.S., Equivalent Linear Stochastic Seismic Response of Isolated Bridges, *Journal of Sound and Vibration*, 309, 805-822, 2008.
- [12] Marona, G.C., Sgobba, S., Stochastic Energy Analysis of Seismic Isolated Bridges, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 759-773, 2007.
- [13] Dicleli, M., Karalar, M., Optimum Characteristic Properties of Isolators with Bilinear Force–Displacement Hysteresis for Seismic Protection of Bridges Built on Various Site Soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 982–99, 2011.
- [14] Sarıtaş, F., Performance-Based Seismic Assessment of a Base-isolated Bridge-pier, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(1), 21-38, 2022.
- [15] Sarıtaş, F., Seismic Performance Assessment of an Isolated Multispan Bridge, *Arabian Journal of Science and Engineering*, 47(10), 12993-13008, 2022.
- [16] Qiang, H., Jianian, W., Xiuli, D., Nonlinear Response of Continuous Girder Bridges with Isolation Bearings under Bidirectional Ground Motions, *Journal of Vibro engineering*, 7(2), 816-826, 2015.
- [17] Davenport, A.G., Note on The Distribution of Largest Values of Random Function with Application to Gust Loading, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 28, 187–196, 1964.
- [18] Vanmarcke, E.H., Lomnitz, C., Rosenbleuth, E., Structural Response to Earthquakes. Chapter 8, In *Seismic Risk and Engineering Decision*, Elsevier, New York, USA, 1976.
- [19] Mahmoud, S., Austrell, P.E., Jankowski, R., Simulation of The Response of Base-Isolated Buildings under Earthquake Excitations Considering Soil Flexibility, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(3), 359-374, 2012.
- [20] Sarıtaş, F., Hasgür, Z., Dynamic Behavior of Bridge Pier with Elastomeric Bearings under Earthquake Effects for Different Soil Layers and Support Conditions, *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 1733-1756, 2014.
- [21] Jia, H.Y., Zhang, D.Y., Zheng, S.X., Xie W.C., Pandey, M.D., Local Site Effects on a High-Pier Railway Bridge under Tridirectionally Spatial Excitations, *Non-stationary Stochastic Analysis*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 55–69, 2013.
- [22] Jiao, C., Dong, X., Zhou, G.D., Wu, X.P., Seismic Response of Long-Span Triple-Tower Suspension Bridge under Random Ground Motion, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-17, 2017.
- [23] Adanur, S., Altunışık, A.C., Soyluk, K., Bayraktar, A., Dumanoglu, A., Contribution of Local Site-Effect on The Seismic Response of Suspension Bridges to Spatially Varying Ground Motions, *Earthquakes and Structures*, 10(5), 1233-1251, 2016.

- [24] Schueller, G.I., Developments in stochastic structural mechanics, *Archive of Applied Mechanics*. 75(10-12) (2006) 755-773.
- [25] Konaklı, K., *Seismic Response Analysis with Spatially Varying Stochastic Excitation, Risk and Reliability Analysis; Theory and Applications*. (Springer series in reliability engineering, 199-225, 2017.
- [26] Clough R.W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Second edition, Mc-Graw Hill Book Company, New York, 1993.
- [27] Rofooei, F.R., Mobarake, A., Ahmadi, G., *Generation of Artificial Earthquake Records with a Stationary Kanai-Tajimi Model*, *Engineering Structures*, 23, 827-837, 2001.
- [28] Kanai, K., *Semi-Empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground Motion*, *Bull Earthq. Res, Inst. University of Tokyo*, 35, 309–325, 1957.
- [29] Tajimi, H.A., *Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure*, *Proceedings of the 2nd World Conference Earthquake Engineering*, 2, 1467–1482, 1960.
- [30] Liu, S.C., Jhaveri, D.P., *Spectral Simulation and Earthquake Site Properties*, *ASCE, J Eng Mech Div.*, 95, 1145–1168, 1969.
- [31] Hasgür, Z., *Obtaining of the Simulated Earthquake Ground Motions Depending on Soil Conditions*, PhD Dissertation, Istanbul Technical University, Turkey, 1981.
- [32] Penzien, J., Lee, M.C., *Stochastic Analysis of Structures and Piping Systems Subjected to Stationary Multiple Support Excitations*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 11, 91-110, 1983.
- [33] Ohsaki, Y., *Introduction to Spectral Analysis of Earthquake Waves*, Translated by Muzaffer İpek, TMMOB, İstanbul, Turkey, 1991.
- [34] Jennings, P.C., Housner, G.W., Tsai, N.C., *Simulated Earthquake Motions for Design Purposes*, *Proceedings of the 4th World Conference Earthquake Engineering. Chile*, 1(a-1), 145–160, 1969.
- [35] Housner, G.W., Jennings, P.C., *Generation of Artificial Earthquakes*, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 90, 113-150, 1964.
- [36] Şafak, E., Mueller, C., Boatwright, J., *A Simple Model for Strong Ground Motions and Response Spectra*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 203-215, 1987.
- [37] Lee, S.C., Latha, V., Rajaserkan, S., *Generation of Artificial Earthquake Motion Records using Wavelets and Principal Component Analysis*, *Journal of Earthquake Engineering*, 10, 665-691, 2006.
- [38] Sarıtaş, F., *Stochastic Dynamic Analysis of Box-Girder Bridges*, PhD Dissertation, Istanbul Technical University, Turkey, 2007.
- [39] DIN 4141-14. *Structural Bearings, Laminated Elastomeric Bearings Design and Construction*. Deutsche Institut für Normung. 1985.

- [40] AASHTO, LFRD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Joints and Bearings, Washington D.C., 2007.
- [41] Naeim, F. and Kelly, J.M. Design of Seismic Isolated Structure. John Wiley & Sons, U.S.A. 1999.
- [42] CSI Computer & Structures Inc. SAP2000, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Three-Dimensional Structures. Computer & Structures, Inc., Berkeley, California. 2004.

Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın Entegrasyonu Modeli

Hüseyin ERYAMAN¹
Ertan AKÜN²

ÖZ

İnşaat sahasında gerçekleşen kazalar özellikle yükseklikten düşmeler hem ölümcül hem de ölümcül olmayan yaralanmaların önde gelen nedenidir. İnşaat sektöründe Yapı bilgi modelleri (YBM), Genişletilmiş Gerçeklik (GG) ve Yapay Zekâ (YZ) gibi dijital teknolojiler, yapım üretkenliğini, verimliliğini ve güvenliğini artırmak için değerli araçlar olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın entegrasyonu modeli önerilmektedir. Teorik çerçeveye ilişkin olarak iş süreci modeli ve sistem uygulama model entegrasyonu gösterilmektedir. Önerilen modelin değerlendirilmesi, hipotezlerin güvenilirliğini, geçerliliğini ve katkısının test edilmesi için bir Yapısal Eşitlik Model geliştirilmiştir. Araştırma bulguları, önerilen modelde kullanılan teknolojilerin entegrasyonun iş güvenliği denetimine olan olumlu etkisini ve önemini doğrulamaktadır. Önerilen model yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin iş güvenliği bilgilerini analitik yeteneklerle dijitalleştirir ve karar verme sürecini optimize eder.

Anahtar Kelimeler: Yüksekte çalışma, iş güvenliği denetimi, genişletilmiş gerçeklik, yapay zekâ, entegrasyon modeli.

ABSTRACT

An Integration Model to Facilitate Occupational Safety Inspection through Augmented Reality and Artificial Intelligence for Working at High Locations in Buildings

Accidents at the construction site, especially falls from height, are the leading cause of both fatal and non-fatal injuries. In the construction industry, digital technologies such as Building

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 3 Ağustos 2022 günü ulaşmıştır. 25 Nisan 2023 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1291960>

1 Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Haspolat, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
eryamanhuseyin79@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-3021-6032>

2 Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Haspolat, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
eakun@ciu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3021-6032>

information modeling (BIM), Extended Reality (XR) and Artificial Intelligence (AI) have been identified as valuable tools to increase construction productivity, efficiency and safety. In this research, an integration model to facilitate occupational safety inspection through augmented reality and artificial intelligence for working at high locations in buildings is proposed. The business process model and system application model integration are shown in relation to the theoretical framework. A Structural Equation Model was developed to evaluate the proposed model and test the reliability, validity and contribution of the hypotheses. Research findings confirm the positive effect and importance of integration of technologies used in the proposed model on occupational safety auditing. The proposed model digitizes the occupational safety information of teams working at high locations with analytical capabilities and optimizes the decision-making process.

Keywords: Occupational safety inspection, augmented reality, artificial intelligence, integration model.

1. GİRİŞ

Günümüzde, inşaat endüstrisi en tehlikeli yapım işlerini içeren sektörlerden biridir [1]. Aslında, inşaat sektörü dünya iş gücünün sadece yaklaşık %7'sini istihdam etmesine rağmen, ölümlerin %30-40'ından sorumludur. İstatistikler, inşaat güvenliğinin kalıcı bir küresel sorun olduğunu göstermektedir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD), Çalışma İstatistikleri Bürosundan (ÇİB) alınan nüfus sayımı verilerine göre 774 işçi inşaatta yaralanarak yaşamını yitirmiştir, bu da 2010 yılında tüm endüstrilerin %16,5'ini oluşturmaktadır. Ölüm oranı 100.000 tam zamanlı eşdeğer işçi başına 9.8'dir ve tüm endüstriler arasında en yüksek dördüncü sırada yer almaktadır. 1990 ve 2000 yıllarında, 26.000'den fazla ABD inşaat işçisi çalışırken yaşamını yitirmiştir. [2]. Bu ölümlerin %40'ı yüksekten düşme şeklindedir. Daha ileri araştırmalar, yetersiz, kaldırılmış veya düşmeye karşı koruma ekipmanının uygunsuz kullanımı bu düşüşlerin %30'undan fazlasına neden olmuştur [2]. Çin [3], Birleşik Krallık [1] ve Almanya [4] gibi diğer ülkelerle ilgili istatistikler, inşaat sektöründeki yüksek ölümlü kaza yüzdelerini doğrulamaktadır ve yüksekten düşmelerin en sık görülen sebeplerden biri olduğuna işaret etmektedir. Sonuç olarak inşaat sektörünün birçok inşaat firmasının benimsediği “sıfır kaza/yaralanma” vizyonundan uzak olduğu bir gerçektir [1].

İnşaat sektöründe, iş güvenliği konuları karmaşık sosyo-teknik sistemler olarak kabul edilebilir [6]. Paydaşlar arasında malzeme üretici firmaları, ana yükleniciler ve alt yükleniciler, tasarım personeli, proje ve şantiye yöneticileri vardır. Ayrıca, genellikle çalışan işçi yoğunluğunun, bitişik binaların ve tesislerin, karmaşık hava olaylarının meydana geldiği şantiyeler, çok dinamik bir çalışma ortamına neden olur. Başka bir deyişle, iş güvenliği durumu, bileşenleri öngörülemeden doğrusal olmayan etkileşimlere maruz kalan bir sistemin acil bir özelliğidir [12]. Bir araştırmada [6], yazarlar [13] tarafından tanımlanan ve özellikle karmaşık sosyo-teknik sistemler düşünülerek geliştirilen iş güvenliği riski yönetimi çerçevesini varsayarak, bir kule vincin güvenlik sorunlarını sistemik bir sorun olarak incelemişler; sonucunda kule vinç güvenliğini etkileyen faktörlerin bir listesini belirlemişlerdir.

İnşaat sahasında gerçekleşen kazalar özellikle yükseklikten düşmeler hem ölümcül hem de ölümcül olmayan yaralanmaların önde gelen nedenidir [14]. Düşmeler, bir denge kaybının ve dengesizlikten kurtulamamanın neden olduğu duruş bozukluğuna bağlanabilir. İşgücü İstatistik Ofisi (BLS), 2017 yılında 887 ölümün düşmelere, kaymalara ve takımlara atfedildiğini ve toplam 227.760 ölümcül olmayan işyeri yaralanmasının düşmelerden kaynaklandığını bildirmiştir (düşük seviyeye düşme: 47.180; aynı seviyeden düşme: 142.770; kayma/takılma: 33.720) özellikle yüksek etki oranı ile inşaat (24.160 düşme) ve imalat (22.010 düşme) [14]. Mesleki popülasyonlarda bu kadar yüksek ölümcül ve ölümcül olmayan yaralanmalar rapor edildiğinde, ergonomik bir popülasyonda düşmeleri ve düşmeye bağlı yaralanmaları önlemek için yeni değerlendirme ve eğitim metodolojilerinin izlenmesine ihtiyaç vardır. Tehlikeli çalışma koşullarından kaynaklanan tehlikeler ve mesleki ve endüstriyel çalışma ortamında insan vücuduna uygulanan fiziksel talepler, mesleki düşme riskini artırmaktadır [15]. Ayrıca, duruş dengesinin değerlendirilmesi hem fizyolojik hem de bir bireye yerleştirilen biyomekanik streslerin dolaylı bir etkililik ölçüsüdür ve duruş kontrol sisteminin genel bir güvenlik durumunu nicelleştirir.

Görsel yüksekliğe dayanamama, görsel uyarıcının, duruşsal dengesizlik ve yüksekte düşme endişesine yol açan bir olay olarak tanımlanır [16]. Duruşsal dengesizlik, 5 m (16.4 ft.); [17] yüksekliklerde ve 20 m (65.6 ft.) yüksekliğe kadar artan bir dengesizlik ile rapor edilmiştir, ardından dengesizlik değişiklik olmayan bir duruma ulaşmaktadır [17]. Ayrıca, 20 (65.6 ft.), 50 (164 ft.) ve 100 m (328 ft.) irtifalarında duruşsal denge ve genel vücut sallanması etkilenmemiştir [17]. Öznel yükseklik dengesizliğinin yukarıya ve göze bakmadan bağımsız olduğu ancak göz-nesne mesafesine bağlı olduğu bildirilmiştir [17,18]. Daha sonra, 20 m'nin (65.6 ft.) üzerindeki yüksekliklerde, görsel ipuçları doygun hale geldiğinden ve yüksekliğe tepki olarak duruşsal denge göz-nesne mesafesinin büyüklüğünün bir fonksiyonu gibi görüldüğünden ve karmaşık koordineli ve sürekli geribildirim duruşsal kontrol sistemlerinden dolayı vücut sallanmasında hiçbir farklılık belirgin değildir [17].

Ölümlerin yüksek sayısı genellikle güvenlik planlaması ve proje yürütme süreçleri arasındaki ayrılma gibi çeşitli nedenler [2,5], örtük güvenlik sorunları ve hepsinden önemlisi inşaat projelerinin dinamik ve karmaşık yapısı ve sürekli değişim gerektiren güvenlik ihtiyaçlarıdır [5]. İnşaat güvenliği sorunları düzgün bir şekilde karmaşık sosyoteknik sistem [6] olarak tanımlanan, sadece en iyi uygulama yaklaşımını benimseyerek önceden tanımlanmış gibi üstesinden gelinemez. Tersine, bu tür sorunların cevapları acil uygulamalar olarak tanımlanabilir [7].

İnşaat sektörü genellikle doğası gereği yenilikçi teknolojileri benimsemeye yapılındırılmamış ve değişen ortamının zorlukları nedeniyle belirsiz olarak kabul edilir [1,8]. Bununla birlikte, birçok araştırma çalışması [9-11] Güvenlik yönetimi alanındaki Bilişim ve İletişim Teknolojilerine ilişkin uygulanan en son gelişmelerin proaktif olarak tehlikeli senaryolara yanıt verebileceğini ve reaktif güvenlik yönetiminden proaktif güvenlik yönetimine geçişi sağladığını göstermektedir.

Tasarım Yoluyla Önleme (TyÖ), yüksekte düşme çalışmalarının ana odak noktasıdır ve TyÖ araçlarının çoğu, planlama ve tasarım aşamalarının başlarında güvenlik tehlikelerini belirlemek için YBM teknolojisini kullanır. Gelişmiş TyÖ teknolojisi, yalnızca kural denetleme seçenekleri sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tasarımdaki değişiklikleri birleştirmek için mekanizmalar içerir. Bu araçlar tehlikeleri belirledikten sonra önleyici tedbirler önerebilir ve kontrol tedbirlerinin uygulanmasını izleyebilir. Zhang ve diğ. [2],

tasarımla ilgili düşme tehlikelerinin planlama sürecinin başlarında nasıl belirlenebileceğini ve ortadan kaldırılabilirliğini araştırmıştır. YBM için bir eklenti olarak otomatik bir güvenlik kuralı kontrol algoritması uygulanmış ve düşmeye karşı koruma sistemlerinin manuel ve otomatik güvenlik modellemesini karşılaştıran iki konut projesi üzerinde test edilmiştir. TyÖ araçlarının doğru kullanımı, tüm proje paydaşlarının, çalışanların güvenliğini artırmak için bina tasarımlarını optimize etmek üzere birlikte çalışmasına olanak tanır. YBM, bilgisayar tarafından oluşturulan algoritmalarla birlikte, Güvenli Tasarım (GT) elde etmek için bir binanın tasarımına veya inşaat programına dahil edilmiş düşme risklerini belirleyebilir. Yüksekten düşmeyi önlemek için fiziksel engellerin seçilmesi ve uygulanması, kurulum sırasında SD hedeflerine ulaşılmasını sağlamak için tasarımcıların odak noktasıdır [19].

Goh ve Guo [20], aktif düşmeye karşı koruma sistemlerinin tasarımını desteklemek amacıyla FPSWizard'ı web tabanlı bir sistem olarak önermiştir. Hibrit Vaka Tabanlı Akıl Yürütme (CBR) ve Kural Tabanlı Akıl Yürütme (RBR) temelli bu tür sistemlerin tasarımında ve seçiminde son kullanıcılara yardımcı olmak için çevrimiçi bilgiye dayalı bir sistem önerdiler. Diğer araştırmalar da avantajlara göre seçmenin uygun şekilde uygulanmasıyla (AGS) yalnız düşünce kavramlarını kullanmış [21] ve yüksek binalarda korkuluklar aracılığıyla önleyici tasarım için Sanal Ortam (SO) Teknolojisini kullanmıştır [22].

İnşaat sektöründe yüksek bina projelerinin inşası, faaliyetlerin benzersizliği ve doğasının yanı sıra çalışma ortamının karmaşıklığı ve iş güvenliği konularının hayati önem taşıması nedeniyle tehlikeli bir meslektir. İnşaat sektöründe yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının artan sayısı ve olumsuz sonuçları nedeniyle, yüksekte çalışma standartları, ekipman, temizlik/düzen, çalışanlar, yönetim faaliyetleri ve eğitim/bilgilendirme çalışmalarına destek olacak yeni teknolojik yaklaşımların belirlenmesi ve uygulamaya konulması gerekmektedir. Bu yeni teknolojik yaklaşımlara örnek olarak Yapı Bilgi Modellemesi (YBM), Dijital İkiz (Dİ) gibi dijital teknolojiler, inşaat üretkenliğini, verimliliğini ve güvenliğini artırmak için değerli araçlar olarak tanımlanmıştır. Bu araştırma, YBM ve inşaat sektöründe fotogrametri, küresel konumlandırma sistemi (KKS), radyo frekansı ile tanımlama (RFT), sanal gerçeklik (SG), artırılmış gerçeklik, (AG), genişletilmiş gerçeklik (GG), Yapay Zekâ (YZ) ve insansız hava aracı (İHA) teknolojisi gibi gelişen dijital teknolojilerle entegre ederek yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazası risklerini azaltmayı amaçlamaktadır. İnşaat sektöründe yer alan paydaşlar ile görüşmeler ve anketler yapılarak ve nicel (sayısal) veri analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, araştırma bulgularının bir araya getirilerek bir araştırma çerçevesi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarını azaltmak için YBM ve GG 'in YZ ve diğer dijital teknolojilerle entegrasyonunun önlemlerini ve gelecekteki ihtiyaçlarını ifade etmektedir. Çerçeve aynı zamanda sektör uygulayıcıları için etkili ve daha güvenli yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarını azaltmaya yönelik pratik kılavuzlar sunmayı amaçlamaktadır.

Makalenin organizasyonu şöyledir. İkinci bölümünde İnşaat Sektöründe Yüksekte Çalışma, Kazalar ve Olası Etkenleri, Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıracak Dijital Teknolojilerin Önemi ve İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak için GG Teknolojileri Uygulamaları ve YZ Teknolojileri sunulacaktır ve literatürde mevcut araştırmalardaki eksiklikler ve hedefler vurgulanacaktır. Üçüncü bölümde Materyal ve Metoda ilişkin olarak Genel Araştırma Metodolojisi, İş Süreci Modeli Geliştirilmesi ve Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin GG ve YZ Entegrasyonu Modeli Geliştirilmesi gösterilecektir. Dördüncü bölümde Geliştirilen Modelin Değerlendirilmesine

ilişkin olarak Hipotezler, Örneklem, Veri Toplama, Ölçütler, Analiz ve sonuçlara ilişkin olarak Tanımlayıcı İstatistikler, Korelasyon Analizi, Faktör Analizi ve Güvenilirlik ve Yapısal Eşitlik Modeli (YEM) sunulacaktır. Beşinci bölümde Teorik Katkılar ve Yönetimsel Uygulamalar tartışılacaktır. Altıncı bölümde sonuç ve öneriler sunulacaktır.

2. TEORİK ÇERÇEVE

2.1. İnşaat Sektöründe Yüksekte Çalışma, Kazalar ve Olası Etkenleri

Günümüzde yüksek binalara olan talep sürekli olarak artmakta, bu da kaza ve ölüm oranlarının artmasına neden olmaktadır [23]. Birçok ülkede, yüksek binaların inşası, kazalardan dolayı yüksek riskli olduğu iyi bilinmektedir [24,25]. Kazalar sadece proje gecikmelerine ve kalıcı sakatlıklara [26] neden olmakla kalmaz, aynı zamanda çok büyük kişisel, sosyal ve finansal maliyetlere de neden olur [27,28]. İnşaat sektöründe kaza ve ölüm oranları diğer sektörlerle kıyasla hala daha yüksektir [29,30]. Avrupa'da kazaların yaklaşık %20'si inşaat sektöründe gerçekleşmektedir [31]. Benzer şekilde Malezya'da İş Sağlığı ve Güvenliği Dairesi (İSGD), 2019 yılında 7984 kaza vakasının kaydedildiğini ve bu rakamın önceki yıllara göre en fazla kaza vakası olduğu belirtilmiştir. Son birkaç on yılda inşaat sektöründe iş yerindeki yüksek sayıdaki olay ve yaralanmaları azaltmak için çok sayıda uygulama yapılmasına rağmen, iş güvenliği önemli bir endişe olmaya devam etmektedir [31]. Bilir ve Güranlı [32] yaptıkları çalışmada yüksekten düşmeyi, en sık görülen beş kazadan biri olarak belirtmektedir. Ayrıca çalışmada yüksekten düşmenin ilk sırada yer aldığını ve ölümlerin %59,3'ünü oluşturduğunu dile getirmişlerdir.

2.2. Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıracak Dijital Teknolojilerin Önemi

Modern inşaat yönetimi her zaman gelişmiş dijital teknolojileri benimsemekte ve buna bir örnek teknoloji de YBM'dir [33]. BIM, inşaat sektöründeki en bilgilendirici teknolojilerden biri olan dijital bir bilgi yönetim sistemi olarak hizmet vermektedir [34]. YBM'nin kullanılmasıyla inşaat projelerinin bilgileri ortak veri bilgi sistemi oluşturularak birçok amaca yönelik içeriklerin oluşturulmasına katkıda bulunur [35]. Ayrıca YPM, fotogrametri, KKS, coğrafi bilgi sistemi (GBS), RFT, AG ve SG, lazer tarama ve kare kod (KK) gibi farklı veri yakalama teknolojilerinden gelen verileri entegre etme ve bir proje hakkında çeşitli kapsamlı veri ve bilgiler üretmek için özellikle şantiye güvenliğinin iyileştirilmesi potansiyeline sahiptir [36,37]. Mimarlar ve mühendisler, modelleme yazılımını kullanarak, yalnızca parametrik ve nesne yönelimli özelliklere sahip olmakla kalmayıp aynı zamanda mevcut ve olası inşaat için gerekli bilgileri de sağlarlar [38][33]. Yüksek binalar açısından bakıldığında, YBM, inşaatta dijital bina modellerini kullanma potansiyelini gösteren bir güvenlik kuralı kontrol platformu ile entegre edilmiştir [39]. Ek olarak, İHA'lar, iş güvenliği yöneticilerinin şantiyeleri ziyaret etmek için gereken süreyi en aza indirmesini ve yüksek binalardaki risklerin tanımlanmasını ve denetlenmesini güçlendirmesini sağlayabilmektedir [40]. Dijital teknolojilerin potansiyel kullanımları, yüksek binalardaki iş güvenliği uygulamalarını önemli ölçüde iyileştirebilir. Dijital teknolojilerin desteğiyle, etkili bir şekilde iş birliği yapmak için işçiler ve yönetim personeli arasında inşaat bilgileri değiş tokuş edilebilir [41].

İş güvenliği performansı ve risk faktörlerini belirlemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [42,43][37,38]; bununla birlikte, inşaat işçileri arasındaki yüksek ölüm oranları, geleceğe yönelik politika belirleyicileri için önemli bir küresel endişe olmaya devam etmektedir [44]. İnşaat güvenliği izleme ve denetimi için belirli dijital teknolojileri entegre etmek amacıyla yeni bir vaka çalışması veya prototip yapılmıştır [45]. Bununla birlikte, çok sınırlı sayıda ampirik çalışmalar, mevcut yaklaşımların veya çalışmaların temel olarak veri alışverişi için YBM tabanlı AG ve SG uygulamalarına ve vaka çalışmaları ve prototipler yoluyla geliştirilmiştir. Ayrıca inşaat güvenliği yönetimi için iş güvenliği performansına odaklanan diğer dijital teknolojilerle BIM entegre edilmiştir [46]. Ek olarak, inşaat güvenliği için kural kontrol platformunu oluşturmak amaçlı YBM tabanlı 4 boyutlu modelleme kullanılmıştır [47]. Benzer şekilde, makine öğrenimi (MÖ) tabanlı nesne algılama tekniği, inşaat güvenliği ve gözetimi için 3B nokta bulutlardan oluşturulan model ile ve bilgisayarlı görme yoluyla bir platform sunmuştur [48]. Ayrıca, çok sayıda araştırmacı, yüksek bina inşaat güvenliği alanına büyük katkılarda bulunmuştur, ancak bu konuda bazı sınırlamalar vardır. Örneğin, Manzoor ve diğ. [43] yüksek bina projelerinde kazalara neden olan güvenlik faktörlerini belirlemiş, ancak azaltıcı çözümler önerememişlerdir. Thinakaran ve diğ. [49], yüksek bina projelerinin güvenlik performansını etkileyen güvenlik unsurlarını belirlemiş, ancak azaltıcı önlemler önermemişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, inşaat güvenliğinin iyileştirilmesi için YBM'ni geliştirmekte olan diğer dijital teknolojilerle (AG, YZ) entegre ederek yüksek bina projelerinde kazaen güvenlik faktörlerini azaltmaktır.

İş güvenliği teknolojisi, yeterli güvenlik düzenlemelerinin yürürlükte olmasını sağlamak için bina teknolojisiyle aynı hızda ilerlemelidir. Modern inşaat ortamındaki belirsizliklerle başa çıkmak ve düşme tehlikelerinin ele alınmasında etkinliği artırmak için gelişmiş teknolojik yardımlar gereklidir. Newaz ve diğ. [50] şantiyelerde yüksekten düşme riskini ele alan teknolojilerin bir incelemesini ve değerlendirmesini gerçekleştirmiştir.

2.3. Yapım İşlerinde İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Teknolojileri Uygulamaları

İnşaat sektöründe şantiyeler, dijital teknolojilerin Nesnelere İnterneti (Nİ) sensörü, İHA, 3B tarayıcı, YZ, AG v.b) yaygınlığının hızla artması nedeniyle akıllı çalışma ortamlarına dönüşmüştür. Şantiye analitiği, görselleştirme ve derin içgörüler oluşturmak amacıyla inşaat sahası verilerinin oluşturulması, toplanması, depolanması ve analizi ile ilgilenir. Toplanan veriler YBM'de modellenerek ve planlama ve iş güvenliği gibi tüm önemli alanlarda saha performansını optimize etmek için gelişmiş YZ teknikleri kullanılarak analiz edilebilir. Winge ve diğ. [51] işçi eylemleri, risk yönetimi, acil denetim, malzeme veya ekipmanın kullanılabilirliği, yerel tehlikeler, işçi yetenekleri ve proje yönetimini içeren inşaat kazalarına neden olan en yaygın yedi faktörü belirlemiştir. Bu faktörlerin tümü, özellikle robotik, bilgisayarlı görme, gelişmiş veri analitiği ve optimizasyon teknikleri gibi yapay zekâ teknolojileri kullanılarak diğer dijital teknolojilerle entegre edildiğinde çözülme potansiyeline sahiptir. Le ve diğ. [52] sağlık ve güvenlik eğitimi için yapay zeka ile bütünlük bir mobil tabanlı sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik teknolojilerini kullanan bir çerçeve geliştirmiştir. Kolar ve diğ. [53], iki boyutlu (2B) görüntülerde güvenlik korkuluğu tespiti için transfer öğrenimi ve derin evrimsel sinir ağlarını uygulamıştır. Otomatik ve akıllı şantiye denetimi elde etmek için yerelleştirme teknikleri ve görüntü işleme gibi algılama teknolojilerini kullanmışlardır. Fang ve diğ. [54], engelleyicilerin güvenliğini

artırmak için derin öğrenme destekli bilgisayarlı görü teknolojisini kullanan otomatik bir denetim yöntemi tanıtmıştır. Bir hava harekât senaryosu anlama modeli bu hedef inşaat işçileri grubu için yüksekte düşme riskini azaltmak için geliştirilmiştir. Yüksekte düşme tehlikelerinin önlenmesini iyileştirmeye yönelik başka bir çabada, (Rey-Merchán ve diğ. [55]) Bluetooth uygulamasını değerlendirmiştir. Şantiyelerdeki Bluetooth Düşük Enerji (BDE) izleme sistemleri ve BIM, radyo frekansı tanımlama ve küresel konumlandırma sistemi gibi teknolojilerin bir kombinasyonu kullanılarak (BDE) sınırlamalarının nasıl aşılabileceği tartışılmıştır.

Alizadehsalehi ve diğ. [56] inşaat sahasında bütünleşik bir YBM/İHA modelinin iş güvenliğinin yönetimindeki etkinliğini göstermiştir. Sidani ve diğ. [57] otomatik kural denetimi ve AG/SG'yi benimseyen YBM tabanlı bir güvenlik sisteminin genel çerçevesini geliştirmiştir Harichandran ve diğ. [58], dijital ikizlerden bilgi akışı yoluyla SG eğitim oyunlarını dinamik olarak güncellemek için kavramsal bir çerçeve önermektedir. Ogunseiju [59], işçilerin duruşları ve bunlara karşılık gelen dijital temsilleri arasında iki yönlü haritalama yoluyla kas-iskelet sistemi yaralanmalarını azaltmak için dijital bir ikiz çerçeve önermiştir. Kaarlea [60] saha dışı güvenlik eğitimi için dijital ikizler ve sanal gerçeklik ortamlarını geliştirmiştir. Choi [61], derin öğrenme ve dijital ikiz nesil kullanarak güvenlik bilincine sahip insan-robot işbirliği için entegre bir karma gerçeklik sistemi geliştirmiştir. Ramos-Hurdato [62] inşaat güvenliği denetimi için artırılmış gerçeklik aracının dağıtımını için bir öneri sunmuştur. Wu ve diğ. [63] DI, Derin Öğrenme (DÖ) ve Karışık Gerçeklik (KG) teknolojilerini yeni geliştirilmiş gerçek zamanlı görsel uyarı sistemine entegre ederek inşaat işçilerinin güvenlik durumlarını proaktif olarak belirlemelerini ve kazalardan kaçınmalarını sağlamayı amaçlamıştır. Wolf ve diğ. [64] inşaat güvenliği eğitimi ve öğretiminde kişiselleştirilmiş geri bildirim için artırılmış sanallıkta tehlike tanımayı araştırmıştır. Recal ve Demirel [65] ikili ve çok sınıflı iş kazası şiddetinin tahmininde makine öğrenimi yöntemlerinin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Kazar ve Çomu [66], iskele ve kalıp faaliyetleri için sanal bir güvenlik eğitim aracı geliştirmiştir. Teizer ver diğ. [67] DI iş akışındaki üç temel adımı tanımlayan İnşaat Güvenliği için Dijital İkiz konseptini ana hatlarıyla belirtmiştir: (1) tehlike önleme için güvenli tasarım ve planlama, (2) proaktif tahmin ve uyarı için risk izleme ve kontrol ve (3) kişiselleştirilmiş veya proje tabanlı öğrenme için sürekli performans iyileştirme.

Tablo 1.'de yapım işlerinde iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için kullanılan dijital teknolojileri uygulamalarının bir özeti görülmektedir.

Tablo 1 - Yapım işlerinde iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için kullanılan dijital teknolojilerin bir literatür özeti

No	Başlık	Teknoloji/Metod	Referans
1	Tehlike tahmini için risk yayma sistemleri	Bulanık dinamik Bayes ağı Bilişsel güvenilirlik ve hata analizi yöntemi (BGHAY) ve karmaşık ağ teorisi.	Guo ve diğ. [68]; Liu ve diğ. [69]

		Karakter tabanlı ağlar ağı	Liu ve diğ. [70]
		İnşaat kazası neden sistemi (İKNS) modeli	Zhang ve diğ. [71]
2	YBM kullanarak yapım modellerinin ve çizelgelerin otomatik güvenlik kuralı kontrolü	YBM	Abed ve diğ. [19]; da Rocha Leao ve diğ. [72]
3	Yapım Güvenliği risk faktörlerinin YBM’de entegrasyonu	YBM	Kim ve diğ. [73]
4	Konum ve duruş verisi füzyonunun kullanılması için proaktif işçi güvenlik riski değerlendirmesi	Veri füzyonu	Darko ve diğ. [74]
5	Değiştirilmiş Öğretme-Öğrenme-Tabanlı-Optimizasyon (ÖÖTO) algoritmasına dayalı risk tahmini ve kontrol sistemi	YZ	Chen ve diğ. [75]
6	İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanılması, Otomatik Düşme Tehlikesi İzleme	İHA	Liu ve diğ. [76]
7	İnşaat işçilerinin tepkileri İzlemek için fizyolojik sensörlerin kullanılması	Sensör	Alizadehsalehi ve diğ. [56]
8	Gelişmiş güvenlik alarmı ve izleme için görüntü işleme	Görüntü işleme	Subedi ve diğ. [77]
9	Konum verilerine dayalı olarak işçilerin güvenliğini analiz etmek için sensör tabanlı izleme sistemi	Sensör	Wang [78]
10	Giyilebilir teknoloji kullanan gerçek zamanlı düşmeye karşı koruma sistemleri	Giyilebilir teknoloji	Park ve diğ. [79]
11	Düşmeye karşı koruma tasarımına yardımcı olmak için YBM tabanlı sanal simülasyon ve modelleme	YBM	Hayat ve Shan [80]
12	Düşmelerin önlenmesi için bir bilgi sisteminin ontoloji modeli	Ontoloji Modeli	Tekbas ve Guven [81]; Lu ve diğ. [82]
13	Güvenlik eğitimi için mobil tabanlı Sanal Gerçeklik (SG) ve Artırılmış Gerçeklik (AG) kullanma.	SG-AG	Park ve Liu [83]
14	3B YBM Simülasyonu Kullanılarak İnşaat Şantiyesinde Güvenlik Eğitimi	YBM	Shi ve diğ. [84]; Xu ve Zeng [85]
15	İnşaat tehlikesi tanımlama eğitimi için SG tabanlı göz izleme teknolojisinin kullanılması	SG göz izleme	Ahn ve diğ. [86]
16	Düşmeyi önleme tedbirlerine ilişkin bilgisayar görüşü destekli denetim	Bilgisayar görüşü	Chihming ve diğ. [87]
17	Yapay Zekâ (YZ) tekniklerini kullanarak Akıllı Kişisel Koruyucu Donanım geliştirme	YZ	Fang ve diğ. [88]

18	İkili ve çok sınıflı iş kazası şiddetinin tahmininde makine öğrenimi yöntemlerinin karşılaştırılması	MÖ	Recal ve Demirel [65]
19	İskele ve kalıp faaliyetleri için sanal bir güvenlik eğitim aracı	SG	Teizer ver dig. [67]
20	Bulanık kano modunu kullanarak iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin etkinliklerine göre sınıflandırılması	YZ	Uzun ve Cebi, [90]

2.4. Literatürdeki Araştırma Eksiklikleri ve Hedefler

Görüntüye dayalı yöntemlerle ilgili olarak, yüksekte çalışma ile ilgili farklı senaryolarda iş güvenliği risklerini tanımlamak zordur. Dinamik 3B modelleme ile şantiyelerin tek başına bilgisayar görüntüleme teknikleri aracılığıyla gerçek zamanlı olarak yeniden yapılandırılması, bu aşamada hala zor bir görevdir ve bu, çalışanları mekânsal ilişkili tehlikeleri sezgisel olarak belirlemeye zorlar. Bu amaçla, bu çalışma izlenen nesnelere uzamsal konumunu YPM'in geometrik bilgilerine dayalı olarak belirleyebilen GG ve YZ'yi entegre eder. Bu entegrasyon sadece mekânsal bağlam bilgisi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda nesnelere arasındaki mekânsal ilişkiyi de elde eder. YBM modellerini girerek ve güncelleyerek, ilgili ortamda tehlikeler bulunabilir ve bu da tehlike tanımlamasının sağlamlığını artırır.

Yazarların bildiği kadarıyla, yüksekte çalışmaya ilişkin olarak saha çalışanları için ortam görüşlerinde gerçek zamanlı güvenlik bilgileri sağlamak için mekânsal bağlama duyarlı bir yöntem eksikliği vardır. Sonuç olarak, son yıllarda literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde, inşaat sektöründe yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ve denetimi kolaylaştıracak YBM, Dİ, GG, YZ gibi dijital teknolojilerin entegrasyonu ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, öngörülen araştırma soruları ve ortaya konulan problemlerin çözümüne yönelik sunulan model ile literatüre ve sektöre yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ve denetimi kolaylaştırmaya yönelik katkılar sağlanması hedeflenmektedir.

Araştırma sorusu 1: Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya bağlı iş kazalarının önlenmesi ve güvenli çalışma ve denetimi kolaylaştıracak hangi dijital teknolojiler uygulamaları mevcuttur?

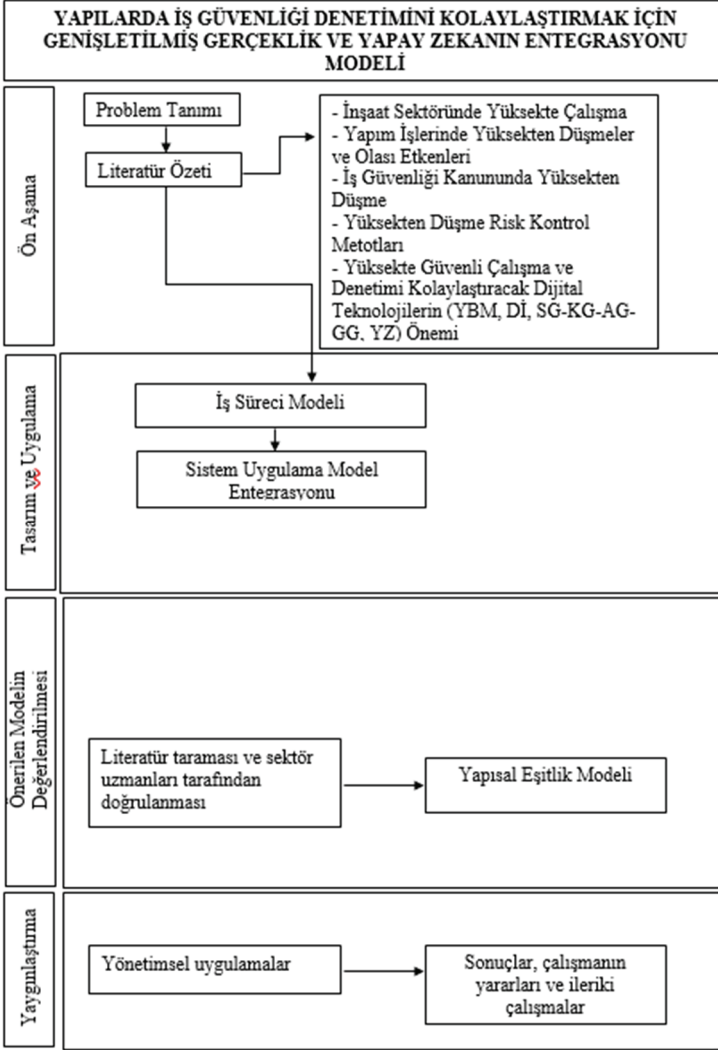
Araştırma sorusu 2: Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli nasıl geliştirilebilir?

Araştırma sorusu 3: Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için geliştirilen Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli İş Süreci Modelinin değerlendirilmesi nasıl gerçekleştirilebilir?

Yapım işlerinde yüksekte çalışmaya ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için GG ve YZ'nin entegrasyonu, sorunu çözebilir ve hem odak hem de ortam görüş kanalları aracılığıyla aynı mekânda çalışanlara ve ilgili yöneticilere görsel uyarılar sağlayabilir. Bu çalışmanın amacı, birden fazla dijital teknolojiyi entegre ederek yukarıda belirtilen araştırma boşluğunu kapatmaktır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde genel araştırma metodolojisi, iş süreci geliştirilmesi ve yapılarda iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için GG ve YZ entegrasyonu modeli geliştirilmesi konuları anlatılacaktır.



Şekil 1 - Araştırma metodolojisi

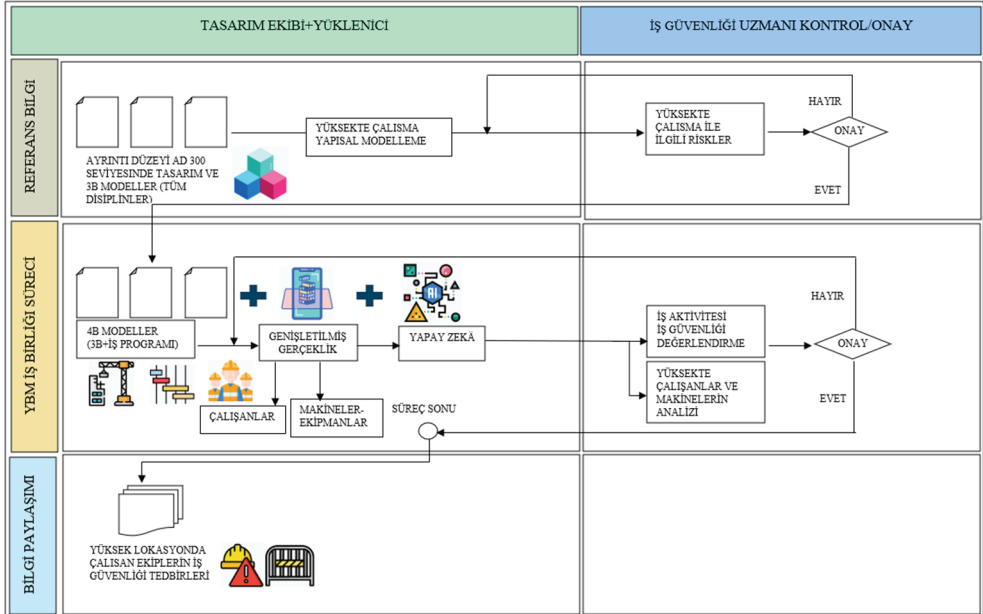
3.1. Genel Araştırma Metodolojisi

Genel araştırma metodolojisi Ön aşama, Tasarım ve uygulama, Önerilen modelin değerlendirilmesi ve son olarak da Yaygınlaştırma süreçlerini içerir. Şekil 1. Genel araştırma metodolojisi süreçlerini göstermektedir. Ön aşamada problem tanımı yapılarak literatür özeti

sunulmaktadır. Tasarım ve uygulama aşamasında iş süreci modeli ve sistem uygulama model entegrasyonu gösterilmektedir. Önerilen modelin değerlendirilmesi aşamasında literatür taramasının sektör uzmanları tarafından doğrulanması ve Yapısal Eşitlik Modelinin geliştirilmesi ele alınmaktadır. Yaygınlaştırma aşamasında yönetimsel uygulamalar, sonuçlar, çalışmanın yararları ve ileriki çalışmalar sunulmaktadır.

3.2. İş Süreci Modeli Geliştirilmesi

Yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için GG ve ZK'nın entegrasyonuna yönelik İş Süreci modeli geliştirilme süreci şu adımlardan oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalar ve araştırma eksikliklerinden derlenerek bir kavramsal çerçeve geliştirilmiştir. Kavramsal çerçevede planlanan iş süreçlerinin tanımlanması, iş akışlarının süreç hedefleri doğrultusunda optimizasyonu, durumsal ve mantıksal modellemenin belirlenmesi, izlenmesi ve iyileştirilmesi stratejik yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşıma göre de İş Sürecinin ana bileşenleri olan Referans Bilgileri, YBM İş Birliği Süreci ve Bilgi Paylaşımı oluşturulmuştur.



Şekil 2 - Yapım işlerinde Yüksekte Çalışma İş Güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonuna yönelik İş Süreci Modeli

İş Süreci Modeli geliştirilmesi referans bilgilerin oluşturulması ile başlar. Tasarım Ekibinin projeye ilişkin olarak AD 300 seviyesinde (Detaylı tasarım) 3B modelleri (tüm disiplinler) geliştirmeleri ve yüklenicinin de yüksekte çalışma ortamı (mekânsal özellikler ve mevcut şartlar, işçi ve ekipmanların durumu ile ilgili riskler v.b) yapısal modellemesini

gerçekleştirmesi ile bu risk bilgilerini içeren dokümanlar İş Güvenliği Uzmanının kontrolüne ve onayına sunulmaktadır. AD 300 seviyesinde (Detaylı tasarım) belirli unsurların, kesin miktar, boyut, şekil, konum ve yönelim ile tanımlandığı doğru modelleme mümkün olabilmektedir. Tüm bilgiler onaylandıktan sonra YBM İş Birliği süreci devreye girmektedir. 4B Modellerin geliştirilmesini (işçi ve makine-ekipmanların aktivitelerine ilişkin İş programları) takiben çalışanların ve makine-ekipmanların gerçek konumları ile çalışma ortamındaki etkileşimini gösteren GG modellerinin oluşturulması ve yüksekte çalışma ortamında oluşabilecek muhtemel risk faktörlerinin tahminini içeren YZ modülü entegrasyonu ile İş Güvenliği Uzmanı tarafından yüksekte çalışma iş güvenliği değerlendirilmesi yapılır. Bu değerlendirmede Yüksekte çalışma ile ilgili “Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği”, “Çalışma yapılacak zeminin eğimi”, “Çalışma yapılacak zeminin yapısı”, “Ekiplerin çalışma suresi” ve “Ortam şartları” (Bakınız Şekil 4., Tablo 2) gibi risk unsurları dikkate alınır. TyÖ’ye destek olarak 3B YBM modellerden yararlanarak, yüksekte düşme çalışmalarında muhtemel güvenlik tehlikeleri belirlenmiş olur. Bu değerlendirme uygun bulunursa yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin ve iş güvenliği tedbirleri dokümantasyonu ilgili paydaşlarla paylaşılır. Şekil 2.’de Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonuna yönelik İş Süreci Modeli gösterilmektedir.

3.3. Yapılarda İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli Geliştirilmesi

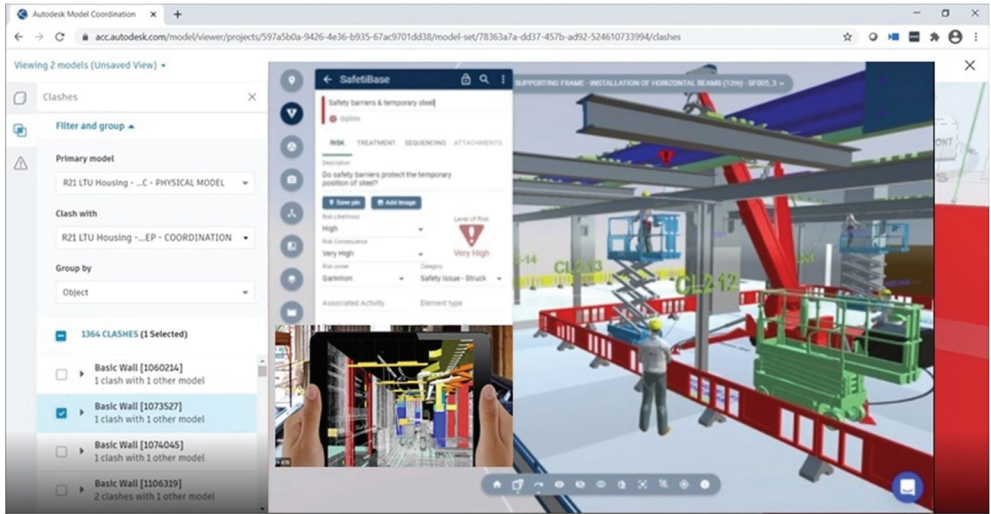
Literatürdeki çalışmalar ve araştırma eksikliklerinden derlenerek oluşturulan kavramsal çerçeve doğrultusunda geliştirilen ve yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştıran GG ve ZK’nın entegrasyonu uygulaması BIM Collaborate (YBM İş Birliği) yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. YBM İş Birliği yazılımı, ortak bir platformda tüm disiplinlerin ve paydaşların bir araya gelerek iş süreçlerinin (tasarım, planlama, yapım yönetimi iş akışlarının) koordinasyonuna imkân tanımaktadır. Yüksekte çalışma iş güvenliği denetimi ile ilgili tanımlanan süreçlerin sıra ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Görsel (3B+4B) ve tabular bilgilerin kesin ve doğruluğunun sağlanması için onay mekanizması bu ortak platformda çalışmanın en önemli özelliğidir.

Geliştirilen modelin alınan önlemlerin etkinliğine ilişkin yüksekte düşme kazaları dahil olmak üzere “risk kontrol hiyerarşisi” çerçevesinde bir değerlendirme yapılarak aşağıda belirtilen sistematik bir yaklaşım benimsenmiştir:

- Tehlikenin ortadan kaldırılması (Örneğin, yüksekte elle taşıma işlerinin taşınabilir vinç mekanik araçlarla desteklenmesi, vb.)
- Riskin azaltılması (Örneğin, yüksekte çalışma sırasında işçilerin dikkatini dağıtacak unsurların minimize edilmesi vb.)
- İşçilerin tehlikeden uzak tutulması (Örneğin, yüksekte çalışma sırasında kişilerin riskli bölgelere girişine izin verilmemesi, vb.)
- Tehlikenin çembere alınması (Örneğin yüksek yerlere korkuluk yapılması vb.)
- Çalışanların maruziyetlerinin azaltılması (Örneğin bir kişinin 8 saat maruz kalması yerine 4 kişinin her birinin ikişer saat yüksekte çalışmaya maruz kalması, vb.)

- İş metodunun iyileştirilmesi (Örneğin yüksekte ölçme işlerinin dijital araçlarla yapılmasının artırılması, vb.)
- Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımı (Örneğin baret, eldivenler, koruyucu gözlükler, koruyucu giysiler, emniyet kemeri, vb. kullanımı)

YBM' de geliştirilen 3B modeller (tüm disiplinler) ile süreç başlamaktadır. Yüksekte çalışma ortamını ve muhtemel risk tanımlama sürecini canlandırarak olan 4B modellerin geliştirilmesi ile tüm katılımcıların (tasarımcılar, planlamacılar, iş güvenliği denetim uzmanları) biraya geleceği ve bu modellerin güncel olarak paylaşılacağı bir Ortak Veri Ortamı oluşturulur. Yer ve zamandan bağımsız olarak bu modellere erişim ve muhtemel risk oluşumuna ilişkin iş güvenliği denetimini kolaylaştıracak uzaktan karar verme mümkün olabilmektedir. Ortak bir platformda ele alınan yüksekte çalışma risklerine ilişkin tüm veriler YZ modülünde islenerek kendi kendine öğrenen bir algoritma ile yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin iş güvenliği tedbirleri oluşturulur ve karar vericilerin onayına sunulur. Şekil 3.'de Ortak Veri Ortamında İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli gösterilmektedir.

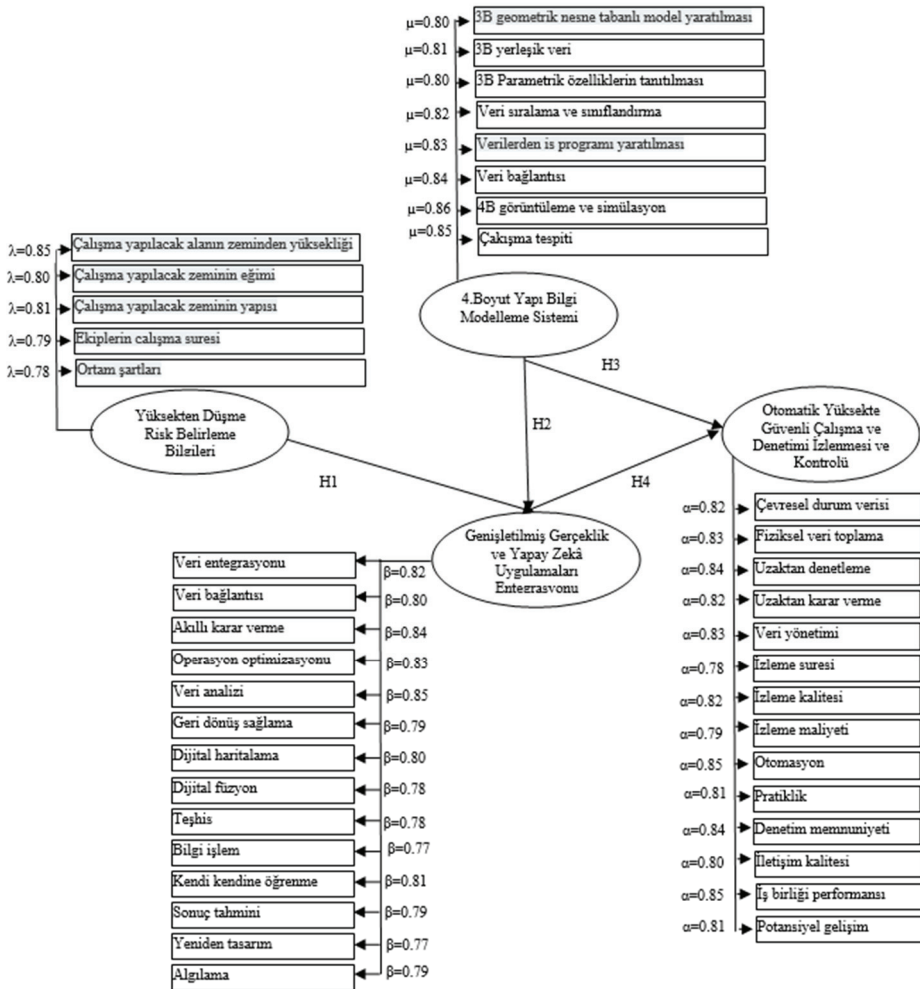


Şekil 3 - Ortak Veri Ortamında İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekanın Entegrasyonu Modeli

4. GELİŞTİRİLEN MODELİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Hipotezler

Kapsamlı literatür incelemesine, literatürdeki araştırma eksikliklere ve hedeflere, ve geliştirilen İş Süreci Modeli (İSM) şemasına dayalı olarak, bu çalışmadaki dört ana yön arasındaki hipotezlenirilmiş ilişkiler Yapısal Eşitlik Modeli (YEM) ile Şekil 4.'de gösterilmektedir: Yüksekten Düşme Risk Belirleme Bilgileri, 4.Boyut (İş planlaması) Yapı Bilgi Modelleme Sistemi, Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu, Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü. Geliştirilen kavramsal çerçeve (ISM) ile bağlantılı olarak oluşturulan YEM'deki değişkenler ve göstergeler sistematik olarak literatürdeki ilgili çalışmalardan (Bakınız Tablo 1.) yararlanılarak belirlenmiştir.



Aşağıdaki hipotezler, bu ilişkilerin teorik arka planı ile birlikte, yapısal ölçüleri ve diğer değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamayı amaçlamaktadır. Bu, aşağıdaki hipotezlerin geliştirilmesine yol açar:

- Hipotez 1 (H1): Yüksekten Düşme Risk Belirleme Bilgileri, Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunun gerçekleştirilmesini ve simülasyonunu kolaylaştırır.
- Hipotez 2 (H2): 4.Boyut (İş planlaması) Yapı Bilgi Modelleme Sistemi, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunu geliştirir.
- Hipotez 3 (H3): 4.Boyut (İş planlaması) Yapı Bilgi Modelleme Sistemi Oluşturulması Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü performansını destekler.
- Hipotez 4 (H4): Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu simüle edilen verileri zenginleştirir ve Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü performansını güçlendirir.

4.2. Örneklem

Yukarıda açıklandığı gibi, araştırmanın doğasının bir önceki bölümde türetilen teorik modeli test etmek olduğu açıktır. Bu nedenle, pozitivist bir epistemolojik konum benimsenmiş ve daha spesifik olarak, ölçülen değişkenler arasındaki ilişkilerin derecesini belirlemeyi içeren bu araştırmanın hedeflerini karşılamak için en uygun olan nicel araştırma metodolojisi oluşturulmuştur. Daha fazla bilginin iletilmesine izin vermek ve araştırmacı ile katılımcılar arasında daha iyi bir etkileşimi desteklemek için bilgisayar destekli anket (CSAQ) yapılmıştır. Farklı coğrafi bölgelerde çalışan insanların farklı deneyimleri olduğundan, bu araştırmada farklı gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde çalışan uygulayıcıların görüşlerini toplamak amaçlanmıştır. Bu çalışmada, ABD, BAE, İsveç, Danimarka ve Kanada'da bulunan inşaat işleri, altyapı ve inşaat projeleri ile uğraşan müteahhitlik ve mühendislik danışmanlık şirketlerinde çalışan profesyonellerin görüşlerine başvurulmuştur. Anket kapsamında hedeflenen alanlar, inşaat yönetiminde en yoğun ve en aktif bölgeleri oluşturmaktadır. Örneklem sadece büyük şirketleri içermektedir. Şirketin büyüklüğünü, profesyonel personel sayısı, yıllık inşaat projelerinin sayısı ve ABD doları cinsinden proje bütçesi belirler. 100–200'den fazla çalışanı olan, yılda 10–25 proje yürüten ve değeri 5 milyon ABD dolarının üzerinde tipik bir proje inşa eden bir müteahhitlik şirketi büyük, 25-50'den fazla çalışanı olan bir mühendislik danışmanlık şirketi ise büyük olarak tanımlanır. Yılda 25–50 proje yürüten ve değeri 5 milyon ABD Doları'nın üzerinde olan tipik bir projeyi tasarlamak ve kontrol etmek büyük olarak tanımlanmaktadır.

4.3. Veri Toplama

Bu çalışmada kullanılan örnekleme yöntemi Snowball örneklemesidir. Bu örnekleme, olasılıklı olmayan örnekleme teknikleri sınıfına girer. Olasılıksız örnekleme planı, temsili bir örnekleme elde etmek için kullanılabilir ve yanıtlayıcıların tüm popülasyondan rastgele seçilmediği, daha çok araştırmaya katılmaya istekli olup olmadıklarına göre seçildiği

durumlarda uygun olduğu kabul edilmiştir. Olasılıksız örnekleme teknikleri, araştırmacıların rastgele seçim gerektirmeden daha büyük bir popülasyondan örnekler almasını içerir [91]. Ampirik veriler bir CSAQ anketi yoluyla toplanmıştır. Katılımcılara e-posta yoluyla gönderilen CSAQ anket bağlantısı, katılımcıların belirlenmiş bir web sitesine gittikleri ve anketi çevrimiçi olarak doldurdıkları bir web anketi içerir. CSAQ anketi, görüşmenin hızını yavaşlatarak yanıtlayanlara düşünmek için daha fazla zaman vererek daha doğru yanıtlar verir. En yüksek raporlama seviyeleri CSAQ anketi içindir [92]. Katılımcılarla temasların sayısı artmış, geri dönüş oranları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakta, bu da anketin geçerliliğini artırmaktadır [93]. CSAQ anketi ABD, BAE, İsveç, Danimarka ve Kanada'daki müteahhitlik ve mühendislik danışmanlık şirketlerine uygulanacaktır. Anket uygulaması sırasında, araştırmaya katılmak için toplam 500 kişiyle iletişime geçilmiştir. Daha sonra araştırma hedefleri, araştırmanın kesinlikle bilimsel ve gizli olduğu ve anonimlerinin sağlandığı konusunda tam olarak bilgilendirilmişlerdir. Araştırmaya toplam 319 kişi katılmıştır. Bu da iletişim kurulan firmalardan %63'lik bir yanıt oranına tekabül etmektedir. Katılımcılardan, 1'den (kesinlikle katılmıyorum) 5'e (kesinlikle katılıyorum) kadar beşli Likert ölçeğine dayalı olarak her bir ifadeye katılma derecesini derecelendirmeleri istenmiştir. Anket araştırması için şirketlerdeki iletişim personeli, bu süreç ve teknolojilerle ilgili üst yönetim veya üst yönetim veya ilgili uzman kişilerdir ve bu nedenle, bu kişilerin bilgi düzeyinin geçerli yanıtlar üretmesi beklenmiştir. Katılımcılar Proje Müdürleri, Yapım Yöneticileri, İş Güvenliği Uzmanı, 4B planlamacıları ve YBM Yöneticileri olacaklar ve katılımcılar şirketlerinde bu resmi unvanlara sahiptirler. Tablo 2, dünyanın farklı bölgelerinden farklı mesleklere sahip ankete katılanların yüzdelerini göstermektedir.

Tablo 2 - Ankete katılanların bölgelere, geçmişe ve mesleklere göre dağılımı

Tecrübe (Yıl)	Ülke	Katılımcının Geçmişi ve Mesleği					Toplam
		Proje Müdürü (PM)	Yapım Yöneticisi (YM)	İş Güvenliği Uzmanı	4B Planlamacı	YBM Yöneticisi	
		19.43%	15.67%	18.80%	23.19%	22.88%	
>20 yıl	ABD	24	14	22	24	18	102
	BAE	10	12	10	8	15	55
	İsveç	12	10	9	14	14	59
	Danimarka	9	6	8	12	9	44
	Kanada	7	8	11	16	17	59
	Toplam	62	50	60	74	73	319

4.4. Ölçütler

Değişkenlerin ölçümü, değerlendirmenin doğruluğuna ve tutarlılığına olan güveni artıran, çoklu madde yöntemi uygulanarak oluşturulmuştur. Her madde "beşli Likert ölçeği" ile değerlendirilmiştir. Tablo 3, değişkenleri ölçmek için kullanılan tüm öğeleri göstermektedir.

Tablo 3 - Faktör analizi ve tutarlılık testi

Grup	Değişkenler	Faktör Yüklere	Cronbach α
Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri	Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği	0.81	0.79
	Çalışma yapılacak zeminin eğimi	0.79	
	Çalışma yapılacak zeminin yapısı	0.80	
	Ekiplerin çalışma süresi	0.78	
	Ortam şartları	0.77	
4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sistemi	3B geometrik nesne tabanlı model yaratılması	0.79	0.80
	3B yerleşik veri	0.80	
	3B parametrik özelliklerin tanıtılması	0.79	
	Veri sıralama ve sınıflandırma	0.81	
	Verilerden is programı yaratılması	0.82	
	Veri bağlantısı	0.83	
	4B görüntüleme ve simülasyon	0.85	
	Çakışma tespiti	0.83	
Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	Veri entegrasyonu	0.82	0.81
	Veri bağlantısı	0.79	
	Akıllı karar verme	0.83	
	Operasyon optimizasyonu	0.82	
	Veri analizi	0.84	
	Geri dönüş sağlama	0.78	
	Dijital haritalama	0.79	
	Dijital füzyon	0.77	
	Teşhis	0.77	
	Bilgi işlem	0.76	
	Kendi kendine öğrenme	0.80	
	Sonuç tahmini	0.78	
	Yeniden tasarım	0.76	
Algılama	0.78		
Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	Çevresel durum verisi	0.81	0.82
	Fiziksel veri toplama	0.82	
	Uzaktan denetleme	0.84	
	Uzaktan karar verme	0.86	
	Veri yönetimi	0.82	
	İzleme süresi	0.77	
	İzleme kalitesi	0.81	
	İzleme maliyeti	0.78	
	Otomasyon	0.87	
	Pratiklik	0.85	
	Denetim memnuniyeti	0.83	
	İletişim kalitesi	0.79	
	İş birliği performansı	0.81	
	Potansiyel gelişim	0.80	

Sonuçlar, tüm faktörlerin (0,7–0,9) arasında değişen yükler olduğunu ve tüm Cronbach alfa değerlerinin (0,70'ten büyük) yeterli olduğunu göstermektedir. Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri beş farklı değişkenle ölçülmüştür: Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği, Çalışma yapılacak zeminin eğimi, Çalışma yapılacak zeminin yapısı, Ekiplerin çalışma süresi ve Ortam şartları. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.79$). 4B Yapı Bilgi Modellemesi (YBM), sekiz farklı değişkenle ölçülmüştür: 3B geometrik nesne tabanlı model yaratılması, 3B yerleşik veri, 3B parametrik özelliklerin tanıtılması, Veri sıralama ve sınıflandırma, Verilerden iş programı yaratılması, Veri bağlantısı, 4B görüntüleme ve simülasyon, Çakışma tespiti. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.80$). Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu 14 farklı değişkenle ölçülmüştür: Veri entegrasyonu, Veri bağlantısı, Akıllı karar verme, Operasyon optimizasyonu, Veri analizi, Geri dönüş sağlama, Dijital haritalama, Dijital fizyon, Teşhis, Bilgi işlem, Kendi kendine öğrenme, Sonuç tahmini, Yeniden tasarım ve Algılama. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.81$). Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü 14 farklı değişkenle ölçülmüştür: Çevresel durum verisi, Fiziksel veri toplama, Uzaktan denetleme, Uzaktan karar verme, Veri yönetimi, İzleme süresi, İzleme kalitesi, İzleme maliyeti, Otomasyon, Pratiklik, Denetim memnuniyeti, İletişim kalitesi, İş birliği performansı, ve Potansiyel gelişim. Ölçek yüksek geçerlilik ve güvenilirlik göstermiştir ($\alpha = 0.82$).

4.5. Analiz ve Sonuçlar

Öngörülen modeli (Sekil 3' de gösterilen) test etmek ve incelemek için Lineer Yapısal İlişkiler (LISREL) 8.8 istatistiksel yazılım paketi kullanılmıştır. İlk olarak “Tanımlayıcı istatistikler ve Pearson korelasyon katsayıları” hesaplanmış, ardından YEM analiz edilmiştir. YEM, yapısal bir teorinin bazı fenomenler üzerindeki etkisinin analizi için bir hipotez testi yaklaşımı benimseyen istatistiksel bir metodolojidir. YEM'in temel adımları, “teoriye dayalı bir modelin belirlenmesi, yapıların nasıl ölçüleceğinin belirlenmesi, veri toplanması ve genel model uyum istatistiklerini ve parametre tahminlerini içeren verilerin analizini” içerir. Bu analiz, gizli değişkenler ve gözlenen değişkenler arasında nedensel ilişkiler kurar.

Tablo 4 - Tanımlayıcı istatistikler ve Pearson Korelasyonanalizi

Değişkenler	Ortalama	SS	1	2	3	4
Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri	4.80	0.86	1.000			
4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi	4.81	0.87	0.643**	1.000		
Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	4.83	0.89	0.692**	0.724***	1.000	
Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	4.85	0.90	0.761***	0.778***	0.796***	1.000

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$, $n=319$

Model, gizil değişkenlerin veya varsayımsal yapıların nasıl gözlemlenen değişkenlere bağlı olduğunu veya bunlar tarafından nasıl gösterildiğini belirtir. Yapı modelinin geçerliliğini ve varsayılan nedensel ilişkilerin gerçek verilere uygunluğunu ve uyumluluğunu ölçmek için “Uygunluk İyiliği İndeksi (GFI)”, “Ayarlanmış Uyum İndeksi (AGFI)”, “Karşılaştırmalı Uyum İndeksi (CFI)”, “Normlanmış Uyum İndeksi (NFI)”, “Normsuz Uyum İndeksi (NNFI)” ve “Kök-Ortalama-Kare Yaklaşım Hatası (RMSEA)”, ve “Ki-kare”nin “Serbestlik Derecesi”ne (χ^2/df) oranı kullanılmıştır. “Uygunluk indeksleri, varsayılan modelin ampirik verilere uyup uymadığını değerlendirir, bu nedenle modelin geçerliliği ve güvenilirliğinin önemli göstergeleridir. Sekil 4. standartlaştırılmış yapısal katsayıları temsil eden bu çalışmada kullanılan varsayımsal modelin sonuçlarını göstermektedir. Değişkenlerin katsayılarının büyüklüğü, onların görelî önemini yansıtır.

4.5.1. Tanımlayıcı İstatistikler ve Korelasyon Analizi

Tablo 4, ilişkilerin anlamlılık düzeyini değerlendirmek amacıyla çalışma değişkenleri için ortalamaları ve standart sapmaları ve ayrıca faktörler arası korelasyon matrisini göstermektedir. Bu çalışmada test edilen bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri doğrulamak için Pearson korelasyon analizi kullanılmıştır. Tüm yapılar birbiriyle ilişkilidir ve “Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri”, “4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu” ve “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” üzerine odaklanır. Bir ilişkinin önemi bir “ ρ değeri” ile ifade edilebilir. “ ρ değeri < 0.05 olduğunda, iki derecelendirme grubu arasındaki ilişkinin anlamlı olduğu kabul edilir”. “Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri”, “4BYapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu” ve “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” değişkenlerini temsil eden faktörler arasında dikkate değer ve pozitif doğrusal ilişkilerin olduğu korelasyon matrisi inceleme noktalarıdır.

4.5.2. Faktör Analizi ve Güvenilirlik

Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri, 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu ve Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü değişkenlerindeki temel boyutları belirlemek için faktör analizi kullanılmıştır. Yapıların değişkenleri ampirik olarak doğrulanmış ve temel bileşen analizi yoluyla test edilmiştir. Tablo 3, sonuçların bir özeti göstermektedir. 0,5'ten büyük değerler kabul edilebilir olarak kabul edilir. “Çıkarılan faktörlerin her birinin güvenilirliği, Cronbach alfaları kullanılarak bu faktörlerin iç tutarlılık açısından kontrol edilmesiyle belirlenir”. “Cronbach's alpha (α), 0,7 değerinin minimum kabul edilebilir değer olduğu her bir faktör içindeki değişkenler arasındaki ortalama korelasyona dayanmaktadır”. Tablo 4, “Cronbach's alpha” değerlerinin incelenmesinin, yapılar için tüm α güvenilirlik katsayılarının kabul edilebilir düzeyde güvenilirliğe sahip olduğunu ortaya koyduğunu göstermektedir. “4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu”, “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” yapıları sırasıyla 0.80, 0.81, 0.82 değerleri ile en yüksek güvenilirlik katsayılarına α sahiptir. 0.87,0.86 ve 0.85 değerleri ile “Otomasyon”, “Uzaktan karar verme”, “Pratiklik” değişkenleri, ile “Uzaktan denetleme”, “Çakışma tespiti”, “Veri entegrasyonu”, “Fiziksel veri toplama” değişkenleri de 0.84, 0.83, 0.82 değerleri ile sırasıyla en yüksek faktör yüklerine sahiptir.

4.5.3. Yapısal Eşitlik Modeli

Son yıllarda, YEM, sosyal bilimlerde, doğrulayıcı faktör analizi ve yol analizini birleştirmenin desteği ile, çoklu gözlemlenen değişkenler tarafından ölçülen gizli bir yapıya izin veren, etkin bir analitik araç olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4'te gösterilen hipotez modeli, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri göstermektedir. Model, “Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri”, “4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi”, “Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu” ve “Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü” arasındaki varsayımsal ilişkileri göstermektedir. Örneklem (n = 319) varsayımsal ilişkileri test etmek için kullanılmıştır. Öngörülen model, kabul edilebilir model uyumunu gösteren istatistikler kullanılarak test edilmiş ve “önemli bir Ki-kare istatistiğine” sahip olduğu gösterilmiştir ($\chi^2=167.46$, $df = 91$; $p < 0.01$).

4.5.3.1. Uyum İyiliği Testi

Model yapıları (hipotezler) ile modelin uyum iyiliği arasındaki ilişkileri test etmeye yardımcı olan yol analizlerini gerçekleştirmek için SEM teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar, ilgili yapılar üzerindeki tüm standartlaştırılmış yüklemelerin 0,5'ten ($p < 0.001$) büyük olduğunu göstermiştir. Modelin genel uyumu anlamlı olmuştur ($\chi^2 = 167.46$ ile $df = 91$; $p < 0.01$). Elde edilen uyum iyiliği istatistikleri, karşılaştırmalı uyum indeksi (CFI) = 0.929, GFI = 0.916, AGFI = 0.911, NFI = 0.921, NNFI = 0.920 ve ortalama karekök yaklaşıklık hatasının (RMSEA) = 0.063 olduğunu ortaya koymuştur. Farklı testlerin kullanılmasının nedeni, genel olarak, indekslerin büyük çoğunluğu iyi bir uyum gösteriyorsa, muhtemelen iyi bir uyum olduğundandır. GFI, AGFI, CFI, NFI ve NNFI'nin sonuçları 0.90 eşik değerini aşmıştır ve varsayılan model iyi bir uyum ortaya koymuştur. 3'ün altındaki serbestlik derecelerine dayalı model uyum istatistiklerinin oranı, yeterli bir model uyumunu göstermektedir ($\chi^2/df = 1.840$). Şekil 4'teki varsayımsal model bu nedenle verilere çok yakın olarak sınıflandırılabilir. Tablo 5, varsayılan model için uyum iyiliği ölçümlerinin sonuçlarını listelemektedir. Genel uyum iyiliği ölçümlerinin tümü, varsayımsal model için çok uygun uygunluk yargılarını göstermektedir.

Tablo 5 - Varsayılan model için genel uyum iyiliği ölçümleri

İstatistik	Uygunluk Kriterleri	Değerler	Uygunluk Kararı
χ^2	$p < 0.01$	167.46 ($p = 0.000 < 0.01$)	Evet
RMSEA	< 0.08 (< 0.05 is mükemmel ve < 0.08 iyi)	0.063	Evet (İyi)
GFI	> 0.90	0.916	Evet
AGFI	> 0.90	0.911	Evet
NFI	> 0.90	0.921	Evet
NNFI	> 0.90	0.920	Evet
CFI	> 0.90	0.929	Evet
χ^2 / df	< 2.00	1.840	Evet

4.5.3.2. Hipotez Testi

1'den 4'e kadar olan Hipotezleri test etmek için "LISREL 8.8" yazılımı kullanılmıştır. Varsayımsal modelde, Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri ile Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu (H1), 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi ile Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu (H2), 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi ile Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü (H3), Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu ve Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü(H4) ilişkileri tahmin edilmiştir. İlişkilere ilişkin hipotezler "ilişkili t istatistiklerine" dayalı olarak test edilmiştir. 1.65, 1.98 veya 2.576'yı aşan "t değerleri" sırasıyla 0.05 ve 0.01 seviyelerinde anlamlı kabul edilmiştir. Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri, 4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi ve Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu, Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü önemli ölçüde ve olumlu bir şekilde etkilenmiştir ($\rho < 0.05$) (H1 = 0,81, t değeri = 4,69, H2 = 0,82, t değeri = 4,70 değerleriyle) , H3 = 0,83, t değeri = 4,75 ve sırasıyla H4 = 0,84, t değeri = 4,78). Böylece 1'den 4'e kadar olan Hipotezler desteklenmiştir.

Tablo 6 - Yapısal eşitlik modeli için parametre tahminleri

Varsayımsal model	Parameter katsayısı	t- değeri
<i>Model ilişkileri</i>		
H1: Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri → Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	0.81**	4.69
H2: 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi →Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	0.82**	4.70
H3:4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi → Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	0.83***	4.75
H4: Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu→Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	0.84***	4.78
Fit Indices: $\chi^2=167.46$, $df= 91$, $\chi^2/df=1.840$ GFI=0.916, CFI=0.929, AGFI=0.911, NFI=0.921, NNFI=0.920, RMSEA=0.063 ** $\rho < 0.05$, and *** $\rho < 0.01$.		

Tablo 6. varsayılan modelin parametre tahminlerinin sonuçlarını listeler. Standartlaştırılmış parametre tahminleri göz önüne alındığında, sonuçlar dört hipotezli ilişkinin anlamlı ve kabul edilmiş olarak sınıflandırıldığını göstermektedir. Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu-Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü" 0,84 parametre katsayısı ile en yüksek öneme sahiptir ve Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamalarının Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolüne katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. "4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sistemi-Otomatik Yüksek Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü" 0,83 yol katsayısı ile ikinci en yüksek öneme sahiptir ve 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sisteminin

Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolünü geliştirmek için bir teşvik sağladığını ortaya koymaktadır. Tablo 7, değişkenlerin “standartlaştırılmış yapısal katsayılarını”, Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri, 4B Yapı Bilgi Modelleme (BIM) Sistemi, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu, Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü ve göreceli önemini yansıtan büyüklükleri temsil eden ilişkilerini listeler. “4B görüntüleme ve simülasyon”, “Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği”, “Çakışma tespiti”, “Otomasyon”, “Akıllı karar verme”, “Uzaktan denetleme”, ve “Denetim memnuniyeti” değişkenleri 0.86, 0.85, 0.85, 0.85, 0.84, 0.84, ve 0.84 değerleri sırasıyla en yüksek faktör yüküne sahiptir. En önemlisi, yapısal modeldeki yüksek parametre katsayı değerleri ampirik modelleme çalışmasını doğrulamaktadır.

Tablo 7 - Parametreler ve ilişkileri

Değişkenler	Göstergeler	Parametre	Standartlaştırılmış yapısal katsayı
Yüksekten düşme risk belirleme bilgileri	Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği	λ	0.85
	Çalışma yapılacak zeminin eğimi	λ	0.80
	Çalışma yapılacak zeminin yapısı	λ	0.81
	Ekiplerin çalışma süresi	λ	0.79
	Ortam şartları	λ	0.78
4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sistemi	3B geometrik nesne tabanlı model yaratılması	μ	0.80
	3B yerleşik veri	μ	0.81
	3B parametrik özelliklerin tanıtılması	μ	0.80
	Veri sıralama ve sınıflandırma	μ	0.82
	Verilerden is programı yaratılması	μ	0.83
	Veri bağlantısı	μ	0.84
	4B görüntüleme ve simülasyon	μ	0.86
	Çakışma tespiti	μ	0.85
Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	Veri entegrasyonu	β	0.82
	Veri bağlantısı	β	0.80
	Akıllı karar verme	β	0.78
	Operasyon optimizasyonu	β	0.83
	Veri analizi	β	0.85
	Geri dönüş sağlama	β	0.79
	Dijital haritalama	β	0.80
	Dijital füzyon	β	0.78
	Teşhis	β	0.78
	Bilgi işlem	β	0.77
	Kendi kendine öğrenme	β	0.81
	Sonuç tahmini	β	0.79
	Yeniden tasarım	β	0.77
	Algılama	β	0.79

Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	Çevresel durum verisi	α	0.82
	Fiziksel veri toplama	α	0.83
	Uzaktan denetleme	α	0.84
	Uzaktan karar verme	α	0.82
	Veri yönetimi	α	0.83
	İzleme süresi	α	0.78
	İzleme kalitesi	α	0.82
	İzleme maliyeti	α	0.79
	Otomasyon	α	0.85
	Pratiklik	α	0.81
	Denetim memnuniyeti	α	0.84
	İletişim kalitesi	α	0.80
	İş birliği performansı	α	0.85
	Potansiyel gelişim	α	0.81

Hipotez 1: Yüksekten düşme risk belirleme bilgilerinin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunu kolaylaştırdığını öne sürer. Şekil 4'te gösterildiği gibi varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.81'lik katsayısı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. H1, Çalışma yapılacak alanın zeminden yüksekliği, Çalışma yapılacak zeminin eğimi, Çalışma yapılacak zeminin yapısı, Ekiplerin çalışma süresi ve Ortam şartlarının Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamalarına veri teşkil ederek görselleştirme, modelleme ve kendi kendine öğrenme yoluyla riskleri tahmin etmeye yönelik olarak kullanılması ve analizi ile entegrasyon süreci önemli ölçüde iyileştirilebilir.

Hipotez 2: 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sisteminin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonunu geliştirdiğini öne sürer. Şekil 4'te gösterildiği gibi varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.82'lik katsayısı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. Bu, denetlenecek işin planlandığı gibi üst düzey birçok boyutlu (nB) ve genişletilmiş gerçeklik modeli mevcut olduğunda, modele dahil edilen önceki verilerden otomatik ilerleme izleme için yararlanılabileceğini ve kendi kendine öğrenme yoluyla muhtemel oluşabilecek risklerin tahmin edilebildiğini önermektedir. Geliştirilen 4B modelin doğru bilgiye doğru zamanda ve kesin yerde erişim sağladığı seviye, karar verme ve bir projenin başlangıcında oluşturulmuş risk planına göre önceden tanımlanmış parametrelere uygun olarak yürütülmesini sağlaması açısından çok önemlidir. Planlandığı gibi yüksekte çalışma ortamında oluşabilecek muhtemel risk bilgilerin gösterebilmek için iletişim ve raporlama yöntemlerini kolaylaştıran tutarlı bir platform sağlamaktadır.

Hipotez 3: 4B Yapı Bilgi Modelleme (YBM) Sisteminin Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolüne katkı koyduğunu varsaymaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.83'lük katsayısı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. Bu, dijital yapım işleri modelini vurgulayan ve genişletilmiş gerçeklik modeliyle entegre olan 4B YBM'de yüksekte güvenli çalışma denetimi izlenmesi ve kontrolüne, değişiklikleri senkronize etmeye ve proje ilerledikçe varlıkların değişen gerçekliği ile onları güncel tutmaya yardımcı olduğunu önermektedir. Genişletilmiş gerçeklik modelleri, YBM sistemlerine önemli bir analitik avantaj sunmaktadır. Çeşitli kaynaklardan gelen verileri

toplayarak ve bunları bir nB modeliyle birleştirerek, yapım ekibi üyeleri her bir bileşene önemli erişim bilgileri elde edebilecektir. Genişletilmiş gerçeklik yeteneklerinin yardımıyla, 4B YBM modelleri, temsil ettikleri fiziksel varlıkların otomatik olarak güncellenen temsilleri "canlı" hale getirmek üzere geliştirilmiştir. 4B YBM, genişletilmiş gerçeklik modellerinin gerektireceği bilgilerin çoğunu içeren bir nB sanal proje modeli oluşturmaktadır.

Hipotez 4: Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi Kolaylaştıran Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu simüle edilen verileri zenginleştirdiğini ve Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma ve Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü performansını güçlendirdiğini varsaymaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, varsayılan modeldeki ilişkileri tanımlayan 0.84'lik katsayı istatistiksel olarak pozitif ve önemlidir. Bu, Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamalarının Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü için mükemmel bir araç oluşturmasını önermektedir. Lazer tarayıcı, dijital kamera ve/veya senyörlerden alınan gerçek zamanlı veriler dahil edilerek, gerçek çalışma koşullarına dayalı gerçek zamanlı yüksekte güvenli çalışma denetimi analizi gerçekleştirilebilir. Genişletilmiş Gerçeklik Uygulamaları, inşaat projeleri bileşenlerinin/sistemlerinin standartlaştırılmış bir semantik temsiliyi kolaylaştıran prosedürler, teknolojiler ve veri şemaları sağlarken, Yapay Zekâ, otomatikleştirilmiş inşaat projesi yüksekte güvenli çalışma denetimi için veri akışlarından yararlanarak karmaşık yönetim ve optimizasyon sürecinin daha bütünsel süreç odaklı bir karakterizasyonunu sağlar ve muhtemel risk oluşturan aktiviteler hakkında tahminde bulunur. Bu sistem, proje paydaşlarına otomatik yüksekte güvenli çalışma denetimi izlenmesi ve kontrolünü kolaylaştırarak üstün performans sağlar.

5. TARTIŞMA VE UYGULAMALAR

5.1. Teorik Katkılar

Kazaları önlemeye yönelik mevcut önlemler, toplu koruma kapsamında bile tek başına yeterli görülmemektedir. Bu bağlamda şantiyede iş sağlığı ve güvenliği risklerini azaltmanın en önemli yolunun risk değerlendirme ekipleri tarafından işyerinin kendi koşullarının değerlendirilmesi ve koruma tedbirlerinin belirlenmesinde ortak akıl oluşturulmasından geçtiğini söylemek mümkündür [94]. Emniyet kemerleri gibi geleneksel yöntemler öncelikle risk etkilerini azaltmada faydalı olsa da, yüksekten düşme olaylarının mevcut kayıtları, çağdaş dinamik bir çalışma ortamında çeşitli düşme tehlikeleriyle baş etmede geleneksel yöntemlerin yeterli olmadığını göstermektedir [95]. Modern inşaat ortamındaki belirsizliklerle başa çıkmak için, düşme sorununu ele almadaki etkinliği artırmak için gelişmiş teknolojik yardımlara ihtiyaç vardır. Yeni teknolojilerin doğru kullanımı, bu tür yöntemlerin uygulanmasını kolaylaştırabilir ve yüksekten düşme risklerinin başarılı bir şekilde tahmin edilme şansını artırabilir [96]. Son teknolojiler, şantiyelerde çalışma durumlarının değerlendirilmesine ve tahminde bulunulmasına katkıda bulunabilir. Uygulayıcıların kritik riskleri ortaya çıkmadan önce planlama aşamasında erken dahil etmelerine izin verir. Modern teknolojilerin uygulanması şantiyelerde düşme tehlikelerinin etkin yönetimine yönelik (1) sınırlı proje bütçesi dikkate alınarak donanım ve yazılım tedarikinin yüksek maliyeti, (2) inşaat personelinin yüksekten düşme tespit teknolojisinin nasıl kullanılacağı konusunda eğitmek için zaman ve bütçe ayrılması [97] ve (3) giyilebilir aygıtları kullanırken çalışanların çevikliğinin azalması [54] gibi zorluklarla ilişkilidir. Yeni

teknolojilerin uygulanmasıyla ilgili maliyetlere ve sınırlamalara rağmen, otomatik tahmin ve düşme tehlikelerinin kontrolüne proaktif bir yaklaşım getirebilmektedirler [98].

Yüksekten düşme risk tahmini, tehlikelerden kaçınmaya yönelik uygun kontrol önlemlerinin uygulanması ile zamanında önlemeyi sağlamaktadır. Bilgisayar destekli önleyici tasarım gibi gelişmiş teknolojiler, bu süreci kolaylaştırmaya ve yüksekten düşme risklerini azaltmak için gerekli değişiklikleri uygulamaya yardımcı olur. Örneğin, görselleştirme ve simülasyon teknolojileri, tasarımcıları inşaat aşamasında olası düşme tehlikelerini değerlendirme konusunda desteklemek için kapsamlı bir araç takımı sağlamaktadır [99]. Çeşitli tehlikeleri belirlemek, ilişkili riskleri değerlendirmek ve kontrolleri etkin bir şekilde takip etmek için platformlar ve yazılımlar geliştirilmiştir. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ve ilgili araçlardaki son gelişmeler, otomatik düşme tehlikeleri değerlendirmesine olanak tanır ve uygun önleyici tedbirlerin geliştirilmesine yardımcı olur. Algoritmalar, düşmeyle ilgili olası güvenlik risklerini belirlemek için bina modellerini ve çizelgelerini otomatik olarak analiz eder [51]. Araştırmacılar, iş güvenliği risklerini BIM'de değerlendirmek ve risk azaltma stratejileri önermek için 4B YBM'i kullanmaktadırlar. 4B YBM, riskli çalışma bölgelerinde planlanmış farklı görevlerin üstlenme risklerini görselleştirmek için proje planlama süreci boyunca yardımcı olur. İş güvenliği risklerinin gerçek zamanlı izlenmesi, yüksekten düşme kazaları riski altında olan çalışanları alarmla geçirmeye yardımcı olur. Gerçek zamanlı izleme, olası riskler ortaya çıkmadan ve çalışanları etkilemeden önce tespit etmek için gereklidir. Alizadehsalehi ve dig. [56], tehlikeli durumları tahmin etmek ve düşme önleme mekanizmalarını tetiklemek için YBM ve IHA'na dayalı hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, yüksekten düşme riskleri için uygun azaltma stratejilerini benimsemeye tasarım ve inşaat aşamaları arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir.

5.2. Yönetsel Uygulamalar

Tablo 8.'de yönetsel uygulamalara örnek olarak otomatik yüksekte güvenli çalışma denetimi izlenmesi ve kontrolü sürecinde genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekâ uygulamaları entegrasyonunun gerçekleştirilmesine yönelik 4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sisteminin oluşturulması, ilgili gereksinimler ve beklenen yararlar gösterilmektedir. Yapımda görev alan ilgili yöneticiler ve uzmanlar, İş Güvenliği Uzmanı, 4B Planlamacı, ve YBM Yöneticisi, iş programında planlanan işlere ilişkin olarak iş güvenliği yönetimi kapsamında sahada 3B lazer tarama teknolojisi kullanılarak fiziksel veri toplama aşamasından başlayarak, 3B nokta bulutu (mimari) oluşturulması ve 3B-4B modellerinin yaratılması, sonrasında IoT şebeke ağı aracılığı ile yapılan aktivitelere ilişkin iş güvenliği bilgilerinin kolay bilgi paylaşımı gibi yararlar elde etme imkânına sahiptirler. SG/AG/GG araçları ve yazılımları kullanılarak uzaktan denetleme amaçlı 4B modeller yardımıyla yüksekte çalışma ortamının canlı görüntüye (çalışan ekiplerin) entegrasyonu sağlanır ve otomatik çalışma ortamı iş güvenliği risk tespiti gerçekleştirilmiş olur. Süreçlerin otomasyonu sağlanarak 4B-GG modeli oluşturulur ve veri entegrasyonu gerçekleştirilir. Otomatik GG modeli oluşturulması ile otomatik GG çalışma ortamı iş güvenliği risk görüntüleme sağlanmış olur. Böylelikle uzaktan karar vermeye destek olacak olan AI algoritma ile GG modeli ve YZ yazılımı kullanılarak verilerin analizi yapılır. Bunun sonucunda entegre 4B-GG modeli öğrenmesi ve iterasyonu gerçekleştirilerek muhtemel kaza erken uyarı imkânı sağlanmış olur.

Tablo 8 - Yapılarda yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonu örnek süreç, gereksinimler ve yararları

Otomatik Yüksekte Güvenli Çalışma Denetimi İzlenmesi ve Kontrolü	Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekâ Uygulamaları Entegrasyonu	4.Boyut Yapı Bilgi Modelleme Sistemi	Gereksinimler	Süreç	Yararlar
Fiziksel veri toplama	3B lazer tarama	3B Nokta Bulutu (Mimari)	Nİ ağı	3B-4B modellerinin yaratılması	İş güvenliği bilgilerinin kolay bilgi paylaşımı
Uzaktan denetleme	SG/AG/GG araçları	4B modeli	SG/AG/GG yazılımı	4B Yüksekte çalışma ortamının canlı görüntüye (çalışan ekiplerin) entegrasyonu	Otomatik çalışma ortamı iş güvenliği risk tespiti
Otomasyon	Veri Entegrasyonu	4B-GG modeli	GG uygulaması	Otomatik GG modeli oluşturma	Otomatik GG çalışma ortamı iş güvenliği risk görüntüleme
Uzaktan karar verme	Veri analizi	YZ algoritma ile GG modeli ve verileri	YZ yazılımı	Entegre 4B-GG modeli öğrenmesi ve iterasyonu	Muhtemel kaza erken uyarı imkânı

5.3. Sınırlamalar ve İleriki Araştırmalar

Bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için başlıca fırsatlar sunan sınırlamalara sahiptir. İlk ve en büyük sınırlılık, anket için kullanılan örneklemin sınırlı sayıda olmasıdır. İkincisi, sadece yönetsel bakış açısına odaklanmak ve diğer paydaşların görüşlerini dikkate almamak da yapım işleri güvenliği doğası gereği sınırlıdır. Üçüncüsü, gerçekleştirilen ankette yapılarda yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonuna ilişkin olarak sınırlı sayıda faktör değerlendirilmiştir. Son olarak, bu araştırmanın örneklemini inşaat sektöründe teknolojik olarak gelişmiş ülkelerin (ABD, BAE, İsveç, Danimarka, Kanada) firmalarında çalışan yöneticiler oluşturmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bulguların daha geniş bağlamlarda daha fazla doğrulanması için farklı kıtalardaki ülkelerde çalışan küresel yöneticileri içermelidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapım işlerinde yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın entegrasyonu modeli önerilmektedir. Teorik çerçeveye ilişkin olarak iş süreci modeli ve sistem uygulama model entegrasyonu

gösterilmektedir. Önerilen modelin değerlendirilmesi, hipotezlerin güvenilirliğini, geçerliliğini ve katkısının test edilmesi için bir Yapısal Eşitlik Model geliştirilmiştir. Araştırma bulguları, önerilen modelde kullanılan teknolojilerin entegrasyonun iş güvenliği denetimine olan olumlu etkisini ve önemini doğrulamaktadır. Önerilen model yüksek lokasyonda çalışan ekiplerin iş güvenliği bilgilerini analitik yeteneklerle dijitalleştirir ve karar verme sürecini optimize eder. Yüksekten düşme riskleri tahmini açısından, yapılan çalışmaların çoğunluğu, yüksekten düşme risklerinin yönetimini geliştirmek için gerçek zamanlı algılama ve izleme mekanizmalarını dikkate almıştır. Yüksekten düşme önleme çalışmaları, özellikle YBM kapasitelerinden yararlanarak tasarım yoluyla otomatik önlemeyi (TyÖ) vurgulamaktadır. Ayrıca, yüksekten düşme risk azaltma konusundaki araştırmaların, inşaat işçilerinin uygun şekilde korunmasını sağlamak için bilgisayar destekli kullanımına giderek daha fazla odaklanmak durumundadır.

Bu araştırma gelecekteki yapılarda yüksekte çalışma iş güvenliği denetimini kolaylaştırmak için genişletilmiş gerçeklik ve yapay zekanın entegrasyonu ve iş güvenliği konusunda otomatik olarak uzaktan karar vermeye destek olacak çalışmalar için bir yol haritası sağlayabilir.

Kaynaklar

- [1] Zhou, Z., Goh, Y.M. and Li, Q., Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Safety Science*, 72:337–350, 2015.
- [2] Zhang, S., Teizer, J., Lee, J., Eastman, C.M., Venugopal, M. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, 29:183–195, 2013.
- [3] Guo, H., Yu, Y., Skitmore, M. Visualization technology-based construction safety management: A review. *Automation in Construction*, 73:135–144, 2017.
- [4] Melzner J, Zhang S, Teizer J, Bargstädt H.J. A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models. *Construction Management and Economics*, 31(6):661–674, 2013.
- [5] Zhang S, Sulankivi K, Kiviniemi M, Romo I, Eastman CM, Teizer J. BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning. *Safety Science*, 72:31–45, 2015.
- [6] Zhou, W., Zhao, T., Liu, W., & Tang, J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective. *Safety Science*, 109(June):95–108, 2018.
- [7] Snowden, D. J., & Boone, M. E. A Leader's Framework for Decision Making -Harvard Business Review. *Harvard Business Review*, pages 1–8, 2007.
- [8] Zhou Z, Irizarry J, Li Q. Applying advanced technology to improve safety management in the construction industry: a literature review. *Construction Management and Economics*, 31(6):606–622, 2013.
- [9] Kiani, A., Salman, A., Riaz, Z. (2014). Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction H&S management. *Journal of Information Technology in Construction*, 19 (September 2013):72–91, 2014.

- [10] Hammad, A., Setayeshgar, S., Zhang, C., Asen, Y. Automatic generation of dynamic virtual fences as part of BIM-based prevention program for construction safety. Proceedings – Winter Simulation Conference, (December), 2012.
- [11] Park, C.S., Kim, H.J. A framework for construction safety management and visualization system. *Automation in Construction*, 33:95–103, 2013.
- [12] Nancy Leveson, N. A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science*, 42(4):237–270, 2004.
- [13] Rasmussen, J. Risk management in a dynamic society: A modelling problem. *Safety Science*, 27(2-3):183–213, 1997.
- [14] Bureau of Labor Statistics. (2017). Survey of occupational injuries and illnesses chart data. [https://www.bls.gov/iif/soii-chart-data-2017.htm](https://www.bls.gov/iif/soii/chart-data-2017.htm)
- [15] Kincl, L. D., Bhattacharya, A., Succop, P. A., Clark, C. S. Postural sway measurements: A potential safety monitoring technique for workers wearing personal protective equipment. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17(4), 256–266, 2002.
- [16] Huppert, D., Grill, E., Brandt, T. Down on heights? One in three has visual height intolerance. *Journal of Neurology*, 260(2), 597–604, 2013.
- [17] Salassa, J. R., Zapala, D. A. Love and fear of heights: The pathophysiology and psychology of height imbalance. *Wilderness & Environmental Medicine*, 20(4), 378–382, 2009.
- [18] Brandt, T., Arnold, F., Bles, W., & Kapteyn, T. S. The mechanism of physiological height vertigo: I. Theoretical approach and psychophysics. *Acta Oto-Laryngologica*, 89(3–6), 513–523, 1980.
- [19] Abed, H.R., Hatem, W.A., Jasim, N.A. Adopting BIM technology in fall prevention plans. *Civil Eng. J.* 5 (10), 2270–2281, 2019.
- [20] Goh, Y.M., Guo, B.H.W., FPSWizard: A web-based CBR-RBR system for supporting the design of active fall protection systems. *Autom. Constr.* 85, 40–50, 2018.
- [21] Karakhan, A., Gambatese, J., Rajendran, S., Application of choosing by advantages decision-making system to select fall-protection measures. In: Proc. 24th Ann.Conf of the Int'l. Group for Lean Construction, Boston, MA, USA, pp. 33–42, 2016.
- [22] Jokkaw, N., Sutecharuwat, P., Weerawetwat, P., Measurement of Construction Workers' Feeling by Virtual Environment (VE) Technology for Guardrail Design in High-Rise Building Construction Projects. *Eng. J.* 21 (5), 161–177, 2017.
- [23] Abd Rahman, N., Goh, K.C., Goh, H.H., Omar, M.F., Toh, T.C., Zin, M., Asuhaimi, A., MohdJaini, Z., Yunus, R., Rahmat, S.N. Accidents preventive practice for high-rise construction. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences, Cape Town, SouthAfrica, 1–3 February 2016; EDP Sciences: Les Ulis, France, Volume 47, pp. 1–6.2016.
- [24] Im, H.-J.; Kwon, Y.-J.; Kim, S.-G.; Kim, Y.-K.; Ju, Y.-S.; Lee, H.-P. The characteristics of fatal occupational injuries in Korea's construction industry, 1997–2004. *Saf. Sci.*, 47, 1159–1162, 2009.

- [25] Rubio-Romero, J.C.; Gámez, M.C.R.; Carrillo-Castrillo, J.A. Analysis of the safety conditions of scaffolding on construction sites. *Saf. Sci.*, 55, 160–164, 2013
- [26] Hu, K.; Rahmandad, H., Smith-Jackson, T, Winchester, W. Factors influencing the risk of falls in the construction industry: A review of the evidence. *Constr. Manag. Econ.*, 29, 397–416, 2011.
- [27] Forteza, F.J.; Carretero-Gomez, J.M.; Sese, A. Occupational risks, accidents on sites and economic performance of construction firms. *Saf. Sci.* 2017, 94, 61–76.
- [28] Feng, Y.; Zhang, S.; Wu, P. Factors influencing workplace accident costs of building projects. *Saf. Sci.*, 72, 97–104, 2015.
- [29] Zhou, Z.; Goh, Y.M.; Li, Q. Overview and analysis of safety management studies in the construction industry. *Saf. Sci.*, 72, 337–350, 2015.
- [30] Amiri, M.; Ardeshir, A.; Zarandi, M.H.F. Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction. *Saf. Sci.*, 93, 16–28, 2017.
- [31] Andersen, L.P.; Nørdam, L.; Joensson, T.; Kines, P.; Nielsen, K.J. Social identity, safety climate and self-reported accidents among construction workers. *Constr. Manag. Econ.*, 36, 22–31, 2018
- [32] Bilir, S., Gürcanlı, G.E. (2018). A method for determination of accident probability in construction industry. *Teknik Dergi*, 29(4), 8537-8561.
- [33] Mistikoglu, G.; Gerek, I.H.; Erdis, E.; Usmen, P.E.M.; Cakan, H.; Kazan, E.E. Decision tree analysis of construction fall accidents involving roofers. *Expert Syst. Appl.*, 42, 2256–2263, 2015.
- [34] Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Autom. Constr.*, 38, 109–127. 2014.
- [35] Scheffer, M.; Mattern, H.; König, M. BIM Project Management. In *Building Information Modeling*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 235–249, 2018.
- [36] Akinlolu, M.; Haupt, T.C.; Edwards, D.J.; Simpeh, F. A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies. *Int. J. Constr. Manag.*, 1–13, 2020.
- [37] Manzoor, B.; Othman, I.; Durdyev, S.; Ismail, S.; Wahab, M.H. Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development-A Systematic Literature Review. *Appl. Syst. Innov.*, 4, 52, 2021.
- [38] Alizadehsalehi, S.; Yitmen, I. The impact of field data capturing technologies on automated construction project progress monitoring. *Procedia Eng.* 2016, 161, 97–103.
- [39] Melzner, J.; Teizer, J.; Zhang, S.; Bargstaedt, H.-J. Object-oriented safety planning of building construction by using Building Information Modeling. *Bauingenieur*, 88, 471–479, 2013.
- [40] Martinez, J.G.; Gheisari, M.; Alarcón, L.F. UAV integration in current construction safety planning and monitoring processes: Case study of a high-rise building construction project in Chile. *J. Manag. Eng.*, 36, 5020005, 2020.

- [41] Skibniewski, M.J. Research trends in information technology applications in construction safety engineering and management. *Front. Eng. Manag.* 2015, 1, 246–259.
- [42] Bhagwat, K.; Delhi, V.S.K. Review of construction safety performance measurement methods and practices: A science mapping approach. *Int. J. Constr. Manag.*, 1–15,2021.
- [43] Manzoor, B.; Othman, I.; Manzoor, M. Evaluating the critical safety factors causing accidents in high-rise building projects. *Ain Shams Eng. J.* 2021.
- [44] Sunindijo, R.Y.; Zou, P.X.W. Political skill for developing construction safety climate. *J. Constr. Eng. Manag.* 2012, 138, 605–612.
- [45] Xu, Q.; Chong, H.-Y.; Liao, P.-C. Collaborative information integration for construction safety monitoring. *Autom. Constr.*, 102, 120–134, 2019.
- [46] Getuli, V.; Capone, P.; Bruttini, A.; Isaac, S. BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach. *Autom. Constr.*, 114, 103160,2020.
- [47] Ji, Y.; Leite, F. Automated tower crane planning: Leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking. *Autom. Constr.*, 93, 78–90,2018.
- [48] Braun, A.; Tuttas, S.; Borrmann, A.; Stilla, U. Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision. *Autom. Constr.*, 116, 103210, 2020.
- [49] Thinakaran, V.; Othman, I. Factors of Safety Misconduct Affecting Safety Performance of Tall Building Construction Site. In *Proceedings of the International Conference on Civil, Offshore and Environmental Engineering, Kuching, Malaysia, 13–15 June 2021*; Springer: Singapore, pp. 620–630, 2021.
- [50] Newaz, M. T., Ershadi, M., Carothers, L., Jefferies, M., & Davis, P. A review and assessment of technologies for addressing the risk of falling from height on construction sites. *Safety science*, 147, 105618, 2022.
- [51] Winge, S., Albrechtsen, E., Mostue, B. A. Causal factors and connections in construction accidents. *Safety science*, 112, 130-141, 2019.
- [52] Le, Q.T.; Pedro, A.; Park, C.S. A Social Virtual Reality Based Construction Safety Education System for Experiential Learning. *J. Intell. Robot. Syst.*, 79, 487–506,2015.
- [53] Kolar, Z.; Chen, H.; Luo, X. Transfer learning and deep convolutional neural networks for safety guardrail detection in 2D images. *Autom. Constr.*, 89, 58–70, 2018.
- [54] Fang, Q.; Li, H.; Luo, X.; Ding, L.; Luo, H.; Li, C. Computer vision aided inspection on falling prevention measures for steeple jacks in an aerial environment. *Autom. Constr.*, 93, 148–164,2018.
- [55] Rey-Merchán, M. D. C., Gómez-de-Gabriel, J. M., Fernández-Madrigal, J. A., & López-Arquillos, A. Improving the prevention of fall from height on construction sites through the combination of technologies. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 28(1), 590-599, 2022.

- [56] Alizadehsalehi, S., Yitmen, I., Celik, T., & Ardit, D. (2020). The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 26(4), 829-844.
- [57] Sidani, A., Martins, J. P., & Soeiro, A. BIM approaches for enhanced health and safety status in construction-protocol for a systematic review: Protocol. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 6(1), 1-8, (2022).
- [58] Harichandran, A., Johansen, K. W., Jacobsen, E. L., & Teizer, J. A conceptual framework for construction safety training using dynamic virtual reality games and digital twins. In ISARC. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Vol. 38, pp. 621-628, IAARC Publications, 2021.
- [59] Ogunseiju, O. R., Olayiwola, J., Akanmu, A. A., Nnaji, C. Digital twin-driven framework for improving self-management of ergonomic risks. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(3), 403-419, 2021.
- [60] Kaarlela, T., Pieskä, S., Pitkääho, T. Digital twin and virtual reality for safety training. In 2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom) (pp. 000115-000120). IEEE, 2020.
- [61] Choi, S. H., Park, K. B., Roh, D. H., Lee, J. Y., Mohammed, M., Ghasemi, Y., & Jeong, H. An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102258, 2022.
- [62] Ramos-Hurtado, J.; Muñoz-La Rivera, F.; Mora-Serrano, J.; Deraemaeker, A.; Valero, I. Proposal for the Deployment of an Augmented Reality Tool for Construction Safety Inspection. *Buildings*, 12(4), 500, 2022.
- [63] Wu, S., Hou, L., Zhang, G. K., & Chen, H. Real-time mixed reality-based visual warning for construction workforce safety. *Automation in Construction*, 139, 104252, 2022.
- [64] Wolf, M., Teizer, J., Wolf, B., Bükrü, S., & Solberg, A. Investigating hazard recognition in augmented virtuality for personalized feedback in construction safety education and training. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101469, 2022.
- [65] Recal, F., Demirel, T. Comparison of machine learning methods in predicting binary and multi-class occupational accident severity. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(6), 10981-10998, 2021.
- [66] Kazar, G., Comu, S. Developing a virtual safety training tool for scaffolding and formwork activities. *Teknik Dergi*, 33(2), 11729-11748, 2022.
- [67] Teizer, J., Johansen, K. W., & Schultz, C. The Concept of Digital Twin for Construction Safety. In *Construction Research Congress 2022*, pp. 1156-1165, 2022.
- [68] Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L., Tong, Q., A novel fuzzy dynamic Bayesian network for dynamic risk assessment and uncertainty propagation quantification in uncertainty environment. *Saf. Sci.* 141, 105285, 2021.

- [69] Liu, M., Tang, P., Liao, P.-C., Xu, L., Propagation mechanics from workplace hazards to human errors with dissipative structure theory. *Saf. Sci.* 126, 104661, 2020.
- [70] Liu, M., Xu, L., Liao, P.-C., Character-based hazard warning mechanics: A network of networks approach. *Adv. Eng. Inf.* 47, 101240, 2021.
- [71] Zhang, W., Zhu, S., Zhang, X., Zhao, T., Identification of critical causes of construction accidents in China using a model based on system thinking and case analysis. *Saf. Sci.* 121, 606–618, 2020.
- [72] Da Rocha Leao, B.B., Barkokebas Jr, B., Barkok'ebas, B., Zlatar, T., Risk management of falls from height by using the bim platform: a systematic review. *Int. J. Develop. Res.* 9 (11), 31267–31273, 2019.
- [73] Kim, Y., Jung, H., Koo, B., Kim, J., Kim, T., Nam, Y., Detection of pre-impact falls from heights using an inertial measurement unit sensor. *Sensors* 20 (18), 5388, 2020.
- [74] Darko, A., Chan, A.P., Yang, Y., Tetteh, M.O., Building information modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management–Critical survey and future needs. *Comput. Ind.* 123, 103327, 2020.
- [75] Chen, H., Luo, X., Zheng, Z., Ke, J., A proactive workers' safety risk evaluation framework based on position and posture data fusion. *Autom. Constr.* 98, 275–288, 2019.
- [76] Liu, H., He, Y., Hu, Q., Guo, J., Luo, L. Risk management system and intelligent decision-making for prefabricated building project under deep learning modified teaching-learning-based optimization. *PLoS ONE* 15 (7), e0235980, 2020.
- [77] Subedi, S., Pradhananga, N., Ergun, H., Monitoring Physiological Reactions of Construction Workers in Virtual Environment: Feasibility Study Using Noninvasive Affective Sensors. *J. Legal Affairs Dispute Resolut. Eng. Construct.* 13 (3), 04521016, 2021.
- [78] Wang, Q., Automatic checks from 3D point cloud data for safety regulation compliance for scaffold work platforms. *Autom. Constr.* 104, 38–51, 2019.
- [79] Park, J., Cho, Y.K., Khodabandelu, A., Sensor-based safety performance assessment of individual construction workers. *Sensors* 18 (11), 3897, 2018.
- [80] Hayat, A., Shan, M. Fall Detection System for Labour Safety. In: 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST) IEEE, pp. 1–4, 2018.
- [81] Tekbas, G., Guven, G. BIM-based automated safety review for fall prevention. In: Ofluoglu, S., Isikdag, U., Ozener, O.O. (Eds.) 1st Eurasian BIM Forum, EBF 2019. Springer, pp. 80–90, 2020.
- [82] Lu, Y., Gong, P., Tang, Y., Sun, S., Li, Q., BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Autom. Constr.* 124, 103553, 2021.

- [83] Park, H., Liu, R., 2020. Improving for construction safety design: Ontology model of a knowledge system for the prevention of falls. In: Construction Research Congress 2020: Safety, Workforce, and Education American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 463–471, 2020.
- [84] Shi, Y., Du, J., Ahn, C.R., Ragan, E., Impact assessment of reinforced learning methods on construction workers' fall risk behavior using virtual reality. *Autom. Constr.* 104, 197–214, 2019.
- [85] Xu, Z., Zheng, N., Incorporating virtual reality technology in safety training solution for construction site of urban cities. *Sustainability (Switzerland)* 13 (1), 1–19, 2021.
- [86] Ahn, S., Kim, T., Park, Y.J., Kim, J.M., Improving Effectiveness of Safety Training at Construction Worksite Using 3D BIM Simulation. *Adv. Civil Eng.* 2020, 2020.
- [87] Chihming, W., Zexin, J., Yuxin, L., Songqing, H. & Zhongwei, Y. Investigation on the eye-tracking technology in hazard identification of building construction engineering. In: 2nd IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics, ICACEH 2020 Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 32–35, 2020.
- [88] Fang, W., Ding, L., Luo, H., Love, P.E., Falls from heights: A computer vision-based approach for safety harness detection. *Autom. Constr.* 91, 53–61, 2018.
- [89] Łabędź, P., Skabek, K., Ozimek, P., Nytko, M., 2021. Histogram Adjustment of Images for Improving Photogrammetric Reconstruction. *Sensors* 21 (14), 4654.
- [90] Uzun, I. M., & Cebi, S. (2020). A novel approach for classification of occupational health and safety measures based on their effectiveness by using fuzzy kano model. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(1), 589-600.
- [91] Wolf, C., Joye, D., Smith, T. W., & Fu, Y.-c. *The SAGE handbook of survey methodology*: Sage, 2016.
- [92] Bowling, A. Mode of questionnaire administration can have serious effects on data quality. *Journal of public health*, 27(3), 281-291, 2005.
- [93] Stern, M. J., Bilgen, I., & Dillman, D. A. The state of survey methodology: Challenges, dilemmas, and new frontiers in the era of the tailored design. *Field Methods*, 26(3), 284-301, 2014.
- [94] Zhang, W., Zhu, S., Zhang, X., Zhao, T., 2020. Identification of critical causes of construction accidents in China using a model based on system thinking and case analysis. *Saf. Sci.* 121, 606–618.
- [95] Zuluaga, C.M., Albert, A., Winkel, M.A., Improving safety, efficiency, and productivity: evaluation of fall protection systems for bridge work using wearable technology and utility analysis. *J. Construct. Eng. Manage.* 146 (2), 04019107, 2020.
- [96] Begic, H.; Galic, M. A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11, 337, 2021.

- [97] Kitagawa, K., Taguchi, Y., Wada, C., & Toya, N. Step Length Estimation Based on Arm Accelerations for Wearable Fall Prevention Systems. *International Journal of Applied*, 13(2), 2020.
- [98] Liu, P., Xie, M., Bian, J., Li, H., Song, L., A hybrid PSO–SVM model based on safety risk prediction for the design process in metro station construction. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (5), 1714, 2020.
- [99] Zhou, Y., Yang, Y., Yang, J.-B., Barriers to BIM implementation strategies in China. *Eng., Construct. Arch. Manage.* 26 (3), 554–574, 2019.

Işıksız Kavşaklarda Kritik Aralık Kabulü İçin Yeni Bir Yaklaşım

Sezin HIZARCI¹
Serhan TANYEL²
Selim DÜNDAR³
Ilgın GÖKAŞAR⁴
Burak ŞENGÖZ⁵
Ali TOPAL⁶

ÖZ

Bu çalışma kapsamında İzmir’de yer alan 4 ışısız kavşaktan toplanan verilerden yararlanarak, farklı manevralar için bağıntılar geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada, kritik aralık kabul değerinin, düşük ana yol hacim değerleri altında önemli oranda değişkenlik gösterdiği; ancak ana yol trafik akımı yüksek değerlere ulaştığında sürücülerin daha kısa aralıkları kabul ettikleri görülmüştür. Aralık kabul değerinin belirlenmesinde, kavşağa giriş yapacak sürücünün manevrasından daha çok; uygun aralık bulmaya çalıştığı manevranın daha etkin olduğu görülmüştür. Çalışmanın bir diğer çıktısı da, özellikle düşük ana yol trafik akımı etkisi altında sürücü davranışlarının daha etkili olduğu ve davranış farklılıklarının modele katılmasıyla sahada gözlemlenen değerlere daha sağlıklı biçimde ulaşılabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Işıksız kavşak, kritik aralık, kapasite.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 2 Ağustos 2022 günü ulaşmıştır. 12 Haziran 2023 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1314559>

- 1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye
sezinhizarci@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-4435-5535>
- 2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
serhan.tanyel@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-8549-9442>
- 3 İstanbul Okan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
selim.dundar@okan.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-4433-1998>
- 4 Boğazici Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
ilgin.gokasar@boun.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9896-9220>
- 5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
burak.sengoz@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-0684-4880>
- 6 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
ali.topal@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-2601-1926>

ABSTRACT

A New Approach for Acceptance of Critical Gap at Unsignalized Intersections

Within the scope of this study, it is aimed to develop relations for different maneuvers by using the data collected from four different unsignalized intersections in İzmir. In the study, it is observed that the critical gap acceptance value varies significantly under main arterials involving low volumes of traffic; however, when the highway traffic flow reaches high values, drivers accept shorter gaps. In determining the gap acceptance value it is observed the maneuver of the driver trying to find an appropriate gap at the intersection is more effective than the maneuver of the driver entering the intersection. Another output of the study is that driver behaviors are more effective, especially at main arterials having low traffic flow, and it is determined that the actual values observed in the field can be achieved by adding behavioral differences to the investigated models.

Keywords: Unsignalized intersections, critical gap, capacity.

1. GİRİŞ

Farklı doğrultudaki taşıt hareketlerinin ışıksız trafik işaretleri ile düzenlendiği kavşaklar denetimsiz ve ışıksız eşdüzey kavşak adını alırlar. Işıksız eşdüzey kavşakların düzenlenmesinde, kavşağa bağlanan yollardan birisi, hacim ya da geometrik özelliklerine göre diğerlerinden daha önemli kabul edilir ve “ana yol” adını alır. Diğeri ya da diğerleri “yan yol” olarak adlandırılırlar [1]. Ana yol üzerinde seyreden araçlar kavşakta ilk geçiş hakkına sahip araçlardır ve trafik güvenliği açısından yan yolda seyreden araçlar için kavşak yaklaşımlarına “DUR” ya da “YOL VER” mesajlı trafik işaretleri yerleştirilir. Yan yolda hareket eden taşıt sürücülere kavşağa yaklaşırken hızlarını azaltıp ve/veya durup ana yolu gözlemek ve ana yoldan kavşağa yaklaşan taşıt var ise ilk geçiş hakkını bunlara bırakmak zorundadır. Bu davranış, aynı zamanda kavşağın kapasite ve başarımını etkileyen en önemli unsur olarak da ön plana çıkmaktadır. Her ne kadar ışıksız kavşakların DUR veya YOL VER levhaları ile yönetilmesi uluslararası kabul görmüş bir yöntem olsa da, günümüzde, özellikle ülkemizde, bu işaret levhalarının bulunmadığı veya yol kademelenmesi dikkate alınmayarak yerleştirildiği uygulamalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu uygulamalar, kavşak kapasitesini ve başarımını etkilemektedir. Kavşak geometrilerindeki farklılıklar da, kavşak başarımını etkileyen diğer bir unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, ülkemizdeki ışıksız kavşakların kapasite ve başarımlarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Günümüzde ışıksız kavşakların kapasite ve başarımlarının belirlenmesinde üç ana yöntem kullanılmaktadır:

1. Analitik (Davranışsal) yöntem veya daha bilenen adıyla kritik aralık kabulü yöntemi,
2. Geometrik veya ampirik yöntem,
3. Eklenik engelleyici akımlar (EEA) yöntemi [1,2,3,4].

Analitik (davranışsal) yöntem, daha çok ana yoldaki ve yan yoldaki sürücülerin davranışlarını dikkate alan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Yöntem ayrıca kritik aralık kabul yöntemi (critical gap acceptance method) olarak da bilinmektedir. Bu yöntemin temelleri, ilk olarak [5] tarafından yayaların karşıdan karşıya geçişleri için geliştirilen

gecikme modeline dayanmaktaysa da yöntemin ilk olarak tanımlandığı çalışma Tanner tarafından 1962 yılında yayınlanmıştır [2]. Kritik aralık kabul yönteminin temelinde yapılan kabuller aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

- Yan yoldan kavşağa yaklaşan bir taşıt sürücüsü için kavşak içinde üç çeşit manevra söz konusudur. Bunlar; sağa dönüşle ana yoldaki yakın şerit akımına katılmak, sola dönüşle ana yoldaki yakın şerit akımını kesip uzak şerit akımına katılmak ya da her iki ana yol akımını da kesip karşıya geçerek karşıdaki yan yola girmek şeklinde olabilir. Bu manevralar sırasıyla kısaca katılma, kesip katılma ve kesip geçme olarak belirtilir [1].
- Yan yol sürücüleri için katılmak veya kesip geçmek istedikleri ana yol akımındaki taşıtlardan, önde bulunan taşıtın arkası ile onu izleyen taşıtın önü arasındaki aralık “Araya Giriş Aralığı (GAP)” olmaktadır.
- Ayrıca yan yol taşıtının kavşağa vardığı anda kavşağa en yakın ana yol taşıtı ile arasındaki uzaklık ise “Öne Giriş Aralığı (LAG)” olmaktadır.

Yan yoldan ışısız kavşağa yaklaşan bir sürücü, ana akım içine ancak kendisi için güvenli gördüğü “T” gibi bir zaman cinsinden aralık değerine eşit veya daha büyük bir aralık bulunduğu katılabilecektir [6]. Aralığın büyüklüğü, olası en az gecikme için seçilen en güvenli, en kısa zaman cinsinden aralık değeri olarak ifade edilebilir. Her sürücünün kabul ettiği aralık değeri birbirinden farklı olabilir. Bir sürücünün kabul ettiği bir aralık değerinden çok daha uzun bir aralık değerinin başka bir sürücü tarafından kabul edilmemesi sık görülen bir olaydır [1]. Her sürücü kabul edeceği aralığı, kişinin kendisi tarafından ve çoğu zaman sürücülük tecrübesine bağlı olarak belirlediği bir karar verme süreci sonucunda seçmektedir. Bu seçimde sürücünün yaşı, cinsiyeti, fiziksel durumunun yanı sıra karakteri de önemli bir rol oynamaktadır. Bazı araştırmacılar, sürücülerin aynı kavşakta farklı davranışlarda bulduklarını da öne sürmektedirler [1, 6, 7]. Bazı araştırmacılar ise, kavşağı sık kullanan sürücülerin, edindikleri alışkanlıklar sonucunda daha kısa aralıkları kabul ettiklerini belirtmektedirler [8]. Ancak özellikle ikincisi, gözlemlenmesi çok güç olduğundan kesinlik kazanmamıştır. Sürücüler arasındaki davranış farklılığı, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [7]:

- Eğer bir sürücü hep aynı aralığı kabul ediyorsa bu sürücünün davranışı tutarlı olarak tanımlanabilir. Aksi takdirde, tutarsız bir sürücü olarak tanımlanır.
- Eğer sürücülerin seçtikleri aralık değerleri bütün sürücülerini kapsayacak bir dağılıma aitse bu sürücüler homojen, eğer değilse homojen olmayan sürücüler olarak tanımlanırlar.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında sürücü davranışları dört şekilde modellenabilmektedir [7]:

1. Homojen ve tutarlı: Her sürücü sabit bir aralık kabulüne sahiptir.
2. Homojen ve tutarsız: Sürücü, durma çizgisine her geldiğinde, dağılıma ait farklı bir aralık değeri seçmektedir
3. Homojen olmayan ve tutarlı: Her sürücünün kabul ettiği sabit bir aralık değeri vardır fakat bu aralık değerlerinin dağılımı bir sürücü grubu için ifade edilmektedir.
4. Homojen olmayan ve tutarsız: Sürücülerin tutarsızlığına bağlı olarak, her sürücü veya bir grup sürücü, ayrı bir kritik aralık dağılımına sahiptirler.

Yapılan çalışmalar, homojen olmayan ve tutarsız sürücü davranışının, gerçek olayları daha iyi karakterize ettiğini göstermiştir. Ancak bu tip sürücü davranışlarının modellenmesi çok güçtür. Bu yüzden yapılmış olan çalışmalarda sürücülerin, homojen ve tutarlı oldukları kabul edilmiştir. Bu kabule göre, belirli bir "T" değerinden kısa ana yol aralıklarında hiçbir yan yol sürücüsü kavşağa girmeyecek, daha uzun aralıklarda ise yan yol sürücülerinin tümü kavşağa girecekleridir [1,7]. Bu durum, genel aralık kabulü fonksiyonuyla tanımlanabilir [6, 7]:

$$G(t) = P(\text{herhangi bir sürücünün kabul edeceği aralık} \geq t) \quad (1)$$

$G(t)$, bir aralığın kabul edilme olasılığı olup normal şartlarda $G(t)$ dağılımının ortalaması veya medyanı, kritik aralık değeri olarak kabul edilmektedir. Her ne kadar sürücü davranışı homojen olmayan ve tutarsız olarak kabul edilse de burada sürücü davranışının homojen ve tutarlı olduğu göz önüne alınarak yapılmaktadır [7]. Karar verme durumunda göz önünde bulundurulması gereken nokta, $G(t)$ 'nin "t" değerinin bir ön giriş aralığı mı yoksa araya giriş aralığını mı belirttiğidir. Bu durumda seçilen aralığın kritik araya giriş aralığı (T_g) veya kritik öne giriş aralığı (T) olup olmadığı belirlenmesinde de karşılaşmaktadır. Bu karışıklığın önlenmesi için kritik öne giriş aralığı ve araya giriş aralıklarının birbirlerine eşit olduğu kabul edilmiştir. Kavşağa, oluşan bir aralıkta girebilecek araç sayısı, aralığın büyüklüğüne ve yan yoldan giren araçların takip aralıklarına (T_0) bağlıdır. Eğer tali akımdaki araçlar arasındaki zaman cinsinden aralık değerinin sabit olduğu kabul edilirse, model aşağıdaki şekilde basite indirgenebilir:

$$T(n) = T + (n - 1) T_0 \quad (2)$$

Burada; $T(n)$, sadece ve sadece "n" sayıda yan yol akımdaki aracın girebileceği kadar büyük aralık değerini, T_0 , takip aralığını göstermektedir. Böylece "t" aralığında kavşağa girebilecek araç sayısı (N_t) aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$N_t = 1 + (t - T)/T_0 \quad (3)$$

Kritik aralık kabul değeri, doğrudan araziden ölçülebilen bir değer değildir. Toplanan verilerin, büro ortamında değerlendirilmesiyle elde edilebilen; kavşağı kullanan sürücülerin büyük kısmı tarafından kabul edileceği düşünülen bir parametredir. Bu sebeple, kritik aralık kabul yönteminin bulunması amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Literatürde en fazla bilinen yöntem Raff yöntemidir [9]. Bu yöntem en basit şekliyle, ana yoldaki taşıtlar arasındaki zaman cinsinden aralıklardan, yan yoldaki sürücüler tarafından reddedilen ve kabul edilen değerlerinin olasılık dağılım fonksiyonlarının kesiştiği değerini kritik aralık kabul değerini verdiği kabulüne dayanmaktadır. Diğer bir deyişle, kabul edilen aralıkların olasılık dağılım fonksiyon değeri ile ($F(a)$); reddedilen aralıkların olasılık dağılım değerlerinin ($F(r)$) toplamının 1" olduğu kabulüne dayanmaktadır.

Seigloch, yan yolda sürekli kuyruk bulunması durumunda kritik aralık değerinin hesaplanabileceğini öne sürmüştür [10, 11]. Bu yöntemin uygulanabilmesi için, yan yolda sürekli olarak en az bir araç bulunması gerekmektedir. Yöntem şu şekilde tanımlanabilir:

- Aralığın genişliği "t" ve bu aralıkta kavşağa giren araç sayısı "n" kaydedilir.

- Sadece "n" sayıda sürücü tarafından kabul edilen aralıklar için ortalama aralık değeri "E(t)" hesaplanır.
- Ortalama aralık değeri bağımlı değişken olarak kabul edilerek; bu aralıklarda kavşağa giren araç sayısı ile aralarında doğrusal regresyon yapılır.
- Doğrunun eğimi " T_o ", aralık eksenini kestiği nokta " t_o " olarak kabul edilirse; kritik aralık değeri " T ", aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir [11]:

$$T = t_o + T_o/2 \quad (4)$$

Ancak yan yolda her zaman kuyruk görülmeyebilir. Bu durumda kritik aralık değeri, takip ve aralık kabulü değerlerinin dağılımlarının bulunması suretiyle hesaplanabilir. Yan yolda bulunan bir sürücü, bir tek giriş aralığı kabul edecek ve kavşağa girecektir. Fakat aynı sürücü, birden fazla aralığı da reddedebilir. Bu durumda, reddedilen aralıkların en büyüğünün dikkate alınması uygun olacaktır [1, 6, 11].

Hewitt [12], öncelikli bir kavşak noktasında ana yola girişte sürücüler tarafından önce reddedilen ve sonra kabul edilen aralık değerlerini kullanarak sürücülerin kritik aralıklarının olasılık dağılımını tahmin eden bir yöntem geliştirmiştir. Miller [13], kritik aralık değerlerinin bulunması için aralarında maksimum olasılık yönteminin en iyi sonuç verdiği 9 adet yöntemi karşılaştırılmıştır. Miller haricinde Troutbeck [14] ve Tian v.d. [15] sürücülerin kritik aralıklarının bulunması için maksimum olasılık tekniğini kullanmıştır. Troutbeck [14] kritik aralık kabul yöntemini kullanarak Avustralya'da trafik çevreleri üzerinde ağır araçların etkisini incelemiştir. Abou-Henaidy v.d. [16] tarafından Kanada'da sürücüler tarafından aralıkların reddedilme ve kabul edilme olasılığı bulunurken logit modelden yararlanılmıştır. Radwan ve Sinha [17], logit analizini kullanarak farklı uzunluklardaki aralık kabullerinin kümülatif olasılığını modellemişlerdir. Hamad ve Easa [18], Solberg ve Oppenlander [19] ise kavşaklarda aralık değerlerinin bulunmasında probit model, Raff analizi ve Bissell yöntemini uygulamışlardır. Brilon v.d. [20], Dutta ve Ahmed [21] çalışmalarında, farklı yöntemleri karşılaştırmış ve maksimum olasılık yönteminin (MOY) gözlemlere en uygun sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. MOY ayrıca kritik aralığın bulunması için diğer araştırmacılar tarafından da [22, 23, 24] kullanılmıştır. Wu [25, 26], kritik aralık tahmini için reddedilen ve kabul edilen aralıklara dayanan olasılık dengesi yöntemini (ODY) kullanmıştır.

Vasconcelos, v.d.[27], yuvarlak ada kavşaklarda kritik takip aralığı ve takip sürelerini elde eden farklı yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada Raff, ODY ve MOY'lerine dayalı olarak elde edilen kapasiteler tutarlı bir şekilde doğruluk, Siegloch ve Logit yöntemlerine göre elde edilen kapasitelerin daha az tatmin edici başarımlar gösterdiği saptanmıştır. Ülkemizde Gedizlioğlu [1] aralık kabulü değerlerinin Lognormal ve Erlang dağılımları ile tanımlanabileceğini bulmuştur.

Sinha ve Tomiak [28] çalışmalarında ölçülen zaman aralıklarını tanımlamak için manevra türüne ve araç türüne göre değişiklik gösteren yeni bir terim olan "Section Gap" i sunmuşlardır. Madanat vd. [29] kuyruğa katılma ile kavşak durma noktasına varma arasında geçen süreyi açıklayan yeni bir parametre olarak kuyruk gecikmesini önermiştir. Çalışkanelli ve Tanyel [30] benzetim programı yardımıyla bir "T" kavşakta Dur, Yol Ver Ve Kontrolsüz denetim koşulları için ana yol araçlarının gecikmelerini hesaplayan bağıntılar önermiştir. Ozan v.d. [31] denetimsiz eşdüzey kavşakların performanslarını iyileştirecek önerilerde

bulunmuşlardır. Velan ve Van Aerde [32] kritik aralığı zamanla doğrusal olarak azalacak şekilde modellemiştir. Çalışmanın amacı bekleme süresi bazı eşik değerlere ulaştığında daha düşük öncelikli hareketi araya giriş olmadığında bile karşı akıma doğru yol almaya zorlamaktır.

Zohdy vd. [33] logit modelleri kullanarak bekleme süresinin ve yağmur yoğunluğunun sürücülerin aralık kabul etme davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Devarasetty vd. [34], çeşitli trafik ve geometrik özellikler kullanarak, lojistik regresyon yoluyla sürücülerin aralık kabulü davranışını modellemiştir. Vasconcelos vd. [35] manevraların geometrik özelliklerini ve araç-sürücü özelliklerini hesaba katan bir model önermiştir. Serag [36] sürücülerin agresif davranışlarının araya giriş ve öne giriş üzerindeki etkilerini inceleyen bir ikili logit model oluşturmuştur. Liu vd. [37] düz hareket eden sürücülerin ışıklı olmayan bir kavşakta karşıdan karşıya geçen başka bir araçla karşılaştıklarında kararlarını etkileyen ana unsurları da incelemiştir. Ayrıca, karar davranışını analiz etmek için bulanık teori yöntemi, uzman sistem, petri ağı ve yapay sinir ağı gibi çeşitli matematiksel yöntemler uygulanmıştır [38, 39, 40, 41]. Ashalatha ve Chandra [42] kritik aralık, takip süresi ve işgal süresini elde etmek amacıyla aralık kabulü için etki alanı (INOFEGA) kavramını geliştirmişlerdir. Mohon ve Chandra [43] tarafından ise karma trafik koşullarında kritik aralığın bulunması için kavşak alanındaki bir aracın işgal süresine dayalı yeni bir yöntem önerilmiştir.

Literatürden de anlaşılacağı üzere kritik aralığın belirlenmesi için farklı yöntemler önerilmektedir. Bu nedenle, kritik aralık değerlerini etkileyen parametrelerin iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Kavşak geometrisi ve trafik akım koşulları değiştiğinde yan yolda bekleyen sürücülerin ana yolda kabul edecekleri aralık değerleri de farklılık gösterebilir. Özellikle ana yol trafik akımı arttıkça yan yol sürücülerinin kabul edecekleri aralıkların kılalacağı ve bunun sonucunda ana yoldaki taşıtların da gecikmeye maruz kalacakları beklenebilir. Bu çalışmada ana yoldaki trafik akımının kritik aralık kabulü üzerindeki etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla gözlemler, İzmir’de belirlenen 4 adet ışiksiz kavşakta, sabah/zirve saat trafiğinde video kamera yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Gözlemci ekip tarafından veriler elde edilirken kavşakların geometrik durumları ve ana yol ile yan yolda yer alan sürücülerin manevra türleri dikkate alınmıştır. İlk aşama olarak Wu [25, 26] tarafından olasılık dengesi yöntemi kullanılarak kritik aralık kabul değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise farklı trafik akımı koşullarının kritik aralık kabul değerleri üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Sonraki aşamada farklı manevra türleri için kritik aralık kabul değerleri kantil regresyon yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır. Son aşamada ise sürücü tipleri ve manevra türlerinin yer aldığı genel bir bağıntı sunulmaya çalışılmıştır. Sunulan bağıntı yardımıyla gelecekte yapılacak olan çalışmalarda kritik aralık değerlerinin daha sağlıklı hesaplanması sağlanarak ışiksiz kavşakların kapasite ve performansların artırılması amaçlanmaktadır.

2. GÖZLEM YAPILAN KAVŞAKLAR

Çalışma kapsamında İzmir’de yer alan dört ışiksiz kavşakta gözlemler yapılmıştır. Kavşakların ikisi Buca, birisi Bayraklı ve birisi de Karşıyaka ilçesinde yer almaktadır (Şekil 1). Kavşakların geometrik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Gözlemler, sabah ve/veya akşam zirve saatlerinde, açık hava koşullarında video kamera ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen

video çekimleri daha sonra büro ortamında gözlem ekibi tarafından izlenerek veriler toplanmıştır.



a) Bülent Ecevit Kavşağı



b) Çevik Bir Meydanı



c) Buca Mezarlık (Google Earth, 2021)



d) Nursultan Nazarbayev (Google Earth, 2015)

Şekil 1 - Gözlem Yapılan kavşaklar

Tablo 1 - Gözlem Yapılan Kavşakların Geometri Özellikleri

Kavşak	Yaklaşım Kolu	Hareket	Eğim (%)	Şerit Genişliği (m)	Şerit sayısı	Dönüş yarıçapı (m)
Bülent Ecevit	6753/19. Sokak	Sola Dönüş	0,07	3,0	1	13
	Bülent Ecevit Caddesinden Gelip 6753/19.Sokağa Gidiş	Sola Dönüş	0,005	3,0	1	26
	6753/19. Sokak	Sağa Dönüş	0,07	3,0	1	39,11
	Bülent Ecevit Cad	Sağa Dönüş	-0,0663	3,0	2	15,2
Çevik Bir	Buca Heykel		0,005	3,0	1	
	255.Sokak	Sola Dönüş	0,005	5,0	1	10,6
	Özmen Cad		0,005	3,0	1	
Mezarlık	61.Sokak		0,035	4,0	1	
Nursultan Nazarbayev	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	-0,02	3,3	2	27
	Adliye Gelişi	Sola Dönüş	0,005	3,3	1	25

İlk aşama olarak ana yoldaki taşıtlar arasındaki takip aralığı değerleri toplanmıştır. Daha sonra yan yoldaki taşıtların kavşak girişine geldikleri anla, kavşağa girdikleri anlar kaydedilmiştir. Her iki veri grubu birlikte değerlendirilerek yan yol sürücülerinin kavşağa giriş için kabul ve reddettikleri zaman cinsinden takip aralığı değerleri tespit edilebilmiştir. Kabul edilen aralık değerlerinin istatistiksel özellikleri, verilerin tanımlanması ve modelleme aşamalarında önemli bir yere sahiptir. Kabul edilen aralıkların dağılımlarının genel olarak sağa çarpık dağılımlara uyduğu bilinmektedir [1]. Çalışma kapsamında toplanan verilerin uyduğu dağılımlar ve dağılım parametreleri Tablo 2’de yer almaktadır. Tablo 2’den de görülebileceği gibi, yan yol sürücülerini kabul ettikleri aralıklar Lognormal ve Weibull dağılımları ile tanımlanabilmektedir.

Tablo 2 - Aralık Kabul değerlerinin uyduğu istatistiksel dağılımlar

Kavşak	Yaklaşım Kolu	Hareket	Dağılım	Lokasyon Pr.	Şekil Pr.	Ölçek Pr.	Eşik Pr.
Bülent Ecevit	6753/19. Sokak	Sola Dönüş	Weibull		1,041	44,461	
	6753/19. Sokak	Sola Dönüş	Lognormal	1,801		0,827	
	Bülent Ecevit Caddesinden Gelip 6753/19.Sokağa Gidiş	Sola Dönüş	Weibull		0,903	42,000	
	6753/19. Sokak	Sağa Dönüş	Weibull		0,937	46,283	
Çevik Bir	Bülent Ecevit Cad	Sağa Dönüş	Lognormal	2,326		0,736	-1,707
	Buca Heykel		Lognormal	1,601		0,888	-0,477
	255.Sokak	Sola Dönüş	Lognormal	1,328		0,714	
Mezarlık	Özmen Cad		Weibull		1,041	11,647	
	61.Sokak		Lognormal	1,585		0,840	
	61.Sokak		Lognormal	0,543		0,800	1,331
Nursultan Nazarbayev	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	Weibull		0,901	17,043	0,008
	Adliye Gelişi	Sola Dönüş	Lognormal	2,185		1,221	
	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	Weibull		1,105	25,627	0,062
	Adliye Gelişi	Sola Dönüş	Lognormal	2,037		0,949	
	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	Weibull		0,911	79,196	0,122

Sürücülerin kabul ettikleri zaman cinsinden takip aralığı değerleri özellikle ana yoldaki trafik akımının ve yan yol talebinin düşük olması durumunda çok büyük değerler alabilmektedir. Yan yolda bekleyen bir sürücü, kuyruk baskısı olmadığı durumlarda (arkasında başka taşıtların bulunmaması durumunda); güvenlik ve sürüş konforu açısından göreceli olarak daha uzun aralıkları bekleyerek kavşağa girebilmektedir. Ancak çalışmalar, 12 saniyeden daha büyük aralıkların yan yolda bekleyen sürücüler tarafından fark edilemeyeceğini; ana yoldan kavşağa yaklaşan taşıtların, yan yoldaki sürücü tarafından görülemeyeceğini vurgulamaktadır [27]. Çalışmada yan yoldaki bir sürücü tarafından kabul edilebilecek en büyük aralık değeri 12 saniye olarak kabul edilmiş ve bu değer üzerindeki veriler analiz kapsamı dışında bırakılmıştır.

Kritik aralık kabul değerlerinin ortalama ve varyansları Wu [25] tarafından önerilmiş olan yöntem kullanılarak bulunmuştur. Yöntem, kabul edilen ve reddedilen aralıkların olasılıklarının dengesi prensibine dayanmaktadır. Yöntem, kabul edilen ve reddedilen aralıkların olasılık dağılım fonksiyonlarının arasında, kritik aralık kabul değerlerine ait bir başka olasılık dağılım fonksiyonu eğrisi olduğunu kabul etmiş ve bu fonksiyonun değerlerinin aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabileceğini belirtmiştir:

$$F_T(t) = F_K(t) / (F_K(t) + 1 - F_R(t)) \quad (5)$$

Burada $F_{T(t)}$, kritik aralık kabul değerlerine ait olasılık dağılım fonksiyonunu; $F_{K(t)}$, kabul edilen aralıklara ait olasılık dağılım fonksiyonu; $F_{R(t)}$, reddedilen aralıklara ait olasılık dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Bu yöntem de sürücülerin homojenliği ve tutarlılığına bakılmaksızın bütün reddedilen ve kabul edilen aralık değerleri dikkate alınarak kritik aralık kabul değerine ait ampirik bir olasılık dağılım fonksiyonu hesaplanmaktadır. Wu [25], kritik aralık kabul değerlerinin bulunması için de bir Excel tablosu önermiştir. Çalışma kapsamında kullanılan Excel Tablosunun bir örneği Şekil 2’de görülmektedir. Tablonun 10. ve 11. kolonlarının toplamları sırasıyla kritik aralık kabul değerlerinin ortalamasını ve varyansını vermektedir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3’te sunulmuştur. Ayrıca her manevra türünü engelleyen manevralar ve bu manevralara ait hacim değerleri verilmiştir.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Aralık No	Aralık (s)	Kabul veya red	n_{red}	n_{kabul}	F_{red}	F_{kabul}	Tahmin edilen KAK değerlerinin ODF	Tahmin edilen KAK değerlerinin OYF	t_{kabul} (s)	OYF* Aralık	σ^2
290	7.169	r	279	11	0.808696	0.478261	0.714286	0.003079	7.169000	0.022072	0.158234
291	7.169	r	280	11	0.811594	0.478261	0.717391	0.003106	7.169000	0.022264	0.159610
292	7.177	r	281	11	0.814493	0.478261	0.720524	0.003133	7.173000	0.022471	0.161184
293	7.179	r	282	11	0.817391	0.478261	0.723684	0.003160	7.178000	0.022684	0.162825
294	7.279	k	282	12	0.817391	0.521739	0.740741	0.017057	7.229000	0.123302	0.891348
295	7.289	r	283	12	0.820290	0.521739	0.743802	0.003061	7.284000	0.022296	0.162402
296	7.359	r	284	12	0.823188	0.521739	0.746888	0.003086	7.324000	0.022604	0.165553
297	7.359	r	285	12	0.826087	0.521739	0.750000	0.003112	7.359000	0.022901	0.168532
298	7.608	r	286	12	0.828986	0.521739	0.753138	0.003138	7.483500	0.023484	0.175741
299	7.608	k	286	13	0.828986	0.565217	0.767717	0.014578	7.608000	0.110913	0.843826
300	7.618	k	286	14	0.828986	0.608696	0.780669	0.012953	7.613000	0.098608	0.750704
301	7.729	r	287	14	0.831884	0.608696	0.783582	0.002913	7.673500	0.022352	0.171522
302	7.729	r	288	14	0.834783	0.608696	0.786517	0.002935	7.729000	0.022683	0.175315
303	7.776	r	289	14	0.837681	0.608696	0.789474	0.002957	7.752500	0.022923	0.177709
304	7.776	r	290	14	0.840580	0.608696	0.792453	0.002979	7.776000	0.023166	0.180138
305	7.781	r	291	14	0.843478	0.608696	0.795455	0.003002	7.778500	0.023349	0.181619
306	7.998	r	292	14	0.846377	0.608696	0.798479	0.003025	7.889500	0.023862	0.188260
307	8.045	r	293	14	0.849275	0.608696	0.801527	0.003048	8.021500	0.024447	0.196098
308	8.055	r	294	14	0.852174	0.608696	0.804598	0.003071	8.050000	0.024721	0.199007
309	8.16	r	295	14	0.855072	0.608696	0.807692	0.003095	8.107500	0.025090	0.203413
310	8.408	r	296	14	0.857971	0.608696	0.810811	0.003119	8.284000	0.025834	0.214006
311	8.457	r	297	14	0.860870	0.608696	0.813953	0.003143	8.432500	0.026501	0.223467
312	8.457	r	298	14	0.863768	0.608696	0.817121	0.003167	8.457000	0.026784	0.226516
313	8.457	r	299	14	0.866667	0.608696	0.820313	0.003192	8.457000	0.026994	0.228286
314	8.457	k	299	15	0.866667	0.652174	0.830258	0.009946	8.457000	0.084112	0.711332
315	8.528	r	300	15	0.869565	0.652174	0.833333	0.003075	8.492500	0.026115	0.221779

Şekil 2 - Örnek Excel çalışma tablosu

Ortalama ve varyans değerlerinin birkaç gözlem noktası haricinde, trafik güvenliği açısından risk yaratabilecek oranda düşük olduğu görülmektedir. Bu değerler, ana yolda nispeten yüksek trafik akımı gözlenmesi durumunda, çok kısa aralıkların bile sürücüler tarafından kabul edilebileceğini göstermektedir ki, sınırlı öncelik ve/veya aralık zorlama koşullarının ortaya çıkmasının ana nedeni de budur. Özellikle yüksek ana yol hacimleri altında yan yoldaki sürücüler uzun süre beklemelere maruz kalabilmekte ve ana yoldaki taşıtları yavaşlamaya veya durmaya mecbur ederek kavşağa giriş yapabilmektedirler. Bu da, aslında kritik aralık değerinin, ana yol hacmi arttıkça düşebileceğini göstermektedir.

Tablo 3 - Farklı Manevralara ait engelleyici akım tanımları, engelleyici akım hacimleri ve yan yol sürtücilleri tarafından kabul edilen aralıkların ortalama ve varyans değerleri

Kavşak	Yaklaşım Kolu	Hareket	Engelleyici Akım	Hareket	Ort.T (saniye)	T Varyans	Engelleyici Akım (taşıt/saat)
	6753/19. Sokak	Sola Dönüş	Bülent Ecevit Cad	Doğru Geçiş	6,54	49,48	113
	6753/19. Sokak	Sola Dönüş	Bülent Ecevit Caddesinden Gelip 6753/19.Sokağa Gidiş	Sola Dönüş	6,13	44,91	468
Bülent Ecevit	Bülent Ecevit Caddesinden Gelip 6753/19.Sokağa Gidiş	Sola Dönüş	Bülent Ecevit Cad	Doğru Geçiş	2,17	7,05	295
	6753/19. Sokak	Sağa Dönüş	Bülent Ecevit Cad	Doğru Geçiş	5,53	34,28	152
	Bülent Ecevit Cad	Sağa Dönüş	Bülent Ecevit Caddesinden Gelip 6753/19.Sokağa Gidiş	Sola Dönüş	6,09	44,72	405
Çevik Bir	Buca Heykel	Tınaztepe			4,41	25,48	575
	255.Sokak	Sola Dönüş	Özmen Cad		4,49	24,65	780
	Özmen Cad		255. Sokak	Sola Dönüş	3,60	14,44	483
Mezarlık	61.Sokak		Dokuzçşmeler Gelişi	Doğru Geçiş	4,94	26,38	495
	61.Sokak		Tınaztepe Yaklaşımı		4,68	28,29	793
Nursultan Nazarbayev	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	Bayraklı Gelişi	Doğru Geçiş	4,16	23,17	338
	Adliye Gelişi	Sola Dönüş	Bayraklı Gelişi	Doğru Geçiş	5,21	34,75	248
	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	Adliye Gelişi	Sola Dönüş	4,71	28,94	231
	Adliye Gelişi	Sola Dönüş	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	6,26	46,84	396
	Adatepe Gelişi	Sola Dönüş	Adliyeden Gelip Bayraklıya Gidiş	Doğru Geçiş	2,92	14,47	139

3. ARALIK KABULÜ DEĞERİNİN ENGELLEYİCİ AKIM VE KAVŞAK GEOMETRİSİNE BAĞLI DEĞİŞİMİ

Yukarıda açıklanan bulgular, aslında literatürde yer alan, ana yoldaki trafik hacmi arttıkça yan yolda bekleyen sürücülerin daha kısa aralıklar kabul etme eğiliminde oldukları yönündeki genel yaklaşımlarla örtüşmektedir. Ana yoldaki trafik akımının çok düşük olması durumunda yan yoldaki sürücüler, kendileri için daha güvenli olduğunu düşündükleri çok daha uzun bir aralığı tercih edebilmektedirler. Diğer yandan ana yol hacmi arttıkça, yan yoldaki sürücüler kavşağa giriş yapabilmek uzun süre beklemek zorunda kalacaklar ve bunun sonucunda reddettiklerinden daha kısa bir takip aralığını bile kabul ederek kavşağa giriş yapabileceklerdir. Trafik akımına bağlı olarak sürücülerin kabul ettikleri aralıkların modellenmesi için daha fazla sayıda veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, veri sayısının artırılması için farklı bir yaklaşım tercih edilmiştir. Bu amaçla ilk önce KYTE v.d. [44] tarafından önerilmiş ve daha sonra Chandra v.d. [45] ile Tanyel v.d. [46]'nin çalışmalarında da kullanılmış olan aşağıdaki yöntem tercih edilmiştir.

Yan yoldaki bir sürücünün kavşak DUR veya YOL VER çizgisine geldiği an t_0 , kavşağa girdikleri an ise t_d olarak adlandırılırsa sürücünün maruz kalacağı gecikme:

$$D = t_d - t_0 \quad (6)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Sürücünün beklediği süre boyunca yoldan geçen taşıt sayısı " N ", N 'inci taşıtın yoldan geçtiği an ise t_N ile tanımlanırsa sürücünün yan yolda beklediği süre boyunca karşılaştığı engelleyici akım değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Engelleyici akım} = N / (t_N - t_0) \quad (7)$$

Sürücünün kavşağa girmek için kabul ettiği zaman cinsinden aralık değeri de kaydedilerek tüm sürücüler ve farklı trafik akım koşulları için kabul edilen aralık değerleri elde edilebilir. Böylece, veri sayısı büyük oranda arttırılmış olur.

Çalışma kapsamında, veriler:

1. Kavşaktan doğru geçen taşıtlar;
2. Kavşaktan sağa dönen taşıtlar;
3. Kavşaktan sola dönen taşıtlar;
4. Ana yoldan sola dönen taşıtlar

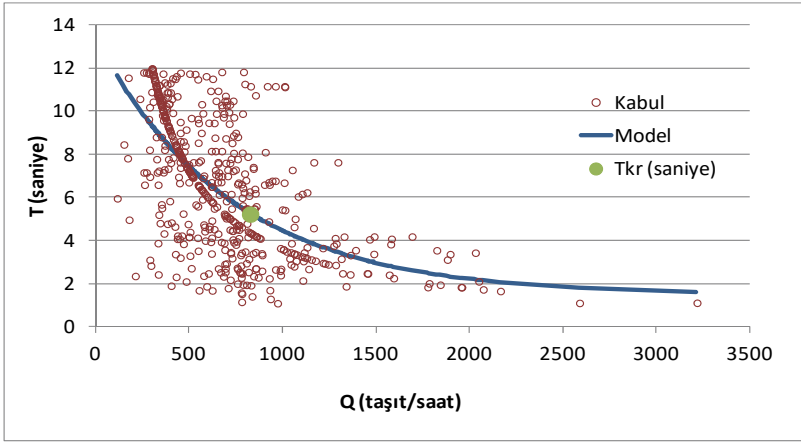
olarak 4 (dört) grupta toplanmıştır. Analizlerde, 12 saniyeden daha büyük olan değerler dikkate alınmamıştır. Çalışmada engelleyici akım ile sürücülerin kabul ettikleri aralık arasında eğrisel bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Bu ilişkinin, Horton' un sızma denklemi ile tanımlanabileceği kabul edilmiştir. Horton [47]'un sızma bağıntısı formülü aşağıda verilmiştir:

$$y = y_{alt} + (y_{üst} - y_{alt})e^{-Kx} \quad (8)$$

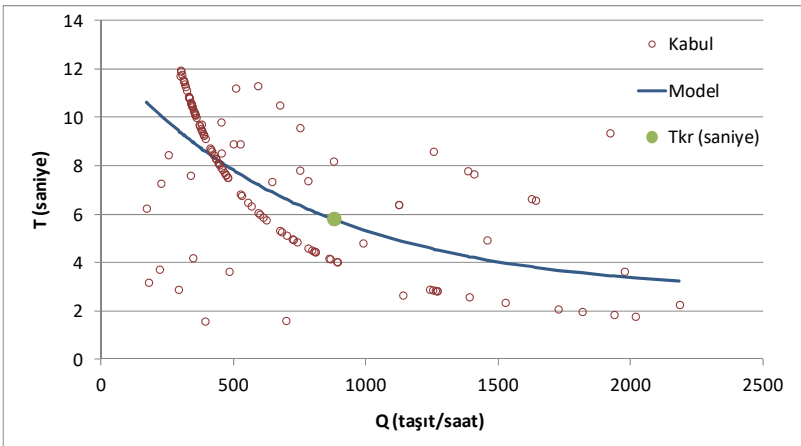
Burada “y”, tahmin edilmek istenen değişkeni, y_{alt} , değişkenin alt limit değerini; $y_{üst}$, değişkenin üst limit değerini, K bir katsayıyı ve “x” bağımsız değişkeni ifade etmektedir. Kritik aralık kabul değerleri için bağıntı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$T_k = T_{kalt} + (T_{küst} - T_{kalt})e^{-Kqc} \quad (9)$$

Bağıntıda T_{kalt} , kritik aralık kabul değerlerinin alt sınırını (saniye); $T_{küst}$, kritik aralık kabul değerlerinin üst sınırını (saniye), T_k , kritik aralık kabul değerini (saniye); ve qc engelleyici akım değerini (taşıt/saniye) ifade etmektedir. Farklı manevra türleri için denklem parametreleri, R programında [48] oluşturulan bir model yardımıyla bulunmuştur. R programı istatistiksel hesaplama için kullanılan bir program dilidir. R programında oluşturulan modelde En Küçük Kareler yönteminden yararlanılmıştır. En Küçük Kareler Yöntemi hataların karelerinin toplamını en aza indiren bir yöntemdir ve analizlerde en sık kullanılan yöntemlerden biridir.

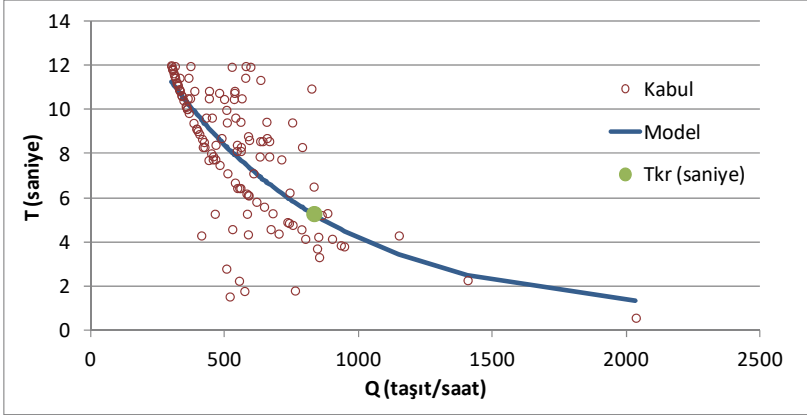


Şekil 3 - Sola dönen taşıtlara ait aralık kabul değerleri

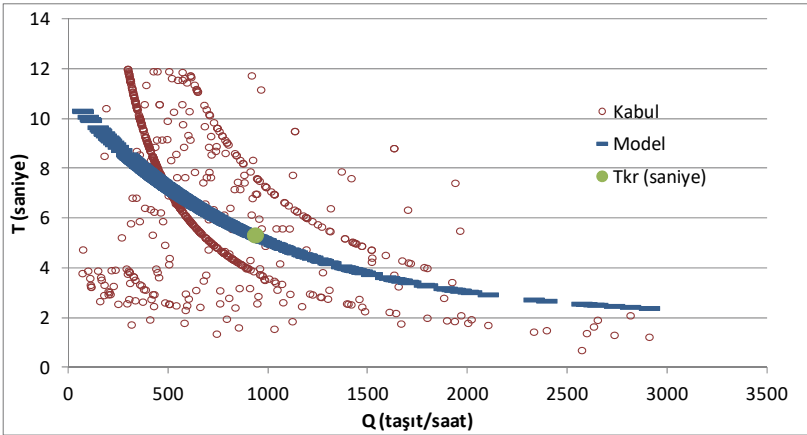


Şekil 4 - Ana yoldan sola dönen taşıtlara ait aralık kabul değerleri

Analizler; sola dönen 352 taşıt , sağa dönen 127 taşıt, ana yoldan sola dönen 268 taşıt ve doğru geçen 581 taşıt yani toplam 1328 veri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen katsayı değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 3~6'da manevra türlerine ait veriler ve ölçümlenmiş Horton değerleri görülmektedir. Şekil 7'de ise, tüm manevralar için elde edilen fonksiyonların karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 5 - Sağa dönen taşıtlara ait aralık kabul değerleri



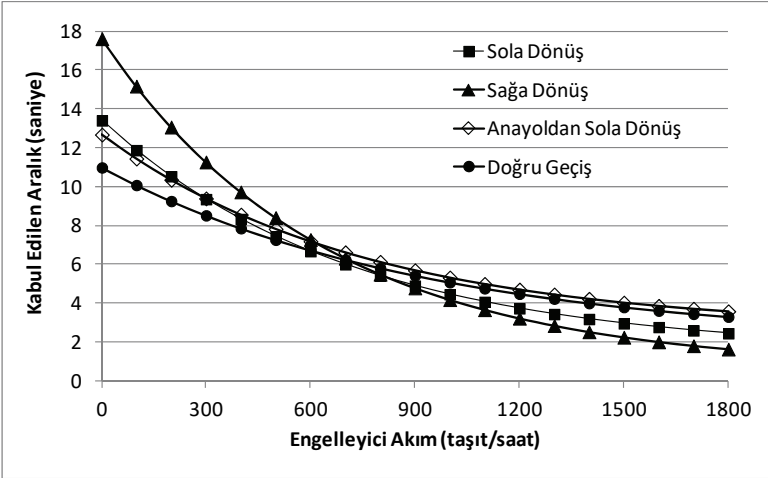
Şekil 6 - Kavşaktan doğru geçen taşıtlara ait aralık kabul değerleri

Tablo 4 - Farklı manevra türlerine ait Horton Fonksiyonu katsayıları

Manevra	Talt (saniye)	Tüst (saniye)	K	Tkr (saniye)
Sola Dönüş	1,47	13,42	4,99	5,23
Ana yoldan Sola Dönüş	2,67	12,69	4,79	5,82
Sağa Dönüş	0,62	17,63	5,63	5,29
Doğru Geçiş	2,00	10,99	3,86	5,33

Şekiller incelendiğinde, engelleyici akım ile sürücülerin kabul ettikleri aralık arasında eğrisel bir ilişki olduğu net olarak görülmektedir. Şekillerde farklı manevra türleri ele alınsa dahi sürücülerin toplamda %47 sinin engelleyici akım karşısında aynı aralık kabul değerlerini kabul ettiği söylenebilir. %47 dışında kalan sürücülerin manevra türlerine göre kabul ettiği aralık değerleri değişkenlik göstermektedir. Özellikle kavşaktan doğru geçen sürücülerin engelleyici akım karşısında kabul ettikleri değerleri farklılık göstermektedir. Çalışmanın ileriki bölümlerinden bu durum ayrıntılı incelenmiştir. Engelleyici akımın ana yolda trafik hacminin düşük olduğu durumlarda yan yol sürücülerinin kabul ettikleri aralık sürelerinin arttığı anlaşılmaktadır. Diğer yandan, ana yoldaki trafik hacmi arttıkça, çok küçük aralıkların bile sürücüler tarafından kabul edilebildikleri sonucuna varılabilmektedir. Bu sonuçlar, ana yolda düşük trafik akımı olması durumunda yan yol sürücülerinin daha uzun ve dolayısıyla daha güvenli aralıkları tercih ettiklerini göstermektedir. Ancak ana yoldaki trafik akımı arttıkça yan yol sürücülerinin sabırsızlandıkları ve yan yoldaki bekleme süreleri arttıkça daha kısa aralıkları kabul ettikleri söylenebilir.

Şekiller ve Tablo 4 incelendiğinde kritik aralık kabul değerinin (Tkr) manevra türlerine göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Elde edilen kritik aralık kabul değerleri literatürdeki verilerle uyum sağlasa dahi gözlem verilerinin sayıları manevra türlerine göre değişkenlik gösterdiği için Horton fonksiyonu yardımıyla kurulan modelden tespit edilen kritik aralık (Tkr) değerlerinin manevra türlerine göre değişimi hakkında kesin bir yargıya varılamamaktadır. Özellikle Şekil 6 incelendiğinde aynı engelleyici akım altında kavşaktan doğru geçiş yapan bir yanyol sürücüsünün kabul ettiği aralık değerlerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, Horton fonksiyonu yardımıyla kurulan modelin özellikle kavşaktan doğru geçen taşıtlara ait verilerin açıklanmasında yeterli gelmeyeceği tespit edilmiştir. Şekil 7’de farklı manevra türleri için modelden elde edilen engelleyici akıma bağlı kabul edilen aralık değerlerine ait grafik yer almaktadır. Şekil 7 incelendiğinde sürücüler farklı manevra türleri gerçekleştirse dahi yaklaşık olarak aynı davranışı benimsediği gözükmektedir. Aşağıda yan yoldaki sürücülerin kabul ettikleri aralık değerlerinin hangi parametrelerden etkilenebileceği ile ilgili daha detaylı bir analiz yer almaktadır.



Şekil 7 - Farklı Manevralar için modelden elde edilmiş engelleyici akıma bağlı kabul edilen aralık değerleri

Ana yoldaki engelleyici akım değerinin, yan yol sürücülerinin kabul aralıklarını etkilediği aslında beklenen bir sonuç olarak kabul edilebilir. Ancak aralık kabul değerleri, manevra türü (*MNV*) ve/veya engelleyici akım kadar (Q_{eng}), engelleyici manevra (*Op.MNV*) (örneğin ana yoldan sola dönen taşıtlar için, karşı yönden doğru geçiş yapan taşıtlar, yan yoldan sola dönen taşıtlar v.b.), ana yol şerit sayısı (*N*); şerit genişliği ($\$G$); yolun eğimi (*G*); dönüş yapan taşıtların takip ettikleri yörüngenin eğrilik yarıçapı (*I/R*) gibi parametrelerin de etkili olabileceği öngörülmüştür. Bu amaçla ilk adım olarak bağımsız değişkenler arasında çoklu bağlantılık (Multicollinearity) olup olmadığı araştırılmıştır. Tablo 5'te bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon (ilişki; ilgileşim) değerleri görülmektedir. Tablodan da görülebileceği gibi manevra (*MNV*) türü ile eğrilik yarıçapının (*I/R*); şerit sayısı (*N*) ile eğim (*G*) ve eğrilik yarıçapı (*I/R*) ile şerit genişliği ($\$G$) değerlerinin aynı bağıntı içerisinde yer almalarının uygun olmayacağı anlaşılmaktadır. Model araştırması yapılırken bu olumsuzluklar göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 5 - Bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon (ilişki; ilgileşim) değerleri

	Engelleyici		Eğim	Şerit Genişliği	Şerit Sayısı
	Manevra	Manevra			
Engelleyici Manevra	-0,282				
	0,000				
Eğim	-0,017	-0,025			
	0,000	0,360			
Şerit Genişliği	0,374	-0,428	0,001		
	0,000	0,000	0,000		
Şerit Sayısı	0,472	0,124	-0,696	-0,132	
	0,000	0,000	0,000	0,000	
1/R	0,665	-0,147	0,047	0,702	0,177
	0,000	0,000	0,084	0,000	0,000

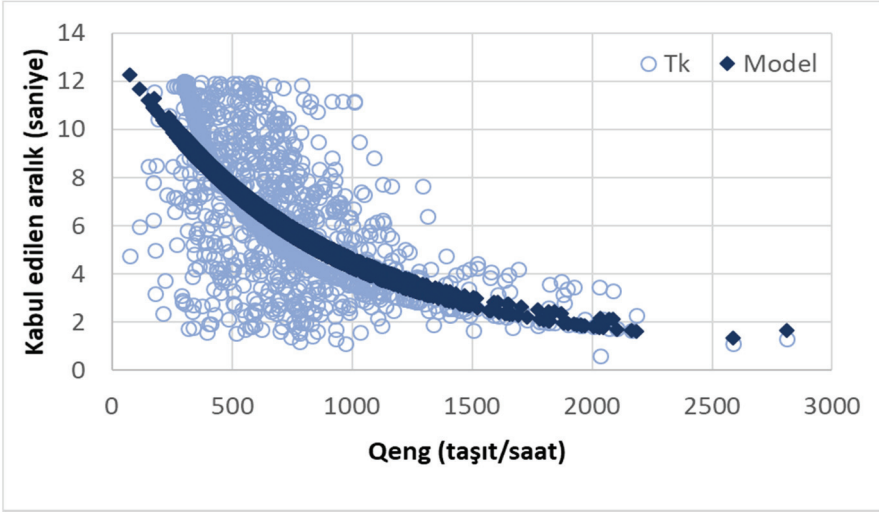
Modelde manevra ve engelleyici manevra değişkenleri, kukla değişken olarak analizlere katılmışlardır. Kavşaktan düz geçiş yapan taşıtlar için "0"; sağa dönenler için "1"; sola dönenler için "2" ve ana yoldan sola dönenler için "3" değerleri modelde kullanılmıştır. Analizler yine R programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Engelleyici akım ile yan yol sürücülerinin kabul ettikleri aralıklar arasında üstel bir ilişki olduğu bilinmektedir. Diğer bağımsız değişkenler ise doğrusal olarak modele katılmışlardır. Yapılan analizler sonucunda en iyi sonuç aşağıdaki bağıntı ile elde edilmiştir.

$$T = 0,935 + 0,199p.MNV + 0,109N + 12,534e^{(-0,001Q_{eng})} \quad R^2 = 0,468 \quad (10)$$

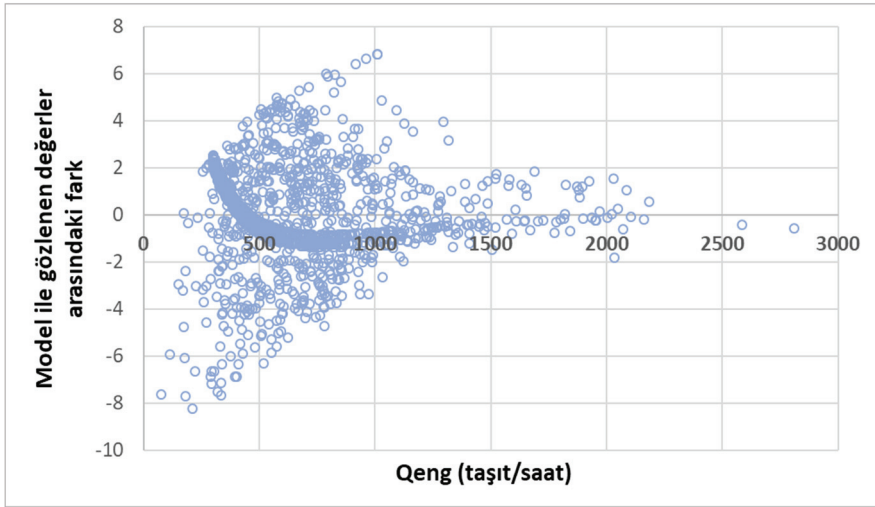
Bağıntıdan da görülebileceği üzere, yan yoldan kavşağa giriş yapan sürücülerin kabul ettikleri aralıklar, engelleyici akım; uygun aralık bulmaya çalıştıkları engelleyici manevra türü ve ana yol şerit sayısına bağlı olarak değişebilmektedir. Şekil 8'de gözlemlenen ve modelden elde edilen aralık kabul değerleri, engelleyici akıma bağlı olarak gösterilmektedir.

4. ARALIK KABULÜ DEĞERİNİN KANTİL REGRESYON İLE MODELLENMESİ

Yapılan analizlerden de görülebileceği gibi, yan yolda bekleyen bir sürücünün ana yolda kabul edeceği aralık değeri, büyük oranda ana yoldaki trafik akımına (engelleyici akıma), engelleyen akımın niteliğine (manevra türüne) ve belirli bir oranda da ana yoldaki şerit sayısına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Ancak Şekil 8’den de görülebileceği gibi, elde edilen bağıntılar, kapasite ve kavşak başarımı analizi için kullanılabilir değerler vermekteyse de, gözlem verilerinin önemli bir kısmını açıklamada yetersiz kalmaktadır.



Şekil 8 - Gözlemlenen ve modelden elde edilen aralık kabul değerlerinin engelleyici akıma bağlı olarak değişimleri



Şekil 9 - Gözlem değerleri ile modelden elde edilen değerler arasındaki farkların, engelleyici akıma bağlı değişimleri

Şekil 9’da, gözlem değerleri ile modelden elde edilen değerler arasındaki farkların, engelleyici akıma bağlı değişimleri görülmektedir. Şekilden de açıkça anlaşılacağı gibi, model ile gözlemler arasındaki farklar, engelleyici akımın 1000 taşıt/saat’ ten daha düşük olduğu koşullarda daha fazladır. Ancak engelleyici akım 1000 taşıt/saat’ i aştıkça, model ile gözlemlenen değerlerin birbirlerine oldukça yaklaştıkları söylenebilir. Bu durum aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

- Düşük engelleyici akımlarda, yan yol sürücülere tarafından kabul edilen aralıklar, sürücü davranışlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Saldırgan olarak tanımlanabilecek olan bir sürücü, daha uzun ve güvenli bir aralık yerine çok daha kısa bir aralığı tercih ederek kavşağa girerken; yavaş olarak tanımlanabilecek bir sürücü, çok daha uzun bir aralığı bekleyebilmektedir.
- Ancak engelleyici akım arttıkça, bekleme süresinin de uzamasıyla birlikte tüm sürücüler kısa aralıklarda kavşağa girmeye çalışmaktadırlar. Diğer bir değişle sürücü davranışları homojen hale gelmektedir.

Çalışma kapsamında gözlem verileri ve model arasındaki farklılıkların Kantil Regresyon yardımıyla daha iyi açıklanacağı tespit edilmiştir.

Kantil regresyon Koenker ve Bassett (1978) [49] tarafından geliştirilen, serilerin normal dağılmadığı durumlarda kullanılan bir regresyon modelidir. Kantil regresyon en küçük kareler ve medyan regresyonuna alternatif olarak kullanılan yöntemlerden biridir. En küçük kareler yöntemi hataların karelerinin minimize edilmesine dayalı bir yöntemken kantil regresyon hataların mutlak değerlerinin minimize edilmesine dayalı bir yöntemdir. Kantil regresyon medyan regresyonun aksine bağımlı değişkenin sadece medyan kantilini açıklamakta kalmayıp aynı zamanda bağımlı değişkene ait farklı kantil değerlerini de tahmin etmektedir. Kantil regresyon aşırı değerlere karşı kararlı bir yöntemdir. .

Kantil regresyon birden fazla bağımsız değişken olduğunda da kullanılmaktadır. Kantil regresyonun çoklu doğrusal regresyonundan farkı; değişkenlerin normal dağılması şartının olmamasıdır. Kantil regresyonda değişkenlerin normal dağılım göstermesi durumunda çoklu doğrusal regresyon analizleri ile aynı sonucu vermekte olup değişkenlerin normal dağılmadığı durumlarda daha anlamlı sonuçlar vermektedir.

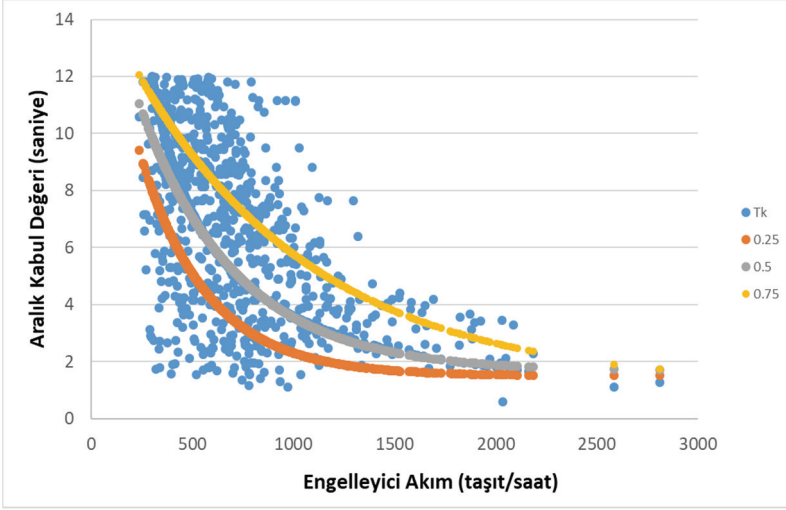
Yukarıda da bahsedildiği üzere kantil regresyon aykırı değerlere bağlı kalmadan regresyon modelini oluşturmaktadır. Bu çalışmada değişkenlerin aykırı değer içerip içermediğine dair istatistikte yaygın olarak kullanılan Shapiro-Wilk testi kullanılmıştır. Shapiro-Wilk testinin sıfır hipotezi dağılımın normal dağılım olmasıdır. Eğer p-value değeri, 0,05 anlamlılık düzeyinin altına düşerse, o dağılımın uygun olmadığı söylenebilir. Yapılan çalışmada p değeri 0.05’in altına düştüğü için hipotez reddedilmiştir yani kullanılan değişkenlerin aykırı değer içerdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle analizlerde kantil regresyon kullanılması uygun görülmüştür.

Kantil regresyon bağımsız değişkenlerin farklı kantil değerlerinde bağımlı değişken üzerindeki etkisini incelemektedir. Kantil regresyon değerleri 0 ile 1 arasında değişkenlik gösteren değerlerdir. Örnek olarak, kantil değerinin 0.25 olması demek dağılımının yüzde %25 ini açıklayan değerlerin kantil regresyon tarafından tahmin edileceği anlamına gelmektedir [50].

Çalışma kapsamında kullanılan kantil regresyon modeli aşağıda yer almaktadır. Yukarıda da değinildiği üzere, engelleyici akım ile kabul değerleri arasındaki eksponansiyel ilişki vardır.

Regresyon modeli kurulurken engelleyici akım ve kabul değerleri arasındaki eksponansiyel ilişki ve değişkenler arasındaki korelasyon göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda yer alan regresyon modeli yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir.

$$T = Sabit + \beta_1 MNV + \beta_2 Op.MNV + \beta_3 N + \beta_4 \text{ŞG} + \beta_5 e^{-\beta_6 Q_{eng}} \quad (11)$$



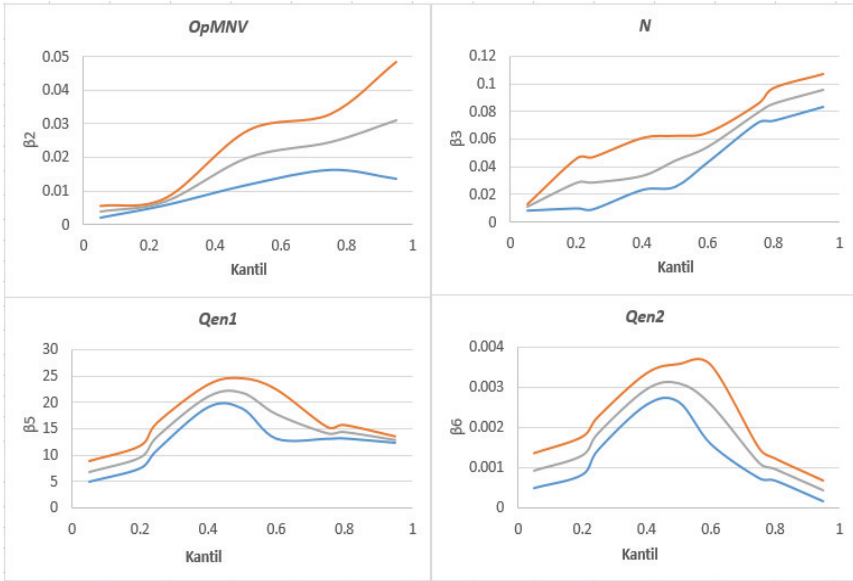
Şekil 10 - Aralık kabul değerleri ve engelleyici akımın kantillere bağlı değişimi

Kantil regresyon analizleri ilk aşamada; literatürde sık olarak kullanılan 0.25, 0.50, 0.75 kantil değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 10’da 0.25, 0.50, 0.75 kantil değerleri yardımıyla kabul değerleri ve engelleyici akım arasındaki ilişki görülmektedir. Engelleyici akım ve yan yol sürücüler tarafından kabul edilen aralık değerleri arasındaki ilişkinin kantiller arasında farklılıklar gösterdiği açıkça görülmektedir. 0.25 kantil de, düşük engelleyici akım altında yan yol sürücülerinin daha uzun ve güvenli aralıklar yerine daha kısa aralıklarla kavşağa girdiği görülmektedir. 0.75 kantilde ise düşük engelleyici akım altında yan yol sürücülerinin kendilerini güvende hissettikleri daha uzun aralıkları tercih ettiği görülmektedir. 0.50 kantil değerinde gözlem verileri ve model verilerinin birebir uyumlu olduğu ortalama değerler görülmektedir. Kantil değerleri arasındaki farklılıklar sürücü davranışlarına benzetilebilir. 0.25 kantili saldırgan sürücüyü, 0.50 kantilin normal sürücüyü ve 0.75 kantilin yavaş sürücüyü temsil ettiği modelden de açıkça görülmektedir.

Aşağıda yer tabloda 0.25(saldırgan sürücü),0.50(normal sürücü) ve 0.75(yavaş sürücü) kantillerin parametrelerine ait katsayıları ve anlamlılık düzeylerine ait bilgiler bulunmaktadır. Manevra ve Şerit Genişliğine ait sırasıyla β_1 ve β_4 katsayı tahminleri istatistiksel olarak anlamsız olduğu için modellerde yer almamıştır. Engelleyici akım (Q_{eng}), ($Op.MNV$) ve ana yol şerit sayısı (N) istatistiksel olarak anlamlı bulunduğu için modellerde yer almıştır. Aşağıda yer alan tabloda 0.25, 0.50 ve 0.75 kantil değerlerine ait veriler yer almaktadır.

Tablo 6 - Farklı kantil değerlerinde bağımsız değişkenlere ait veriler

Kantil	Açıklayıcı Değişkenler	Kat Sayı	Standart Hata	t istatistiği	p değeri
0.25	Sabit	1.450	0.220	6.590	0.000
	OpMnv	0.007	0.001	1.625	0.000
	N	0.028	0.010	2.929	0.003
	Qen ₁	13.587	1.324	10.264	0.000
	Qen ₂	0.002	0.000	9.011	0.000
0.50	Sabit	2.670	0.222	12.025	0.000
	OpMnv	0.020	0.004	1.682	0.005
	N	0.044	0.009	3.631	0.000
	Qen ₁	21.858	1.435	15.231	0.000
	Qen ₂	0.003	0.000	12.891	0.000
0.75	Sabit	1.122	0.468	2.790	0.004
	OpMnv	0.025	0.004	2.478	0.001
	N	0.079	0.003	3.456	0.000
	Qen ₁	14.212	0.574	24.762	0.000
	Qen ₂	0.001	0.000	5.797	0.000

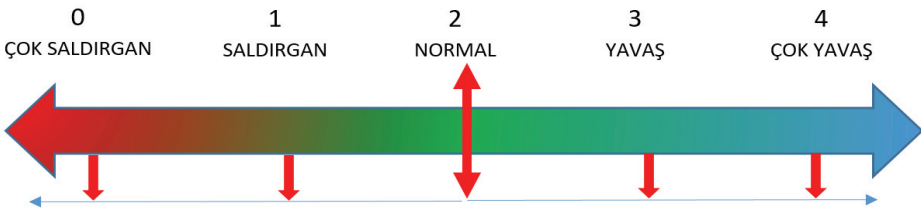


Şekil 11 - Farklı kantil değerlerinde parametre katsayılarının değişimi

Yukarıda yer alan şekillerde kullanılan parametrelere ait katsayıların sadece çeyreklik kantillerin üzerinde değil, diğer kantil değerleri üzerindeki değişimi görülmektedir. Şekil 11’de kantil değerleri yatay eksende gösterilerken, parametrelere ait katsayılardaki değişim aralıkları düşey eksende gösterilmektedir. Turuncu ve mavi çizgi katsayıların sırasıyla %95 ve %5 güven aralığını, gri çizgi ise katsayıları göstermektedir. Şekiller incelendiğinde; Engelleyici manevranın sürücülerin Kabul değerleri üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu ve engelleyici manevranın etkisinin arttıkça sürücülerin kabul ettiği aralık değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Saldırgan sürücüler(0.25) daha kısa aralıkları tercih ettiği için engelleyici manevranın etkisi bu tip sürücülerde daha az hissedilirken yavaş sürücülerin engelleyici manevraya bağlı olarak bekleme sürelerinin arttığı anlaşılmıştır. Engelleyici akımın etkisi ise farklı kantilerde farklı şekilde hissedilmektedir. Şekiller yorumlanırken engelleyici akım ile kabul değerleri arasında eksponansiyel bir ilişkinin olduğu unutulmaması gerekmektedir. Buna göre; kantil değerleri arttıkça engelleyici akımında etkisinin arttığı söylenebilir . Ancak unutulmaması gereken nokta şudur ki engelleyici akım arttıkça sürücülerin kabul edecekleri bekleme süreleri düşmektedir. Ayrıca düşük engelleyici akımlarda, yan yol sürücüler tarafından kabul edilen aralıklar, sürücü davranışlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Şerit sayısının kantil değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, düşük kantil değerlerinden yüksek kantil değerlerine doğru gidildikçe şerit sayısı arttıkça sürücülerin kabul edecekleri aralık değerleri de artmaktadır.

Çalışma kapsamında anlaşılacağı üzere kantil değerlerinin sürücü davranışlarını nitelediği tespit edilmiştir. Her bir kantil değeri aynı bağımsız değişkenler yardımıyla modellenirse bile, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etki düzeyleri her bir kantil değerinde farklıdır. Bu nedenle, çalışma kapsamında elde edilen bağıntıların gelecekte ışsız kavşaklar ile ilgili yapılacak olan çalışmalara altlık sağlaması amacıyla sürücü davranış tiplerinin de dikkate alındığı genel bir modelle sunulmaya çalışılmıştır.

Akçelik [48], SIDRA TRIP programında 5 (beş) farklı sürücü tipi tanımlamıştır: çok saldırgan, saldırgan, normal, yavaş ve çok yavaş. Bu çalışmada da, benzer bir yaklaşımın sürücü davranışlarının aralık kabul değerinin tahmininde etkili olabileceği düşünülmüştür. Çalışmada sürücülerin saldırganlık düzeylerini belirleyici bir anket çalışması yapılmamıştır. Bu sebeple genel bir yaklaşımla farklı sürücü davranışlarını tanımlayabilecek aralıklar belirlenmeye çalışılmıştır.



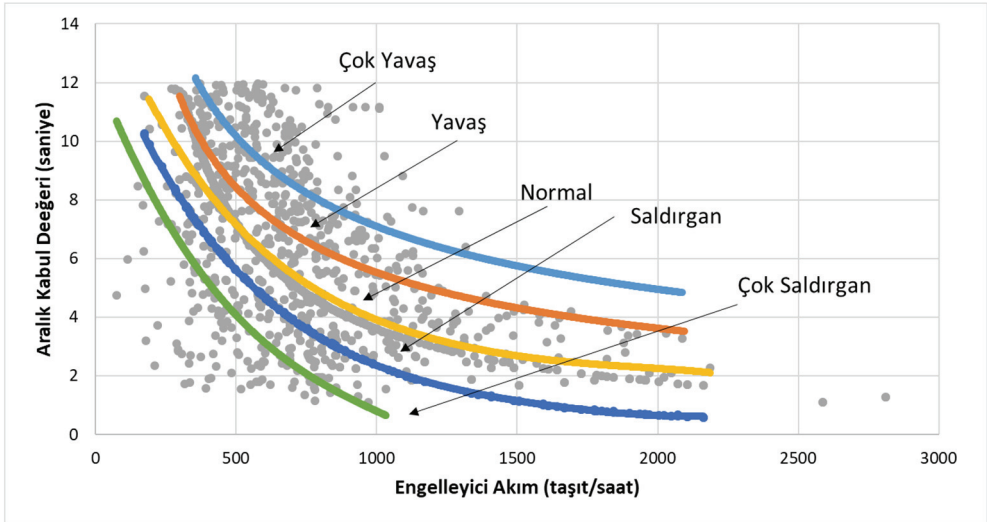
Şekil 12 - Farklı sürücü davranışlarını tanımlamak için kullanılan aralık değerleri.

Sürücü tiplerinin de dahil edildiği model oluşturulurken, sadece çeyreklik kantillere bağlı kalınmamıştır aynı zamanda farklı kantillere göre kurgulanan modellerde değerlendirilmiştir. SİDRA programında yer alan 5 farklı sürücü tipi referans alındığı için sürücü tipleri oluşturulurken gözlem verilerini en iyi kurgulayan 5 adet kantil değeri dikkate alınmıştır. Sürücü tiplerini niteleyen aralık değerlerinin seçiminde ise , gözlem verileri ve seçilen modeller arasındaki kalıntıların minimum olduğu diğer bir değişle gözlem verilerinin en iyi açıklandığı aralık değerleri dikkate alınmış olup sürücü tipleri kukla değişkenler yardımıyla bağımsız değişken olarak modele dahil edilmiştir. Sürücü tiplerini tanımlayan kukla değişkenlere ait şekil yukarıda yer almaktadır.

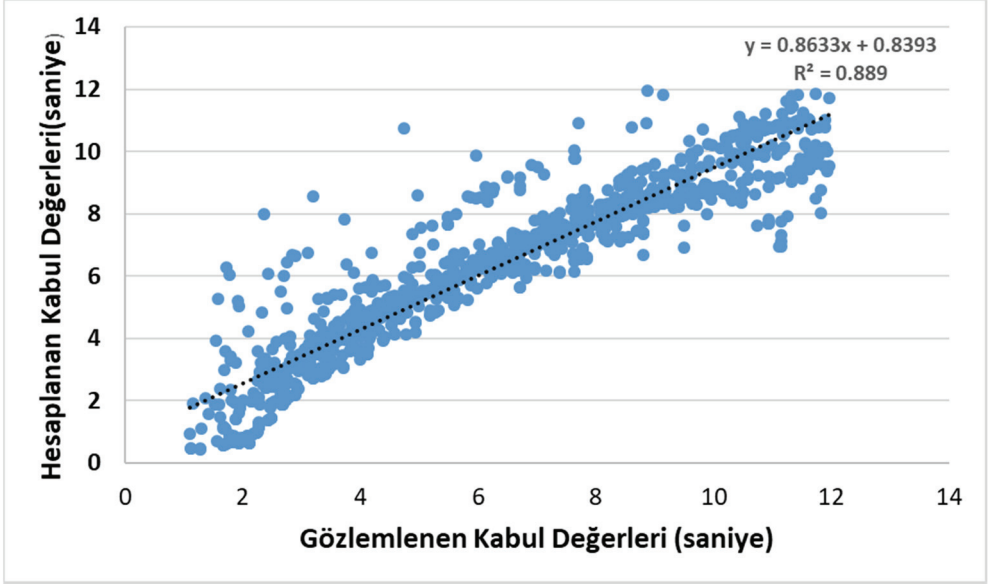
Kurgulanan regresyon modelinde bağımsız değişkenler olarak engelleyici akım (Q_{eng}), manevra (MNV), engelleyici manevra ($Op.MNV$), ana yol şerit sayısı (N), şerit genişliği (SG) ve sürücü tipi (ST) değerlendirmeye alınmıştır. Regresyon analizi daha öncede değinildiği gibi R programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en iyi sonuç aşağıdaki bağıntı ile elde edilmiştir.

$$T = 0,371 + 0,020Op.MNV + 0,002N + 13,78e^{(-0,001Q_{eng})} + 1.538ST \quad (10)$$

Bağıntıdan da görülebileceği üzere, yan yoldan kavşağa giriş yapan sürücülerin kabul ettikleri aralıklar, engelleyici akım, uygun aralık bulmaya çalıştıkları engelleyici manevra türü, ana yol şerit sayısı ve sürücü tipine bağlı olarak değişebilmektedir. Şekil 13'den de görülebileceği gibi, sürücü tipleri dikkate alındığında modelin daha fazla veriyi tanımlayabileceği anlaşılmaktadır. Nitekim model, sürücü tipleri de eklendiğinde gözlemlenen verileri neredeyse tam doğrulukla hesaplayabilmektedir (Şekil 14).



Şekil 13 - Sürücü tipleri de dikkate alınarak elde edilen aralık kabul değerleri ile gözlenen değerlerin engelleyici akıma bağlı değişimi



Şekil 14 - Sürücü tipleri de dikkate alınarak hesaplanan kabul değerleri ile gözlemlenen kabul değerleri arasındaki ilişki

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, ışıksız kavşaklarda sürücülere ait aralık kabul değerlerinin hesaplanabilmesi için yeni bir yaklaşım geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Sürücülerin aralık kabul değerlerinde en önemli etken, sürücülerin uygun aralık aradıkları akımın hacmidir. Engelleyici akım değeri arttıkça, sürücülerin kabul ettikleri aralık değeri de düşmektedir.
2. Sürücülerin kabul ettikleri aralık değerinin belirlenmesinde, sürücülerin yapacakları manevra etkili olsa da, esas belirleyici etkenlerden birisinin engelleyici manevra değeri olduğu anlaşılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda ışıksız kavşak dizayn edilirken engelleyici manevranın etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.
3. Diğer önemli bir parametre ise ana yoldaki şerit sayısıdır. Şerit sayısı arttıkça, sürücüler daha uzun aralıklar beklemek zorunda kalmaktadır.
4. Sürücü davranışının da önemli bir etken olabileceği, çalışma kapsamında bir kez daha vurgulanmıştır. Sürücülerin %47 si manevra türleri farklı olsa dahi aynı engelleyici akım karşısında aynı davranışı sergilemektedir. Kavşakların performans düzeyini yavaş/saldırgan davranış gösteren sürücülerin etkileyebileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle düşük ana yol hacimlerinde değişken aralık kabul değerleri farklı sürücü davranışlarını işaret etmektedir.

5. Engelleiyici akım hacmi arttıkça sürücülerin kabul aralıklarındaki farklılık azalmakta; tüm sürücüler kısa aralıklarda kavşağa giriş yapmaya çalışmaktadırlar.

Çalışma sonuçları, dört kavşak verisi ile sınırlıdır. Kavşak sayısı arttıkça, geometrinin aralık kabul değerleri üzerindeki etkisi daha sağlıklı bir şekilde anlaşılabilir. Yapılacak çalışmalarda, sürücülerin davranış özelliklerinin de belirlendiği araştırmalar, gerçek koşulları daha iyi tanımlayan modeller elde edilmesinde önemli yararlar sağlayabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında kullanılan veriler TÜBİTAK 118M637 nolu araştırma projesi kapsamında elde edilmiştir. Yazarlar desteği nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkür eder. Birinci yazar, doktora tez çalışmaları kapsamında verdiği destek nedeniyle Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür eder.

Semboller

- I/R : Dönüş yapan taşıtların takip ettikleri yörünge eğrilik yarıçapı
 $E(t)$: "n" sayıda sürücü tarafından kabul edilen aralıklar için ortalama aralık değeri
 $F(a)$: Kabul edilen aralığın olasılık dağılım fonksiyon değeri
 $F(r)$: Reddedilen aralığın olasılık dağılım değeri
 $F_{T(t)}$: Kritik aralık kabul değerlerine ait olasılık dağılım fonksiyonunu
 $F_{K(t)}$: Kabul edilen aralıklara ait olasılık dağılım fonksiyonu
 $F_{R(t)}$: Reddedilen aralıklara ait olasılık dağılım fonksiyonunu
 G : Yolun eğimi
 $G(t)$: Bir aralığın kabul edilme olasılığı
 K : Bir katsayı
 K : Kritik aralık kabul değerlerinin alt sınırını (s)
 MNV : Manevra türü
 n : Kavşağa giren taşıt sayısı (taşıt)
 N : Sürücünün beklediği süre boyunca yoldan geçen taşıt sayısı (taşıt)
 N_t : "t" aralığında kavşağa girebilecek araç sayısı (taşıt)
 $Op.MNV$: Engelleiyici manevra
 N : Şerit sayısı
 ST : Sürücü tipi
 $ŞG$: Şerit genişliği (m)
 t : Araçlar arasındaki zaman cinsinden aralık değeri (s)

t_o	: Doğrunun aralık eksenini kestiği nokta
t_0	: Yanyoldaki bir sürücünün kavşak DUR veya YOL VER çizgisine geldiği an (s)
t_d	: Kavşağa girilen an (s)
t_N	: N 'inci taşıtın yoldan geçtiği an (s)
T	: Yanyoldan ana yola katılmaya çalışan araçların, ana yoldaki araçlar arasında kabul edebilecekleri en uygun zaman cinsinden aralık değeri (s)
T_0	: Yanyoldan kavşağa giriş yapan araçlar arasındaki takip aralığı değeri (s)
T_o	: Doğru eğimi
T_l	: Kritik öne giriş aralığı (s)
T_g	: Seçilen aralığın kritik araya giriş aralığı
T_k	: Kritik aralık kabul değeri (s)
$T_{ksüt}$: Kritik aralık kabul değerinin üst sınırı (s)
y	: tahmin edilmek istenen değişken
y_{alt}	: Değişkenin alt limit değeri
$y_{üst}$: Değişkenin üst limit değeri
q_c	: Engelleyici akım değerini (taşıt/s)
Q_{eng}	: Engelleyici akım (taşıt/sa)
x	: Bağımsız değişken
ΔT	: Gözlenen değerler ile model arasındaki fark

Kaynaklar

- [1] Gedizlioğlu, E., Denetimsiz kavşaklarda yanyol sürücülerinin davranışlarına göre pratik kapasite saptanması için bir yöntem, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, 1979.
- [2] Tanner, J. C., A Theoretical Analysis of Delays at an Uncontrolled Intersection, *Biometrika*, 49(1/2), 163–170, 1962.
- [3] Tanyel, S., Türkiye'deki dönel kavşaklar için kapasite hesap yöntemi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, 2001.
- [4] Utku, S.B., Yuvarlakada Kavşaklarda Kavşak İçi Gecikmelerin Kavşak Başarımı Üzerindeki Etkisi ve Buna Bağlı Kapasite Değişimlerinin Modellenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [5] Adams, W.F., Road Traffic Considered as a Random Series, *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 4(1), 121–130, 1936.

- [6] Haging, O., Roundabout Entry Capacity, Bulletin, 135, Dept. of Traffic Planning and Engineering, Lund, Sweden, 1996.
- [7] Haging O., Vehicle-Vehicle Interactions at Roundabouts and their Implications for the Entry Capacity, Lund Institute of Technology, 1998.
- [8] Fricker, J., Gutierrez, M. and Moffet, D., 1991. Gap acceptance, wait time and risk aversion at unsignalized intersections, *Intersections Without Traffic Signals II*, Bochum, Germany, 297–307.
- [9] Raff, M. S., Hart, J. W., A Volume Warrant for Urban Stop Signs, Eno Foundation for Highway Traffic Control, Saugatuck, Connecticut, 1950.
- [10] Siegloch, W., Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen (Capacity Calculations at Unsignalized Intersections) (in German), *Series Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, No. 154, 1973.
- [11] Troutbeck, R.J., Brilon, W., Unsignalized Intersection Theory. In *Traffic Flow Theory A State of Art Report*, 8-1-8-44. Edited by Gartner, N., Messer, C.J., and Rathi, A.K., 1995.
- [12] Hewitt, R. H., (1985). “A comparison between some methods of measuring critical gap”. *Traffic Engineering and Control* 26(1), 13-22.
- [13] Miller, A.J., Nine Estimators for Gap-Acceptance Parameters. In: Newell, G. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*. Berkeley, California June, 1971.
- [14] Troutbeck, R.J., *Estimating the Critical Acceptance Gap from Traffic Movements*, Queensland University of Technology, 1992.
- [15] Tian, Z., Vandehey, M., Robinson, B. W., Kittelson, W., Kyte, M., Troutbeck, R., Wu, N. Implementing the Maximum Likelihood Methodology to Measure a Driver’s Critical Gap, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(3-4), 187–197, 1999.
- [16] Abou-Henaidy, M., Teply, S., Hunt J.D., Gap Acceptance Investigations in Canada. *Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity*. Australian Road Research Board, Transportation Research Board, 1, 1–20, 1994.
- [17] Radwan, A. E., Sinha, K.C., Gap acceptance and delay at stop controlled intersections on multilane divided highways, *Journal of Institute of Transportation Engineers*, 50, 3, 38–44, 1980.
- [18] Hamed, M. M., Easa, S. M., & Batayneh, R. R. (1997). Disaggregate gap-acceptance model for unsignalized T-intersections. *Journal of transportation engineering*, 123, 1, 36–42.
- [19] Solberg, P., Oppenlander, J., Lag and Gap Acceptance At Stop-Controlled Intersections. *Highway Capacity Record*, 118, 48–67, 1966.
- [20] Brilon, W., Koenig, R., Troutbeck, R.J., Useful Estimation Procedures for Critical Gaps, *Transportation Research, Part A*, 33, 161–186, 1999.

- [21] Dutta, M., Ahmed, M.A., Mod, J., Gap Acceptance Behavior of Drivers at Uncontrolled T-Intersections Under Mixed Traffic Conditions, *Transport*, 1–14, 2017.
- [22] Tian, Z.Z., Troutbeck, R., Kyte, M., Brilon, W., Vandehey, M., Kittelson, W., Robinson, B., A Further Investigation on Critical Gap and Follow-Up Time, 4th International Symposium on Highway Capacity; Maui, Hawaii, 2000.
- [23] Hagring, O., Estimation of Critical Gaps in Two Major Streams, *Transportation Research Part B: Methodological*, 34, 4, 293–313, 2000.
- [24] Weinert, A., Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Unsignalized Intersections in Germany, 4th International Symposium on Highway Capacity, Maui, Hawaii: Transportation Research Board, 409–421, 2000.
- [25] Wu, N., A New Model for Estimating Critical Gap and Its Distribution at Unsignalized Intersections Based on the Equilibrium of Probabilities, *Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*, Yokohama, Japan, 25–29, 2006.
- [26] Wu, N., Equilibrium of Probabilities for Estimating Distribution Function of Critical Gaps at Unsignalized Intersections, *Transportation Research Record*, 2286 (December), 49–55, 2012.
- [27] Vasconcelos, L., Álvaro S., Ana S., Comparison of Procedures to Estimate Critical Headways at Roundabouts, *PROMET – Traffic & Transportation*, 25, 1, 43–54, 2013.
- [28] Sinha, K.C., Tomiak, W.W., Section Gap Acceptance Phenomenon at Stop Controlled Intersections, *Traffic Engineering*, 41, 7, 28–33, 1971.
- [29] Madanat, S.M., Cassidy, M.J., Wang, M-H., Probabilistic Delay Model at Stop-Controlled Intersection, *J. Transp. Eng.*, 120, 21–36, 1994.
- [30] Çalışkanelli, S. P., ve Tanyel, S., Işıksız Kavşaklardaki Ana yol Araç Gecikmelerinin İrdelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24.6, 1093-1099, 2018.
- [31] Ozan C., Başkan, Ö., Ve Metin, M., Denetimsiz Eşdüzey Kavşakların Performans Analizi: Aydın Örneği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22.2, 637-648, 2020.
- [32] Velan, S.M., Van Aerde, M.V., Gap Acceptance and Approach Capacity at Unsignalised Intersections, *ITE Journal*, 66, 3, 40–45, 1996.
- [33] Zohdy, I., Sadek, S., Rakha, H., Empirical Analysis of Effects of Wait Time and Rain Intensity on Driver Left-Turn Gap Acceptance Behavior, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2173, 1–10, 2010.
- [34] Devarasetty, P.C., Zhang, Y., Fitzpatrick, K., Differentiating Between Left-Turn Gap and Lag Acceptance at Unsignalized Intersections as a Function of the Site Characteristics, *J. Transp. Eng.*, 138, 580–588, 2011.
- [35] Vasconcelos, L., Álvaro S., Ana S., Gilberto R., Estimation of Critical Headways at Unsignalized Intersections – A Microscopic Approach, *Advances in Transportation Studies* (1), 59–72, 2012.

- [36] Serag MS (2015) Gap-Acceptance Behaviour at Uncontrolled Intersections in Developing Countries. *Malays. J. Civ. Eng.*, 27, 80–93.
- [37] Liu, M., Lu, G., Wang, Y., Zhang, Z., Analyzing Drivers' Crossing Decisions at Unsignalized Intersections in China. *Transp. Res. Part. F Traffic Psychol Behav.*, 24, 244–255, 2014.
- [38] Russell, M., Stuber, G.L., Interchannel Interface Analysis of OFDM in a Mobile Environment, *IEEE 45th Vehicular Technology Conference*, Chicago, IL, 820–824., 1995.
- [39] Tsguhide, A., Magnus, S., Pilot Design for Frequency Offset Tracking in MIMO-OFDM System. *17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, Finland, 1–5, 2006.
- [40] Wang, X., Yang, X., Study on Decision Mechanism of Driving Behavior Based on Decision Tree, *Journal of System Simulation*, 20, 2, 415–419, 2008.
- [41] Yinghi, L., Hlaing, M., Consistent Pilot Design for Frequency Offset Estimation in MIMO-OFDM System, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Honolulu, USA, 249–252, 2007.
- [42] Ashalatha, R., Chandra S., Critical Gap Through Clearing Behavior of Drivers at Unsignalised Intersections, *KSCE J. Civ. Eng.*, 15, 1427–1434, 2011.
- [43] Mohan M., Chandra, S., Critical Gap Estimation at Two-Way Stop-Controlled Intersections Based on Occupancy Time Data, *Transportmetrica A: Transport Science*, 14, 4, 316–329, 2018.
- [44] Kyte, M., Clemow, C., Mahfood, N., Lall, B.K., Khisty, C.J., Capacity and Delay Characteristics of Two-Way Stop-Controlled Intersections, *Transportation Research Record 1320*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 160–167, 1991.
- [45] Chandra, S., Agrawal, A., Rajamma, A., Microscopic Analysis of Service Delay at Uncontrolled Intersections in Mixed Traffic Conditions, *Journal of Transportation Engineering*, 135, 6, 323–329, 2009.
- [46] Tanyel, S., Çalışkanelli, S.P., Özuysal, M., A New Minimum Delay Model for Multi-Lane Traffic Circles, *İMO Teknik Dergi*, 33, 1, 11429–11454, 2022.
- [47] Horton, R.E., An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 5, 399–417, 1940.
- [48] R Core Team, *R: A Language And Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, URL: <https://www.Rproject.org>, 2023.
- [49] Koenker, R., Bassett Jr, G., Regression Quantiles, *Econometrica: Journal Of The Econometric Society*, 33-50, 1978.
- [50] StataCorp, L. L. C., *Stata Treatment-Effects Reference Manual: Potential Outcomes/Counterfactual Outcomes*, Release 15, 2017.

- [51] Lasdon, L.S., and Waren, A.D., Large Scale Nonlinear Programming, Computers and Chemical Engineering, 7, 5, 595–604, 1983.
- [52] Waren, A.D., and Lasdon, L.S., The Status of Nonlinear Programming Software, Operations Research, 27(3): 431–456, 1979.
- [53] Akçelik, R., SIDRA TRIP User Guide. Greythorn, Australia: Akçelik & Associates, 2011.
- [54] Koenker, R. Quantile Regression in R: A Vignette. <https://cran.r-project.org/web/packages/quantreg/vignettes/rq.Pd>, 2019.

TECHNICAL NOTE

Case Study of Stormwater Control by Permeable Road in Commercial Centre under Equatorial Climate

Darrien Yau Seng MAH¹

Norazlina BATENI²

Frederik Josep PUTUHENA³

ABSTRACT

This paper describes the investigation into stormwater control measures of a 3,425 m² commercial centre of 61% of which were tarred surfaces and targeting these surfaces, areas from 10 to 34% of which were permeable roads of various coverage areas of permeable roads of various surface areas were modelled using Storm Water Management Model version 5.0. Testing the permeable roads for very-short duration storms ranging from 5 to 15 minutes, it was found that the catchment area contributing water for detention purposes played a major role in stormwater control. Other than that, the orifice outlet attached to the storage facility was major factor in determining the flow.

Keywords: Drainage, hydrograph, urban runoff, post-development, pre-development, sustainable development.

1. INTRODUCTION

Located in the equatorial region, Sarawak receives 3,000 mm of rainfall annually. Urban stormwater drainage system over the region is separated into two distinct systems, namely the major drainage system which is designed to 50- or 100-year Average Recurrent Interval (ARI), and minor drainage system which is designed to 10-year ARI design storms [1], [2]. This paper reports the stormwater control over a commercial centre surrounded by parking spaces and roads which is classified as a minor drainage system (Figure 1).

According to a local study [3] conducted from December 2019 to February 2020 in conjunction with the Northeast Monsoon, it was reported that 90% of the recorded rainfall

Note:

- This paper was received on September 7, 2022 and accepted for publication by the Editorial Board on May 26, 2023.
- Discussions on this paper will be accepted by September 30, 2023.
- <https://doi.org/10.18400/tjce.1310648>

1 Universiti Malaysia Sarawak, UNIMAS Water Centre, Sarawak, Malaysia
ysmah@unimas.my - <https://orcid.org/0000-0003-3469-2335>

2 Universiti Malaysia Sarawak, UNIMAS Water Centre, Sarawak, Malaysia
bnorazlina@unimas.my - <https://orcid.org/0000-0001-6015-4739>

3 Universitas Pembangunan Jaya, Centre for Urban Studies, Tangerang, Indonesia
fj.putuhena@upj.ac.id - <https://orcid.org/0000-0001-6134-8260>

were below 20 mm, 5% between 20-30 mm, 4% between 30-40 mm and 1% between 40-50 mm. The values of 10-year ARI design storms for 5-, 10- and 15-min are estimated as 23, 36 and 46 mm, as intense rainfalls. As such, the minor drainage system should be tested against the very-short duration design storms.

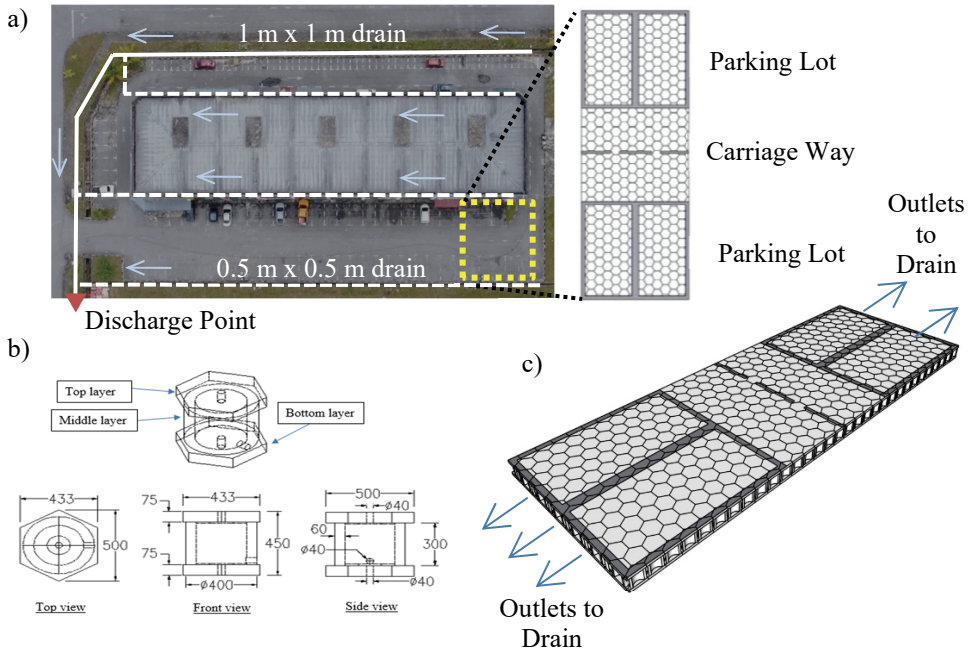


Figure 1 - Case study in commercial centre, (a) Study area and indication of permeable road at the parking spaces and carriage way in front of the shop building, (b) Dimension of a modular unit of chosen permeable road and c) 3D view of the assembled permeable road.

It is common in Malaysia to have two rows of roadside parking spaces in front of the shop building. In this case, the road is flanked by parking spaces. On one side attached to the shop building, a stretch of the urban drain is constructed to convey stormwater from both roof and road surfaces. On the other side of the road, another stretch of urban drain-cum-road shoulder is constructed to convey stormwater from the road surface. It is found that the land area occupied by road and parking spaces is more than half of the total catchment area, which is further described in the study area. In this case study, applying intervention to the tarred surfaces is more appropriate than on the shop building.

Having a manmade structure underneath the road surfaces to capture the stormwater is mimicking the natural function of the soil layer to absorb excess water. According to a study for a residential property lot [4], it was recommended to have at least 60% of the total catchment area directed for detention to achieve the intended lowering the peak of post-development hydrograph. Another study in the design of stormwater detention reported the capacity of the water receiving structure is related to the connected drainage catchment[5]. It

was also reported elsewhere that the water receiving structure was limited by available land spaces and therefore the area of contributing catchment should also in line with the limitation[6]. A study of Low Impact Development (LID) water infrastructure, [7], had reported that the effectiveness of the structure in stormwater control decreased with increasing catchment area and the structure had better performance when closer to the source.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study Area

A commercial centre was selected as a case study (Figure 1a). It is called Palm Square beside Dato' Mohd Musa Road, Kota Samarahan, at the outskirts of Kuching city, Sarawak, Malaysia. The total catchment area of Palm Square is calculated as 3,425 m². The centre has ten (10) units of shop buildings, in which the eight (8) intermediate lots are 18 m x 7 m each while the two (2) corner lots are 18 m x 9 m each. As such, the catchment area occupied by the shop buildings is calculated as 1,332 m², about 39% of the total catchment area.

The remaining 61% of the catchment area is covered by tarred surfaces. At the front of Palm Square, it has 5 m wide car parking spaces on both sides of the road and a 4 m wide carriageway in the middle. At the back, it has a 4 m wide motorcycle parking space and a 4 m wide carriageway. The minor drainage system consists of two drain sizes, namely the 0.5 m x 0.5 m and 1 m x 1 m concrete drains. The minor system discharges runoff to a major drainage system which is not covered in this study. These measurements have provided a realistic basis to support the simulation efforts that followed [8].

2.2. Permeable Road

A length of 84 m road in front of the shop building was selected for intervention. One of the stormwater control measures that suitable for a road is a permeable road. Its general structure consisted of a top layer of permeable pavement allowing water to seep through and a bottom layer of storage facility allowing water to be stored temporarily under the road [9]. The outflow of the storage layer was through a 50 mm diameter orifice.

The type of permeable road chosen for this study was a non-commercialised R&D product developed by Universiti Malaysia Sarawak and collaborators. It was made up of micro detention structure in the form of a hollow cylindrical tube which sandwiched between two hexagonal plates (Figure 1b). The storage facility had a solid-framed structure but hollow within, thus having a porosity as high as 0.9. Such a storage structure was reported by [10].

The hollow cylindrical tube had an inner diameter of 313 mm and a wall thickness of 60 mm; while the hexagonal plate had a width of 500 mm and a height of 433 mm which contributed an area of 0.1624 m² per plate. The mentioned three pieces formed a singular modular unit and when combined, the hexagonal plates formed honeycomb-patterned plane. The top plane functioned as the road surfaces with 40 mm diameter service inlet on each hexagonal plate to drain water to the hollow cylindrical tube. The bottom plane functioned as a raft foundation which allowed water infiltration to the surrounding soil. The permeable road was not built but based on what-if simulation scenarios. It was a common practice to manipulate what-if scenarios to obtain insights into the workability of engineering measures [11].

2.3. Design Storm

The small total catchment area of the commercial centre (0.3 ha) fell under the catchment category of 0.2 - 4 ha according to the Singaporean Public Utilities Board (PUB) [1]. The Singaporean manual suggested a time of concentration of 5 min for the category. Therefore, 5 min was adopted as the design storm duration based on the assumption all parts of the catchment were contributing to the outflow, thus achieving a condition of storm duration was equal to the time of concentration. Similarly, a Malaysian manual according to the Department of Irrigation and Drainage (DID) [2] also reinstated the recommendation under equatorial region. Malaysian authority recommended that drainage system within a commercial centre as a minor system to be designed to 10-year Average Recurrent Interval (ARI) under local climate. The case study was subjected to a range of 10-year ARI design storms starting from 5 to 15 min.

2.4. Modelling Approach

Stormwater runoff processes through catchments and drainage systems were simulated using Storm Water Management Model version 5.0 (SWMM5). It begun with rainfall (design storms described in section 2.3) and ended with an outlet. Other than that, it involved components like catchment (roof and road), drainage (urban drain) and storage (storage facility in the permeable road) (Figure 2).

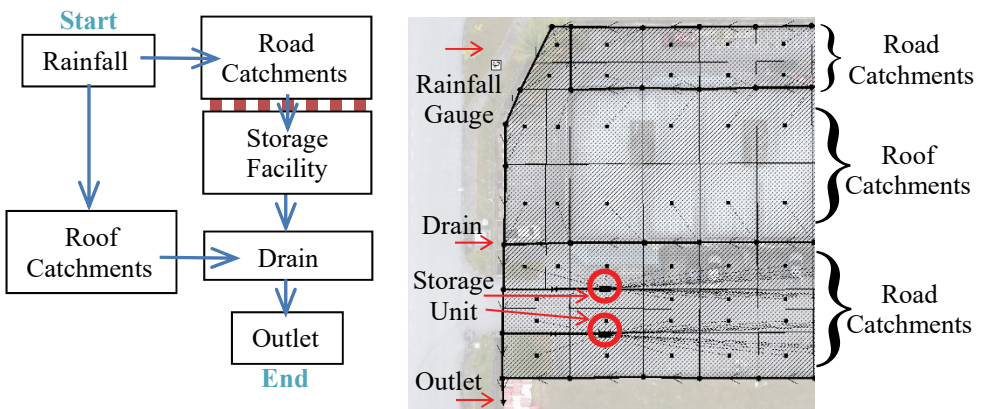


Figure 2 - Modelling approach that involves rainfall, catchment, permeable road, drain and outlet. The permeable road is modelled as storage units that receive water from the tarred surfaces and release water via orifice to the concrete drain.

The chosen permeable road (Section 2.2) was different from the conventional permeable roads. SWMM5 was chosen because it could represent the layer of multiple hollow cylinder tubes in the permeable road as storage units, quite well by defining the storage volume of the mentioned layer [12]. Firstly, the permeable road was assumed with different depths of the storage layer. Usually, a conventional permeable road was designed to about 0.5 - 0.6 m of

storage layer [13]. As such, the common depth range was benchmarked for the assumption here. The research team was applying 0.2 m, 0.4 m and 0.6 m of storage heights, plus the thickness of hexagonal plates.

Secondly, scenarios of installing permeable roads in front of the shop building were set. Measure 1 was having one row of parking spaces that constituted 420 m² (84 m x 5 m) or 12% of the total catchment. Measure 2 was inclusive of two rows of parking spaces that constituted 840 m² (84 m x 10 m) or 25% of the total catchment. Measure 3 considered only the carriageway that comprised 336 m² (84 m x 4 m) or 10% of the total catchment. Lastly, Measure 4 took in all parking spaces and carriageway that made up of 1176 m² (84 m x 14 m) or 34% of the total catchment.

Flow in a catchment was computed by SWMM engine using a non-linear reservoir runoff method which treated the catchment as a shallow reservoir and its runoff flow as a non-linear function of water depth of the reservoir [14]. In practice, engineers used the rational method to generate catchment flow, in which PUB [1] suggested using 0.4 as the runoff coefficient assuming the catchment was naturally grassed for pre-development conditions, while DID [2] suggested using 1.0 for impervious surfaces like roof and road, assuming the loss of water over the course of runoff was negligible for post-development conditions. Comparison of catchment flow from the two methods is presented in Figure 3a.

From the catchment, runoff was directed to enter the drain and storage unit. The runoff was routed through urban drains from point to point by SWMM engine using kinematic wave routing method [15], [16]. On the other hand, engineers used Manning formula to calculate flow in drain. Comparison of the drain flow from the two methods is presented in Figure 3b. The coefficient of determination, R-square values, are depicted in the same figure which were larger than 0.9 for both. These R-square values indicated highly satisfactory good fit [17].

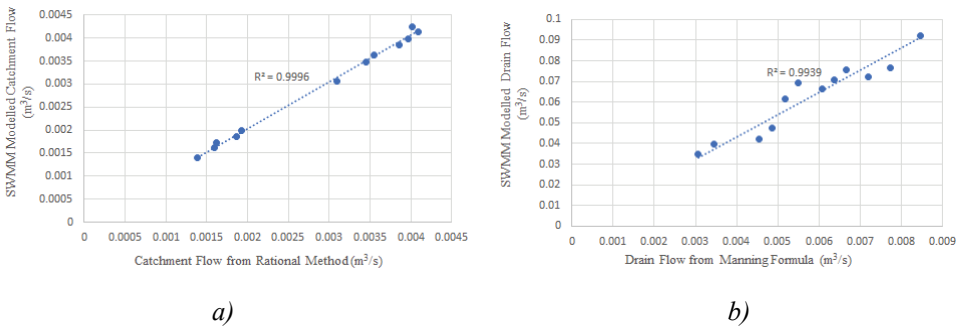


Figure 3 - Verification of SWMM modelled results for a) Catchment flow and b) Drain flow.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Flow Pattern

It is demonstrated that the shorter the duration, the more the intensity of the design storm (Figure 4). It makes sense that the 5-minute duration which produced the highest peak flow,

is recommended as a reference for engineering design. Among the four intervention measures, Measure 4 that received water from the largest catchment area is repeatedly demonstrated to have the lowest peak hydrographs (0.04 - 0.09 m³/s) when subjected to very-short duration design storms. Measure 2 is demonstrated to have a peak hydrograph above Measure 4 (0.05 - 0.09 m³/s) in all different storm durations for having the second-largest catchment area. Measures 1 and 3 are having the highest peak hydrographs (0.05 - 0.12 m³/s) for having the least catchment areas.

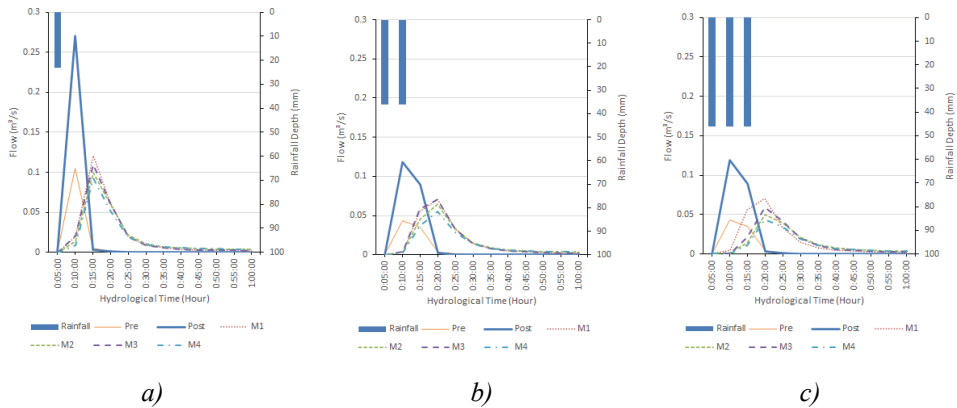


Figure 4 - Flow hydrographs at outlet for 0.2 m deep permeable road subjected to 10-year ARI design storm with durations of a) 5 min, b) 10 min and c) 15 min.

It can be deduced that the size of the catchment area of the permeable road has a key role in the effectiveness of lowering the peak hydrograph. It is found that for larger catchment areas higher runoff control could be achieved. This finding is in line with the report of [7]. Another deduction from Figure 4 is the attenuation of peak hydrographs from Measures 1 to 4 from the pre- and post-development hydrographs. Having the runoff being captured within the permeable road has slowed down the flow out of the commercial centre. The ranges of attenuation are estimated to delay 5 minutes for 5-min storm, 10 minutes for 10- and 15-min design storms for 0.2 m storage depth on the permeable road.

Since the observed flow patterns were similar for storage depths of 0.4 m and 0.6 m the respective attenuations are not reported. However, outcomes for all storage depths are presented below for the facilitation of a through understanding.

3.2. Water Level Pattern

The associated water level data in the storage unit corresponding to the previous flow patterns are depicted in Figure 5. Conforming to report of [6], these water level graphs are used to verify the limitation of storing capacity for 0.2 m storage depth. The graphs show that of maximum water levels ranges from 0.07 - 0.1 m. It means for the 10-year ARI design storm at most 50% of the storage capacity is utilized.

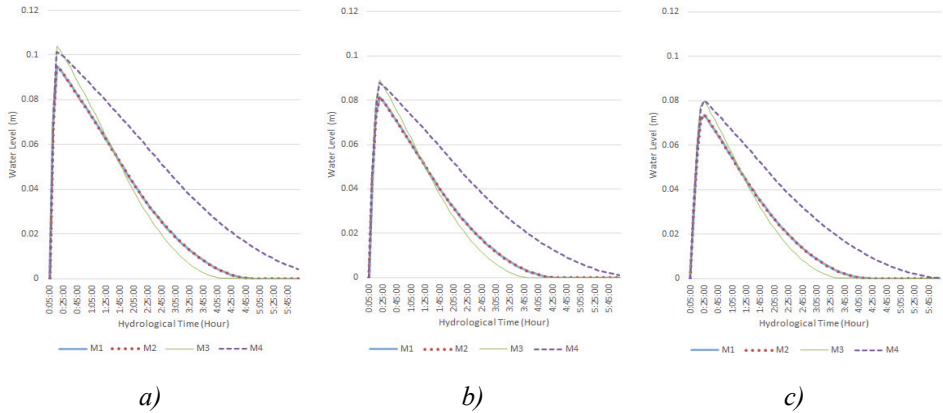


Figure 5 - Water level plots in storage unit for 0.2 m deep permeable road subjected to 10-year ARI design storm with durations of a) 5 min, b) 10 min and c) 15 min.

Measure 4, that is the largest contributing catchment area, is repeatedly exhibited the highest water level and largest hydrograph base as compared to the rest of the measures. Since the catchment area is the highest, the higher volume of runoff and higher water level are expected in the storage unit. Measures 1 to 3 share similar hydrograph shapes. These three measures have closely packed hydrograph patterns as depicted in Figure 5.

Another observation worth to mention is that Measure 4 has demonstrated a detention time of six hours for all 10-year ARI design storms and Measures 1 to 3 have a detention time of four hours. Since the observed flow patterns were similar for storage depths as previously stated, the water level graphs are limited to 0.2 m storage depth.

3.3. Comparison of Measures

Peak hydrographs, as depicted in Figure 6, for the measures 1 through 4 are almost identical. This is due to the use of the same outlet orifice size for all storage depths. It is found that Measure 4 with the largest catchment area, 34% of total commercial area, performs the best than other measures. Measure 4 produces the highest reduction of post-development peak hydrograph and nearing pre-development condition.

The maximum water levels (MWL) are presented in Figure 7. The MWL increases slightly with storage depth in equilibrium. A storage depth of 0.2 m with 0.05 m orifice outlet is found adequate to contain water from road surfaces. The highest water levels estimated are below 0.2 m after testing through the three storage depths. It suggests that runoff from sources other than the road surfaces could still be directed to the underground storage since less than 50% of the storage spaces are utilized in all cases.

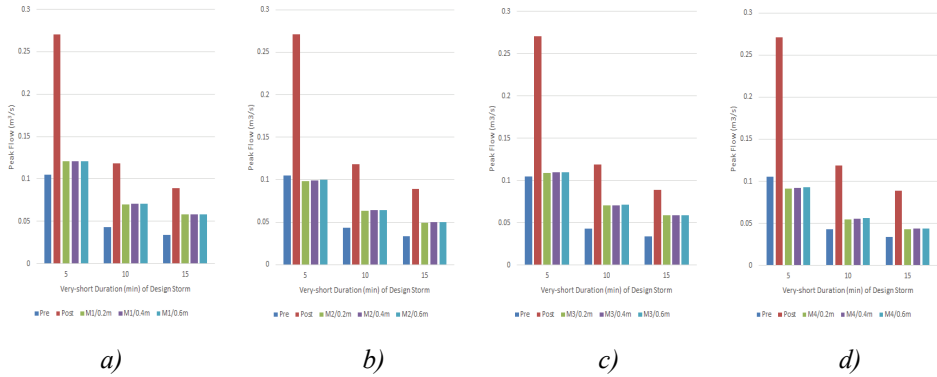


Figure 6 - Peak flow values at outlet for a) Measure 1, b) Measure 2, c) Measure 3 and d) Measure 4

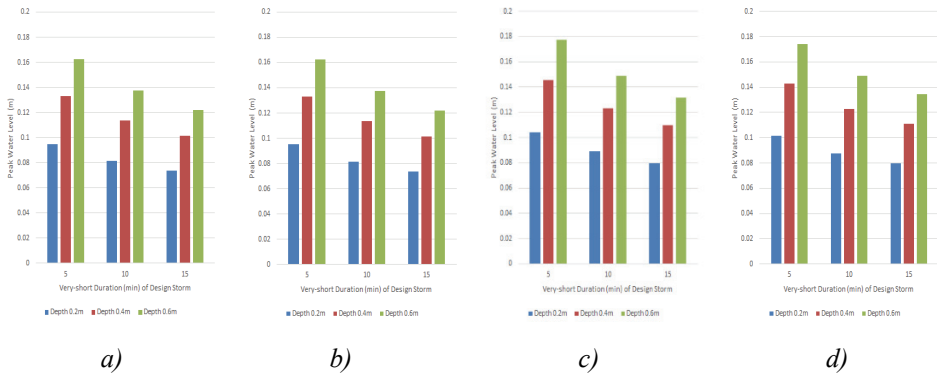


Figure 7 - Peak water level values at storage unit for a) Measure 1, b) Measure 2, c) Measure 3 and d) Measure 4

4. CONCLUSION

The study was conducted to assess the capability and effectiveness of the chosen permeable road being incorporated into minor drainage system in the commercial centre. Modelling through SWMM5 was carried out to simulate the hydrological processes acted upon various surface areas of the permeable road when subjected to very-short duration design storms. The verification of the model was performed using the coefficient of determination, R-squared values, which were satisfactory and met the study requirements.

Under the weather patterns of equatorial region, the analyses of flow hydrographs at outfall showed the permeable road was able to lower the peak hydrographs compared to peak hydrograph of post-development and nearing pre-development condition for all scenarios. The analyses of storage unit were also performed to assess the capability of the permeable road. It indicated the permeable road could withstand the induced weather patterns to

accommodate the generated runoff volume for all four scenarios, without overflowing from the permeable road.

Acknowledgement

The authors acknowledged the financial support from the International Matching Grant Scheme between Universiti Malaysia Sarawak and Universitas Pembangunan Jaya under the research program entitled “Flood Infrastructure for Sustainable Urban Development”.

References

- [1] Singaporean Public Utilities Board, Technical Guide for On-Site Detention Tank Systems, National Water Agency, Singapore, 2010.
- [2] Malaysian Department of Irrigation and Drainage, Urban Stormwater Management Manual for Malaysia. Ministry of Environment and Water, Kuala Lumpur, 2012.
- [3] Ngu, J.O.K., Mah, D.Y.S., Taib, S.N.L., Mannan, M.A., Chai, S.L., Evaluating the Efficiency of Household Stormwater Detention System. *ASEAN Engineering Journal*, 10(2): 105-114, 2020.
- [4] Mah, D.Y.S., Ngu, J.O.K., Caroline, P.D., Malek, M.A., Catchment Size to Effective Tank Volume Relationships for Individual Lot Stormwater Detention System in Malaysian Detached House. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9(5): 8358-8363, 2020. doi:10.30534/ijatcse/2020/209952020.
- [5] Terêncio, D.P.S., Sanches Fernandes, L.F., Cortes, R.M.V., Moura, J.P., Pacheco, F.A.L., Flood Risk Attenuation in Critical Zones of Continental Portugal using Sustainable Detention Basins. *Science of the Total Environment*, 721: 137727, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137727.
- [6] Loh, S.L., Mah, D.Y.S., Potential of Roundabout as a Stormwater Detention Basin in Equatorial Region. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 10(1): 104989, 2020. doi:10.1504/IJHST.2020.104989.
- [7] Fiori, A., Volpi, E., On the Effectiveness of LID Infrastructures for the Attenuation of Urban Flooding at the Catchment Scale. *Water Resources Research*, 56(5): e2020WR027121, 2020. doi:10.1029/2020WR027121.
- [8] Abd-Elhamid, H.F., Zelenáková, M., Vranayová, Z., Fathy, I., Evaluating the Impact of Urban Growth on the Design of Storm Water Drainage Systems. *Water*, 12(6):1572, 2020. doi:10.3390/w12061572.
- [9] Liow, C.V., Mah, D.Y.S., Mohd Arif Zainol, M.R.R., Modelling of StormPav Green Pavement: Inlet and Outlet of Integrated Permeable Road and Stormwater Detention System. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2) :966-976, 2019.

- [10] Bateni, N., Lai, S.H., Putuhena, F.J., Mah, D.Y.S., Mannan, M.A., Chin, R.J., Hydrological Impact Assessment on Permeable Road Pavement with Subsurface Precast Micro-Detention Pond. *Water and Environment Journal*, 34(S1):960-969, 2020. doi:10.1111/wej.12613.
- [11] Nowogoński, I., Low Impact Development Modeling to Manage Urban Stormwater Runoff: Case Study of Gorzów Wielkopolski. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 28(3):105-115, 2020.
- [12] Mah, D.Y.S., Ngu, J.O.K., Taib, S.N.L., Mannan, M.A., Modelling of Compartmentalized Household Stormwater Detention System Using SWMM5. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(2):344-349, 2020. doi :10.30534/ijeter/2020/17822020.
- [13] Zhang, K., Chui, T.F.M., Design Measures to Mitigate the Impact of Shallow Groundwater on Hydrologic Performance of Permeable Pavements. *Hydrological Processes*, 34(25):5146-5166, 2020. doi :10.1002/hyp.13935.
- [14] Huber, W.C., Hydrologic Modeling Processes of the EPA Storm Water Management Model (SWMM). *World Water & Environmental Resources CVongress*, 1-10, 2003.
- [15] Huber, W.C., Rosmman, L.A., Dickinson, R.E., EPA Storm Water Management Model, SWMM5. *Watersheds Models*, 339-359, 2005.
- [16] Swathi, V., Raju, K.S., Varma, M.R .R., Addition of Overland Runoff and Flow Routing Methods to SWMM – Model Application to Hyderabad, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192:643, 2020. doi :10.1007/s10661-020-08490-0.
- [17] Zakizadeh, F., Moghaddam Nia, A., Salajegheh, A., Sañudo-Fontaneda, L.A., Alamdari, N., Efficient Urban Runoff Quantity and Quantity Modelling Using SWMM Model and Field Data in an Urban Watershed of Tehran Metropolis. *Sustainability*, 14(3):1086, 2022.

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.



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