



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

Cilt 33 Sayı 3 Mayıs 2022

## TEKNİK DERGİ YAYIN İLKELERİ

Teknik Dergi, inşaat mühendisliğinin bütün alanlarını içeren, Science Citation Index Expanded (Genişletilmiş Bilimsel Atıf Endeksi) kapsamında bilimsel ve teknik bir dergidir. Ocak, Mayıs ve Eylül aylarında Türkçe, Mart, Temmuz ve Kasım aylarında İngilizce olmak üzere yılda altı sayı olarak yayımlanır. Derginin yayın ilkelerinden başlıcaları aşağıda özetlenmektedir:

1. Yalnızca özgün bilimsel araştırma çalışmalarını ve ilginç mühendislik uygulamaları yansıtan yazılara yer verilir. “Özgünlük” kapsamı içinde, çalışmanın ya yeni bilgi üretmiş olması veya varolan bilgiye yeni bir boyut kazandırmış olması, ya da yeni bir yöntem geliştirmiş veya bilinen bir yöntemi elle tutulur bir ölçüde ilerletmiş olması koşulu aranır.
2. Bilimsel çalışmaların öndeğerlendirme sonuçlarını aktaran yazılar ile bilimsel içeriği makale için yeterli görülmeyen, ancak okuyucuya yararlı bilgi aktarabileceği düşünülen yazılar, “teknik not” olarak yayımlanabilir.
3. Yayın tarihinden başlayarak üç ay içinde, okurlardan alınan tartışma yazıları, Yayın Kurulu’nca değerlendirildikten sonra, yazarın yanıtı ile birlikte yayımlanır.
4. Yayımlanmak üzere gönderilen yazılar iki veya üç danışman tarafından değerlendirilir; kabul-red kararı Yayın Kurulu tarafından verilir. Yazıları değerlendiren danışman adları yazarlara bildirilmez. Yeterli görülmeyen yazıların danışman önerileri doğrultusunda geliştirilmesi genel yaklaşımdır. Amaçlanan düzeye erişilemeyen yazılar reddedilir.
5. Yazardan, yazının daha önce “dergi makalesi veya kitap bölümü olarak yayımlanmamış” olduğunu belirten imzalı bir bildirim alınır. Yayın Kurulu, yazının ufak tefek değişikliklerle başka bir dergide/kitapta yayımlanmış olduğu ya da intihal vb bir başka etik ihlali bulunduğu kanısına ulaşırsa, yalnızca o yazı değil, o yazarın hiçbir yazısı yayımlanmaz.
6. Daha önce bir konferansa bildiri olarak sunulmuş olan bir çalışmayı geliştirerek aktaran yazılar yayımlanabilir. Bu durumda, daha önce sunulduğu konferans, birinci sayfada dip not olarak belirtilir.
7. Ayrıca, yazar(lar) tarafından imzalanmış, yazının telif hakkının TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası’na devredildiğini bildiren bir belgenin yazı ile birlikte gönderilmesi istenir.

 TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

*Technical Journal  
of  
Turkish Chamber of Civil Engineers  
Volume 33 Number 3 May 2022*

Cilt 33 Sayı 3 Mayıs 2022



**TMMOB**  
**İnşaat Mühendisleri Odası**

Necatibey Cad. No: 57, Kızılay 06440 Ankara  
Tel: 0.312.294 30 00 - Faks: 294 30 88  
E-posta: imo@imo.org.tr - www.imo.org.tr

**Sahibi:**

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası adına  
Taner YÜZGEÇ

**Yazı İşleri Müdürü:**

Özer AKKUŞ

Cilt 33 - Sayı 3 - Mayıs 2022

İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın.

Baskı tarihi: 1 Mayıs 2022 / 800 adet basılmıştır.

Yayın Kurulu'nun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.

**ISSN: 1300-3453**

Teknik Dergi

- 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
- TR Dizin

tarafından taranmaktadır.

Teknik Dergi, özgün bilimsel araştırmalar ile ilginç uygulama çalışmalarına yer veren ve bu niteliği ile hem araştırmacılara hem de uygulamadaki mühendislere seslenmeyi amaçlayan hakem sistemini etkin kullanan açık erişimli bir dergidir.

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

## Editör:

Tuğrul TANKUT

## Yardımcı Editörler:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Gürkan Emre GÜRCANLI

Alper İLKİ

Kutay ORAKÇAL

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Emine Beyhan YEĞEN

## Yayın Sekreteri:

Cemal ÇİMEN

## Danışma Kurulu:

Prof. M. Aral, ABD

Prof. D. Arditi, ABD

Prof. A. Aydilek, ABD

Prof. K. Beyer, İsviçre

Prof. N. Çatbaş, ABD

Prof. M. Çetin, ABD

Prof. M. Dewoolkar, ABD

Prof. T. Edil, ABD

Prof. K. Elwood, Yeni Zelanda

Prof. M. Fardis, Yunanistan

Prof. G. Gazetas, Yunanistan

Prof. P. Gülkan, Türkiye

Prof. J. Han, Türkiye

Prof. I. Hansen, Hollanda

Prof. T. Hartmann, Almanya

Prof. F. Imamura, Japonya

Prof. T. Kang, Kore

Prof. K. Kusunoki, Japonya

Prof. S. Lacasse, Norveç

Prof. R. Al-Mahaidi, Avustralya

Prof. K. Özbay, ABD

Prof. H. Özer, ABD

Prof. G. Özmen, Türkiye

Prof. S. Pampanin, İtalya

Prof. A. J. Puppala, ABD

Prof. M. Saatçioğlu, Kanada

Prof. C. Santamarina, Suudi Arabistan

Prof. S. Sheikh, Kanada

Prof. E. C. Shin, Güney Kore

Prof. J. Smallwood, Güney Afrika

Prof. M. Sümer, Türkiye

Dr. H. A. Şentürk, Türkiye

Dr. S. S. Torisu, Japonya

Prof. E. Tutumluer, ABD

Prof. M. Tümay, ABD

## Danışmanlar:

Bu liste, son iki yayın yılında danışmanlık yapmış olan kişileri içerir ve her Ocak sayısında yenilenir.

Şükran AÇIKEL	Halil İbrahim BURGAN	Ilgın GÜLER	Derviş Volkan OKUR	Kerem TAŞTAN
Merve AÇIKGENÇ	Erdem CANBAY	Hamza GÜLLÜ	Mehmet Hakkı	Gökmen TAYFUR
ULAŞ	Zekai CELEP	Gürkan GÜNAY	OMURTAG	Beytullah TEMEL
Stileyman ADANUR	Cihan CENGİZ	Taylan GÜNAY	Engin ORAKDÖĞEN	Rasim TEMÜR
Ali Mardani	Halim CEYLAN	Murat GÜNAYDIN	Şeref ORUÇ	Egemen TEOMETE
AGHABAGLOU	Hüseyin CEYLAN	Samet GÜNER	Akın ÖNALP	Serdal TERZİ
Perviz AHMEDZADE	Ömer CİVALEK	Ülker GÜNER BACANLI	Halil ÖNDER	Berrak TEYMUR
Bülent AKBAŞ	Ayşe COŞKUN BEYAN	Oğuz GÜNEŞ	Jülide ÖNER	Hüseyin Onur TEZCAN
Rağıp AKBAŞ	Melih ÇALAMAK	Mehmet Şükrü GÜNEY	Bihrat ÖNÖZ	Mesut TİĞDEMİR
Sami Oğuzhan AKBAŞ	Gülben ÇALIŞ	Tuba GÜRBÜZ	Ali Hakan ÖREN	Şahnaz TİĞREK
Şeref Doğuşcan AKBAŞ	Süheyla Pelin	BÜYÜKKAYIÇI	Mustafa ÖZAKÇA	Salih TİLEYLİOĞLU
Rıfat AKBIYIKLI	ÇALIŞKANELLİ	Melike GÜREL	Ceyhan ÖZÇELİK	Vedat TOĞAN
Özge AKBOĞA KALE	Dilay ÇELEBİ	İbrahim GÜRER	Yiğit ÖZÇELİK	Onur Behzat TOKDEMİR
Hüseyin AKBULUT	Tevfik Kutay	Aslı Pelin GÜRGÜN	Gökhan ÖZDEMİR	İrem Dikmen Toker
Sarven AKCELYAN	ÇELEBİOĞLU	İman HAJİRASOULİHA	Osman Nuri ÖZDEMİR	TOKER
Buru AKÇAY	Ahmet Ozan ÇELİK	Soner HALDENBİLEN	Halit ÖZEN	Cengiz TOKLU
ALDANMAZ	Oğuz Cem ÇELİK	Mustafa HATİPOĞLU	Murat ÖZEN	Ali TOPAL
Cihan Taylan AKDAĞ	Semet ÇELİK	Bo-Tao HUANG	Pelin ÖZENER	İlker Bekir TOPÇU
Cem AKGÜNER	Hilmi Berk ÇELİKOĞLU	Zeynep İŞİK	Cem ÖZER	Cem TOPKAYA
Muhammet Vefa	Mahmut ÇETİN	Hande İŞİK ÖZTÜRK	Hasan ÖZER	Kamile TOSUN
AKPINAR	Mecit ÇETİN	Sabriye Banu İKİZLER	Serkan ÖZGEN	FELEKOĞLU
Atakan AKSOY	Gökhan CEVİKBİLEN	Rağıp İNCE	Eren Arman ÖZGÜVEN	Gökçe TÖNÜK
Hafzullah AKSOY	Erdal ÇOKÇA	Recep İYİSAN	Hakkı Oral ÖZHAN	Ülgen Mert TUĞSAL
Hakan AKSU	İsa ÇÖMEZ	Nihat KABAY	M. Hulusi ÖZKUL	Gürsoy TURAN
Tülay AKSU ÖZKUL	İsmail DABANLI	Mehmet Sedat	Zeynep Huri ÖZKUL	Ö. Tuğrul TURAN
Büşra AKTÜRK	Ömer DABANLI	KABDAŞLI	BİRGÖREN	Cüneyt TÜZÜN
Zuhal AKYÜREK	Atilla DAMCI	Mehmet Rifat	ÖZKULA	Eren UÇKAN
Uğurhan AKYÜZ	Yakup DARAMA	KAHYAOĞLU	Ahmet ÖZTOPAL	Ergin ULUTAŞ
Sadık ALASHAN	Osama M.F. DAWOUD	Özkan KALE	Sadık ÖZTOPRAK	Berna UNUTMAZ
Cenk ALHAN	Tayfun DEDE	Volkan KALPAKÇI	Turan ÖZTURAN	Tayfun UYGUNOĞLU
Ayşe Burcu ALTAN	Özgür DEĞERTEKİN	Murat KARACASU	Hasan Tahsin ÖZTÜRK	Halvan Emre UZ
SAKARYA	Abdullah DEMİR	Halil KARAHAN	Mustafa ÖZUYSAK	Nihal UZCAN ERATLI
Sinan ALTIN	Cem DEMİR	Cenk KARAKURT	Ahmet Onur PEHLİVAN	İbrahim Mert UZUN
Adlen ALTUNBAŞ	Emre DEMİR	Mustafa KARASAĞIN	Onur PEKCAN	Deniz ÜLGEN
Ahmet Can ALTUNBAŞ	Munise Didem	Zülküf KAYA	Seval PINARBAŞI	Mehmet ÜLKER
Ahmet Can ALTUNİŞİK	DEMİRBAŞ	Hasan Ahmed KAZMEE	ÇUHADAROĞLU	Mehmet Barış Can
Yalçın ALVER	Ender DEMİREL	Mustafa Kubilay	Elişan Filiz PİROĞLU	ÜLKER
Bahadır ALYAVUZ	Mehmet Cüneyd	KELEŞOĞLU	Selim PUL	Yurdanur ÜNAL
Özgür ANIL	DEMİREL	Elçin KENTEL	Selçuk SAATÇI	Cüneyt VATANSEVER
Necati ARAS	Fatih DİKBAŞ	Havvanur KILIÇ	Selman SAĞLAM	Syed Tanvir WASTI
Yalın ARICI	Seyyit Ümit DİKMEN	Young Hoon KIM	Mehmet SALTAN	Mehmet YAKUT
Yalçın ARISOY	Ali Ersin DİNÇER	Ufuk KIRBAŞ	İlyas SARIBAŞ	Mehmet Cem YALÇIN
Musa Hakan ARSLAN	İsmail DURANYILDIZ	Veysel Şadan Özgür	Metin SARIGÖL	Aslı YALÇIN
Deniz ARTAN İLTER	Selim DÜNDAR	KIRCA	Afşin SARITAŞ	DAYIOĞLU
Şenay ATABAY	Nurhan ECEMİŞ ZEREN	Cem KIRLANGIÇOĞLU	Altuğ SAYGILI	Ahmet Cevdet
Ali Osman ATAHAAN	Volkan Ş. EDİGER	Güven KIYMAZ	Serdar SELAMET	YALÇINER
Hakan Nuri ATAHAAN	Muhammet Emin	Gökhan KIRKİL	Senem SEYİS	İsmail Özgür YAMAN
Hakan Nuri ATAHAAN	EMİROĞLU	Kasım KOÇAK	Alper SEZER	Arcan YANIK
Bekir Özer AY	Murat Altuğ ERBERİK	Salih KOÇAK	Osman ŞİVRİKAYA	Mert Yücel YARDIMCI
Ersin AYDIN	Ali ERCAN	Niyazi Uğur KOÇKAL	Behzad SOLTANBEİĞİ	Ufuk YAZGAN
Gökçe AYDIN	Hakan ERDEM	Mehmet Melih KOŞUCU	Celal SOYARSLAN	Amil YAZICI
Hakan AYGÖREN	Sinan Turhan ERDOĞAN	Baha Vural KÖK	Serdar SOYÖZ	Halit YAZICI
Mustafa Tamer AYVAZ	Ramazhan Cüneyt	Mete KÖKEN	Rifat SÖNMEZ	Seda YEŞİLMEN
İhsan Engin BAL	ERENOĞLU	Şerife Yurdağul KUMCU	Tayfun Altuğ SÖYLEV	Tahsin Alper YIKICI
Selim BARADAN	Esin ERGEN	Murat KURUOĞLU	Erol ŞADOĞLU	İrem Zeynep YILDIRIM
Eray BARAN	PEHLEVAN	Akif KUTLU	Güvenç ŞAHİN	Mehmet
Türkay BARAN	Gökmen ERGÜN	Abdullah KÜRKCÜ	Olcay ŞAHİN	YILDIRIMOĞLU
Bekir Oğuz BARTIN	Bülent ERKMEN	Hilmi LUŞ	Ömer Lütfi ŞEN	Abdülazim YILDIZ
Eyüp Ensar BAŞAKIN	Barış ERKUŞ	Kasım MERMERTAŞ	Burak ŞENGÖZ	Koray Kamil YILMAZ
Özgür BAŞKAN	Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ	Mehmet Murat MONKUL	Özkan ŞENGÜL	Mehmet YILMAZ
Niyazi Özgür BEZGİN	Burak FELEKOĞLU	Hamid MORTEZAİE	Aynur ŞENSOY	Mustafa Tolga YILMAZ
Senem BİLİR	Okan FISTIKOĞLU	Yetiş Şazi MURAT	ŞORMAN	Mustafa Tuğrul YILMAZ
MAHÇİÇEK	Abdullah GEDİKLİ	Sepanta NAİMİ	Karın ŞEŞETKAN	İsmail YÜCEL
Gökçen BOMBAR	Ergun GEDİZLİOĞLU	Öcal NECMİOĞLU	Okan ŞİRİN	Ömer YÜKSEK
Burak BOYACI	Ömer GİRAN	Sinan Melih NİĞDELİ	Ali Ünal ŞORMAN	Shaban Isamel Albrka Ali
İlknur BOZBEY	Zehra Canan GİRGİN	Elif OĞUZ	Gülüm TANIRCAN	ZANGENA
Zafer BOZKUŞ	Ilgın GÖKAŞAR	Fuad OKAY	Serhan TANYEL	Abdullah Can ZÜLFİKAR
Atıl BULU	Serdar GÖKTEPE	Umut OKKAN	Yüksel TAŞDEMİR	
Buru BURAK BAKIR	Fazlı Erol GÜLER			

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

Cilt: 33 Sayı: 3 Mayıs 2022

## İÇİNDEKİLER

**Prof. Dr. M. SÜHEYLAKMAN**

Yapı Bilgi Modellemesi Kullanımının Sürdürülebilir Yeşil Bina Projeleri  
Üzerine Etkileri..... 11857  
**Aşlı Pelin GÜRGÜN, Kerim KOÇ, Şenay ATABAY**

Otopark Seçim Davranışlarını Etkileyen Faktörler: İzmir Örneği ..... 11887  
**Mervegül UYSAL, Yalçın ALVER**

Ultrasonik Yöntemler ile Çelik-lif Takviyeli Betonda Eğilme Çatlaklarının  
Derinlik Tayini..... 11903  
**Ahmet Serhan KIRLANGIÇ**

Deprem Bölgesinde Bulunan Mevcut Bir Tank Yapısının Geoteknik  
Değerlendirmesi..... 11921  
**E. Ece ESELLER-BAYAT, Onur DENİZ**

Betonarme Kiriş ve Kolonların Tersinir Çevrimsel Yükler Altındaki Kesme  
Dayanımına Betonun Katkısı Üzerine Deneysel Bir inceleme..... 11955  
**Cem AYDEMİR, Müberra ESER AYDEMİR, Güray ARSLAN**

Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı..... 11979  
**Havvanur KILIÇ, Onur DEMİRCİ**

Yüksek Hızlı Tren Üst Yapı İhaleleri İçin Teklif Değerlerinin Oyun Teorisi ile  
Belirlenmesi..... 12003  
**Hacı Mehmet ALAKAŞ, Cem KACAR, Emre YAZICI**





## Prof. Dr. M. SÜHEYL AKMAN



6 Şubat 2022 günü aramızdan ayrılan değerli arkadaşımız ve meslektaşımız Prof. Dr. M. Süheyl Akman'ı sevgi ve saygıyla anıyoruz.

Teknik Dergi Yayın Kurulu'nda yirmi yıla yakın bir süre görev yapan Prof. Akman 2021 yılında oluşturulan Danışma Kurulu'nda da yer almıştır. Bu görevleri yanı sıra, yayımlanmak üzere Dergiye gönderilmiş çok sayıda

yazıyı danışman olarak değerlendirmiştir.

Prof. Akman 15 Mart 1930'da İstanbul'da doğmuştur. Temel eğitimini Galatasaray Lisesi'nde tamamlamış, inşaat mühendisliği eğitimi gördüğü İstanbul Teknik Üniversitesi'nden 1955'de mezun olmuştur. Bir süre İmar ve İskân Bakanlığı'nda mühendis olarak çalıştıktan sonra, 1961 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Kürsüsüne asistan olarak girmiştir. Bu kürsüde gerçekleştirdiği akademik kariyeri sırasında 1967'de doktorasını almış, 1972'de doçent, 1979'da profesör, 1997'de emekli olmuştur. Bu süre içinde, EPFL, Lozan İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak görev yapmıştır (1968-70). Uzun süre RILEM (Uluslararası Yapı Malzemesi Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği) üyesi olarak görev yapmış, üç teknik komite çalışmalarına yaptığı katkılar nedeniyle kendisine Takdir Belgesi (Recognition) verilmiştir (1979-97).

Yapı malzemesi, deney teknikleri, onarım ve güçlendirme gibi alanlarda on kitap/ders notu yazmış olan Prof. Akman'ın çok sayıda bilimsel ve teknik makalesi/bildirisi bulunmaktadır.

Prof. Akman öğretim üyeliği yanı sıra, çeşitli yönetsel ve örgütsel etkinliklerde görev almıştır. TÜBİTAK İnşaat ve Çevre Teknolojileri Araştırma Grubu üyeliğinde bulunmuş (1994-2002), İnşaat Mühendisleri Odası Ulusal Beton Kongrelerinde Bilim Kurulu Başkanlığı (1989-2007) yapmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yönetim Kurulu üyeliğinde (1972-79) ve İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi Yayın Kurulu üyeliğinde (1981-93) bulunmuştur.

Prof. Akman, geleneksel İstanbul görgüsünü yansıtan, "İstanbul Beyefendisi" tanımına uyan bir kişiydi; kibarlığı ve zarafetiyle dikkati çekerdi. Çalışkanlığı ve güvenilir karakteri yanı sıra ince espri anlayışı, onunla hem verimli hem keyifli iş birlikleri yapılabilmesini sağlardı. Yazı değerlendirmelerinde sabırlı, titiz ve en önemlisi yapıcı yaklaşımı göze çarpardı; yazara yazıyı geliştirme, iyileştirme olanağı vermeden yazıyı reddetmez, olaya bir eleştirilen gibi değil, adeta bir tez hocası gibi yaklaşır, neler yapması gerektiğini yazara tek tek anlatırdı.

Yayın Kurulu, Prof. Dr. M. Süheyl Akman'ın İMO Teknik Dergi'ye yaptığı paha biçilemez katkıları takdir ve teşekkürle dile getirirken, ailesine en içten başsağlığı dileklerini sunar.

Prof. Dr. Tuğrul Tankut  
Yayın Kurulu Adına



# Yapı Bilgi Modellemesi Kullanımının Sürdürülebilir Yeşil Bina Projeleri Üzerine Etkileri

Ash Pelin GÜRGÜN<sup>1</sup>

Kerim KOÇ<sup>2</sup>

Şenay ATABAY<sup>3</sup>

## ÖZ

Doğal kaynakların hızla tükenişi ve kontrolsüz artan nüfus gibi sebepler her alanda olduğu gibi, inşaat sektöründe de sürdürülebilirliği zorunlu hale getirmiştir. Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) uygulamaları bu amaca ulaşabilmek için, inşaat sektöründe son yıllarda önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki ana bölümde YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerindeki avantajları incelenmiştir. İlk bölümde YBM kullanımının avantajları etkili oldukları proje aşamalarına göre değerlendirilmiştir. İkinci bölümde ise, bu aşamalarda YBM'nin inşaat projelerinin maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtlarına sağladığı katkılar irdelenmiştir. Analizler sonucunda, farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik en önemli avantaj olarak saptanmış, bu avantajlarının proje aşamaları özelinde değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı bilgi modellemesi, yapılarda sürdürülebilirlik, proje aşamaları, proje kısıtları.

## ABSTRACT

### Impacts of Using Building Information Modelling (BIM) in Sustainable Green Building Projects

Rapid consumption of natural resources and uncontrolled increasing population made sustainability necessary in the construction industry, as in many other areas. Building Information Modeling (BIM) applications have been used as an important tool in the construction industry in recent years to achieve this goal. In this study, the advantages of using BIM in sustainable green building projects were investigated in two main parts. In the

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 6 Nisan 2020 günü ulaşmıştır. 18 Ocak 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.715574>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - apelin@yildiz.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-0026-4685>

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - kerimkoc@yildiz.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-6865-804X>

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - satabay@yildiz.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-0026-4685>

first part, the advantages of using BIM in sustainable projects according to effective project phases were examined. In the second part, contributions of BIM to cost, duration, scope and quality constraints were analyzed. The results indicate that interdisciplinary collaborating environment has been identified as the most important advantage and these advantages could vary according to project phases.

**Keywords:** Building information modelling, sustainable buildings, project phases, project constraints.

## 1. GİRİŞ

Dünyada son yıllarda hızla artan nüfus ile birlikte enerji talebi de hızlanarak artmaktadır. Bu talep nedeniyle artan enerji tüketimi sonucu ortaya çıkan çevresel faktörlerin baskısı ve enerji maliyetlerindeki artış, enerji kullanımıyla ilgili bazı faktörlerin dengelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yapılan tahminlere göre gelecekte de enerji ihtiyacı artarak devam edecektir. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak fosil yakıtların oluşum süreci kullanım hızından milyonlarca kat daha hızlı olduğundan, gelecekteki ihtiyacın karşılanamayacağı aşikârdır. Ayrıca, fosil yakıtların çevreye olumsuz etkisi de vahim boyutlara ulaşmaktadır. Günümüzde, zararlı gaz salımının azaltılması ve artan tüketim talebinin karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılması zorunlu hale gelmiştir [1].

Enerji kaynaklarının yaklaşık %40'ının, su kaynaklarının yaklaşık %25'inin tüketiminden ve dünya sera gazı salımının yaklaşık üçte birinden sorumlu olması nedeniyle binalar sürdürülebilirlik açısından öncelikli olarak ele alınması gereken alanların başında yer almaktadır [2]. Ancak, sürdürülebilir yapılar inşa edilmeden önce mutlaka hedeflenen performans ölçütlerini sağlayıp sağlamadıkları kontrol edilmelidir. Aksi takdirde büyük maliyet ve zaman kayıpları meydana gelebilmektedir. Yapılar, sürdürülebilirlik açısından temel olarak enerji tüketimi, gün ışığı alımı, kendisi ve çevresi ile güneş ve gölge ilişkisi, ısıtım kazanımı, rüzgâr kullanımı ve doğal havalandırma alanlarında analiz edilebilmektedir [3]. Bunların yanında etkili atık yönetimi, sürdürülebilir malzeme kullanımı ve malzeme geri dönüşümü sürdürülebilir yapılaşma için önerilen stratejiler arasındadır [4]. Örneğin, %80, %75 ve %65 geri dönüşüm oranlarıyla Danimarka, Hollanda ve Japonya sürdürülebilir yapılaşmanın başarılı bir şekilde yürütüldüğü ülkeler arasında gösterilmektedir [5]. Ayrıca sürdürülebilir ya da genel olarak yeşil binalar kullanıcıların bina yaşam döngüsü boyunca maruz kalacağı iç hava kalitesini de artırmaktadır [6]. Geleneksel olarak bu gibi performans analizleri, fiziksel maketler ve laboratuvar koşullarında gerçekleştirilebilmekteyken, günümüzde ise binaların fiziksel gerçeklikte tüm alfasayısal (malzeme, maliyet, fiziksel çevre kontrolü) veri seti ile modellenmesi ve ardından performanslarının analiz edilmesi için sayısal teknikler mevcuttur. Bu sayısal çalışma biçimlerinden yapı bilgi modellemesi (YBM) yazılımları, binaların tüm grafik (geometri, biçim) ve alfasayısal verisinden oluşan bir 3B model meydana getirerek bu modelin proje katılımcıları tarafından yapının tüm yaşam döngüsü boyunca farklı şekillerde kullanımını sağlar [7], [8].

Bünyesinde barındırdığı birçok araç ve kolaylık ile YBM kullanımı inşaat sektörünün çevre üzerindeki negatif etkisinin azaltmayı ve daha sürdürülebilir bir gelişmenin yardımcı olmasını hedeflemektedir [9], [10]. YBM'nin özellikle sürdürülebilir yeşil bina projelerinde kullanımı sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için çeşitli avantajlar sağlayacaktır. Wu ve Issa [11] YBM'nin sürdürülebilir yeşil bina projelerinde kullanımının inşaat firmaları için bir

sinerji yaratacağına, ortaya atılan Yeşil YBM (Green BIM) kavramıyla birlikte işaret etmiştir. Ayrıca, atık azaltımı ve tasarım optimizasyonu gibi sürdürülebilir projelerde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için geleneksel projelerden daha önemli hale gelen kavramların YBM kullanımı ile başarılı bir şekilde ele alınabileceği söylenebilir [12], [13]. Bu nedenle bu çalışmada, sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının proje aşamaları ve proje kısıtları hesaba katılarak sağladığı avantajların değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Çalışmada ulaşılmaya çalışılan hedefler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Proje aşamaları bazında sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının avantajlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi,
- YBM kullanımının hangi proje aşamalarına hangi proje kısıtı özelinde daha çok avantaj sağladığının belirlenmesi,
- Değişen katılımcı özelliğine göre sonuçların değişip değişmediğinin belirlenmesi,
- Sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının proje kısıtlarına sağladığı avantajların proje aşamaları özelinde değişip değişmediğinin belirlenmesi,
- Sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının proje aşamalarına sağladığı avantajların proje kısıtları özelinde değişip değişmediğinin belirlenmesi.

Bu çalışma genel olarak iki ana bölümde ele alınmıştır. Birinci bölümde YBM kullanımının sürdürülebilir proje üretimindeki avantajları, etkili oldukları proje aşamalarına (fizibilite, tasarım, ihale ve sözleşme, inşaat, ve işletme ve yönetim) göre belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. İnşaat sektöründe çalışan, konu ile ilgili uzman kişilerle gerçekleştirilen anket çalışması ile sürdürülebilirlik ve YBM ilişkisi derinlemesine incelenmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. İkinci bölümde ise bu aşamalarda YBM'nin inşaat projelerinin maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtlarına sağladığı katkılar irdelenmiştir. Her ne kadar YBM ve sürdürülebilirlik diğer birçok çalışmada incelenmiş ise de, proje aşamaları ve kısıtları bir arada hesaba katılarak, proje aşamaları ve kısıtları üzerinde sağlanan avantajların detaylı olarak analiz edildiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Özellikle sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının proje aşamaları bazında sağladığı faydaların proje kısıtlarına göre farklılaşıp farklılaşmadığı ve proje kısıtları bazında sağladığı faydaların proje aşamalarına göre farklılaşıp farklılaşmadığı literatürde eksikliği saptanan bir araştırma konusudur. Bu çalışmanın literatürde karşılaşılan benzer çalışmalardan ayrıldığı nokta burasıdır. Hangi proje aşamasında YBM kullanılmasının ne gibi avantajlar sağlayacağı, aşamalar ve kısıtların birbirinden ayrı düşünülüp düşünülmediği yatırım kararı eşliğinde olan ve etkin proje yönetimi yapmak isteyen şirketler için büyük önem arz etmektedir. Her proje aşaması için YBM kullanacak kaynağı olmayan, bugüne kadar genellikle geleneksel yöntemlerle ilerleme kat etmeye çalışmış inşaat şirketleri, sürdürülebilirlik hedefleri kapsamında en uygun proje aşamalarını seçip bu aşamaları YBM kullanımı için birer başlangıç noktası olarak seçebilir. Bununla birlikte maliyet, süre, kapsam ve kalite genel olarak kabul görmüş proje kısıtları olarak karşımıza çıkmakta ve hangi proje aşamasında ne gibi kısıtların YBM kullanımı ile rahatlatılabileceğinin analizi, gelişen dünyada sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için büyük önem taşımaktadır. Bu şekilde sürdürülebilir yeşil bina projelerine ve bununla birlikte yeşil bina sertifikalarına, özellikle maliyet olmak üzere tüm proje kısıtları kapsamında önyargılı yaklaşan firmalar, çalışma bulguları ile firma hedeflerini birleştirerek sürdürülebilirlik zinciri içinde bir halka olma gayreti içine girebilirler.

## **2. YBM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK**

YBM en temel tanımı ile bir yapının fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin dijital olarak tasvir edilmesidir [14], [15]. Başka bir tanıma göre ise, kavram proje öncesi, yapıyı oluşturan tüm elemanların özelliklerinin sayısal olarak inşa edilebildiği akıllı bir 3B sanal bina modelinin düşük risk ve yüksek değerle yapımını optimize etmek olarak belirtilmiştir [16]. YBM aynı zamanda bir yapının yaşam döngüsü süresince gerekli bilgi oluşturma ve yönetme süreçleri olarak da değerlendirilebilir [17]. İnşaat sektörüne radikal bir inovasyon getiren YBM teknolojisi, firmalara çeşitli alanlarda geniş fırsatlar sunmaktadır [18]. Görselleştirme, koordinasyon, çeşitli senaryo analizleri yapabilme ve tedarik zinciri entegrasyonu YBM uygulamalarının önde gelen sebeplerinden olarak gösterilmektedir [19]. Sürdürülebilir binalar, yaşam döngüsünde çevre ve insan sağlığı üzerindeki kötü etkileri azaltmak, su, malzeme ve enerjiyi verimli kullanmak için; arazi seçimi, yerleşim, tasarım, taşıyıcı sistem, işletme, bakım ve yıkılma süreçlerinin etkili bir şekilde tasarlanması ile ortaya çıkan ürünler olarak gösterilebilir. Sürdürülebilirlik, insanların bugünkü ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılamaları noktasında tehlike oluşturmaktan kaçınması olarak tanımlanmaktadır [20]. Bu noktada, inşaat sektörünün çevre ve toplum üzerindeki yoğun etkisi de düşünüldüğünde [21], sürdürülebilir yeşil bina kavramı ve bu hususta yapılacak ilerlemeler büyük önem arz etmektedir. Bunun yanında, sürdürülebilirliğin taşınmaz değerini artıran özelliklerden biri olduğu yapılan araştırmalarla desteklenmiştir [22].

İnşaat sektöründe süregelen uygulamalar tasarım takımının işbirliği içinde çalışmasına engel olmakta, ve bunun sonucunda sıkça yanlış anlaşılmalara, inşaat sırasında pahalya mal olan değişikliklere ya da etkin şekilde işlemeyen, fazla enerji tüketen, sürdürülebilir olmayan yapılara neden olmaktadır [2]. Sürdürülebilir yapı tasarımında YBM kullanımı, daha etkin proje geliştirme ve uygulama yönünde sürece birçok açıdan destek sağlama potansiyeline sahiptir. YBM bilgi entegrasyonu sağladığı için tasarım aşamasında sürdürülebilirlik faktörlerini hesaba katmayı mümkün kılmakta, verimliliğin artması ve inşaat atıklarının azalması noktasında projelere fayda sağlamaktadır [23], [24]. YBM tabanlı yazılımlar ile yapı modeli performansını ölçen simülasyon ortamları oluşturulabilmekte, sayısal ve grafik çıktılar elde edilebilmektedir. Böylece, yapı inşa edilmeden önce, sanal ortamda oluşturulan 3B model ile binanın performansı belirlenerek problemler tespit edilebilmekte ve bu problemlere erken aşamada çözüm üretilerek, maliyet, süre, kapsam ve kalite ile ilgili olan sorunlar önlenmektedir. Firmaları YBM kullanmaya iten en önemli faktörler arasında gösterilen görselleştirme ve koordinasyonun [25], özellikle sürdürülebilir yeşil bina projeleri için yüksek kalite ve minimum atık çözümlerine sağlayacağı katkılar düşünüldüğünde YBM özellikle bu tip projeler için bir gereklilik halini almaktadır [13].

Sürdürülebilir inşaat projeleri, sağlıklı bir yapıyı çevre oluşturmak ve yönetmek için kaynak verimliliğini ve ekolojik kaygıları hesaba katarak gerçekleştirilen projelerdir [26]. Sürdürülebilir inşaat projelerinin uygulamaları ise çeşitli ülkeler tarafından geliştirilip kullanılan LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ve BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) gibi yeşil bina sertifikaları ile yaygınlık kazanmıştır [27]. Başka bir tanıma göre ise sürdürülebilir inşaat, yeşil bina sertifikası kazanmanın da proje hedefleri arasında olduğu inşaat projelerinin tasarım, inşaat ve işletme aşamalarındaki süreçlerini kapsar [28] ve ilgili projeler sürdürülebilir yeşil bina projeleri olarak adlandırılır. YBM kullanımı sürdürülebilir yeşil bina projelerine atık, karbon ayak izi, enerji ve su tüketimi, malzeme geri kullanımı ve yenilenebilir enerji kullanımı için

çeşitli çözümler sunarak katkı sağlamaktadır [29]. Her ne kadar sürdürülebilirlik kavramı YBM literatüründeki çalışmaların merkezinde yer almasa da [30], YBM ve sürdürülebilirlik farklı birçok çalışmada birlikte kullanılmıştır. Örneğin, Reeves vd. [31] yeşil bina sertifikası olan ve olmayan iki binanın enerji performansını, aydınlatma, enerji kullanımı ve doğal havalandırma ekseninde yapı enerji modeli kullanarak karşılaştırmış ve sürdürülebilirlikle YBM'nin birlikte kullanılabilceğini göstermiştir. Edwards vd. [32] YBM içerisindeki sürdürülebilirlik araçlarını bir yenileme projesi kapsamında inceleyerek sürdürülebilirlik gereksinimlerinin karşılanması için gerekli YBM araçlarını ilgili yeşil bina sertifika kategorilerine atamıştır. Jalaei vd. [33] tarafından geliştirilen modelde erken tasarım aşamasında sürdürülebilir yeşil bina sertifikaları için gerekli alınabilecek puanlar tahmin edilmeye çalışılmıştır. Carvalho vd. [34] bina sürdürülebilirlik değerlendirilmesi için YBM'nin etkilerini analiz etmiş ve YBM'nin sadece sürdürülebilir yeşil binalara yönelik bir yaklaşım olmadığını fakat bu kapsamda büyük bir potansiyelinin olduğunu belirtmiştir. Ölçer [35] iklim krizinde YBM'nin üstleneceği rolü araştırmış ve binanın karbon üretimini azaltmak için gerekli değişiklikler ve işletme aşamasında çevresel performansı yöneten analizler ile YBM'nin iklim sorunlarına olumlu katkı sağlayacağını ifade etmiştir. Chong vd. [36] tarafından yapılan literatür taraması sonucunda sürdürülebilirlik kriterlerini belirlemek için yeni YBM araçlarına ihtiyaç duyulduğuna ulaşılmıştır. Olawumi ve Chan [37] tarafından gerçekleştirilen faktör analizi sonucunda ise YBM ve sürdürülebilirliğin ortak kullanılmasının avantajlarının beş ana faktörden oluştuğu tespit edilmiştir. Bu faktörler özetle: i) verimlilik, ii) performans ve bilgi, iii) teknik, iv) finansal ve v) yasal avantajlardır.

Proje yaşam döngüsü özelinde YBM kullanımı ile ilgili literatürde birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu kapsamda, Bynum vd. [25] YBM kullanımını inşaat proje aşamaları özelinde incelemiş ve çalışmaya katılan uzmanlar YBM kullanımının optimum olduğu aşamaları şematik tasarım, tasarım öncesi ve tasarım olarak değerlendirmiştir. Oldukça az bir katılımcı ise YBM'nin inşaat dokümantasyon, inşaat öncesi ve işletme aşamalarında optimum fayda getireceğine işaret etmiştir. Becerik-Gerber ve Kensek [38] YBM'nin kritik kullanım alanlarını incelemiş ve tüm proje aşamalarında tek bir YBM kullanımının YBM uygulamaları arasında en önemli yere sahip olduğuna değinmiştir. Lu vd. [39] yaptığı literatür taraması sonucunda YBM ve Yeşil binaları anlamak için üç temel yaklaşımın birlikte uygulanması gerektiğine dikkat çekmiştir: proje aşamaları, yeşil bina uygulamaları ile sahip olunan özellikler ve YBM özellikleri. Çalışmada ayrıca her bir proje aşamasında (Tasarım, inşaat, işletme, yenileme) YBM kullanımının sağlayacağı katkılar detaylıca verilmiştir. Marzouk ve Othman [40] bina sürdürülebilirlik sıhhi tesisat performansını YBM kullanarak modellemiş ve YBM kullanımını farklı proje aşamaları bazında sınıflandırmıştır. Li vd. [41] YBM kullanarak binalardaki inşaat aşamasında gerçekleşecek karbon üretimini incelemiş ve YBM'nin aynı amaç doğrultusunda işletme aşamasında da kullanılabilceğine dikkat çekmiştir. Zhou vd. [42] YBM kullanımının faydaları üzerine bir literatür taraması gerçekleştirmiş ve çoğu çalışmanın proje aşamaları özelinde bir ayırım yapmadan tüm aşamaları göz önünde bulundurduğuna işaret etmiştir. Yapılan literatür taramasında, inşaat projelerinde YBM ve sürdürülebilirlik konularını değişik açılardan inceleyen akademik çalışmalara rastlanmıştır. YBM ve sürdürülebilirlik kavram ve uygulamalarının bir arada ele alındığı çalışmalarda ise, bu çalışmanın odaklandığı şekilde proje aşamaları ve kısıtlarının değerlendirilmesi yapılmamıştır.

### 3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Bu çalışmada, daha önce değinildiği şekilde iki aşamalı olarak tasarlanan analizlerin yapılabilmesi amacıyla gerçekleştirilen anket çalışması için öncelikle kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Scopus ve Google Scholar arama motorlarında “Yapı bilgi modelleme”, “Sürdürülebilir inşaat”, “Yeşil bina”, “Avantaj”, “Fayda” vb. anahtar sözcükleri kullanılarak arama yapılmış ve kapsamı bu çalışmanın kapsamına en yakın olduğu değerlendirilen 7 çalışma detaylıca incelenmiştir (Tablo 1). Bu araştırma sonunda belirlenen avantajlar alt alta sıralanmış ve etkili oldukları proje aşamalarının belirlenmesi için üç profesyonel ile pilot çalışma gerçekleştirilmiştir. Ardından sektörde tecrübeli uzmanlardan görüşlerini alabilmek amacıyla anket çalışmasına başlanmıştır. Sırasıyla önce YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerinde fizibilite, tasarım, ihale ve sözleşme, inşaat, ve işletme ve yönetim aşamalarında sağlayacağı avantajlar hakkında veri toplanmıştır. Daha sonra YBM kullanımının bu proje aşamalarında, maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtlarına olan etkileri ve farklılıkları incelenmiştir. Pilot çalışmasının ardından anketin ilk bölümünde 37 farklı avantaj belirlenmiştir (Tablo 1). Bunların etkili oldukları proje aşamalarındaki katkılarının ortaya çıkarılması amacıyla, katılımcılardan sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının avantajlarını 1-5 ölçeğinde değerlendirmeleri istenmiştir. Çalışmanın akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 1 - Birinci bölüm anket soruları

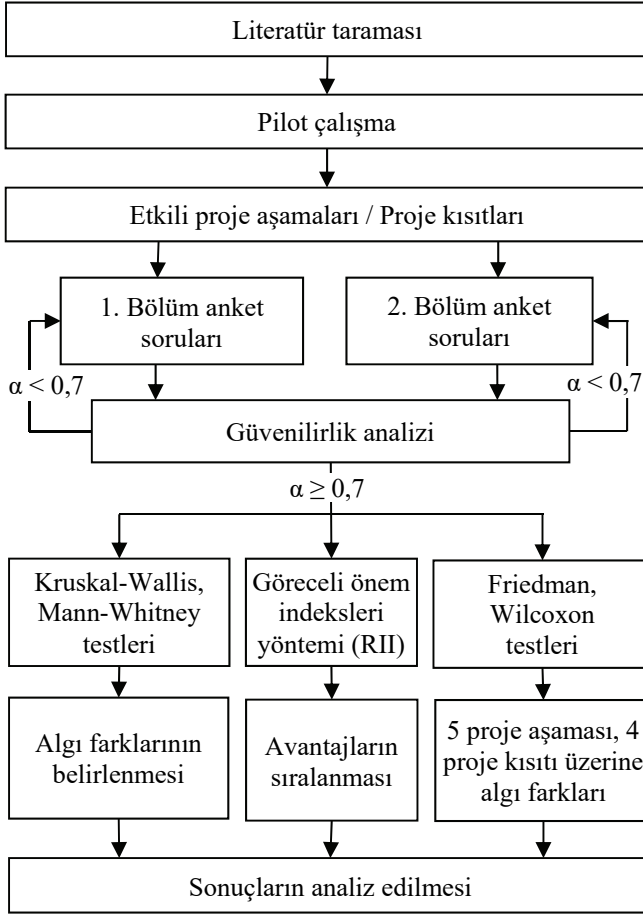
Etkili olduğu proje aşaması	Kod	Avantajlar	A	B	C	D	E	F	G
Fizibilite	FZ1	Proje süresinin azalması	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
	FZ2	Proje karlılığının artması	✓	—	—	—	—	✓	—
	FZ3	5D maliyet tahmini yapabilme	✓	✓	—	✓	✓	✓	—
	FZ4	Detay seviyesi belirleyebilme	—	—	—	✓	✓	—	—
	FZ5	Yeni iş geliştirme kabiliyeti sağlaması	✓	—	—	—	—	✓	✓
Tasarım	TA1	Tasarım hatalarının erken önlenmesi	—	✓	✓	✓	—	✓	✓
	TA2	Nesne tabanlı modelleme yapabilme	—	✓	✓	—	—	✓	—
	TA3	Endüstri temel sınıfı (IFC) tabanlı dosya transferi yapabilme	—	✓	—	—	✓	✓	✓
	TA4	Çakışma kontrolü	✓	✓	✓	✓	—	✓	—
Tasarım	TA6	Tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
	TA7	2D çizimlerin standartlaşması	—	✓	—	—	✓	✓	—
	TA8	Sürdürülebilir bina tasarım kolaylığı	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓



Tablo 1 - Birinci bölüm anket soruları (devam)

Etkili olduğu proje aşaması	Kod	Avantajlar	A	B	C	D	E	F	G
İhale ve Sözleşme	İS1	Maliyet azalması	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
	İS2	6D sürdürülebilirlik analizlerini yapabilme	✓	✓	—	—	✓	✓	✓
	İS3	Otomatik metraj alabilme	—	✓	—	✓	—	✓	—
	İS4	Erken tasarım doğrulaması	—	—	✓	—	✓	—	✓
	İS5	Dokümantasyon hatalarının azalması	✓	✓	—	—	✓	✓	✓
İnşaat	İN1	Tasarım ve inşaat planlama entegrasyonu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	İN2	Yalın inşaatı uygulama kolaylığı	✓	✓	✓	—	✓	—	✓
	İN3	Tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu	—	—	—	—	✓	✓	✓
	İN4	Yanlış imalatların azalması	—	✓	—	✓	—	✓	—
	İN5	Farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	İN6	4D iş programı oluşturabilme	✓	✓	—	✓	—	✓	✓
	İN7	Tümleşik proje yönetimi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—
	İN8	Modelin inşaat aşamasında kullanılabilmesi	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓
	İN9	Çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik	—	✓	—	—	—	✓	✓
	İN10	Her aşamada maliyet çıktısı alabilme	✓	✓	—	—	—	✓	✓
	İN11	Anlaşmazlıkların azalması	✓	✓	—	—	—	✓	✓
	İN12	İnsan kaynağının daha verimli kullanımı	—	✓	—	✓	✓	✓	✓
	İN13	Değişikliklere hızlı adapte olabilme	✓	✓	✓	✓	—	✓	—
İşletme ve Yönetim	İY1	Devir/teslim kolaylığı	✓	✓	—	—	—	—	—
	İY2	Özen isteyen aktivite ve bakım süresinin azalması	✓	—	—	—	—	✓	—
	İY3	İşletme ve yönetim kolaylığı	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓
	İY4	7D tesis & bakım yönetimi yapabilme	✓	✓	—	—	✓	✓	✓
	İY5	Bina kullanım ömrü boyunca kolay bilgi aktarımı	✓	✓	—	✓	—	✓	✓
	İY6	Müşteri memnuniyeti sağlaması	✓	—	✓	—	—	✓	—

Not: A: Bryde vd. [43], B: Kivits ve Furneaux [44], C: Wong ve Fan [13], D: Luth vd. [45], E: Wu ve Issa [11], F: Ghaffarianhoseini vd. [46], G: Olawumi ve Chan [47].



Şekil 1 - Çalışmanın akış şeması

YBM kullanımının avantajları incelenirken, projelerin belirli bir aşamasına odaklanmaktan ziyade, proje yaşam döngüsünün tamamına dikkat çekilmiştir. Bunun bir sebebi tüm proje aşamalarına odaklanarak YBM kullanımının tümleşik avantajlarını incelemek iken, diğer bir sebebi ise bu kapsamda literatürde yapılan çalışmaların eksikliğidir [45]. Bu bağlamda, Eadie vd. [48] tarafından yapılan proje yaşam döngüsü tanımı benimsenmiştir. Bu tanıma göre proje yaşam döngüsü; başlama, fizibilite, tasarım, inşaat, teslim etme, işletme ve bakım aşamalarının tamamını kapsamaktadır. Literatür geneline göre YBM kullanımı ise projelerin beş ana aşamasında yoğunlaşmaktadır. Bu aşamalar; fizibilite [49], [50], tasarım [49], [51], ihale ve sözleşme [49]–[51], inşaat [51], [52], ve işletme ve yönetim [52], [53] şeklinde sıralanabilir. Bununla birlikte maliyet, süre, kapsam ve kalite, YBM kullanımının en önemli başarı kriterleri olarak gösterilmektedir [43]. Ayrıca, bir projenin başarısı, proje üçgeni (iron triangle) olarak da bilinen, merkezinde kalitenin yer aldığı maliyet, zaman ve kapsam kısıtlarına bağlı ölçülür [54]. Çalışmanın ikinci bölümünde YBM'nin yoğun olarak katkı

sağladığı ve etkili olduğu proje aşamaları ve proje kısıtlarının bir arada düşünülmesi istenmiştir. Katılımcılara YBM'nin sürdürülebilir yeşil bina projelerinin beş farklı aşaması olan fizibilite, tasarım, ihale ve sözleşme, inşaat, ve işletme ve yönetim aşamalarına; dört farklı proje kısıtı olan maliyet, süre, kapsam ve kalite açısından avantajlarının etkileri sorulmuştur. Bu amaçla 20 sorgudan oluşan 5x4 boyutlarında bir matris hazırlanarak yanıtlar toplanmıştır.

Çalışmaya hem sürdürülebilirlik hem de YBM konularında bilgi sahibi olan 26 uzman katılmıştır. Çok sayıda katılımcıya ulaşmaktan ziyade doğru katılımcılara ulaşip, özenli verilen yanıtların derlenmesi hedeflenmiştir. Simms ve Rogers [55]'in de ifade ettiği üzere katılımcıların çalışmalara istekli katılımı ilgili konuyla ilgilendiklerini göstermekte ve böylece güvenilir sonuçlara ulaşmak için avantaj sağlamaktadır. Türk inşaat sektörünün bu alanlardaki uygulamaların kullanılmasında henüz gelişme aşamasında olduğu dikkate alındığında, katılımcıların bu konularda gerçekten fikir sahibi olmaları hedeflenmiştir. Anket çalışması yüz yüze görüşmelerle gerçekleştirilmiş olup, konunun ve ilgili sorunun doğru anlaşılıp anlaşılmadığı teyit edilerek ilerleme sağlanmıştır. Hem YBM hem de sürdürülebilir yeşil bina projelerinde çalışıyor ya da çalışmış olan uzmanlar, çeşitli sektör ve yeşil bina tecrübesine sahip olup bu konularda yetkin, çeşitli katılımcı özellikleri dikkate alınarak seçilmiştir. Böylece değişen katılımcı özelliklerine göre uzmanların görüşleri karşılaştırılabilecektir. Ankete katılan uzmanların demografik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. 1-3 yıl tecrübeli katılımcıların da çalışmaya dâhil edilmesinin sebebi ise, bu katılımcıların mezun oldukları okullarda sürdürülebilirlik ve YBM gibi bazı güncel konularda ders/seminer/toplantı gibi etkinliklere katılmış olmalarıdır. Bilindiği üzere YBM ve sürdürülebilirlik sürekli gelişen ve gelişmelere adapte olmanın zorlayıcı olabildiği süreçleri de kapsamaktadır. Bu çalışmadaki sektör tecrübesi için kullanılan aralık ve ilgili aralıktaki katılım yüzdeleri çeşitli sektör tecrübelerine bağlı çalışanların görüşlerini yansıtmak amacıyla belirlenmiş ve Budayan [56]'ın çalışmasındaki değerlerle benzerlikler göstermektedir.

26 uzmandan toplanan veriler SPSS 17.0 programı kullanılarak analiz edilmiştir. İlk olarak verilerin güvenilirliğini test etmek için güvenilirlik analizi (Reliability Analysis) yapılmıştır. Cronbach alpha testi faktörler arasındaki iç tutarlılık ve ortalama korelasyon katsayılarını hesaplayarak anketlerin güvenilirliğini belirleyen ve sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [57]. Anketin güvenilir olarak değerlendirilebilmesi için hesaplanan alpha değerinin 0,7'den büyük çıkması gerekmektedir [58]. YBM'nin sürdürülebilir yeşil bina projelerindeki avantajlarını önem derecelerine göre sıralayabilmek için ise, göreceli önem indeksleri (Relative Importance Index: RII) yöntemi kullanılmıştır [59]. Sorgulanan faktörlerin göreceli önem indeksleri (RII), Eş. 1 ile hesaplanmaktadır;

$$RII = \frac{\sum W}{(A \cdot N)} \quad (1)$$

Bu denklemde W değeri faktörlere katılımcılar tarafından verilen ağırlıklardır (1 = çok önemsiz, 2 = önemsiz, 3 = orta derecede önemli, 4 = önemli, ve 5 = çok önemli); A = en yüksek ağırlık (bu çalışmada 5'tir); N = toplam katılımcı sayısıdır (bu çalışmada 26'dır).

Tablo 2 - Katılımcıların demografik yapısı

Profil	Kategoriler	Katılımcı sayıları	Yüzdeler
Katılımcıların sektör tecrübesi (yıl)	1-3	6	23,1%
	4-9	12	46,2%
	10-19	5	19,2%
	≥20	3	11,5%
Katılımcıların yeşil bina (LEED, BREEAM vs.) tecrübesi (yıl)	1-3	8	30,8%
	4-9	11	42,3%
	10-19	7	26,9%
	≥20	0	0,0%
Katılımcıların karar vermeye katılım durumu	Hiçbir zaman	0	0,0%
	Nadir	5	19,2%
	Bazen	11	42,3%
	Sık sık	8	30,8%
	Her zaman	2	7,7%
Katılımcıların çalıştıkları proje aşamaları	Fizibilite aşaması	1	3,8%
	Tasarım aşaması	8	30,8%
	İhale ve sözleşme aşaması	5	19,2%
	İnşaat aşaması	10	38,5%
	İşletme ve yönetim aşaması	2	7,7%
Katılımcıların çalıştıkları pozisyon	Mühendis	10	38,5%
	Mimar	7	26,9%
	Müdür/Yönetici	9	34,6%

İstatistiksel analizlere devam edebilmek için kullanılacak testler genel olarak parametrik ve parametrik olmayan testler olmak üzere ikiye ayrılır. Varyans homojenliği ve normal dağılım gösteren veriler için parametrik testler uygulanabilir [60]. Bu çalışmadaki veri seti ise 30'dan küçük olduğu için, Shapiro-Wilk normallik testi yapılmıştır [61], [62]. Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları, çeşitli istatistiksel özelliklerle birlikte Tablo 3'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre normal dağılım göstermeyen verilerin analizi için, literatürde de işaret edildiği gibi parametrik olmayan testler kullanılmıştır [61], [63]–[66]. Sorulara verilen yanıtların, katılımcıların sektör tecrübesi ve karar vermeye katılım seviyesine bağlı değişiklik

gösterip göstermediğini tespit etmek için, parametrik testlerden tek yönlü varyans analizi'nin (One way ANOVA) parametrik olmayan karşılığı olan Kruskal-Wallis testi kullanılmıştır. İlgili profil yapısına göre anlamlı bir fark tespit edilen sorulardaki farklılıkların hangi gruplar arasında gerçekleştiğini tespit etmek için ise, her bir ikili grup için Mann-Whitney U testi uygulanmıştır [67].

Son olarak, birbiri ile ilişkili olan ve aynı katılımcıların oyladığı ikiden çok faktör arasında önemli bir fark olup olmadığını araştıran Friedman testi [68], ikinci bölümdeki anket sorularını daha detaylı incelemek için çapraz olarak uygulanmıştır. Hem YBM'nin sürdürülebilir yeşil bina projelerindeki maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtları üzerine avantajlarının proje aşamalarına göre değişip değişmediğini, hem de YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerindeki her bir proje aşaması içinde bu kısıtlar üzerindeki avantajlarının önem derecelerinde bir farklılığın olup olmadığını araştırmak amacıyla Friedman testi uygulanmıştır. Bu teste her bir faktörün ortalama sıralaması; yanıtların sıklığı, standart sapma ve normal ortalama önem değerine bağlı olarak hesaplanır [69]. Friedman testi sonucunda bir farklılık tespit edilen gruplardaki farklılıkların kaynağını bulmak için ise Wilcoxon testi kullanılmıştır [68]. Bu çalışmada uygulanan tüm istatistiksel testlerde, literatürde de sıklıkla kullanılan 0,05 [70] ve 0,01 [68] anlamlılık seviyeleri (p) kullanılmıştır. 0,05 ve 0,01 anlamlılık seviyeleri sırasıyla, % 95 ve % 99 güven aralıklarını ifade etmektedir [71].

Tablo 3 - Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları

Kod	Avantajlar	Statistics			Shapiro-Wilk		
		Mean	Skewness	Kurtosis	Statistic	df	Sig.
FZ1	Proje süresinin azalması	4,308	-0,571	-0,874	0,777	26	0,000
FZ2	Proje karlılığının artması	3,808	-0,073	-1,342	0,833	26	0,001
FZ3	5D maliyet tahmini yapabilme	4,269	-0,580	-1,466	0,722	26	0,000
FZ4	Detay seviyesi belirleyebilme	4,462	-0,807	-0,272	0,735	26	0,000
FZ5	Yeni iş geliştirme kabiliyeti sağlama	3,846	-0,432	-0,826	0,863	26	0,003
TA1	Tasarım hatalarının erken önlenmesi	3,923	-0,743	-0,786	0,797	26	0,000
TA2	Nesne tabanlı modelleme yapabilme	3,962	0,078	-1,715	0,777	26	0,000
TA3	Endüstri temel sınıfı tabanlı dosya transferi yapabilme	4,269	-0,969	0,140	0,785	26	0,000
TA4	Çakışma kontrolü	4,077	-0,159	-1,775	0,760	26	0,000
TA5	Tasarımın görsellerle desteklenmesi	4,346	-0,778	-1,310	0,666	26	0,000
TA6	Tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları	4,462	-1,083	-0,531	0,655	26	0,000
TA7	2D çizimlerin ve kapsamın standartlaşması	4,115	-0,171	-0,887	0,807	26	0,000
TA8	Sürdürülebilir bina tasarım kolaylığı	4,154	-0,251	-1,004	0,806	26	0,000

Tablo 3 - Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları (devam)

Kod	Avantajlar	Statistics			Shapiro-Wilk		
		Mean	Skewness	Kurtosis	Statistic	df	Sig.
İS1	Maliyet azalması	4,192	-0,956	1,603	0,785	26	0,000
İS2	6D sürdürülebilirlik analizlerini yapabilme	4,154	-1,480	3,096	0,780	26	0,000
İS3	Otomatik metraj alabilme	4,385	-1,509	1,426	0,691	26	0,000
İS4	Erken tasarım doğrulaması	4,154	-0,287	-1,279	0,800	26	0,000
İS5	Dokümantasyon hatalarının azalması	3,923	-0,674	-0,339	0,843	26	0,001
İN1	Tasarım ve inşaat planlama entegrasyonu	4,423	-0,667	-0,428	0,749	26	0,000
İN2	Yalın inşaatı uygulama kolaylığı	4,077	-0,606	-1,098	0,782	26	0,000
İN3	Tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu	3,846	-0,452	-1,362	0,809	26	0,000
İN4	Yanlış imalatların azalması	4,154	-0,190	-0,650	0,797	26	0,000
İN5	Farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik	4,731	-2,191	3,840	0,504	26	0,000
İN6	4D iş programı oluşturabilme	4,231	-0,486	-1,504	0,746	26	0,000
İN7	Tümleşik proje yönetimi	4,077	-1,001	0,281	0,793	26	0,000
İN8	Modelin inşaat aşamasında kullanılabilirliği	4,115	-0,242	-1,811	0,742	26	0,000
İN9	Çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik	4,615	-1,474	1,190	0,636	26	0,000
İN10	Her aşamada maliyet çıkışı alabilme	3,923	-0,635	-0,860	0,826	26	0,000
İN11	Anlaşmazlıkların azalması	3,462	0,140	-0,096	0,856	26	0,002
İN12	İnsan kaynağının daha verimli kullanımı	3,462	-0,513	-0,028	0,897	26	0,013
İN13	Değişikliklere hızlı adapte olabilme	4,115	-0,204	-1,205	0,808	26	0,000
İY1	Devir/teslim kolaylığı	4,038	-0,498	-1,314	0,774	26	0,000
İY2	Özen isteyen aktivite ve bakım süresinin azalması	4,154	-0,905	-0,124	0,801	26	0,000
İY3	İşletme ve yönetim kolaylığı	4,577	-1,286	0,669	0,668	26	0,000
İY4	7D tesis & bakım yönetimi yapabilme	4,231	-1,886	5,388	0,727	26	0,000
İY5	Bina kullanım ömrü boyunca kolay bilgi aktarımı	4,231	1,358	-0,177	0,524	26	0,000
İY6	Müşteri memnuniyeti sağlaması	3,500	0,175	-0,626	0,878	26	0,005

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

##### 4.1. Güvenilirlik Analizi ve Faktörlerin Göreceli Önem İndeksleri

Analizlere ankete verilen yanıtlardaki güvenilirliğin kontrol edilmesiyle başlanmıştır. Cronbach alpha değeri 0 ile 1 arasında değişiklik göstermekte ve 1 değerine yakın olması

verilerin daha yüksek iç tutarlılığa sahip olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca verilerin güvenli kabul edilebilmesi için Cronbach alpha değerinin 0,7'den büyük olması gerekmektedir [58], [72].

Tablo 4 - İlk bölümdeki soruların anket sonuçları

Kod	Avantajlar	AO	SS	RII
İN5	Farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik	4,731	0,871	0,946
İN9	Çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik	4,615	0,892	0,923
İY3	İşletme ve yönetim kolaylığı	4,577	1,076	0,915
TA6	Tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları	4,462	0,811	0,892
FZ4	Detay seviyesi belirleyebilme	4,462	0,874	0,892
İN1	Tasarım ve inşaat planlama entegrasyonu	4,423	0,766	0,885
İS3	Otomatik metraj alabilme	4,385	0,604	0,877
TA5	Tasarımın görsellerle desteklenmesi	4,346	0,711	0,869
FZ1	Proje süresinin azalması	4,308	1,129	0,862
FZ3	5D maliyet tahmini yapabilme	4,269	0,863	0,854
TA3	Endüstri temel sınıfı (IFC) tabanlı dosya transferi yapabilme	4,269	0,891	0,854
İY5	Bina kullanım ömrü boyunca kolay bilgi aktarımı	4,231	0,643	0,846
İN6	4D iş programı oluşturabilme	4,231	0,874	0,846
İY4	7D tesis & bakım yönetimi yapabilme	4,231	0,967	0,846
İS1	Maliyet azalması	4,192	0,643	0,838
İS4	Erken tasarım doğrulaması	4,154	0,637	0,831
TA8	Sürdürülebilir bina tasarım kolaylığı	4,154	0,784	0,831
İS2	6D sürdürülebilirlik analizlerini yapabilme	4,154	0,908	0,831
İN4	Yanlış imalatların azalması	4,154	1,055	0,831
İY2	Özen isteyen aktivite ve bakım süresinin azalması	4,154	1,190	0,831
İN8	Modelin inşaat aşamasında kullanılabilmesi	4,115	0,647	0,823
İN13	Değişikliklere hızlı adapte olabilme	4,115	0,736	0,823
TA7	2D çizimlerin ve kapsamın standartlaşması	4,115	1,093	0,823
İN7	Tümleşik proje yönetimi	4,077	0,941	0,815
TA4	Çakışma kontrolü	4,077	0,977	0,815

Tablo 4 - İlk bölümdeki soruların anket sonuçları (devam)

Kod	Avantajlar	AO	SS	RII
İN2	Yalın inşaatı uygulama kolaylığı	4,077	1,021	0,815
İY1	Devir/teslim kolaylığı	4,038	0,430	0,808
TA2	Nesne tabanlı modelleme yapabilmek	3,962	0,909	0,792
İN10	Her aşamada maliyet çıktısı alabilme	3,923	0,732	0,785
TA1	Tasarım hatalarının erken önlenmesi	3,923	0,749	0,785
İS5	Dokümantasyon hatalarının azalması	3,923	0,761	0,785
İN3	Tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu	3,846	0,675	0,769
FZ5	Yeni iş geliştirme kabiliyeti sağlama	3,846	0,977	0,769
FZ2	Proje karlılığının artması	3,808	0,967	0,762
İY6	Müşteri memnuniyeti sağlama	3,500	1,008	0,700
İN11	Anlaşmazlıkların azalması	3,462	0,906	0,692
İN12	İnsan kaynağının daha verimli kullanımı	3,462	1,140	0,692

Yapılan analiz sonucunda ilk bölümdeki 37 sorunun Cronbach alpha değeri 0,896 olarak hesaplanmış ve verilen yanıtlara göre anketin yüksek güvenilirlikte olduğu belirlenmiştir. [73]. İkinci bölümdeki soruların Cronbach alpha değeri ise 0,869 olarak hesaplanmıştır ve yine anketin yüksek güvenilirlikte olduğuna işaret etmektedir. Daha sonra Eş. 1 uygulanıp tüm bölümlerdeki soruların RII değerleri tespit edilmiştir. İlk bölümdeki soruların aritmetik ortalama (AO), standart sapma (SS) ve RII değerleri Tablo 4’de RII sıralamasına göre gösterilmiştir. Tablo 5’te ise ikinci bölümdeki anket sonuçları matris formunda verilmiştir.

Tablo 4’deki sonuçlar, sürdürülebilir yeşil binalarda YBM kullanımının en büyük avantajlarının farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik (RII = 0,946; inşaat aşaması), çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik (RII = 0,923; inşaat aşaması), işletme kolaylığı (RII = 0,915; işletme ve yönetim aşaması), tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları (RII = 0,892; tasarım aşaması) ve detay seviyesi belirleyebilme (RII = 0,892; fizibilite aşaması) olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, İN5, İN9 ve TA6 avantajlarının ilk beş sıra içinde yer alması sebebiyle, katılımcıların birlikte çalışabilirliğe önem verdiklerini göstermektedir. Bulgular, Olawumi ve Chan [47]’in elde ettiği sonuçlarla yakın benzerlikler göstermektedir. YBM ve sürdürülebilirliği beraber kullanmanın 36 avantajını sıraladıkları çalışmada, çoklu tasarım alternatiflerini kolaylaştırma, işletme ve bakım yönetimini iyileştirme, bilgi paylaşımını kolaylaştırma, ve entegre ortamda doğru tasarım görselleştirmesini sağlama etmenleri, yine 1-5 ölçeğinde 4,5 ortalamasının üzerinde puan almış, ve en önemli 5 fayda içerisinde yer almıştır. Bilgi paylaşımının kolaylaşması birlikte çalışabilirliğin, doğru tasarım görselleştirmesi ise tasarımdaki değişikliklerin tüm paftalara yansımalarının birer sonucudur. Bunun yanında katılımcılar, insan kaynağının daha verimli kullanımı (RII = 0,692), anlaşmazlıkların azalması (RII = 0,692) ve müşteri memnuniyeti sağlama (RII = 0,700) faktörlerini ise en alt sıralarda değerlendirilen avantajlar olarak belirlemiştir. Her ne kadar bu şekilde sıralanmış olsalar da, bu çalışmaya dâhil edilen bütün avantajların katılımcılar



tarafından RII = 0,5 (1-5 ölçeğinde alınabilecek ortalama RII puanı) puanının üzerinde değerlendirilmeleri sebebiyle önemli avantajlar sağladıkları söylenebilir.

Tablo 5 - İkinci bölümdeki soruların anket sonuçları

Proje Aşamaları	Maliyet (MA)			Süre (SÜ)			Kapsam (KA)			Kalite (KL)		
	AO	SS	RII	AO	SS	RII	AO	SS	RII	AO	SS	RII
Fizibilite aşaması (FZ)	3,23	1,34	0,646	3,62	1,33	0,723	4,08	0,98	0,815	3,31	1,01	0,662
Tasarım aşaması (TA)	3,81	1,13	0,762	4,12	0,91	0,823	4,12	1,18	0,823	4,08	0,93	0,815
İhale ve sözleşme aşaması (İS)	3,04	1,43	0,608	3,31	1,29	0,662	3,77	1,07	0,754	3,96	1,04	0,792
İnşaat aşaması (İN)	4,00	0,69	0,800	4,27	0,72	0,854	3,62	0,64	0,723	3,77	1,27	0,754
İşletme ve yönetim aşaması (İY)	4,00	1,02	0,800	3,96	0,96	0,792	3,62	0,94	0,723	3,12	1,40	0,623

Tablo 5'deki veriler ışığında, YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerinin fizibilite aşamasında kapsam (RII = 0,815), ihale ve sözleşme aşamasında kalite (RII = 0,792), tasarım aşamasında süre ve kapsam (RII = 0,823), inşaat aşamasında süre (RII = 0,854), ve işletme ve yönetim aşamasında maliyet (RII = 0,800) özelinde, diğer kısıtlardan daha fazla avantaj getireceği belirlenmiştir. Bu bulgular sürdürülebilir yeşil binaların YBM ile modellenmesi yapılırken, hangi proje aşaması için en fazla avantaj sağlayacağını gösterdiği için önemlidir. Örneğin, YBM kullanımının fizibilite, ve ihale ve sözleşme aşamalarında kalite ve kapsam kısıtlarına olumlu etkilerinin daha ön plana çıktığı; inşaat, ve işletme ve yönetim aşamalarında ise proje maliyet ve süresine daha fazla katkıda bulunduğu değerlendirilmiştir. Bu bilgiler ışığında, kapsam muğlaklığının karmaşıklığı artırabileceği özel projelerde [74], ve kapsamın açıkça tanımlandığı durumlarda oldukça başarılı olabilen tasarla-yap (design-build) yöntemi ile teslim edilecek projelerde [75], özellikle fizibilite aşamasında YBM kullanımının oldukça avantajlı olacağı söylenebilir. Aksine, tasarla-ihale et-yap (design-bid-build) yöntemi ile teslim edilecek projelerde ise, doğası gereği sıralamalı gerçekleşen işlerden dolayı proje süresi ve maliyeti ciddi olarak artabilmekte [76], ve dolayısı ile özellikle inşaat ve tasarım aşamalarında YBM kullanımının artan süre ve maliyet baskısını azaltabileceği düşünülmektedir. İşletme ve yönetim aşamasında ise sıkı imtiyaz süresi içerisinde oluşabilecek zamansal problemler, öngörülemeyen sebeplerden ötürü ortaya çıkabilecek bakım ve onarım masrafları nedeniyle, özellikle kamu özel sektör işbirliği (Public-private partnership: PPP) projelerinde [77] YBM kullanımının avantajlı olacağı söylenebilir.

Elde edilen sonuçlar, ilgili literatürdeki çeşitli çalışmalar tarafından da desteklenmektedir. YBM'nin ihale ve sözleşme aşamasında kullanımı, istenen işlerin detay, özellik ve şartnamesini de içerdiği için kullanıcılara avantaj sağlamakta [78] ve bunların yapılacak işin kalitesi üzerine yoğun bir etkisi bulunmaktadır. Azhar [53]'ün yaptığı çalışmada ele aldığı bir projede; dokümantasyon, fizibilite ve operasyon aşamalarında YBM uygulaması, uygulamanın kendi maliyetinin üç katından daha fazla bir maliyet düşüşüne sebep olmuştur.

Bununla birlikte YBM, birçok disiplin ve firmayı işbirliği içine sokması sebebiyle tasarım ve inşaat aşamalarında zaman ve kaynak tasarrufu yaparken, yapının daha verimli bir hale gelmesini sağlamakta [25], ve böylece sürdürülebilirliğe hizmet etmektedir.

#### **4.2. Sonuçların Katılımcı Özelliklerine Göre Değerlendirilmesi**

Sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının avantajlarının ankete katılan uzmanların çeşitli özelliklerine göre değişip değişmediğini saptamak için, parametrik olmayan veriler için kullanılan Kruskal-Wallis testi anketteki tüm sorulara uygulanmıştır. Test sonucunda önem derecesi anlamlılık değeri (Asymp. Sig.) 0,05'ten küçük çıkan sorguların sektör tecrübesine göre farklılık gösterdiği söylenebilir. Kruskal-Wallis testi sonucunda sektör tecrübesine göre değişiklik gösteren sorular ve anlamlılık değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Kruskal-Wallis testi, bir profil özelliğine göre hangi sorularda anlamlı bir fark olduğu cevabını verirken, hangi grupların diğerlerinden farklılaştığına yanıt vermemektedir. Anlamlı bir fark tespit edilen sorulardaki farklılıkların hangi gruplar arasında gerçekleştiğini belirlemek için, katılımcıların tecrübe sınıfına göre Mann-Whitney U testi uygulanmıştır. Tablo 7'de, Kruskal-Wallis testi sonucunda anlamlı fark belirlenen soruların, Mann-Whitney U testi sonucunda elde edilen anlamlılık dereceleri gösterilmiştir.

*Tablo 6 - Kruskal-Wallis test sonuçları*

Soru	Chi Square	Serbestlik derecesi	<i>p</i>
Tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu	8,006	3	0,046
Tasarım hatalarının erken önlenmesi	8,506	3	0,037
Yeni iş geliştirme kabiliyeti sağlaması	7,846	3	0,049
İhale ve sözleşme aşaması _Kalite	11,151	3	0,011
Tasarım aşaması _Maliyet	10,257	3	0,017
Tasarım aşaması _Kapsam	8,794	3	0,032

Bulgular, YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerinde tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu (İN3) ve tasarım hatalarının erken önlenmesi (TA1) faktörlerini, 1-3 yıl tecrübeli çalışanların, 4-9 yıl ve 20 ve üzeri yıl tecrübeli çalışanlara göre daha büyük bir avantaj olarak gördüğünü göstermektedir. 20 yıl ve üzeri tecrübeye sahip katılımcılar YBM uygulamasının yeni iş geliştirme sağlaması (FZ5) faktörüne yeterince avantaj sağlamayacağını düşünürken, daha az tecrübeli katılımcılar, ilgili faktörün göreceli olarak daha fazla avantaj sağlayacağını düşünmektedir. Öte yandan, sürdürülebilir yeşil bina projelerinde ihale ve sözleşme aşamasında YBM kullanımının kalite boyutuna 1-3 yıl ve 20 yıl ve üzeri tecrübeye sahip katılımcılar, diğer katılımcılarla karşılaştırıldığında daha az katkı

sağlayacağını düşünmektedir. Tasarım aşamasında YBM kullanımının inşaat maliyetine oldukça yüksek katkı sağlayacağını düşünen 10-19 yıl arası tecrübeye sahip katılımcılar ise, bu konuda 4-9 yıl ve 20 ve üzeri yıl tecrübeye sahip katılımcılardan ayrılmaktadır. Son olarak, yine tasarım aşamasında YBM kullanımının proje kapsamına oldukça katkı sağlayacağını düşünen 10-19 yıl tecrübeli uzmanlar, kendilerinden daha az ve daha çok tecrübeye sahip uzmanlardan ayrılmaktadır. Anket sonuçları, görece daha tecrübeli katılımcıların; tasarım, işletme ve yönetime bağlı faktörleri diğer katılımcılardan daha kritik gördüklerini göstermektedir. Görece daha az tecrübeli çalışanlar ise, inşaat aşamasındaki avantajlara daha çok odaklanmıştır. Bunun sebebi ise özellikle daha az tecrübeli uzmanların projelerin inşaat aşamasında yeşil bina sertifika gereksinimlerini yerine getirme bağlamında zorluk çekmeleri olabilir [6].

Tablo 7 - Mann-Whitney U test sonuçları

Soru	1-3/4-9	1-3/10-19	1-3/>20	4-9/10-19	4-9/>20	10-19/>20
Tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu	0,019*	0,168	0,023*	0,777	0,096	0,216
Tasarım hatalarının erken önlenmesi	0,021*	0,134	0,015*	0,579	0,151	0,156
Yeni iş geliştirme kabiliyeti sağlanması	0,921	0,317	0,017*	0,329	0,014*	0,04*
İhale ve sözleşme aşaması _Kalite	0,01*	0,013*	0,773	0,634	0,054	0,04*
Tasarım aşaması _Maliyet	0,203	0,284	0,06	0,017*	0,061	0,016*
Tasarım aşaması _Kapsam	0,613	0,032*	0,129	0,062	0,068	0,01*

\* Ortalamalar arasındaki farklar anlamlıdır ( $p < 0.05$ ).

Değişen katılımcı tecrübelerine göre YBM kullanımının avantajlarının sıralaması Tablo 8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm grupların en önemli dört avantaj içinde yer verdiği ortak bir faktöre rastlanmamıştır. Bununla birlikte, farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik (İN5) üç grup tarafından, çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik (İN9), işletme ve yönetim kolaylığı (İY3) ve detay seviyesi belirleyebilme (FZ4) ise ikişer grup tarafından en önemli dört avantajdan biri olarak gösterilmiştir. 10-19 yıl arası tecrübeye sahip katılımcılar ise, ilk dört avantaj konusundan diğer katılımcılardan en fazla ayrılan gruptur. Bu grup, proje süresinin azalması (FZ1) ve 4D iş programı oluşturabilme (İN6) avantajlarını, FZ4 ile birlikte en önemli avantaj olarak belirtmişlerdir. Tecrübeye bağlı değişen bu algı, Awad ve Ghaziri [79]’nin tecrübe ve çalışmadan doğan kazanımları anlama olarak tanımladığı bilginin tecrübeye bağlı değişiklik göstermesi ile bağdaşmaktadır.

Tablo 8 - Katılımcıların sektör tecrübesine göre YBM kullanımının avantaj sıralaması

Kod	Avantajlar	1-3 yıl	4-9 yıl	10-19 yıl	>20 yıl
FZ1	Proje süresinin azalması	22	7	1	16
FZ2	Proje karlılığının artması	16	35	24	23
FZ3	5D maliyet tahmini yapabilme	22	17	4	5
FZ4	Detay seviyesi belirleyebilme	10	2	1	16
FZ5	Yeni iş geliştirme kabiliyeti sağlanması	5	32	34	34
TA1	Tasarım hatalarının erken önlenmesi	2	32	30	34
TA2	Nesne tabanlı modelleme yapabilme	29	28	4	23
TA3	Endüstri temel sınıfı tabanlı dosya transferi yapabilme	27	7	4	10
TA4	Çakışma kontrolü	29	19	13	10
TA5	Tasarımın görsellerle desteklenmesi	2	13	13	23
TA6	Tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları	7	7	13	1
TA7	2D çizimlerin standartlaşması	10	25	24	16
TA8	Sürdürülebilir bina tasarım kolaylığı	10	28	30	1
İS1	Maliyet azalması	22	19	4	10
İS2	6D sürdürülebilirlik analizlerini yapabilme	36	13	4	5
İS3	Otomatik metraj alabilme	16	7	4	5
İS4	Erken tasarım doğrulaması	10	25	13	16
İS5	Dokümantasyon hatalarının azalması	16	19	30	34
İN1	Tasarım ve inşaat planlama entegrasyonu	10	2	4	16
İN2	Yalın inşaatı uygulama kolaylığı	33	5	4	31
İN3	Tasarım ve inşaat tedarik entegrasyonu	22	25	13	37
İN4	Yanlış imalatların azalması	10	19	24	16
İN5	Farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik	2	1	13	1
İN6	4D iş programı oluşturabilme	27	17	1	10
İN7	Tümleşik proje yönetimi	33	13	13	16
İN8	Modelin inşaat aşamasında kullanılabilmesi	16	13	13	31
İN9	Çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik	1	2	13	5
İN10	Her aşamada maliyet çıktısı alabilme	22	28	24	28
İN11	Anlaşmazlıkların azalması	33	35	36	31
İN12	İnsan kaynağının daha verimli kullanımı	37	31	37	23
İN13	Değişikliklere hızlı adapte olabilme	7	19	24	28
İY1	Devir/teslim kolaylığı	7	32	13	23
İY2	Özen isteyen aktivite ve bakım süresinin azalması	16	19	24	10
İY3	İşletme ve yönetim kolaylığı	5	5	4	1
İY4	7D tesis & bakım yönetimi yapabilme	29	7	13	5
İY5	Bina kullanım ömrü boyunca kolay bilgi aktarımı	16	7	30	10
İY6	Müşteri memnuniyeti sağlanması	29	37	34	28

Anket sonuçlarının, ankete katılan uzmanların çalıştıkları projelerde karar vermeye katılım derecesi, katılımcı pozisyonu ve katılımcıların çalıştıkları proje aşamasına göre bir farklılık gösterip göstermediğini tespit etmek için yine Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Fakat her iki bölümdeki toplam 57 sorunun anlamlılık değeri (Asymp. Sig.) 0,05 değerinden büyük çıktığı için, anket sonuçlarının, ilgili katılımcı özelliklerine göre değişmediği sonucu çıkarılmıştır. Karar vermeye katılım derecesine göre anket sonuçlarının bir farklılık göstermemesinin sebebi, katılımcıların kararlara katılım seviyelerinin, hangi düzeydeki kararlara katıldıkları noktasına işaret etmemeleri olarak düşünülebilir. Çalışılan proje aşamasına göre önemli bir değişiklik saptanmamasının sebebi ise, ilgili uzmanların diğer proje aşamalarında da tecrübeye sahip olmaları olarak gösterilebilir. Aynı yorum çalışılan pozisyon için de yapılabilir. Bu nedenle farklılığın kaynağının araştırıldığı bir sonraki aşama olan Mann-Whitney U testini uygulamaya gerek görülmemiştir. Fakat, istatistiksel olarak önemli bir fark tespit edilmese de ilgili uzmanların kendi çalıştıkları proje aşamaları üzerine YBM kullanımının avantajlarını daha önemli gördüğü sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, mühendis olarak çalışanların inşaat aşamasındaki avantajları, mimar olarak çalışanların tasarım aşamasındaki avantajları, yönetici olarak çalışanların ise diğer aşamalarındaki avantajları daha önemli gördükleri tespit edilmiştir.

#### **4.3. Proje Aşamalarının Maliyet, Süre, Kapsam ve Kalite Kısıtları Özelinde İrdelenmesi**

Anketin ikinci bölümünde katılımcılardan sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının proje aşamalarına göre maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtlarını dikkate alarak değerlendirmeleri istenmiştir. Bu değerlendirmelerin birbirinden farklılaşp farklılaşmadığını irdellemek amacıyla Friedman testi uygulanmıştır. Parametrik olmayan Friedman testinin güçlü yanı, verinin kendisi yerine, verinin sıralamasını yaparak analiz etmesidir [80]. Bu yöntem benzer bir problem için katılımcıların zaman, maliyet ve kalite algılarını karşılaştırmak amacıyla Larsen vd. [68] tarafından uygulanmıştır. Friedman testi her bir aşamada 26 veri seti ile çalıştırılmıştır. Bu çalışmadaki veri seti miktarı Friedman testini uygulayabilmek için gerekli minimum veri seti olan 23 şartını sağlamaktadır [68].

Friedman testi sonuçlarına göre (Tablo 9) tasarım aşaması hariç diğer tüm proje aşamalarında, katılımcıların maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtları üzerine YBM kullanım avantajları hakkında farklı değerlendirmeler yaptığı belirlenmiştir. İnşaat aşamasındaki anlamlılık değeri 0,05 seviyesinde iken diğer aşamalarda 0,01 seviyesindedir. Farklılıkların daha ciddi olduğu noktalara odaklanmak amacıyla, 0,01 derecesinde farklılık tespit edilen proje aşamalarında hangi konularda farklılıkların gözleendiğini saptamak için Wilcoxon testi uygulanmıştır (Tablo 10). Tablodaki bulgular, ankete katılan uzmanların, sürdürülebilir yeşil bina projelerinin fizibilite aşamasında YBM kullanımının maliyet/süre, ve maliyet/kalite açısından avantajlarını farklı gördüklerini göstermektedir. Benzer şekilde ihale ve sözleşme aşamasında YBM kullanımının avantajları maliyet/kapsam ve maliyet/kalite özelinde, işletme aşamasındaki avantajları ise maliyet/kalite ve süre/kalite özelinde farklı düşünülmektedir. Bu farklılıklar bu çalışmada elde edilen önemli bulgulardan biridir. Çünkü Luong vd. [81]'nin toplam proje faydasını dayandırdığı bu dört kavramın birbirinden ayrı düşünülebilmesi oldukça zordur.

Tablo 9 - Proje aşamaları bazında Friedman testi sonuçları

Proje Aşamaları	Chi-Square	p değeri
Fizibilite aşaması	15,422	0,001 <sup>a</sup>
Tasarım aşaması	3,224	0,358
İhale ve sözleşme aşaması	15,433	0,001 <sup>a</sup>
İnşaat aşaması	7,892	0,048 <sup>b</sup>
İşletme ve yönetim aşaması	17,081	0,001 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 0,01 seviyesinde anlamlı, <sup>b</sup> 0,05 seviyesinde anlamlı

Tablo 10 - Proje aşamaları bazında Wilcoxon testi sonuçları

Proje aşamaları	İkili kombinasyon	Z değeri	p değeri
Fizibilite	Maliyet/Süre	-2,887	0,004*
	Maliyet/Kapsam	-3,531	0,000*
	Maliyet/Kalite	-0,105	0,917
	Süre/Kapsam	-2,389	0,017
	Süre/Kalite	-0,89	0,373
	Kapsam/Kalite	-2,443	0,015
İhale ve sözleşme	Maliyet/Süre	-1,252	0,21
	Maliyet/Kapsam	-2,805	0,005*
	Maliyet/Kalite	-2,704	0,007*
	Süre/Kapsam	-2,288	0,022
	Süre/Kalite	-2,048	0,041
	Kapsam/Kalite	-0,738	0,46
İşletme ve yönetim	Maliyet/Süre	-0,369	0,712
	Maliyet/Kapsam	-2,045	0,041
	Maliyet/Kalite	-2,844	0,004*
	Süre/Kapsam	-1,764	0,078
	Süre/Kalite	-2,865	0,004*
	Kapsam/Kalite	-1,938	0,053

\*0,01 seviyesinde anlamlı

Aynı analizler maliyet, süre, kapsam ve kalite bazında gerçekleştirilip, YBM uygulamasının sürdürülebilir yeşil bina projelerinde proje aşamasına göre farklılaşıp farklılaşmadığı analiz edilmiştir. Diğer bir deyişle, sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtlarına sağladığı avantajların proje aşaması bazında

değişip değişmediği analiz edilmiştir. Friedman ve Wilcoxon testlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 11 ve Tablo 12'de gösterildiği gibidir.

*Tablo 11 - Maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtları bazında Friedman testi sonuçları*

YBM kullanımının avantaj boyutları	Chi-Square	<i>p</i> değeri
Maliyet	11,72	0,02 <sup>b</sup>
Süre	10,223	0,037 <sup>b</sup>
Kapsam	9,044	0,06
Kalite	19,902	0,001 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 0,01 seviyesinde anlamlı, <sup>b</sup> 0,05 seviyesinde anlamlı

*Tablo 12 - Kalite bazında Wilcoxon testi sonuçları*

Proje aşamaları ikili kombinasyonları	Z değeri	<i>p</i> değeri
Fizibilite/Tasarım	-2,748	0,006*
Fizibilite/İhale ve sözleşme	-2,31	0,021
Fizibilite/İnşaat	-1,928	0,054
Fizibilite/İşletme ve yönetim	-0,209	0,834
Tasarım/İhale ve sözleşme	-0,728	0,467
Tasarım/İnşaat	-1,17	0,242
Tasarım/İşletme ve yönetim	-2,933	0,003*
İhale ve sözleşme/İnşaat	-0,645	0,519
İhale ve sözleşme/İşletme ve yönetim	-2,626	0,009*
İnşaat/İşletme ve yönetim	-2,98	0,003*

\*0,01 seviyesinde anlamlı

Ankete katılan katılımcılar, sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının maliyet, süre, kapsam ve kalite kısıtları üzerine avantajlarından sadece kaliteyi proje süreçlerine göre 0,01 anlamlılık derecesinde değişiklik gösterir bulmuşlardır. Bu nedenle Tablo 11'de sonuçları verilen Wilcoxon testi sadece kalite özelinde gerçekleştirilmiştir. Bulgular, fizibilite/tasarım, ihale ve sözleşme/işletme ve yönetim, tasarım/işletme ve yönetim, ve inşaat/işletme ve yönetim aşamalarında YBM kullanımının kalite üzerine avantajlarının değişiklik gösterdiğine, diğer hiçbir ikili karşılaştırmada ise değişiklik göstermediğine işaret etmektedir. Test sonuçlarına göre, tasarım, ihale ve sözleşme, ve inşaat aşamalarında YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerinde kaliteye olan katkısının diğer aşamalardan yüksek olduğu ve bu farkın 0,01 seviyesinde anlamlı olduğu söylenebilir.

#### **4.4. Sonuçların Türkiye Özelinde İrdelenmesi**

Dünyada ve Türkiye’de YBM ile ilgili çeşitli akademik çalışma ve uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmadaki uzman havuzu Türkiye inşaat sektöründen seçildiği için, sonuçlar Türkiye özelinde değerlendirilebilir. Sonuçların çeşitli bölgelere göre karşılaştırılması açısından Olawumi ve Chan’ın [64] çalışması kullanılabilir. Bu çalışmaya göre, YBM’nin sürdürülebilir yeşil bina projelerindeki avantajları, akademisyenlerin, sektör çalışanlarının, dünyanın değişik bölgelerindeki uzmanların değerlendirmeleri göz önünde bulundurularak ayrı ayrı hesaplanmıştır. İlgili çalışmada bilgi paylaşımını kolaylaştırması akademisyen ve doğulu uzmanlar tarafından en önemli avantaj olarak saptanmışken, batılı uzmanlar ve sektör çalışanları proje kalite ve verimliliğini artırmasını, en önemli avantaj olarak göstermiştir. Bu çalışmada ise farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik ve çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik en önemli avantaj olarak saptanmış ve ilgili çalışma ile karşılaştırıldığında Türkiye inşaat sektörü uzmanlarının dünya genelindeki akademisyenler ve doğulu uzmanlarla benzer fikirde olduğu görülmüştür. Olbina ve Elliot [82] YBM uygulamalarındaki faydaları ENR (Engineering News Record) listesinde ilk yüzde yer alan firmalarla gerçekleştirdiği anket çalışması ile farklı bina tipleri için analiz etmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen faktör analizi sonucunda, YBM’nin takım çalışmasını ve işbirliğini artırması en etkili insan faktörleri olarak belirlenmiş, farklı tipte projeler için avantajların önemli ölçüde değişmediği tespit edilmiştir.

Türkiye özelinde düşünüldüğünde yapılan analizler sonucu öne çıkan bulgular daha çok proje aşamaları ve kısıtlarının birlikte değerlendirilmesi ile elde edilmiştir. Bu değerlendirmelere göre sürdürülebilir yeşil bina projeleri için YBM kullanımı fizibilite aşaması için kapsam kısıtına, ihale ve sözleşme aşaması için kalite kısıtına, tasarım aşaması için süre ve kapsam kısıtlarına, inşaat aşamasında süre kısıtına, ve işletme ve yönetim aşamasında maliyet kısıtına diğer kısıtlardan daha çok katkı sağlayacaktır. Sürdürülebilir malzeme üretiminde yaşanan sıkıntılar, endüstri temel sınıfı geliştirme zorlukları ve güncel standartlardaki eksiklikler, Türkiye’de sürdürülebilirlik ve YBM’nin entegre edilebilirliğini zorlayan başlıca sebeplerdendir [83]. Bunun yanında, Türkiye’de YBM’nin sürdürülebilir yeşil bina projelerinin her aşamasında kullanımını kısıtlayan en önemli etkenler arasında kalifiye çalışan bulma zorluğu ve bütçe problemleri de gösterilebilir [84]. Dolayısı ile özellikle maliyet kısıtına katkı sağlaması sebebiyle sürdürülebilir yeşil binaların işletme ve yönetim aşamalarında YBM kullanımının teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Fizibilite aşamasında kapsam kısıtına ve ihale ve sözleşme aşamasında kalite kısıtına sağladığı avantajlar hesaba katıldığında, ilgili konularda yetkinliğe sahip teknik personel ve mühendis yetiştirmenin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, çoğu üniversitenin inşaat mühendisliği bölümünde zorunlu ders kapsamında yer almayan YBM ve sürdürülebilirlik gibi konuların, zorunlu dersler kapsamına sokulması projelerin istenilen kalite ve kapsamda tamamlanması açısından önem taşımaktadır.

#### **5. SONUÇLAR**

İnşaat sektörünün çevreye, topluma ve ekonomiye olan ciddi etkileri düşünüldüğünde sürdürülebilir yapılaşmanın önemi daha da artmaktadır. İnşaat sektöründe sürdürülebilirliğe ulaşmak için kaynak kullanımını minimize etmek ve disiplinler arası ortak ve verimli bir çalışmaya ortam sağlamak gerekmektedir. YBM bu amaca ulaşabilmek için son yıllarda sık



sık kullanılan sistemlerden biridir. Bu nedenle YBM farklı şirketler tarafından değişik sürdürülebilirlik amaçları doğrultusunda kullanılabilir. Fakat literatüre bakıldığı zaman, her ne kadar YBM ve sürdürülebilirliğin birlikte kullanımının avantajları birçok kez çalışılmış olsa da, etkili olduğu proje aşamaları ve proje kısıtlarının birlikte hesaba katıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu kapsamda literatürde belirlenen eksiklikleri gidermek amacıyla bir anket çalışması düzenlenerek sektördeki uzmanlara ulaşmaya çalışılmıştır. Bunun için önce kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve YBM kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projelerine sağlayabileceği avantajların, bu avantajların etkili olduğu proje aşamalarına (fizibilite, tasarım, ihale ve sözleşme, inşaat, ve işletme ve yönetim) etkileri araştırılmıştır. Ardından ikinci bölümde YBM'nin, bu aşamaların projelerde karşılaşılan en önemli kısıtlar olan maliyet, süre, kapsam ve kalite açısından değerlendirmeleri yapılmıştır. Anket çalışması için sürdürülebilirlik ve YBM konularında deneyimli olan 26 kişiye ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik, çoklu tasarım projelerinde birlikte çalışabilirlik, işletme kolaylığı, tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları ve detay seviyesi belirleyebilme sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının en önemli avantajları olarak saptanmıştır. Bu noktada sürdürülebilir yeşil bina projelerinin geleneksel projelerle benzer sonuçlar gösterdiği söylenebilir. Bunun sebebi ise YBM kullanımının ana amaçlarından birisinin farklı disiplinleri aynı ortamda birleştirebilme kabiliyetidir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, ankete katılan uzmanların tecrübelerine göre değişiklik bulunmaktadır. Görece daha tecrübeli katılımcılar, sürdürülebilir bina tasarım kolaylığı, tasarımdaki değişikliğin tüm paftalara yansımaları, ve işletme ve yönetim kolaylığını; farklı disiplinler arası birlikte çalışabilirlik ile aynı derecede bir avantaj olarak görmektedir.

İkinci bölümdeki anket soruları analiz edildiğinde ise sürdürülebilir yeşil bina projelerinde YBM kullanımının fizibilite aşamasında kapsam, ihale ve sözleşme aşamasında kalite, tasarım aşamasında süre ve kapsam, inşaat aşamasında süre, ve işletme ve yönetim aşamasında maliyet özelinde, diğer kısıtlardan daha fazla avantaj getireceği hesaplanmıştır. Bu çıktılar sürdürülebilir yeşil bina projelerinde inşaat firmalarının YBM uygulamaları kullanma durumunda hangi aşamalarda hangi proje kısıtında ne ölçüde fayda sağlayacağını görebilmesi açısından önemlidir. Örneğin, proje kapsamının önemli olduğu ve kapsam değişikliğinin sürekli yaşanabileceği karmaşık sürdürülebilir yeşil bina projelerinin fizibilite ve tasarım aşamalarında YBM kullanılması ciddi bir önem arz etmektedir. Kalitenin elzem olduğu kamu projelerinde ise en azından ihale ve sözleşme aşamasında YBM kullanımı ciddi bir avantaj sağlayacaktır.

YBM ve sürdürülebilirlik kavramları sürekli gelişen ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak karmaşıklaşan süreç ve uygulamaları kapsar. Bu nedenle yapılan çalışma her ne kadar güncel literatür ve uzman görüşünü yansıtsa da gerçekleşen yeniliklerle birlikte benzer çalışmalar tekrar edilmelidir. Ayrıca bu çalışmada değinilen avantajların birbiri arasındaki ilişkisi hesaba katılmamıştır. Bu bağlamda daha etkin bir şekilde inceleme yapmak için yapısal eşitlik modeli (structural equation modelling) ya da analitik ağ süreci (analytical network process) gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmanın diğer bir kısıtı ise ankete katılan uzman sayısıdır. Her ne kadar ankete katılıma isteklilik ve ilgili konulardaki tecrübe hesaba katılarak analiz yapılmak istenmişse de, 26 uzman ile gerçekleştirilen anket sayısının artırılması çalışmanın güvenilirliğine katkı sağlayabilir. Son olarak ankete katılan uzmanların tamamı Türkiye'de çalışan uzmanlardan seçilmiştir. Dünyadaki tüm sürdürülebilir yeşil bina

projeleri hakkında bilgi verebilmek için çeşitli ülkelerde çalışan uzmanların bilgilerinin derlenmesi gerekmektedir.

### **Semboller**

- $\alpha$  : Cronbach's Alpha değeri  
 $A$  : 1-5 likert ölçeğindeki en yüksek ağırlık  
 $N$  : Katılımcı sayısı  
 $p$  : Anlamlılık değeri  
 $RII$  : Relative importance index (Göreceli önem indeksleri)  
 $W$  : Katılımcılar tarafından verilen ağırlık

### **Kaynaklar**

- [1] İzoder, Dünyada Binalarda Enerji Verimliliği Stratejileri ve Türkiye'de Yapılması Gerekenler, 2010-2023 Isı Yalıtımı Planlama Raporu, 2010.
- [2] YEGM, Bütünleşik Bina Tasarımı Yaklaşımı ile Proje Geliştirme Süreci Uygulama Kılavuzu, 2016.
- [3] Ofloğlu, S., BIM ve sürdürülebilirlik, in *XVIII. Akademik Bilişim Konferansı*, 2016, 1183–1187.
- [4] Udomsap, A. D. and Hallinger, P., A bibliometric review of research on sustainable construction, 1994–2018, *Journal of Cleaner Production*, 254, 120073, 2020.
- [5] Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M. S., Eskicioglu, C., and Sadiq, R., An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15 (1), 81–91, 2013.
- [6] Apanavičienė, R., Maliejus, K., and Fokaidis, P., Sustainability Assessment of the Building Construction Stage Using Building Sustainability Assessment Schemes (BSAS), in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 410, 012064.
- [7] Eastman, C., *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [8] Ofloğlu, S., Yapı Bilgi Modelleme : Gereksinim ve Birlikte Çalışabilirlik, *Mimarist*, 1–5, 2014.
- [9] Reizgevičius, M., Ustinovičius, L., Cibulskienė, D., Kutut, V., and Nazarko, L., Promoting sustainability through investment in Building Information Modeling (BIM) technologies: A design company perspective, *Sustainability (Switzerland)*, 10 (3), 2018.

- [10] Zhang, L., Chu, Z., and Song, H., Understanding the Relation between BIM Application Behavior and Sustainable Construction: A Case Study in China, Sustainability, 2019.
- [11] Wu, W. and Issa, R. R. A., BIM execution planning in green building projects: LEED as a use case, Journal of Management in Engineering, 31 (1), A4014007, 2014.
- [12] Seyis, S., Pros and Cons of Using Building Information Modeling in the AEC Industry, Journal of Construction Engineering and Management, 145 (8), 04019046, 2019.
- [13] Wong, K. din and Fan, Q., Building information modelling (BIM) for sustainable building design, Facilities, 31 (3), 138–157, 2013.
- [14] Ozorhon, B. and Karahan, U., Critical Success Factors of Building Information Modeling Implementation, Journal of Management in Engineering, 33 (3), 1–10, 2017.
- [15] Ahn, Y. H., Kwak, Y. H., and Suk, S. J., Contractors' Transformation Strategies for Adopting Building Information Modeling, Journal of Management in Engineering, 32 (1), 05015005, 2016.
- [16] Zuppa, D., Issa, R. R. A., and Suermann, P. C., BIM's impact on the success measures of construction projects, in *Proceedings of the 2009 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, 2009, 346, 503–512.
- [17] Kuiper, I. and Holzer, D., Rethinking the contractual context for Building Information Modelling (BIM) in the Australian built environment industry, Australasian Journal of Construction Economics and Building, 13 (4), 1–17, 2013.
- [18] Demirdöğen, G. and Işık, Z., Structural Equation Model of the Factors Affecting Construction Industry Innovation Success, Teknik Dergi, 1–21, 2021.
- [19] Taylor, J. E. and Bernstein, P. G., Paradigm Trajectories of Building Information Modeling Practice in Project Networks, Journal of Management in Engineering, 25 (2), 166–176, 2009.
- [20] Shen, L. yin, Tam, V. W. Y., Tam, L., and Ji, Y. bo, Project feasibility study: the key to successful implementation of sustainable and socially responsible construction management practice, Journal of Cleaner Production, 18 (3), 254–259, 2010.
- [21] Gurgun, A. P. and Arditi, D., Assessment of energy credits in LEED-certified buildings based on certification levels and project ownership, Buildings, 8 (2), 1–20, 2018.
- [22] Uğur, L. O. and Leblebici, N., Investigation of the effects of energy and water saving benefits on property value in LEED certified green buildings, Teknik Dergi, 30 (1), 8753–8776, 2019.
- [23] Fanning, B., Clevenger, C. M., Ozbek, M. E., and Mahmoud, H., Implementing BIM on infrastructure: Comparison of two bridge construction projects, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 20 (4), 04014044, 2015.
- [24] Azhar, S., Carlton, W. A., Olsen, D., and Ahmad, I., Building information modeling for sustainable design and LEED ® rating analysis, Automation in Construction, 20 (2), 217–224, 2011.

- [25] Bynum, P., Issa, R. R. A., and Olbina, S., Building information modeling in support of sustainable design and construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 139 (1), 24–34, 2013.
- [26] Hinze, J., Godfrey, R., and Sullivan, J., Integration of Construction Worker Safety and Health in Assessment of Sustainable Construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 139 (6), 594–600, 2013.
- [27] Gurgun, A. P. and Koc, K., Contractor prequalification for green buildings — evidence from Turkey, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27 (6), 1377–1400, 2020.
- [28] El-Sayegh, S. M., Manjikian, S., Ibrahim, A., Abouelyours, A., and Jabbour, R., Risk identification and assessment in sustainable construction projects in the UAE, *International Journal of Construction Management*, 1–10, 2018.
- [29] Atabay, S., Gurgun, A. P., and Koc, K., Incorporating BIM and Green Building in Engineering Education: Assessment of a School Building for LEED Certification, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 25 (4), 04020040, 2020.
- [30] Hosseini, M. R., Maghrebi, M., Akbarnezhad, A., Martek, I., and Arashpour, M., Analysis of Citation Networks in Building Information Modeling Research, *Journal of Construction Engineering and Management*, 144 (8), 04018064, 2018.
- [31] Reeves, T., Olbina, S., and Issa, R. R. A., Guidelines for using building information modeling for energy analysis of buildings, *Buildings*, 5 (4), 1361–1388, 2015.
- [32] Edwards, R. E., Lou, E., Bataw, A., Kamaruzzaman, S. N., and Johnson, C., Sustainability-led design: Feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into BIM for refurbishment projects, *Journal of Building Engineering*, 24, 100697, 2019.
- [33] Jalaei, F., Jalaei, F., and Mohammadi, S., An integrated BIM-LEED application to automate sustainable design assessment framework at the conceptual stage of building projects, *Sustainable Cities and Society*, 53, 101979, 2019.
- [34] Carvalho, J. P., Bragança, L., and Mateus, R., Optimising building sustainability assessment using BIM, *Automation in Construction*, 102, 170–182, 2019.
- [35] Ölçer B., İklim Krizinde BİM'in Üstleneceği Rol, *Yapı Bilgi Modelleme*, 2 (2), 19–29, 2019.
- [36] Chong, H. Y., Lee, C. Y., and Wang, X., A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 142, 4114–4126, 2017.
- [37] Olawumi, T. O. and Chan, D. W. M., An empirical survey of the perceived benefits of executing BIM and sustainability practices in the built environment, *Construction Innovation*, 19 (3), 321–342, 2019.
- [38] Becerik-Gerber, B. and Kensek, K., Building information modeling in architecture, engineering, and construction: Emerging research directions and trends, *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 136 (3), 139–147, 2010.

- [39] Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., and Li, Y., Automation in Construction Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions, *Automation in Construction*, 83 (June), 134–148, 2017.
- [40] Marzouk, M. and Othman, A., Modeling the performance of sustainable sanitation systems using building information modeling, *Journal of Cleaner Production*, 141, 1400–1410, 2017.
- [41] Li, B., Fu, F. F., Zhong, H., and B, L. H., Research on the computational model for carbon emissions in building construction stage based on BIM, *Structural Survey*, 30 (5), 411–425, 2012.
- [42] Zhou, Y., Ding, L., Rao, Y., Luo, H., Medjdoub, B., and Zhong, H., Automation in Construction Formulating project-level building information modeling evaluation framework from the perspectives of organizations: A review, *Automation in Construction*, 81, 44–55, 2017.
- [43] Bryde, D., Broquetas, M., and Volm, J. M., The project benefits of building information modelling (BIM), *International Journal of Project Management*, 31 (7), 971–980, 2013.
- [44] Kivits, R. A. and Furneaux, C., BIM: Enabling sustainability and asset management through knowledge management, *The Scientific World Journal*, 2013, 1–14, 2013.
- [45] Luth, G. P., Schorer, A., and Turkan, Y., Lessons from using BIM to increase design-construction integration, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 19 (1), 103–110, 2014.
- [46] Ghaffarianhoseini, A. *et al.*, Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75 (September 2016), 1046–1053, 2017.
- [47] Olawumi, T. O. and Chan, D. W. M., Identifying and prioritizing the benefits of integrating BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts, *Sustainable Cities and Society*, 40, 16–27, 2018.
- [48] Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., and McNiff, S., BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis, *Automation in Construction*, 36, 145–151, 2013.
- [49] Azhar, S. and Brown, J., Bim for sustainability analyses, *International Journal of Construction Education and Research*, 5 (4), 276–292, 2009.
- [50] Cheung, F. K. T., Rihan, J., Tah, J., Duce, D., and Kurul, E., Early stage multi-level cost estimation for schematic BIM models, *Automation in Construction*, 27, 67–77, 2012.
- [51] Azhar, S., Khalfan, M., and Maqsood, T., Building information modeling (BIM): Now and beyond, *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 12 (4), 15–28, 2012.
- [52] Ibrahim, M., Krawczyk, R., and Schipporeit, G., Two Approaches to BIM: A Comparative Study . ECAADe 2004 ECAADe 2004, *Technology*, 1–7, 2004.

- [53] Azhar, S., Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry, *Leadership and Management in Engineering*, 11 (3), 241–252, 2011.
- [54] Parker, D. W., Parsons, N., and Isharyanto, F., Inclusion of strategic management theories to project management, *International Journal of Managing Projects in Business*, 8 (3), 552–573, 2015.
- [55] Simms, C. and Rogers, B., The significance of flexibility in improving return on property investment: The UK perspective, *Facilities*, 24 (3–4), 106–119, 2006.
- [56] Budayan, C., Analysis of critical success factors in public private partnership projects by triangulation method: Turkey perspective, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 1029–1044, 2018.
- [57] Chan, A. P. C., Darko, A., Olanipekun, A. O., and Ameyaw, E. E., Critical barriers to green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana, *Journal of Cleaner Production*, 172, 1067–1079, 2018.
- [58] Martin, H., Vital, S., Ellis, L., and Obrien-Delpesh, C., Motivating Civil Engineering Students: Self-Determinacy Perspective, *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 144 (4), 04018005, 2018.
- [59] Gündüz, M., Nielsen, Y., and Özdemir, M., Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Turkey, *Journal of Management in Engineering*, 29 (2), 133–139, 2013.
- [60] Eymen, U. E., *SPSS 15.0 Veri Analiz Yöntemleri*. İstatistik Merkezi Hakkında, 2007.
- [61] Gunduz, M. and Elsherbeny, H. A., Operational Framework for Managing Construction-Contract Administration Practitioners ' Perspective through Modified Delphi Method, *Journal of Construction Engineering and Management*, 146 (3), 040191110, 2020.
- [62] Ghasemi, A. and Zahediasl, S., Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians, *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10 (2), 486–489, 2012.
- [63] Okudan, O., Budayan, C., and Dikmen, I., Development of a conceptual life cycle performance measurement system for build–operate–transfer (BOT) projects, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020.
- [64] Olawumi, T. O. and Chan, D. W. M., Identifying and prioritizing the benefits of integrating BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts, *Sustainable Cities and Society*, 40, 16–27, 2018.
- [65] Vidalakis, C., Abanda, F. H., and Oti, A. H., BIM adoption and implementation: focusing on SMEs, *Construction Innovation*, 20 (1), 128–147, 2020.
- [66] Abotaleb, I. S., El-Adaway, I. H., Ibrahim, M. W., Hanna, A. S., and Russell, J. S., Causes, Early Warning Signs, and Impacts of Out-of-Sequence Construction: Expert-Based Survey Analysis, *Journal of Management in Engineering*, 35 (6), 04019030, 2019.

- [67] Gürcanlı, G. E., Baradan, S., and Uzun, M., Risk perception of construction equipment operators on construction sites of Turkey, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, 59–68, 2015.
- [68] Larsen, J. K., Shen, G. Q., Lindhard, S. M., and Brunoe, T. D., Factors Affecting Schedule Delay, Cost Overrun, and Quality Level in Public Construction Projects, *Journal of Management in Engineering*, 32 (1), 04015032, 2016.
- [69] Amini, A., Nikraz, N., and Fathizadeh, A., Identifying and evaluating the effective parameters in prioritization of urban roadway bridges for maintenance operations, *Australian Journal of Civil Engineering*, 14 (1), 23–34, 2016.
- [70] Wood, G. D. and Ellis, R. C. T., Main contractor experiences of partnering relationships on UK construction projects, *Construction Management and Economics*, 23 (3), 317–325, 2005.
- [71] Yurtcu, Ş. and Özocak, A., İnce Daneli Zeminlerde Sikişma Indisi’Nin İstatistiksel Ve Yapay Zeka Yöntemleri İle Tahmin Edilmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 597–608, 2016.
- [72] Jaafar, M., Abdul Aziz, A. R., Ramayah, T., and Saad, B., Integrating information technology in the construction industry: Technology readiness assessment of Malaysian contractors, *International Journal of Project Management*, 25 (2), 115–120, 2007.
- [73] Gupta, M., Hasan, A., Jain, A. K., and Jha, K. N., Site Amenities and Workers’ Welfare Factors Affecting Workforce Productivity in Indian Construction Projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, 144 (11), 04018101, 2018.
- [74] Baccarini, D., The concept of project complexity - A review, *International Journal of Project Management*, 14 (4), 201–204, 1996.
- [75] Khalil, M. I. Al, Selecting the appropriate project delivery method using AHP, *International Journal of Project Management*, 20, 469–474, 2002.
- [76] Tenah, K. A., Project Delivery Systems for Construction: An Overview, *Cost Engineering*, 43 (1), 30–36, 2001.
- [77] Zhang, X., Win-win concession period determination methodology, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135 (6), 550–558, 2009.
- [78] Doumbouya, L., Gao, G., and Guan, C., Adoption of the Building Information Modeling (BIM) for Construction Project Effectiveness: The Review of BIM Benefits, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4 (3), 74–79, 2016.
- [79] Awad, E. M. and Ghaziri, H. M., *Knowledge Management*. Upper Saddle River, NJ.: Pearson/Prentice-Hall, 2004.
- [80] Field, A., *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*, 5th ed. London: Sage Publications, 2009.
- [81] Luong, D. L., Tran, D. H., and Nguyen, P. T., Optimizing multi-mode time-cost-quality trade-off of construction project using opposition multiple objective difference evolution, *International Journal of Construction Management*, 1–13, 2018.

- [82] Olbina, S. and Elliott, J. W., Contributing Project Characteristics and Realized Benefits of Successful BIM Implementation: A Comparison of Complex and Simple Buildings, *Buildings*, 9 (175), 1–19, 2019.
- [83] Ilhan, B. and Yaman, H., Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions, *Automation in Construction*, 70, 26–37, 2016.
- [84] Ilhan, B. and Yaman, H., BIM and sustainability concepts in construction projects: a case study, in *SBI3. Proceedings of Sustainable Procurement in Urban Regeneration and Renovation, 22–24 May (eProceedings)*, 2013.



# Otopark Seçim Davranışlarını Etkileyen Faktörler: İzmir Örneği

Mervegül UYSAL<sup>1</sup>  
Yalçın ALVER<sup>2</sup>

## ÖZ

Çalışmada, İzmir ilinin en merkezi bölgelerinden birisi olan Alsancak bölgesinde iki yol kenarı otoparkı ve iki kapalı otoparkı kullanan sürücülerin davranışları incelenmiştir. Sürücülere sosyoekonomik özelliklerinin, yolculuk bilgilerinin ve otoparkları neden tercih ettiklerinin sorulduğu bir anket yardımıyla veriler toplanmıştır. Otoparklarda kalma süreleri ile bu süreleri etkileyen bağımsız değişkenlerin neler olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Analizlerde ikili logit model kullanılmıştır. Yapılan gözlemlerle otoparkların doluluk oranları ve zirve saat işgal oranları tespit edilmiştir. Otopark seçimini etkileyen faktörler tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Otopark seçim davranışı, yol kenarı parklanma, kapalı otopark, logit model.

## ABSTRACT

### Factors Affecting Parking Choice Behaviors: The Case of Izmir

In the study, the parking behavior of drivers using two on-street car parks and two parking garages has been investigated in Alsancak. Alsancak is one of the most central regions of Izmir Province. Data were collected with the help of a survey asking drivers about their socio-economic characteristics, travel information and, why they prefer parking lots. This study tried to determine the duration of parking and the independent variables affecting parking lot choice. The binary logit model was used in the analysis. Utilization rate and peak hour occupancy of parking lots were determined with the help of observations. Factors affecting parking choice selection behaviours have been identified.

**Keywords:** Parking choice behaviour, on-street parking, multi-storey car park, logit model.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 9 Temmuz 2020 günü ulaşmıştır. 17 Haziran 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.766468>

1 Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Muğla - [merveguluysal@mu.edu.tr](mailto:merveguluysal@mu.edu.tr)  
<https://orcid.org/0000-0002-6482-1436>

2 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - [yalcin.alver@ege.edu.tr](mailto:yalcin.alver@ege.edu.tr)  
<https://orcid.org/0000-0002-9833-4505>

## 1. GİRİŞ

Otoparkların kapasitesinin yeterince etkili kullanılmaması ve park alanlarının yetersiz olmasından dolayı, park etmek isteyen araçların oluşturduğu trafik yolları işgal etmektedir. Ayrıca, mevcut park alanlarının yetersiz koşullarından dolayı, sürücüler zamanlarının büyük bir bölümünü araçlarına uygun park yeri aramak için harcamaktadırlar [1]. Sürücülerin park yeri aramak için kaybettikleri zamanın yanı sıra, bu “arama trafiği” genellikle büyük şehir merkezlerinde mevcut trafiğe eklenerek, trafik problemlerinin artmasına neden olmaktadır [2]. Bu yüzden, park problemleri genellikle bir döngü problemi ve kentsel ulaşım sistemi içerisinde sürücülerin park etme gereksinimlerinin yeterli bir şekilde karşılanamamasından kaynaklanan olumsuz etkiler olarak ele alınmaktadır [1].

Kutlu [3], özellikle çalışanların çok uzun süreler araçlarını park ettiklerini belirtmiştir. Alışveriş için gelen sürücüler daha kısa süreli parkları tercih etmektedir. Bu yüzden Kutlu, iş yolculukları ve alışveriş yolculukları için ayrı park alanlarının oluşturulması gerektiğini önermiştir. Özdirim [4], bir aracın gün içerisinde en fazla iki saat yolculuk halinde olduğunu belirtmiştir. Bu süre bir aracın gün içerisindeki hareket süresinin %8’ine karşılık gelmektedir. Şehir içi trafik ile ilgili yapılan çalışmalarda, araçların yolculuk halinde geçirdiği bu süreler dikkate alınmaktadır. Ancak çalışmalar yapılırken araçların park halinde bulunduğu süreler göz ardı edilmektedir. Bununla birlikte, araçların uygun bir park alanı bulmak için harcadıkları süre, park halinde buldukları süreden 12 kat daha fazladır. Bu sebeple otopark çalışmaları büyük önem kazanmaktadır.

Sürücülerin park alanı seçim davranışlarının tespit edilmesi, park alanlarının tasarımı ve işletmelerinin değerlendirilmesi için önemlidir [5]. Ayrıca şehir merkezlerindeki park problemlerini çözebilmek içinde, sürücülerin seçim davranışlarını bilmek gerekmektedir. Birçok araştırmacı çalışmalarında, sürücülerin park alanı seçim davranışlarını incelemiştir [5-9].

Hongzhi vd., ile Yong park alanı için ödenen ücret ve park alanı seçimi arasında güçlü bir ilişki olduğunu bulmuşlardır [10-11]. Hess [12] tarafından yapılan bir çalışmada ise, yolculuk amaçlarının park alanı seçim davranışlarını etkilediği belirtilmiştir. Yapılan bir başka çalışmada ise altı farklı park alanı incelenmiştir. Çalışmada veriler turistik bir bölge olan Beijing Lama Tapınağı’nda bir anket çalışması yardımıyla toplanmıştır ve park seçim davranışını etkileyen faktörler tespit edilmeye çalışılmıştır. Yürüme mesafesi ile park etme ücretlerinin otopark seçim davranışını etkileyen parametreler olduğu tespit edilmiştir. Ancak park etme süresi ve yürüme mesafesi karşılaştırıldığında sürücülerin yürüme mesafesi konusunda daha hassas oldukları ve park etme ücretlerinin göz ardı edilebileceği belirtilmiştir [5]. Ibeas vd. [6] üç farklı (ücretli ve ücretsiz yol kenarı park alanları ile yeraltı katlı otoparkı) tip park alanı için sürücülerin davranışlarını incelemiştir. Çalışmaya göre, İspanya’da, park alanı seçim davranışı ile araçların yaşı, varış noktasına ulaşana kadar ve park alanı bulana kadar geçen süre ile park alanı ücreti arasında, güçlü ilişkiler bulunduğu tespit edilmiştir. Almanya ve İngiltere’de sürücülerin park seçim davranışlarının incelendiği çalışmada ise park ücreti ve yolculuk amacının park seçim davranışını etkilediği tespit edilmiştir [7]. Teknomo ve Hokao [8] etkili bir park etme politikası geliştirmek amacıyla park alanı seçiminde sürücülerin davranışlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında üç farklı park alanı seçim modeli geliştirmişlerdir. Erişilebilir boş park alanı, yolculuk amacı, arama süresi, yürüme süresi, park ücreti, güvenlik ve rahatlık modellerin sonucunda park alanı seçme davranışını etkileyen faktörler olarak bulunmuştur. Kobus vd. [9]

çalışmalarında park etme ücretlerinin yol kenarı ve kapalı otoparkları seçme davranışını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır. Yol kenarı park etme fiyatlarındaki çok az bir düşüşün bile yol kenarı park etme davranışını tetikleyerek yol kenarı park alanlarındaki stoku artıracakı tespit edilmiştir. Khaliq vd. [13] araç sürücülerinin yol kenarı otopark seçim davranışlarını incelemişlerdir. Park ücreti, beklenen park süresi, hız sınırı, park kolaylığı, otopark alanı dışındaki çevre aktiviteleri gibi değişkenlerin seçim davranışını etkilediğini tespit etmişlerdir.

Ülkemizde de otoparklar ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle otopark sorunları ele alınmıştır. Gülhan ve Ceylan [14] yaptıkları çalışmada, İzmir ili'nin Konak ve Karşıyaka ilçelerinde park yönetim stratejileri için çeşitli çalışmalar ve analizler yapmışlardır. Çalışmada modern parklanma ve yeni park yönetim stratejileri üzerinde durulmuştur. Dönmez vd. [15] Safranbolu kentsel sit alanı için otopark sorunlarını incelemişlerdir. Çalışmada turistik bir bölge olan çarşı bölgesinde bulunan otoparklarda gözlemler yapılarak mevcut sorunlar ve yetersizlikler incelenmiştir. Ceylan vd. [16] Tekirdağ ili Süleymanpaşa ilçesinde bir otopark yönetim çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında yol kenarı otopark sistemlerinin trafik dolaşımına etkileri incelenmiştir. Otopark etütleri yardımıyla mahalle bazında otopark ihtiyaçları tespit edilmiştir. Yol kenarı otoparkların doğru işletilmesi ve yol kenarı parklanmanın yapılacağı yolun geometrisinin yeterli olduğu durumlarda bu otopark tipinin trafik dolaşımını etkilemediği tespit edilmiştir. Haldenbilen vd. [17] Denizli ilinde yol dışı otoparkları incelemişlerdir. Bu otoparkların kapasiteleri ve doluluk oranları tespit edilerek geleceğe yönelik otopark ihtiyacını tahmin etmeye çalışmışlardır.

Scheiner vd. [18] hane halkı anketleri ile Almanya'nın Dortmund kentinde bulunan tarihi bir mahallede bulunan park yerlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında özel park yerlerinin bulunması durumu ve mesafelerini, yol kenarı park yerlerinin kullanımını, park yeri arama sürelerini ve kullanıcıların memnuniyetini araştıran sorular sormuşlardır. Çalışmanın sonucunda yasal olarak bir ücretlendirme veya kısıtlama olmayan yol kenarı parklarda özel park yerlerine gereksinimin bulunmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca park yeri arama sürelerinin ve yol kenarına park etmiş araçlara olan mesafenin aslında algılanandan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Mevcut özel park yerleri gerektiği gibi kullanıldığı takdirde yasadışı parklanmanın %28 ila %49 oranında azaltılabileceği öngörülmüştür. Wang vd. [19] fiyatlandırmanın, park süresinin ve sirkülasyon oranının, yol kenarı parklardaki park etme davranışına olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada Nanning'de yeni bir fiyatlandırma politikası yürürlüğe girmeden önce ve sonra dört farklı zaman diliminde toplanan panel verileri kullanılmıştır. Önce ve sonra çalışması için Kolmogorov-Smirnov testleri yapılmıştır. Yazarlar park fiyatı arttıkça park etme süresinin azaldığını tespit etmişlerdir. Sirkülasyon hızındaki değişikliğin ise araç sahipliği ile ilişkili olacağı varsayımında bulunmuşlardır. Çalışmada ayrıca yol kenarı parklarda yeni bir fiyatlandırma politikasının park etme davranışını etkilediği tespit edilmiştir.

Atalay ve İçen [20] Elazığ ilinde otopark ihtiyacının araştırılması için çalışma yapmışlardır. Kent merkezinde bulunan yol dışı otoparklar ve yol kenarı parklar mevcut yönetmeliklere göre incelenmiştir. Park etüdü çalışmaları iki hafta süreyle yapılmıştır. Çalışma sonucunda mevcut otoparkların yetersiz olduğu, otoparkların tasarım problemlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Yol kenarı parklarda ise park etme açısının değiştirilmesinin kapasiteyi artıracakı tespit edilmiştir.

Şenbil ve Yetişkul [22] İstanbul ili için, sokakların serbest otopark alanları olarak kullanımı araştırmışlardır. Bu çalışmada park etme davranışlarının analizinin yapılması ve otopark politikalarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yol kenarı, bina içi ve ücretli parklanma olmak üzere üç farklı gece parklanma türü için hanehalkı seçimleri dikkate alınarak çok seçmeli logit model ile analizler yapılmıştır. Eğer otopark politikaları arazi kullanımı ve kullanıcıların park etme davranışlarına göre yapılmazsa, park problemlerinin ilerleyen dönemlerde çözülemeyen bir hale gelebileceği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada İzmir ili, Alsancak bölgesinde, iki yol kenarı park alanı ve iki kapalı otopark incelenerek otopark seçim davranışlarını etkileyen faktörler tespit edilmeye çalışılmıştır. Özellikle araçların park halinde geçirdiği süreler üzerinde durulmuştur. Yine gözlem süresince otoparkların doluluk oranları ve zirve saat işgal oranları tespit edilmiştir.

## 2. VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ

Bu çalışmada, Alsancak bölgesi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu bölge birçok hastane, iş merkezi, otel, spor merkezi ve ibadethane barındırmaktadır ve İzmir için turistik bir bölgedir. Ayrıca bu bölge, İzmir'in en eski yerleşim yerlerinden birisidir ve birçok tarihi alan yer almaktadır. Tarihi yapıların ve eski yerleşim yerlerinin çok olmasından dolayı, Alsancak'ta yeteri kadar yol ve otopark yapılması mümkün olmamaktadır. Ayrıca kent merkezlerinde yolların genişletilmesi ve otopark sayısının artırılması, özel araç trafiğini artıracak için ulaşım planlamasında tercih edilen bir yaklaşım değildir.

Alsancak bölgesi, çok yoğun bir şekilde kullanıldığı için otoparkların iyi yönetilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bölgede otopark gereksinimi; binaların kendi otoparklarıyla, İzelman'ın (İzmir Büyük Şehir Belediyesi'ne ait otopark şirketi) işlettiği otoparklarla veya kural dışı yola park etme ile çözülmeye çalışılmaktadır. Çizelge 1'de çalışmada incelenen park alanlarının özellikleri ve ücretlendirme bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 1 - Park alanlarının özellikleri

Otopark	Saatlik Ücretlendirme					Tür	Kapasite
	0-12 saat						
Sezer Doğan Sokak	7,50 TL					Yol kenarı	50 araç
Cumhuriyet Bulvarı	7,50 TL					Yol kenarı	142 araç
Kahramanlar	0-4 saat	4-8 saat	8-24 saat	19:00-09:00	Aylık Abone	Kapalı	1264 araç
	4,00 TL	8,00 TL	12,00 TL	4,00 TL	100 TL		
Kültürpark	0-12 saat	12-24 saat		19:00-09:00	Aylık Abone	Kapalı	594 araç
	7,50 TL	15,00 TL		5,00 TL	240,00 TL		

Çalışma kapsamında iki adet yol kenarı otoparkı seçilmiştir. Bu otoparklar Sezer Doğan Sokak üzerinde ve Cumhuriyet Bulvarı'nda yer alan İzelman'a ait yol kenarı parklardır. Sezer Doğan Sokak yol kenarı parkının bulunduğu sokakta hastane, oteller, iş merkezleri ve konutlar bulunmaktadır. Cumhuriyet Bulvarı'nda yer alan yol kenarı parkında, yolun her iki tarafında ve orta refüjde iki sıra olmak üzere toplam dört sıra halinde park edilmektedir. Konum olarak Kordon'a ve Kıbrıs Şehitleri Caddesi'ne yakın olmakla birlikte çevresinde iş merkezleri, eğlence mekânları, alışveriş merkezleri, sağlık tesisleri bulunmaktadır. Aynı zamanda çalışmada aynı bölgede bulunan iki adet kapalı otopark incelenmiştir. Bu otoparklar ise, bölgenin en büyük otoparkı olan Kahramanlar Katlı otoparkı ve Kültürpark yeraltı otoparkıdır (Şekil 1). Kahramanlar Katlı otoparkında hali hazırda işletilen bir ring sistemi bulunmaktadır.



Şekil 1 - İncelenen otoparklar

Çalışmada yüz-yüze anketlerden elde edilen veriler yanında otoparklarda yapılan araç sayımlarından elde edilen veriler de kullanılmıştır. Kahramanlar ve Kültürpark otoparklarında 22 Şubat-16 Mart tarihlerinde hafta içi 07.30-18.00 saatleri, hafta sonu ise 08.00-16.00 saatleri arasında toplam 402 anket yapılmıştır ve toplamda 2895 araç sayılmıştır. Yol kenarı otoparkları için ise 24 Mart-16 Şubat 2017 tarihleri arasında kapalı otoparklar için seçilen saatler ile aynı saatlerde toplam 303 adet anket yapılmıştır ve toplam 830 araç sayılmıştır. Anketler gelişigüzel (rastgele) örneklem seçimi kullanılarak toplanmıştır. Bu teknikte örneklem hiçbir ölçüt kullanılmadan toplanmaktadır. Bu teknikte toplanan verilerin ana kütleyi ne kadar temsil ettiği ya da ana kütleden ne kadar farklılaştığı tam olarak bilinmemektedir. Buna ek olarak yaklaşık anket sayılarının bilinebilmesi için, ana kütledeki eleman sayısı bilinemediği durumlarda kullanılan Denklem 1'e göre hesaplamalar yapılmıştır.

$$n = \frac{t^2 pq}{d^2} \quad (1)$$

Burada,  $n$  örneklem sayısını,  $p$  olayın görülüş sıklığını,  $t$  t tablosundan alınan değeri,  $q$  olayın görülmeiş sıklığını ve  $d$  ise olayın görülüş sıklığına göre sapmasını temsil etmektedir. Gözlem süresince sayılan araç sayısına göre hesaplar yapıldığında analiz edilecek örneklem sayısı 30'un altında kalmaktadır. Bu yüzden ana kütle bilinmediği duruma göre örneklem hesabı yapılmıştır. Ana kütle bilinmediği için serbestlik derecesi sonsuz olarak kabul edilmiştir. Güven aralığı %95 olarak kabul edilmiştir. 0,05 güven aralığı ve sonsuz serbestlik derecesinde t tablosundan bulunan değer 1,96 olarak elde edilmiştir. Bu veriler ışığında incelenecek veri sayısı Denklem 1'e göre 384 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre toplanan verilerin analizlerde kullanmak için yeterli olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan anketlerin ilk beş sorusunda sürücülerin sosyoekonomik ve demografik özellikleri, altıncı ve yedinci sorularda yolculuklarının başlangıç ve varış noktaları, sekizinci soruda yolculuk amaçları, dokuzuncu soruda yolculuk süreleri, sonraki iki soruda ise katılımcılara kaç kişi yolculuk ettikleri ve otoparkı tercih etme nedenleri sorulmuştur. Bu sorulardan sonra yol kenarı otoparkları ve kapalı otoparkları kullanan sürücülere sorulan sorular farklılık göstermektedir. Yol kenarı otoparklar için yapılan ankette, saatlik ücretlendirme politikası, Kahramanlar kapalı otoparkında kullanılan ring sisteminden haberlerinin olup olmadığı ve bu otoparkı kullanmak isteyip istemedikleri, kapalı otoparklar için ise, otoparkta kalma süresi, otopark ücreti fazla olsa yine tercih edip etmeme durumu, abonelik, ring güzergâh memnuniyeti, ring kullanan sürücülerin hangi durakta oldukları ve ne sıklıkta ring kullandıkları sorulmuştur. Ayrıca otoparkların giriş ve çıkışlarına kameralar yerleştirilerek araçların giriş- çıkış saatleri ile kaç adet aracın giriş yaptığı sayılmıştır. Eksik verisi bulunan anketler çalışmaya dâhil edilmemiştir. Çalışmada veriler toplanırken herhangi bir ölçek kullanılmamıştır. Toplanan veriler ile ilgili bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çalışmaya toplam 211 kadın, 494 erkek katılmıştır. Kadın sürücülerin 115'i yol kenarı otoparkları, 96'sı ise kapalı otoparkları tercih etmiştir. Yapılan anket çalışmasına göre, yol kenarı otoparkları en çok kullanan yaş grubunun 30-39 yaş aralığındaki sürücüler olduğu tespit edilmiştir. Ankete katılan sürücülerden Cumhuriyet Bulvarı'nda bulunan yol kenarı otoparkı kullanan sürücülerin %77'si bu yaş grubundadır. Bu değer Sezer Doğan Sokak için %42 olarak bulunmuştur. İncelenen kapalı otoparkları en çok kullanan yaş grubu ise kendi içinde değişiklik göstermiştir. Kahramanlar katlı otoparkını kullanan sürücülerin %37'si yol kenarı otoparklarda olduğu gibi 30-39 yaş grubunda olmasına rağmen, Kültürpark yer altı otoparkını kullanan sürücülerin %42'si 40-49 yaş grubundadır.

Anket çalışmasında otoparkları kullanan sürücülere eğitim durumları sorulmuştur. Çizelge 2'ye göre incelenen tüm otoparklarda, otoparkları kullanan sürücüler içerisinde en büyük pay eğitim durumu üniversite olan sürücülere aittir. Eğitim durumu üniversite olan sürücülerin, ankete katılan tüm sürücülerin %57'sini oluşturduğu belirlenmiştir.

İncelenen tüm otoparklarda iş yolculuğu en büyük paya sahiptir. Cumhuriyet Bulvarı'nda gezi/eglence yolculuğu yapan sürücüler ikinci en büyük paya sahiptir. Bu durum Sezer Doğan Sokak'ta ise sağlık yolculuğu olarak değişkenlik göstermiştir. Kahramanlar katlı otoparkında sağlık yolculuğu, Kültürpark yer altı otoparkında ise gezi/eglence yolculuğu

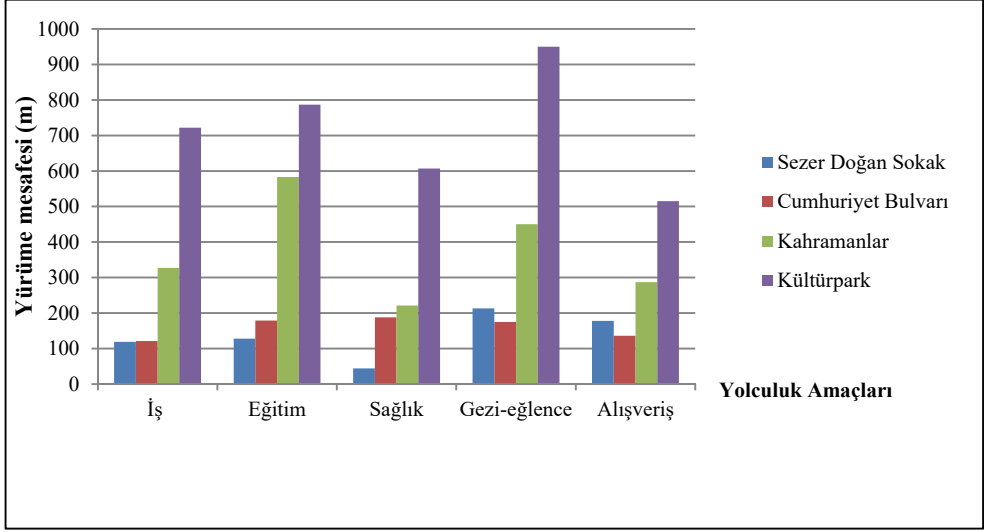
ikinci en büyük paya sahip yolculuk amaçları olarak tespit edilmiştir. Kahramanlar katlı otoparkını ve Kültürpark yer altı otoparkını kullanan sürücülerin özellikle hafta içi büyük çoğunluğunun iş ve sağlık amaçlı yolculuk ettikleri tespit edilmiştir. Bu da otopark etrafında var olan sağlık kuruluşları sebebi ile tercih ettiklerinin göstergesidir. Doluluk oranlarının detayları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2 - Anket sonuçları

		Cumhuriyet Bulvarı	Sezer Doğan Sokak	Yol Kenarı Toplam	Kahramanlar Katlı Otoparkı	Kültürpark Yeraltı Otoparkı	Kapalı Otopark Toplam
<b>Cinsiyet</b>	Erkek	98 (%55)	90 (%73)	188	192 (%82)	114 (%68)	306
	Kadın	81 (%45)	34 (%27)	115	42 (%18)	54 (%32)	96
<b>Yaş</b>	18-29	44 (%25)	28 (%23)	72	37 (%16)	14 (%8)	51
	30-39	77 (%43)	52 (%42)	129	86 (%37)	61 (%36)	147
	40-49	44 (%25)	26 (%21)	70	49 (%21)	70 (%42)	119
	50-59	6 (%3)	7 (%6)	13	34 (%14)	18 (%11)	52
	60+	8 (%4)	11 (%8)	19	28 (%12)	5 (%3)	33
		-Asg. Ücret	21 (%12)	17 (%13)	38	6 (%3)	10 (%6)
<b>Gelir</b>	Asg. Üc.-2500 TL	17 (%9)	25 (%21)	42	47 (%20)	19 (%10)	66
	2500 TL-3500 TL	46 (%26)	45 (%37)	91	122 (%52)	58 (%35)	180
	3500 TL-5000 TL	50 (%28)	17 (%13)	67	38 (%16)	57 (%35)	95
	5000 TL +	45 (%25)	19 (%16)	64	21 (%9)	24 (%14)	45
<b>Eğitim</b>	İlkokul	0 (%0)	5 (%4)	5	7 (%3)	3 (%2)	10
	Ortaokul	12 (%7)	20 (%16)	32	12 (%5)	0 (%0)	12
	Lise	50 (%28)	36 (%29)	86	72 (%31)	45 (%26)	117
	Üniversite	102 (%57)	58 (%47)	160	127 (%54)	112 (%67)	239
	Lisansüstü	15 (%8)	5 (%4)	20	16 (%7)	8 (%5)	24
<b>Meslek</b>	Serbest Meslek	28 (%16)	18 (%15)	46	16 (%7)	23 (%14)	39
	Özel Sektör	115 (%64)	75 (%61)	190	177 (%76)	126 (%75)	303
	Emekli	11 (%7)	13 (%10)	24	34 (%15)	7 (%4)	41
	Öğrenci	17 (%9)	10 (%8)	27	3 (%1)	3 (%2)	6
	İşsiz	8 (%4)	8 (%6)	16	4 (%1)	9 (%5)	13
<b>Yolculuk Amacı</b>	İş	72 (%40)	51 (%41)	123	146 (%62)	79 (%47)	225
	Eğitim	14 (%8)	15 (%12)	29	3 (%1)	8 (%5)	11
	Sağlık	20 (%11)	31 (%25)	51	39 (%17)	20 (%12)	59
	Alışveriş	39 (%22)	11 (%9)	40	21 (%9)	12 (%7)	33
	Gezi/Eğlence	33 (%18)	16 (%13)	49	25 (%11)	49 (%29)	74

Şekil 2’de incelenen otoparklarda yolculuk amaçlarına göre otoparktan varış noktasına olan yürüme mesafeleri verilmiştir. Sezer Doğan Sokak’ta bulunan yol kenarı otoparkına araçlarını park eden sürücülerin varış noktalarına olan ortalama yürüme mesafeleri 117,3

metre olarak hesaplanmıştır. Cumhuriyet Bulvarı'ndaki yol kenarı otoparkı için ise bu değer 147,5 metredir. Kahramanlar katlı otoparkında ortalama yürüme mesafesi 320 metre, Kültürpark yer altı otoparkında ise bu değer 667 metre olarak bulunmuştur. Yapılan gözlemlere göre, yolculuk amaçlarının yürüme mesafesi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Sezer Doğan Sokak'ta bulunan yol kenarı otoparkına en çok iş ve sağlık amaçlı yolculuklar yapılmıştır. Sürücülerin özellikle sağlık amaçlı yolculuklarında araçlarını gidecekleri sağlık merkezine en yakın noktaya park etmek istedikleri görülmüştür. Sürücüler gezi/eğlence ve alışveriş amaçlı yolculuklarında ise araçlarını varış noktalarına daha uzak bir yere park etmeyi kabul etmektedirler.



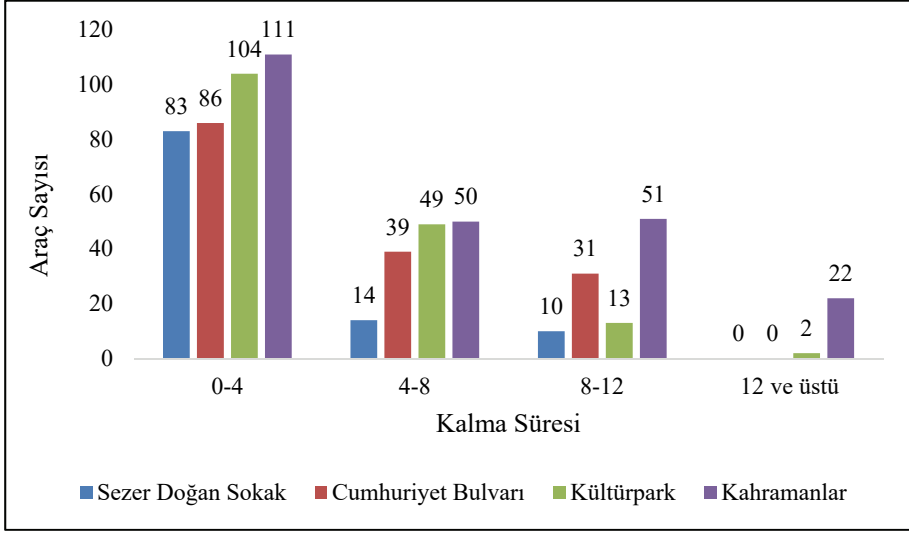
Şekil 2 - Yolculuk amaçlarına göre yürüme mesafeleri

Kahramanlar katlı otoparkında bir ring sistemi olduğu çalışmada daha önce belirtilmiştir. Kahramanlar katlı otoparkından hareket eden dört adet ücretsiz servisle bu sistem işletilmeye başlanmıştır. Servisler 07.00-23.00 saatleri arasında hafta içi ve Cumartesi günleri 10 dakika, Pazar günleri ise 30 dakika arayla sefer yapmaktadır. Başlangıç noktası Kahramanlar katlı otoparkı olan bu servisler, Kültürpark yer altı otoparkına uğrayarak Gündoğdu Meydanı'na ulaşmaktadır. Servisler bu noktadan geri dönerek Alsancak tam otomatik otoparkı ve Alsancak yeraltı otoparkına uğramaktadır. Servisler bu noktadan sonra tekrar Kahramanlar katlı otoparkına gelerek bir döngüsünü tamamlamaktadırlar. Şekil 3'te ring sisteminin durakları ve güzergâhı verilmiştir.

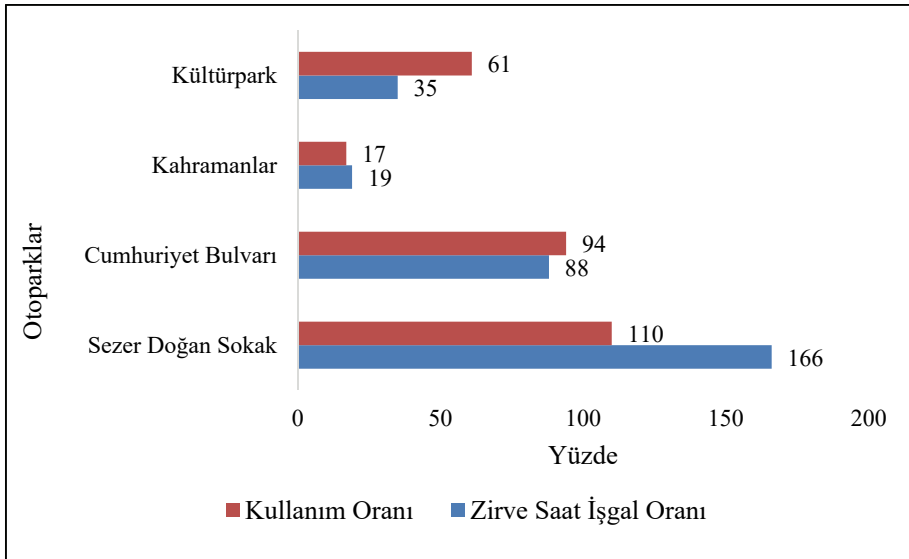
Bu çalışmada ankete katılan sürücülerin %35'i ring sistemini kullanan kişilerdir. Ring sistemini kullanan kişilerin %88'i Kahramanlar katlı otoparkını tercih etmişlerdir. Kahramanlar katlı otoparkını tercih eden ve ring sistemini kullanan sürücülerin ineceği duraklar ile varış noktalarına yürüme mesafeleri incelenmiştir. Ring sistemini kullanan sürücülerin yürüme mesafesi ortalama 254 metre, ring sistemini kullanmayan sürücülerin yürüme mesafesi ise ortalama olarak 580 metre olarak hesaplanmıştır.







Şekil 4 - Araç sayılarına göre otoparkta kalma süreleri



Şekil 5 - Otopark doluluk oranları

bulunduğu için, sabah zirve saatlerinde kısa süreli parklar gözlemlenmiştir. Bu yoğunluk sebebi ile sabah zirve saatler için yapılan hesaplamalarda bu otoparkın kapasitesi %166 değerinde, yani kapasitesinin 1,66 katı kadar bir işgal oranı ile hizmet vermeye çalışmaktadır. Aynı zamanda gözlem yapılan süre boyunca yine bu otopark için sirkülasyon

oranı yaklaşık 4 olarak bulunmuştur. Bu oran bize bu otoparkta bulunan bir park yerinin gözlem boyunca 4 kez işgal edildiğini göstermektedir. Kahramanlar Katlı otoparkı, zirve saatlerde %19 değerinde işgal oranı ile hizmet vermektedir. Çalışma süresince bu otoparkın doluluk oranı %17 olarak bulunmuştur. Çizelge 2’de verildiği üzere bu otoparkı kullanan sürücülerin %62’si iş yolculuğu amacı ile burada bulunmaktadır. Otopark kapasitesine göre yapılan işlemler sonucunda hem zirve saat işgal oranı hem de gözlem süresince doluluk oranları birbirine yakın bulunmuştur. Başka bir değişle, zirve saatlerde araçlarını bırakıp ring sistemiyle işyerlerine ulaşan sürücüler, gözlem süresince araçlarını burada bırakmaktadırlar. Otoparkı kullanan sürücüler genelde iş yolculuk amacı ile bu otoparka geldikleri için, hesaplanan bu iki değer birbirleriyle uyumlu çıkmıştır.

### 3. YÖNTEM

Logit modeller regresyon analizinin bir tipidir. Bu modellerde amaç, bağımlı değişken kategori olasılıklarını, modeldeki bağımsız değişkenler yardımıyla açıklamaktır. Bunun için çalışmada ikili logit model kullanılmıştır. İki seçenek arasından bir seçim yapılması istendiğinde kullanılan seçim yöntemi ikili lojit model adını almaktadır. Bu durumda seçenekler için oluşturulan kümede iki seçenek bulunmaktadır [21].

Sürücülerin park etme sürelerine göre kapalı otoparkları ya da yol kenarı otoparkları seçme davranışları, formülü Denklem (2) ve (3)’te verilen logit modeller [21] yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır.

$$U_{ji} = \beta'_{ji}x_{ji} + \varepsilon_{ji} \quad (2)$$

$$P_i(j) = \frac{e^{\beta'_{ji}x_{ji}}}{1 + e^{\beta'_{ji}x_{ji}}} \quad (3)$$

Burada  $U_{ji}$ , j. alternatif için i. karar vericinin faydasını,  $\beta'_{ji}$  tahmin edilen katsayılar vektörünü,  $x_{ji}$  değişkenleri,  $\varepsilon_{ji}$  ise hata vektörünü temsil etmektedir. Denklem (3), i. karar vericinin j. alternatifini seçme olasılığını vermektedir.

Bu çalışma için Seçenek I ‘Dört saat altı park etme süresi’ iken Seçenek II ‘Dört saat üstü park etme süresi olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmanın fayda fonksiyonu ise Denklem (4)’te verildiği gibidir.

$$U = -682SDS - 0,505CB + 0,79KP - 1,591Yaş4 - 1,2Yaş5 - 0,475Gelir4 - 0,617İş - 1,368Eğitim + 0,581Sağlık + 0,001Yürümes + 0,635Tekkişi \quad (4)$$

### 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Çizelge 3’te park etme süreleri göz önüne alınarak yapılan ikili logit model sonuçları yer almaktadır. Modelde bağımlı değişken olarak otopark kullanım süreleri kabul edilmiştir. Dört saat altı ve üstü olarak, otoparklarda park etme süreleri gruplandırılmıştır. Referans kategori ise dört saatin altında park etme olarak belirlenmiştir. İkili logit model yardımıyla otoparklarda park etme sürelerini etkileyen faktörler tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tablolarda bulunan işaretin yönü çıkan sonucun bağımlı değişkenin o parametreden ne yönde etkilendiğini göstermektedir. Başka bir deyişle negatif çıkan bağımsız değişkenler (1. Sütun) bağımlı değişkeni (park süresinin dört saatin altında olması) ters yönde etkilemektedir.

Çizelge 3 - Park etme sürelerine göre ikili logit model sonuçları

Bağımlı Değişken:Park etme süresi	B	S.E	df	Sig.	%95 C.I	
					Min.	Maks.
Sezer Doğan Sokak	-0,682	0,303	1	0,025	-2,12	-0,153
Cumhuriyet Bulvarı	-0,505	0,277	1	0,058	-1,652	-0,125
Kültürpark	0,79	0,253	1	0,001	0,292	1,287
50-59 yaş	-1,591	0,574	1	0,006	-0,965	0,148
60 yaş ve üzeri	-1,2	0,462	1	0,009	-2,108	-0,293
3500 TL-5000 TL	-0,475	0,232	1	0,041	-0,931	-0,019
İş amacı	-0,617	0,226	1	0,006	-1,061	-0,173
Eğitim amacı	-1,368	0,049	1	0,005	-2,324	-0,412
Sağlık amacı	0,581	0,271	1	0,032	0,048	1,115
Yürüme mesafesi	0,001	0	1	0,038	0,015	1,001
Tek başına yolculuk	0,635	0,219	1	0,004	1,112	1,887

Örneklem sayısı : 675  
Loglikelihood<sub>0</sub>: -411,48  
R.loglikelihood: 618,36  
McFadden R<sup>2</sup> : 0,6108

Çizelge 3'e göre yol kenarı parkların kısa süreli parklar için daha çok tercih edildiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin bu yol kenarı parklardan birisinin bir hastane önünde bulunması, diğerinin ise gezi, alışveriş ve dinlenme merkezlerine yakın bir konumda bulunmasıdır. 50 yaş üstü sürücülerin dört saat ve daha fazla sürelerde park ettikleri bulunmuştur. Analiz sonuçlarına göre orta gelirli sürücüler dört saat üstü park etmiştir. İş ve eğitim amaçlı yolculuklarda sürücüler uzun süreli park ederken, sağlık amaçlı yolculuklarda sürücüler kısa süreli park etmeyi tercih etmiştir. Yürüme mesafesi arttıkça sürücülerin daha uzun süreli park ettikleri tespit edilmiştir. Aynı şekilde tek başına yapılan yolculuklarda sürücüler daha uzun süreli park etmişlerdir. Bu yüzden tek başına yolculuk yapan sürücülerin çoğunlukla iş ve eğitim amaçlı yolculuk yapan sürücüler olduğu düşünülmektedir. Analiz sonuçlarına göre sürücülerin eğitim durumlarının ve cinsiyetlerinin park etme davranışına etki etmediği tespit edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada İzmir ili Alsancak bölgesinde bulunan ikisi yol kenarı ikisi kapalı otopark olmak üzere dört farklı otopark kullanıcılarının otopark seçim davranışları incelenmiştir. Veriler yüz yüze anketler yapılarak ve araç sayımları ile toplanmıştır. Çalışmada otoparkların doluluk oranları da tespit edilmiştir. Sezer Doğan Sokak'ta bulunan yol kenarı otoparkın kapasitesinin %166'sı oranında çalıştığı tespit edilmiştir. Bu otoparkın bulunduğu sokakta bir hastanenin bulunması ve çeşitli iş merkezlerine yakın olmasından dolayı bu otoparkın çok kullanıldığı belirlenmiştir. Kahramanlar katlı otoparkında bulunan ring sistemine bir güzergâh daha eklenerek veya mevcut ring güzergâhına bir durak daha eklenerek Sezer Doğan Sokakta bulunan yol kenarı otoparkından geçirilmesi bu otoparkın doluluk oranını normal seviyelere düşürebilir. Aynı şekilde bu düzenlemeyle birlikte kapasitesinin çok altında çalışan Kahramanlar Katlı otoparkının doluluk oranı artırılabilir.

Anket verilerinden elde edilen sonuçlara göre kadın sürücülerin en çok tercih ettiği otoparkın Cumhuriyet Bulvarı yol kenarı otoparkı olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin kadın sürücülerin incelenen yol kenarı otoparklarında kendilerini daha güvende hissetmesi olarak düşünülmektedir. Aynı zamanda bu otopark Kordon'a ve burada bulunan eğlence ve alışveriş noktalarına oldukça yakın bir yerde bulunmaktadır. Bu yüzden özellikle kadın sürücülerin, park ücreti ve park etme rahatlığını göz ardı ederek kendilerini güvende hissettikleri otoparkları tercih ettikleri düşünülmektedir. Bu yüzden kapalı otoparkların kameralarla güvenliğinin artırılması, otopark içi aydınlatmaların iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu otopark, yukarıda da belirtildiği gibi sahil kesimine ve gençlerin yoğun olarak ziyaret ettikleri merkezlere yakın olduğu için, genç ve orta yaşlı sürücülerin bu bölgeye gittiklerinde araçlarını bu otoparka park ettikleri düşünülmektedir.

Kahramanlar otoparkını seçen sürücülerin varış noktalarına uzun yürüme mesafeleri olduğu belirlenmiştir. Bu otoparkta bulunan ring sisteminin Şekil 3'te gösterildiği gibi geniş bir güzergâhı vardır. Sürücüler varış noktalarına yaklaştıkça, trafik yoğunluğundan ve yeterli araç park alanının mevcut olmamasından dolayı, park yeri aramak için araç içerisinde oldukça uzun süreler geçirmektedirler. Kahramanlar katlı otoparkı, daha uzakta olmasına rağmen ring sistemine sahip olmasından dolayı sürücüler bu otoparkı seçmektedirler. Başka bir deyişle sürücüler uygun bir park etme alanı arayarak geçireceği süre yerine ring sistemini kullanarak varış noktalarına daha kısa sürede gitmeyi tercih etmektedirler. Literatüre göre yürüme mesafeleri arttıkça sürücülerin kapalı otoparkları seçme olasılıkları artmaktadır [9]. Bu sonuç Kobus ve arkadaşlarının [9] yaptıkları çalışmanın sonuçlarına paraleldir. Kapalı otoparklara park etme, ortalama olarak, son varış noktasına daha uzun bir yürüme mesafesi gerektirdiğinden, bir sürücü kapalı otoparka daha uzun süre park edecektir.

Kültürpark yer altı otoparkı incelenen bölgenin merkezinde yer almasına rağmen bu otoparkı kullanan sürücülerin varış noktalarına olan yürüme mesafeleri fazladır. Sürücülerin varış noktalarına yürüme mesafesi artsa bile park etme kolaylığından bu otoparkı seçtikleri düşünülmektedir. Bunun sebebi özellikle uzak yerlerden gelen sürücülerin çok fazla park yeri aramak ve yoğun trafiğe girmek istememesidir.

Elde edilen sonuçlara ek olarak Kültürpark yeraltı otoparkı, İzmir fuar alanı içerisinde bulunmasından ve içerisinde yürüyüş alanları, kafeler ve eğlence merkezlerinin yer

almasından dolayı bu otoparkı tercih eden sürücülerin hafta sonları da kalabalık gruplar halinde gezi/eğlence için bu otoparkı tercih ettikleri söylenebilir.

Kent merkezinde bulunan kapalı otoparkların, incelenen sürücülerin varış noktalarına daha uzakta bulunmasından dolayı tam kapasitelerinde kullanılmadığı belirlenmiştir. Yol kenarı otoparkların ücretlendirilmesi saatlik olarak düzenlenerek, uzun süreli parklar için sürücüler kapalı otoparkları kullanmaya teşvik edilebilir. Aynı şekilde kapalı otoparklar için 0-12 saatlik olarak daha uygun bir ücretlendirme düzenlenirse, bu otoparklar daha efektif olarak kullanılabilir. Özellikle yol kenarı otoparkların kısa süreli parklar için düzenlenmesi, şehir merkezlerinde önemli bir trafik problemi olarak karşımıza çıkan kural dışı parklanmaların önüne geçilmesine yardımcı olabilir.

Otoparkların buldukları konumların, sürücülerin seçim davranışlarını etkilediği gözlenmiştir. Otopark seçim davranışları hafta içi ve hafta sonu olmasına göre değişkenlik göstermemiştir. Otoparkların anket verilerine göre hafta içi büyük ölçüde iş ve sağlık yolculuk amaçları için, hafta sonları ise gezi/eğlence ve alışveriş yolculuk amaçları için kullanıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla hafta içi ve hafta sonu yoğunluğuna göre ayrı park politikalarının geliştirilmesi ile mevcut park etme ve trafik problemlerinin üstesinden gelinebilir.

Çalışma, incelenen otoparklar özelinde İzmir ilinde bulunan sürücülerin otopark seçim davranışlarının tespitini amaçlamıştır. Otopark problemleri büyük ölçüde göz ardı edilen bir problem olduğu için bu makale literatürdeki bu eksikliği gidermeyi amaçlamıştır. Çalışma, sürücülerin otopark seçim davranışlarının bilinmesi ile ileride düzenlenecek otopark politikalarına veri sağlayabilecek niteliktedir. Gelecek çalışmalarda incelenen otopark sayısı ve otopark seçim davranışını etkileyen değişken sayısı artırılarak çalışma daha ileriye götürülebilir.

### **Kaynaklar**

- [1] Yardım, S., Korkmaz B. ve Yılmaz D., Sürdürülebilir Ulaştırma Politikaları Açısından Otopark Stratejileri, 7th International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE 06-210, 2006.
- [2] Okubay, M., Bölgesel Otopark Yönetimi ve Stratejileri: Tarihi Yarımada-Eminönü Bölgesi Örneği, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [3] Kutlu, K., Trafik Etüdüleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul. 1975.
- [4] Özdirim, M., Trafik Mühendisliği, KGM, Ankara, 1994.
- [5] Ma, X., Sun, X., He, Y., and Chen, Y., Parking Choice Behavior Investigation: A Case Study at Beijing Lama Temple. Procedia-Social and Behavioral Science, 96, 2635-2642, 2013.
- [6] Ibeas, A., Dell'Olio, L., Bordagaray, M., and Ortuzar, D., Modelling Parking Choices Considering User Heterogeneity, Transportation Research Part A, 70, 41-49, 2013.
- [7] Axhausen, W., K., Polak, and W., J., Choice of Parking: Stated Preference Approach Transportation, Kluwer Academic Publisher, Hollanda, 1991.

- [8] Teknomo, K., and Hokao, K., Parking Behavior in Central business District a Study case of Surabaya, Indonesia, *Journal of EASTS*, 2, 551-570, 1997.
- [9] Kobus, M., Puigarnau, E., Rietveld, P., and Ommeren, J., The On-street Parking Premium and Car Drivers' Choice Between Street and Garage Parking, *Regional Science and Urban Economics*, 43, 395-403, 2013.
- [10] Hongzhi, G., and Lanhui, L., Survey and Analysis of Parking Behavior in Metropolitan Business Quarter, *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2003.
- [11] Yong, Y., and Min, L., Research on Relationship Between Parking-charge and Parking Behavior in CBD, *Journal of Hebei University of Technology*, 37, 110-114, 2008.
- [12] Hess, S., and Polak, J.W., An Analysis of Parking Behavior Using Discrete Choice Models Calibrated on SP Datasets, *R-Sessions At The European Regional Science Conference*, Porto, 2004.
- [13] Khalid, A., Waerdan, P., Janssens, D., and Wets, G., A Conceptual Framework for Forecasting Car Driver's On-Street Parking Decisions, *Transportation Research Procedia*, 37, 131-138, 2019.
- [14] Gülhan, G., ve Ceylan, H., Otopark Sorununa Otopark Yönetimi Temelinde Yaklaşımlar: İzmir Örneği, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 63-73, 2010.
- [15] Dönmez, Y., Çabuk, S., Öztürk, M., ve Gökyer, E., Safranbolu Kentsel Sit Alanında Otopark Sorunu ve Çözüm Alternatifleri, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2), 137-145, 2016.
- [16] Ceylan, H., Gulhan, G., Ceylan H., ve Haldenbilen, S., Kentlerimizde Yol Kenarı Otopark Yönetim Stratejilerinin Trafik Dolaşımı Açısından Değerlendirilmesi: Süleymanpaşa İlçesi, Tekirdağ Örneği, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 12. Ulaştırma Kongresi (Ulaştırma Politikaları) Bildiriler Kitabı, 59-70, 2017.
- [17] Haldenbilen S., Murat, Y.Ş., Baykan, N., ve Meriç, N., Kentlerde Otopark Sorunu: Denizli Örneği, *PAJES*, 5(2-3), 1099-1108, 1999.
- [18] Scheiner J., Faust N., Helmer J., Straub M., and Holz-Rau C., What's That Garage For? Private Parking and On-Street Parking in a High-Density Urban Residential Neighbourhood, *Journal of Transport Geograpy*, 85, 1-14, 2020.
- [19] Wang H., Li R., Wang X., and Shang P., Effect of On-Street Parking Pricing Policies on Parking Characteristics: A Case Study of Nanning, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137, 65-78, 2020.
- [20] Atalay A., ve İçen Y., Kentiçi Otopark Analizi: Elazığ İli Örneği, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(3), 403-413, 2020.
- [21] Train, K.E., *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Pres, New York, 2009.
- [22] Şenbil M., ve Yetişkul E., İstanbul için Gece Parklanma Davranışları Modellemesi, *İMO Teknik Dergi*, 27 (3), 7515-7532, 2016.





# Ultrasonik Yöntemler ile Çelik-lif Takviyeli Betonda Eğilme Çatlaklarının Derinlik Tayini

Ahmet Serhan KIRLANGIÇ<sup>1</sup>

## ÖZ

Betonda eğilme çatlaklarının derinliklerin tespit edilmesi, yapısal elemanların kalan yük taşıma kapasitelerinin tayini için önem taşımaktadır. Uygulamada, mevcut tahribatsız ultrasonik test yöntemleri çatlak derinliğinin tespitinden ziyade ya elemanların kalınlıklarının ölçülmesinde ya da mukavemet tayininde kullanılmaktadır. Bir cisim içinde yayılmakta olan ultrasonik dalgalar bir çatlak ile karşılaştıkları zaman dalga karakteristiklerinde değişim gözlemlenir. Bu değişimin takibi ve ölçümü ile çatlak derinliğinin tayini mümkündür. Bu makale, bu yaklaşıma dayanarak geliştirilen tanı metodunu, 7 adet çelik-lifli beton kiriş numune ( $50 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) üzerinde gerçekleştirilmiş olan ultrasonik testler üzerinden incelemektedir. Kiriş numeneler çatlak-kontrollü üç-noktalı-eğilme testi ile belli bir çatlak derinliğine ulaşılan kadar hasara uğratılmış ve akabinde gerçekleştirilen ultrasonik testler ile dalga yayılımı kaydedilmiştir. Kaydedilen dalga sinyal serileri, ayrık wavelet dönüşüm ve frekans-dalga numarası analizi gibi dijital sinyal işleme teknikleri ile analiz edilerek iki tip tanı indeksi elde edilmiştir. İlk tanı indeksi malzeme sönüm katsayısı  $\alpha$ , dalga sönümünü; diğer tanı indeksi 'dağılım indeksi  $DI$ ' ise, dalgaların faz hızındaki dağılımı temsil etmektedir. Her iki tanı indeksinin de çatlak tespiti ve derinlik tahmininde faydalı oldukları görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Tahribatsız muayene, çatlak derinlik ölçümü, çelik-lif takviyeli beton, ultrasonik yüzey dalgaları, dalga sönümü, dalga dağılımı.

## ABSTRACT

### Ultrasound based Crack Depth Estimation in Steel-fiber Reinforced Concrete

Estimation of the depth of surface-breaking cracks caused by bending in concrete has crucial importance in order to predict the remaining load capacity of a structural member. In practice, ultrasonic tests are the most commonly used non-destructive methods to assess the condition of concrete. However, the commercial ultrasound-based methods focus on the estimation of thickness of the structural element rather than the crack depth. The cracks cause dispersion

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21 Eylül 2020 günü ulaşmıştır. 1 Mart 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.797412>

1 Bahçeşehir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - serhan.kirlangic@eng.bau.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0003-3638-4475>

and attenuation in the propagating waves, and thus by monitoring the changes in these wave characteristics, diagnostic indexes correlated with the crack depth can be defined. This paper explains this approach through the tests performed on seven laboratory-scale steel-fiber reinforced concrete beams (50x10x10 cm<sup>3</sup>). The beams are loaded under the crack-controlled three-point bending test until a specific crack depth is reached. These beams are then subjected to ultrasonic testing to acquire the propagating surface waves. The recorded signals are analysed by utilizing signal processing techniques, including discrete wavelet transform and frequency-wavenumber analysis in order to extract two diagnostic features, namely, material attenuation coefficient and dispersion index. It is shown that both diagnostic features are able to detect the crack and estimate its depth.

**Keywords:** Non-destructive testing, crack depth estimation, steel-fiber reinforced concrete, ultrasonic surface waves, dispersion, attenuation.

## 1. GİRİŞ

Betonarme yapı elemanlarının hasar durumlarının belirlenmesi çoğunlukla görsel muayene ile yapılmaktadır. Bu yöntemin subjektif ve zaman alıcı olması sebebiyle yakın geçmişte tahribatsız muayene yöntemleri beton yapılar için yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu alanda birçok akademik araştırma olduğu gibi ticari olarak betonun malzeme özelliklerini tahribatsız tayin edecek ekipmanlar da günümüzde mevcuttur. Endüstride kendine yer bulmuş olan en yaygın metotlardan bazıları; ultrason, yer radarı (ground penetrating radar, GPR) ve öz direnç (electrical resistivity, ER) yöntemleridir. Ultrasonik metotlar mekanik dalgaların beton içindeki hızının tespitine dayanırken [1,2], GPR elektro-manyetik dalgaların yayılmasının takip edilmesine dayanır. GPR aslında yeraltı profilini çıkarmak için geliştirilmiş bir jeofizik uygulaması olmakla birlikte beton döşeme ve yol kaplamalarının kalınlık ve donatı tespiti için de kullanılabilir [3]. Elektrik direnç yöntemi ise betonun elektrik akımına gösterdiği direncin ölçülmesine dayanmakta olup, betonarme donatısındaki korozyonun tespitinde kullanılabilir [4]. Uygulamada, bu yöntemler arasında ultrasonik yöntemler betondaki çatlakların tespitinde öne çıkmaktadır.

Ultrasonik tahribatsız yöntemler, genellikle beton içinde yayılan dalgaların geçiş hızının ölçülmesi ve bu karakteristik malzeme özelliğinin referans değer ile karşılaştırılarak betonun dayanımının dolaylı olarak tahmin edilmesine dayanır. Bu yöntem ultrasonik geçiş hızı (UPV) olarak bilinmektedir [1]. UPV'den uyarlanmış bir başka yöntem olan ultrasonik itki-eko (UPE) ise, beton elemanların kalınlığının yanı sıra betonun içinde olup yüzeyde görünmeyen çatlak veya boşluk gibi kusurların tespiti için kullanılmaktadır [2]. Bu klasik ultrasonik test metotlarında bir tip dalga karakteristiği, birincil-dalga (P-dalgası) hızı, tanı parametresi olarak elde edilir. Ancak P-dalgası hızı, yüzeyde görünen eğilme tipi çatlakların derinliğinin tayininde, çatlak ucunun şekline ve yönüne bağlı olarak, yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir [5]. Klasik ultrasonik testlerin bu eksikliği, yüzey dalgalarını kullanarak aşılabilir. Yüzey dalgalarından, penetrasyon derinlikleri oranında, içinde yayıldığı malzeme hakkında bilgi edilebilir. Bu sebeple, yüzey dalgalarının tahribatsız muayene amaçlı birçok farklı uygulamada kullanımı bulunmaktadır. Örneğin, yeraltındaki tesisatın tespiti [6], yeraltı boşluklarının boyutlandırılması [7,8] ve beton yapı elemanlarının durum tayini [9,10] bu uygulamalardan bazılarıdır.

Yüzey dalgaları içinde yayıldıkları cismin malzeme özelliklerine göre ilerledikleri mesafe boyunca sönümlenirler. Eğer yayılan dalgalar ilk kaynak noktasından itibaren farklı mesafelerde kayıt altına alınırsa, dalga-boylarının genliklerinin değişiminden malzeme sönüm katsayısı tespit edilebilir. Sönüm katsayısı malzemenin karakteristik bir özelliği olduğundan, bu katsayıdaki değişim takip edilerek malzemedeki yüzey kusurlarının ne kadar derine indiğini tayin etmek mümkün olabilmektedir [11,12]. İkinci bir tanı parametresi de yüzey dalgaların faz hızlarının dağılımından elde edilebilir. Sınırsız katı cisimlerde, tüm dalga boyları aynı hızda hareket eder. Cisimde çatlak veya boşluk gibi bir kusur olması durumunda ise, bu engel ile karşılaşan dalga-boylarından engelin boyutları ile orantılı olanlar dağılım özelliği gösterir. Başka bir ifade ile, bu dalga-boylarının hızlarında engel ile etkileşime girmeyen dalga-boylarına kıyasla değişim gözlenir. Bu durum dalgalarda dağılım (dispersiyon) olarak bilinir ve malzemenin hasar tayininde faydalanılmaktadır [13,14,15].

Literatürde, beton yapı elemanlarında eğilme çatlak derinliğinin ultrasonik yöntemler ile tayinine dönük araştırmalarda çoğunlukla, laboratuvar numuneleri içinde yaratılmış yapay düzgün şekilli çatlak veya kusurlar üzerinde çalışılmıştır. Bu araştırmalarda, çatlak derinliği ile sönüm ve dispersiyon gibi dalga yayılım karakteristiklerinin çatlak derinliği ile olan ilişkisi niceliksel olarak ortaya konulmuştur [11-15]. Ancak beton yapı elemanlarında oluşan eğilme çatlakların gerçek formları çok daha komplekstir. Bu yüzden, yüzeyde görünen eğilme çatlaklarının derinliklerinin, dolayısıyla yapı elemanının en-kesit alanındaki kaybının, doğru tayin edilebilmesi için gerçekçi şekildeki çatlaklar üzerinde detaylı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda, bu araştırmada, beton yapı elemanlarında oluşan eğilme çatlaklarının derinliğini tayin edebilmek için ultrasonik dalgalara dayanan bir metot geliştirilmiştir. Bu amaçla, önce farklı derecelerde hasara maruz bırakılmış çelik-lif takviyeli beton kırış numuneler üzerinde çok-kanallı ultrasonik testler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, hasar tanı indekslerini dalga sönüm ve hız dağılım davranışlardan elde edecek sinyal işleme algoritması geliştirilmiştir. Çelik-lif takviyeli betonların ultrasonik yöntemler ile muayenesine yönelik önceki araştırmaların büyük bir çoğunluğu malzeme karakterizasyonu amacıyla gerçekleştirilmiş olup, çelik-lifli betonlarda ultrasonik yöntemler ile çatlak derinliği tayinine dönük araştırmalar ise çok sınırlıdır. Bu konuda, dikkate değer tek çalışmada ise yüzey dalgalarının genliğinin dalga hızına kıyasla çatlak derinliğine daha duyarlı olduğu tespiti yapılmıştır [16]. Burada sunulan çalışmada çelik-lifli betonlarda eğilme çatlağı derinliği tayini için ilk kez çok-kanallı ultrasonik test konfigürasyonu kullanılarak, dalga hızı dışındaki dalga özelliklerinden (sönüm ve dağılım) hasar tanı indeksleri elde edilmiştir.

## 2. MEKANİK DALGA YAYILIM KARAKTERİSTİKLERİ

Bu çalışmada, çatlak derinliği tayini için aşağıda açıklanan mekanik dalga yayılım karakteristiklerinden faydalanılmıştır.

### 2.1. Malzeme Sönüm Katsayısı

Yayılan dalgalarda sönüm, malzeme sönümü ve geometrik yayılım nedeniyle oluşur. İçsel sürtünmeden kaynaklanan malzeme sönümü, bir malzeme özelliği olan sönüm katsayısı  $\alpha$  ile ifade edilir ve yayılan dalgalardan aşağıdaki denklem ile belirlenebilir [17]:

$$\alpha = \frac{1}{x_{i+1}-x_i} \left[ \ln \left( \frac{A_{i+1}}{A_i} \right) - \beta \ln \left( \frac{x_{i+1}}{x_i} \right) \right] \quad (1)$$

Burada  $A_i$  etki noktasından  $x_i$  mesafesinde ölçülmüş olan dalganın genliğidir.  $\beta$  ise dalga cephesindeki geometrik büyümeden kaynaklı sönüm ile ilgili olan geometrik yayılım sabitidir ve yüzey dalgaları için -0,5'e eşittir.  $A_i$  dalga genliği olabileceği gibi Fourier dönüşüm (FT) gibi sinyal işleme teknikleri kullanılarak elde edilen belirli bir frekans veya frekans aralığının büyüklüğü de olabilir.

## 2.2. Faz Hızı Dağılımı (Dispersiyon)

Homojen bir cismin yüzeyinde yayılan yüzey dalgalarını oluşturan tüm dalga-boyları sabit Rayleigh dalga hızında  $V_R$  hareket eder. Cisimde bir engel ile karşılaşan dalga-boylarının faz hızlarında ise, engelin boyutları ile orantılı olarak, dağılım gözlenir. Faz hızındaki bu dağılım “dispersiyon” olarak adlandırılır. Dispersiyon dalga-boyuna ve dolayısıyla frekansa bağlıdır. Dalga boyu  $\lambda$ , faz hızı  $V_{ph}$  ve frekans  $f$  arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\lambda = V_{ph}/f \quad (2)$$

Yayılan dalgalarda dispersiyon, “dispersiyon eğrisi” olarak adlandırılan frekans  $f$  vs. faz hızı  $V_{ph}$  grafiği ile görselleştirilir. Yüzey dalgalarında dispersiyon tespiti için gerekli prosedür üç adımda özetlenebilir [18]:

- (i) “ofset-zaman” ( $x - t$ ) domaininde dalga sinyallerinin kayıt edilmesi,
- (ii) sinyallerin “ofset-zaman” ( $x - t$ ) domaininden “frekans-dalğanumarası” domainine dönüştürülmesiyle “ $f - k$  spektrumunun” elde edilmesi,
- (iii)  $f - k$  spektrumundan faz hızı  $V_{ph}$  hesabının yapılarak dispersiyon eğrilerinin çizimi.

Burada, dalğanumarası  $k$  ile dalgaboyu  $\lambda$  aşağıdaki ilişki ile birbirine bağlıdır:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3 kullanılarak, (iii) adımda bahsedilen  $f - k$  spektrumundan faz hızı, başka bir deyişle dispersiyon eğrisi, aşağıdaki gibi elde edilir:

$$V_{ph} = 2\pi(f/k) \quad (4)$$

Dalga yayılımındaki dispersiyonun ölçümü için farklı konumlarda dalga sinyallerinin kayıt altına alınmasına izin veren çok kanallı bir test konfigürasyonunun kullanılması gerekmektedir. Daha sonra, kaydedilen bu sinyallerin iki boyutlu Fourier dönüşümü (2D-FT) ile ofset-zaman  $p(t, x)$  domaininden frekans-dalğanumarası domainine  $P(f, \kappa)$  aşağıdaki gibi geçiş yapılarak  $f - k$  spektrumu elde edilir:

$$P(f, \kappa) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x) e^{-i(2\pi ft - \kappa x)} dt dx \quad (5)$$

2D-FT ile elde edilen  $f - k$  spektrumunda direk yayılan, yansıyan ve iletilen dalgalar tespit edilebilmektedir. Bu spektrumda, çatlakların dalgaların yayılımında sebep oldukları dağılım etkisi de gözlemlenerek, çatlak boyut tahmini gerçekleştirilebilir.

### 3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Yukarıda bahsi geçen dalga yayılım karakteristiklerinin eğilme çatlakları içeren beton yapı elemanları içindeki davranışların incelenmesi için laboratuvar ölçekli çelik-lifli beton numuneler üzerinde aşağıda detayları verilen çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

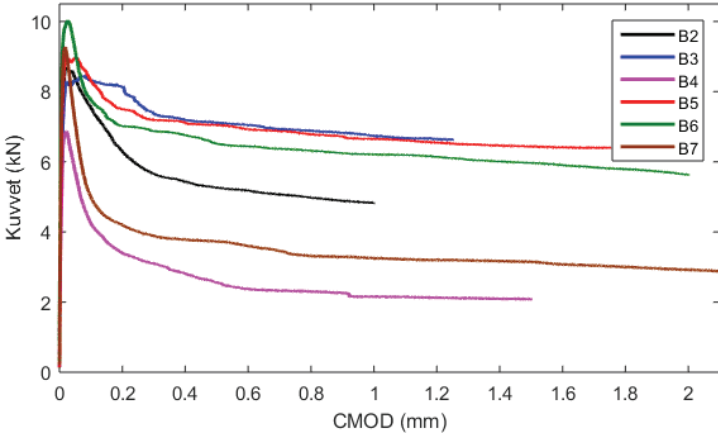
#### 3.1. Beton numunelerin Hazırlanması

Ultrasonik testleri gerçekleştirmek için eğilme çatlakları içeren 7 adet 50x10x10 cm<sup>3</sup> boyutlarında çelik lif takviyeli beton kiriş numune üretilmiştir. Çelik lif takviyeli numune tercih edilmesinin sebebi, sünek numuneler elde etmek ve EN 14651 [19] test prosedürü ile çatlak oluşumunu kontrol altında tutarak farklı seviyelerde çatlak oluşturabilmektir. Bu çelik lif takviyeli beton (SFRC) kiriş numunelerin 1 m<sup>3</sup> tasarım karışımı: 1053,9 kg kaba agregası, 797,2 kg kum, 310 kg CEM I 42.5R tipi çimento, 201,7 kg su, 3,5 kg süper-akışkanlaştırıcı ve 39,3 kg 35 mm uzunluğunda 0.55 mm çapında (boyluluk oranı = 64) kanca uçlu çelik elyaf içermektedir. Maksimum dane çapı 24 mm, çelik-lifin çekme dayanımı ise 1345 MPa'dır.

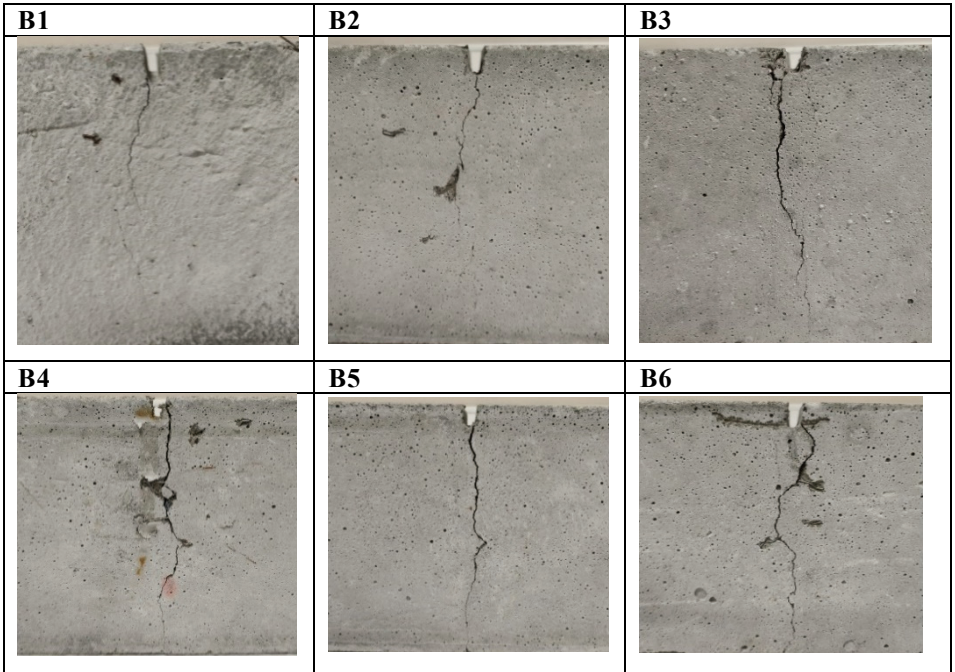
28 günlük kür süresinden sonra, altı adet kiriş, EN 14651 standardına uygun olarak 8 mm derinliğinde çentik açıldıktan sonra 100 kN yükleme kapasiteli MTS marka servo-hidrolik kontrollü eğilme deneyi cihazı kullanılarak, üç-nokta-eğilme testine tabi tutulmuş ve gerçek şekilli dikey düşümlü çatlaklar oluşturulmuştur. Eğilme testleri yükleme hızı 0.07 mm/dakika olarak ve yükleme başlığı deplasmanı kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme sırasında zaman, yük, yükleme başlığı deplasmanı ve çatlak ağız açıklığı deplasmanı (CMOD) verileri sürekli olarak kaydedilmiştir. Eğilme testleri sırasında, CMOD değeri önceden belirlenmiş bir çatlak genişliğine ulaştığında yükleme durdurulmuştur; böylece her kiriş için farklı bir çatlak derinliği elde edilmiştir.

Tablo 1 - Kiriş Özellikleri

Kiriş	Eğilme Dayanımı (MPa)	CMOD (mm)	Çatlak Derinliği (mm)
B1	N/A	N/A	N/A
B2	5.34	1.00	53
B3	4.79	1.25	58
B4	3.65	1.50	79
B5	4.49	1.75	76
B6	4.63	2.00	90
B7	4.93	2.25	94



Şekil 1 - Yük vs. CMOD eğrileri



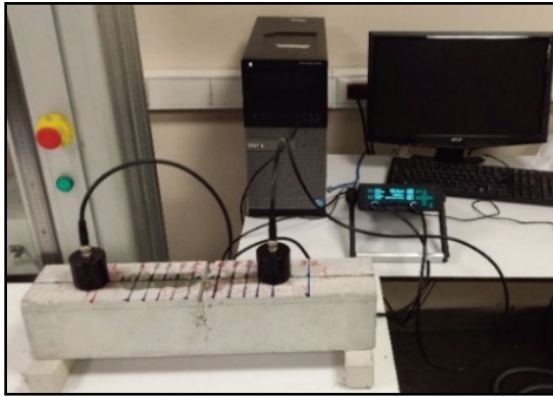
Şekil 2 - Kiriş numunelerdeki eğilme çatlakları

Eğilme testlerinden elde edilen yükleme vs. CMOD eğrileri Şekil 1 gösterilmiştir. Şekildeki eğrilerde görülebileceği gibi maksimum CMOD değerleri 0,25 mm'lik bir artışla 1,00 mm ile 2,25 mm arasında değişecek şekilde eğilme testleri tamamlanmıştır. Kirişler bu maksimum CMOD değeri artan şekilde B1, B2, B3, B4, B5, B6 ve B7 olarak kodlandırılmıştır; B1

hasarsız kontrol kirişini, B7 ise en çok hasar içeren kirişi ifade etmektedir. Şekil 2’de gösterilmiş olan çatlakların görsel muayene sonucu ölçülen derinlikleri Tablo 1’de verildiği gibi 53 ila 94 mm arasında değişmektedir. Kirişlerin eğilme mukavemetleri ise 3.65 MPa ila 5.34 MPa (Tablo 1) arasında değişmekte olup, ortalaması 4.64 MPa’dır. Son olarak, basınç dayanımı, EN 12390-3’e [20] uygun olarak test edilen üç adet 160 mm çapında ve 320 mm uzunluğunla silindirik numuneden 31,8 MPa olarak ölçülmüştür.

### 3.2. Ultrasonik Testler

Ultrasonik test düzeneği: ultrasonik bir pundit (Proceq Pundit Lab), 54 kHz rezonans frekansına sahip iki transdüser ve bir bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 3). Transdüserlerden biri, transmittör olarak kullanılarak çatlaktan 15 cm uzağa, alıcı olarak kullanılan diğer transdüser ise 18 cm uzunluğundaki bir çizgi boyunca kaydırılarak farklı noktalara yerleştirilmiştir. Alıcı transdüser birbirinden 2 cm mesafe ile ayrılmış 10 farklı konuma yerleştirilmiştir. Transmittör, alıcı transdüserin ilk konumuna göre 6 cm uzaklıktadır. Transdüserler ve kiriş numuneler arasında vakum gresi sürülerek yüzey teması tam olarak sağlanmıştır. Her lokasyonda, 100 adet ultrasonik sinyalin ortalaması alındıktan sonra bu ortalama sinyal bilgisayarda kaydedilmiştir. Ultrasonik testlerin sonunda, her bir numune için farklı noktalarda kaydedilmiş 10 sinyalden oluşan bir veri seti elde edilmiştir.

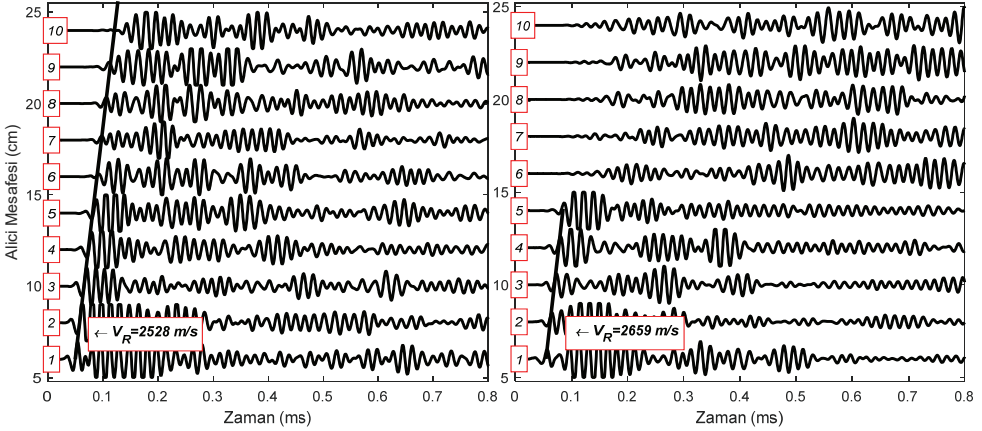


Şekil 3 - Test düzeneği

### 3.3. Ultrasonik Test Sinyalleri

Kontrol kirişi (B1) ile en derin çatlaka sahip olan kirişten (B7) elde edilen ultrasonik yüzey dalga sinyalleri normalize edilerek Şekil 4’te gösterilmiştir. B7’den elde edilen sinyallerde çatlaktan sonra dalga cephelerindeki önemli azalma açıkça görülmektedir. B7’de 6 nolu alıcıdaki maksimum dalga genliğinde komşusu olan 5 nolu alıcıya göre %90 düşüş gözlemlenmiştir. Yüzey dalgasının varış zamanlarına göre hesaplanan Rayleigh dalga hızı  $V_R$ , sağlam kiriş için 2528 m/s bulunmuştur. B7 için ise, çatlak nedeniyle, çatlaktan önce ve sonra iki farklı  $V_R$  tespit edilmiştir. Çatlaktan önce (1-5 nolu alıcılar kullanılarak)  $V_R$  2659 m/s olarak belirlenmiştir ki; bu değer B1’de ölçülen hız ile uyumludur. Çatlaktan sonra ise, dalga cephesindeki azalma sebebiyle (6-10 nolu alıcılar için), net bir varış zamanı tespit

edilmemiştir. Çatlak ilk varması gereken dalga cephesini önemli ölçüde sönmüldürmekte; ardından ise çatlak ucundan kırılarak daha geç ulaşan dalgalar belirlemektedir. Çatlaktan geçen dalga cephesi çok zayıf olduğu için,  $V_R$  güvenle belirlenememiştir ve bu nedenle çatlak derinliğinin bir ölçüsü olarak değerlendirilmemiştir. Bunun yerine, ultrasonik test sinyalleri üzerinden dalga sönmüne ve dispersiyonuna dayanan iki diyagnostik tanı indeksi aşağıda anlatıldığı gibi geliştirilmiştir.



Şekil 4 - Ultrasonik dalga sinyalleri (sol) B1 ve (sağ) B7

## 4. DİYAGNOSTİK İNDEKSLER İÇİN VERİ ANALİZİ

### 4.1. Malzeme Sönüm Katsayısı

Kiriş numunelerindeki çatlakların dalga enerjisi üzerinde sönmüleyici etkisi, Şekil 5'te farklı çatlak derinliklerine sahip B1, B3 ve B7 kirişleri için verilmiş olan 'frekans vs. alıcı mesafesi' spektrumunda açıkça görülmektedir. Sağlam numune olan B1 için tüm frekanslar kiriş boyunca yayılımına devam etmekte iken, çatlak derinliği arttıkça daha küçük frekanslar, başka bir deyişle sadece çatlaktan geçebilecek büyüklükteki dalga-boyları yayılımına devam edebilmektedir. Çatlak derinliği (94 mm) neredeyse kiriş en-kesitine (100 mm) denk olan B7 için ise hiçbir frekans çatlaktan geçememiştir. Çatlakın frekanslar üzerindeki bu sönmüleyici etkisi Denklem 1'de verilen sönmüleme katsayısı ile ölçülebilir. Denklem 1, tüm spektral enerji yerine, sadece seçilmiş frekansların enerjisini dikkate alacak şekilde adapte edilirse, farklı frekansların sönmülenme seviyelerini inceleyerek çatlak derinliğini tayin etmek mümkün olacaktır. Bu sebeple burada, Denklem 1'deki  $A_i$  parametresi için klasik Fourier dönüşümü yerine wavelet dönüşümü (WT) sonucunda elde edilen değerler tercih edilmiştir. Klasik Fourier dönüşüm zaman domaininden frekans domainine dönüşümü sağlarken, aşağıdaki denklemde gösterilmiş olan sürekli wavelet dönüşümü (CWT) zaman domainini kaybetmeden sinyallerin frekans bantlarına ayrılmasını sağlar [21]:

$$W_{\psi}(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \psi^* \left( \frac{t-t'}{a} \right) dt \quad (6)$$



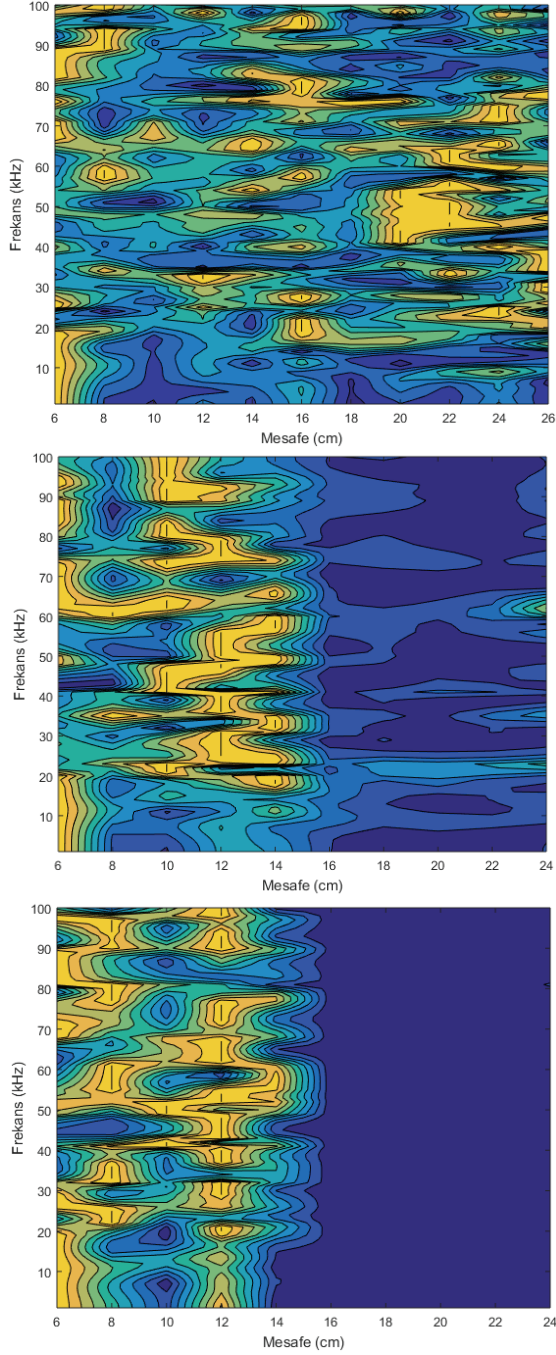
Burada,  $a$  dilatasyon (ölçek) parametresi;  $t'$  konum (zaman kayması) parametresi;  $p(t)$  zaman sinylidir.  $\psi^*$  ise ana dalgacık fonksiyonunun karmaşık eşleniğini ifade eder. Wavelet dönüşümü, Denklem 6'da ifade edildiği üzere, ölçeklendirilebilen ve kaydırılabilen bir dalgacık fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirildiğinden, belirli bir frekansın zaman domainde takibini sağlar. Bununla birlikte, daha geniş bir frekans aralığı hedeflenirse, o zaman, CWT yerine, ayrık wavelet dönüşümü (DWT) tercih edilmelidir. DWT kullanılarak, herhangi bir  $p(t)$  sinyali, her biri belirli bir frekans bandı genişliği ile ilişkili olan alt-sinyallere ayrıştırılabilir. Bunun için DWT'de aşağıda verilmiş olan ayrıklaştırılmış ana dalgacık fonksiyonu kullanılmalıdır [22]:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \psi\left(\frac{t - k\tau_0 a_0^j}{a_0^j}\right) \quad (7)$$

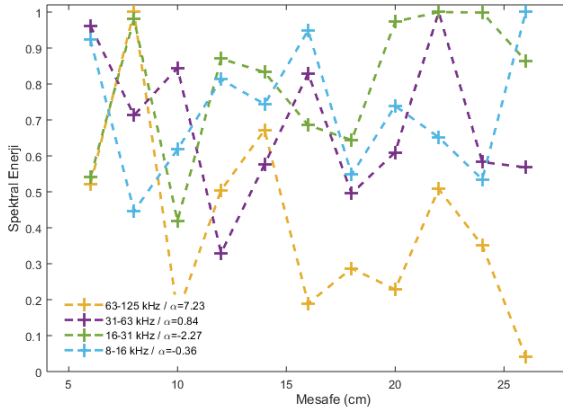
$j$  ve  $k$  tamsayı olup, burada sabit dilatasyon adımı  $a_0 = 2$  ve konum faktörü  $\tau_0 = 1$ 'dir.

Bu çalışmadaki ultrasonik testlerde kaydedilen sinyaller DWT ile işlenerek dalga sönümü hesaplanmıştır. Ham sinyaller önce, Daubechies (dbn18) fonksiyonunun [23] ana dalgacık olarak kullanıldığı DWT ile alt-sinyallerine ayrıştırılmıştır. Bu alt-sinyallerin her biri belirli bir frekans bant genişliği ve bu nedenle belirli bir dalga boyu aralığı ile ilişkilidir. Örnek olarak, B1 üzerinde kaydedilmiş sinyallerin DWT ile ayrıklaştırılmış alt-sinyallerinden elde edilmiş spektral enerjilerdeki mesafe ile gözlemlenen sönüm eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Her sönüm eğrisi belli bir frekans bandını temsil etmekte olup yüksek frekans aralıklarında daha hızlı sönümlenirken, düşük frekanslarda bu sönümleme daha azdır. Bu çalışmada, DWT ile elde edilmiş alt-sinyaller arasında, verici transdüserin frekans aralığı ile örtüştüğü için, 31-62,5 kHz frekans bant aralığını içeren alt-sinyaller tercih edilmiştir. Bu frekans aralığının spektral enerjisi Fourier dönüşüm kullanılarak hesaplandıktan sonra sönüm katsayısı tayin edilmiştir.

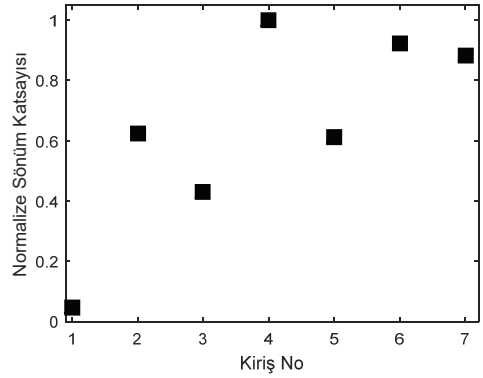
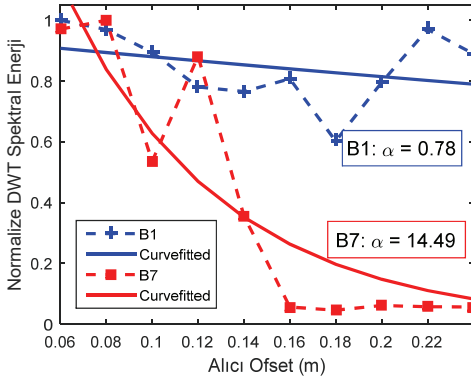
Şekil 7(sol)'da gösterilen sönüm eğrileri, B1 ve B7 numuneleri için 31-62,5 kHz frekans bant aralığını içeren alt-sinyallerin spektral enerjisindeki düşüşü temsil eder. Numunelerden elde edilen sönüm eğrileri Denklem 1 ile uyumlu olarak  $e^{\alpha(x_1 - x_i)}$  fonksiyonuna regresyon yapılarak sönüm katsayısı  $\alpha$  hesaplanmıştır. Her kiriş için hesaplanan  $\alpha$  katsayısı, maksimum katsayı ile normalize edilerek, Şekil 7(sağ)'da verilmiştir. Kontrol kirişi (B1) ile en fazla hasar görmüş kiriş (B7) arasında  $\alpha$  katsayısı neredeyse 18 katlık bir artış göstermiştir. Şekil 7(sağ) B2, B3 ve B5'teki çatlak derinliği ile B4, B6 ve B7'dekin birbirine yakın olduğunu işaret etmektedir. Seçilen alt-sinyal 4 ile 8 cm arasındaki dalga boylarına tekabül ettiği için, B4, B6 ve B7'de çatlak derinliğinin en az 8 cm olduğu tahmin edilebilir. Şekil 7(sağ)'da gözlenen  $\alpha$  katsayısındaki değişim, B2, B3, B6 ve B7 için Tablo 1'de verilen yüzey çatlakların gözlenen muayene ile ölçülen derinliği ile uyum içerisindedir. B4 ve B5 ise üzerlerinde gözlenen yüzey çatlaklarının derinliği ile uyum göstermemektedir. Bu durumun yüzeyde ölçülmüş olan çatlak derinliğinin kiriş en-kesiti boyunca değişken olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Son olarak Şekil 8'de normalize edilmiş sönüm katsayıları karşılıklı geldikleri görsel muayene ile ölçülmüş çatlak derinliği için grafik olarak sunulmuştur. Bu grafiğe göre sönüm katsayısı  $\alpha$  genel olarak çatlak derinliği ile orantılı olarak artmakta olup, hasarsız numune B1'in dahil edilmediği lineer regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı  $R^2 = 0.767$  olarak belirlenmiştir.



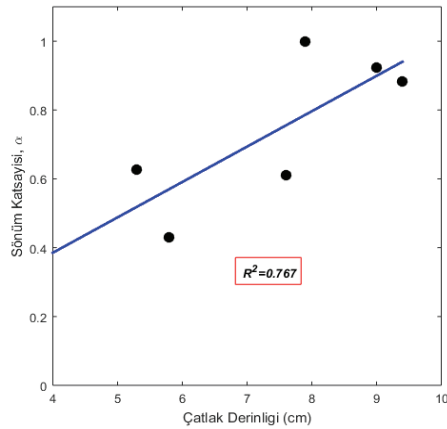
Şekil 5 - Spektrum vs. mesafe (üst) B1, (orta) B3 ve (alt) B7



Şekil 6 - Kiriş B1 için alt-sinyallerin spektral enerjisi



Şekil 7 - (sol) Sönüm eğrileri, (sağ) her bir kiriş için normalize edilmiş sönüm katsayısı



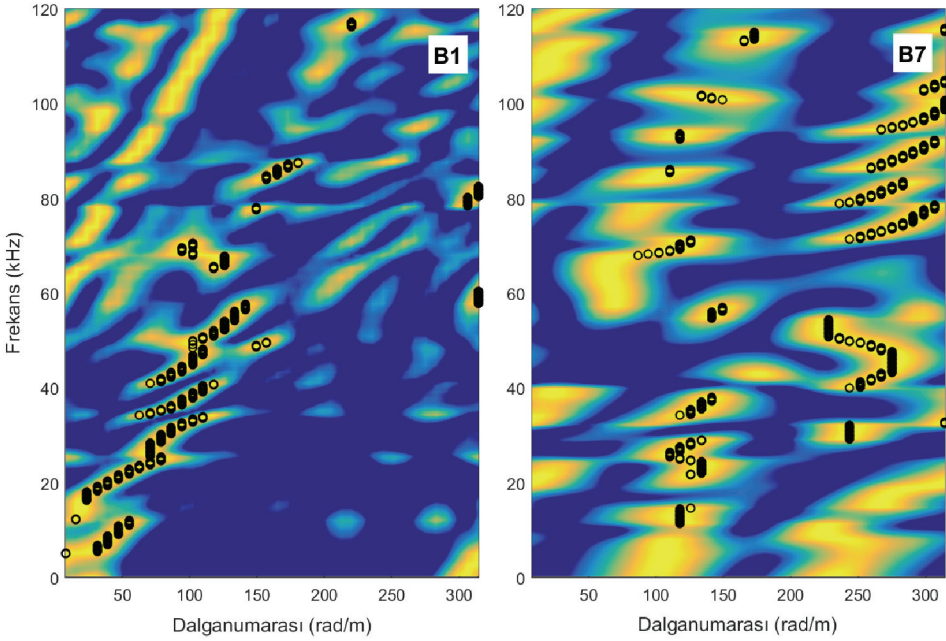
Şekil 8 - Normalize edilmiş sönüm katsayısı vs. çatlak derinliği

#### 4.2. Faz Hızı Dağılımı (Dispersiyon)

Bölüm 2.2’de açıklandığı gibi  $f - k$  spektrumu üzerinde dalga yayılımındaki dağılım (dispersiyon) tespit edilebilmektedir. Dağılımın tespitinin de ötesinde, bu dağılımın derecesinin belirlenmesi de mümkündür. Bunun için öncelikle  $f - k$  spektrumundaki maksimum değerlere karşılık gelen dalganumarası  $k$  tespit edilerek dispersiyon eğrisini oluşturan faz hızları  $V_{ph}$  Denklem 4 ile hesaplanmalıdır. Homojen bir cisimde, dispersiyon eğrisi Rayleigh hızına  $V_R$  eşit olup, düz bir çizgi olarak görünür. Bununla birlikte, herhangi bir çatlak veya kusur olması durumunda ise faz hızlarında  $V_{ph}$  sabit Rayleigh hızına  $V_R$  kıyasla sapma meydana gelecektir ki, bu değişim de çatlak derinliğini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada, testlerden elde edilen dispersiyon eğrileri, faz hızlarındaki  $V_{ph}$  toplam dispersiyonu dikkate alan çatlak seviyesi ile orantılı “dağılım endeksi  $DI$ ” adı verilen tanı indeksini hesaplamak için, kullanılmıştır [24]:

$$DI^{(Kiriş\#)} = \sum \left| V_{ph}^{(Kiriş\#)}(f) - V_{ph}^{(Referans)}(f) \right| / V_{ph}^{(Referans)}(f) \quad (8)$$

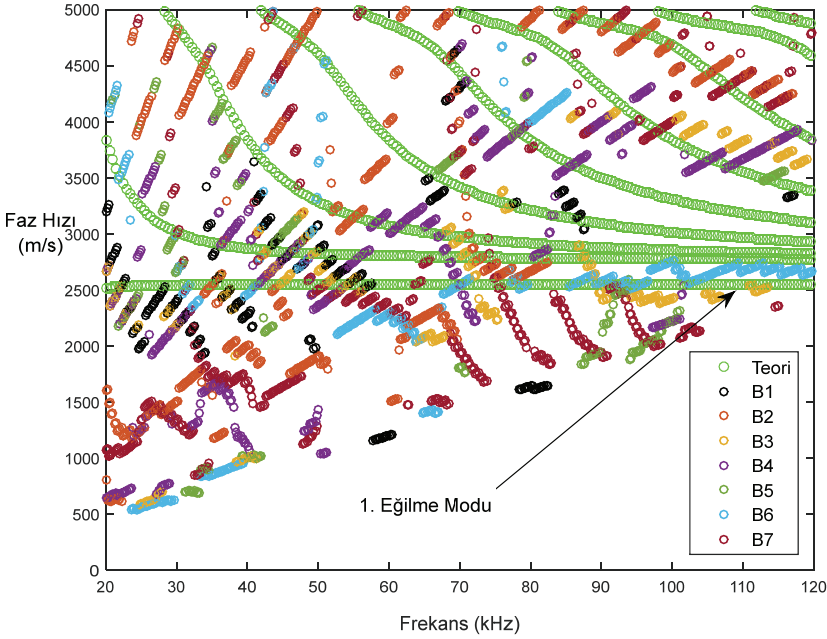
Dağılım endeksi  $DI$  herhangi bir kirişte çatlakın neden olduğu faz hızlarındaki kümülatif değişiminin referans bir dispersiyon eğrisine göre normalize edilmesiyle elde edilmektedir.



Şekil 9 -  $f - k$  spektrumu (a) B1, (b) B7

Şekil 9’da örnek olarak B1 ve B7 kirişlerinde kaydedilen sinyal seti üzerinde gerçekleştirilen iki boyutlu Fourier dönüşümü sonucu elde edilen  $f - k$  spektrumları verilmiştir. Şekil 9’da

B7'deki çatlağın faz hızı üzerindeki dağılım etkisi, sağlam kiriş B1 ile kıyaslandığında,  $f - k$  spektrumu üzerinde açıkça gözlenmektedir. Bu spektrumlarda işaretlenen maksimum değerlere karşılık gelen dalganumarası  $k$  seçilerek Denklem 4'e yerleştirilmiş ve  $V_{ph}$  hesaplanarak Şekil 10'daki dağılım eğrileri elde edilmiştir. Şekil 10'da testlerden elde edilen dağılım eğrilerine ek olarak teorik dispersiyon eğrileri de gösterilmiştir. İlk anti-simetrik (eğilme) modunu temsil eden dağılım eğrisini de içeren bu teorik faz hızı eğrileri aşağıda verilen "Rayleigh-Lamb frekans denklemi" [25] kullanılarak elde edilmiştir:



Şekil 10 - Dispersiyon eğrileri

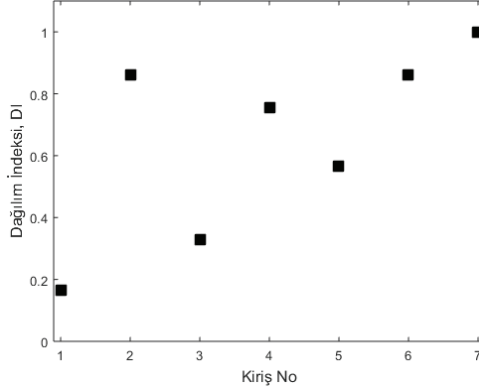
$$\frac{\tanh(\beta d)}{\tanh(\alpha d)} + \left[ \frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \right]^{\pm 1} = 0 \quad \begin{cases} +1 = \text{symmetrical} \\ -1 = \text{antisymmetrical} \end{cases} \quad (9)$$

Burada  $\alpha^2 = k^2 - \omega^2/V_P^2$  ve  $\beta^2 = k^2 - \omega^2/V_S^2$ .  $V_P$  ve  $V_S$  sırasıyla P-dalgası ve S-dalgası hızları;  $k$ ,  $\omega$  ve  $d$  ise sırasıyla dalganumarası, açısal frekans ve cisim kalınlığıdır. Denklem 9'da ihtiyaç duyulan S-dalga hızı  $V_S$ , Rayleigh dalga-hızı  $V_R$  ve Poisson oranı  $\nu$  kullanılarak aşağıdaki eşitliğin yardımıyla bulunur [25]:

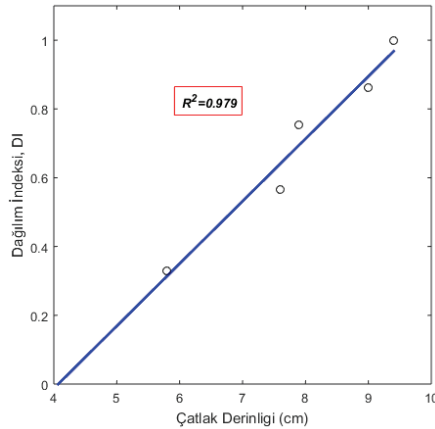
$$V_S = \frac{1+\nu}{0.87+1.12\nu} V_R \quad (10)$$

Burada teorik faz hızı eğrileri hesabı için P-dalga hızı 4513 m/s, Rayleigh-dalga hızı 2528 m/s (B1 için ölçülen), cisim kalınlığı 10 cm ve Poisson oranına  $\nu = 0.2$  olarak kabul edilmiştir. Teorik faz hızı eğrileri hesabının akabinde, Şekil 10'da gösterilen testlerden elde edilmiş olan dağılım eğrilerindeki toplam varyasyon, Denklem 8'de tanımlanan dağılım indeksi  $DI$  ile ölçülmüştür. Denklem 8'de ihtiyaç duyulan referans dispersiyon eğrisi Şekil

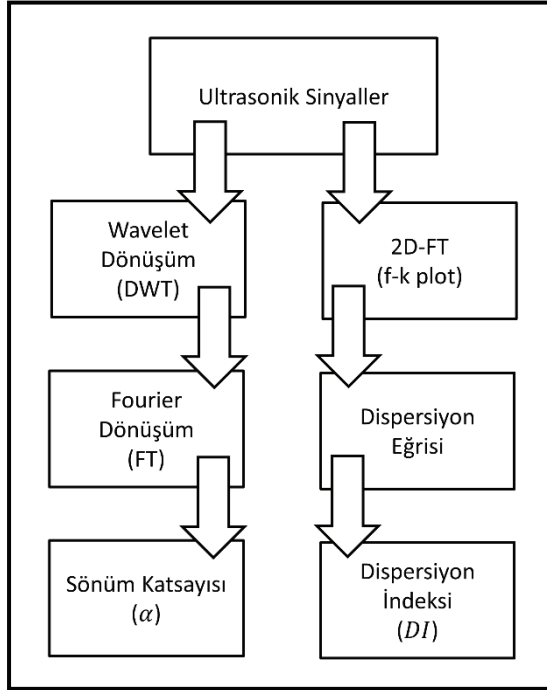
10'da gösterilmiş olan Rayleigh-Lamb frekans denkleminde (Denklem 9) elde edilmiş olan 1. eğilme modunu temsil eden eğri olarak seçilmiştir. Bu eğri çatlaksız kirişte sabit hızla ilerleyen yüzey dalgalarını temsil ettiği için tercih edilmiştir. Her bir kiriş için Denklem 13 ile elde edilmiş olan  $DI$  değerleri normalize edilerek Şekil 11'de gösterilmiştir.  $DI$ , B2 haricinde, genel olarak hasar seviyesi ile uyumlu olarak artmaktadır. Kontrol numunesi B1, hasar içermediği için, sadece kirişin geometrisinden kaynaklanan dalga dağılımı sebebiyle en küçük indeks,  $DI = 0.165$ , elde edildiği numunedir. B2'de ise beklenmeyen aykırı bir  $DI$  değeri elde edilmiştir. B2'deki anormal dalga dağılımının sebebi netleştirilememiş olmakla birlikte, muhtemel sebebinin test sırasında ekipman veya operatör kaynaklı bir kusur olduğu düşünülmektedir. Dağılım indeksinin çatlak derinliği ile olan ilişkisini daha iyi kavramak amacıyla, Şekil 12'de normalize edilmiş  $DI$  karşılık geldikleri görsel muayene ile ölçülmüş çatlak derinliği için grafik olarak sunulmuştur. Bu grafiğe göre, daha önce sönüm katsayısında da gözlemlendiği gibi, kirişlerdeki toplam dispersiyonun göstergesi olan  $DI$  genel olarak çatlak derinliği ile orantılı olarak artmaktadır. Hasarsız numune B1 ve aykırı değere sahip B2'nin dahil edilmediği Şekil 12'de verilen beş numune için yapılan lineer regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı  $R^2 = 0.979$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 11 - Her bir kiriş için  $DI$



Şekil 12 -  $DI$  vs. çatlak derinliği



Şekil 13 - Algoritma akış diyagramı

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Burada sunulan araştırma kapsamında, çelik-lif takviyeli betonlarda eğilme çatlakları derinliği tayini için çok-kanallı ultrasonik test konfigürasyonu kullanılarak, yüzey dalgalarının genel dağılım davranışını temsil eden dağılım indeksi  $DI$  ilk kez elde edilmiştir. Eğilme çatlaklarının derinliklerinin tayini için geliştirilen diyagnostik algoritmaların akış şeması Şekil 13'te tasvir edilmiş olup, Tablo 2'de ise yukarıda elde edilmiş sonuçlar özet olarak sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen bulgular ve öneriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ultrasonik testlerden elde edilen tanı indeksleri, malzeme sönüm katsayısı  $\alpha$  ve dağılım indeksi  $DI$ , genel olarak çatlak derinliği ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir.
- Bu iki indeks arasında, regresyon analizi sonucunda elde edilen  $R^2$  değerleri dikkate alındığında,  $DI$  indeksinin  $R^2=0.979$  ile  $\alpha$  katsayısına ( $R^2=0.767$ ) göre daha güvenilir bir tanı indeksi olduğu ifade edilebilir.
- $DI$ , çatlakların dispersiyon eğrisinde neden olduğu varyasyonu tek bir tanı parametresini indirgeyerek, ultrasonik test verilerinin yorumlanmasında kolaylık sağlamaktadır.
- $DI$ , incelenen yedi numunenin altısında (%86), görsel inceleme ile ölçülen çatlak derinlikleri ile uyumluluk göstermiştir.

- Her bir indeksin gerek test düzeneği gerekse veri işleme tekniklerinin kendine özgü olarak hata ihtiva edebileceği düşünüldüğünde, gerçekçi bir tespit yapmak için tek bir tanı yerine birden fazla indeksin dikkate alınmasının daha doğru sonuçlar vereceği aşikardır. Bu sebeple, ileride farklı yöntemler ile elde edilmiş, burada bahsi geçen tanı indekslerinin, son zamanlarda yaygınlaşmış olan veri-kaynaştırma [26] metodları ile kaynaştırılarak tek ama güvenilirliği artırılmış tanı indeksi elde etmeye dönük çalışmalar yapılması uygun olacaktır.

Tablo 2 - Özet Sonuçlar

Kiriş	CMOD (mm)	Çatlak Derinliği <sup>[1]</sup> (cm)	$\alpha$ <sup>[2]</sup>	$Df$ <sup>[3]</sup>
B1	N/A	N/A	0.047	0.165
B2	1.00	5,3	0.626	0.860
B3	1.25	5,8	0.429	0.330
B4	1.50	7,9	1	0.755
B5	1.75	7,6	0.610	0.566
B6	2.00	9,0	0.923	0.861
B7	2.25	9,4	0.882	1

[1] Görsel muayeneye dayalı ölçüm, [2] Normalize edilmiş malzeme sönüm katsayısı, [3] Dağılım indeksi

## Teşekkür

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) desteği ile gerçekleştirilmiştir. [BİDEB 2232 Yurda Dönüş Bursu, Proje No: 118C022].

## Kaynaklar

- [1] ASTM C597-16. (2016) Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [2] ACI 228.2R-13. (2013) Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. ACI Committee 228
- [3] Daniels, D. J. (2004). Ground Penetrating Radar. Institution of Engineering and Technology.
- [4] ACI Committee 222R-01. (2010). Protection of metals in concrete against corrosion, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.



- [5] Song, W., Popovics, J. S., Aldrin, J. C., and Shah, S. P. (2003). Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(2), 717-725. doi:10.1121/1.1537709
- [6] Tallavo, F., Cascante, G., and Mahesh, P. (2009). Experimental and Numerical Analysis of MASW Tests for Detection of Buried Timber Trestles: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), 91-102.
- [7] Nasseri-Moghaddam A., Phillips C., Cascante G., and Hutchinson J. (2007). Effects of underground cavities on Rayleigh waves-numerical and experimental study. *Soil Dyn Earthquake Eng.*, 27(4), 3000-13.
- [8] Hassan, A., Nasseri-Moghaddam, A., and Cascante, G. (2011). Use of numerical simulation for the identification of underground voids using the MASW test: in *Proceedings: 14th PanAm CGS Geotechnical Conference*.
- [9] Kirlangic, A. S., Cascante, C., and Polak, M. (2016). Assessment of concrete beams with irregular defects using surface waves. *ACI Materials*, 113(1), 73-81.
- [10] Rodríguez-Roblero, M. J., Ayon, J. J., Cascante, G., Pandey, M. D., Alyousef, R., and Topper, T. (2019). Application of correlation analysis techniques to surface wave testing for the evaluation of reinforced concrete structural elements: *NDT and E International*, 102, 68-76. doi:10.1016/j.ndteint.2018.11.003.
- [11] Aggelis, D. G., Shiotani, T., and Polyzos, D. (2009). Characterization of surface crack depth and repair evaluation using Rayleigh waves. *Cement & Concrete Composites*, 31 (1), 77–83.
- [12] Zerwer, A., Polak, M., and Santamarina, J. C. (2003). Rayleigh Wave Propagation for the Detection of Near Surface Discontinuities: Finite Element Study. *Journal of Nondestructive Evaluation*, (22)2, 39-52.
- [13] Zerwer, A., Polak, M., and Santamarina, J. C. (2005) Detection of Surface Breaking Cracks in Concrete Members Using Rayleigh Waves. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 10(3), 295-306.
- [14] Yang, Y., Cascante, G., and Polak, M. (2009). Depth detection of surface-breaking cracks in concrete plates using fundamental Lamb modes. *NDT & E International*, 42(6), 501-512.
- [15] Kirlangic, A. S., Cascante, C., and Polak, M. (2015). Condition Assessment of Cementitious Materials Using Surface Waves in Ultrasonic Frequency Range. *ASTM International Geotechnical Testing Journal*, 38(2), 1-11.
- [16] Aggelis, D. G., Leonidou, E., and Matikas, T. E. (2012). Subsurface crack determination by one-sided ultrasonic measurements. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 140-146. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.09.017
- [17] Richart, F. E. Jr., Hall, J. R. and Woods, R. D. (1970). *Vibrations of Soil and foundations*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [18] Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1997). *Multichannel Analysis of Surface Waves*, Kansas Geological Survey, Lawrence, KS.

- [19] EN 14651. (2005). Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength.
- [20] EN 12390-3. (2019). Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [21] Addison, P. (2002). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.
- [22] Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 674-693.
- [23] MATLAB. (2010). version 7.10.0 (R2010a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- [24] Kirlangic, A. S., Cascante, G., and Salsali, H. (2020). New Diagnostic Index Based on Surface Waves: Feasibility Study on Concrete Digester Tank. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(6). doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001522.
- [25] Graff, K. F. (1975). *Wave Motion in Elastic Solids*, Ohio State University Press, Belfast.
- [26] Ploix M-A., Garnier, V., Breysse, D., and Moysan, J. (2011). NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures. *NDT E Int*, 44(5), 442-448. doi:10.1016/j.ndteint.2011.04.006.

# Deprem Bölgesinde Bulunan Mevcut Bir Tank Yapısının Geoteknik Değerlendirmesi

E. Ece ESELLER-BAYAT<sup>1</sup>  
Onur DENİZ<sup>2</sup>

## ÖZ

Bu çalışma TBDY 2018, uluslararası standartları ve literatürdeki çalışmalarını esas alarak deprem bölgesinde bulunan mevcut bir tank yapısının deprem yükleri altında geoteknik değerlendirmesini sunmaktadır. Sahada sıvılaşma potansiyeli bulunması ve kayma mukavemeti düşük 35 m'den kalın kil tabakalarının mevcut olması sebebiyle zaman tanım alanında doğrusal olmayan boşluk suyu basıncı modelleri kullanılarak ve kullanılmadan sahaya özel zemin davranış analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Zemin yumuşaması ve sıvılaşmasının doğal bir izolatör gibi davranarak yüzey ivmelerini ciddi oranda sönümlediği gözlemlenmiş, ancak serbest sahada yüksek mertebelerde yanıl yer değiştirmelere (2.0-2.3 m) ve düşey oturmalara (58-128 cm) sebebiyet verdiği tahmin edilmiştir. Tank yapısı temelinde oluşacak farklı oturmanın yaklaşık en fazla 70-80 cm, en düşük ise 5-10 cm mertebelerinde olduğu tahmin edilmekte ve boru bağlantılarında bu yer değiştirme farkının göz önünde bulundurulması önerilmektedir. Üst yapıdan gelecek olan atalet (ilave deprem) yükleri altında tank yapısı tabanında ve geogritli dolgu altında taşıma gücü ve tabanda kayma kontrolleri yapılmış ve güvenli bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Sismik analiz, tank yapıları, sıvılaşma, TBDY 2018, sahaya özel yer tepki analizleri.

## ABSTRACT

### Geotechnical Evaluation of an Existing Tank Structure Located in a Seismic Zone

This study presents the geotechnical evaluation of an existing tank structure under earthquake loads, based on TBDY 2018, international standards, and the published models in the literature. Due to the presence of liquefaction potential and clay layers thicker than 35 m with low shear strength in the field, non-linear site-specific analyses were performed

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21 Ekim 2020 günü ulaşmıştır. 11 Mayıs 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.813808>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ebayat@itu.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-5774-4911>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - denizonu@itu.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0003-3540-0584>

in the time domain with and without pore pressure models. Soil softening and liquefaction act as a natural isolator, damping surface accelerations significantly, but they have caused high lateral displacements (2.0-2.3 m) and vertical settlements (58-128 cm) in the free field. It is estimated that the differential settlement at the tank structure is approximately 70-80 cm at the maximum and 5-10 cm at the lowest that is needed to be considered in pipe connections with the tank at the site. Under the additional earthquake loads from the superstructure, the bearing capacity and sliding control on the bottom of the tank structure and under the fill reinforced with geogrid were found to be safe.

**Keywords:** Seismic analysis, tank structures, liquefaction, site-specific ground response analysis, TBDY (Turkish Earthquake Resistant Building Design Regulations) 2018.

## 1. GİRİŞ

Deprem bölgelerinde bulunan, endüstriyel yapılar olarak sınıflandırılan tank yapılarının sismik tasarımı can, mal ve ekonomik kayıplara sebebiyet vermesi açısından büyük önem taşımakta olup kritik yapı tasarımı olarak değerlendirilebilir. Bu kritik yapılar için ülkemizde henüz bir depreme dayanıklı tasarım yönetmeliği bulunmamakta ve tank yapılarının tasarımı için uluslararası standartlardan yararlanılmaktadır: API Standardı 650 [1], ASCE 7-10 Bölüm 15 [2], Eurocode 1 Part 4 Silo ve Tanklar [3], NZSEE (New Zealand Society for Earthquake Engineering) Depolama Tanklarının Sismik Tasarımı: 2009 [4]. Amerika Petrol Enstitüsü tarafından önerilen API Standardı 650 "Welded Tanks for Oil Storage" petrol ürünlerini depolayan sıvı depolama tankları için tasarım, imalat, montaj ve test için minimum kriterleri belirlemekte olup sismik tasarıma sadece Ek E'de yer vermektedir ve Amerika'da ve diğer dünya ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ASCE 7-10 Bölüm 15.7'de bina tipi olmayan yapıların sismik tasarımı bölümü altında betonarme depolama tankların sismik tasarımına ait kriterler verilmiş olup, çelik tankların tasarımı için API-650'ye yönlendirmektedir. Türkiye'deki mevcut sıvı depolama çelik tankların tasarımı 20-30 yıl öncelerine dayanmakta olup tasarımlarında API 650 baz alınmış olduğu tahmin edilmektedir. Ancak son yıllarda, NZSEE tarafından önerilen depolama tanklarının sismik tasarımı standardı sıvı depolama tanklarının sismik tasarımı için en güncel ve detaylı kriterleri içermektedir. Bu standartların tamamında detaylı kriterler, tankların deprem yüklerinin belirlenmesi ve yapısal stabilite kontrollerinin yapılması üzerine yoğunlaşmaktadır. Zemin kaynaklı oluşacak olan hasar ve kriterler, bina temelleri ve duvar yapıları için çoğu yönetmelikte önerilen kriterlere yönlendirilmektedir. Standartlarda temel tasarım kriterleri ankrajlı ve ankrajlı olmayan temeller için verilmiştir. API-650 Ek B bölümünde tank temeli tasarımı için öneriler verilmekte ve zeminin sıvılaştıran zemin veya yumuşak kil olması durumunda özel mühendislik hizmeti alması gerektiği ve temel tasarımının taşıma gücü ve izin verilebilir oturmaları sağlayacak şekilde gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmektedir. NZSEE'ye ait standartta ise temel tasarımı açısından en önemli stabilite kontrolleri oturma, taşıma gücü ve yatayda kayma olarak belirtilmiş, sıvılaştıran ve zayıf zeminler için ise gerekli kontrollerin yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Tank yapılarının tasarım esasları bina yapılarından farklılık göstermektedir. Tank yapılarının genel itibarıyla malzeme taşınmasının kolay ve elverişli olmasından dolayı nehir ve deniz kenarlarında inşası planlanmaktadır. Bu bölgelerde inşa edilen yapıların oturduğu zeminlerin ise büyük ölçüde zemin profili boyunca yumuşak ve/veya gevşek özelliklere

sahip zeminler olduğu görülmektedir. Geniş çapa ve büyük yüksekliklere sahip tank yapılarının içi doldurulduktan sonra zemine aktarılacak gerilmeler yüksek mertebelere ulaşmaktadır. Bu da taşıma kapasitesi ve oturma miktarı açısından tank tasarımlarını etkilemektedir. Duncan ve D'Orazio [5] 40 adet tank yapısında yaptıkları incelemelerde uygulamada taşıma kapasitesi açısından iki temel stabilite problemi olduğunu belirtmiştir: genel taşıma gücü (base shear) ve kenar taşıma gücü (edge shear) problemi. D'Orazio ve Duncan [6] oturmalar açısından tank yapılarını incelediklerinde ise tank tabanlarının oturdukça çok çeşitli distorsiyonlara maruz kaldığını belirlemişlerdir. Bazı durumlarda maksimum oturma tank merkezi altında gerçekleşirken bazı durumlarda ise tank merkezi ile tank kenarı arasında kalan bölgede oluştuğu gözlemlenmiştir. Depolama tankları esnek yapı olarak kabul edilmekte ve diğer mühendislik yapılarına göre daha büyük oturmalarla müsaade etmektedir [6-7]. Literatürde tank tabanı ve tank duvarı arasında 60 cm'ye ulaşan farklı oturmaya sahip hasarsız çalışmaya devam eden vakalar bulunmaktadır. Düzceer [8] beş adet yüzer tavanlı çelik akaryakıt depolama tankında yaptığı incelemeler sonucunda geniş çapa sahip tank temellerinde oluşmuş 40.8 cm'lik oturma üst yapıda herhangi bir fonksiyon kaybına sebep olmadığını belirtmiştir. Tank yapılarının oturma miktarları konusunda genel kabul görmüş limitler bulunmamaktadır. Yine de izin verilebilir oturma miktarları sınırsız değildir. Tank yapısında meydana gelecek oturmaların oluşturacağı olası etkiler, tankın genel oturması, tank çapı boyunca oluşacak farklı oturma kaynaklı iç boru bağlantılarını zorlayıcı etkiler, tank çevresi boyunca oluşacak farklı oturma kaynaklı üst yapıyı zorlayıcı ve yüzer tavan sistemine sahip tanklarda bu sistemin çalışmasını engelleyici etkiler ve tank ve çevresi arasında oluşacak farklı oturma kaynaklı dış boru bağlantılarında meydana gelecek etkiler olarak sıralanabilir [9-10]. İçlerinde büyük hacimlerde çevreye zararlı malzemeler barındıran bu tür tanklarda meydana gelecek hasarlar, ciddi çevresel zararlara, insan hayatı kayıplarına ve büyük mali kayıplara neden olmaktadır. Bu yüzden tank tasarımında üst yapı tasarımı kadar temel zemini davranışı ve temel sistemi tasarımı da büyük önem arz etmektedir.

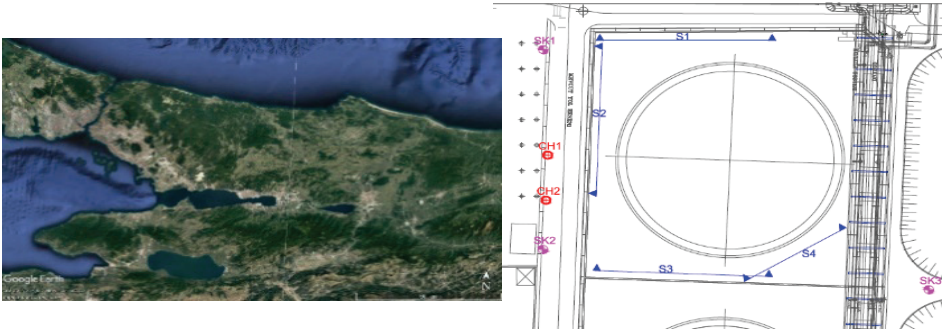
Mevcut veya yeni inşa edilecek olan tank yapılarının sismik geoteknik değerlendirmesi üzerine burada sunulduğu gibi bütün bir değerlendirmeye hem ulusal hem de uluslararası literatürde erişilememiştir. Literatürde tank temelleri altında statik oturmalar ve zemin iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmiş [5-6-7], deprem bölgelerinde yapılacak olan tanklarla ilgili sınılaşma kaynaklı oluşan hasarlardan ve dönmelerden bahsedilmiştir. Sento vd. [11] tarafından sunulan çalışmada sınılaşan zemin üzerindeki bir tank yapısı modellenmiş ve yine nümerik olarak iyileştirilmiş zemin üzerinde tankın performansı irdelenmiştir. Cubrinowski vd. [12] Japonya'da sıkılaştırılmış kum kolonları ile iyileştirilmiş kazıklı bir tank temeli zeminin Kobe Depremi sırasındaki davranışını sayısal olarak irdelenmişlerdir.

Tank yapı tasarımlarında takip edilecek bir yönetmelik ülkemizde henüz bulunmamaktadır. Bu yüzden çalışma kapsamında geoteknik değerlendirmesi yapılan tank için gerekli kontroller 1 Ocak 2019 tarihi itibarıyla yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY-2018 [13], esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda inceleme sahasına ait zemin araştırmaları yapılmış ve arazi zemin modeli oluşturulmuş, mevcut tank temeli sistemi irdelenmiştir. Yapının deprem riskinin yüksek olduğu bir bölgede bulunması sebebiyle tasarım spektrumu belirlenmiş ve temel zeminin deprem etkisi altında sınılaşma riski değerlendirilmiştir. Sınılaşma analizleri sonucunda sahaya özel zemin davranış analizleri yapılmış, deprem yükleri altında zeminde oluşacak yer değiştirmeler tahmin

edilmiş ve tank yapısı temellerinin TBDY 2018'e göre deprem yükleri altında stabilite kontrolleri sağlanmıştır.

## 2. ARAZİ ZEMİN MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Geoteknik değerlendirmesi yapılan tank yapısı Marmara denizine 300 m mesafede bulunmaktadır. Güvenlik sebebiyle kesin konum bilgisi veremediğimiz yapının bulunduğu alan, deprem geçmişi açısından oldukça aktif bir bölgede yer almaktadır (Şekil 1a). İnceleme sahasının yakınında bulunan diri faylar Maden Tetkik ve Arama tarafından oluşturulan diri fay haritası kullanılarak incelenmiştir. İnceleme sahasının yakınında Kuzey Anadolu, Orhangazi ve Yalakdere doğrultu atılımlı fayları ile Yalova normal fayı ve Altınova ters fayının bulunduğu tespit edilmiştir. Belirtilen fay kaynaklarına ait deprem tarihçesine bakıldığında deprem moment büyüklükleri 7.5'e varan birçok deprem gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 1 - (a) İnceleme alanı uydu görüntüsü (Google Earth), (b) Vaziyet planı

### 2.1. Zemin Araştırmaları

İnceleme sahasında tank inşası öncesinde zemin profilini ve zemine ait mühendislik parametrelerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen ilk arazi ve laboratuvar çalışmaları 1997 yılında yapılmıştır. 2017 yılında bölgede planlanan yeni tank inşası, yeni sondaj çalışmalarını gerektirmiş ve inceleme sahasının kuzeyinde 8 adet sondaj gerçekleştirilmiştir. 1 Ocak 2019 yılında yeni deprem yönetmeliğinin faal hale gelmesi inceleme sahasında bulunan mevcut tankların temel sistemlerinin TBDY 2018 esas alınarak uygunluğunu incelemeye sebebiyet vermiştir.

İncelenen tank yapısının oturduğu zemine ait modelin belirlenmesi amacıyla tankın çevresinde her biri 30 m derinlikte toplam 3 adet sondaj gerçekleştirilmiştir (Şekil 1b). Yapılan sondajlar sırasında her 1.5 m'de bir standart penetrasyon deneyi (SPT) yapılmış ve sondajlarda alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvar ortamında doğal birim hacim ağırlık, elek analizi, hidrometre, doğal su muhtevası, kıvam limitleri, konsolidasyon, direkt kesme, serbest basınç ve üç eksenli UU (konsolidasyonsuz-drenajsız) basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Açılan zemin sondajlarından birinde 6 farklı seviyede presiyometre deneyi yapılmıştır. Ayrıca bölgedeki anakaya derinliğini saptamak ve

yüzeiden itibaren anakayaya kadar profilde yer alan tabakaların kayma dalgası hızlarını belirlemek amacıyla patlatma metodu kullanılarak 1 adet geniş açılımlı 2 atışlı 2B MASW çalışması gerçekleştirilmiştir. Bunun yanısıra 1 adet karşıt kuyu (cross-hole CH) ve 4 adet sismik kırılma-MASW çalışmaları da yapılmıştır (Şekil 1b).

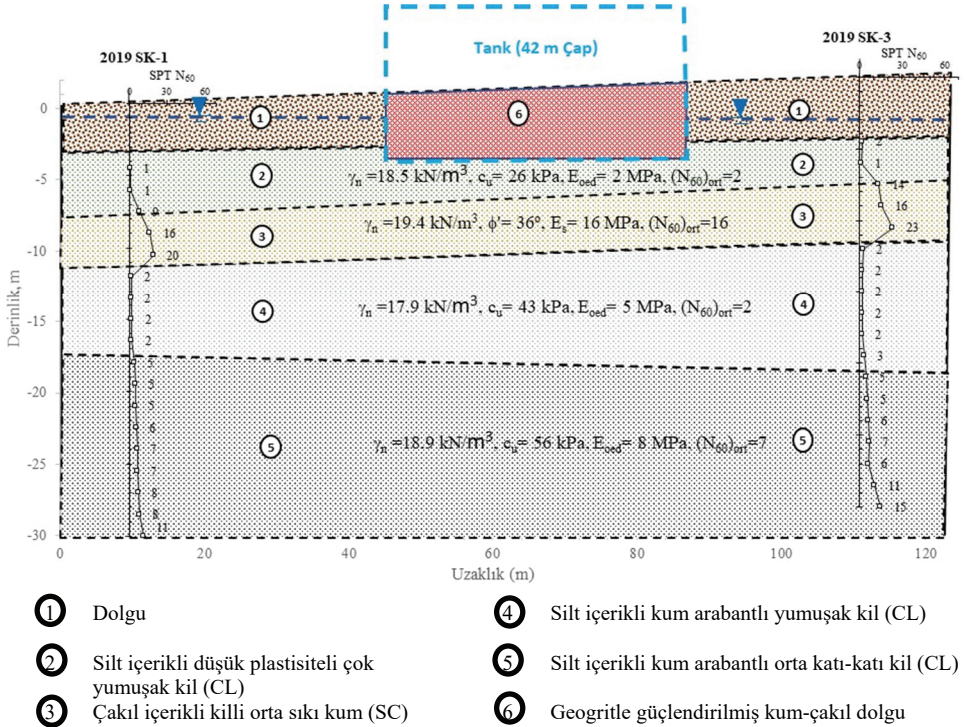
Bu çalışmada oluşturulan zemin modeline ait profilin ilk 30 metresindeki tabakalar ve mühendislik parametreleri SPT darbe vuruş sayıları ( $N_{60}$ ), presiyometre deney sonuçları ve yukarıda bahsedilen laboratuvar deney sonuçları ortak değerlendirilerek tahmin edilmiştir. Arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına göre zemin tabakalarına ait drenajlı ve drenajsız kayma mukavemeti parametreleri ve elastisite modülü değerleri sırasıyla Stroud [14], Baguelin [15], Hatanaka ve Uchida [16], Kulhawy ve Mayne [17] ile Briaud [18] tarafından önerilen bağıntılar kullanılarak tahmin edilmiştir (Şekil 2). Bölüm 5'de yer alan sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılmak üzere oluşturulan zemin modelinde ise profilin ilk 30 metreden sonraki bölümü 2B MASW çalışması ile tamamlanmıştır. Oluşturulan zemin modeline ait profilde 0.0-3.5 m arasında dolgu tabakası, 3.5-7.0 m arasında silt içerikli düşük plastisiteli çok yumuşak kil tabakası, 7.0-11.5 m arasında çakıl içerikli killi orta sıkı kum tabakası, 11.5-20.0 m arasında silt içerikli kum arabantlı yumuşak kil tabakası ve 20.0-30.0 m arasında silt içerikli kum arabantlı orta katı-katı kil tabakası olarak tahmin edilmiştir. Yapılan 2B MASW çalışması ile yüzeiden itibaren 150 metre derinlik için kayma dalgası hızının derinlikle değişimi profili elde edilmiş ve anakayaya ulaşılammıştır (Şekil 5). Sahada yapılan 2B MASW ve karşıt kuyu ölçümleri göz önüne alınarak temel seviyesinden itibaren 30 metre derinliğe kadar devam eden zemin profili için ortalama kayma dalgası hızı ( $V_s$ )<sub>30</sub>=109 m/s olarak hesaplanmıştır.

## 2.2. Yerel Zemin Sınıfı ve Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

Tank yapılarının tasarımında kullanılacak deprem yer hareketi düzeyinin belirlenmesi için ülkemizde herhangi bir kriter bulunmamaktadır. Genel olarak, kritik yapıların tasarımında sahaya özel sismik tehlike analizleri tasarımda önerilse de uluslararası standartlarda burada bahsedilen tank yapıları için zorunlu kılınmamıştır. Bununla beraber genellikle kritik yapıların tasarımında 2475 yıllık deprem düzeyi (50 yılda bir aşılma olasılığı %2 olan) kullanılması önerilir. API-650 Bölüm EC.4 'e göre de depremlerin daha sıklıkla gözlemlendiği bölgelerde 475 yıllık depremin (50 yılda bir aşılma olasılığı %10) minimum şart olarak kullanılacağı belirtilmiştir. Bölgeye ait deprem hareketinin belirlenmesi için tesis yönetimi ve mühendisleri ve üst yapı mühendisliği danışmanlarıyla verilen karara göre DD-2 (475 yıllık: 50 yılda bir aşılma olasılığı %10) düzeyinde analiz yapılması uygun görülmüştür.

İnceleme sahasına ait harita spektral ivme katsayıları AFAD'a ait <https://tdth.afad.gov.tr> adresinden herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi ve yerel zemin sınıfı esas alınarak kayma dalgası hızı, ( $V_s$ )<sub>30</sub>=760 m/s olan mostra için %5 sönüm oranında kısa periyot harita spektral ivme katsayısı,  $S_s$  ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı,  $S_1$  olarak belirlenebilmektedir. Çalışma kapsamında standart tasarım deprem yer hareketi olarak adlandırılan Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) kullanılarak kısa periyot ve 1.0 saniye periyoduna ait harita spektral ivme katsayıları  $S_s=1.527$  ve  $S_1=0.412$  olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada temel taban kotundan itibaren ( $N_{60}$ )<sub>30</sub>=3 ve ( $V_s$ )<sub>30</sub>=109 m/s olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar inceleme sahasının yerel zemin sınıfının ZE olduğunu

göstermiştir. Yerel zemin etki katsayıları, TBDY 2018 bölüm 2.3.3'de yer alan Tablo 2.1 ve Tablo 2.2 yardımıyla yerel zemin sınıfı ile  $S_s$  ve  $S_1$  değerlerine bağlı olarak  $F_s=0.800$  ve  $F_1=2.376$  olarak tespit edilmiş ve kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı,  $S_{DS}=S_s F_s=1.222$ , 1.0 saniye periyodu tasarım spektral ivme katsayısı,  $S_{D1}=S_1 F_1=0.979$  olarak hesaplanmıştır.  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  değerleri kullanılarak köşe periyotları  $T_A=0.160$  ve  $T_B=0.801$  ve yatay elastik tasarım spektral ivme değerleri hesaplanmış ve bu şekilde yatay elastik tasarım ivme spektrumu elde edilmiştir. Yönetmeliğe uygun olarak sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu  $T_L=6$  saniye alınmıştır.



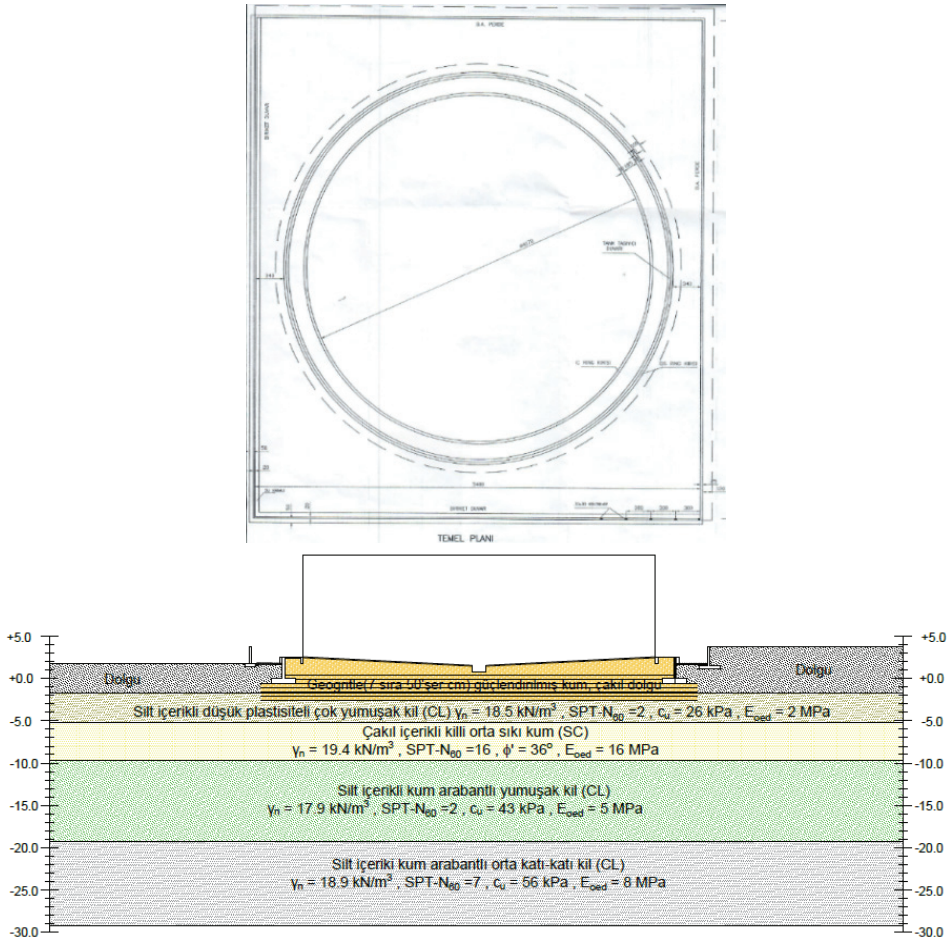
Şekil 2 - İnceleme sahasına ait zemin profili

### 3. MEVCUT TANK YAPISI VE TEMEL SİSTEMİ

Yüzer çatı tipine sahip inceleme tankı 41.7 m çapında ve 12 m yüksekliğinde olup 16000 m<sup>3</sup>lük iç hacime sahiptir. İmalat sırasında hazırlanan raporda belirtildiği üzere tankın temel inşası için zemin yüzeyinden itibaren 4.0 m zemin kazısı yapılmıştır. Zemin kazı kotundan itibaren elenmiş, yıkanmış, granülometrisi ayarlanmış kum-çakıl dolgu malzemesi ile 50 cm'lik tabakalar halinde doldurulmuş ve 25 tonluk vibrasyonlu silindir ile sıkıştırılmıştır. Her sıkıştırma işleminden sonra bir sonraki kum-çakıl kontrollü dolgusu yapılmadan, zemin yüzeyine geogrit malzeme serilerek güçlendirme gerçekleştirilmiştir. 7. geogrit tabakasının üzerine tekrar kum-çakıl dolgusu yapılarak tankın tabanı bu tabaka üzerine oturtulmuştur. Kum-çakıl dolgu malzemesi ve 7 tabaka geogritle güçlendirilmiş zemin üzerine tank taban



dolgunu çevreleyen betonarme çevre duvarı inşa edilmiştir. Tank taşıyıcı çevre duvarı temeli 60 cm kalınlığa ve 290 cm taban genişliğine sahip olup toplamda 310 cm yüksekliğindedir. Çevre duvarın ön kısmı da ayrı bir dolgu malzemesi ile doldurulmuş ve aynı silindirle sıkıştırılmıştır. Tank çeperinin alt kısmına 30 cm x 80 cm'lik betonarme iç ring kirişi inşa edilmiştir. Tankın sızdırmazlığını sağlamak amacıyla çevre duvarı üst kotundan itibaren tankın oturacağı çember içi 10 cm kalınlığında mastik asfalt ile kaplanmış ve tankın doğrudan dolgu malzemesi ile temas etmesi önlenmiştir. Tankın ortasında olan boşaltma nozulu için iç ring kirişinden ortaya doğru asfalt üzerinde %5'lik bir eğim verilmiş olup kum çakıl dolgu içinde 1.20 m x 0.80 m ölçülerinde bir tünel yapılmıştır. İç ring kirişi üzerinden çevre duvar üst kotuna doğru yapılan asfalt kaplama %1 eğim ile teşkil edilmiştir (Şekil 3).



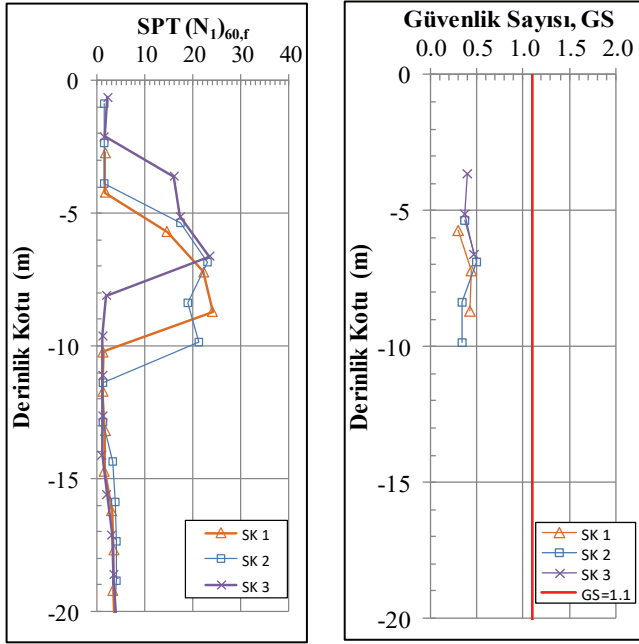
Şekil 3 - Tank temeli idealize zemin kesiti

#### **4. DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN SIVILAŞMASI VE YUMUŞAMASI RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yönetmelikte Kısım 16.6'da hangi durumlarda sıvılaşma potansiyelinin araştırılacağı ifade edilmektedir. Buna göre, Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için yerel zemin sınıfının ZD, ZE veya ZF olması halinde, sürekli bir tabaka veya kalın mercerler halinde bulunup Kısım 16.6.6'da tanımlanan durumlar dışında kalan kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin bulunup bulunmadığının belirlenmesi zorunlu tutulmuştur. Bölüm 2.2'de temel taban seviyesinden itibaren ilk 30 m ortalama kayma dalgası hızına göre belirlenmiş olan zemin sınıfı ZE için elde edilen tasarım spektrumu kullanılarak TBDY EK 16.B'de bahsedilen yöntemle sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu zeminin sıvılaşma direncinin zeminde deprem hareketi sebebiyle oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesine oranının en az 1.10 olması koşulu olarak ifade edilmiştir. Sıvılaşma direncinin,  $\tau_R$ , hesaplanması için moment büyüklüğü  $M_w=7.5$  olan depreme karşılık gelen çevrimsel dayanım oranı,  $CRR_{M7.5}$ , değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer ise ince dane içeriği göz önüne alınarak yeniden hesaplanmış  $N_{1,60f}$  kullanılarak elde edilmektedir. Tasarım depremi moment büyüklüğünün 7.5'tan farklı olması durumunda deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı,  $C_M$ 'nin kullanılması gerekmektedir. Zemin kayma gerilmesi hesabı için gereken en büyük yer ivmesi değeri ise kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısının,  $S_{DS}$ , %40'ı olarak alınacaktır. Ancak tasarım depremi büyüklüğünün nasıl belirleneceği konusunda yönetmelikte herhangi bir bilgi yer almamaktadır. Bu sebeple sıvılaşma analizi için gereken deprem büyüklüğünün tespiti için deterministik bir yaklaşım izlenerek proje sahası için deprem tehlikesine katkısı olan en büyük deprem, Akkar vd. [19] tarafından hazırlanan TDTH'de (Türkiye Deprem Tehlike Haritaları) dikkate alınan deprem katalogları taranarak belirlenmiştir. Buna göre Marmara Bölgesine ait depremler ve deprem tekerrür modeli incelenerek,  $M_w=7.5$  moment büyüklüğünün sıvılaşma analizlerinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan mevcut tank yapısının çevresinde yapılmış olan üç sondaja (SK1, SK2 ve SK3) ait düzeltilmiş ve ince dane oranı etkisine göre hesaplanmış  $N_{1,60f}$  değerlerinin ve sıvılaşma analizi sonucunda hesaplanan sıvılaşmaya karşı güvenlik sayılarının zemin profili boyunca değişimleri Şekil 4'de verilmiştir. Kayma gerilmesi oranını ifade eden CRR değeri TBDY 2018'de sunulan ve Youd vd. [20] tarafından verilen denklem ile hesaplanmıştır. Efektif gerilme düzeltmesini ifade eden  $K_\sigma$  ise yönetmelikte bulunmamakla birlikte bu çalışmada hesaplara dahil edilmiştir.

Arazi ve laboratuvar deney verileriyle yapılan analiz sonuçlarına göre özellikle derinlik kotları -4.0 m ile -10.0 m arası değişen kil ve silt içerikli orta sıkı kum tabakalarında sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları 1.10'un altında elde edilmiştir. Zemin kesiti içerisinde kum tabakası altında devam etmekte olan kalın yumuşak ve orta katı kil tabakalarının bulunduğu arazi ve laboratuvar deneylerine göre (SPT  $N_{60}$ : 2-8,  $c_u < 50$  kPa) tahmin edilmiştir. Bu tür kil tabakalarının dinamik yükler altında yüksek deformasyonlara sebebiyet verme riski bulunmaktadır. Sonuç olarak TBDY 2018 yönergelerine göre zemin sınıfı ZF olarak belirlenmiş olup, deprem etkisi altında sahaya özel zemin davranış analizlerinin doğrusal olmayan (nonlinear) zemin modelleri ile yapılması gerekmektedir. Bu analizler sonucunda zemin sıvılaşması ve yumuşaması kaynaklı yerdeğiştirmeler belirlenmelidir.



Şekil 4 - SK 1, SK 2 ve SK3 sondajlarına ait (a) SPT-N<sub>1,60f</sub> değerlerinin derinlikle değişimi ve (b) sıvılaşma analizi sonucunda bulunan güvenlik sayısının (GS) derinlikle değişimi

## 5. DEPREM ETKİSİ ALTINDA SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ

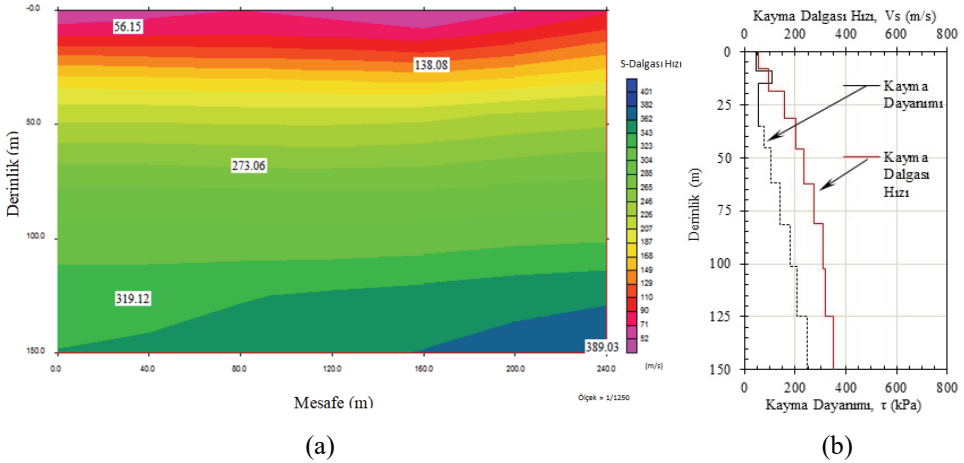
TBDY 2018 ZF yerel zemin sınıfı olarak tanımlanan zeminlerin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere sahaya özel zemin davranış analizlerinin yapılmasını zorunlu tutmaktadır. Ayrıca yönetmeliğin kısım 16.5.2.6 maddesinde sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde yapılacak analizlerde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılması gerektiği açıklanmaktadır. Yine yönetmelikte belirtildiği üzere yapı çevresinde zemin ortamının yaklaşık olarak yatay tabakalardan oluştuğu durumlarda, sahaya özel zemin davranış analizleri için tek boyutlu yatay tabakalı serbest zemin modelinin kullanılabilirliği belirtilmektedir.

İnceleme sahasında serbest zemin modelini oluşturmak, zeminin tabakalaşma durumunu ve zemin modelinde yer alan tabakaların kayma dalgası hızlarını belirlemek ve anakaya derinliğini saptamak amacıyla jeofizik çalışma yapılmış ve yapılan çalışma sonucunda 150 metre derinliğe kadar zemin tabakalarının kayma dalgası hız profili elde edilmiştir (Şekil 5). Bu denli derin tabakalara kadar kayma dalgası hızlarının tahmini için güçlü bir kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır (Dikmen vd. [21]). Bu sebeple patlatma yöntemi ile MASW ölçümleri 2 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kayma dalgası hız profili sonuçlarına göre anakaya tabakasına ilk 150 metre derinlikte rastlanılmamıştır. Bölge için önceden hazırlanmış jeofizik raporlar incelendiğinde yapılan jeofizik çalışmanın sonucu doğrulanmış ve incelenen raporlarda inceleme sahası bölgesinde anakaya derinliğinin 300

metre derinlik seviyelerinde olabileceği öngörülmüştür. Ayrıca Şekil 5'a da verilen kayma dalgası derinlik kesiti incelendiğinde kayma dalgası hız dağılımları zeminin yatayda oldukça homojen tabakalaştığını göstermektedir. Yönetmelikte belirtildiği üzere sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak serbest zemin modeli oluşturulurken, taban kayasının yapı temelinden itibaren derinliği en büyük yapı genişliğinin üç katından çok daha fazla olması durumunda tabakalı zemin modeli yerel zemin sınıfı ZC veya ZD olan zemin tabakası ile sonlandırılabilir. Bu durumda deprem etkisi, taban kayası yerine bu tabakanın üzerinden tanımlanacak ve etkililmek istenilen deprem kayıtları ZC ya da ZD zemin sınıfına uygun yerel zemin etki katsayıları ile büyütülmüş deprem spektrumlarına uyumlu olarak ölçeklendirilmesi gerekecektir. Sahada yapılan sismik kırılma-MASW çalışması çok sığ derinliğe kadar (12 m) veri sağladığı için etkisi dikkate alınmamıştır. Karşıt kuyu deneyi, 2B MASW verileri ile yakın değerler vermiştir. Sahada yapılan sismik ölçümler göz önüne alınarak temel taban seviyesinden itibaren ilk 30 metre derinliğe kadar devam eden zemin profili için ortalama kayma dalgası hızı  $(V_s)_{30} = 109$  m/s olarak hesaplanmıştır. Yapılan jeofizik çalışma sonucunda 150 m derinlikte kayma dalgası hızı 350 m/s olarak ölçülmüştür. Yönetmelik Tablo 16.1'de verilen yerel zemin sınıfları için kayma dalgası hız aralığına göre, 150 metre derinlikte ölçülen kayma dalgası hızının  $180 < 350 < 360$  m/s aralığında olduğu belirlenmiş ve bu derinlikte ZD zemin sınıfına ait kayma dalgası hızı aralığında kaldığı düşünülerek serbest zemin modeli 150 m derinlik için DeepSoil v.7 [22] programında oluşturulmuştur. Sondaj çalışmaları sırasında alınan numunelerde yapılan laboratuvar deneyleri, oluşturulan serbest zemin modelinin ilk 30 metresi hakkında bilgi sağlamaktadır. Serbest zemin modelinin 30 metre derinlikten 150 metre derinliğe kadar olan kısmında tabakalaşma belirlenirken sondaj çalışması yapılmamış olmasından dolayı jeofizik çalışma sonucu elde edilen kayma dalgası hız profiline bağlı olarak tabakalaşma modellenmiş ve 30 metredeki orta katı kil tabakasının profil sonuna kadar devam ettiği öngörülerek bu derinlikten itibaren kayma dalgası hızlarına bağlı olarak 6 farklı kil tabakası oluşturulmuştur. 30 m derinliğinin altında yer alan 6 farklı kil tabakasına ait kayma dalgası hız profili Şekil 5 (b)'de sunulmuştur. Ayrıca, DeepSoil programında zaman tanım alanında yapılacak serbest saha davranış analizlerinde düşük kayma dalgası hızına sahip tabakaların iletebileceği maksimum frekans değerini yüksek tutmak amacıyla ( $f_{maks} > 30$  Hz) zemin modeli 102 alt tabakaya ayrılmıştır.

Doğrusal olmayan analizler için genelleştirilmiş kuadratik/hiperbolik model (GQ/H) ve Kondner ve Zelasko tarafından oluşturulan ve Matasovic tarafından modifiye edilen hiperbolik modeller (MKZ) kullanılmıştır. GQ/H modelinde kullanılan zeminin, ilk 30 m için kayma mukavemeti  $\tau_{max}$  parametreleri, yapılan laboratuvar deneyleri ve arazi deneyi sonuçları ile korelasyonlar kullanılarak belirlenmiştir. 30 m derinlikte bulunan kil tabakasından itibaren daha derindeki tabakaların zemin mukavemeti değerleri ise Skempton'un [23] normal konsolide killer için plastisite indisine bağlı olarak verdiği korelasyon ( $c_u/\sigma_v' = 0.11 + 0.0037I_p$ ) kullanılarak  $I_p = 20\%$  kabulüyle ( $c_u/\sigma_v' = 0.18$ ) belirlenmiştir (Şekil 5b). Maksimum kayma modülü, kayma dalgası hızı kullanılarak elastik bağıntı ile elde edilmiştir ( $G_{maks} = \rho V_s^2$ ). Darendeli [24] tarafından önerilen kayma modülü azalım eğrilerine uygun olacak şekilde 5 adet doğrusal olmayan GQ/H zemin model parametreleri ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  ve  $\theta_5$ ) belirlenmiştir. MKZ modelinde oluşturulan zemin tabakalarına ait model parametreleri de Darendeli tarafından önerilen kayma modülü azalım eğrilerine uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan modelde belirli derinliklerdeki kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm oranı eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Oluşturulan iki

model için de tabaka orta noktalarında kullanılan sahaya özel zemin davranış analizleri model parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Sahada deprem yükleri altında oluşacak olan drenajsız durum kaynaklı kum zeminlerin sıvılaşma ve killi zeminlerin yumuşama potansiyeli bulunması sebebiyle MKZ doğrusal olmayan modelde boşluk suyu basıncı bünye modelleri kullanılmıştır. DeepSoil programında bulunan kum zeminler için Dobry-Matasovic ve killi zeminler için Matasovic-Vucetic boşluk suyu basıncı modelleri kullanılmıştır. Böylece zemin sıvılaşması ve yumuşamasının yüzeye aktarılacak olan ivme-zaman grafiklerine ve ivme tepki spektrumuna etkisi incelenmiştir.

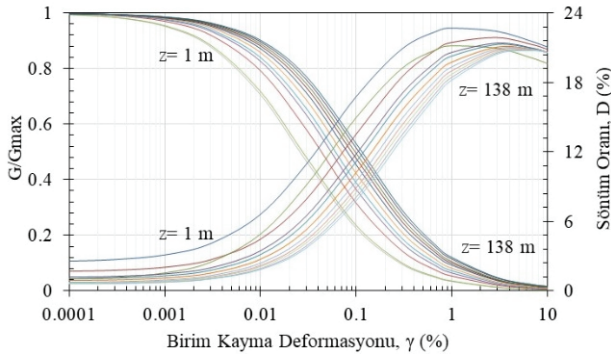


Şekil 5 - (a) 2B MASW çalışması ile elde edilen kayma (S) dalgası derinlik kesiti (b) Kayma dalgası hızının ve kayma dayanımının derinlikle değişimi

İnceleme sahasında yapılacak sahaya özel zemin davranış analizi için gerekli zemin modeli oluşturulduktan sonra inceleme sahasının sismolojisini yansıtacak deprem kayıtları seçilmiştir. Bu aşamada inceleme sahasının yakınında bulunan diri faylar Maden Tetkik ve Arama tarafından oluşturulan diri fay haritası kullanılarak incelenmiş ve fayların bölgeye uzaklıkları, faylanma mekanizmaları ve ilgili fayda gerçekleşmiş maksimum deprem büyüklüğü belirlenmiştir. Deprem kaydının etkileyeceği tabakanın kayma dalgası hızı ve yerel zemin sınıfı yine deprem kayıt seçiminde ki diğer önemli parametrelerdir. Bu çalışma kapsamında Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezine (PEER) ait <https://ngawest2.berkeley.edu> sitesi [25] veri tabanı kullanılarak doğrultu atımlı fay (strike slip) üzerinde  $R_{jb}$  (kuvvetli yer hareketi istasyonunun fay kırığının yüzeydeki projeksiyonuna en yakın mesafesi) türü kaynak mesafesi,  $R_{jb} < 12$  km içerisinde gerçekleşmiş ve  $6 < M_w < 7.5$  deprem büyüklüğüne sahip, depremin kaydedildiği istasyon zemininin kayma dalgası hızı  $200 \text{ m/s} < V_s < 360 \text{ m/s}$  değerleri arasında olan iki yanal yönde (doğu-batı ve kuzey-güney) 11'er farklı deprem kaydı seçilmiştir. Seçilen deprem kayıtlarına ait bilgiler Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1 - Sahaya özel dinamik zemin davranış analizi model parametreleri

Zemin	Kalınlık (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	GQ/H Modeli Parametreleri										MKZ Modeli Parametreleri						
			D <sub>min</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>	θ <sub>3</sub>	θ <sub>4</sub>	θ <sub>5</sub>	A	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	D <sub>min</sub>	γ <sub>ref</sub>	β	s	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>		
Yumuşak Kil	7.0	60	1.899	-10	10.79	3.090	1	0.99	1	0.99	1	0.865	0.1	1.884	0.060	1.59	0.915	0.628	0.104
Orta Sıku Kum	4.5	93	1.021	-10	10.9	0.832	1	0.99	1	0.99	1	0.865	0.1	0.971	0.043	1.52	0.915	0.628	0.104
Yumuşak-Orta Katu Kil	18.5	156	1.044	-1.54	-2	4.365	1	0.89	1	0.89	1	0.775	0.15	1.050	0.095	1.50	0.915	0.629	0.105
Kil 1	15.0	202	0.856	-1.82	1.6	0.001	1	0.42	1	0.42	1	0.64	0.15	0.839	0.114	1.52	0.915	0.629	0.105
Kil 2	16.2	236	0.777	-1.56	1.72	0.002	1	0.27	1	0.27	1	0.55	0.1	0.760	0.127	1.50	0.915	0.629	0.105
Kil 3	19.8	275	0.705	-0.75	1.1	0.060	1	0.35	1	0.35	1	0.55	0.1	0.691	0.142	1.50	0.915	0.629	0.105
Kil 4	20.0	310	0.660	-0.58	1.08	0.166	1	0.36	1	0.36	1	0.505	0.1	0.640	0.159	1.53	0.915	0.629	0.105
Kil 5	23.4	319	0.615	-1.53	1.98	0.003	1	0.21	1	0.21	1	0.55	0.1	0.608	0.167	1.52	0.915	0.631	0.106
Kil 6	25.6	350	0.584	-1.32	1.95	0.011	1	0.2	1	0.2	1	0.55	0.1	0.571	0.183	1.53	0.915	0.632	0.107



Şekil 6 - MKZ modeli kullanılarak yapılan analizlerde kullanılan normalize kayma modülü ve sönüm oranı ile birim kayma deformasyonu ilişkisi

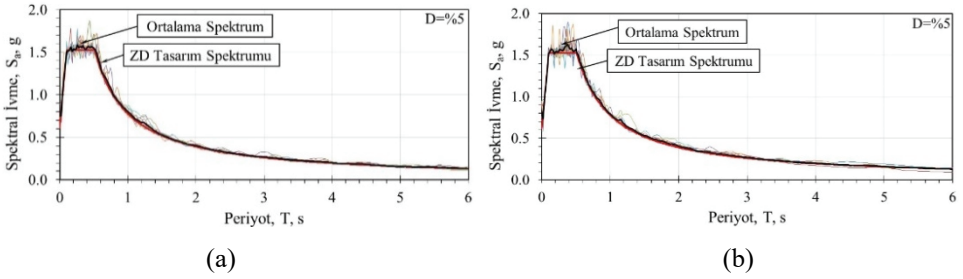
Çizelge 2 - Analizlerde kullanılan deprem kayıtları ve özellikleri

PEER Kodu	Deprem	Yıl	M <sub>w</sub>	İstasyon	Fay Mekanizması	R <sub>jb</sub> (km)	(V <sub>s</sub> ) <sub>30</sub> (m/s)	D-B	K-G
RSN6	Imperial Valley-02	1940	6.95	El Centro	Doğrultu Atımlı Fay	6.09	213	DEP 1-1	DEP 1-2
RSN30	Parkfield	1966	6.19	Cholame - Shandon	Doğrultu Atımlı Fay	9.58	289	DEP 2-1	DEP 2-2
RSN95	Managua - Nicaragua-01	1972	6.24	Managua - ESSO	Doğrultu Atımlı Fay	3.51	288	DEP 3-1	DEP 3-2
RSN171	Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	Doğrultu Atımlı Fay	0.07	264	DEP 4-1	DEP 4-2
RSN6962	Darfield	2010	7.00	ROLC	Doğrultu Atımlı Fay	0	295	DEP 5-1	DEP 5-2
RSN723	Superstition Hills-02	1987	6.54	Parachute Test Site	Doğrultu Atımlı Fay	0.95	348	DEP 6-1	DEP 6-2
RSN821	Erzincan	1992	6.69	Erzincan	Doğrultu Atımlı Fay	0	352	DEP 7-1	DEP 7-2
RSN1120	Kobe	1995	6.90	Takatori	Doğrultu Atımlı Fay	1.46	256	DEP 8-1	DEP 8-2
RSN1605	Düzce	1999	7.14	Düzce	Doğrultu Atımlı Fay	0	281	DEP 9-1	DEP 9-2
RSN1114	Kobe	2010	6.90	Port Island	Doğrultu Atımlı Fay	3.31	202	DEP 10-1	DEP 10-2
RSN6927	Darfield	2010	7.00	LINC	Doğrultu Atımlı Fay	5.07	263	DEP 11-1	DEP 11-2

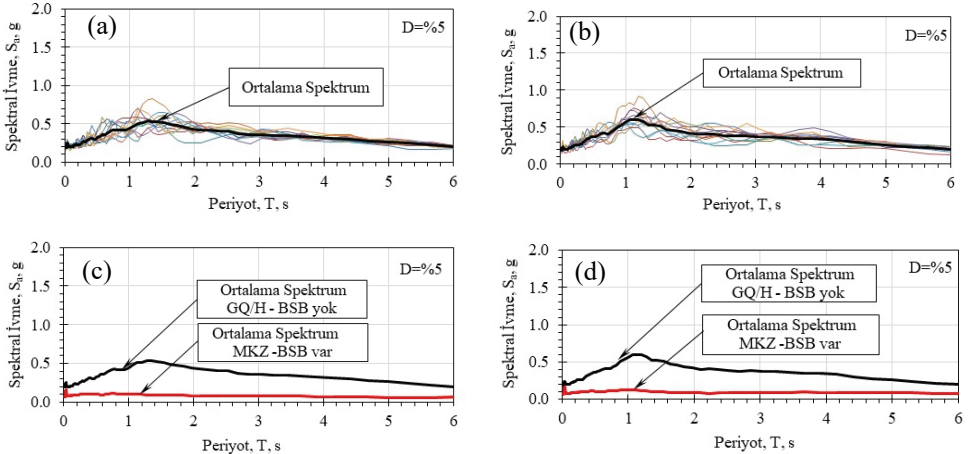
TBDY 2018 bölüm 2.5.3'de belirtildiği üzere bölüm 16.5.2 kapsamında yapılacak sahaya özel zemin davranış analizlerinde tüm periyotlar için deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna uyum sağlayacak şekilde ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Ölçeklendirilen

deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ordinatlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından küçük olmamalıdır. Yönetmelikte belirtilen uyuşumun sağlanması amacıyla PEER veri tabanından elde edilen deprem kayıtlarının doğu-batı ve kuzey-güney yönleri (H1 ve H2) ayrı ayrı ölçeklendirilip, ordinatlarının ortalamalarının tasarım spektrumunun üzerinde kalması sağlanmıştır. Ölçeklendirme işlemi SeismoMatch 2020 [26] programında gerçekleştirilmiştir. Belirlenen periyot aralığında yapılan ölçeklemede minimum periyot 0.05 s, maksimum periyot ise 6 s olarak seçilmiştir. Elde edilen ölçeklenmiş deprem kayıtlarının tepki spektrumları, ortalama spektrum ve ZD tasarım spektrumu ile birlikte Şekil 7'de gösterilmiştir.

Zaman tanım alanında sahaya özel zemin davranış analizi kapsamında oluşturulan doğrusal olmayan GQ/H modeli boşluk suyu basıncı modelleri kullanılmadan (boşluk suyu basıncı oluşumunu dikkate almadan) ve doğrusal olmayan MKZ modeli boşluk suyu basıncı modelleri kullanılarak (boşluk suyu basıncı oluşumu dikkate alınarak) ölçeklenmiş deprem kayıtları mostra kaydı olarak etkilmiştir.



Şekil 7 - Tasarım spektrumuna ölçeklenmiş 11 adet deprem kaydının tepki spektrumları (a) Doğü-Batı doğrultusu, (b) Kuzey-Güney doğrultusu



Şekil 8 - Serbest saha analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme kayıtlarına ait tepki spektrumları (a) GQ/H Modeli Doğü-Batı (D-B) doğrultusu (b) GQ/H Modeli Kuzey-Güney (K-G) doğrultusu (c) GQ/H modeli ve MKZ+BSB modeli ortalama spektrumları karşılaştırması (D-B) (d) GQ/H modeli ve MKZ+BSB modeli ortalama spektrumları karşılaştırması (K-G)



Serbest saha analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme kayıtlarının tepki spektrumları Şekil 8'de yer almaktadır. Analiz sonuçlarına göre boşluk suyu basıncı modelleriyle gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerin pik ivmeyi ( $p_{ga}$ ) düşürdüğü ve spektral ivmeleri kayda değer oranda sönümlediği görülmektedir.

## 6. ZEMİN SIVILAŞMASI VE ZEMİN YUMUŞAMASI KAYNAKLI ZEMİN YER DEĞİŞTİRMELERİNİN BELİRLENMESİ

Deprem yükleri altında zeminde drenajsız durumun söz konusu olması sebebiyle genellikle kumlu zeminlerin sıvılaşması sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının azaltılması için suyun yukarı doğru penetre etmesiyle zeminde düşey deformasyonlar meydana gelir. Ayrıca aşırı boşluk suyunun oluşması sebebiyle kumlu zeminlerde oluşan mukavemet kaybı sebebiyle yanıl yayılmalar da meydana gelir. Aynı şekilde killi zeminlerde drenajsız durumda dinamik etki altında belli miktarda aşırı boşluk suyu basıncı oluştuğu ve yine killerde mukavemet kaybı sebebiyle yanıl ve düşey deformasyonların oluştuğu bilinmektedir. Literatürde kum zeminlerde bu deformasyonların belirlenmesi için çeşitli deneysel ve ampirik korelasyonlar geliştirilmiştir (Tokimatsu ve Seed [27-28], Ishihara ve Yoshimine [29], Shamoto vd. [30], Youd vd. [31], Wu vd. [32], Zhang vd. [33], Çetin vd. [34]). Kohezyonlu zeminler için de deprem sonrası oturmalar üzerine literatürde bazı bağıntılar verilmiş ancak bunlar genel olarak boşluk suyu basıncına bağılı olarak geliştirilmiştir ve pratikte uygulaması pek kolay olmamaktadır (Yasuhara vd. [35]). Erken vd. [36] yaptıkları çalışmada killi zeminlerdeki mukavemet ve taşıma gücü kayıplarından bahsetmiş ancak oturmalarla ilgili bir veri veya bağıntı sunmamıştır. Literatürdeki çalışmalar sıvılaşma sonrası oturmalarla daha çok yönelirken son yıllardaki çalışmalar hem kohezyonsuz hem de kohezyonlu zeminlerde deprem yüklerinden kaynaklanan deformasyonlarının belirlenmesi gerektiğine dikkat çekmiştir.

TBDY 2018 kısım 16.6.9'a göre sıvılaşma potansiyeli bulunan zemin tabakalarında sıvılaşma riski belirlenirse ( $GS < 1.1$ ), sıvılaşma kaynaklı yer değiştirmelerin üstyapı-altyapı davranışına etkisi irdelenmelidir. Ancak deprem sırasında yer değiştirmelerin sadece sıvılaşan zeminlerde değil diğer zeminlerde de oluştuğu göz önünde bulundurularak, bu çalışmada hem kum hem de kil zeminlerde yer değiştirmeler hem serbest saha hem de mevcut tank yapısı altında literatürde önerilen yöntem ve bağıntılar kullanılarak tahmin edilmiştir.

### 6.1. Serbest Saha Yanıl Yer Değiş-tirmeler

Tank sahasında deprem yükleri altında serbest saha yanıl yer değiştirmeler için sahaya özel analizler ve Çetin vd. [34] ve Unutmaz ve Çetin [37] tarafından önerilen olasılıksal ve ampirik bağıntılar kullanılmıştır. Kayma modülü sahaya özel zemin davranışı analizleri sonrasında her tabakada oluşan maksimum yatay şekil değiştirmeye ( $\gamma_{max}$ ) bağılı olarak bulunurken,  $\nu' = 0.30$  kabul edilmiştir. Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönünde 11'er deprem kaydı altında yapılan analizler sonucunda elde edilen ortalama maksimum yanıl yer değiştirmelerin derinlikle değişimi Şekil 9'da verilmiştir. Ayrıca Çetin vd. [34], Bilge ve Çetin [38] ve Unutmaz ve Çetin [37] tarafından önerilen  $\gamma_{max}$ , kumlu zeminler için Denklem 1'de ve killi zeminler için Denklem 2'de verilen olasılıksal bağıntılar kullanılarak SK-1

verilerine göre tahmin edilmiştir. Bu bağıntılar kullanılarak elde edilen maksimum yanıl yer değiştirmeler Şekil 9'da serbest saha analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

$$\gamma_{\max} = \frac{-0.025 \cdot N_{1,60,CS} + \ln(CSR_{SS,20,1-D,1atm}) + 2.613}{0.004 \cdot N_{1,60,CS} + 0.001} \quad (1)$$

$$\gamma_{\max} = 21.509 \cdot \frac{21.788 \cdot \frac{0.092 \left( \frac{w_c}{LL} \right) \ln \left( \frac{FC}{0.00067} \right)}{\ln(PI \cdot FC / 61.843)} \cdot \left( 1 - 0.061 \cdot \ln \left( \frac{29.878}{PI \cdot FC} \right) \right)}{\ln(PI \cdot FC / 61.843)} \times \frac{3.473 - \sqrt{\left( \frac{\tau_{st}}{c_u} - 1.007 \right)^2 + \left( \frac{\tau_{cyc}}{c_u} + 3.262^* \right)^2}}{3.473 - 17.805} \quad (2)$$

Burada  $N_{1,60,CS}$  temiz kumlar için düzeltilmiş SPT vuruş sayısını,  $CSR_{SS,20,1-D,1atm}$  1 boyutlu basit kesme deneylerinde 20. çevrimde 100 kPa dūřey efektif gerilme altında çevrimsel gerilme direnci oranını,  $w_c$  su muhtevasını, LL likit limiti, PI, plastisite indisini, FC ince dane oranını,  $\tau_{st}$  statik kayma gerilmesini,  $\tau_{cyc}$  çevrimsel kayma gerilmesini ifade etmektedir. LL, PI, FC % olarak girilmelidir.  $CSR_{SS,20,1-D,1atm}$  saha için bulunan CSR değerine Denklem 3'de belirtilen düzeltmeler yapılarak elde edilmektedir.

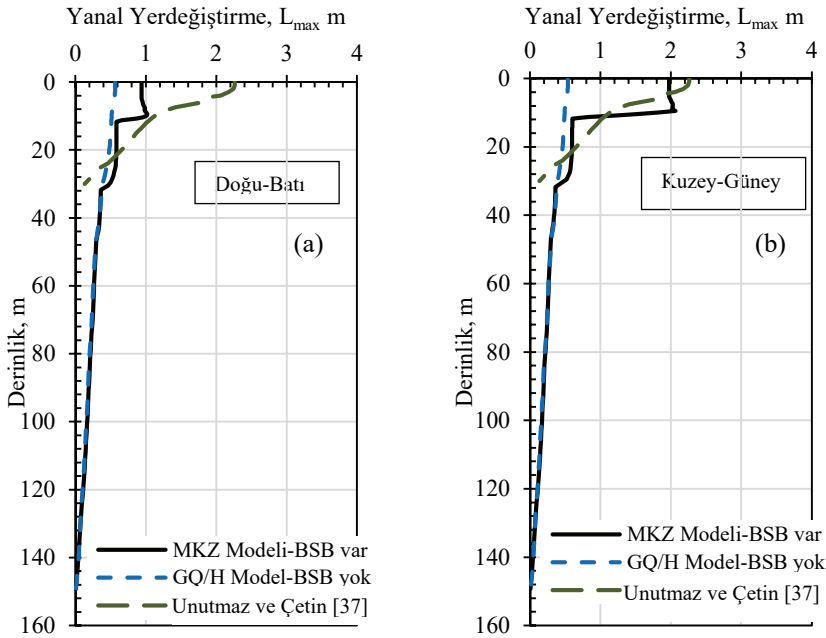
$$CSR_{SS,20,1-D,1atm} = \frac{CSR_{saha}}{K_{md}(z) \cdot K_{M_w}(z) \cdot K_{\sigma}(z)} \quad (3)$$

Burada,  $K_{md}$ , çok yönlü deprem hareketi için,  $K_{MW}$  deprem büyüklüğü için,  $K_{\sigma}$  ise 100 kPa efektif gerilme için düzeltme katsayılarını ifade etmektedir. Bu denklemlerin detayları Çetin vd. [34] tarafından verilmiştir. Her bir zemin tabakası için Denklem 4'de verilen her bir tabakada oluşan birim yer değiştirmelerin tabaka kalınlıkları ile çarpılıp toplanması ile  $DPI_{dev}$  (Deviatoric Displacement Potential Index) değerleri tahmin edilmiştir. 30 m derinlikten yukarı doğru her derinlik seviyesinde hesaplanan DPI değeri en büyük yanıl yer değiştirme  $L_{\max}$  olarak ifade edilmiş ve serbest saha analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır (Şekil 9).

$$DPI_{dev} = \sum_{i=1}^n \gamma_{\max,i} \cdot h_i + \sum_{j=1}^k \gamma_{\max,j} \cdot h_j \quad (4)$$

Yanal yer değiştirme tahminlerine göre, boşluk suyu basıncı kaynaklı yanıl yer değiştirmeler yaklaşık 30.0 m derinlikten yüzeye doğru etkili olmaya başlamıştır. Çetin vd. [34] tarafından önerilen bağıntılar ile tahmin edilen yanıl yer değiştirmeler Kuzey-Güney yönündeki deprem kayıtları ile yapılan boşluk suyu basıncını dikkate alan doğrusal olmayan MKZ modeli sonuçlarıyla yaklaşık olarak yakın tahminler vermiş olup yüzeydeki maksimum yanıl yer değiştirmeler Çizelge 3'de verilmiştir.

†Makalenin orjinalindeki ifadenin önündeki "-" işareti orjinal makalede şehven yazılmış olup yazar ile iletişime geçilerek bu makalede "+" olarak düzeltilmiştir.



Şekil 9 - Yüzeyde elde edilen yanal yerdeğiştirmeler (a) Doğu-Batı (D-B) doğrultusu (b) Kuzey-Güney (K-G) doğrultusu

## 6.2. Serbest Saha Koşullarında Düşey Yer Değiştirmeler

Bu çalışmada hem kumlu hem killi zeminlerin bulunması sebebiyle düşey yerdeğiştirmeler bu zeminlerde oluşacak olan artık boşluk suyu basıncının sönmülmesi sonucu oluşacak olan konsolidasyon oturması olarak değerlendirilmiştir. Artık boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile oluşan düşey yerdeğiştirmelerin tahmini için Chiaradonna vd. [39] tarafından önerilen boşluk suyu basıncı bünye modelleriyle yapılan sahaya özel analizlerinin kullanıldığı yaklaşım uygulanmıştır. Buna göre düşey yerdeğiştirme, artık boşluk suyu basıncının sönmülmesi neticesinde artan düşey efektif gerilmenin ( $\Delta u = \Delta \sigma'_z$ ), hacimsel sıkışma modülüne ( $E_{oed}$ ) bölünmesi ile belirlenen düşey şekil değıştirmenin, tabaka kalınlığı ( $\Delta z$ ) ile çarpılması sonucunda elde edilmektedir (Denklem 5).

$$s = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta \sigma'_{z,i}}{E_{oed,i}} \Delta z_i \quad (5)$$

Yukarıda verilen denklemde bulunan  $E_{oed}$ , kayma modülü ( $G$ ) ve Poisson oranı ( $\nu'$ ) kullanılarak Denklem 6 ile hesaplanmıştır.

$$E_{oed} = \frac{2G(1-\nu')}{(1-2\nu')} \quad (6)$$

Kayma modülü sahaya özel zemin davranışı analizleri sonrasında her tabakada oluşan maksimum yatay şekil değiştirmeye ( $\gamma_{max}$ ) bağlı olarak azaltılmış sekant modülü olarak bulunurken,  $\nu'=0.30$  kabul edilmiştir. Boşluk suyu basıncı modelleriyle gerçekleştirilen doğrusal olmayan serbest saha analizi sonuçlarına göre doğu-batı yönü için ve kuzey-güney yönü için yapılan hesaplar sonucunda ortalama maksimum oturmalar Şekil 10'da sunulmuştur.

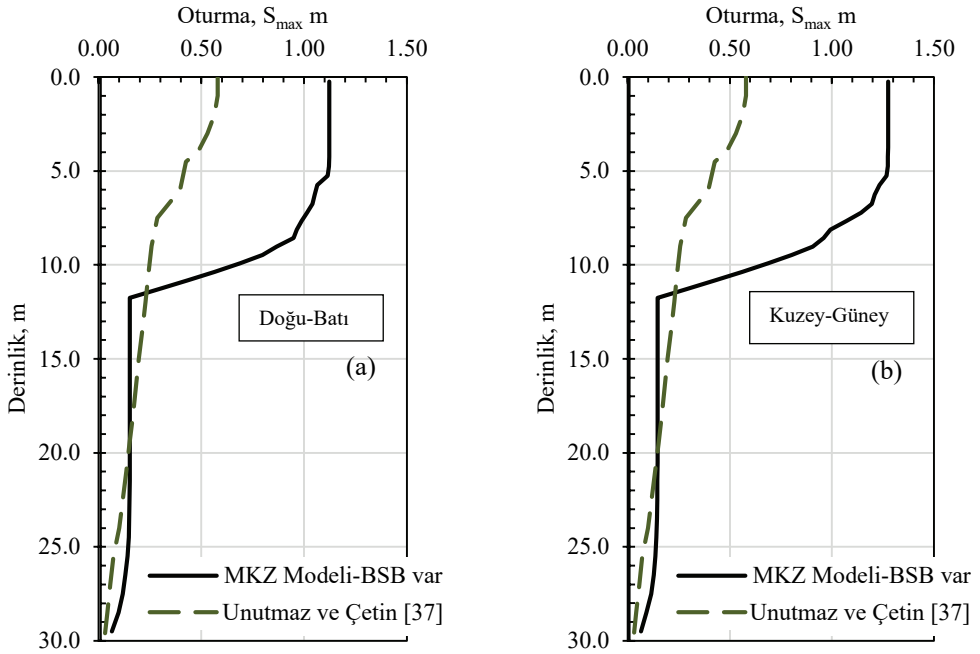
Ayrıca, literatürde deprem yükleri altında hem killi hem kumlu zeminlerde düşey yerdeğiştirmeleri tahmin edebilen Çetin vd. [34] ve Bilge ve Çetin [38] tarafından önerilen hacimsel birim sıkışma bağıntıları( $\varepsilon_v$ ) Denklem 7 kum zeminler için, Denklem 8 kil zeminler için kullanılmıştır. İlk 30 m için Denklem 9'da verilen bağıntı kullanılarak her bir tabakada oluşan hacimsel birim sıkışmanın tabaka kalınlıkları ile çarpılıp toplanması ile  $DPI_{vol}$  (Volumetric Displacement Potential Index) değerleri tahmin edilmiştir. 30 m derinlikten yukarı doğru her derinlik seviyesinde hesaplanan  $DPI_{vol}$  değeri en büyük düşey yer değiştirme veya oturma  $S_{max}$  olarak ifade edilmiş ve serbest saha analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır (Şekil 10), (Çizelge 3).

$$\varepsilon_v = 1.879 \cdot \ln \left[ \frac{780.416 \cdot \ln(CSR_{SS,20,1-D,1am}) - N_{1,60,CS} + 2442.465}{636.613 \cdot N_{1,60,CS} + 306.732} \right] + 5.583 \quad (7)$$

$$\varepsilon_v = \frac{0.4 \cdot \gamma_{max}^{0.562}}{1.805 - 0.036 \cdot \ln(PI) - \left( \frac{w_c}{LL} \right)} \quad (8)$$

$$DPI_{vol} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{v,i} \cdot h_i + \sum_{i=1}^k \varepsilon_{v,j} \cdot h_j \quad (9)$$

Şekil 10'da sunulan karşılaştırmalara göre serbest saha analizi sonucu konsolidasyon oturmalarının, 30 m'den yaklaşık 12 m'ye kadar Unutmaz ve Çetin [37] bağıntıları kullanılarak elde edilen düşey yer değiştirmelere yakın sonuçlar verdiği ancak 12.0 m derinlikten yüzeye kadar konsolidasyon oturma hesabı ile elde edilen düşey yer değiştirmelerin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu farklılıklar kullanılan modellerin farklılığından ve Unutmaz ve Çetin [37] bağıntılarında deprem bilgisi olarak ortalama  $p_{ga}$  ve deprem büyüklüğü kullanılırken, serbest saha analizlerinde sahaya özel ivme-zaman kayıtlarının kullanılmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Ayrıca serbest saha doğrusal olmayan analizler BSB kaynaklı zemindeki yumuşama ve sönümlenmeleri analiz sırasında hesaba kattığı için daha fazla deformasyonlar elde edilmiş olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca yaklaşık 6-10 m derinlikleri arasında bulunan kumlu zeminlerdeki oturmaların killi zeminlerdeki oturmalarından daha fazla geldiği görülmektedir. Kum zeminlerdeki oturmanın killi zeminlere göre daha fazla gelmesi aşırı boşluk suyu basıncının daha fazla oluşması ve bunun sonucunda oluşan konsolidasyon oturmasının daha fazla olması olarak düşünülebilir.



Şekil 10 - Serbest saha analizleri sonucunda ve Unutmaz ve Çetin'e [37] göre yüzeyde elde edilen oturma (a) Doğu-Batı (D-B) doğrultusu (b) Kuzey-Güney (K-G) doğrultusu

Çizelge 3 - Serbest Sahada Dinamik Yükler Altında Tahmin Edilen Yer Değişiklikleri

Analiz	Doğu-Batı		Kuzey-Güney	
	$L_{max}$ , cm	S, cm	$L_{max}$ , cm	S, cm
GQ/H -BSB yok	43	-	54	
MKZ -BSB var	94	112	197	128
Unutmaz ve Çetin [28]	226	58	226	58

### 6.3. Tank Yapısı Altında Düşey Yer Değişiklikleri

Yapı altında sıvılaşma kaynaklı düşey yer değişiklikleri üzerine son yıllarda güncel çalışmalar yapılmıştır (Dashti vd. [40-41], Wu [42], Bray ve Marcedo [43]). Bu çalışmalarda temel altı zemin sıvılaşması sebebiyle oluşan oturma mekanizmalarının konsolidasyon oturmasının yanı sıra daha çok deprem sırasında temel zemin mukavemet kaybı sonucu oluşan ve temel zeminin dışarı taşınması ve fıçırması sonucu oluşan oturmalardan oluştuğu deneysel olarak gösterilmiş ve olasılıksal bağıntılar sunulmuştur. Ancak bu çalışmalarda sunulan tahmin modelleri sahada sadece sıvılaşan zemin bulunması durumunda ve geniş radye temeller için önerilmiştir. Bu çalışmada sahada hem yumuşama potansiyeli olan killer hem de daha az kalınlıkta sıvılaşan tabaka bulunması sebebiyle, hem

killerdeki yumuşamayı hem de kumlarda sıvılaşmayı dikkate alan serbest saha ile yapı arasındaki farklı yer değiştirmeler ve dönmeleri tahmin eden Unutmaz ve Çetin [37] tarafından önerilen olasılıksal model bağıntıları kullanılmıştır. Bu model kumlu ve killi zeminlerde yapı altında deprem sonrası oturmaların tahmin edilmesi için geliştirilmiş ve yine Denklem 7 ve Denklem 8 kullanılarak oturmaları tahmin etmektedir. Bu denklemlerde bu sefer yapı altında oluşan, yapı-zemin etkileşimini de dikkate alan sismik kayma gerilmeleri veya kayma gerilme oranı ( $CSR_{SSEI}$ ) girdi olarak kullanılmaktadır.  $CSR_{SSEI}$  için Denklem 10'da verilen bağıntı Unutmaz ve Çetin [37] tarafından önerilmiştir:

$$CSR_{eq,SSEI,\alpha=0,\sigma'_v=100kPa}(z) = \theta_1 \cdot \left( \frac{\theta_2 \cdot f(\sigma) \cdot f\left(\frac{S_A(T)}{PGA}\right) \cdot f\left(\frac{h}{B}\right) \cdot \tau_{b,max}(z) + \tau_{soil,max}(z)}{\sigma'_{v,SSEI}(z) \cdot K_\alpha(z) \cdot K_\sigma(z)} \right)^{\theta_3} \quad (10)$$

Bu denklemde  $f(\sigma)$ ,  $f\left(\frac{S_A(T)}{PGA}\right)$ ,  $f\left(\frac{h}{B}\right)$  yapı-zemin etkileşimi iştirak fonksiyonlarını ifade etmektedir ve  $\sigma$  sahaya özel analizler sonucunda azalmış kayma dalgası hızına ( $V_{s,final}$ ) ve yapının periyoduna (T) ve boyutlarına (h: yapı yüksekliği, B: temel genişliği) bağlı bir

parametreyi ( $\sigma = \frac{V_{s,final} \times T}{h_{efektif}}$ ),  $S_{A(T)}$  yapının spektral ivmesini, PGA: pik yer ivmesini,

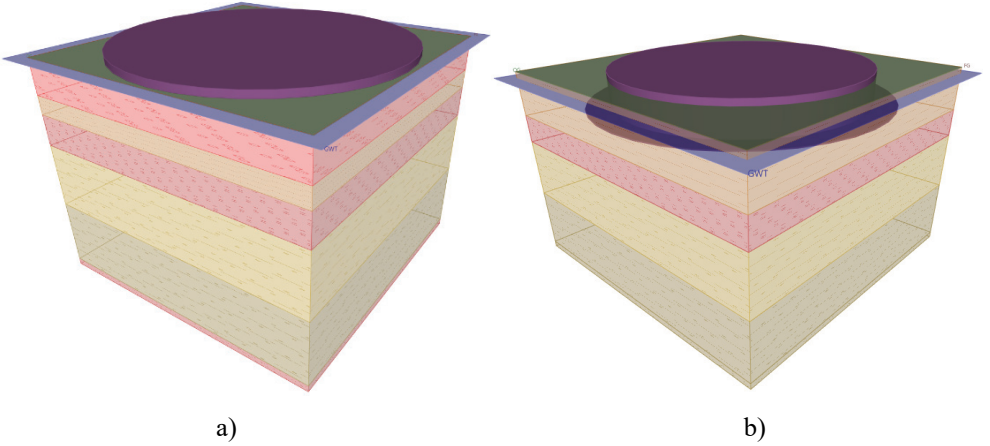
efektif = 2h/3 ifade etmektedir. Tank yapısının periyodu T= 0.3 s,  $S_{A(T=0.3s)}=0.27g$  olarak girilmiştir.  $V_{s,final}$  değeri GQ/H modeli ile yapılan serbest saha analizlerinden her tabaka için elde edilmiş ve Denklem 10'da girdi olarak kullanılmıştır. Bu denklemin detayları Unutmaz ve Çetin [37] yayınında bulunmaktadır. Bu denklemdeki istatistiksel parametreler ( $\theta_i$ ) en büyük CSR ( $CSR_{SSEI,max}$ ) ve ortalama (karakteristik: representative) CSR, ( $CSR_{SSEI,rep}$ ) için belirlenmiştir. En büyük değer yapının köşesinde, temsili değer ise yapının merkezinde olduğu kabulü yapılmaktadır. Tank yapısı altında 4-4.5 m mertebelerinde geogritli bir iyileştirilmiş tabaka bulunması sebebiyle oturmalar iyileştirilmiş tabakanın altında hesaplanmıştır. Bu bağıntılara göre yapı altında karakteristik ve maksimum oturma ortalama yaklaşık 50-55 cm değerleri arasında kaldığı tahmin edilmektedir.

Bu durumda, iyileştirilmiş tabakanın varlığı ile ortalama oturmalara bakıldığında tank yapısı altında oturma serbest sahaya göre daha az olabileceği tahmin edilmektedir. Ancak bu farklı oturmayı tahmin etmek birçok belirsizlik bulundurması sebebiyle oldukça güçtür. Sahaya özel yer tepki analizlerine göre serbest sahada en fazla oturma 128 cm, Unutmaz ve Çetin [37]'e göre 58 cm olarak bulunmuştur. Bu durumda farklı oturma tahmin yaklaşık en fazla 70-80 cm, en düşük ise 5-10 cm mertebelerinde olduğu tahmin edilmektedir. Tank yapısı ile serbest saha arasındaki boru bağlantılarında bu deplasman farkının göz önünde bulundurulması önerilir.

## 7. TANK YAPISI TEMELLERİNİN TBDY 2018'E GÖRE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA STABİLİTE KONTROLLERİ

Deprem yükleri etkisi altında temel tasarımı için gerçekleştirilmesi gereken stabilite analizleri temel taşıma gücünün aşılmamasının, yapı temelinin yatayda kaymamasının ve zemin yer değiştirmelerinin izin verilebilir sınırlar içerisinde kalmasının kontrolünü gerektirmektedir. Tank yapılarına özel, belirtilen stabilite analizlerinin esas alınacağı bir yönetmeliğimiz bulunmaması sebebiyle, yapıya ait temel sisteminin belirtilen yüklenme durumu altında stabilite analizleri TBDY 2018'e göre gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada inceleme tankının temel sistemi bir çok karmaşık geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan ve uluslararası standartları ve analitik çözümleri esas alan Fine Yazılımlarından Geo5 [44] analiz programında modellenmiş ve TBDY 2018 standartlarına göre analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 11).

Stabilite analizlerinde depremleri durumda temele etkileyecek düşey yük, eğilme momenti ve taban kesme kuvveti Şekil 8 (a) ve Şekil 8 (b)'de sunulan spektrumlar ile yapılan üst yapı analizleri sonucunda elde edilmiş ve Çizelge 4'de sunulmuştur. Tank tabanı altında elde edilmiş olan kesme kuvveti ve moment değerleri tank temelini hareket etmediği durum kabulü ile tank temel dolgusu altına da tamamen aktarılarak kayma ve taşıma gücü kontrolleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında tank yapısı taşıma gücü analizleri tank temeli dolgusu altında (geogritle güçlendirilmiş kum-çakıl kontrollü dolgusu altında), yatayda kayma kontrolleri ise hem tank temeli (tabanı) seviyesinde hem de tank temeli dolgusu altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11 - a) Tank temeli altında, b) tank temel dolgusu altında yapılacak Geo5 analiz modelleri

Deprem yükleri etkisi altında tank çevresinde bulunan tank çevre duvarının stabilite analizleri TBDY 2018 esas alınarak incelenmiştir. Bu kapsamda çevre duvarının dönmeye karşı güvenliği, kaymaya karşı güvenliği ve taşıma gücü güvenliği kontrol edilmiştir.

Çizelge 4 - Tank temeli stabilite analizlerinde kullanılan yük değerleri

	Tank Tabanı Altında	Tank Temel Dolgusu Altında
Depremlı durumda düşey yük Q (kN)	101919	282220
Deprem kaynaklı taban kesme kuvveti $V_{th}$ (kN)	36963	36963
Depremlı durumda moment M (kN.m)	173915	173915

### 7.1. Deprem Yükleri Altında Tank Temel Yapısının Taşıma Gücü ve Yatayda Kayma Kontrolleri

Tank yapıları genel itibariyle lojistik açıdan daha uygun olması sebebiyle nehir ve deniz kıyılarındaki sahalarda inşa edilmektedir. Nehir ve deniz kenarlarındaki zemin profillerinde ise yumuşak ve/veya gevşek zemin birimleri hakimdir. İnceleme tankı Marmara denizine yaklaşık 300 metre uzaklıkta bulunmaktadır ve yer altı su seviyesi yüzeye yakın konumdadır. Ayrıca Bölüm 3'de verilen idealize zemin kesiti incelendiğinde yapı temelinin kontrollü dolgu altında genel profil itibariyle sıkışabilirliği yüksek yumuşak kile oturduğu görülmektedir (Şekil 3). Bu tür zeminler hem taşıma kapasitesi hem de oturma problemi açısından kritik durumdadırlar.

Tank temelinin deprem yükleri altında taşıma gücü analizleri TBDY 2018 esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre yüzeysel temellerin taşıma gücü kontrolünde deprem etkilerini de içeren temel taban basıncı ( $q_0$ ) tasarım dayanımından ( $q_t$ ) küçük olmalıdır. Tasarım dayanımı ise, karakteristik dayanımın ( $q_k$ ), dayanım katsayısına ( $\gamma_{RV}=1.4$ )'e bölünmesiyle elde edilmektedir. Karakteristik dayanım bağıntısı Denklem 11'de verilmiştir.

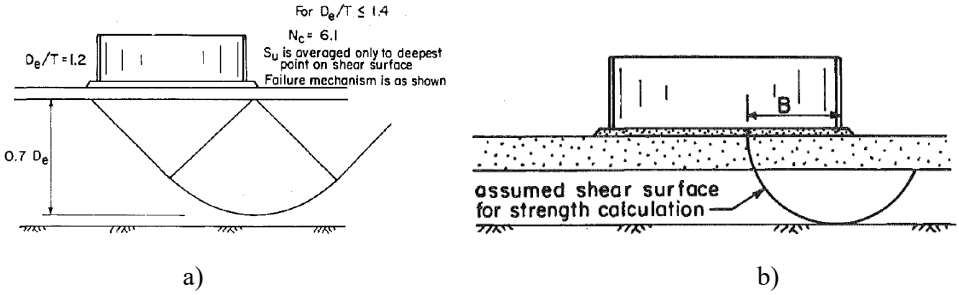
$$q_k = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B' N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (11)$$

İncelemesi yapılan tank temeli altında geogritle güçlendirilmiş kum-çakıl kontrollü dolgusu yer almaktadır. Bu tarz dolgu tabakalarının etkisi yapı tabanına gelen gerilmeleri daha geniş alanlara yayarak azaltmaktır. Çalışma kapsamında tank dolu iken üst yapıdan gelecek yükler ve kontrollü kum-çakıl dolgu ağırlığı hesaplanarak kum-çakıl dolgusu tabanında (yumuşak kil tabakası üzerinde) temel taban basıncı  $q_0=171$  kPa olarak belirlenmiştir. Kil zemin üzerine taşınan tank temeli yapısının taşıma gücü analizinde depremlı durumda ani yükleme durumu göz önünde bulundurularak drenajsız yükleme koşulları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Kum tabakalarının sıvılaşma ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu göz önünde bulundurularak tasarım dayanımı hesabına katılmamıştır (Day [45]). Denklem 11 kullanılarak deprem yükleri altında tasarım dayanımı temel dolgusu altında  $q_t=191$  kPa olarak hesaplanmıştır ve deprem yüklemesi sonucunda temel tabanında oluşacak gerilme (temel taban basıncı),  $q_0=171$  kPa'dan büyük bulunmuştur.

Duncan ve D'Orazio [5] tank yapılarında taşıma gücü açısından 2 yenilme durumunun kritik olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 12). Bunlardan ilki yönetmelik kapsamında incelemiş

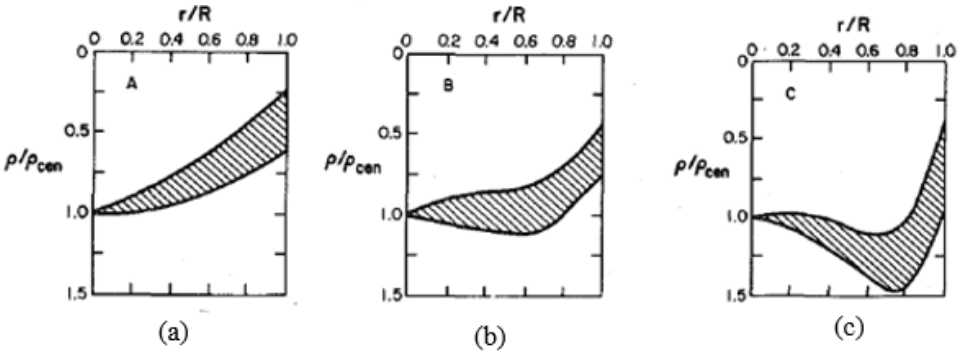


olduğumuz tank tabanı altında genel taşıma gücü yenilmesi durumudur. İkincisi ise tank çeperi altında lokal olarak göçmenin gerçekleşebileceği kenar taşıma gücü yenilmesi durumudur. Duncan ve D'Orazio [5] iki durumun da incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan kenar taşıma kapasitesi hesabı sonucunda tasarım dayanımı temel altında  $q_t=172$  kPa olarak hesaplanmıştır ve deprem yüklemesi sonucunda temel tabanında oluşacak gerilme (temel taban basıncı),  $q_o=117$  kPa'dan büyük bulunmuştur. Ayrıca Bölüm 3'de bahsedildiği üzere, tank tabanında merkeze doğru uygulanan %5 eğimin, kenar çeperinde olası bir lokal göçme potansiyelinin azaltılması için tasarlandığı düşünülmektedir. Taşıma kapasitesi açısından tankın hem taban hem de kenarda güvenli olduğu görülmüştür.



Şekil 12 - a) Genel taşıma gücü mekanizması, b) Kenar taşıma gücü mekanizması

Mevcut tank temelinin deprem yükleri etkisi altında oturma miktarları konsolidasyon oturması olarak ödometrik modül kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda tank tabanı ortasında gerçekleşecek oturma miktarı 30.4 cm ve tank kenarında gerçekleşecek maksimum oturma miktarı 15.5 cm olarak elde edilmiştir (Çizelge 6).



$p$  = Oturma miktarı  
 $p_c$  = Tank merkezindeki oturma miktarı  
 $r$  = Tank merkezinden uzaklık  
 $R$  = Tank yarıçapı

Şekil 13 - a) A tipi oturma profili b) B tipi oturma profili c) C tipi oturma profili

Tank yapısı altında oluşacak farklı oturma güvenliğinin kontrolü için D'Orazio ve Duncan'ın [6] yaptığı çalışma incelenmiştir. D'Orazio ve Duncan [6] tank tabanlarında farklı oturma olması durumunda tank tabanı merkezinden kenarına doğru değişecek şekilde 3 tip (A, B, C) oturma profili şekli oluşabileceğini belirtmişlerdir. A tipi oturmada en fazla oturma merkezde olup kenarlara doğru azalmaktadır. B tipi oturma profilinde merkezden kenara doğru belli bir mesafeye kadar oturmalar aynı miktarda devam etmekte ve bir noktadan sonra azalmaya başlamaktadır. C tipi oturma profilinde ise maksimum oturma merkezden kenara olan uzaklığın 2/3'ünde gerçekleşmektedir (Şekil 13).

Tank yapısı altında gerçekleşecek oturma profili şekli yapıda meydana gelecek hasarın miktarını etkilemektedir. D'Orazio ve Duncan [6] yaptıkları çalışmalar sonucu oturma profilinin şeklini efektif tank çapı ( $D_e$ )/sıkışabilir tabaka kalınlığı (T) oranına ve minimum taşıma kapasitesine (genel taşıma kapasitesi güvenlik sayısı ve kenar taşıma kapasitesi güvenlik sayısından küçük olanı) bağlı olarak vermişlerdir (Çizelge 5).

Çizelge 5 - Oturma profili tipi belirlenmesi ve izin verilebilir farklı oturma sınırları

	A tipi	B tipi	C tipi
$D_e/T$	$< 4$	$> 4$	
$F_{min}$	$> 1.1$	$> 1.1$	$< 1.1$
<b>İzin verilebilir farklı oturma sınırı</b>	$\frac{\Delta p}{D} \leq 0.025$	$\frac{\Delta p}{D} \leq 0.015$	$\frac{\Delta p}{D} \leq 0.005$

Yaptıkları ampirik çalışma ile D'Orazio ve Duncan [6] oturma profili tiplerine bağlı olarak izin verilebilir farklı oturma limitlerini belirlemişlerdir (Çizelge 5). İnceleme tankı için efektif tank çapı  $D_e=46.2$  m ve sıkışabilir tabaka kalınlığı  $T>25$ m (yapılan sondajlar sonucunda tank temeli altından 30 metreye kadar kil tabakası olduğu belirlenmiştir) için  $D_e/T=1.8<4$  ve minimum taşıma kapasitesi güvenlik sayısı  $F_{min}>1.1$  olarak belirlenmiştir. Çizelge 5 Çizelge 5'te verilen limitlere göre inceleme tankı altında A tipi tank oturma profili oluşabileceği tahmin edilmiş ve farklı oturma miktarı  $\frac{\Delta p}{D}=(30.4-15.5)/4120=0.004<0.025$  olarak belirlenmiştir ( $\Delta p$ =tank merkezi ve kenarı arasındaki oturma farkı,  $D$ =tank çapı) . Deprem yükleri etkisi altında farklı oturma açısından tankın güvenli olduğu görülmüştür.

Statik ve deprem yükleri etkisi altında oluşacak oturma miktarı, statik durumda oluşan oturma miktarından pek farklılık göstermemiştir. Tank yapısının statik oturmasını tamamladığı ve günümüze kadar güvenli bir şekilde temel zeminin stabilize olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak üst yapıdan deprem kaynaklı gelecek olan ilave yükler açısından kritik bir oturma olmayacağı anlaşılmaktadır. Ancak, Bölüm 6'da bahsedilen deprem dalgaları altında temel zeminin sıvılaşması veya yumuşaması sonucu oluşan oturmaların yüksek olduğu ve ortalama 50-55 cm mertebelerine gelebileceği görülmüştür. Literatürde tank tabanı ve tank duvarı arasında 60 cm'ye ulaşan farklı oturmaya sahip hasarsız çalışmaya devam eden vakalar bulunmaktadır. Düzceer [8] beş adet yüzer tavanlı çelik akaryakıt depolama tankında yaptığı incelemeler sonucunda geniş çapa sahip tank

temellerinde oluşmuş 40.8 cm'lik oturmanın üst yapıda herhangi bir fonksiyon kaybına sebep olmadığını belirtmiştir. Tank yapılarında oluşacak oturma miktarları konusunda genel kabul görmüş limitler bulunmamaktadır. Ancak boru bağlantılarının bu yer değiştirmelerin oluşma ihtimali göz önünde bulundurularak revize edilmesi önerilir.

Çizelge 6 - Tank yapısı temelinin deprem yüklemesi altında taşıma gücü ve oturma miktarı kontrolü

	Tank Temel Dolgusu Altında
Tasarım dayanımı, $q_t$ (kPa)	191
Temel taban basıncı, $q_0$ (kPa)	171
Toplam maksimum eksantrisite, $e_t$	$0.011 < 0.333$
Merkezde Oturma (cm) – Statik Yükleme /Deprem Yüklemesi Durumu	30.4/30.4
Kenarda Max. Oturma (cm) – Statik Yükleme /Deprem Yüklemesi Durumu	14.1/15.5
Farklı Oturma	$0.004 < 0.025$

Çizelge 7. Tank yapısı temellerinin deprem yüklemesi altında yatayda kayma kontrolü

	Tank Tabanı Altında	Tank Temel Dolgusu Altında
Tasarım sürtünme direnci, $R_{th}$ (kN)	60818	43786
Tasarım pasif direnci, $R_{pt}$ (kN)	0	255
$R=R_{th}+0.3 R_{pt}$ (kN)	60818	43863
Tasarım yatay kuvveti, $V_{th}$ (kN)	36963	36963

Tank yapısının yatayda kayma kontrolü hem tank tabanı altında hem de kontrollü kum-çakıl dolgusu altında TBDY 2018'e uygun olarak incelenmiştir. Yönetmeliğe göre yüzeysel temellerin yatayda kayması kontrolünde temel tabanında etkiyen tasarım yatay kuvveti ( $V_{th}$ ), tasarım sürtünme direnci ( $R_{th}$ ) ile tasarım pasif direncinin ( $R_{pt}$ ) %30'unun toplamından küçük olmalıdır. İncelenen tank yapısında, tank tabanı altında yatayda kayma kontrolü hesaplarında yatayda kayma direnci (sürtünme direnci ve pasif direncin 30%'unun toplamı) 60818 kN (R) olarak hesaplanmış olup deprem yükleri altındaki yatayda tasarım kuvvetinden  $V_{th}= 36963$  kN'dan büyük bulunmuştur. İncelenen tank yapısında, kontrollü kum-çakıl temel dolgusu altında yatayda kayma kontrolü hesaplarında yatayda kayma direnci 45006 kN (R) olarak hesaplanmış olup deprem yükleri altındaki yatayda tasarım kuvvetinden  $V_{th}= 36963$  kN'dan büyük bulunmuştur. İncelenen tank yapısı için yatayda tasarım dayanımı hem temel dolgusu altında hem de asfalt tabaka ile dolgu arasında yatay deprem yüklerinin üzerinde bulunmuş olup kaymaya karşı tank tabanının güvenli olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7).

## 7.2. Tank Temeli Çevre Duvarının Stabilite Kontrolleri

Çevre duvarının deprem yükleri altında zemin taşıma gücü analizi, devrilmeye ve yatayda kaymaya karşı kontrol analizleri TBDY 2018 esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Dayanma yapısının temelinde taşıma gücü kontrolünde deprem etkilerini de içeren temel taban basıncı ( $q_0$ ) tasarım dayanımından ( $q_t$ ) küçük olmalıdır. Devrilme ve yatayda kayma tahkikinde dayanma yapısının devrilmeye ve yatayda kaymaya zorlayan etkiler (momentler/kuvvetler) ile bunlara karşı koyan etkilerin ve dirençlerin dengesi karşılaştırılmaktadır. Dayanma yapısının devrilmeye karşı güvenli olması için Denklem 12 koşulu sağlanmalıdır.

$$E_{dev} \leq \frac{R_{dev}}{\gamma_{Rdev}} \quad (12)$$

Burada,  $E_{dev}$  devrilmeye zorlayan etkiler toplamı,  $R_{dev}$  devrilmeye karşı koyan etkiler ve dirençler toplamı,  $\gamma_{Rdev}$  ise devrilmeye karşı tasarım güvenlik katsayısıdır. Bu katsayı  $\gamma_{Rdev} \geq 1.3$  olarak göz önüne alınacaktır. Dayanma yapılarının yatayda kayması kontrolünde temel tabanında etkiyen tasarım yatay kuvveti ( $V_{th}$ ), tasarım sürtünme direnci ( $R_{th}$ ) ile tasarım pasif direncinin ( $R_{pt}$ ) %30'unun toplamından küçük olmalıdır.

Çalışma kapsamında çevre duvarı analizlerinde çevre duvarının arkasında bulunan tank yapısının oluşturacağı taban basıncı çevre duvarı arkasında sürşarj yükü olarak etkilmiştir. Çevre duvarının deprem yükleri altında düşey tasarım dayanımı  $q_t=31.5$  kPa olarak hesaplanmış olup deprem yüklemesi sonucunda temel tabanında oluşan gerilme (temel taban basıncı),  $q_0=28.9$  kPa'dan büyük bulunmuştur. Çevre duvarı yapısında, devrilmeye karşı kontrol hesabında devrilmeye zorlayan etkiler toplamı  $E_{dev}=72$  kNm/m olarak hesaplanmış olup deprem yükleri altında devrilmeye karşı koyan etkiler toplamı  $R_{dev}=122$  kNm/m'den küçük bulunmuştur. Çevre duvarı yapısında, yatayda kayma kontrolü hesaplarında yatayda kayma direnci (sürtünme direnci ve pasif direncin 30%'unun toplamı) 78 kN (R) olarak hesaplanmış olup deprem yükleri altındaki yatayda tasarım kuvvetinden  $V_{th}= 29$  kN'dan büyük bulunmuştur. Sonuçlar Çizelge 8'de sunulmuştur.

Çizelge 8 - Tank çevre duvarının stabilite kontrolleri

Taşıma Gücü Analizi	Tasarım dayanımı, $q_t$ (kPa)	31.5
	Temel taban basıncı, $q_0$ (kPa)	28.9
Devrilmeye Karşı Kontrol Analizi	Devrilmeye zorlayan etkiler toplamı, $E_{dev}$ (kN.m/m)	72
	Devrilmeye karşı koyan etkiler toplamı, $R_{dev}$ (kN.m/m)	122
Yatayda Kaymaya Karşı Kontrol Analizi	Tasarım sürtünme direnci, $R_{th}$ (kN)	54
	Tasarım pasif direnci, $R_{pt}$ (kN)	79
	$R=R_{th}+0.3 R_{pt}$ (kN)	78
	Tasarım yatay kuvveti, $V_{th}$ (kN)	29

## 8. SONUÇLAR

Bu yayın deprem bölgesinde bulunan mevcut bir endüstriyel tank yapısının Uluslararası Standartlara, TBDY 2018'e ve literatürde tank yapıları için önerilen kriterler esas alınarak, deprem kayıtlarının belirlenmesi ve ölçeklendirmesi, temel zemininde yumuşama ve sıvılaşma davranışlarının irdelenmesi, temel zemini mukavemeti, stabilite ve oturma analizlerinin değerlendirilmesi üzerine bir örnek çalışma sunmaktadır. Tank yapılarının içinde buldukları kimyasal sıvıların yanıcı etkileri olması sebebiyle statik olarak güvenli olsa da deprem yükleri altında riskli durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada bu riskler geoteknik açıdan irdelenmiş, stabilite kontrolleri ve oturma analizleri gerçekleştirilerek alınması gereken önlemlerden bahsedilmiştir. Endüstriyel tank yapıları için henüz ülkemizde bir yönetmelik bulunmaması sebebiyle bu çalışmanın gelecekte yönetmelik çalışmalarına da bir ışık tutacağı umut edilmektedir.

Yüzer çatı tipine sahip inceleme tankı 41.7 m çapında ve 12 m yüksekliğinde, 16000 m<sup>3</sup>'lük iç hacime sahip olup yüzeyden 4 m derinlikten itibaren kum-çakıl dolgu malzemesi ile 50 cm'lik tabakalar halinde doldurulmuş ve sıkıştırılmış ve 7 seviye geogrit malzeme serilerek güçlendirme gerçekleştirilmiş bir dolgu temel üzerine oturtulmuştur. Tank tabanı 10 cm kalınlığında tankın ortasına doğru %5 eğimli mastik asfalt ile kaplanmıştır. 7. geogrit tabakasının üzerine tekrar kum-çakıl dolgusu yapılarak tankın tabanı bu tabaka üzerine oturtulmuştur. Kum-çakıl dolgu malzemesi ve 7 tabaka geogritle güçlendirilmiş zemin üzerine tank taban dolgusunu çevreleyen betonarme temel çevre duvarı inşa edilmiştir. Deprem yükleri altında içerisinde yanıcı kimyasal bulunduran tanklarda çalkalanma etkisi kritik durum arz etmektedir. Fakat inceleme tankı yüzer çatı tipine sahip olmasından dolayı bu çalkalanma etkisi sınırlandırılmıştır.

Marmara bölgesinde diri fay hatlarına yakın mesafede (10-50 km arası) bulunmakta olan tank yapısının bulunduğu sahada yoğunlukla deniz alüvyonu zemini bulunmakta ve zemin profili 0.0-3.5 m arasında dolgu tabakası, 3.5-7.0 m arasında silt içerikli düşük plastisiteli çok yumuşak kil tabakası, 7.0-11.5 m arasında çakıl içerikli killi orta sıkı kum tabakası, 11.5-20.0 m arasında silt içerikli kum arabantlı yumuşak kil tabakası ve 20.0-30.0 m arasında silt içerikli kum ara bantlı orta katı-katı kil tabakası olarak tahmin edilmiştir. Sahada yapılan jeofizik deneylere göre ilk 30 m kayma dalgası hızı  $(V_s)_{30} = 109$  m/s olarak hesaplanmıştır. Yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmekle beraber sahada bulunan kumlu birimlerde sıvılaşma potansiyeli ZE sınıfı tasarım spektrumu esas alınarak incelenmiştir. Sahada yapılan 3 sondajın verileri ile gerçekleştirilen sıvılaşma analizlerine göre yüzeyden 4 m-10 m derinlikleri arasında değişkenlik gösteren orta sıkı kum tabakalarında sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları 1.10'un altında elde edilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli bulunması ve sahada kayma mukavemeti düşük 35 m'den kalın kil tabakalarının mevcut olması sebebiyle zemin sınıfının ZF olarak ele alınıp zaman tanım alanında doğrusal olmayan sahaya özel zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analizler, sahada 150 m derinliğe kadar yapılan 2B MASW arazi deneyi sonucunda anakaya derinliğine 150 m'de ulaşılamamış olması ve anakayanın 300 m kadar derinde olduğu tahmin edilmesi sebebiyle ZD hedef spektrumuna göre ölçeklendirilmiş 11 adet yer hareketi ivme-zaman mostra kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sahaya özel zemin davranış analizleri doğrusal olmayan GQ/H modeli ile boşluk suyu basıncı modelleri kullanılmadan ve doğrusal olmayan MKZ modeli ile hem kum hem de kil zeminlerde boşluk suyu basıncı modelleri kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Serbest saha analiz sonuçlarına göre ve literatürdeki olasılıksal

modeller kullanılarak serbest sahada yatay yer değiştirmeler tahmin edilmiştir. MKZ modeli ile yapılan analiz sonuçlarında her tabakada oluşan boşluk suyu basıncını konsolidasyon oturmasına dönüştürerek ve yine literatürdeki modeller kullanılarak serbest sahada düşey deformasyonlar tahmin edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca tank yapısı altında düşey yer değiştirmeler tahmin edilmiştir. Tank yapısı tabanında, güçlendirilmiş geogritli dolgu altında ve temel çevre duvarı için deprem yükleri altında taşıma gücü ve yatayda kayma kontrolleri ve çevre duvarı için devrilme kontrolleri yapılmıştır.

Sahaya özel zemin davranış analiz sonuçlarına göre boşluk suyu basıncı modelleriyle yüzeyde elde edilen ivme tepki spektrumlarının boşluk suyu basıncı modeli kullanılmadan elde edilen yüzey spektrumlarının çok altında değerler verdiği ve zemin yumuşaması ve sıvılaşmasının doğal bir izolatör gibi davranarak yüzey ivmelerini ciddi oranda sönümlediği gözlemlenmiştir. Ancak deprem yükleri altında zemin sıvılaşması ve yumuşaması serbest sahada yüksek mertebelerde yanal yer değiştirmelere (2.0-2.3 m) ve düşey oturmalara (58-128 cm) sebebiyet vermiştir. Tank yapısı altında deprem yükleri kaynaklı zemin sıvılaşması ve yumuşaması sonucu oluşan düşey oturumların tahmini için, birçok parametrenin etkisindeki belirsizlikler sebebiyle halen literatürde kısıtlı sayıda olasılıksal model bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan modelle yapılan hesaplamalar sonucunda tank yapısı altında 50-55 cm oturma tahmin edilmiş olup, serbest saha tahminlerinden daha düşüktür. Tank yapısı altında 4.5 m derinliğe kadar sıkıştırılmış geogritli dolgunun bulunması sebebiyle serbest sahadan daha az oturma bekleneceği tahmin edilebilir. Bu oturma değerlerinin tank yapılarının sağlıklı bir şekilde çalışması için limit sınırlar içerisinde kaldığı literatürde bahsedilmiş olup tank yapısı altında bir iyileştirme önerilmemiştir. Tank yapısı altındaki ince asfalt temel yapısının merkeze doğru 5% eğimli olması ve 4.0-4.5 m temel dolgusu bulunması sebebiyle tank temelinde dönme olasılığının düşük olduğu tahmin edilmiştir. Ancak bu tür tank yapılarının sıvılaşma ve yumuşama potansiyeli olan zeminlerin üzerinde dolgu temel ile tasarımlarının incelenmesi ve araştırılması önem arz etmektedir.

Bu tür geniş bir sahada zemin iyileştirmesi yapılması ve her tank yapısının temel altı zeminin iyileştirilmesi bir çözüm olarak önerilebilir. Ancak tank yapılarının tolere edebileceği oturumların söz konusu olması sebebiyle böyle bir iyileştirmenin tüm sahada uygulanması pek pratik görülmemektedir. Sadece tank yapısı altında yapılacak olan iyileştirme ise boru bağlantılarındaki farklı deformasyonları daha da arttıracaktır. Bu sebeple burada kritik olan serbest saha ve tank yapısı arasındaki farklı oturumların boru bağlantıları tarafından karşılanabilecek düzeyde bağlantıların esnek tasarlanması veya revize edilmesi önem arz etmektedir. Serbest saha ile tank yapısı arasındaki farklı oturmanın yaklaşık en fazla 70-80 cm, en düşük ise 5-10 cm mertebelerinde olduğu tahmin edilmektedir. Tank yapısı ile serbest saha arasındaki boru bağlantılarında bu yer değiştirme farkının göz önünde bulundurulması önerilir. Üst yapıdan gelecek olan ilave deprem yükleri altında tank yapısı tabanında ve geogritli dolgu altında taşıma gücü ve tabanda kayma kontrolleri yapılmış ve güvenli bulunmuştur. Tank temeli çevre duvarı taşıma gücü, yatayda kayma ve devrilmeye karşı güvenli bulunmuştur.

Endüstriyel tank yapılarının deprem bölgelerinde tasarımında ve mevcut yapıların sismik stabilite analizleri ile ilgili literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunması sebebiyle mevcut bir tank yapısının geoteknik açıdan değerlendirilmesi bu çalışmada sunulmuş olup, bu tür yapılar için yönetmelik çalışmalarının gerekliliğine dikkat çekilmiştir.

## Semboller

A	Model parametresi
B	Temel genişliği
$b_c, b_q, b_\gamma$	Temel taban eğimi düzeltme katsayıları
BSB	Boşluk suyu basıncı
c	Zeminin kohezyon dayanımı
CH	Kroshol deneyi (crosshole)
$C_M$	Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı
$CRR_{M7.5}$	Çevrimsel dayanım oranı
$CSR_{SS,20,1-D,1atm}$	1 boyutlu basit kesme deneylerinde 20. çevrimde 100 kPa düşey gerilme altında çevrimsel gerilme direnci oranını
$CSR_{SSEI}$	Yapı-zemin etkileşimini dikkate alan sismik kayma gerilme oranı
$c_u$	Drenajsız kayma dayanımı
$(c_u)_{30}$	Temel tabanından itibaren 30 metre derinliğe kadarki ortalama drenajsız kayma dayanımı
D	Sönüm oranı, Tank çapı
DD	Deprem düzeyi
$D_e$	Efektif tank çapı
$d_c, d_q, d_\gamma$	Temel derinliği düzeltme katsayıları
$DPI_{dev}$	Deviatorik Yerdeğiştirme potansiyeli indeksi (Deviatoric Displacement Potential Index)
$DPI_{vol}$	Hacimsel Yerdeğiştirme potansiyeli indeksi (Volumetric Displacement Potential Index)
DTS	Deprem tasarım sınıfı
E	Deformasyon modülü
$E_{dev}$	Dayanma yapısını devrilmeye zorlayan etkiler toplamı
$E_{oed}$	Hacimsel sıkışma modülü
FC	İnce dane oranı
$F_{min}$	Minimum taşıma kapasitesi güvenlik sayısı
$f_{maks}$	Maksimum frekans
$F_S$	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
$F_1$	1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
G	Kayma modülü
$g_c, g_q, g_\gamma$	Zemin eğimi düzeltme katsayıları
$G_{maks}$	Maksimum kayma modülü
$G_s$	Güvenlik sayısı

$h$	Yapı yüksekliği
$i_c, i_q, i_\gamma$	Yükleme eğikliği düzeltme katsayıları
$I_p$	Plastisite indisi
$K_{md}$	Çok yönlü deprem hareketi için düzeltme katsayısı
$K_{MW}$	Deprem büyüklüğü için düzeltme katsayısı
$K_\sigma$	Efektif gerilme düzeltme katsayısı
LL	Likit limit
$L_{max}$	En büyük yanıl yerdeğiştirme
$M$	Eğilme momenti
MASW	Çok kanallı yüzey dalgası analiz yöntemi
$M_w$	Moment büyüklüğü
$N_c, N_q, N_\gamma$	Taşıma gücü katsayıları
$N_{60}$	Düzeltilmiş SPT değeri
$(N_{60})_{30}$	Temel tabanından itibaren 30 metre derinliğe kadarki ortalama standart penetrasyon darbe sayısı
$N_{1,60cs}$	Temiz kumlar için düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
$N_{1,60f}$	İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
$p_{ga}$	En büyük yer ivmesi
PI	Plastisite indisi
$P_1$ ve $P_2$	Model parametreleri
$R_{dev}$	Dayanma yapısında devrilmeye karşı koyan etkiler ve dirençler toplamı
$R_{jb}$	Faya olan uzaklık (Joyner-Boore mesafesi)
$R_{pt}$	Tasarım pasif direnci
$R_{th}$	Tasarım sürtünme direnci
$r_u$	Boşluk suyu basıncı oranı
$Q$	Deprem durumunda düşey yük
$q_k$	Temel taşıma gücü karakteristik dayanımı
$q_o$	Temel seviyesinde etkiyen düşey yük, kesme ve moment etkilerinin oluşturduğu temel taban basıncı
$q_t$	Temel taşıma gücü tasarım dayanımı
$s$	Model parametresi
$S$	Sismik kırılma ölçü lokasyonu
$s_c, s_q, s_\gamma$	Temel şekli düzeltme katsayıları
$S_{DS}$	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$S_{D1}$	1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı



SK	Sondaj kuyusu
$S_{max}$	En büyük düşey yerdeğiştirme/oturma
SPT	Standart penetrasyon deneyi
$S_s$	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
$S_1$	1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
T	Periyot, Sıkışabilir tabaka kalınlığı
TBDY	Türk bina deprem yönetmeliği
TDTH	Türkiye deprem tehlike haritaları
UU	Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi
$V_s$	Kayma dalgası hızı
$V_{s,30}$	Temel tabanından itibaren 30 metre derinliğe kadarki ortalama kayma dalgası hızı
$V_{s,final}$	Sahaya özel analizler sonucu azalmış kayma dalgası hızı
$V_{th}$	Temel tabanında etkiyen tasarım yatay kuvveti
$\nu'$	Poisson oranı
$w_c$	Su muhtevası
$\beta$	Model parametresi
$\Delta p$	Tank merkezi ve kenarı arasındaki oturma miktarı farkı
$\phi'$	Zeminin efektif kayma direnci açısı
$\gamma_{max}$	Maksimum yatay şekil değiştirme
$\gamma_n$	Doğal birim hacim ağırlık
$\gamma_{Rdev}$	Dayanma yapısında devrilmeye karşı tasarım güvenlik sayısı
$\gamma_{ref}$	Referans şekildeğiştirme değeri
$\gamma_{Rv}$	Temel taşıma gücü dayanım katsayısı
$\rho$	Yoğunluk
$\sigma'_v$	Düşey efektif gerilme
$\tau$	Kayma gerilmesi
$\tau_{cyc}$	Çevrimssel kayma gerilmesi
$\tau_{max}$	Maksimum kayma dayanımı
$\tau_R$	Sıvılaşma direnci
$\tau_{st}$	Statik kayma gerilmesi
$\theta_{1,2,3,4,5}$	Model parametresi

### **Kaynaklar**

- [1] API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, 12th Edition, American Petroleum Institute, Washington DC, USA, 2013.
- [2] ASCE/SEI 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures, Reston, VA: ASCE, 2013.
- [3] EN 1991-4, Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks, European Committee for Standardization, 2006.
- [4] New Zealand Society of Earthquake Engineering (NZSEE), Seismic Design of Storage Tanks: 2009, Recommendations of a NZSEE Study Group on Seismic Design of Storage Tanks, Wellington, New Zealand, 2009.
- [5] Duncan, J. M., and D'Orazio, T. B., Stability of steel oil storage tanks. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(9), 1219-1238, 1984.
- [6] D'Orazio, T. B., and Duncan, J. M., Differential settlements in steel tanks. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(9), 967-983, 1987.
- [7] Kumbasar V., Silindirik Tankların Temel Hesapları, 641, İTÜ Kütüphanesi, 1966.
- [8] Düzceer, R., Akaryakıt tank temellerinin hesaplanan ve ölçülen oturmaları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 1. Özel Konulu Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [9] Ramdane, B., Omar, S., and Djahid, A., Differential Settlements of Cylindrical Steel Storage Tanks: Case of the Marine Terminal of Bejaia, Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Chicago, USA, 2013.
- [10] Kamyab, H., and Palmer, S. C., Displacements in oil storage tanks caused by localized differential settlement. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 113, 71-80, 1991.
- [11] Sento, N., Yasuda, S., Yoshida, N., and Harada, K., Case Studies for Oil Tank on Liquefiable Sandy Ground Subjected to Extremely Large Earthquakes and Countermeasure Effects by Compaction, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004.
- [12] Cubrinovski, M., Ishihara, K., and Kijima, T., Effects of Liquefaction on Seismic Response of a Storage Tank on Pile Foundations. *Proceedings: Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn*, Paper No 6.15, California, 2001.
- [13] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Türkiye, 2018.
- [14] Stroud, M. A., The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks. *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing*, 2(2): 367-375, Stockholm, 1974.
- [15] Baguelin, F., The pressuremeter and foundation engineering. *Series on Rock and Soil Mechanics*, 2(4), 617, 1978.

- [16] Hatanaka, M., and Uchida, A., Empirical Correlation between Penetration Resistance and Internal Friction Angle of Sandy Soils. *Soils and Foundations*, Vol. 36, No.4, pp. 1-10, 1996.
- [17] Kulhawy, F.H., and Mayne, P.W., *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1990.
- [18] Briaud J.L., ,The Pressuremete, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1992.
- [19] Akkar, S., Azak Eroğlu, T., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu M.B., Duman, T., Ergintav, S., Kadrioğlu, F.T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal R.F., Kılıç, T., Özalp, S., Şeşetyan, K., Tekin, S., Yakıt, A., Yılmaz, M.T., ve Zülfikar, Ö., *Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi*. AFAD, Proje No: UDAP-Ç-13-06, 2014.
- [20] Youd, T. L., and Idriss, I. M., Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(4), 297-313, 2001.
- [21] Dikmen, Ü., Başokur. A.T., Akkaya, İ., ve Arısoy, M.Ö., Yüzey dalgalarının çok-kanallı analiz yönteminde uygun atış mesafesinin seçimi. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi*, 31(1), 23-32, 2009.
- [22] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., *DEEPSOIL 7.0, User Manual*. 2017.
- [23] Skempton, A. W., Discussion: Sensitivity of clays and the c/p ratio in normally consolidated clays. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Separate, 478, 19-22, 1954.
- [24] Darendeli, M.B., Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 2001.
- [25] Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>, 2006.
- [26] SeismoMatch 2020. A computer program for spectrum matching of earthquake records, <https://seismosoft.com>, 2020
- [27] Tokimatsu, K., and Seed, H. B., Simplified procedures of the evaluation of settlements in clean sands. Rep. No. UCB/GT-84/16, University of California, USA, 1984.
- [28] Tokimatsu, K., and Seed, H. B., Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 861-878, 1987.
- [29] Ishihara, K., and Yoshimine, M., Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and foundations*, 32(1), 173-188, 1992.
- [30] Shamoto, Y., Zhang, J. M., and Tokimatsu, K., New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 17(7-8), 427-438, 1998.
- [31] Youd, T. L., Hansen, C. M., and Bartlett, S. F., Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(12), 1007-1017, 2002.

- [32] Wu, J., Seed, R. B., and Pestana, J. M., Liquefaction triggering and post liquefaction deformations of Monterey 0/30 sand under unidirectional cyclic simple shear loading. Geotechnical Engineering Research Rep. No. UCB/GE-2003/01, University of California, USA, 2003.
- [33] Zhang, G., Robertson, P. K., and Brachman, R. W. I., Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 861-871, 2004.
- [34] Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., and Seed, R. B., Probabilistic model for the assessment of cyclically induced reconsolidation (volumetric) settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 387-398, 2009.
- [35] Yasuhara, K., Konami, T., Hyodo, and Hirao, K., M., Earthquake-Induced Settlement in Soft Grounds, Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering Soil Dynamics, Missouri, 1991.
- [36] Erken, A., Özay, R., Kaya, Z., ve Ülker, M.B.C, Elibol, B., Deprem Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Taşıma Gücü Kayıpları, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 431(3), 2004.
- [37] Unutmaz, B., and Cetin, K. O., Post-cyclic settlement and tilting potential of mat foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 271-286, 2012.
- [38] Bilge, H. T., and Cetin, K. O., Probabilistic assessment of cyclic soil straining in fine-grained soils. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, (pp. 1-10), 2008.
- [39] Chiaradonna, A., Bilotta, E., d'Onofrio, A., Flora, A. and Silvestri, F., A Simplified Procedure for Evaluating Post-Seismic Settlements in Liquefiable Soils. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, Austin, Texas, 2018.
- [40] Dashti, S., Bray, J.D., Pestana, J.M., Riemer, M., and Wilson, D., Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 151-164, 2010a.
- [41] Dashti, S., Bray, J.D., Pestana, J.M., Riemer, M., and Wilson, D., Centrifuge Testing to Evaluate and Mitigate Liquefaction-Induced Building Settlement Mechanisms. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 918-929, 2010b.
- [42] Lu, C.W., A Simplified Calculation Method for Liquefaction-Induced Settlement of Shallow Foundation. *Journal of Earthquake Engineering*, 21:8, 1385-1405, 2017.
- [43] Bray, J.D., Macedo, J., 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 215-231, 2017.
- [44] Fine. GEO5 2020-Spread Footing. <http://www.finesoftware.eu/>, Prague, Czech Republic, 2020.
- [45] Day, R.W., *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook: With the 2012 International Building Code*. McGraw-Hill Education, 2012.

# Betonarme Kiriş ve Kolonların Tersinir Çevrimsel Yükler Altındaki Kesme Dayanımına Betonun Katkısı Üzerine Deneysel Bir inceleme

Cem AYDEMİR<sup>1</sup>

Müberra ESER AYDEMİR<sup>2</sup>

Güray ARSLAN<sup>3</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada betonun kesme dayanımına katkısı deneysel olarak incelenmiştir. İncelemeler, eğilme kırılmasıyla taşıma gücüne ulaşan toplam 12 adet kolon ve kiriş numunesiyle gerçekleştirilmiştir. Yön değiştiren ya da yön değiştirmeyen plastik mafsallı davranışının söz konusu olduğu kiriş deney numuneleri için temel değişkenler; basınç dayanımı, enine donatı aralığı, plastik mafsallı çalışma biçimi ve kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır. Sabit eksenel yük ve yön değiştiren çevrimsel yerdeğiştirme altında zorlanan betonarme kolon numunelerinde ise temel değişkenler; eksenel yük düzeyi ve kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır. Deney numunelerinde yerdeğiştirme talebine göre değişken olarak ortaya çıkan beton kesme katkısı, başta Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği olmak üzere çeşitli tahmin modellerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. Sınırlı sayıda karşılaştırma sonuçlarına göre, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kabulleriyle belirlenen beton katkısının kiriş numunelerinde ihtiyatlı, kolon numuneleri için ise kapasitenin üzerinde sonuçlar verdiği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kesme dayanımı, betonun kesme dayanımına katkısı, kesme dayanımı-süneklik etkileşimi, yön değiştiren plastik mafsallı, yön değiştirmeyen plastik mafsallı.

## ABSTRACT

### An Experimental Study on Concrete Contribution to Shear Capacity of RC Beams and Columns under Cyclic Loading

In this study, concrete contribution to shear strength is experimentally investigated for RC beams and columns with flexural failure. For beam samples with reversing or non-reversing plastic hinge mechanism, the main variables are concrete compressive strength, transverse reinforcement spacing,

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21 Ekim 2020 günü ulaşmıştır. 13 Nisan 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.814089>

1 İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - cemaydemir@aydin.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0003-4531-5084>

2 İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - muberraaydemir@aydin.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-4609-4845>

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - aguray@yildiz.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0001-5004-8617>

type of plastic behavior and shear span / effective depth ratio. For column samples under constant axial load level and reversing cyclic loads, the considered variables are axial load level and shear span / effective depth ratio. Concrete contribution to shear strength, which varies with displacement demand, is compared with analytical results of different approaches involving the assumptions of Turkish Seismic Design Code. With the limited number of test samples, it is obtained that Turkish Seismic Design Code assumptions may provide conservative results for beam samples whereas remain unconservative for column samples.

**Keywords** Shear strength, concrete contribution to shear strength, shear strength-ductility interaction, reversing plastic hinge, non-reversing plastic hinge.

## 1. GİRİŞ

Kesme ya da eğik çekme kırılması gevrek bir kırılmadır. Kesmeye karşı güvenlik, dayanımın, tasarım kuvvetinden ( $V_d$ ) eşit ya da büyük tutulmasıyla sağlanır. Deprem durumunda tasarım kuvvetinin ( $V_c$ ) saptanmasında kapasite tasarımı ilkesinden [1, 2 ve 3] yararlanılır. Eleman uçlarındaki eğilme momenti kapasitelerinin ( $M_p$ ) kullanıldığı bu uygulamayla, kesme kuvveti talebinin olası en büyük değeri elde edilerek [4, 5], güç tükenmesinin sünek olarak ortaya çıkması sağlanabilir.

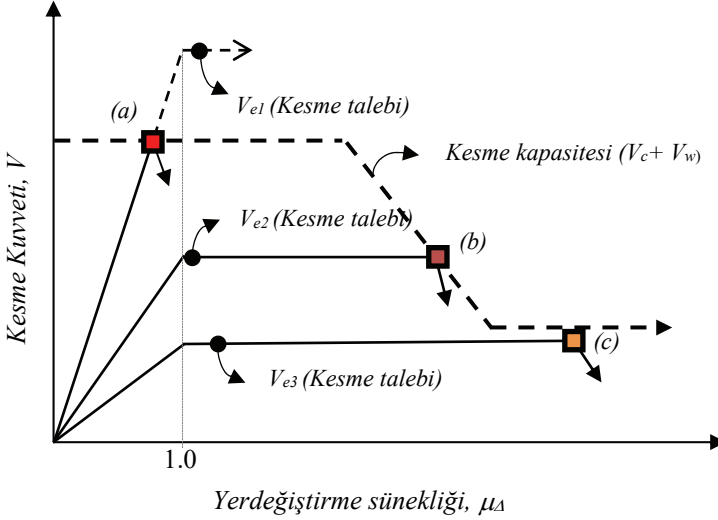
Betonarme kesitlerin kesme dayanımı, beton katkısı ( $V_c$ ) ve kesme donatısı katkısının ( $V_w$ ) toplanmasıyla ifade edilir (6~9). Kesme donatısı katkısı, eğik kesme çatlağını kesen enine donatılarla karşılanan kesme kuvvetlerinin toplamıdır. Tasarım yönetmeliklerinde bu katkı, eğik kesme çatlağı açısının değişmediği ( $45^\circ$ ) varsayılarak [6, 7] ya da açıdaki değişim dikkate alınarak [8, 9] belirlenebilmektedir. Kesme dayanımına beton katkısı ise çatlamamış basınç bölgesinde beton, çekme bölgesinde boyuna donatının kaldırma etkisi ve çatlak yüzeyinde agrega sürtünmesi tarafından karşılanan bileşenlerin toplamı olarak ifade edilebilir [10].

Çevrimsel yüklerle elastik ötesi davranışa zorlanan betonarme elemanlarda, kesme dayanımında, eğilme dayanımına nispeten daha hızlı bir azalma meydana gelir. Bu olgu, Şekil 1'de gösterilen ve kesme dayanımının süneklik ile etkileşiminin tanımlandığı kavramsal bir model [11] yardımıyla tartışılacaktır.

Şekilden de görüleceği üzere; kavramsal modelde, kapasite tasarımı ilkesi yardımıyla eğilme kapasitesine bağlı üç farklı kesme talebi ( $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ ,  $V_{c3}$ ) örneklendirilmiştir. Diyagramda kesikli çizgiyle elemanın yerdeğiştirme sünekliğine ( $\mu_\Delta$ ) göre değişken varsayılan kesme kapasitesi ( $V_c+V_w$ ) gösterilmiştir. Elastik ötesi yerdeğiştirme talebi altında kesme dayanımının doğrusal azalarak, kalıcı bir dayanımda sabit varsayıldığı bu modelde: (a) akma öncesi kesme kırılmasının meydana geldiği gevrek kırılma durumu, (b) plastik yerdeğiştirme yapabilmesine karşın; elastik ötesi yerdeğiştirme kapasitesine ulaşmadan kesme kırılması durumu, (c) ise sünek eğilme kırılması durumudur. Modelin kavranması, depreme dayanıklı bina tasarım yönetmeliklerinde uygulanan *kapasite tasarımı* ilkesinin ve elastik ötesi davranışta bazı durumlarda *betonun kesme dayanımına katkısının ihmal edilmesinin*; (a) ve (b) türü gevrek kırılmaların önlenmesi, (c) türü sünek kırılma ile taşıma gücüne ulaşılması için yapılan uygulamalar olduğunu daha anlaşılır kılmaktadır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve ACI318-14'de [1 ve 6] betonarme kirişler için, sadece deprem yüklerinden oluşan kesme kuvvetinin depremleri durumdaki toplam kesme

kuvvetinin yarısından daha büyük olması; betonarme kolonlar için ise yukarıdaki şarta ek olarak aynı zamanda kolon eksenel yükünün  $0.05A_c f_{ck}$  değerinin altında olması durumunda, betonun kesme dayanımına katkısını ihmal edilmektedir. Belirgin ve yüksek süneklik talebi altındaki betonarme elemanların kesme dayanımına betonun katkısı FEMA 356 [12] yönetmeliğinde de benzer yaklaşımla belirlenmektedir.



Şekil 1 - Kesme dayanımı-süneklik etkileşim modeli (ATC-6 [11])

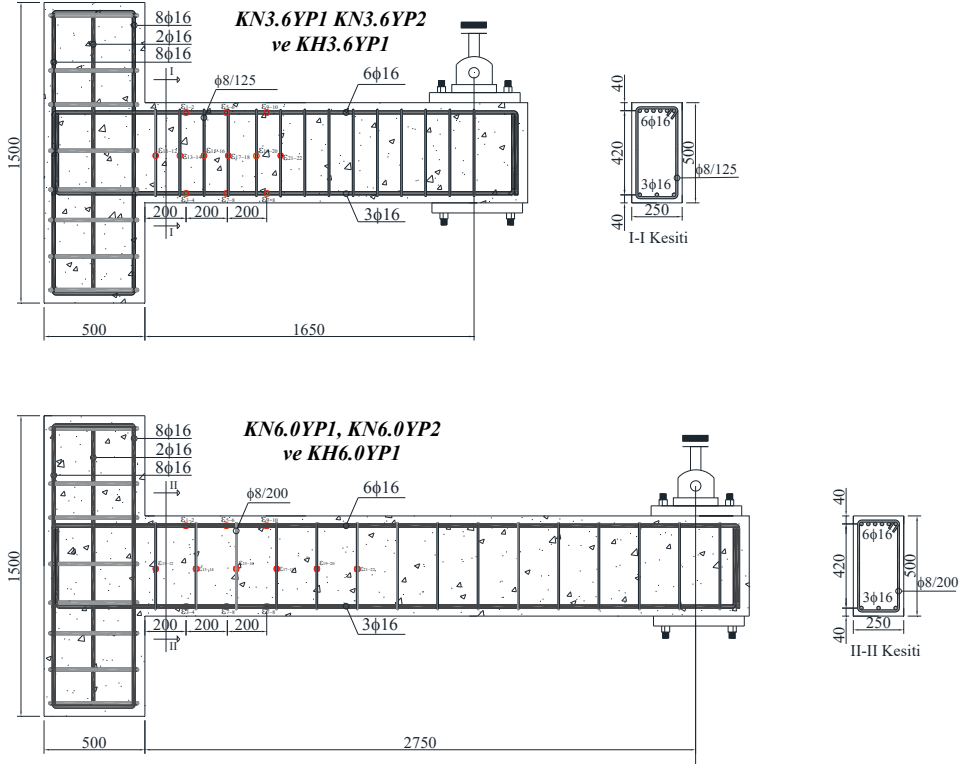
Betonarme yapı elemanların elastik ötesi yerdeğiştirme talebine bağlı olarak kesme dayanımındaki azalmanın belirlenmesine yönelik birçok model geliştirilmiştir. Moehle vd. [13] ve Sezen ve Moehle [14] betonarme kolonların kesme dayanımını yerdeğiştirme süneklik oranı talebiyle ilişkilendirmiştir. Bu ilişkide betonun ve enine donatının kesme dayanımlarına katkıları için benzer katsayılar kullanılmaktadır. Wong vd. [15], Aschheim ve Moehle [16], Priestly vd. [17] ve Pérez ve Pantazopoulou [18] tarafından geliştirilen modellerde de betonun kesme dayanımına katkısı, yerdeğiştirme süneklik oranı talebine bağlı biçimde ifade edilmektedir. Lee ve Watanabe [19] tarafından geliştirilen modelde kesme dayanımındaki azalma, betonarme kirişlerde boyuna donatı akması sonrası, uygunluk şartlarına bağlı biçimde kafes kiriş benzeşimi yardımıyla ifade edilmektedir. Elwood ve Moehle [20] yapıların şekil değiştirmeye göre tasarımı ve mevcut yapıların performans değerlendirmesinde kat öteleme oranına göre değişken bir model geliştirmiştir. Arslan [21], betonun kesme dayanımına katkısının olmadığı göçme hasar sınır durumu için enine donatının kesme dayanımına katkısının belirlenebilmesi için bir model önermiştir. Kowalsky ve Priestley [22], betonarme kolonların kesme dayanımını, kolon narınlık oranı, boyuna donatı oranı ve yerdeğiştirme süneklik oranına göre değişken olarak ifade etmişlerdir. Muttoni [23], betonun kesme dayanımına katkısını kontrol derinliğindeki boyuna birim şekildeğiştirme talebine bağlı biçimde ifade ederek, geliştirilen bağıntının sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Bu çalışmada, çevrimsel yükler altında eğilme kırılması ile taşıma gücüne ulaşan deney numunelerinde kesme dayanımına beton katkısı incelenmiştir. Bu incelemelerde kolon ve kiriş deney numunelerinde meydana gelen kesme donatısı ve beton katkılarının artan yerdeğiştirme talebine göre değişimleri diyagramlar üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca deney numunelerinde yerdeğiştirme talebine göre değişken olarak ortaya çıkan beton kesme katkısı, başta Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği olmak üzere çeşitli tahmin modellerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

## 2. DENEY PROGRAMI

### 2.1. Deney Numuneleri

İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında üretilerek test edilen kiriş deney numunelerinin geometrisi ve donatı detayları Şekil 2’de gösterilmiş, malzeme özellikleri ise Çizelge 1’de özetlenmiştir. Kolon numuneleri için benzer veriler Şekil 3 ve Çizelge 2’de verilmiştir.



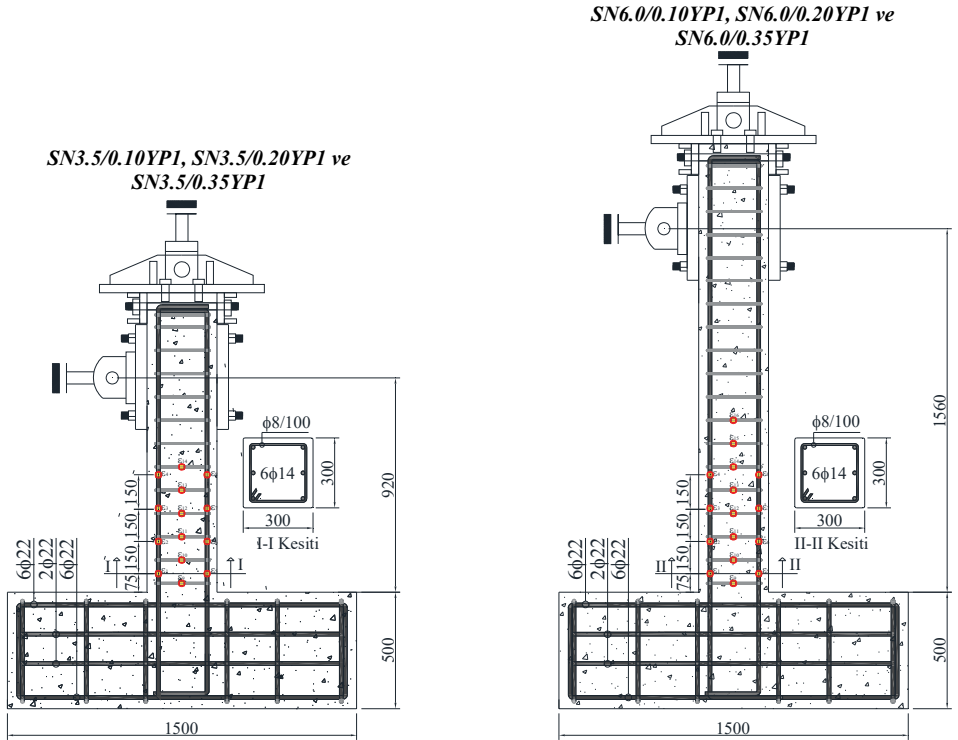
Şekil 2 - Kiriş deney numunelerinin detayları (tüm boyutlar mm) ve birim şekildeğiştirme ölçerlerin konumları



Çizelge 1 - Kiriş deney numunelerinin malzeme özellikleri

Parametre	Kiriş Deney Numuneleri	
	KN3.6YP1 KN3.6YP2 KH3.6YP1	KN6.0YP1 KN6.0YP2 KH6.0YP1
Beton basınç dayanımı <sup>(a)</sup> , $f_{co}$ (MPa)	45.6 39.7 64.4	48.6 44.5 65.4
Boyuna donatı akma dayanımı <sup>(b)</sup> , $f_y$ (MPa)	498	490
Enine donatı akma dayanımı <sup>(b)</sup> , $f_{yw}$ (MPa)	597	597

<sup>(a)</sup> 150mm/300mm boyutlarındaki silindirik beton numuneden TS EN 12390-3 standardına uygun olarak deney günü elde edilen basınç dayanımı.  
<sup>(b)</sup> Boyuna ve enine donatıdan alınan numunelerinden TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak elde edilen akma dayanımı.



Şekil 3 - Kolon deney numunelerinin detayları (tüm boyutlar mm) ve birim şekildeşirme ölçerlerin konumları

Çizelge 2 - Kolon deney numunelerinin malzeme özellikleri ve eksenel yük düzeyleri

Parametre		Kolon Deney Numuneleri	
		SN3.5/0.10YP1 SN3.5/0.20YP1 SN3.5/0.35YP1	SN6.0/0.10YP1 SN6.0/0.20YP1 SN6.0/0.35YP1
Malzeme	$f_{co}$ (MPa)	29.0 40.0 29.0	32.0 37.0 31.7
	$f_y/f_{yw}$ (MPa)	484/690	484/690
Eksenel Yükleme	Eksenel Yük, N (kN)	261.0	292.0
		725.0	666.0
		913.0	999.0
	Eksenel Yük Düzeyi ( $N/(A_c f_{co})$ )	0.10 0.20 0.35	0.10 0.20 0.35

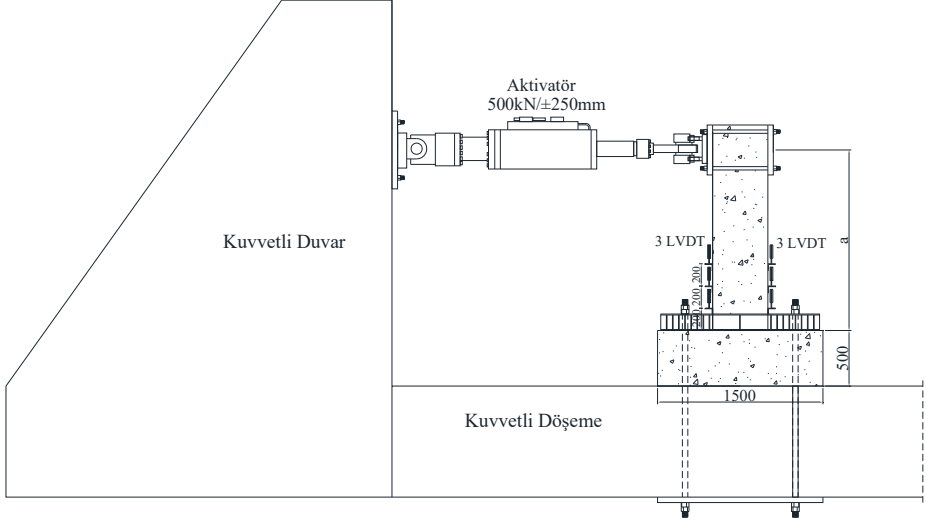
Deney programındaki kiriş numuneler, çevrimsel yükleme altında potansiyel plastik mafsallık bölgelerinde tabla betonunun çekme etkisiyle çatlamış olacağı kabulüyle, çift donatılı dikdörtgen kesit olarak tasarlanmıştır [24, 25, 26]. Ayrıca tabla betonunun çekmeye zorlanması durumunda, döşeme donatılarının eğilme kapasitesini artırıcı etkisi [27] göz önüne alınmamıştır. Kiriş deney numuneleri (K), beton basınç dayanımı (N: Normal, H: Yüksek), a/d oranı (3.6 ya da 6.0) ve yükleme geçmişi (YP1 ya da YP2); kolon numuneleri ise (S), a/d oranı (3.5 ya da 6.0) ve eksenel yük düzeyi (0.10, 0.20 ve 0.35) farklılığına göre isimlendirilmiştir.

## 2.2. Deney Düzenegi

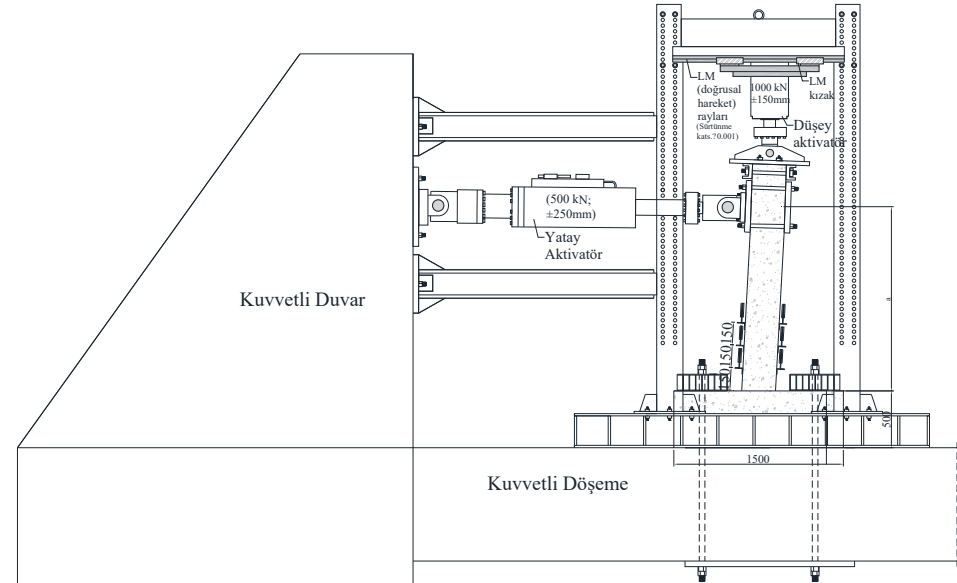
Kiriş deney düzenegi şematik olarak Şekil 4'de gösterilmiştir. Yükleme öncesi deney numunesi laboratuvar kuvvetli döşemesine sabitlenerek, mesnette dönme ve yerdeğiştirme tutulu hale getirilmiştir. Deney düzeneginde yükleme geçmişi, 500kN/±250mm kapasiteli servo-hidrolik bir aktivatör ile uygulanmaktadır. Deney düzeneginde mesnet bölgesi gerçek bir yapıda rijit bir kolon, konsol kiriş numunesine bağlanan aktivatörün yük uygulama merkezi ise kirişin moment sıfır noktası ile benzeştirilebilir.

Kolon deney düzenegi ise Şekil 5'de verilen şematik çizimden görülebilir. Kolon numuneleri deney öncesi laboratuvar kuvvetli döşemesine sabitlenerek, mesnet bölgesinde dönme ve yerdeğiştirme tutulu hale getirilmiştir. Konsol kolon numunesinin mesnedi gerçek bir yapıda rijit bir temel, yükleme geçmişinin uygulama noktası ise gerçek bir yapıda moment sıfır noktası ile benzeştirilebilir. Kolon numunelere uygulanan yatay yük yerdeğiştirme kontrolünde, eksenel yük ise kuvvet kontrolünde uygulanmıştır. Eksenel yük verici pistonun numune ile bağı mafsallı, çerçeveye ise kayıcı ankastredir. Bu bağ yapısı konsol ucundaki yatay yerdeğiştirme, düşey yerdeğiştirme ve dönmenin serbest, eksenel

yük verici pistonun doğrultusunun ise sabit kalmasını sağlamaktadır [28]. Bu bağlantının daha iyi anlaşılabilmesi için şematik deney düzeneği gösteriminde konsol ucundan yer değiştirmiş bir kolon numunesi üzerinde yapılmıştır.



Şekil 4 - Kiriş deney numunelerine uygulanan deney düzeneği



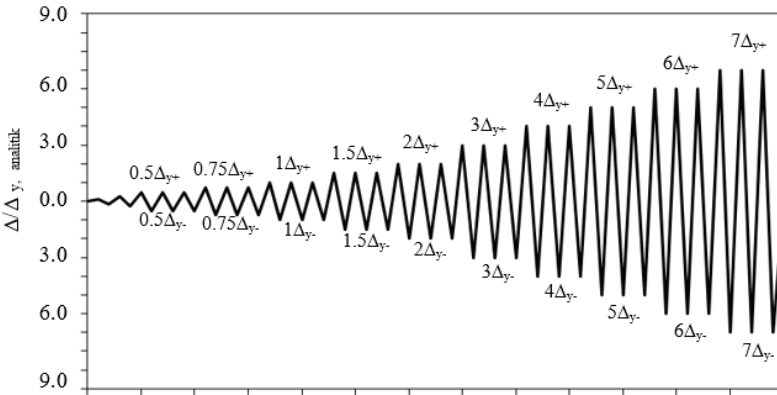
Şekil 5 - Kolon deney numunelerine uygulanan deney düzeneğinin yer değiştirmiş bir kolon numunesi üzerinde şematik gösterimi

Deney düzeneğinde boyuna ve enine donatılardaki birim şekil değiştirmeler, potansiyel plastik mafsalsal bölgesinde 3 farklı düzlemde boyuna birim şekil değiştirme dağılımlarının belirlenebilmesi için birim şekil değiştirme (Şekil 2 ve Şekil 3) ve yer değiştirme ölçerler (Şekil 4 ve Şekil 5) kullanılmıştır. Deney verilerinin toplanmasında 30 kanallı bir veri toplayıcıdan yararlanılmıştır.

### 2.3. Yükleme Geçmişleri

Çalışmada YP1, numune mesnet bölgelerinde yön değiştiren plastik mafsalsal davranışı meydana getiren yükleme geçmişi, YP2 ise numune mesnet bölgelerinde yön değiştirmeyen plastik mafsalsal davranışı meydana getiren yükleme geçmişi için kullanılan isimlendirmedir.

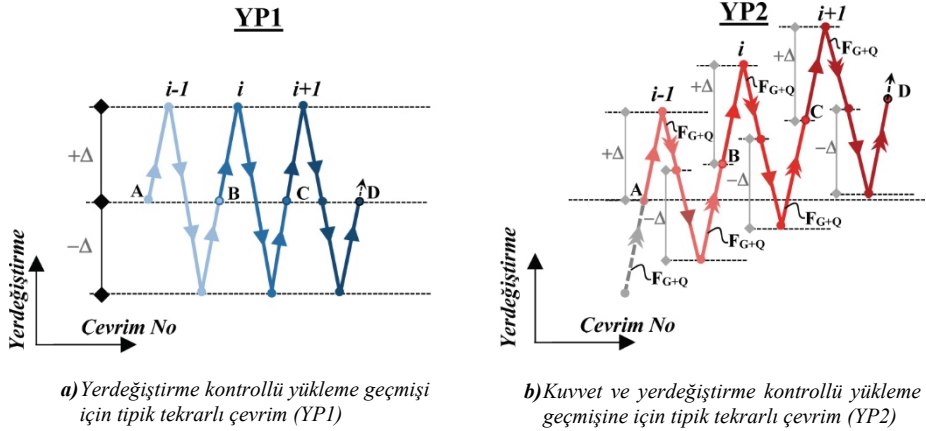
Şekil 6'da yer değiştirme kontrolünde numunelere uygulanan YP1 isimli yükleme geçmişi gösterilmiştir. YP1 yükleme geçmişinde hedef yer değiştirme, numunelerin analitik akma yer değiştirmelerine oranları ile tanımlanmaktadır. Bu oranların 0.5 ve üzerindeki değerleri için hedef yer değiştirme 3 tekrarlı olarak uygulanmıştır. Kiriş deney numunelerinde simetrik olmayan donatı düzeni nedeniyle, kiriş numuneleri için YP1 yükleme geçmişinin belirli bir çevrimdeki pozitif ve negatif hedef yer değiştirmeler birbirinden farklı olabilmektedir.



Şekil 6 - YP1 yükleme geçmişi [24, 25]

Şekil 7.b'de, Düşey yüklerin tek yönlü eğilme etkisinin (kuvvet kontrolüyle) ve depremin tersinir etkisinin (yer değiştirme kontrolüyle) birlikte uygulandığı YP2 yükleme geçmişinin tipik tekrarlı çevrimi şematik olarak gösterilmiştir. Yer değiştirme kontrolü aşamasında özdeş hedef yer değiştirme uygulanan YP1 ve YP2 yüklemeleri, aralarındaki farklılığın daha belirgin gösterilmesi adına yan yana gösterilmiştir (Şekil 7.a ve 7.b). YP2 yüklemesine- kuvvet kontrolünde- işletme yükünün ( $F_{G+Q}$ ) uygulanmasıyla başlanır. YP2 çevrimsel yüklemesinin bir çevrimi için izlenen adımlar [29] şu şekilde özetlenebilir. Kuvvet kontrollü işletme yükü sabit tutulurken ilave olarak yer değiştirme kontrolünde pozitif bir hedef yer değiştirme uygulanır. İlave yer değiştirme hedef yer değiştirmeye ulaşıldığında, düşey işletme yükünün yön değiştirmesi kuvvet kontrollünde uygulanmaktadır. Bu adım

başta verilen işletme yükünün boşaltılması olarak da ifade edilebilir ama numune üzerinde hala ilave bir pozitif yer değiştirme vardır. Kuvvet kontrollü adım sonrası ilave olarak, yerdeğiştirme kontrolünde negatif bir hedef yerdeğiştirme uygulanır. İlave yerdeğiştirme hedef yerdeğiştirmeye ulaştığında, düşey işletme yükü kuvvet kontrolünde YP2'nin tipik bir çevrimi tamamlanır. Şekil 7.b'de tipik tekrarlı çevrimde düşey işletme yükünün yüklenip boşaltıldığı tekrarlı yükleme çevrimleri, elastik ötesi aşamada numune rijitliğinin bir önceki adıma göre azalacağı ve dolayısıyla numunenin yerdeğiştirme cevabının artacağı varsayılarak, şematik olarak çizilmiştir. YP2 yüklemesinde düşey işletme yükün uygulama değeri, kesiti akma limit duruma getiren yükün yarısı olarak dikkate alınmıştır [29].



Şekil 7 - Yükleme geçmişlerinin tipik bir çevrimleri (a) YP1, Yerdeğiştirme kontrollü yükleme (standart çevrimsel yükleme) (b) YP2, Kuvvet ve yerdeğiştirme kontrolünün birlikte uygulandığı yükleme (Belirgin düşey yük hali için çevrimsel yükleme izlencesi [29])

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMALAR

#### 3.1. Kırılma Biçimleri

Numunelere uygulanan deneysel eğilme momenti ve kesme kuvvetinin, numunelerin analitik eğilme momenti ve kesme kuvveti taşıma güçleriyle karşılaştırılması ve kırılma biçimleri Çizelge 3'de özetlenmiştir. Çizelgede verilen analitik taşıma güçleri, deneysel malzeme dayanımları kullanılarak, TS500-2000'e göre hesaplanan karakteristik taşıma güçleridir ( $\gamma_c=1$  ve  $\gamma_s=1$ ).

Deney numunelerinin tamamında başlangıç hasarı, numune eksenine dik konumda gelişen eğilme çatlaklarıdır. Yerdeğiştirme genliği talebinin artan değerleri için eğilme çatlaklarının aralıkları azalmaktadır. YP1 yükleme geçmişinin uygulandığı numunelerde yön değiştiren plastik davranış nedeniyle bu çatlaklar numunelerin her iki yüzünde de meydana gelmekte ve çatlak oluşumuyla numunenin her iki eğilme doğrultusunda da eğilme rijitliğinde belirgin bir azalma görülmektedir. Deney numunelerinin eğilme rijitliğinde belirgin bir değişime neden olan bir diğer hasar göstergesi de çekme bölgesindeki boyuna donatının akmasıdır. Deney sırasında bu durum donatılara yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerlerle saptanmıştır. Çekme donatısı akma durumu, YP1 yükleme profilinin uygulandığı

numunelerin tamamında her iki yüzde (yön değiştiren plastik mafsal davranışı), YP2 yükleme profilinin uygulanan numunelerde ise sadece bir yüzdeki (yön değiştirmeyen plastik mafsal davranışı) boyuna donatılarda meydana gelmiştir. Deney numunelerinin tamamında betonda ilk ezilme başlangıcı (örtü betonda ezilme başlangıcı), boyuna donatıda akma meydana geldikten sonra gerçekleşmiştir. Bu bağlamda çizelge 3'de verilen ve kapasite karşılaştırması ile belirlenen kırılma biçimleri ile deneysel gözlemler uyumlu biçimde gerçekleştiği söylenebilir. SN6.0/0.35YP1 kolonu dışındaki tüm numuneler için boyuna donatı akması sonrası eğik çatlak oluşumu gözlenmiştir. Eğik çatlak oluşumunun gözlemlendiği yerdeğiştirme talebi numuneden numuneye değişkenlik göstermektedir. Deney numunelerinin tamamında elastik ötesi davranış bölgesinde yük taşıma gücünde belirgin azalma basınç bölgesindeki boyuna donatıların burkulmasıyla ortaya çıkmaktadır. YP1 yükleme profilinin uygulandığı kiriş numunelerinde basınç donatısı burkulması sonrası kiriş alt yüzüne karşı gelen bu bölgenin çekmeye zorlanması durumunda boyuna donatılarda kopma da gözlenmiştir. Ayrıca SN6.0/0.35YP1 kolonunda basınç donatısı burkulmasının meydana geldiği yerdeğiştirmenin tekrarlı uygulaması sırasında, numunenin aksel yük taşıma kapasitesinde belirgin azalma meydana geldiğinden, yüklemeye son verilmiştir.

Çizelge 3 - Deney numunelerinin eğilme ve kesme kapasitelerinin karşılaştırılması

Deney Numunesi	Seri			$M_{maks}^a/M_n^b$	$V_{maks}^c/V_n^d$	Kırılma biçimi <sup>e</sup>
	TYPM <sup>1</sup>	EYDB05 <sup>2</sup>	YDAKU <sup>3</sup>			
SN3.5/0.10YP1	x	√	√	1.39	0.45	E/Ç
SN3.5/0.20YP1	x	√	√	1.13	0.20	E/Ç
SN3.5/0.35YP1	x	√	√	1.10	0.46	E/Ç
SN6.0/0.10YP1	x	√	√	1.08	0.23	E/Ç
SN6.0/0.20YP1	x	√	√	1.36	0.56	E/Ç
SN6.0/0.35YP1	x	√	√	1.14	0.25	E/Ç
KN3.6YP1	x	-	√	1.02/1.05	0.72/0.38	E/Ç
KH3.6YP1	x	-	√	1.03/1.04	0.75/0.38	E/Ç
KN3.6YP2	√	-	√	1.11	0.49	E/Ç
KN6.0YP1	x	-	x	1.01/1.04	0.69/0.37	E/Ç
KH6.0YP1	x	-	x	1.01/1.03	0.70/0.37	E/Ç
KN6.0YP2	√	-	x	1.04	0.35	E/Ç

<sup>1</sup> Tersinir tekrarlı yüklemeye plastik mafsal bölgesinde tek yönlü plastik mafsal (TYPM) davranışı.

<sup>2</sup> Aksel yükü elemanlarda, aksel yük düzeyinin ( $N/(A_f \cdot \sigma_c)$ ) 0.05'den büyük olması durumu (EYDB05).

<sup>3</sup> 2007 Tarihli Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikte [2] tanımlanan enine donatı aralık koşullarına uyum (YDAKU).

<sup>a</sup> Deneysel yüklemeye ölçülen eğilme momentinin en büyük değeri ( $M_{maks}=Maks(VL+NA)$ ).

<sup>b</sup> Deneysel malzeme dayanımlarına göre hesaplanan karakteristik moment kapasitesi ( $M_n$ ) [1, 2, 7].

<sup>c</sup> Deneysel yüklemeye ölçülen kesme kuvvetinin en büyük değeri ( $V_{maks}=Maks(V)$ ).

<sup>d</sup> Deneysel malzeme dayanımlarına göre hesaplanan karakteristik kesme kuvveti taşıma gücü ( $V_c=0 \Rightarrow V_n=V_w$ ;  $V_c>0 \Rightarrow V_n=V_c+V_w$ ) [1, 2, 7].

<sup>e</sup> E: Eğilme, Ç: çekme.

### 3.2. Eğik Çatlama Dayanımı, $V_{cr}$

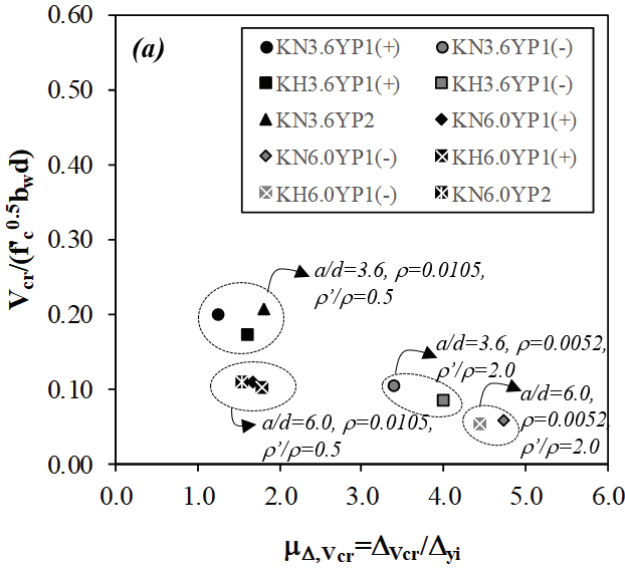
Deney numunelerinin eğik çatlama dayanımları ( $V_{cr}$ ) ile eğik çatlak oluşumunun gözlemlendiği yerdeğiştirme süneklik oranları ( $\mu_{\Delta, V_{cr}}$ ) Çizelge 4'de özetlenmiştir. Deney sırasında numunelerdeki eğik çatlak oluşumu, yerdeğiştirme yüklemeye geçmişinin hedef maksimum değerine erişildiği her bir yüklemeye adımında yapılan görsel inceleme ile tespit edilmiştir.

Çizelge 4 - Deney numunelerinin eğik çatlama dayanımları

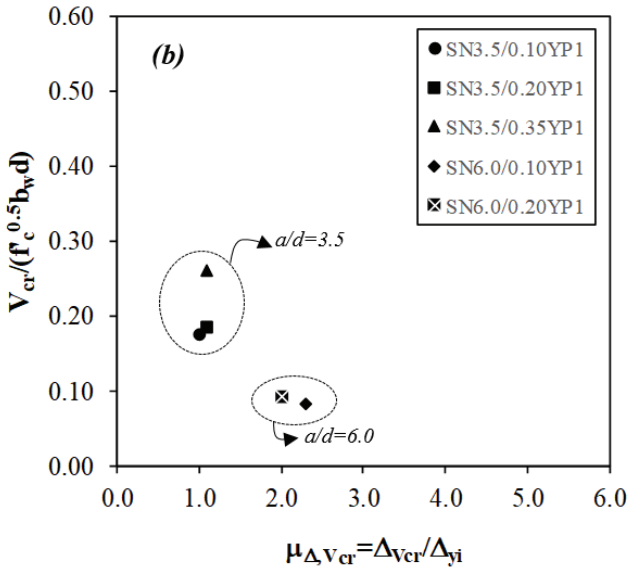
Deney Numunesi	Seri			$V_{cr}^a$	$\mu_{\Delta, V_{cr}}^b$
	TYPM <sup>1</sup>	EYDB05 <sup>2</sup>	YDAKU <sup>3</sup>		
SN3.5/0.10YP1	x	√	√	108.0	1.0
SN3.5/0.20YP1	x	√	√	135.1	1.1
SN3.5/0.35YP1	x	√	√	161.2	1.1
SN6.0/0.10YP1	x	√	√	53.5	2.3
SN6.0/0.20YP1	x	√	√	65.6	2.0
SN6.0/0.35YP1	x	√	√	---	---
KN3.6YP1	x	-	√	155.8/-82	1.26/3.4
KH3.6YP1	x	-	√	159.4/-78.5	1.61/4.0
KN3.6YP2	√	-	√	149.7	2.17
KN6.0YP1	x	-	x	87/---	1.67/---
KH6.0YP1	x	-	x	94.9/-50.0	1.78/4.44
KN6.0YP2	√	-	x	83.47	1.64

<sup>1</sup> Tersinir tekrarlı yüklemeye plastik mafsallık bölgesinde tek yönlü plastik mafsallık (TYPM) davranışı.  
<sup>2</sup> Eksenel yüklü elemanlarda, eksenel yük düzeyinin ( $N/(A_f \cdot f_{ck})$ ) 0.05'ten büyük olması durumu (EYDB05).  
<sup>3</sup> 2007 Tarihli Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikte [2] tanımlanan enine donatı aralık koşullarına uyum (YDAKU).  
<sup>a</sup> Eğik çatlak gözlemindeki deneysel kesme yükü ( $V_{cr}$ ).  
<sup>b</sup> Eğik çatlak gözlemindeki yerdeğiştirmenin akma yerdeğiştirmesine oranı ( $\mu_{\Delta, V_{cr}} = \Delta_{V_{cr}} / \Delta_y$ ).

Eğik çatlama dayanımının eğik çatlak gözlenen süneklik oranı talebiyle değişimleri kiriş numuneleri için Şekil 8'de, kolon numuneleri için ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere; a/d oranının artması, -bilindiği gibi- eğik çatlama dayanımında azalma meydana getirmesinin yanında, eğik çatlak oluşumu gözlenen yerdeğiştirme süneklik oranını da arttırmaktadır. Bu artış kiriş numunelerinde boyuna donatı oranının azalması ve basınç donatısı oranının artmasıyla, kolon numunelerinde ise eksenel yük seviyesinin azalmasıyla belirginleşmektedir. Bir başka ifadeyle, kesme açıklığının artması ve/veya eğilme davranışında tarafsız eksen derinliğini azalmasıyla; eğik çatlak oluşumunun gözlemlendiği yerdeğiştirme süneklik oranı arttığı, numunenin kesme dayanımının ise azaldığı söylenebilir.



Şekil 8 - Kiriş numunelerinde eğik çatlama dayanımının eğik çatlak oluşumunun gözleendiği yerdeğiştirme süneklik oranıyla etkileşimi

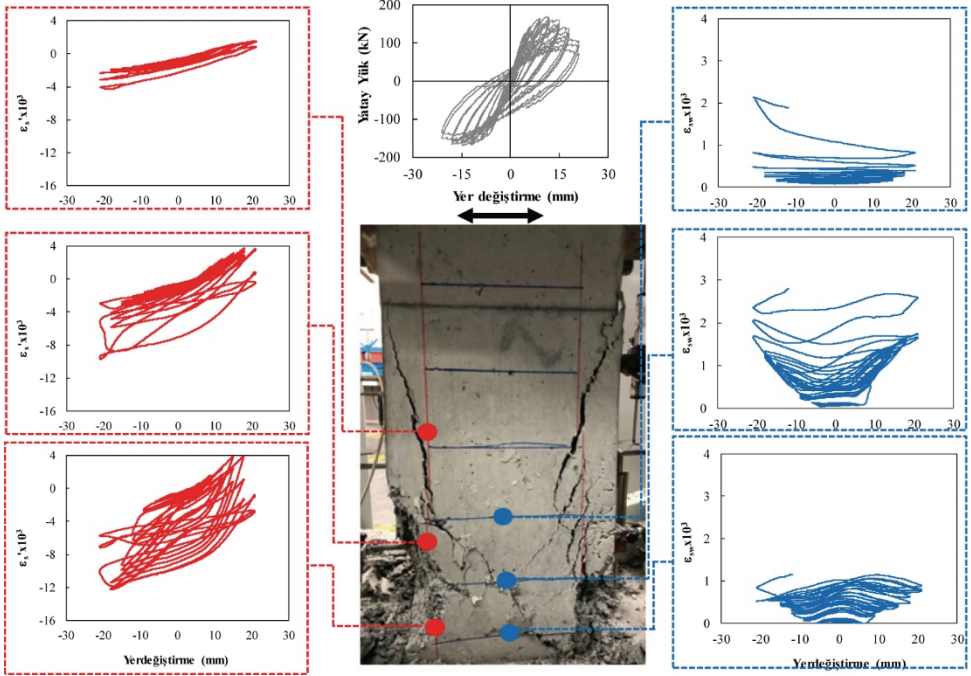


Şekil 9 - Kolon numunelerinde eğik çatlama dayanımının eğik çatlak oluşumunun gözleendiği yerdeğiştirme süneklik oranıyla etkileşimi





talebinin belirsizliği, çalışmada betonun ve donatının kesme dayanımına katkılarının belirlendiği yaklaşımın sonuçları üzerinde bir belirsizlik doğuracağı açıktır. Sözü edilen belirsizliğin sonuçlar üzerindeki etkileri yorumlayabilmek amacıyla, Şekil 11'de bir kolon numunesi için farklı düzeylerde ölçülen enine ve boyuna şekildeğiştirme talepleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, boyuna donatıda ölçülen birim şekildeğiştirme talepleri temel yüzüne mesafe arttıkça azalma eğilimindedir. Eğilme momentindeki değişim göz önüne alındığında, bu değişim beklenen bir eğilimdir. Basınç bölgesinde boyuna donatı eksenine ile en dış sargılı beton lifi oldukça yakın olduğundan, sargılı beton birim kısaltmalarında da benzer bir eğilim olduğu söylenebilir. Dolayısıyla temel seviyesine yakın enine donatılarda kesme kuvveti talebine bağlı enine birim şekildeğiştirme talebinin, eğik çatlaklı kesme ve üst konumda yer alan diğer enine donatılara kıyasla daha yüksek olması beklenebilir (sargı etkisinin ilave talebiyle). Konsol deney düzeninde kesme etkisi eleman boyunca sabit olmasına karşın, kesme davranışı bakımından zorlama belirli bir kesitte beton ve enine donatı ile birlikte taşınmıştır. Kesme açısından kritik kesit olarak anılan bu kesit temel yüzüne yaklaşık  $d/2$  mesafededir. Bu kesit ile temel arasındaki bölgede temele aktarılan kesme kuvveti ise doğrudan bir basınç çubuğu ile temele iletilmekte ve enine donatısı katkısına ihtiyaç duyulmamaktadır. Şekil üzerinde çeşitli seviyelerdeki enine donatı birim şekildeğiştirme talepleri, yukarıda eğilme ve kesme davranışına yönelik bilgilerle incelendiğinde; sargı davranışının ölçüm yöntemi sonuçlarına etkisinin ileri hasar bölgesinde ve genelde temel seviyesine yakın bölgelerdeki ölçümler için söz konusu olduğu söylenebilir.



Şekil 11 - SN3.5/0.35YP1 deney numunesinde deneysel yük-yerdeğiştirme geçmişi ve çeşitli düzeylerdeki boyuna ve enine donatıların birim şekildeğiştirme geçmişleri

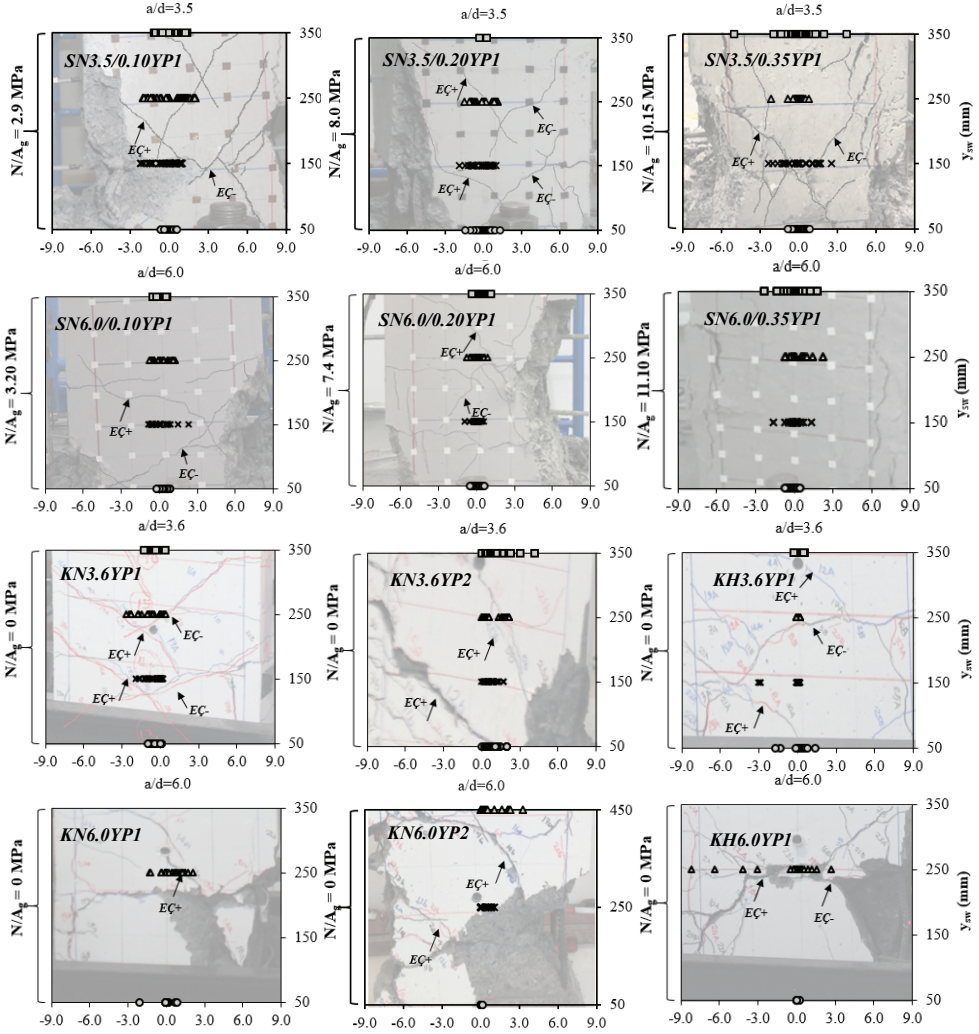
- Bilindiği üzere boyuna donatı burkulması ileri bir hasar göstergesidir. Gerçekleşmesi durumunda enine donatıda belirgin bir ilave birim şekildeğiştirme talebi meydana getirir. Sözü edilen ilave talep Şekil 11’de verilen karşılaştırmalardan da görülebilir. Şekilde boyuna donatıda burkulma meydana gelmesiyle, yük-yerdeğiştirme ilişkilerindeki tekrarlı çevrimsel yükleme adımları arası belirgin bir düşüş, enine donatı birim şekildeğiştirme talebinde hızlı bir artış meydana gelmektedir. Kesme talebinden bağımsız olarak gerçekleşen böyle durumlar için, çalışmada enine donatı şekildeğiştirme talebiyle betonun ve donatının kesme dayanımına katkılarının belirlendiği ölçüm yöntemi kullanılması uygun olmayacağı söylenebilir. Bu nedenle çalışmada belirgin burkulma davranışı gözlemlendiği nokta sonrası beton katkısı belirlenmemiştir.

Şekil 12’de numunelerin deney sonu hasar durum fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar üzerindeki eğik çatlaklar yöne göre  $EÇ_+$  ve  $EÇ_-$  olarak isimlendirilerek gösterilmiştir. Ayrıca fotoğraflar üzerinde numunelere uygulanan aksel basınç gerilmesi ve çeşitli seviyedeki enine donatılarda meydana gelen birim şekil değiştirmeler de gösterilerek, ilave bilgi verilmeye çalışılmıştır. Enine donatı birim şekildeğiştirme değerleri ( $\epsilon_{sw}$ ) çevrimsel yükleme geçmişinde her bir yükleme adımındaki hedef maksimum yerdeğiştirme adımında ölçülen değerler olup, ölçümlerinin tamamı aynı işaretlidir. Şekil 12’de ise yatay yükün işaret değiştirdiğinin gösterilmesi adına ters işaretli olarak gösterilmiştir.

Şekil 13’de kiriş numuneleri için kesme dayanımına beton ve kesme donatısı katkılarının yerdeğiştirme talebine göre değişimleri yük-yerdeğiştirme diyagramları üzerinde gösterilmiştir. Kolon numuneleri için ise benzer ilişkiler Şekil 14’den görülebilir. Bu ilişkilerde kesme donatısı katkısı, eğik çatlak kesen enine donatı iç kuvvetlerin bileşkesi olup, enine donatı iç kuvvetleri deney sırasında meydana gelen birim şekildeğiştirme ölçümleri yardımıyla saptanmıştır. Diyagram üzerinde beton katkısına yönelik gösterilen deneysel sonuçlar, eğik çatlak gözlemi yapılan yerdeğiştirme talebinden itibaren gösterilmeye başlanmıştır. Eğik çatlak gözlenmeyen numunelerde ise beton katkısı belirlenememiş/gösterilmemiştir.

Şekil 13’de YP1 yükleme geçmişinin uygulandığı deney numunelerinde her iki eğilme yönünde de plastik mafsallık (yön değiştiren plastik mafsallık davranışı), YP2 yükleme geçmişinin uygulandığı numunelerde ise sadece bir eğilme yönünde de plastik mafsallık (yön değiştirmeyen plastik mafsallık davranışı) oluşmuştur. İsimlendirmede “KN” kullanılan numuneler normal, “KH” kullanılanlar ise yüksek mukavemetli beton ile imal edilmiştir. Şekil üzerinde sol tarafta yer alan diyagramlar a/d oranı 3.6, sağ taraftakiler ise a/d oranı 6.0 olan numuneler içindir. Deney kirişlerinin tamamında kesme donatısı katkısında artış eğilimi boyuna donatı akmasıyla belirginleşmektedir. Beton katkısındaki azalma eğiliminin ise örtü betonda ezilme gözlemi ile belirginleşmeye başladığı söylenebilir. Ayrıca YP1 yükleme geçmişinin uygulandığı kiriş numunelerinde beton katkısının ileri hasar bölgelerinde belirgin bir biçimde azaldığı söylenebilir. Bu kirişlerde beton katkısının neredeyse sıfırlandığı öteleme oranı, YP2 yükleme geçmişinin uygulandığı kiriş numuneleri için de bir sınır olarak alındığında, bu kirişlerdeki beton katkısındaki azalmanın daha az olduğu söylenebilir (yön değiştirmeyen plastik mafsallık davranışı). Bilindiği gibi Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, sadece deprem yüklerinden oluşan kesme kuvvetinin depremlilik durumdaki toplam kesme kuvvetinin yarısından daha büyük olması durumunda, betonarme kirişlerde beton katkısı ihmal edilmektedir. Bu yaklaşım Şekil 13’de verilen beton

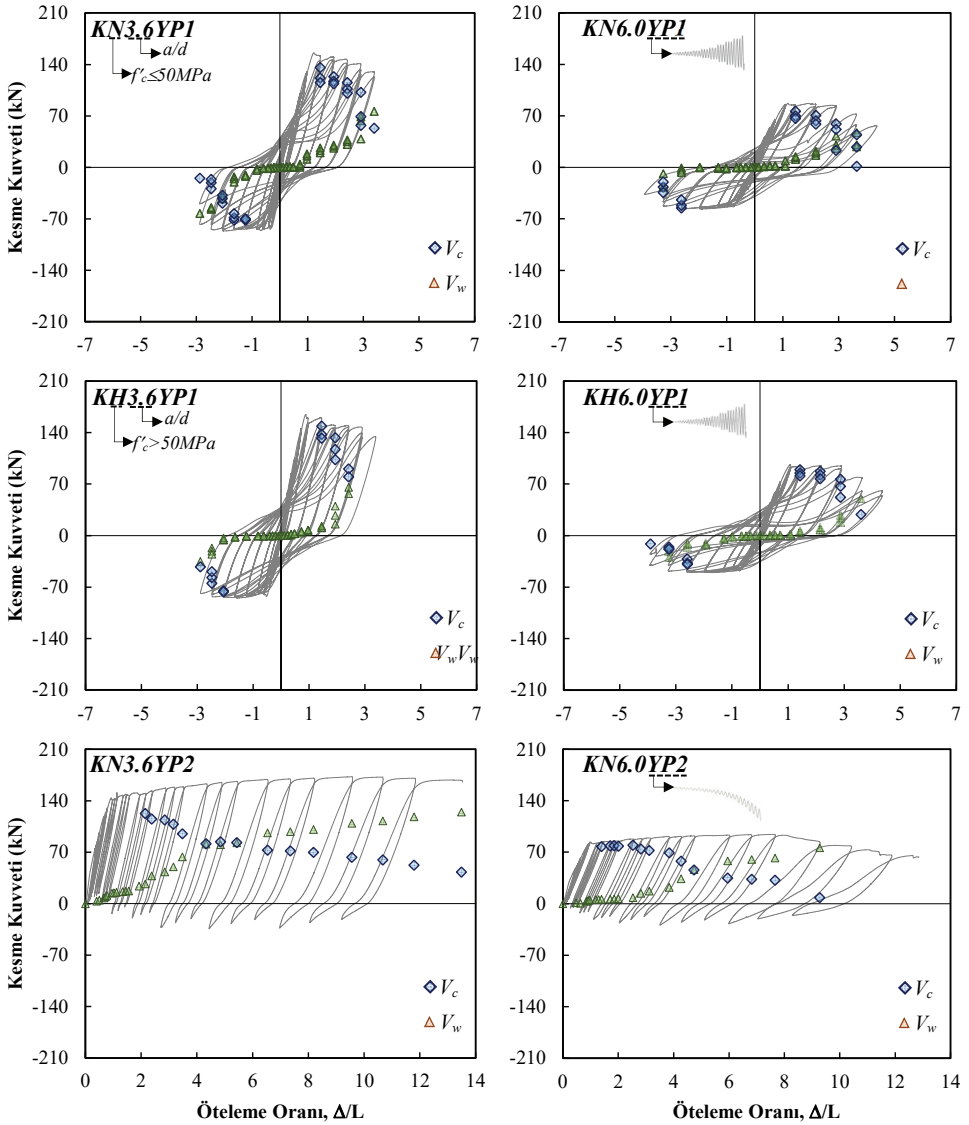
katkılarıyla karşılaştırıldığında, Yönetmelik önerisinin YP1 yükleme geçmişinin uygulandığı kiriş numuneleri ve ileri hasar bölgeleri için yerinde bir yaklaşım olduğu, YP2 profilinin yüklendiği numuneler için daha ihtiyatlı kalabileceği söylenebilir.



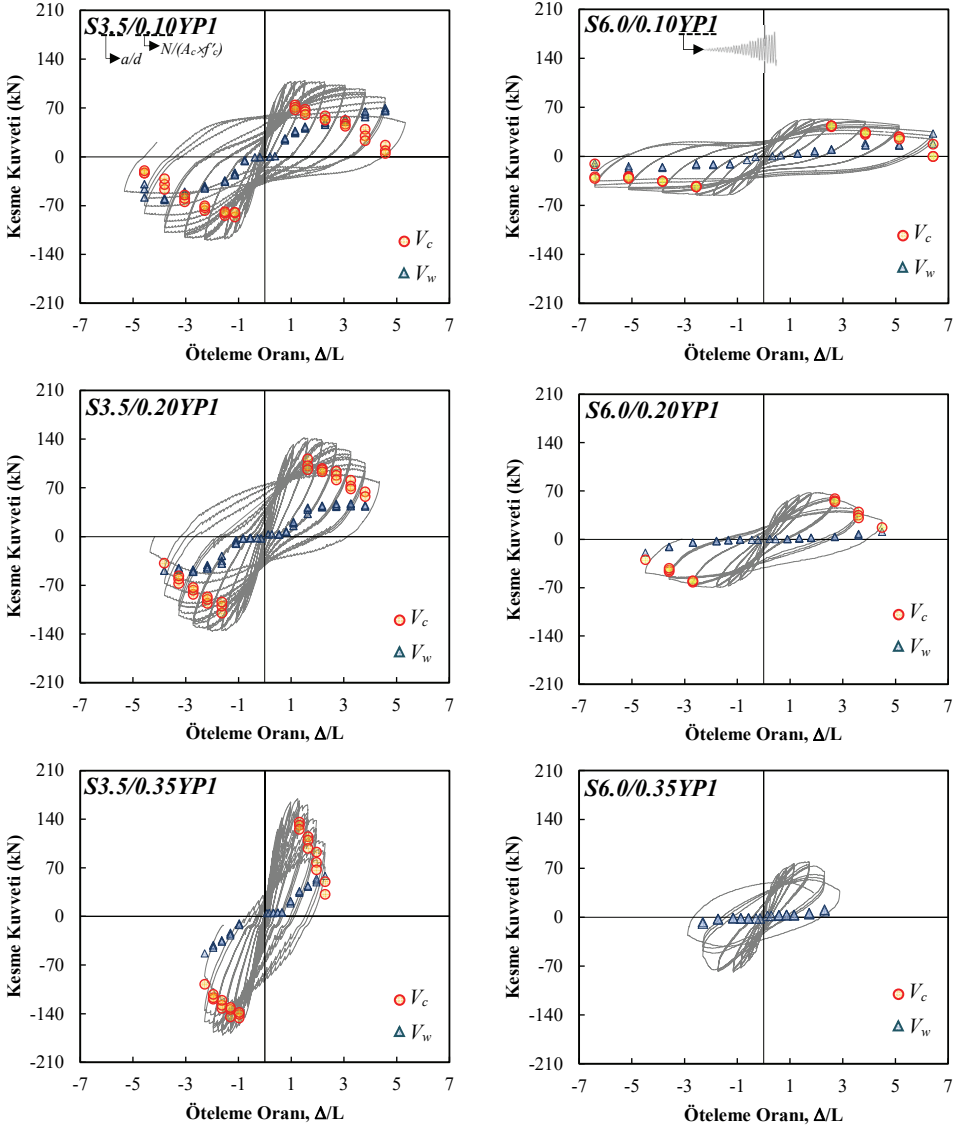
Şekil 12 - Kolon ve kiriş numunelerinin deney sonu hasar durumları

Şekil 14’de solda verilen diyagramlar a/d oranı 3.5, sağdakiler ise a/d oranı 6.0 olan kolonlar içindir. Eğik çatlak gözlenmeyen S6.0/0.35YP1 kolonunda beton katkısı gösterilmemiştir. Diğer kolonlarda eğik çatlak oluşmuş olup, kolon numunelerin tamamında kesme donatısı katkısında artış eğilimi boyuna donatı akmasıyla belirginleşmektedir. Bir başka ifadeyle plastik yer değiştirme talebiyle birlikte beton katkısında bir azalma eğilimi söz konusudur. Bilindiği üzere Türkiye Bina Deprem

Yönetmeliği'nde kolonlarda betonun kesme dayanımına katkısını kirişler için tanımlanan şarta ek aynı zamanda kolon eksenel yükünün  $0.05A_c f_{ck}$  değerinin altında olması durumunda ihmal edilmektedir. Karşılaştırmadaki kolonlarda eksenel yük belirtilen sınırın üzerindedir. Dolayısıyla Yönetmeliğin önerisi beton katkısının TS500-2000'de verilen bağıntı ile belirlenmesidir. Bu yaklaşımın özellikle plastik yerdeğiştirme talebi ve/veya  $a/d$  oranı artıkça beton katkısında görülen azalmayı yansıtamayacağı bir başka ifadeyle güvensiz kalabileceği söylenebilir.



Şekil 13 - Kiriş numunelerinde beton ( $V_c$ ) ve enine donatının ( $V_w$ ) kesme dayanımına katkılarının yerdeğiştirme talebine göre değişimleri



Şekil 14 - Kolon numunelerinde beton ( $V_c$ ) ve enine donatının ( $V_w$ ) kesme dayanımına katkılarının yerdeğiştirme talebine göre değişimleri

### 3.4. Kesme Dayanımına Beton Katkısı Bağlılarının Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde kesme dayanımına beton katkısı belirlenmesinde kullanılan çeşitli yaklaşımların sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Karşılaştırmalarda kullanılan bağıntılar Çizelge 5’de verilmiştir. Tahmin modellerin deneysel sonuçlar ile

karşılaştırılmaları Şekil 15’de, istatistiksel olarak karşılaştırmaları ise Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 5 - Karşılaştırmada kullanılan kesme dayanımına beton katkısı modelleri

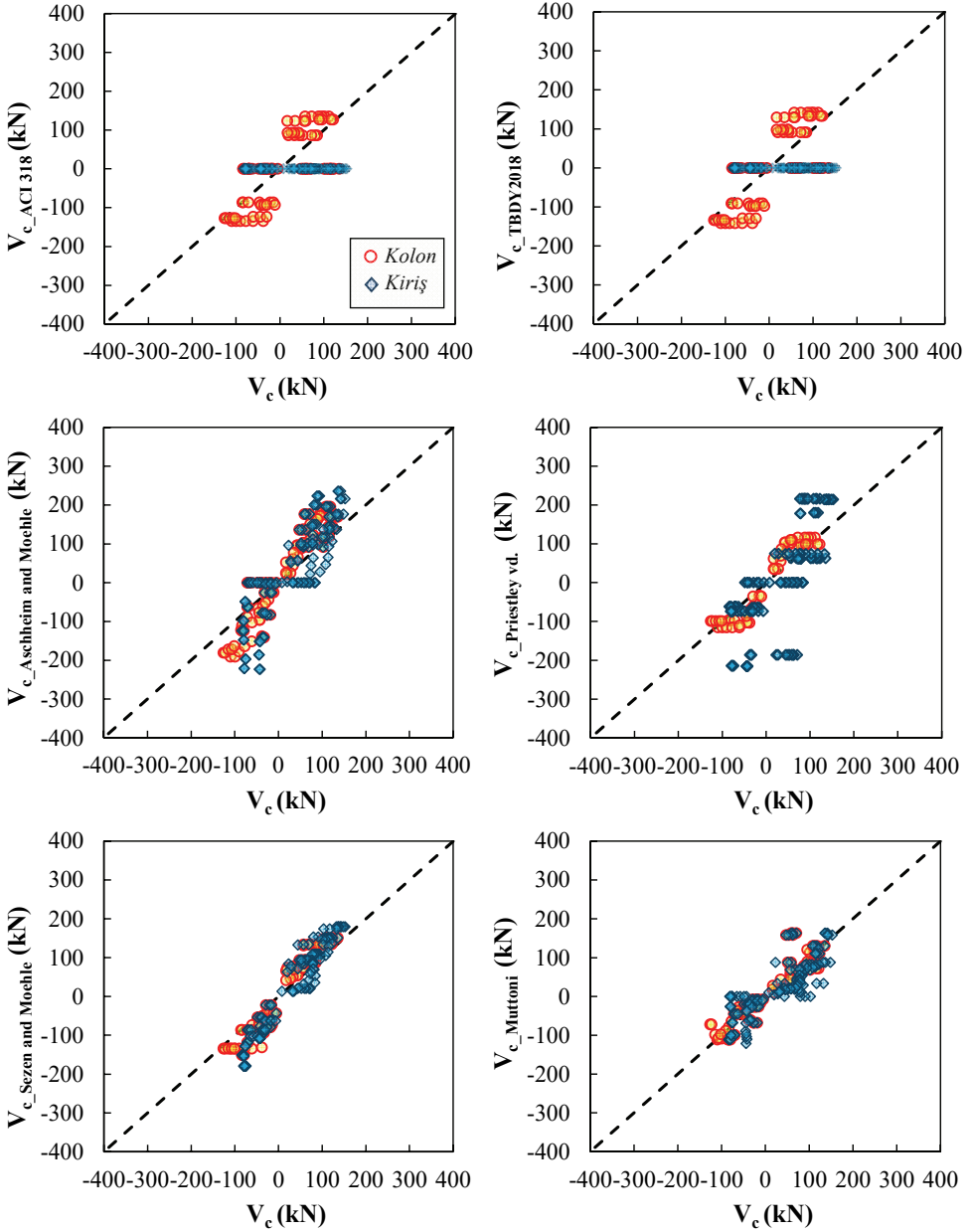
Model [Referans]	Bağıntı	Bağıntı No	Açıklama
ACI 318 [6]	$V_c = 0.17\sqrt{f_{co}} \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) b_w d$	(1)	Kirişler için, sadece deprem yüklerinden oluşan kesme kuvvetinin toplam kesme kuvvetinin yarısından daha büyük olması; kolonlar için ise ek olarak eksenel yükün $0.05A_c f_{ck}$ değerinin altında olması durumunda, $V_c=0$ alınmaktadır.
TBDY2018 [1]	$V_c = 0.18\sqrt{f_{co}} \left(1 + 0.07 \frac{N_u}{A_g}\right) b_w d$	(2)	
Aschheim ve Moehle [16]	$V_c = 0.3\sqrt{f_{co}} \left(k_\mu + \frac{N_u}{13.8A_g}\right) b_w d$	(3)	$\mu_\Delta = \Delta/\Delta_y$ olmak üzere; $k_\mu = (4 - \mu_\Delta)/3$
Priestley vd. [17]	$V_c = k_\mu \sqrt{f_{co}} b_w d$	(4)	$\mu_\Delta = \Delta/\Delta_y$ olmak üzere; $k_\mu = 0.29 (\mu_\Delta \leq 2)$ $k_\mu = 0.10 (\mu_\Delta \geq 4)$
Sezen ve Moehle, [14]	$V_c = k_\mu \left(\frac{0.5\sqrt{f_{co}}}{a/d}\right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.5\sqrt{f'_c} A_g}} b_w d$	(5)	$\mu_\Delta = \Delta/\Delta_y$ olmak üzere; ( $0.7 \leq k_\mu = 1.15 - 0.075\mu_\Delta \leq 1.0$ )
Muttoni [23]	$V_c = \frac{1/3}{1 + \frac{120 \times \varepsilon_{0.6d} \times d}{16 + d_g}} \sqrt{f_{co}} b_w d$	(6)	$\varepsilon_{0.6d}$ : Kesme açısından kritik kesitte en dış basınç yüzüne 0.6d derinlikteki boyuna birim şekildeğiştirme ve $d_g$ : Beton agregasının en büyük tane boyutu

Şekil 15’de Çizelge 5’de detayları özetlenen model sonuçları ile deneysel olarak meydana gelen sonuçlar diyagramlar üzerinde karşılaştırılmıştır. Diyagramlarda düşey eksen model tahminini yatay eksen deneysel beton katkısını göstermektedir. Diyagramlarda kiriş ve kolon numunelerine ait sonuçlar farklı işaretçiler kullanılarak topluca gösterilmiştir. Karşılaştırmalardan da görüleceği üzere Çizelge 5’de verilen son iki modelin sonuçlarının deneysel sonuçlara yakın olduğu söylenebilir.

Karşılaştırılan model sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi Çizelge 6’da özetlenmiştir. İstatistiksel değerlendirmeler standart hata (SH) ve korelasyon katsayıları (R) yardımıyla yapılmıştır. Standart hata ve korelasyon katsayısı ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$SH(V_c) = \sqrt{\frac{\sum(V_{c,deney} - V_{c,model})^2}{n}} \quad (7)$$

$$R(V_c) = \sqrt{\frac{\text{Var}(V_{c,deney}, V_{c,model})}{\sigma(V_{c,deney}) \times \sigma(V_{c,model})}} \quad (8)$$



Şekil 15 - Beton katkı modelleri sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 6'dan da görüleceği üzere Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin kesme dayanımına beton katkısı tahmini kolon numunelerinde daha başarılıdır. Sezen ve Moehle [14] ve Muttoni [23] tarafından geliştirilen bağıntıların sonuçları ise hem standart hata (SH)



hem de korelasyon katsayıları (R) bakımından çizelgedeki diğer bağıntılara kıyasla daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Çizelge 6 - Beton katkı model tahminlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Referans	İstatistiksel Değerlendirme					
	Kiriş numunelerinde		Kolon numunelerinde		Kiriş ve kolon numunelerde	
	SH(V <sub>c</sub> )	R(V <sub>c</sub> )	SH(V <sub>c</sub> )	R(V <sub>c</sub> )	SH(V <sub>c</sub> )	R(V <sub>c</sub> )
ACI318 [6]	78.4	0	53.5	0.92	72.7	0.46
TBDY2018 [1]	78.4	0	58.6	0.92	73.8	0.46
Aschheim ve Moehle [16]	72.2	0.85	55.4	0.98	68.2	0.89
Priestley vd. [17]	102.0	0.73	34.0	0.95	89.0	0.75
Sezen ve Moehle [14]	48.6	0.96	36.3	0.97	45.7	0.96
Muttoni [23]	41.0	0.85	20.5	0.96	36.7	0.88

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tersinir çevrimsel yük altında eğilme kırılmasıyla taşıma gücüne ulaşan betonarme kolon ve kirişlerde, betonun kesme dayanımına katkısı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel programdaki kiriş numuneleri için beton basınç dayanımı, plastik davranış biçimi, plastik mafsallı çalışma biçimi ve kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı; kolon numuneleri için ise eksenel yük düzeyi ve kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı değişken olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada betonun kesme kuvvetine katkısı, artan yerdeğiştirme talebine bağlı biçimde deneysel olarak gözlenmiş ve deneysel sonuçlar farklı çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sınırlı sayıda deney numunesi sonucu esas alınarak yapılan karşılaştırmalardan elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Kiriş numunelerinde a/d oranının artması, kolon numunelerinde ise a/d oranının artması ya da eksenel yük düzeyinin azalması -beklendiği gibi- eğik çatlama dayanımında azalma meydana getirmesinin yanında, eğik çatlak oluşumu gözlenen yerdeğiştirme süneklik oranını da arttırmaktadır (Şekil 8 ve Şekil 9).
- YP1 isimli yükleme geçmişiyle zorlanarak çift yönlü plastik mafsallı davranışı sergileyen normal ve yüksek dayanımlı beton ile imal edilen kiriş numunelerinde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki V<sub>c</sub>=0 kabulünün plastik yerdeğiştirme talebinin artmasıyla gerçekçi olduğu, plastik davranışın başlangıcında ise ihtiyatlı kaldığı söylenebilir (Şekil 13).
- YP2 isimli yükleme geçmişiyle zorlanarak tek yönlü plastik mafsallı davranışı sergileyen numunelerde, kesme kuvveti kalıcı pozitif yer değiştirme altında yön değiştirmektedir. Dolayısıyla kesme kuvvetinin yön değiştirmesi kesitte diğer eğilme yönünde bir plastik davranış ya da iki eğilme yönünde de betonda ezilme

oluşumu gerçekleştirmediği. Kesme kuvveti yön değiştirdiği için  $V_c=0$  alınması önerisinin, plastik mafsal davranışı yön değiştirmedeği durumlar için ihtiyatlı kaldığı söylenebilir.

- Sabit eksenel yük etkisinde YP1 isimli yükleme geçmişiyle zorlanarak çift yönlü plastik mafsal davranışı sergileyen ve a/d oranı 3.5 olan kolon numunelerinde Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki  $V_c$  tahmininin ( $V_c>0$  durumu) deneysel sonuçlara yakın olduğu söylenebilir. Plastik yerdeğiştirme talebinin artmasıyla, yönetmelik tahmini deneysel sonuçlara göre büyük gerçekleşmektedir. a/d oranı 6.0 ve eksenel yük düzeyi 0.1 ve 0.2 olan deney kolonlarında, a/d oranı 3.5 olan kolonlara göre eğik çatlağın daha büyük plastik yerdeğiştirme talebiyle ortaya çıktığı ve yönetmeliğin  $V_c$  tahmininin, plastik yerdeğiştirme talebiyle  $V_c$ 'de görülen azalmayı yansıtamadığı söylenebilir.
- Çizelge 6'da yapılan karşılaştırmalarla, Sezen ve Moehle [14] tarafından geliştirilen ve yerdeğiştirme süneklilik oranına göre ifade edilen ve Muttoni [23] tarafından geliştirilen boyuna birim şekildeğiştirmeye bağlı ifade edilen bağıntı sonuçlarının, karşılaştırmada esas alınan diğer bağıntılara göre daha başarılı sonuçlar verdiği söylenebilir.

Basit ya da bileşik eğilme altında zorlanan betonarme elemanların eğilme davranışı, beton ve donatı çeliği için gerçekçi malzeme modellerine dayanan moment-eğrilik analizi yardımıyla belirlenebilir. Bu analiz ile moment ve kesit eğriliği ile birlikte kesitteki birim şekil değıştirme dağılımı da saptanmaktadır. Dolayısıyla bu dağılım yardımıyla Muttoni [23] tarafından geliştirilen bağıntıda yer alan ve kesme açısından kritik kesitte en dış basınç yüzüne  $0.6d$  derinlikteki boyuna birim şekildeğiştirme ( $\varepsilon_{0.6d}$ ) de belirlenerek, betonun kesme dayanımına katkısı yaklaşık olarak hesaplanabilir. Ayrıca bu yaklaşım ile eleman eksenli boyunca kesme talebi sabit olup, plastik davranış talebi ya da birim şekildeğiştirme talebi azalan kesitler için betonun kesmeye katkısındaki değışkenlik (artış) göz önüne alınabilir. Dolayısıyla bu yöntem, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan çeşitli hasar sınır durumları için kesme dayanımının belirlenmesinde -mevcut  $V_c$  yaklaşımı bir üst sınır olarak benimsenerek- kullanılabilceği değerlendirilmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Aydın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce BAP2015-01, BAP2016-01 ve BAP2017-01 numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir. Proje çalışmasında değerli emekleri olan Prof. Dr. Metin GER (KHÜ)'e, İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı teknik ekibine ve UTEST Malzeme Test Cihazlarına teşekkürlerimizi sunarız.

## Kaynaklar

- [1] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.

- [2] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Mart 2007.
- [3] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Ağustos 1997.
- [4] Aydemir C. and Zorbozan M., Uncertainty Analysis of Flexural Overstrength Ratio for RC Columns, *ASCE Journal of Structural Engineering*, V.138(8), 1042-1053, 2012.
- [5] Aydemir C. ve Zorbozan M., Betonarme Kolonların Olası Eğilme Momenti Kapasitelerinin Belirlenmesi İçin Bir Yöntem, *İMO Teknik Dergi*, 23(112), 5903-5930, 2012.
- [6] Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-14, ACI (American Concrete Institute), Farmington Hills, MI., 2014.
- [7] Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TS-500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [8] Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Eurocode-2, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [9] Design of Concrete Structures, CSA A23.3-04, Canadian Standards Association, Mississauga, ON, 2004.
- [10] ASCE-ACI Committee 426, The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, *Journal of the Structural Division*, ASCE, V. 99, No. ST6, June 1973, pp. 1091-1187.
- [11] Seismic Design Guidelines for Highway Bridges, Applied Technical Council, Report No. ATC-6, Berkeley, CA, 1981.
- [12] Federal Emergency Management Agency, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, Washington, D.C., 2000.
- [13] Moehle, J., Lynn, A., Elwood, K. and Sezen, H.O, Gravity load collapse of building frames during earthquakes, PEER Report: 2<sup>nd</sup> U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Design Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, PEER, Richmond, Calif., 2001
- [14] Sezen, H. and Moehle, J.P., Shear strength model for lightly reinforced concrete columns, *J Struct Eng*, 130(11): 1692-1703, 2004.
- [15] Wong Y.L, Pauley T. and Priestley M.J.N, Response of circular reinforced concrete column to multi-ductile seismic attack. *ACI Structural Journal* 90(2) 180-191, 1993.
- [16] Aschheim, M., and Moehle, J. P. Shear strength and deformability of RC bridge columns subjected to inelastic displacements, UCB/EERC 92/04, University of California, Berkeley, 1992.
- [17] Priestley M.J.N., Verma R., and Xiao Y. Seismic shear strength of reinforced concrete columns, *J Struct Eng*, 120(8): 2310–2329, 1994.

- [18] Pérez B.M. and Pantazopoulou S.J. Mechanics of concrete participation in cyclic shear resistance of RC, *J Struct Eng*, 124(6): 633–641, 1998.
- [19] Lee, J.-Y. and Watanabe F., Shear deterioration of reinforced concrete beams subjected to reversed cyclic loading, *ACI Struct J*, 100(4): 480-489, 2003.
- [20] Elwood K.J. and Moehle J.P, Axial capacity model for shear- damaged columns, *ACI Struct J*, 102(4): 578-587, 2005.
- [21] Arslan, G., Shear strength of reinforced concrete frame members under cyclic loads Ph.D. thesis, Yıldız Technical University, 2005.
- [22] Kowalsky M.J., Priestley M.J.N., Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions, *ACI Struct J*, 97(3):388–96, 2000.
- [23] Muttoni, A., “Shear and Punching Strength of Slabs without Shear Reinforcement,” *Beton-und Stahlbetonbau*, V. 98, 2003, pp. 74-84.
- [24] Aydemir C., Aydemir M.E., Betonarme Kirişlerin Hasar Sınırlarının Deneysel Gözlemlerle İrdelenmesi, *IMO Teknik Dergi*, 28(4), 8023-49, 2017.
- [25] Aydemir C., Eser Aydemir M., ve Yıldırım P., Belirgin Düşey Yük Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Çevrimsel Yükler Altındaki Davranışı Üzerine Deneysel Bir İnceleme, *IMO Teknik Dergi*, 31(1), 9683-9709, 2020.
- [26] Aydemir C., Eser Aydemir M., Experimental Research on Reversing and Nonreversing Plastic-Hinge Behavior for RC Beams, *J Struct Eng*, 146(7), 2020.
- [27] Aydemir C., Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi, *IMO Teknik Dergi*, 24(1), 6279-6306, 2013.
- [28] Cansız S., Aydemir C., and Arslan G., Comparison of displacement capacity of reinforced concrete columns with seismic codes, *Advances in Concrete Construction*, 8(4), 295-304, 2020.
- [29] Gião R., Lúcio V., and Chastre C., Assessing the behaviour of RC beams subject to significant gravity loads under cyclic loads, *Engineering Structures*, Vol. 59, 512-21, 2014.

## Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

Havvanur KILIÇ<sup>1</sup>  
Onur DEMİRCİ<sup>2</sup>

### ÖZ

Gömülü betonarme boru tasarımında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi ACPA tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlanılan doğrudan tasarım yöntemidir. Bu yöntemde (SIDD) Tip 4 boru kurulumunda tabanda kayaç malzeme olmadığında boru tabanında özel bir yatak malzemesine ihtiyaç yoktur ve gömülme için herhangi bir kontrol gerektirmemektedir. Bu çalışmada, doğrudan tasarım yöntemine göre Tip 4 kurulum ile gömülen bir betonarme borunun davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak beton bir borunun tasarımı için parametrik sayısal analizler yapılmıştır. Analizlerde gömme derinliği ve boru çapı değişimi dikkate alınarak hesaplanan kesit tesirlerine göre gerekli donatı alanları belirlenerek Tip 4 kurulum koşulları için bir abak oluşturulmuştur. Ayrıca belirlenen bu donatı alanları, ülkemizde gömülü boruların tasarımında yaygın olarak kullanılan İller Bankası A.Ş.'nin kullandığı donatı alanları ile karşılaştırılmıştır. Böylece Tip 4 kurulum koşulları için bu abaktan yararlanılarak pratik olarak tasarım yapılabilmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Gömülü betonarme borular, sonlu elemanlar analizi, doğrudan tasarım.

### ABSTRACT

#### Design of Buried Reinforced Concrete Pipes with SIDD Type IV Installation

One of the most common and widely used methods of buried reinforced concrete pipe design is the direct design method (SIDD) which was started being developed in 1970's. In SIDD Type IV pipe installation, there is no need to use a special bedding material under the pipe invert because a rock material is used in foundation soil. In this study, the behavior of the buried reinforced concrete pipe with SIDD Type IV installation is investigated. In this scope, a parametric investigation was conducted with numerical analysis to design a concrete pipe considering soil-structure interaction concept. In numerical analysis, the

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28 Kasım 2020 günü ulaşmıştır. 8 Mayıs 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.832738>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - kilic@yildiz.edu.tr-  
<https://orcid.org/0000-0001-9455-1687>

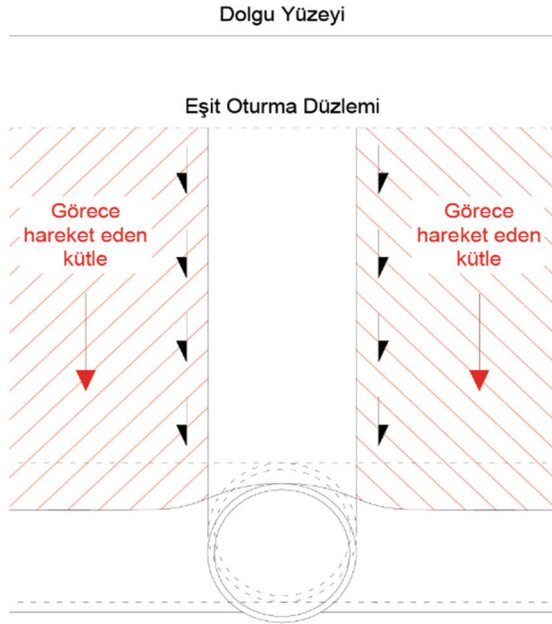
2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - onurdemirci1094@gmail.com -  
<https://orcid.org/0000-0002-3385-3056>

effects of varying design parameters are investigated such as properties like burial depths and diameter of pipes. Therefore, a reinforcement area chart has been created according to the SIDD Type IV design calculation results which includes internal forces obtained from pipe cross section. Furthermore, these obtained reinforcement areas are compared with reinforcement areas used by İller Bankası A.Ş which are widely used in our country for buried pipe design. Hence, the main scope is to design concrete pipes practically by using this chart for SIDD Type IV conditions.

**Keywords:** Buried reinforced concrete pipes, finite element analysis, direct design.

## 1. GİRİŞ

Gömülü boruların üzerine etkiyen yüklerin hesabı ve boru hatlarının güvenli tasarımı için 1900'lerden günümüze kadar çalışmalar halen sürdürülmektedir. Düşey yükler altında şekil değişimine uğramayan veya çok küçük şekil değişimlerine uğrayan borular rijit boru olarak adlandırılmakta ve üzerine etkiyen düşey yükleri boru tacından boru tabanında yatak düzeyine aktararak taşımaktadırlar. Deneysel çalışmalar gömülü rijit borular üzerine etkiyen prizma yükünün mevcut zemin yükünden daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 1 - Gömülü beton boru-zemin etkileşimi [7]

Marston ve Anderson (1913) hendek ortamına yerleştirilmiş rijit bir borunun taç düzeyine etkiyen düşey gerilme hesabında, Janssen (1895)'in Silo Teorisi'ni temel almıştır [1, 2]. Bu hesaplarda, boru üzerindeki zemin prizması ağırlığı ve ilave hareketli yük ile hendek yan duvarları ile geri dolgu arasındaki sürtünme de dikkate alınmaktadır [3, 4]. Genellikle boru

rijitliği ile gömülü bulunduğu zemin ortamının rijitliği birbirinden farklı olduğundan, borunun üzerinde yer alan zemin prizması ile komşu zemin prizmaları arasında bir görece hareket söz konusudur. Bu hareketin yönü ve büyüklüğü boru üzerine etkiyen zemin gerilmelerinin büyüklüğünü etkilemektedir. Rijit (betonarme) borularda boru çevresinde yer alan geri dolgu boruya göre daha fazla sıkışacağından, boru üzerindeki zemin prizması ile yan zemin prizmaları ara yüzeylerinde aşağı yönlü kayma kuvvetleri gelişir (Şekil 1). Görece hareketin büyüklüğüne bağlı olarak yan zemin prizması nedeniyle oluşan gerilmeler rijit boru üzerine aktarılır [5]. Bu nedenle rijit boruların tasarımında gömülme koşullarına bağlı olarak boruya aktarılacak gerilmelerin gerçekçi olarak tahmini önemlidir [6].

Boruların tasarımında genellikle yarı-ampirik yaklaşımlara dayanan yöntemlerden, arazi ve laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerden yararlanılabilir. Gömülü boru ve boruyu çevreleyen zeminin davranışı zemin-yapı etkileşimi problemi olarak ele alındığından boruların davranışı yükleme miktarı, boru rijitliği, yataklama, geri dolgu özellikleri ve yerel zemin koşullarından etkilenmektedir [7].

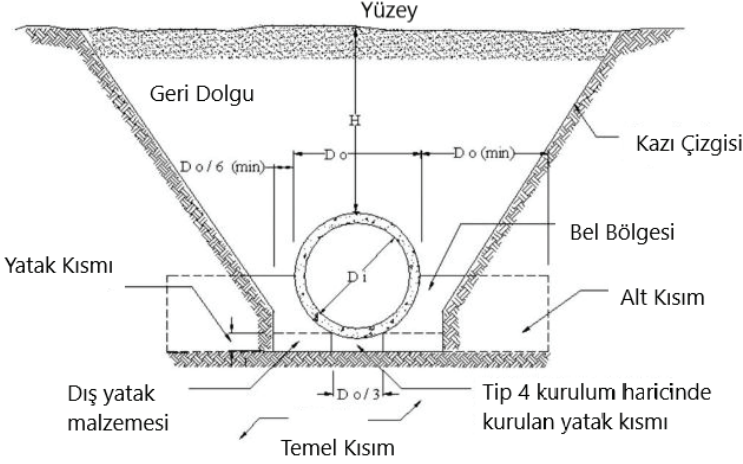
Gömülü boru hatlarında amaçlanan yapısal performansın elde edilebilmesi için yönetmeliklere uygun bir yataklama ve geri dolgu uygulaması gereklidir. Yatak ve dolgu malzeme özellikleri temel zemini koşullarına, boru cinsine, kullanım amacına ve boru üzerine etkiyen statik ve dinamik yüklere vb. birçok faktöre göre değişebilir. Genellikle su, atık su ve drenaj borusu uygulamalarında Amerikan Su İşleri Birliği (AWWA) tasarım kılavuzlarına ve standartlarına, ASTM ve AASHTO'nun yürürlükteki standartlarına uyulmaktadır. Ayrıca beton borular için doğrudan tasarım yöntemi (ASCE 15-98) veya bazı üretici firmaların geliştirdiği özel tasarım kılavuzları dikkate alınmaktadır [8]. Bu tasarım kılavuzlarında yataklama ve dolgu malzemeleri için açıklamalar ve sınıflandırmalar yer almakta, böylece tasarımın öngörülen servis süresi boyunca sorunsuz işlev görebilmesi için yeterli dayanıma ve/veya rijitliğe ve duraylılığa sahip olması sağlanabilmektedir. Gömülü beton boruların tasarımında genellikle doğrudan ve dolaylı tasarım yöntemi olarak bilinen yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerin detayları ve avantaj-dezavantajları Erdoğan vd. (2009)'da ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur [9]. Allard ve Naggar (2016)'da doğrudan tasarım yönteminde kullanılan Heger basınç dağılımının zemin-yapı etkileşimi kapsamında doğruluğu ve uygulanabilirliğini parametrik sayısal analizler ile araştırılmıştır [10].

Beton boruların kurulumu AASHTO LRFD (2014) Köprü Tasarım Şartnamesi, Bölüm 27 veya ASCE 15-98'e uygun olarak gerçekleştirilir. Şekil 2'de hendek veya dolgu durumunda boru gömülmesi ve boru gömülme terminolojisi gösterilmiştir. Burada  $D_o$  boru dış çapı,  $D_i$  boru iç çapı, H boru tacından zemin yüzüne olan dolgu yüksekliğini göstermektedir. Boru tabanında boru çapının  $1/3D_o$  kadarlık bölümü (orta yatak) olarak ifade edilerek genellikle gevşek bırakılmaktadır.

ASTM C76'da dolaylı tasarım yöntemi ve ASCE 15-98 standardına göre ise doğrudan tasarım için standart kurulumlar (SIDD) kullanılarak tasarlanan gömülü beton boru hatlarının kurulum uygulamaları belirtilmiştir. Bu standart dolgu malzemeleri için I, II ve III, IV kategorilerinde farklı zeminler tanımlanmıştır (Tablo 1). Bunlardan I ve II kategorileri iri daneli zeminleri ve III ve IV kategorileri ince daneli zeminleri temsil etmektedir. Standartta borunun oturduğu yatak, boru yan bölgesi ve üst dolgu olarak üç farklı dolgu bölgesi tanımlanmıştır. Tablo 1'de doğrudan tasarım yönteminde dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminlerin USCS ve AASHTO zemin sınıflandırma sistemlerine göre karşılıkları belirtilmiştir. Doğrudan tasarım (SIDD) Tip 4 kurulum

#### Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

uygulamasında, boru tabanında kaya olmadığı durumda yatak tabakası düzenlenmeden kötü derecelenmiş temel zemini üzerine beton boru yerleştirilebilmektedir.



Şekil 2 - Standart hendek/dolgu kurulumu [11]

Tablo 1 - Standart boru gömülme durumları için kullanılan zemin türleri ve SIDD'de eşdeğer USCS ve AASHTO zemin sınıflandırma tanımları [12]

Doğrudan Tasarım Yöntemi Zemin	Zemin Sınıflandırma Sistemi		Kompaksiyon Derecesi (%)	
	USCS	Standart AASHTO	Standart Proktor	Modifiye Proktor
Kategori I Çakıllı kum	SW, SP, GW, GP	A-1, A-3	100	95
			95	90
			90	85
			85	80
			80	75
			61	59
Kategori II Kumlu silt	GM, SM, ML %20'sinden daha azı No.200'den geçen GC, SC	A-2, A-4	100	95
			95	90
			90	85
			85	80
			80	75
			49	46



Tablo 1 - Standart boru gömülme durumları için kullanılan zemin türleri ve SIDD’de eşdeğer USCS ve AASHTO zemin sınıflandırma tanımları [12] (devam)

Doğrudan Tasarım Yöntemi Zemin	Zemin Sınıflandırma Sistemi		Kompaksiyon Derecesi (%)	
	USCS	Standart AASHTO	Standart Proktor	Modifiye Proktor
Kategori III Siltli kil	CL, MH, GC, SC	A-5, A-6	100	90
			95	85
			90	80
			85	75
			80	70
			40	40
Kategori IV Yüksek Plastisiteli Kil	CH	A7	100	90
			95	85
			90	80
			45	40

ASCE 15-98 Şartnamesi, dolgu veya hendek koşullarında beton borunun yerleşimi ile ilgili dört adet kurulum yöntemi tanımlanmıştır (Tablo 2). Bu dört kurulum yöntemi; Tip 1, 2, 3 ve 4 hem dolgu hem de hendek tipi kurulumlar için standart olarak kullanılabilir. Bu kurulum tiplerinin her biri, üç sıkıştırma bölgesi için izin verilen malzeme kategorilerini ve bu bölge için uygun sıkıştırma derecesini tanımlar. Tip 1, en çok dikkat ve kontrol gerektiren en kaliteli kurulum iken Tip 4 ise en düşük kalitedeki kurulumu göstermektedir. Doğrudan tasarım (SIDD) Tip 4 kurulum uygulamasında, boru tabanında kaya olmadığı durumda yatak tabakası düzenlenmeden kötü derecelenmiş temel zemini üzerine beton boru yerleştirilebilmektedir. Bu tür uygulamalarda aktarılan dolgu ve trafik yüklerini boru kesiti taşıyacağı için, borunun yeterli dayanıma ve/veya rijitliğe ve duraylılığa sahip olması gerekmektedir. Dolayısıyla Tip 4 kurulum daha rijit bir boru gerektirmektedir. Çünkü dolgu malzemesi türü ve sıkıştırma kontrolü bakımından çok az veya hiç kontrol olmayan koşulları kapsamaktadır [13].

Nitelikli dolgu malzeme kaynaklarına uzak bölgelerde inşa edilecek boru hatlarının tasarımında, taşıma maliyetleri ekonomik olmayan imalatlara neden olmaktadır. Bu tür problemler araştırmacıları alternatif çözümler arayışlarına yöneltmiş ve doğrudan tasarım yönteminde (Standard Installation Direct Design-SIDD) gömülü boruların Tip 4 kurulum tipi ile kurulduğunda yerel zeminin ince daneli zemin ve geri dolguda da ince daneli zeminlerin kullanılmasında boru davranışı araştırılmıştır. Wong vd. (2006)’da SIDD yöntemi ile Tip 4 kurulum standartları ile gömülmüş olan dört adet beton boruya ait arazi deneyinde, boruların kısa ve uzun süreli olarak davranışı incelenmiştir [14]. Bu kapsamda boruların etrafına gerilme ölçerler yerleştirilerek gerilmelerin zamana bağlı değişimi izlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 2 - Standart kurulum türleri ve minimum kompaksiyon oranları [12]

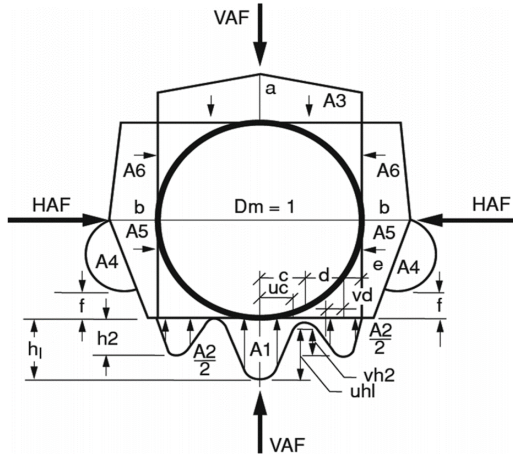
Kurulum Tipi	Yatak	Boru Alt Yan Kısımındaki Malzeme	Hendek Duvarı Alt Kısımındaki Malzeme
Tip 1	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%95 Kategori I	%90 Kategori I %95 Kategori II %100 Kategori III
Tip 2	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%90 Kategori I veya %95 Kategori II	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 3	75 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/24 Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 4	Yatak gerekmez (tabanda kaya yoksa) Tabanda kaya varsa 150 mm.'den küçük olmamak şartıyla Do/12	Kompaksiyon gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III	Kompaksiyon gerekmez (Kategori III kullanılması hariç) %85 Kategori III

Bu makalede, doğrudan tasarım yöntemi kapsamında Tip 4 kurulum koşullarında gömülen beton boruların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla önce Wong vd. (2006) kapsamında yapılan Barrie sahası arazi deneyi, Plaxis 2D (2019) programı ile modellenmiş ve araziden alınan gerilme ölçümleri ile analiz hesap sonuçları karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Ayrıca sayısal analiz hesap sonuçları SIDD yöntemi ile Tip 4 kurulum için belirlenen kesit tesirleri ile de karşılaştırılmıştır. Barrie sahası sayısal modeli ve zemin koşulları dikkate alınarak farklı boru çapı ve gömülme derinlikleri için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Analizlerden hesaplanan kesit tesirlerinden yararlanılarak farklı boru çapları ve gömülme derinlikleri için boru imalatında gerekli olan donatı miktarlarını gösteren bir abak elde edilmiştir. Ayrıca ülkemizde İller Bankası A.Ş'nin gömülü beton boru tasarımında yaygın olarak kullandığı gerekli donatı miktarlarının yeterli olup olmadığı incelenmiştir.

## 2. DOĞRUDAN TASARIM YÖNTEMİ

1970'li yıllarda ACPA (American Concrete Pipe Association – Amerikan Beton Boru Birliği) tarafından beton boru-zemin yerleşim performanslarını incelemek için uzun vadeli araştırma programları başlatılarak, beton boruların yapısal davranışı ve boru-zemin etkileşimleri incelenmiştir. Bu araştırmaların bir sonucu olarak standart yerleşim tipleri için Heger zemin basıncı dağılımı geliştirilmiştir (Şekil 3). Bu kapsamda, Tablo 1'de belirtilen zemin kategorileri ve Tablo 2'de verilen kurulum tipleri için Şekil 3'te gösterilen Heger toprak basıncı dağılımı kullanılabilir.

Kurulum tipleri için boru etrafındaki gerilme dağılımlarının hesaplanmasında kullanılacak katsayılar Tablo 3'te sunulmuştur. A1-A6 katsayıları toprak basıncının boyutsuz düşey ve yatay bileşenleri, a - v ise boyutsuz düşey ve yatay gerilmeleri tanımlamak için kullanılan katsayılardır. Diğer katsayılar (d, h1 ve h2) ise (1), (2) ve (3) eşitliklerinden hesaplanabilir.



Şekil 3 - Doğrudan tasarım için Heger zemin basıncı dağılımı [12]

Tablo 3 - Kurulum tiplerine göre Heger toprak basıncı dağılımı katsayıları [12]

Katsayılar	Kurulum Tipleri			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
VAF	1.35	1.40	1.40	1.45
HAF	0.45	0.40	0.37	0.30
A1	0.62	0.85	1.05	1.45
A2	0.73	0.55	0.35	0.00
A3	1.35	1.40	1.40	1.45
A4	0.19	0.15	0.10	0.00
A5	0.08	0.08	0.10	0.11

Tablo 3 - Kurulum tiplerine göre Heger toprak basıncı dağılımı katsayıları [12] (devam)

Katsayılar	Kurulum Tipleri			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
A6	0.18	0.17	0.17	0.19
a	1.40	1.45	1.45	1.45
b	0.40	0.40	0.36	0.30
c	0.18	0.19	0.20	0.25
e	0.08	0.10	0.12	0.00
f	0.05	0.05	0.05	-
u	0.80	0.82	0.85	0.90
v	0.80	0.70	0.60	-

$$d = 0.5 - c - e \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{(1.5A1)}{[c(1+u)]} \quad (2)$$

$$h_2 = \frac{(1.5A2)}{[d(1+u)+2e]} \quad (3)$$

Doğrudan tasarım yönteminde gerekli boru donatı alanı, boruya etkiyen gerilmelere bağlı olarak hesaplanan moment (M), aksel kuvvet (N) ve kesme kuvveti (V) dikkate alınarak belirlenir. Bu kesit tesirleri Tablo 4'te Tip 4 kurulum için verilen katsayılardan yararlanılarak veya boru-zemin etkileşimini dikkate alan sayısal analizlerden hesaplanabilir. M, N ve V değerlerini hesaplamak için sırasıyla (4), (5) ve (6) eşitlikleri verilmiştir [6]. Diğer kurulum tipleri için de ASCE 15-98'den yararlanılarak belirlenecek boru analiz katsayıları kullanılarak kesit tesirleri hesaplanabilir. Tablo 4'te Tip 4 kurulum için farklı dış yük uygulamalarındaki katsayılar sunulmuştur [12].

$$M = \frac{C_{mi} \times W_i \times D_m}{2} \quad (4)$$

$$N = C_{ni} \times W_i \quad (5)$$

$$V = C_{vi} \times W_i \quad (6)$$

Burada;  $C_{mi}$ = Moment hesabı için boru analiz katsayısı,  $C_{ni}$ = Aksel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısı,  $C_{vi}$ = Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısı,  $W_i$ = Boru üzerine etkiyen yüklerin toplamı,  $D_m$ = Boru ortalama çapını temsil etmektedir.

Tablo 4 - Tip 4 kurulum için boru analiz katsayıları (ASCE 15-98) [12]

Lokasyon	Yük Tipi	Cmi	Cni	Cvi
Boru alt	Wp	0.235	0.077	
	We	0.131	0.128	
	Wf	0.160	-0.403	-
	WL1	0.185	0.152	
	WL2	0.237	-0.004	
Boru üst	Wp	0.079	-0.077	
	We	0.118	0.079	
	Wf	0.076	-0.232	
	WL1	0.110	0.114	-
	WL2	0.255	0.004	
Boru yan duvar	Wp	-0.101	-0.287	
	We	-0.127	0.504	
	Wf	-0.095	-0.057	
	WL1	-0.121	0.495	-
	WL2	-0.168	0.492	
Kritik kesme	Wp		0.188	0.431
	We		0.211	0.309
	Wf	-	-0.323	0.284
	WL1		0.229	0.305

Doğrudan tasarım yönteminde donatı gereksinimi, ilgili zemin parametreleri ve standart kurulum tiplerine bağlı olarak verilen analiz katsayıları ile zemin yüklerinin belirlenmesi ve tesir kuvvetlerinin hesaplanmasıyla elde edilir. Tablo 4'teki  $W_e$  boru üzerindeki zemin yükünü,  $W_p$  borunun kendi ağırlığından dolayı oluşacak yükü,  $W_f$  varsa akışkan yükünü ve varsa hareketli yükler WL1 ve WL2'yi ifade etmektedir.

Heger basınç dağılımları kapsamında Tablo 3'te verilen düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) doğrudan tasarım yönteminde toprak basınçlarının hesaplanmasında kullanılır. Tasarımda dikkate alınacak gerçek düşey ve yatay yükler bu kemerlenme faktörleri ile çarpılarak belirlenir. Prizma yükü (PL) borunun üzerindeki zemin örtüsünün ağırlığıdır ve uluslararası birim sistemine göre Eşitlik (7) ile hesaplanır. Boru üzerine etkileyen toplam zemin yükü (W), prizma yükünün (PL), VAF ile çarpımı sonucu Eşitlik (8) ile belirlenir.

$$PL = \left(\frac{w \cdot D_o}{1000}\right) \cdot \left(H + \left(\frac{0.107 \cdot D_o}{1000}\right)\right) \quad (7)$$

$$W = PL \times VAF \quad (8)$$

#### Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

Burada; PL= Prizma yükü (kN/m), w= zemin birim hacim ağırlığı (kN/m<sup>3</sup>), D<sub>o</sub>= borunun dış çapı (mm), H=borunun üst kısmındaki dolgu yüksekliği (m)'ni göstermektedir.

Boru üzerine etkiyen trafik yükü boru çapına ve dolgu yüksekliğine (H) bağlı olarak Tablo 5 yardımıyla hesaplanabilir. Doğrudan tasarım yönteminde 2.734m dolgu kalınlığından daha derine gömülen borulara trafik yükünün etkisi olmadığı belirtilmiştir [15].

Tablo 5 - Boru üzerindeki dolgu yüksekliğine bağlı trafik yükü [15]

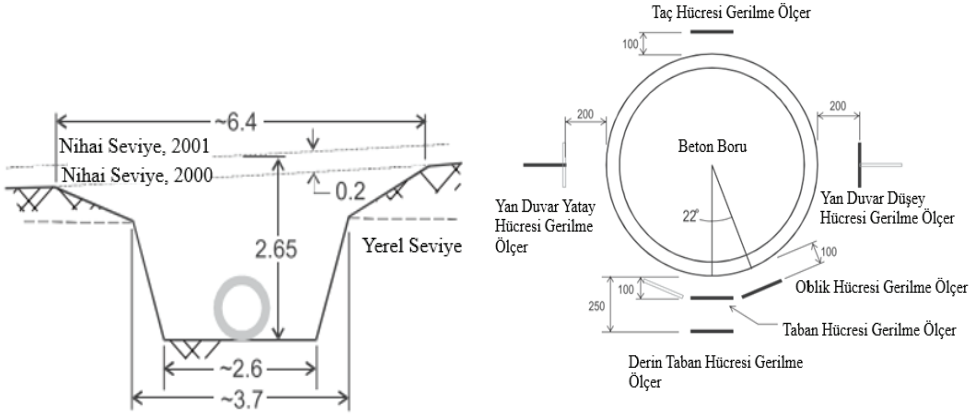
Boru Çapı (m)	Boru üzerindeki dolgu yüksekliği H (m)								
	0.305	0.610	0.914	1.219	1.524	1.829	2.134	2.438	2.743
0.38	34.44	18.68	9.63	6.57	5.11	4.09	3.36	2.77	2.34
0.46	38.09	21.31	10.95	7.59	5.84	4.67	3.79	3.21	2.77
0.53	41.15	23.64	12.26	8.46	6.57	5.25	4.38	3.65	3.06
0.61	43.93	25.98	13.57	9.34	7.30	5.84	4.82	4.09	3.50
0.69	42.91	28.17	14.74	10.22	8.17	6.42	5.25	4.38	3.79
0.76	41.30	30.21	15.76	10.95	8.61	7.01	5.69	4.82	4.09
0.84	42.76	32.11	16.93	11.82	9.19	7.44	6.13	5.25	4.38
0.91	41.01	34.00	17.95	12.55	9.78	8.03	6.57	5.55	4.82
0.99	38.97	35.61	18.83	13.28	10.36	8.46	7.01	5.98	5.11
1.07	37.21	37.36	19.85	13.86	10.95	8.90	7.44	6.28	5.40
1.22	34.00	36.19	21.45	15.18	11.97	9.78	8.17	6.86	5.98
1.37	31.38	34.44	23.06	16.35	12.99	10.65	8.90	7.59	6.42
1.52	29.04	32.84	24.52	17.37	13.86	11.38	9.49	8.17	7.01
1.68	27.00	31.52	23.93	18.39	14.74	12.11	10.22	8.61	7.44
1.83	25.25	31.96	22.91	19.41	15.47	12.84	10.80	9.19	7.88
1.98	23.79	32.69	22.18	20.29	16.20	13.43	11.38	9.63	8.32
2.13	22.47	33.42	21.31	19.85	16.93	14.01	11.82	10.07	8.76

Bilgi ve Notlar: Ham zemin üzerine uygulandığı varsayılmıştır. AASHTO HS20 kamyon yüküne göre hesaplanmıştır. 3.05 metre ve üzerindeki dolgu yüksekliklerinde araç yükü ihmal edilmiştir. Yük birimi kN/m'dir.

### 3. BARRIE SAHASI ARAZİ DENEYİ

Bu çalışma kapsamında, Wong vd. (2006)'da Ontario'da yer alan Barrie sahasında yapılan bir arazi deneyinden alınan gerilme ölçümleri dikkate alınarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Şekil 4'te gösterilen hendek kesitinde ortalama hendek derinliği 2.5m'dir. Arazi deney alanında, temel zemini kötü derecelenmiş siltli kum ve geri dolgu zemini

düşük miktarda ince dane içeren iyi derecelenmiş çakıllı kum olarak belirtilmiştir. Yerel zeminin doğal su muhtevası kazı derinliği boyunca %2 ve %5 arasında değişim göstermektedir [16]. Yerel zemin için maksimum standart proktor yoğunluğu  $1725 \text{ kg/m}^3$ , optimum su muhtevası ise %10'dur [17]. Boru iç çapı 600mm, dış çapı 800mm olup boru uzunluğu 2.44m'dir. Arazi deneyi verileri Tablo 6'da sunulmuştur.



Şekil 4 - Barrie deney sahası (a) kazı kesiti (ölçüler m) (b) gerilme ölçerlerin yerleşimi [14]

Tablo 6 - Barrie sahası arazi deney verileri [14]

Geri dolgu	İnce dane barındıran iyi derecelenmiş çakıllı kum
Yatak	Kötü derecelenmiş siltli kum
Toplam kazı derinliği (m)	2.5
Boru iç çapı (Di) (mm)	600
Boru dış çapı (Do) (mm)	800
Zemin birim hacim ağırlığı ( $\text{kN/m}^3$ )	16.91
YASS (m)	-
Boru uzunluğu (m)	2.44

Arazi deneyinde boru, Şekil 4'te gösterilen kazı kesitinde Tip 4 kurulum koşullarında gömülmüştür. Bu kapsamda, 2.65m derinlikte ve 6.4m genişlikte şevli bir kazı yapılmıştır (Şekil 4a). Hendek tabanında kaya zemin olmadığı için özel bir yatak tabakası yapılmamış, boru arazide kötü derecelenmiş siltli kum zemin üzerine oturtulmuştur (Tip 4 kurulumunda yatak gerekmemektedir). Ardından gerilme ölçerler borunun çevresine gömülme sırasında Şekil 4b'de gösterildiği gibi konumlandırılmıştır. Geri dolgu sırasında gerilme ölçerlerin zarar görmesini engellemek için kum yastıklar kullanılmıştır. Gerilme ölçerler, borunun yatay simetri ekseninde sağ ve sol tarafına biri düşey biri yatay gerilmeyi ölçmek üzere 0.2m mesafede, oblik hücre 0.1m mesafede, boru taç ve taban bölgesinde 0.1m mesafede

#### Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

konumlandırılmıştır. Boru tabanına önce gerilme ölçer yerleştirilmiş, daha sonra üzerine beton boru konulmuştur. Hendek içine yerleştirilen borunun etrafı düşük miktarda ince dane içeren iyi derecelenmiş çakıllı kum dolgu ile adım adım kapatılırken gerilme ölçerlerden okumalar alınmıştır. Boru tamamen geri dolgu ile kapatıldıktan sonra da adım adım dolgu yerleşimine devam edilerek istenilen seviyeye kadar dolgu gerçekleştirilmiştir.

### 3.1. SIDD Tip 4 Yerleşime Göre Boru Kesit Tesirleri Hesabı

Bölüm 2’de detayları belirtilen SIDD yöntemine göre boru üzerine etkiyen yükler ve kesit tesirleri hesaplanmıştır. Doğrudan tasarım yöntemine göre öncelikle boru üzerindeki Prizma Yükü (PL) eşitlik (7) ve Tip 4 kurulum için VAF=1.45 dikkate alınarak eşitlik (8)’den dolgu zemin yükü (W) 37.97 kN/m olarak hesaplanmıştır. Doğrudan tasarım yöntemine göre boru taç, yan duvar ve taban kısmında, zemin ve trafik yükünden dolayı oluşacak moment ve normal kuvvet değerleri hesaplanarak Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7 - SIDD yöntemine göre boru üzerine etkiyen kesit tesirleri

	Boru taçı		Boru yan duvarı		Boru tabanı	
	Moment (kNm/m)	Eksenel kuvvet (kN/m)	Moment (kNm/m)	Eksenel kuvvet (kN/m)	Moment (kNm/m)	Eksenel kuvvet (kN/m)
Zemin yükünden (We)	1.79	2.99	-1.92	19.13	1.98	4.86
Taşıt yükünden (WL)	0.31	0.81	-0.34	3.52	0.53	1.08
Toplam	2.10	3.80	-2.26	22.65	2.52	5.94

### 3.2. Sayısal Modelin Doğrulaması

Şekil 4’te gösterilen arazi deneyi hendek kesitinin, boru özellikleri ve yükleme koşulları dikkate alınarak sayısal analizi Plaxis 2D (2019) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde zemin davranışı Hardening – Soil (HS) bünye bağıntısı dikkate alınarak, betonarme boru ise eğilme rijitliği (EI) ve eksenel rijitlik (EA) parametreleri ile elastik olarak modellenmiştir. Sayısal analizler iki boyutlu olarak düzlem şekil değiştirme koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sahada yeraltı suyu bulunmamaktadır. Trafik yükü olarak ACPA Design Data 5, 2011’teki HS20 trafik yükü, boru dış çapı 0.8m ve dolgu yüksekliği yaklaşık 2m dikkate alınarak tasarım çizgisel yükü 7.11 kN/m olarak Tablo 5’ten belirlenmiştir [15]. Analizlerde boru tabanında yer alan temel zemini, yerel zemin ve geri dolgu zeminlere ait malzeme parametreleri Tablo 8’de sunulmuştur. Şekil 5’te Barrie sahası arazi kesiti için sayısal analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir. Analizlerde 4, 5, 8, 9, 10 ve 11. yükleme adımlarında sıkıştırma etkisini dikkate almak için



15 kN/m’lik bir yük ve 13. yükleme adımında ise 7 kN/m’lik bir yük uygulanmıştır. Sayısal analizlerde yükleme adımlarında etkililen yükler Tablo 9’da gösterilmiştir. Sayısal analizden elde edilen hesap sonuçları ile arazi deneyinde alınan ölçümler farklı sonlu elemanlar ağı sıklıkları da göz önünde bulundurularak karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Analizlerde boru ve zemin arasında ara-yüzey eleman kullanılarak ara-yüzey eleman katsayısı  $R_{int}=0.80$  olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 8 - Hardening - Soil zemin parametreleri

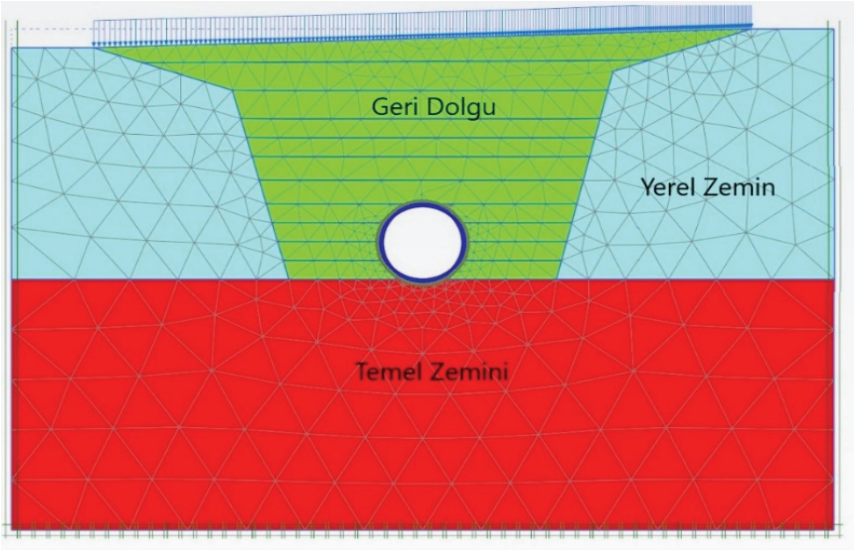
Parametre	Sembol	Birim	Yerel zemin	Temel zemini	Geri Dolgu
Birim hacim ağırlık	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	17	18	17
Referans Elastisite Modülü	$E_{50}^{ref}$	MPa	40	10	30
Referans Ödometre Modülü	$E_{oed}^{ref}$	MPa	40	10	30
Referans Yükleme-boşaltma Elastisite Modülü	$E_{ur}^{ref}$	MPa	120	30	90
Üstel malzeme sabiti	m	-	0.5	0.5	0.5
Kohezyon	$c^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	16	10	2
İçsel sürtünme açısı	$\phi$	(°)	37	30	30
Poisson oranı	$\nu_{ur}$	-	0.2	0.2	0.2
Referans gerilme	$p^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	100	100	100
Göçme oranı	$R_f$	-	0.90	0.90	0.9

Tablo 9 - Sayısal analizlerde yükleme adımlarında etkililen yükler

Yükleme Adımları	Sıkıştırma Yüğü (kN/m)	Tasarım Çizgisel Yüğü (kN/m)
Adım 4	15	-
Adım 5	15	-
Adım 8	15	-
Adım 9	15	-
Adım 10	15	-
Adım 11	15	-
Adım 13	-	7

#### Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

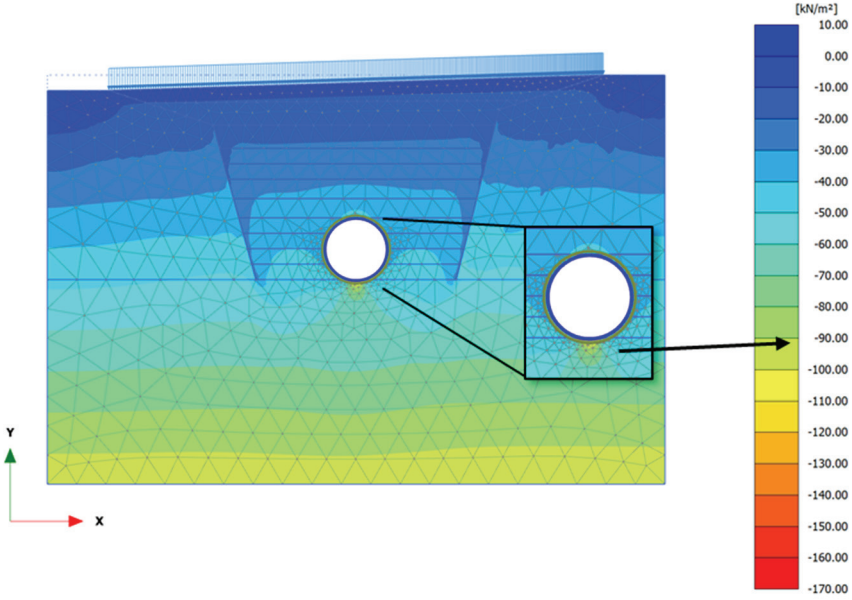
Sayısal analiz sonuçlarına ağ sıklığının etkisini belirlemek için orta ve ince sıklıkta oluşturulan sonlu eleman ağları için analizler tekrarlanmış ve hesap sonuçları Tablo 10'da sunulurken arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi hesap sonuçları arazide ölçülen gerilmelere oldukça yakındır. Şekil 6'da sayısal analiz sonucunda elde edilen düşey gerilme dağılımı gösterilmiştir. Boru çevresinde en yüksek gerilmenin taban bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Şekil 3'te gösterilen Heger zemin basıncı dağılımı ile de uyumludur. Borunun taban bölgesinde gerilme konsantrasyonu meydana gelmiştir. Sayısal analizden ve SIDD yöntemine göre Tablo 3 ve Tablo 4 kullanılarak Eşitlik (4) ve (5)'ten kesit tesirleri hesaplanmış ve Tablo 11'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi doğrudan tasarım (SIDD) ve sayısal analizlerden elde edilen kesit tesirleri arasında eğilme momentlerinde ve aksel kuvvetlerde boru taç bölgesinde yaklaşık 2 kat, taban bölgesinde ise yaklaşık 1.5 kat fark bulunmuştur.



Şekil 5 - Barrie sahası arazi deneyi kesiti sayısal modeli (orta sıkı ağ)

Tablo 10 - Ölçülen ve hesaplanan gerilmelerin karşılaştırılması

Gerilmeler (kPa)	Barrie arazi deneyinde ölçülen gerilme [8]	Plaxis 2B Sayısal Analiz	
Ağ Sıklığı	-	Orta	İnce
Taç	38	40	40.2
Taban	110	93	94
Oblik	39	36	38.8
Yan duvar (yatay)	22	17	19.3
Yan duvar (düşey)	54	39	39.7



Şekil 6 - Sayısal modelde elde edilen düşey gerilme dağılımı

Tablo 11 - SIDD yöntemi ve sayısal analizden hesaplanan kesit tesirlerinin karşılaştırılması

Kesit Tesirleri	Doğrudan Yöntem (SIDD) Tip 4 kurulum			Plaxis 2B Sayısal Analiz		
	Taç	Taban	Yan duvar	Taç	Taban	Yan duvar
Eğilme momenti (kNm/m)	2.10	2.52	-2.26	1.2	1.60	-1.52
Eksenel kuvvet (kN/m)	3.80	5.94	22.65	8.08	9.69	-21.1

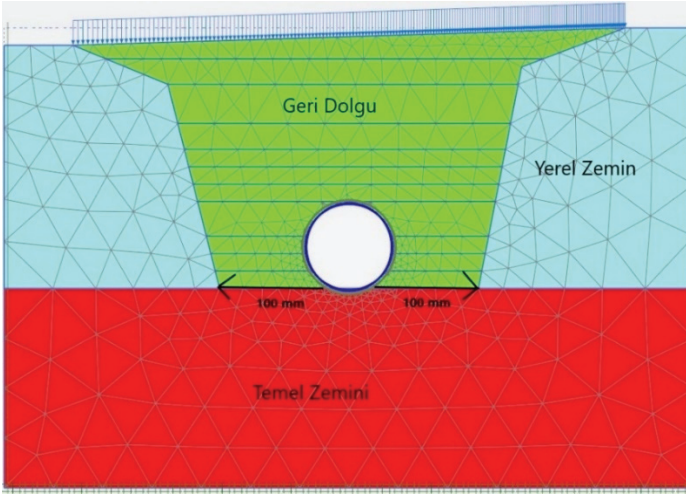
#### 4. PARAMETRİK SAYISAL ANALİZLER ve KESİT TESİRLERİ

Bu makale kapsamında, özellikle nitelikli dolgu malzemesine ulaşılamadığı durumlar için Tip 4 kurulum koşullarında beton boru davranışı zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak Plaxis 2D (2019) sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir. Sayısal analizler orta (medium) ve ince (fine) sonlu elemanlar ağı ile ayrı ayrı yapılarak ağ sıklığının analiz sonuçlarına etkisi de araştırılmıştır.

Şekil 5'te gösterilen sonlu eleman modelinde boru çapı ve dolgu yüksekliği değişiminin boru tasarımına etkileri sayısal analizler ile incelenmiştir. Bu kapsamda boru çapı 600 mm ile 2000 mm arasında ve dolgu yüksekliği ise 2m, 4m, 6m ve 8m dikkate alınarak sayısal analizler tekrarlanmıştır. Şekil 7'de gösterilen sayısal model ile yapılan parametrik

#### Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

analizlerde, boru dış çapı 200 mm olarak artırılırken model geometrisinde hendek taban genişliği modelde daralma yaratmamak ve bu genişliğin etkisinin analiz sonuçlarını etkilememesi için x ekseninde 100'er mm kaydırılarak sabit tutulmuştur. Analizlerde boru çapı ve dolgu yüksekliği değişimlerine karşılık olarak elde edilen en yüksek momentler Tablo 12'de, en yüksek aksel kuvvetler ise Tablo 13'te sunulmuştur. Şekil 8'de görüldüğü üzere, parametrik analizlerde sonlu elemanlar ağı sıklığının ortadan inceye doğru iyileştirilmesi sonucunda elde edilen iç kuvvetlerin (eğilme momenti ve aksel kuvvet) de karşılaştırılması yapılarak sunulmuştur. Büyük çaplı boruda kesit tesirlerini daha az etkilerken, küçük çaplı boruda kesit tesirlerine daha fazla etkisi olduğu ve moment değerlerini yaklaşık olarak %40, aksel kuvvet değerlerini ise %15 oranında arttırdığı görülmüştür.



Şekil 7 - Sayısal analizlerde model geometrisi değişimi

Tablo 12 - Parametrik sayısal analizlerdeki en yüksek moment değerleri

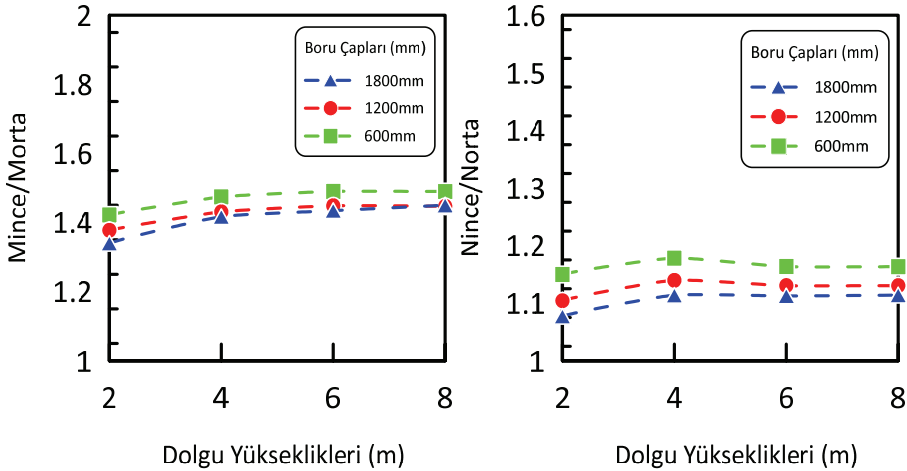
Boru Çapı (mm)	Sayısal analizlerden belirlenen en yüksek moment (kNm/m)							
	Dolgu Yüksekliği H(m)							
	2m		4m		6m		8m	
Ağ Sıklığı	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce
Ø600	0.8	1.2	1.2	1.8	1.6	2.5	1.9	2.8
Ø800	1.6	2.3	2.4	3.5	3.3	4.8	3.8	5.5
Ø1000	2.7	3.8	4.1	5.8	5.4	7.9	6.1	9.2
Ø1200	4.2	5.8	6.1	8.7	8.1	11.8	9.5	13.7
Ø1400	7.5	9.8	8.4	12.1	11.4	16.4	13.2	19.2
Ø1600	8.2	11.1	11.3	16.1	15.2	21.8	17.7	25.7
Ø1800	10.7	14.4	14.5	20.7	19.4	27.9	22.6	32.9
Ø2000	13.5	18	18.2	25.9	24.2	34.7	29.8	41

Tablo 13 - Parametrik sayısal analizlerdeki en yüksek eksenel kuvvet değerleri

Boru Çapı (mm)	Sayısal analizlerden belirlenen en yüksek eksenel kuvvet (kN/m)							
	Dolgu yüksekliği H(m)							
	2m		4m		6m		8m	
Ağ Sıklığı	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce	Orta	İnce
Ø600	16.8	16.9	27.3	32.2	38.3	44.6	44.5	51.8
Ø800	22.8	26.1	37.5	43.7	52.4	60.4	61.2	70.4
Ø1000	29.4	32.9	47.9	55.2	66.9	76.4	73.9	89.1
Ø1200	36.1	39.8	58.7	66.9	81.6	92.3	95.3	107.8
Ø1400	43.5	47.05	69.6	78.7	95.9	108.1	112.5	126.6
Ø1600	49.8	53.9	80.7	90.6	110.9	124.2	129.9	145.4
Ø1800	56.6	61	91.9	102.4	126	140.2	147.3	164.1
Ø2000	63.5	67.9	103.1	114.3	141	156.2	166.8	182.8

Tablo 12 ve Tablo 13'te sayısal analizlerden hesaplanan kesit tesirleri kullanılarak boru tasarımı için gerekli donatı alanı ASCE 15-98'de belirtildiği gibi Eşitlik 9'dan hesaplanmıştır.

$$A_s \geq \frac{g\phi d - Nu\sqrt{g[g(\phi d)^2 - Nu(2\phi d - h) - 2Mu]}}{f_y} \quad (9)$$



Şekil 8 - Sonlu elemanlar ağ sıklığının değişiminin kesit tesirlerine olan etkisi

Burada;  $A_s$  birim uzunluk için gerekli donatı alanı;  $f_y$  donatı akma dayanımı;  $d$  paspayı;  $h$  boru et kalınlığı;  $M_u$  Tasarım momenti,  $N_u$  eksenel kuvvet; (basınç durumunda pozitif alımlar);  $\phi$  direnç faktörü;  $g$   $0.85 \times b \times f_c$ ,  $b$  hesap genişliği;  $f_c$  beton tasarım mukavemetini

*Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı*

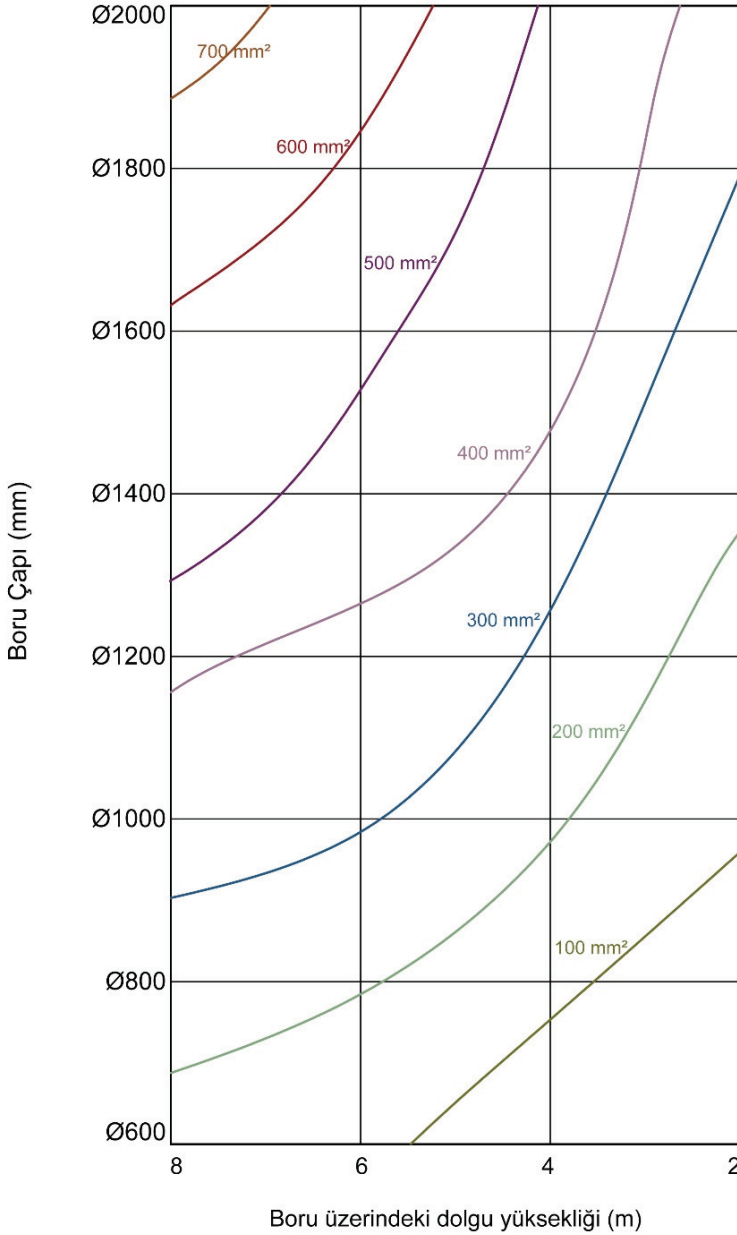
temsil etmektedir. Hesaplamalarda donatı akma dayanımı  $f_y$  485 MPa, beton tasarım mukavemeti  $f_c$  ise 45 MPa alınmıştır. Donatı alanı hesabı için boru çaplarına göre Eşitlik 9'da kullanılan parametreler Tablo 14'te verilmiştir. Eşitlik 9'dan hesaplanan donatı alanlarının boru çapı ve dolgu yüksekliğine göre değişimi Tablo 15'te sunulmuştur. İnce sonlu elemanlar ağı dikkate alınarak hesaplanan bu sarmal donatı alanlarının boru çapı ile dolgu yüksekliğine bağlı değişimi Şekil 9'da bir abak halinde gösterilmiştir. Beklendiği gibi boru çapı ve dolgu yüksekliği arttıkça gerekli donatı alanı da artış göstermektedir. Böylece, Şekil 9'da gösterilen abaktan faydalanılarak, Tip 4 kurulum koşulları için beton boruların imalatında dikkate alınması gereken donatı alanları pratik olarak belirlenebilmektedir.

*Tablo 14 - Donatı hesabında boru çaplarına göre kullanılan parametreler*

<b>Boru Çapı (mm)</b>	<b>h (Boru duvar kalınlığı) (mm)</b>	<b>d (Paspayı) (mm)</b>
Ø600	100	70
Ø800	120	90
Ø1000	120	90
Ø1200	140	110
Ø1400	140	110
Ø1600	170	140
Ø1800	200	170
Ø2000	200	170

*Tablo 15 - Tip 4 Kurulum için hesaplanan sarmal donatı alanı*

<b>Boru Çapı (mm)</b>	<b>Sayısal analizlerden belirlenen kesit tesirlerine göre sarmal donatı alanı (mm<sup>2</sup>)</b>							
	<b>Dolgu yüksekliği H(m)</b>							
	<b>2m</b>		<b>4m</b>		<b>6m</b>		<b>8m</b>	
<b>Ağ Sıklığı</b>	<b>Orta</b>	<b>İnce</b>	<b>Orta</b>	<b>İnce</b>	<b>Orta</b>	<b>İnce</b>	<b>Orta</b>	<b>İnce</b>
Ø600	53.4	65.1	80.7	106.5	111.1	146.2	128.1	168.5
Ø800	72.4	93.5	112.9	148.7	155.4	204.7	180.2	236.3
Ø1000	109.5	141.4	167.7	221.3	228.6	303.7	253.4	352.6
Ø1200	133.8	170.9	201.1	264.7	273.8	361.8	320.1	422.6
Ø1400	173.9	260.2	223.4	350.2	303.7	476.8	354.8	560.1
Ø1600	193.8	295.9	282.4	447.7	382.7	505.1	447.4	593.2
Ø1800	209.5	304.8	304.1	458.3	410.3	538.1	478.9	632.9
Ø2000	253.7	317.5	365.5	478.5	491.7	647.2	596.8	762.9



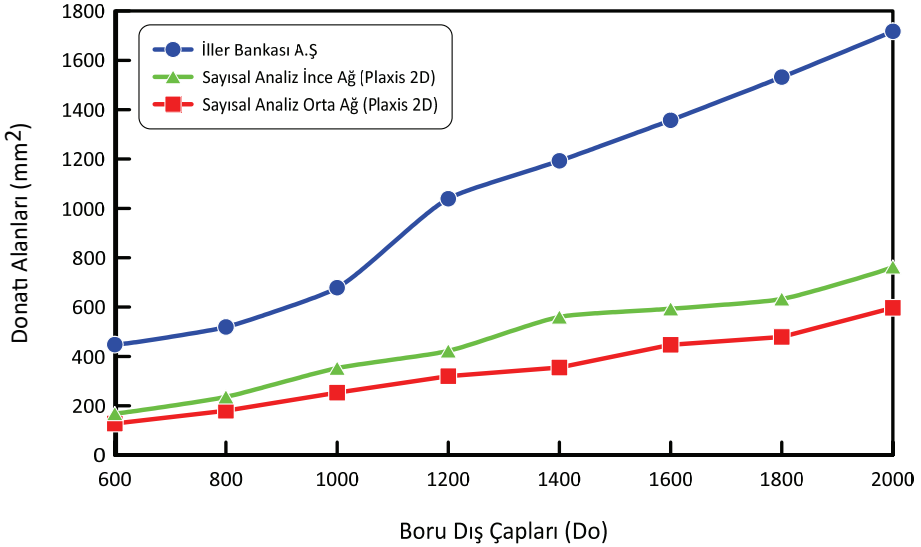
Şekil 9 - Boru çapı ve gömülme derinliğine bağlı olarak gerekli minimum sarmal donatı alanı abağı (ince sonlu elemanlar ağı ile hesaplanan değerlerden)

#### 4.1. Sayısal Analizlerden Belirlenen Donatı Alanlarının İller Bankası Donatı Alanları ile Karşılaştırılması

Ülkemizde yaygın olarak gömülü beton boruların tasarımında İller Bankası A.Ş kriterleri dikkate alınmaktadır. Tablo 16'da İller Bankası A.Ş'nin güncel olarak kullandığı boru çaplarına karşılık gerekli donatı alanları gösterilmiştir. Bu donatı alanları 1m ile 8m arasında değişen dolgular altında kalan boruların en elverişsiz gömülme durumuna göre tüm geri dolgu malzemeleri için verilmiştir.

Tablo 16 - İller Bankası tarafından kullanılan sarmal donatı alanları [18]

Boru Çapı (mm)	Donatı Alanı (mm <sup>2</sup> )
Ø600	447.958
Ø800	519.526
Ø1000	678.564
Ø1200	1039.05
Ø1400	1192.79
Ø1600	1357.13
Ø1800	1532.07
Ø2000	1717.62



Şekil 10 - İller Bankası A.Ş tarafından uygulanan ve sayısal analizlerden hesaplanan donatı alanlarının karşılaştırılması



Şekil 10'da İller Bankası A.Ş ve yapılan sayısal analizlerden en elverişsiz tesir kuvvetleri dikkate alınarak hesaplanan donatı alanlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Görüldüğü gibi İller Bankası tarafından kullanılan sarmal donatı alanları sayısal analiz sonuçlarına göre yaklaşık olarak 2.5-3 kat daha güvenli tarafta kalmaktadır. İller Bankası tarafından kullanılan donatı alanları Tablo 2'de belirtilen tüm gömülme koşulları için uygulanmaktadır. Tip 4 gömülme koşulları, beton borular için en olumsuz koşulları içermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizler ve karşılaştırmalar dikkate alındığında, ülkemizde oldukça güvenli yönde kalınarak betonarme boru tasarımı yapıldığı görülmektedir. Boru hatları kilometrelerce devam eden uzun alt yapı sistemleri olarak değişik zemin koşullarından geçmekte ve her zaman şartnamelerde belirtilen nitelikli dolgu malzemelerine ulaşmak mümkün olamamaktadır. Bu bakımdan, gömülü boru tasarımları yapılırken geçtiği güzergâhın zemin koşulları, boru özellikleri ve yükleme durumu dikkate alınarak zemin-boru etkileşimi ile davranışı incelenerek, şartnameler ile karşılaştırılmaları yapılmalıdır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğrudan tasarım yöntemi (SIDD) Tip 4 boru kurulumunda, tabanda kayaç malzeme olmadığı koşullarda boru tabanında özel bir yatak tabakasına ihtiyaç yoktur. Bu çalışmada referans alınan Barrie sahasında yapılan arazi deneyinde, geri dolgu malzemesi olarak az miktarda ince dane içeren iyi derecelenmiş çakıllı kum kullanılmış ve temel zemininde kötü derecelenmiş siltli kum yer almaktadır. Beton boru tabandaki kötü derecelenmiş siltli kum üzerine oturtularak SIDD Tip 4 koşullarında kurulum gerçekleştirilmiştir. Bu makale kapsamında Barrie arazi deneyinin sayısal modeli Plaxis 2D (2019) kullanılarak oluşturulmuş ve arazide alınan gerilme ölçümleri ile hesap sonuçları karşılaştırılarak model doğrulandıktan sonra parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında gömülme derinliğine karşılık artan dolgu yükü ile boru çapı değişimi dikkate alınarak tesir kuvvetlerindeki ve donatı alanındaki değişimler belirlenmiştir. Ülkemizde gömülü boru tasarımında güncel olarak kullanılan İller Bankası A.Ş kriterlerine göre belirtilen donatı alanları için karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların sonuçlarına göre;

1. SIDD yönteminde Tip 4 kurulumu göre boru bölgelerindeki toplam iç kuvvetlerin hesaplanmasında Tablo 7'de görüldüğü gibi zemin yükü ( $W_e$ ) etkisi, taşıt yüklerinden dolayı oluşan hareketli yüklere ( $W_L$ ) göre daha baskındır.
2. Zemin-boru etkileşimi dikkate alınarak sonlu eleman analiz yöntemi ile yapılan parametrik sayısal analizlerden elde edilen kesit tesirleri (Tablo 12 ve Tablo 13) sunulmuştur. Boru çapı ve dolgu yüksekliği artırıldığında boru kesitindeki eğilme momentleri ve eksenel kuvvetlerde beklenildiği gibi artış meydana gelmiştir. Sonlu elemanlar ağı sıklığının ortadan inceye doğru artırılması boruda meydana gelen kesit tesirlerini etkilemiş ve ağı sıklığının artmasına bağlı olarak moment değerlerinde Şekil 8'de görüldüğü gibi yaklaşık %40, eksenel kuvvet değerlerinde ise yaklaşık %15 oranında artış meydana gelmiştir.
3. Zemin-boru etkileşiminin dikkate alındığı sayısal analizler ve doğrudan tasarım yöntemine göre belirlenen eğilme momentleri karşılaştırıldığında, SIDD ile hesaplanan eğilme momentlerinin sayısal analizlere göre belirlenen eğilme momenti değerlerinden

#### Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı

daha büyük olduğu görülmüştür. Böylece SIDD yöntemine göre yapılan tasarımın zemin-yapı etkileşimi dikkate alınan tasarımlara göre daha güvenli tarafta kaldığı söylenebilir.

4. Çalışma kapsamında SIDD yönteminde Tip 4 gömülme koşullarına göre zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak yapılan parametrik sayısal analizlerden Şekil 9'daki abak elde edilmiştir. Bu abak beton borunun üzerindeki dolgu yüksekliği ile boru çapına bağlı olarak gerekli donatı alanını vermektedir. Tasarımcıların pratik kullanımı için oluşturulmuştur.

5. Yapılan sayısal analizlerden elde edilen düşey gerilme dağılımları incelendiğinde, borunun taban bölgesinde gerilme konsantrasyonu meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, SIDD yönteminde kullanılan Heger zemin basıncı dağılımları ile paralellik taşıdığı görülmüştür.

6. Parametrik sayısal analizlerde orta ve ince ağ kullanılarak hesaplanan donatı alanları ile İller Bankası A.Ş'nin gömülü betonarme boru tasarımı için kullandığı donatı alanları karşılaştırılmıştır. Şekil 10'dan da görüldüğü gibi boru çaplarına karşılık gelen gerekli donatı alanlarında orta ağ kullanıldığında 3, ince ağ kullanıldığında 2-2.5 kat fark vardır. Eşitlik 9 'da görüldüğü gibi bu donatı alanlarının hesaplanmasında iç kuvvetlerin büyük etkisi olduğu gibi kullanılan donatı ve beton malzeme dayanımlarının da etkisi olduğu unutulmamalıdır. Bu durum, İller Bankası A.Ş'nin gömülü betonarme borular için gerekli donatı alanlarında oldukça güvenli tarafta kaldığını göstermektedir. Böylece, ülkemizde yapılan betonarme boru tasarımlarının ekonomik olmadığı söylenebilir.

#### Semboller

W	: Toplam yük
$D_i$	: Boru iç çapı
$D_o$	: Boru dış çapı
VAF	: Düşey kemerlenme faktörü
HAF	: Yatay kemerlenme faktörü
$W_e$	: Boru üzerindeki zemin yükü
$W_p$	: Borunun kendi ağırlığından dolayı oluşan yük
$W_f$	: Akışkan yükü
$W_L$	: Hareketli yük
d	: Paspayı
PL	: Prizma yükü
H	: Dolgu yüksekliği
w	: Zemin birim hacim ağırlığı
As	: Birim uzunluk için gerekli eğilme donatısı alanı
g	: $0.85bf_c$
b	: Birim genişlik
h	: Duvar kalınlığı

- $f_c$  : Beton malzeme dayanımı  
 $f_y$  : Donatı malzeme dayanımı  
 $\Phi$  : Direnç faktörü  
 $M_u$  : Birim genişliğe etkiyen tasarım momenti  
 $N_u$  : Birim genişliğe etkiyen tasarım aksel kuvveti  
 $EI$  : Eğilme Rijitliği  
 $EA$  : Aksel Rijitlik  
 $\gamma$  : Birim hacim ağırlık  
 $HS$  : Pekleşen zemin modeli  
 $E_c$  : Elastisite modülü  
 $\gamma_c$  : Beton malzeme yoğunluğu  
 $E_{50}^{ref}$  : Referans elastisite modülü  
 $E_{oed}^{ref}$  : Referans ödometre modülü  
 $E_{ur}^{ref}$  : Referans yükleme boşaltma modülü  
 $m$  : Üstel malzeme sabiti  
 $c^{ref}$  : Kohezyon  
 $C_{mi}$  : Moment hesabı için boru analiz katsayısı  
 $C_{ni}$  : Aksel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısı  
 $C_{vi}$  : Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısı  
 $W_i$  : Boru üzerine gelecek yüklerin toplamı  
 $D_m$  : Boru ortalama çapı  
 $\phi_u$  : İçsel sürtünme açısı  
 $\nu_{ur}$  : Poisson oranı  
 $p^{ref}$  : Referans gerilme  
 $R_f$  : Göçme oranı  
A1-A6 : Toprak basıncının boyutsuz düşey ve yatay bileşenleri  
a – v : Düşey ve yatay gerilmeleri elde etmek için boyutsuz katsayılar

### Kaynakça

- [1] Marston, A., Anderson, A. C, “*The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests on Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe*”, Bulletin 31, Iowa Engineering Experimental Station, Ames, Iowa, 1913.
- [2] Janssen, H.A, “*Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereinesdeutscher Ingenieurs*”, 1895.

- [3] Sargand, S.M, Hazen, G.A., Vaithianathan, E, and Hurd, J.O, “*Performance verification of a concrete pipe*”, Concrete International, July, pp. 23-27, 1995.
- [4] Spangler, M.G, “*The Supporting Strength of Rigid Pipe Culverts*”, Bulletin 112, Iowa State College, 1933.
- [5] Marston, A.”*The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments*”, Paper presented at the Proceedings of the Highway Research Board 30, Washington, D.C, 1930.
- [6] Canadian Standards Association (CSA), “*Design of concrete structures*”, CSA A23.3–04. CSA, Rexdale, Ontario, 2004.
- [7] Kılıç, H., Akinay E., “*Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi*”, Teknik Dergi, 2019 9373-9398, Yazı 548, 2019.
- [8] Rajah, S., McCabe, M., Plattsmier, J. “*Classification and Specification of Bedding and Backfill for Buried Pipelines*”, Pipelines Conference, Miami Beach, Florida, 2012.
- [9] Erdogmus, E., Tadros, M, “*Behavior and Design of Buried Concrete Pipes Phase II*”, Nebraska Department of Roads Research Reports, 75, 2009.
- [10] Allard, E., Nagggar, E., “*Pressure Distribution around Rigid Culverts Considering Soil-Structure Interaction Effects*”, Int. J. Geomech., ASCE, 2016.
- [11] ACPA, “*Concrete Pipe Technology Handbook*”, American Concrete Pipe Association, 1993.
- [12] ASCE 15-98, “*Standard practice for direct design of buried precast concrete pipe using standard installation (SIDD)*”, 2000.
- [13] ACPA, “*Concrete Pipe Design Manual*”, American Concrete Pipe Association, 2011.
- [14] Wong, L., Allouche, E., Dhar, A., Baumert, M., ve Moore, I., “*Long Term Monitoring of SIDD Type IV Installations*” Can. Geotech. J., 43(4), 392-408, 2006.
- [15] ACPA, “*Design Data 5. Multiple Pipe Installations: Trench Condition.*”, American Concrete Pipe Association, 2011.
- [16] ASTM, “*Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass (D-2216–98).*”, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, Pa., 1998.
- [17] ASTM, “*Standard test methods for laboratory compactions of characteristics of soil using standard effort (D-698–00).*”, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, Pa., 2000.
- [18] İller Bankası A.Ş., “*Beton boru çaplarına göre sarmal donatı alanları*”, İller Bankası A.Ş, Ankara, Temmuz 2015.

# Yüksek Hızlı Tren Üst Yapı İhaleleri İçin Teklif Değerlerinin Oyun Teorisi ile Belirlenmesi

Hacı Mehmet ALAKAŞ<sup>1</sup>

Cem KACAR<sup>2</sup>

Emre YAZICI<sup>3</sup>

## ÖZ

Dünyada tren yolu taşımacılığında hız ve rekabet edilebilirlik için yüksek hızlı tren (YHT) kullanımı artmaktadır. Türkiye’de de son yıllarda tren yolunun geliştirilmesi için yeni hatlar inşa edilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye’de inşa edilen YHT hatlarının üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihalelerinde son teklif fiyatın belirlenmesi için matematiksel model oluşturulması amaçlanmıştır. Matematiksel modelde yükleniciler veya teklif vericiler arasındaki çıkar çatışmasını analiz edebilmek için oyun teorisinden faydalanılmıştır. Modelde geçmiş ihalelerdeki verilmiş tekliflerden faydalanılarak, teklif dağılımları belirlenmiştir. Son teklif fiyatın belirlenmesinde kazananın laneti derecesini minimize etmek için, geçmiş ihale teklifleri kullanılarak, deneysel ampirik yaklaşım ile matematiksel model önerilmiştir. Matematiksel model ile incelenen geçmiş ihalelerin standartlarında yeni yapılacak YHT demiryolu hatlarının üstyapı ve elektromekanik işi yapım ihalelerinin rekabetçi son teklif bedeli hesaplanabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek hızlı tren ihaleleri, oyun teorisi, teklif hazırlama, teklif verme, teklif stratejisi, son teklif fiyatı, kazananın laneti.

## ABSTRACT

### Determination of Bid Values for High Speed Train Superstructure Tenders by Game Theory

The use of high-speed trains (YHT) is increasing for the world's speed and competitiveness in rail transport. In Turkey, new lines have been built for the development of the railway in recent years. This study, it is aimed to create a mathematical model to determine the final bid

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 27 Ağustos 2021 günü ulaşmıştır. 18 Şubat 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2022 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.987879>

1 Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale  
hmalagas@kku.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-9874-7588>

2 Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş., Ankara  
msc.cemkacar@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0001-7334-2122>

3 Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale  
emreyazici92@hotmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-3661-2119>

price in the superstructure and electromechanical construction works of the YHT lines built in Turkey. Game theory was used to analyze the conflict of interest between contractors or bidders in the mathematical model. In the model, the bid distributions were determined by using the bids given in the previous bids. To minimize the degree of the winner's curse in determining the final bid price, a mathematical model is proposed using an empirical approach, using past bids. The competitive final bid price of the superstructure and electromechanical works of the superstructure and electromechanical works of the new YHT railway lines can be calculated in the standards of the previous tenders examined with the mathematical model.

**Keywords:** High speed train auctions, game theory, bid preparation, bidding, bidding strategy, final bid price, winner's curse.

## 1. GİRİŞ

Tüm dünyada ulaştırma sektörü üretim ekonomisinin devamlılığı için büyük önem taşımaktadır. Hem yük hem de yolcu ulaşımı, üretim sürecinin tamamlayıcısı olması yanında; ekonomik, sosyal ve kültürel olarak toplumların gelişmesinde rol oynamaktadır. Ulaştırma sektörü için en büyük alternatiflerden biri demiryolu ulaşımıdır. Dünyada olduğu gibi Türkiye için de önemli ulaştırma seçeneklerinden olan demiryolu, 2003 yılından itibaren Türkiye’de gelişimini hızlandırmıştır. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarının (TCDD) 2018 [1] ve 2020 [2] verilerine göre Türkiye’de şimdiye kadar tamamlanmış olan demiryolu hattının %31,05’i 2003-2020 yılları arasında yapılmıştır. Ayrıca 2020 yılı bütçesinde T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’na ayrılan ödeneklerin %47’si demiryolu yatırımları içindir. Bu oranın 2023 yılında %60 oranında olması beklenmektedir.

Türkiye’deki demiryolu hatları yapım işleri kamu tarafından finanse edilmekte olup ihaleleri ise TCDD tarafından organize edilmektedir. TCDD demiryolu hatları yapım işleri ihale teklifleri istekliler tarafından TCDD’ye kapalı zarf içerisinde sunulur. TCDD, sunulan teklifler arasında en avantajlı teklif sahibi ile sözleşme imzalar. Demiryolu ihalelerinden Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatları ihaleleri, Türkiye’de müşavirlik, altyapı, üstyapı ve elektromekanik yapım işi olarak TCDD tarafından üçe ayrılmıştır. Sırasıyla hattın müşavirlik ihalesi, altyapı ihalesi ve son olarak üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihaleleri yapılır. Müşavir firma belirlendikten sonra, müşavir firmanın hazırladığı projeler kapsamında altyapı ihaleleri yapılır. Altyapı işleri tamamlandıktan sonra üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihale edilir. Bu ihale neticesinde de üstyapı ve elektromekanik yapım işini yapacak yüklenici belirlenir.

Müteahhit firmalar pazarda yerlerini koruyabilmek ve sürdürülebilirliklerini sağlayabilmek adına sürekli rekabet halindedir. Böyle bir rekabetçi ortamda, rekabetçi teklif modeli geliştirilmesi gereklilik haline gelmiştir. Özellikle YHT hatlarının yapımındaki üstyapı ve elektromekanik işleri, inşaat sektöründeki diğer yapım işlerine göre daha spesifik olduğundan dolayı, bu çalışmada YHT üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihaleleri için rekabetçi teklif modeli geliştirilmesine odaklanılmıştır.

Çalışmada geçmiş üç ihale incelenerek YHT ihalelerinde teklif vericilerin teklif ortalamaları üzerinde ve hatta bazı teklif vericilerin TCDD’nin yaklaşık maliyeti üzerinde teklif verdiği tespit edilmiştir. Bu sorunları ortadan kaldırabilmek veya minimize etmek adına, geçmiş

ihale verileri dikkate alınarak gelecekte yapılacak ihaleler için optimum teklif davranışı ortaya koyulabilir. Bu hipotez doğrultusunda çalışmada aşağıdaki soruların cevapları aranacaktır:

- YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalelerinin özellikleri dikkate alınarak teklif hazırlamak için hangi yol izlenmelidir?
- İhale teklifinin belirlenmesinde nasıl bir strateji izlenmelidir?
- İhale teklifi hazırlanırken hangi değerler ve formülasyon kullanılarak teklif değeri belirlenmelidir?
- İhale teklifi hazırlamada hangi kıstaslar dikkate alınmalıdır?
- Oyun teorisi ile ihale teklifi hazırlamak firmaya nasıl bir yarar sağlayacaktır?

İhalelerde sunulan teklifin, işin kazanılabilecek değerinden, ihalenin yapısına göre, daha düşük veya yüksek olması ihtimali söz konusu olabilir. Bu ihtimaller oyun teorisinde “kazananın laneti” olarak açıklanmaktadır. YHT hattı yapım ihalelerinde “kazananın laneti” ihaleyi kazananın daha yüksek bir bedelle ihaleyi kazanma ihtimali varken daha düşük teklif verip ihaleyi kazanması ile açıklanır. Çalışmada son teklif fiyatın belirlenmesinde oyun teorisi kapsamındaki kazananın laneti derecesini minimize edebilmek için deneysel ampirik bir yaklaşım matematiksel modele entegre edilmiştir. Ayrıca son teklif fiyatın belirlenmesinde, yükleniciler veya teklif vericiler arasındaki çıkar çatışması göz önüne bulundurulup oyun teorisinden faydalanılarak matematiksel model sunulmuştur. Önerilen matematiksel model ile incelenen geçmiş üç ihalenin standartlarında yeni yapılacak YHT hatlarının üstyapı ve elektromekanik işi yapım ihalelerinin rekabetçi son teklif bedeli hesaplanabilmektedir.

Çalışma oyun teorisinin YHT hatlarının yapım ihalelerine uygulanması ile literatüre öncülük etmektedir. Ayrıca oyun teorisi ile maliyet tahmini yapılması bu çalışma vasıtasıyla Türkiye’de ilk kez uygulanmıştır. Oyun teorisi ile geçmiş teklif davranışlarına göre teklif vericilerin kazancını maksimize edecek şekilde teklif fiyatını optimize etmek mümkündür. Dolayısıyla oyun teorisi ile oluşturulan matematiksel model, regresyon analizlerinden elde edilen sonuçlara kıyasla daha gerçekçi hesaplama yapılmasını sağlamaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde incelenen konu ve ele alınan problem ile ilgili genel bilgi verildikten sonra ikinci bölümde literatürde konu ve yöntem ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde demiryolları ve demiryolları ihaleleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde oyun teorisi yöntemi hakkında bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde YHT ihaleleri ve bu ihalelerin bir parçası olan üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihalelerine teklif hazırlama stratejileri, metodu ve hesaplamaları yer almaktadır. Son bölüm ise çalışmanın sonuç kısmını oluşturmaktadır.

## **2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

İhalelerde rekabetçi teklif verme konusu; mühendislik, ekonomi, istatistik ve oyun teorisi alanlarının kapsamındadır. Oyun teorisi, karmaşık problemlerin çözülebilmesi ve stratejik karar vermede etkili olabilmesi nedeniyle araştırılması literatürde önemli bir yer tutmaktadır.

Oyun teorisi ile teklif stratejilerinin belirlenmesi konusunda matematiksel yaklaşımla optimum davranış modellenmektedir. Oyun teorisi kapsamındaki ihale türleri için rekabetçi teklif davranışlarının teorik analizini Milgrom ve Weber [3] çalışmalarında açıklamışlardır. Her ne kadar teorik yaklaşım strateji belirlemede faydalı olsa da, uygulanabilirlik teorik yaklaşımın etkinliğini ölçen bir faktördür. İhalelerde teklif stratejilerinin belirlenmesi için üretilen matematiksel modellerin uygulanabilirliğinin sınanması ile gelecekteki ihaleler için tekliflerinin belirlenmesi ve kazanan lanetinin minimize edilmesi Dyer ve Kagel [4] tarafından incelenmiştir. İhalelerde teklif stratejisi belirlenmesi konusu inşaat sektörü üzerinde uygulanmıştır. Chen [5] çalışmasında basitleştirilmiş oyun teorisi ile inşaat sektöründe gelecekteki ihalelerde teklif stratejisi belirlenebilmesi için matematiksel model oluşturmuştur. Jofre-Bonet ve Pesendorfe [6] çalışmalarında geçmişte yapılan otoyol ihaleleri teklif verileri kullanılarak, gelecekteki ihaleler için maliyet tahmininde bulunmuşlardır. Athey ve Levin [7] çalışmalarında ise geçmiş zaman ihalelerindeki teklifler göz önüne alınarak bir teklif modeli geliştirmişlerdir. Teklif stratejileri belirlenmesinde kazananın laneti konusu göz önünde bulundurulmalıdır. Her ne kadar verilen teklif en rekabetçi teklif olsa da şayet ikinci teklif ile kazanan teklif arasında fark bulunuyorsa, kazanan teklifi sunan isteklinin teklifi ile ikinci teklif arasındaki fark masada bırakılmış olur. Kazananın laneti olarak tanımlanan bu durumun etkisinin azaltılması [8]'de ele alınmıştır. Kimi zaman firmalar için teklif sunmamak teklif sunmadan daha avantajlı olabilecektir. İhaleye teklif sunum kararının incelenmesi [9]'da sınanmıştır. Türkiye'deki yapım işi ihalelerinde en düşük teklifi sunan isteklinin teklifi ihaleyi kazanmaktadır. En düşük teklifin kazandığı ihalelerde stratejilerin belirlenmesini ortaya koyan çalışmalarda mevcuttur [10].

Türkiye'de ise maliyet tahmini konusunda sadece regresyon-kolerasyon analizi kullanılmıştır. Regresyon-kolerasyon analizi her ne kadar gelecekteki maliyetlerin belirlenmesi için uygun bir yaklaşım olsa da ihalelere katılacak istekliler için regresyon-kolerasyon analizinin tek başına yeterli rehberliği sağlaması mümkün olmayacaktır. Çünkü oyun teorisi yaklaşımında teklif vericilerin arasındaki çatışmalar incelenmektedir ancak regresyon-kolerasyon analizlerinde incelenememektedir. Dağdeviren ve Kaymak [11] çalışmasında beton istinat duvarları için regresyon ve kolerasyon analizi ile maliyet tahmininde bulunmuşlardır. Türkiye'de Türk Lirası (TRY)'nin Amerikan Doları (\$) karşısındaki değer kaybı Türkiye'deki enflasyon oranlarından daha yüksek olabilmektedir. Dolayısıyla geçmişteki fiyatların güncellenmesi için enflasyon oranları yerine \$ kurları kullanılmalıdır. Uğur ve Sivri [12] çalışmalarında konut projelerinin maliyetleri m<sup>2</sup> cinsinden regresyon-kolerasyon analizi ile incelenerek maliyetlerin Türkiye'deki enflasyon oranlarına bağlı olan üretici fiyat endeksi (ÜFE) ile bağlantısı araştırmışlardır.

Bu çalışmada, aynı standarttaki geçmiş ihale teklif verileri oyun teorisi ile değerlendirilerek ve fiyatlar dolar cinsinden güncellenerek Türkiye'de gelecekte yapılacak olan aynı standarttaki ihaleler için son teklif fiyatını belirleyecek matematiksel model önerilmiştir.

### **3. YHT DEMİRYOLU HATLARI VE YHT İHALELERİ**

Dünyada demiryolu ilk olarak İngiltere'de maden ocaklarında kömür taşımak amacıyla 1825 yılında Teesside'de bulunan Darlington maden ocağını Stockton Limanına bağlayan hattın yapılmasıyla ortaya çıkmıştır. Sanayileşme ile demiryolları, kömür taşıma amacıyla





göre teklifler ihale isteklilerince gerçekleştirilmektedir. Ancak yapım aşamasında olan ve planlanan hat sayılarının fazlalığı nedeniyle ihale sayıları da bu doğrultuda artmaktadır. Bu durum ihale süreçlerinde isteklilerin teklif vermesi ve süreci değerlendirmesi açısından karmaşık bir karar sürecini ortaya çıkarmaktadır.

#### **4. İHALELERDE OYUN TEORİSİ**

Oyun teorisi 1940'lı yılların ortalarında ortaya çıkan bir disiplin olarak kabul edilmektedir. Oyun teorisi bir çatışma diğer bir ifade ile rekabet ortamının söz konusu olduğu durumlardan birden fazla rakibin etkileşimli olarak karar almasını sağlayan bir yaklaşımdır. Bir bireyin başarısının diğer bireyin kararlarına bağlı olduğu durumlarda her bireyin davranışını belirlemek temel amaçtır. Oyun teorisinin üç temel unsuru vardır. Bu unsurlar bireyler “oyuncu” olarak, bireylerin davranışları “oyuncuların stratejileri” sonuç ise “kayıp” veya “kazanç” olarak ifade edilmektedir [15].

Oyun teorisinde oyuncular ve stratejiler sonlu sayıdadır. Aynı zamanda oyuncuların kazanç ya da kayıpları da sınırlıdır. Oyuncular tüm olası stratejileri bilmektedir. Ancak rakiplerin hangi olası strateji ile davranacağını bilmemektedir. Bu nedenle oyuncuların kazanç ya da kayıpları kendi kararlarının yanı sıra rakibin kararına da bağlıdır. Oyuncuların olası tüm stratejileri aynı ölçü biriminde ve hesaplanabilir olmalıdır. Bunlar oyun teorisinin temel varsayımları olmakla birlikte en önemli varsayımlarında birisi de oyuncuların akılcı davranarak en kazançlı durum için rasyonel hareket etmesidir [15].

Oyun teorisinde oyun kuralları belirlenmiştir ve oyunun kuralları değiştirilmez. Tüm oyuncular oyun kurallarını bilerek oyuna katılırlar. Bu sebeple oyunu kurallarına ait bilgilerin genel bilgi olduğu varsayılır. Katılımcıların özel değerlendirmelerinin, herkes tarafından bilinmesi durumuna tam bilgili oyunlar denilmektedir. Tam bilgili oyunlarda katılımcıların stratejileri genel bilgidir. Katılımcıların sadece kendi değerlendirmelerini bildiği durumlara ise eksik bilgili oyunlar denilmekte olup; bu durumda katılımcıların stratejileri asimetric bilgidir.

Oyun teorisinde sosyal, ekonomik ve politik başta olmak üzere birçok karar durumu incelenebilmektedir. Sosyal olarak bakıldığında seçim stratejileri, politik olarak bakıldığında iki ülke arasındaki soğuk savaş politikalarının belirlenmesi gibi birçok karar durumu oyun teorisi ile incelenebilmektedir. Ekonomi veya iktisadi alanda bakıldığında ise özellikle rekabet ortamının söz konusu olduğu durumlara verilecek örneklerin sayısı oldukça fazladır. İktisadi alanda özellikle ihale teorisi son yıllarda ilgi görmeye başlamıştır. İhaleler oyun teorisinin varsayımlarının incelenmesine imkan tanınması ile oyun teorisi ile daha etkin bir şekilde tasarlanabilmektedir. Oyun teorisi ile incelenen ihalelerde tam bilgili ve eksik bilgili ihaleler olarak sınıflandırılabilir.

Tam bilgili ihalelerde teklif verici diğer teklif vericilerin teklif değerlerini bilir. Bu duruma gerçek hayatta çok rastlanmaz. Ancak tam bilgili ihaledeki teklif davranışı eksik bilgili ihale davranışına temel oluşturmaktadır. Tam bilgili ihalede verilecek teklifler aslında tüm katılımcılar tarafından bilindiği kabul edildiğinden, verilecek teklifler bir dağılımla incelenebilir. Belirlenen dağılıma istinaden ikinci tekliften daha az teklifin belirlenebileceği olasılık dilimi hesaplanır [15].

Tam bilgili ihalelerde  $v = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$  değer vektörleri tüm teklif verecekler tarafından bilinir. Her bir  $i$  oyuncusu için kazanç fonksiyonu  $u_i = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$  olacağından kazanacak teklifin hangisi olacağı, tekliflerin bir dağılım ile incelenmesiyle belirlenebilecektir. Dolayısıyla  $i$  oyuncusu özel değerlendirmelerini yapmasıyla  $b_i \geq v_i$  davranışıyla teklifte bulunacaktır. En düşük teklifi veren birinci oyuncunun ihale konusu değerlendirmesi  $v_1 \leq v_2$  şeklindedir. Birinci oyuncu  $b_1 \leq v_2$  teklif koşulunu sağlayarak ihaleyi kazanır. Eğer ihaleye katılımcı sayısı birden fazlaysa, ihaleyi kazanmak isteyen  $i$  oyuncusunun  $b_i = v_2$  koşulunu sağlayan teklifi vermesi gerekir. Çünkü  $b_2$  teklifi ile  $v_2$  arasında epsilon değeri kadar  $b_2 = v_2 + \epsilon$  fark bulunmaktadır. Dolayısıyla  $b_i = v_2$  teklifini veren ihaleyi kazanacaktır.

Tam bilgili ihalelerde Nash dengesi için şöyle bir çıkarım ortaya koyulabilir: Bir oyunda oyuncuların en uygun stratejiyi seçerek, en yüksek kazançlara yaklaşabildikleri durum varsa  $b_2 - \epsilon$  koşulu sağlanması için bu oyun yaklaşık Nash dengesine sahiptir. Diğer bir deyişle oyunda benzersiz bir Nash dengesi bulunmamaktadır. Birinci oyuncu, ikinci oyuncunun teklifinden daha düşük teklifi vermesi durumunda  $b_2 - b_1$  kadar kazanç sağlar. Birinci oyuncu, ikinci oyuncunun teklifinin  $-\epsilon$  kadar düşük teklifini sunmasıyla oyunu kazanmaktadır. Burada  $\epsilon$  değerinin ne kadar küçük olduğunun belirlenmesi için teklif dağılımları baz alınır.  $\epsilon$  değeri sürekli güncellenerek pozitif kazanç sürekli artırılabilir olduğundan dolayı oyunun Nash dengesi, yaklaşık Nash dengesi olacaktır.

Eksik bilgili ihalelerde ise oyuncular diğer oyuncuların tekliflerini bilmemektedir. Bundan dolayı tam bilgili ihalelerde olduğu gibi ikinci en iyi teklife göre bir strateji izlemek mümkün değildir. Eksik bilgili ihalelerde ise geçmiş benzer ihalelerdeki teklifler incelenerek regresyon denklemi elde edilebilir ve yeni ihalenin teklifi hesaplanabilir. Böylelikle en iyi ikinci teklif tahmin edilip, bu değere göre bir teklif sunulabilir.

#### **4.1. TCDD İhalelerinin Oyun Teorisi ile İncelenmesi**

Oyun teorisi ile teklif stratejilerinin belirlenmesi konusunda matematiksel olarak optimum davranışın modellenmesi yapılabildiğinden, YHT üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihalelerinin rekabetçi teklif modeli de oyun teorisi ile oluşturulmuştur. Çünkü yapısı gereği YHT üstyapı ve elektromekanik yapım işi ihaleleri, oyun teorisi ihale türlerinden birinci fiyat kapalı zarf ihale teklif modeliyle incelenebilir. Bu amaçla teklif modelinde gelecekte yapılacak ihalelere rehber olması için aynı standartta geçmişte yapılmış Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy, Polatlı-Uşak Üstyapı ve Elektromekanik işi ihaleleri ele alınmıştır.

#### **4.2. Tam Bilgili Oyun Olarak İhalelerin İncelenmesi**

Yerköy-Sivas YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşinin 14.10.2016 tarihinde ihalesi onaylanmış ve 25.10.2016 tarihinde işin açık ihale usulüyle ihalesi yapılmıştır. TCDD 13.07.2017 tarihinde 1.083.690.000,00 TRY teklifini veren Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi Anonim Şirketi ile sözleşme imzalamıştır. Yerköy-Sivas YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşinin için TCDD tarafından belirlenmiş olan yaklaşık maliyet 1.829.316.995,09 TRY'dir. Yerköy-Sivas YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşinin proje başlangıcı 184+400,00 ve proje bitişi 465+500,00 çift hat olarak ihale dokümanlarında verilmiştir. Buradan proje uzunluğu 281.100,00 mt olarak hesaplanır. 25.10.2016 tarihinde ihalesi yapılan Yerköy-Sivas YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşinin ihalesinin

## Yüksek Hızlı Tren Üst Yapı İhaleleri İçin Teklif Değerlerinin Oyun Teorisi ile Belirlenmesi

tekliflerinin \$ değerine dönüştürülebilmesi için Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB) 'nin 24.10.2016 tarihindeki \$ satış kuru kullanılmıştır. 24.10.2016 tarihinde TCMB \$ satış kuru 3,0780 TRY 'dir. Tablo 1'de Yerköy-Sivas YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesine ait teklifler TRY ve \$ cinsinden gösterilmiştir.

Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik işinin 11.05.2017 tarihinde ihalesi onaylanmış ve 22.05.2017 tarihinde işin açık ihale usulüyle ihalesi yapılmıştır. TCDD, 20.11.2017 tarihinde 779.411.346,35 TRY teklifini veren Doğu İnşaat ve Ticaret Anonim Şirketi ile sözleşme imzalamıştır. Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi için TCDD tarafından belirlenmiş olan yaklaşık maliyet 1.109.719.156,88 TRY'dir. Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi'nin proje başlangıcı 012+263,30 ve proje bitişi 184+400,00 çift hat olarak ihale dokümanlarında verilmiştir. Buradan proje uzunluğu 172.137,00 mt olarak hesaplanır. 22.05.2017 tarihinde ihalesi yapılan Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesinin tekliflerinin \$ değerine dönüştürülebilmesi için TCMB 'nin 18.05.2017 tarihindeki \$ satış kuru kullanılmıştır. 18.05.2017 tarihinde TCMB \$ satış kuru 3,6193 TRY 'dir. Tablo 1'de Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesine ait teklifler TRY ve \$ cinsinden gösterilmiştir.

Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik işinin 01.11.2017 tarihinde ihale onaylanmış ve 14.11.2017 tarihinde işin açık ihale usulüyle ihalesi yapılmıştır. TCDD, 28.05.2018 tarihinde 1.819.779.082,81 TRY teklifini veren KMB Metro İnşaat Altyapı Taahhüt Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi ve YSE Yapı Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi ortaklığı ile sözleşme imzalamıştır. Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi için TCDD tarafından belirlenmiş olan yaklaşık maliyet 2.198.274.399,72 TRY'dir. Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik işinin proje başlangıcı 000+186,00 ve proje bitişi 329+500,00 çift hat olarak ihale dokümanlarında verilmiştir. Buradan proje uzunluğu 329.314,00 mt olarak hesaplanır. 14.11.2017 tarihinde ihalesi yapılan Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesinin tekliflerinin \$ değerine dönüştürülebilmesi için TCMB 'nin 13.11.2017 tarihindeki \$ satış kuru kullanılmıştır. 13.11.2017 tarihinde TCMB \$ satış kuru 3,8728 TRY 'dir. Tablo 1'te Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesine ait teklifler TRY ve \$ cinsinden gösterilmiştir.

Tablo 1 - Yerköy-Sivas Teklifleri

Sıra	Yerköy-Sivas		Kayaş - Yerköy		Polatlı - Uşak	
	Teklif Bedeli (TRY)	Teklif Bedeli (\$)	Teklif Bedeli (TRY)	Teklif Bedeli (\$)	Teklif Bedeli (TRY)	Teklif Bedeli (\$)
1	1.083.690.000,00	352.076.023,39	767.530.540,23	212.066.018,35	1.736.118.502,66	448.285.091,58
2	1.184.999.000,00	384.989.928,53	779.411.346,35	215.348.643,76	1.819.779.052,81	469.887.175,38
3	1.214.886.000,00	394.699.805,07	845.530.629,89	233.617.171,80	1.947.400.000,00	502.840.322,25
4	1.248.553.000,00	405.637.751,79	857.657.166,00	236.967.691,54	1.967.000.000,00	507.901.260,07
5	1.248.966.000,00	405.771.929,82	870.300.000,00	240.460.862,60	1.968.562.012,68	508.304.589,10
6	1.317.000.000,00	427.875.243,66	877.827.604,91	242.540.713,65	1.975.167.766,95	510.010.268,27
7	1.348.539.000,00	438.121.832,36	883.016.380,88	243.974.354,40	2.088.400.900,00	539.248.321,63
8	1.362.500.000,00	442.657.569,85	890.844.000,00	246.137.098,33	2.121.628.081,02	547.827.949,03
9	1.398.200.000,00	454.256.010,40	915.900.000,00	253.059.983,97	2.159.849.396,00	557.697.117,33
10	1.444.244.000,00	469.215.074,72	948.745.621,12	262.135.114,83	2.259.969.839,29	583.549.328,47
11	1.464.182.000,00	475.692.657,57	978.969.396,83	270.485.838,93	3.590.224.760,55	927.035.932,80
12	1.569.449.000,00	509.892.462,64	1.045.371.579,89	288.832.531,12		

İncelenen üç YHT ihalelerinde tam bilgili ihaleler olması kabulüyle Chen [5]'e göre bu üç ihale teklifleri normal dağılım ile incelenebilir. Şayet bu üç ihale tam bilgili ihale olsaydı; teklif vericiler normal dağılıma göre kazanan teklifin olasılığını hesaplayarak  $-\epsilon$  minimizasyonunu belirleyebilirlerdi. Bu üç ihalenin normal dağılım incelemesi için SPSS programı kullanılmıştır.

SPSS programı ile analiz yapılmadan önce Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesindeki 11. katılımcının teklifinin yaklaşık maliyetin %120 'si üzerinde olması nedeniyle aykırı değer olup olmadığı belirlenmelidir. Ovla ve Taşdelen [16] aykırı değer belirlenmesi için Dixon testinin yapılabileceğini ifade etmiştir. Örnek büyüklüğü 11 olduğundan;  $11 \leq n \leq 13$ 'e göre en yüksek değer için aykırı değer Denklem 1'e göre hesaplanır.

$$d = \frac{x_{(n)} - x_{(n-2)}}{x_{(n)} - x_{(2)}} \quad (1)$$

Denklem 1 ile hesaplanan Dixon değeri  $d$ , veri setindeki en büyük veri değeri  $x_{(n)}$  ve veri setindeki ikinci küçük veri değeri  $x_{(2)}$  ile gösterilmiştir.

Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesindeki 11. katılımcının teklifi için  $d$  değeri 0,8079 hesaplanır. Dixon kritik tablo değeri  $d_{n,\alpha}$ ;  $n=11$  şartı ve anlamlılık seviyesi  $\alpha=0,005$  için Verma ve Quiroz-Ruiz [17]'in çalışmasına göre 0,5416 belirlenmiştir.  $d$  değeri  $d_{n,\alpha}$  değerinden büyük olduğundan, %99,95 güvenlilikle, Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesindeki 11. katılımcının teklifi aykırı değerdir ve normal dağılım incelemesinde kullanılamaz.

Böylece üç YHT ihalesi için normallik testleri yapılabilir. Normallik testleri için SPSS programından faydalanılmıştır. Normallik testlerine ilişkin sonuçlar Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2 - Shapiro-Wilk Testleri

<b>Yüksek Hızlı Tren Projesi Üstyapı Ve Elektromekanik İşi</b>	<b>Shapiro-Wilk Anlamlılık Değeri</b>	<b>Shapiro-Wilk Anlamlılık Değeri 0,05'ten Büyük Mü?</b>
Yerköy-Sivas	1,000	Evet
Kayaş-Yerköy	0,826	Evet
Polatlı-Uşak	0,879	Evet

Normal dağılım için Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalelerinin tam bilgili olması varsayımında, ihaleyi kazanan teklifin belirlenmesi standart normal değerler tablosuna göre yapılabilir. Standart normal değerler kullanılarak yapılan hesaplamalara göre kazanan değer Tablo 3'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3 - YHT İhale Tekliflerinin Normal Dağılıma Göre Olasılık Dilimleri

Yüksek Hızlı Tren Projesi Üstyapı Ve Elektromekanik İşi	Kazanan Teklif (TL)	Kazanan Teklifin Yaklaşık Maliyete Göre Tenzilatı	İkinci Teklif (TL)	İkinci Teklifin Yaklaşık Maliyete Göre Tenzilatı	İkinci Teklif Baz Alınarak Kazanacak Teklifin Normal Dağılıma Göre Olasılık Dilimi
Yerköy-Sivas	1.083.690.000,00	%40,7	1.184.999.000,00	%35,22	%13,79
Kayaş-Yerköy	779.411.346,35	%29,76	845.530.629,89	%23,81	%32,74
Polatlı-Uşak	1.819.779.052,81	%17,22	1.947.400.000,00	%11,41	%43,83

Tablo 3'e göre Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihaleleri tam bilgili ihaleler şeklinde ve TCDD tarafından belirlenen yaklaşık maliyet ihale öncesi biliniyor olsaydı; aşağıdaki teklif davranışları gösterilebilirdi:

1. Yerköy-Sivas YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesinde kazanmak için verilecek teklif %13,79 'dan daha küçük bir dilimde olması gerekirdi. Yani yaklaşık maliyete göre tenzilat oranı %35,22 'den büyük hesaplanmalıydı.
2. Kayaş-Yerköy YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesinde kazanmak için verilecek teklif %32,74 'den daha küçük bir dilimde olması gerekirdi. Yani yaklaşık maliyete göre tenzilat oranı %23,81 'den büyük hesaplanmalıydı.
3. Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihalesinde kazanmak için verilecek teklif %43,83 'den daha küçük bir dilimde olması gerekirdi. Yani yaklaşık maliyete göre tenzilat oranı %11,41 'den büyük hesaplanmalıydı. Bu ihalede 11. teklif aykırı değer olduğundan değerlendirme 10 teklif üzerinden yapılmıştır.

Yukarıdaki üç maddeye istinaden, Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihaleleri tam bilgili ihaleler şeklinde olsaydı; karar vericiler aşırı düşük sorgulaması ve tekliflerin ihale dokümanlarına uygun şekilde hazırlanıp sunulması gerekliliğini göz önüne alarak, kendi kişisel değerlendirmelerine göre  $-\epsilon$  değerini ikinci tekliflere göre hesaplamak suretiyle ilgili kazanma olasılığı dilimine girmeyi sağlayabilirlerdi. Benzer şekilde yeni yapılacak YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihaleleri tam bilgili ihaleler şeklinde olabilseydi; karar vericiler tekliflerin uygun dağılımını belirleyerek, kendi kişisel değerlendirmelerine göre  $-\epsilon$  değerini ikinci tekliflere göre hesaplayabilirlerdi.

### 4.3. Eksik Bilgili Oyun Olarak İhalelerin İncelenmesi

Katılımcıların teklif değerlerinin bilinmediği durumdaki ihalelere eksik bilgili ihaleler denir [15]. Eksik bilgili ihalelerde  $v = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$  değer vektörleri teklif vericiler tarafından

bilinmez. Hâlihazırda Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi ihaleleri de eksik bilgili ihalelerdir.

Bu üç ihalede şartnamelere uygun hazırlanan ve kapalı zarfta en düşük teklifi sunan istekli ihaleyi kazanır. Teklif vericiler teklif verme sürecinde kendi özel değerlendirmelerine istinaden farklı proje maliyetleri ve proje durumu hakkında farklı bilgilere erişimi olacaktır. Teklif vericiler TCDD tarafından belirlenen yaklaşık maliyeti ihale öncesi bilmezler. Aynı şekilde teklif vericiler, rakiplerin özel değerlendirmelerini bilmezler. İhaleye fesat karıştırmak yasa dışı olduğundan gizli anlaşmaların ve teklif bilgilerinin değiş tokuşu muhtemel değildir. Bu sebeple teklif verenin tahmini değerinin diğer teklif sahiplerinden bağımsız olduğu varsayılabilir.

TCDD YHT ihaleleri gerçekte eksik bilgili ihale ve birinci fiyat kapalı zarf ihalesi olduğundan i oyuncusu diğer oyuncuların tahmini maliyetlerini bilmez. Her i oyuncusunun  $v_i$  değeri için teklifi j oyuncularına benzer olarak  $b(v_i)$  olacaktır. Karabacak [15] ve Cheng vd. [18]'e göre bir simetrik oyunda tüm oyuncular için bir stratejiyi oynamanın getirisi, oyunculardan bağımsız olarak strateji esaslıdır. Yani bir simetrik oyunda oyuncuların yerlerinin değiştirilmesi oyunun sonucunu etkilemez. Bu tanıma göre simetrik bir oyundaki dengede, her i oyuncusu için  $b_i=b$  denilebilir. Teklif verme fonksiyonu  $b(\cdot)$  ise artan bir fonksiyon olduğundan, i oyuncusunun tahmini değeri  $b^{-1}(b)$  şeklinde gösterilebilir. Teklif veren i oyuncusu  $b_i$  teklifini verdiği elde edilecek kar ise  $(b-v)$  genel gösterim şeklinde ifade edilebilir. Diğer tüm teklif vericiler  $(n-1)$  tahmini maliyetlere sahip olma olasılığı,  $v_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )  $b(v_j)>b_i$  olacak şekilde sıra istatistiğine ve Denklem 2'ye göre  $[1 - F(b^{-1}(b_i))]^{n-1}$  şeklinde ifade edilebilir. Kümülatif dağılım fonksiyonu  $F(\cdot)$  tahmini maliyetlerin dağılımını temsil eder. Teklif veren i oyuncusunun karı Denklem 2'teki gibidir.

$$(b_i - v_i) * [1 - F(b^{-1}(b))]^{n-1} \quad (2)$$

Denklem 2'ye, Yılmaz [19] diferansiyel denklem çözümü uygulanırsa  $b^*(v_i)$  optimal teklifi Denklem 3'teki gibi elde edilir.

$$b^*(v_i) = v_i - \frac{\int_0^{v_i} [1-F(x)]^{n-1} dx}{[1-F(v_i)]^{n-1}} \quad (3)$$

Chen [5]'e göre Denklem 3'teki  $\int_0^{v_i} [1 - F(x)]^{n-1} dx \leq 0$ 'dır. Çünkü  $\int_0^v [1 - F(x)]^{n-1} dx$  eşitliğinin azalan bir fonksiyon olduğunu belirtmiştir. Buna göre  $-\frac{\int_0^{v_i} [1-F(x)]^{n-1} dx}{[1-F(v_i)]^{n-1}} > 0$  eşitliği olduğundan Denklem 3 aslında i oyuncusunun tahmini değeri  $v_i$  üzerine eklemesi gereken fiyatı göstermektedir. Chen [5]'e göre  $F'(x) = f(x)$  Kabulü ile Denklem 3'ün  $v_i$  için türevi alınarak optimum teklif bedeli eşitliği Denklem 4'teki haline getirilebilir.

$$b^*(v_i) = v_i + \frac{1-F(v_i)}{f(v_i)(n-1)} b'(v_i) \quad (4)$$

Denklem 5'te i oyuncusunun optimal teklifi  $b^*(v_i)$ , i oyuncusunun tahmini değeri  $v_i$ ,  $F(v_i)$  i oyuncusunun tahmini değerinin kümülatif dağılım fonksiyonu,  $f(v_i)$  i oyuncusunun tahmini değerinin yoğunluk fonksiyonu, n katılımcı sayısı, optimal teklifin türevi  $b'(v_i)$  olarak ifade

edilmiştir. İncelenen üç ihale teklifleri normal dağılım şeklinde olduğundan Ott ve Longnecker [20]'a göre standart normal dağılım eşitliği  $Z = \frac{x-\mu}{\sigma}$  ile tekliflerin değerlendirilmesi yapılabilir. Chen [5]' e göre kazananın lanetini minimize edebilmek amacıyla standart normal dağılım eşitliği ve sıra istatistiğine göre Denklem 6 ve 7 ampirik denklemleri elde edilebilir.

$$v_{1;n} = \mu + \sigma Z_{1;n} \quad (6)$$

$$E(v_{1;n}) = \mu + \sigma E(Z_{1;n}) \quad (7)$$

Kazananın laneti önlemek için ayarlanmış fonksiyonu  $V^*(v_{1;n}) = v_{1;n} + \varepsilon$  şeklinde tanımlanmıştır [5]. Sonrasında verilecek teklifin gerçek değerini ayarlanmış beklenen değeri olarak  $E[V^*(v_{1;n})] = \mu$  belirterek kazananın lanetinin etkilerini azaltmayı amaçlamıştır. Ayarlanmış beklenen değeri  $E[V^*(v_{1;n})]$  için Denklem 8, 9 ve 10'da geliştirilmiştir.

$$E[V^*(v_{1;n})] = E(v_{1;n}) + \varepsilon \quad (8)$$

$$E[V^*(v_{1;n})] = \mu + \sigma E(Z_{1;n}) + \varepsilon \quad (9)$$

$$\varepsilon = -\sigma E(Z_{1;n}) \quad (10)$$

Böylece ayarlanmış tahmini değer  $V^*(v_i)$  kazananın lanetini önlemek adına Denklem 11'deki gibi gösterilebilir.

$$V^*(v_i) = v_i - \sigma E(Z_{1;n}) \quad (11)$$

Denklem 11'de  $v_{1;n} = v_i$  gösterimi i oyuncusunun n katılımcılı bir ihalede en avantajlı teklifi vermesi kabulüyle yapılmıştır. Denklem 11'deki koşul ideal koşullarda olan bir yaklaşımdır. Gerçek ihalelerde, teklif karar vericileri kazananın lanetinden tam anlamıyla kaçınması olası değildir. Bu nedenle Chen [5] kazananın lanetini minimumda tutmak ve karar vericilerin modelde hesaplanan teklifin pazar şartlarına göre güncelliğini koruyabilmesi için bir düzeltme katsayısı önermiştir. Düzeltme katsayısı  $\beta$ , karar vericilerin aslında alabilecekleri riski de gösteren bir katsayıdır. Düzeltme katsayısı  $\beta$  değeri alınabilecek riske göre  $\beta = [0,1]$  aralığında seçilebilir. Buna göre Denklem 11'in yeni hali Denklem 12'deki gibidir.

$$V^*(v_i) = v_i - \beta \sigma E(Z_{1;n}) \quad (12)$$

Denklem 12 kullanılarak Denklem 5, Denklem 13'teki gibi geliştirilebilir.

$$b^*(v_i) = v_i - \beta \sigma_b E(Z_{1;n}) + \frac{1-F(v_i)}{f(v_i)^{(n-1)}} b'(v_i) \quad (13)$$

Pollarda [21]'a göre normal dağılımın standart snormal dağılıma dönüştürülmesi neticesinde,  $f(v_i)$  ve  $F(v_i)$  fonksiyonları belirlenebilir. Ayrıca teklif vericilerin ihale teklif bedeli tespitinde  $v_i$  tahmini bedelini belirleyebilmek için bir kabulde bulunması gerekir. Bu durum için Chen



[5]  $v_i = \mu$  yaklaşımının yapılabileceğini belirtmiştir. Orlof ve Bloom [22] ile Chen [5]'e göre  $f(v_i)$  ve  $F(v_i)$  fonksiyonları Denklem 14 ve 15'te gösterilmiştir.

$$F(v_i) = G\left(\frac{v_i - \mu}{\sigma}\right) = G(0) = \frac{1}{2} \tag{14}$$

$$f(v_i) = \frac{1}{\sigma} g\left(\frac{v_i - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sigma} g(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \tag{15}$$

Denklem 13 'teki  $b'(v_i)$  ifadesi,  $b^*(v_i)$  optimum teklifinin lineer olması nedeniyle Chen [5]'in belirttiği gibi " $b'(v_i) = 1$ " kabul edilmiştir. Son olarak eksik bilgili ihalelerde optimum teklifi verebilmede Denklem 13'teki optimum teklif standart sapması  $\sigma_b$  için, Denklem 16 kullanılabilir.

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sigma_{bstd}^2}{\sigma^2(Z_{1;n})}} \tag{16}$$

Denklem 16 'da  $x_{r;n}$  değerinin standartlaştırılmış değeri  $Z_{r;n}$ ,  $Z_{r;n}$  'nin varyansı  $\sigma^2(Z_{r;n})$ , geçmiş ihaledeki teklif bedellerinin standart sapması  $\sigma_{bstd}$  ile gösterilmiştir. Böylece Denklem 14,15 ve 16 Denklem 13'te yerine koyularak nihai Denklem 17 bulunur.

$$b^*(v_i) = v_i - \beta \left( \sqrt{\frac{\sigma_{bstd}^2}{\sigma^2(Z_{1;n})}} \right) E(Z_{1;n}) + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sqrt{\frac{\sigma_{bstd}^2}{\sigma^2(Z_{1;n})}}}{n-1} \tag{17}$$

Geçmiş verilere dayanarak bir teklif bedeli oluşturmak için Denklem 17 kullanılır. Denklem parametlerinden olan  $E(Z_{1;n})$  ile  $\sigma^2 Z_{1;n}$  değerleri Tablo 4'te sunulmaktadır. Krishnaiah ve Sen [23]'ün çalışmasından alınan Tablo 4'te normal dağılım için sıra istatistiğine göre beklenen değer (E) ve varyans ( $\sigma^2$ ) değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4 - Normal Dağılım için Sıra İstatistiğinde Beklenen Değer ve Varyans

n	E(Z <sub>r;n</sub> )	σ <sup>2</sup> (Z <sub>r;n</sub> )
2	-0,56419	0,68169
3	-0,84628	0,55947
4	-1,02938	0,49172
5	-1,16296	0,44753
6	-1,26721	0,41593
7	-1,35218	0,39192
8	-1,42360	0,37290
9	-1,48501	0,35735
10	-1,53875	0,34434

11	-1,58644	0,33325
12	-1,62923	0,32364
13	-1,66799	0,31521
14	-1,70338	0,30773
15	-1,73591	0,30104
16	-1,76599	0,29501
17	-1,79394	0,28953
18	-1,82003	0,28453
19	-1,84448	0,27994
20	-1,86748	0,27570

## 5. YHT İHALELERİ İÇİN TEKLİF HAZIRLAMA VE OYUN TEORİSİ İLE TEKLİF DEĞERİNİN TAHMİNİ

Gelecekte yapılacak YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalelerinde örneğin; Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İş devamı olan Uşak-İzmir arası yapılacak YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesinde, teklif değeri ihale bilgi yapısına göre belirlenecektir. Yani teklif değeri ihalenin tam bilgili ihale veya eksik bilgili ihale olmasına göre şekillenecektir. Gelecekte yapılacak YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalelerinde optimum teklif hesabı için izlenecek yol bu bölümde verilecektir.

### 5.1. Bir YHT İhalesi için Teklif Değerinin Hesaplanması

YHT ihalelerinde teklif verme stratejileri değerlendirilmesi için oyun kurallarının belirlendiği ihale dokümanlarının teklif vericiler tarafından temin edilmesi gereklidir. İhaleye teklif verecek olanların ihale dokümanlarını Elektronik Kamu Alımları Platformu (EKAP) üzerinden e-imza kullanarak indirmesi veya TCDD'den satın alması gereklidir. Tüm şartlarda teklif verecek isteklilerin EKAP'a üye olması zorunludur.

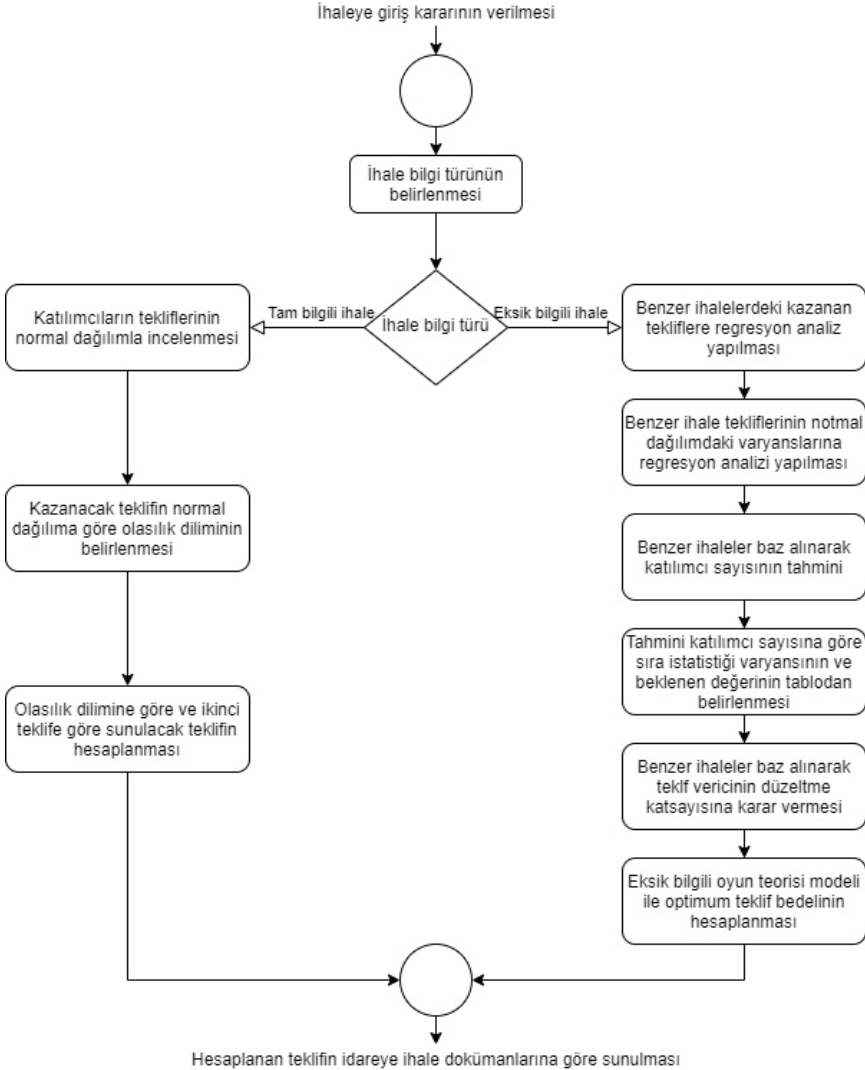
İsteklilerin teklif oluşturmasındaki en önemli şart yeterlik belgeleridir. Yeterlilik belgeleri Türkiye'deki ihale mevzuatında iki başlığa ayrılmıştır. Bu başlıklardan birincisi ekonomik ve mali yeterlik olup, ikincisi de mesleki ve teknik yeterliktir. İsteklilerin gerçek veya tüzel kişi olması, ortak girişim yani iş ortaklığı veya konsorsiyum olması durumuna göre yeterlik kriterleri ayrı ayrı belirlenmiştir. İstekliler bu yeterlik kriterlerini sağladıkları durumda tekliflerini yeterlik belgeleriyle idareye sunmalıdır. Aksi halde teklif kapalı zarfı içinde istenen yeterlik belgelerini sunmayan veya eksik sunan isteklinin teklifi idare tarafından geçersiz sayılacaktır. Bu nedenle, istekli yeterlik belgelerini sağlayıp sağlayamadığını teklif hazırlama sürecinde sınımalıdır. Şayet yeterlik belgelerini sağlayamıyorsa, yeterlik belgelerini sağlayan istekliler ile alt yüklenici sözleşmesi yapma stratejisi kurabilir.

YHT ihalelerinde; istekliler yeterlilik belgeleri şartını sağlaması durumunda, piyasadaki tedarikçilerden TCDD tarafından belirlenen standartlara uygun topladıkları fiyat tekliflerini ve kendi özel değerlendirmelerini TCDD'nin sunduğu birim fiyat cetvellerinde gösterirler.

Birim fiyat cetvelinde her iş kalemi için ayrı ayrı birim fiyatlar isteklilerce bu şekilde belirlenir. Her iş kalemi için teklif fiyatlarının belirlenmesi neticesinde ihale dokümanlarındaki sunum şartlarına göre TCDD'ye teklifler sunulur.

## 5.2. Oyun Teorisi ile Teklif Verme Stratejisinin Belirlenmesi

Oyun teorisi ile teklif stratejisi oluşturmadaki en önemli husus, teklif verilecek ihalenin bilgi yapısıdır. Gelecekte yapılacak YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalelerinde optimum teklif hesabı için izlenecek yol Şekil 2 'de gösterilmiştir.

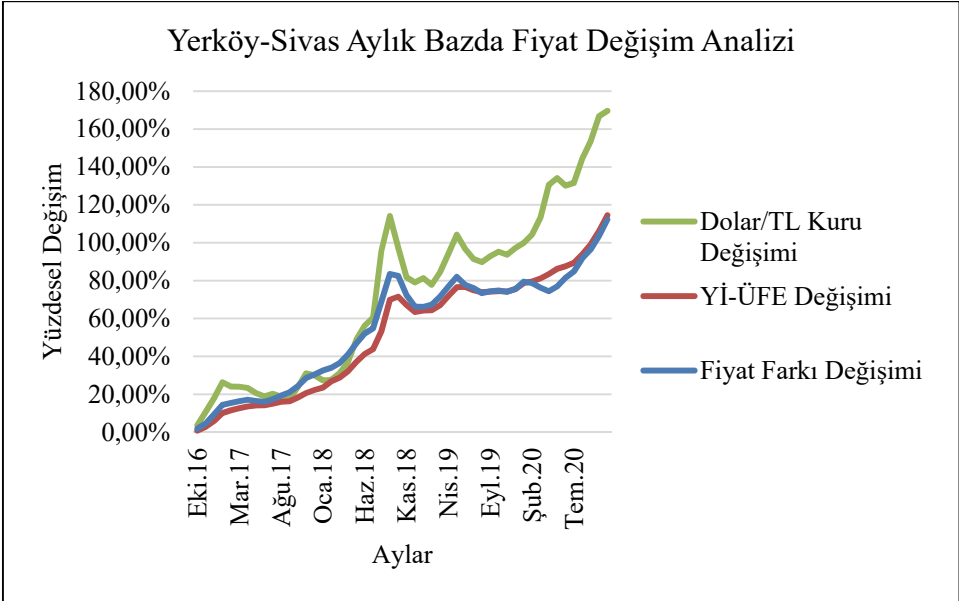


Şekil 2 - Gelecekteki İhalelerde Optimum Teklif Verilmesi İçin İzlenecek Akış Şeması

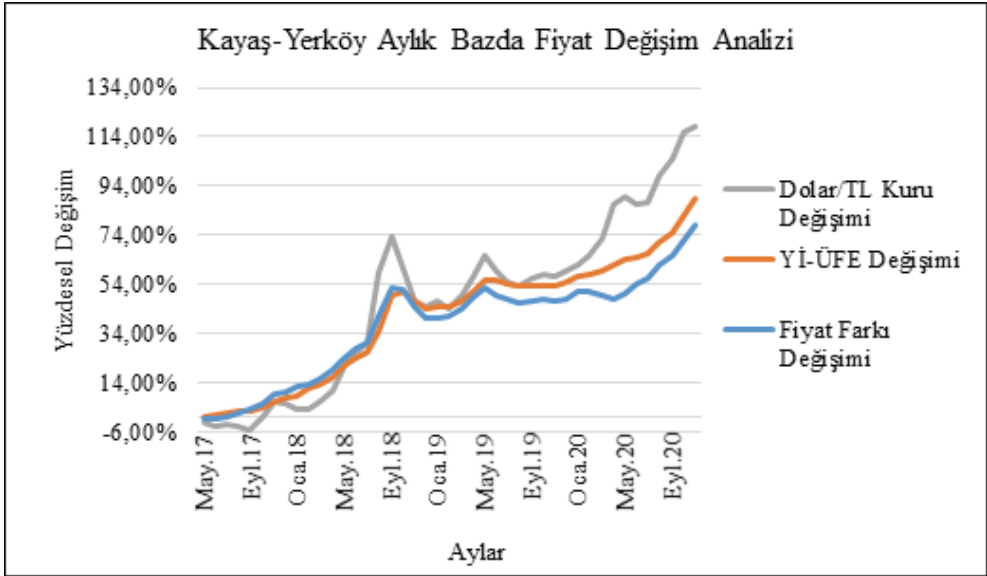
TCDD YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihaleleri eksik bilgili ihalelerdir. Eksik bilgili ihalelerde teklif verici diğer teklif vericilerin teklif değerlerini bilmez. Bu nedenle, Bölüm 4'teki yaklaşımla Denklem 17'yi kullanılarak gelecekte yapılacak olan Uşak-İzmir YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesi için, optimum teklif belirlenebilir. Denklem 15'in gerçek sonucu verebilmesi için Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İş ihalelerinin verileri baz alınacaktır.

Denklem 17'deki  $v_i$  tahmini değeri için, Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İş ihalelerindeki kazanan teklifler kullanılarak regresyon analizi ile doğrusal bir denklem elde edilebilir. YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalelerinin ihale dokümanlarındaki projeler üzerinden gerçeğe en yakın olarak hesaplanabildiği için, kazanan fiyat ile lineer ilişki kurulabilecek en güvenilir değer hat-metre cinsinden demiryolu uzunluğu metrajıdır. Uşak-İzmir YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesinde teklif tahmini için, Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İş ihalelerinin seçilme nedeni ise; neredeyse aynı şartnamelerle ihalelerin yapılmasıdır.

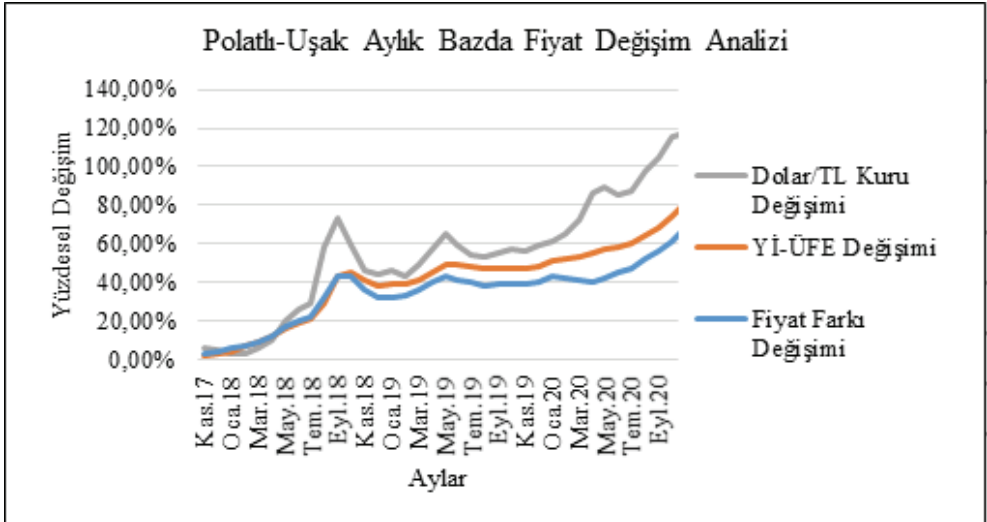
Geçmişteki kazanan tekliflerin günümüze taşınması için de en doğru yöntem, görüleceği üzere \$/TRY kuru değişimi olacaktır. Çünkü zamana göre Türkiye'deki enflasyona bağlı fiyat güncellemeleri \$/TRY kuru değişiminin gerisinde kalmaktadır. Türkiye'de enflasyon değerlerine göre fiyat güncellemesi yurtiçi üretici fiyat endeksi (Yİ-ÜFE) veya üst sınır fiyat katsayıları ile hesaplanmaktadır. Bu katsayılar TÜİK tarafından belirlenmektedir. TÜİK fiyat katsayılarını [24], TÜİK Yİ-ÜFE katsayıları [25] ve aylık ortalama \$/TRY kurları [26] temin edilerek Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak ihalelerinin kazanan tekliflerinin incelenmesi Şekil 3, 4 ve 5'teki gibidir.



Şekil 3 - Yerköy-Sivas İhalesi için Fiyat Değişimi



Şekil 4 - Kayaş-Yerköy İhalesi için Fiyat Değişimi



Şekil 5 - Polatlı-Uşak İhalesi için Fiyat Değişimi

Şekil 3,4 ve 5'te görülebileceği üzere geçmiş teklifler, \$ cinsine çevrilerek regresyon analizi yapılmalıdır. Tablo 1'deki \$ cinsinden teklif bedelleri ile ihale dokümanlarından temin edilen Tablo 5 demiryolu metrajları kullanılarak SPSS programında regresyon analizi yapılmıştır.

SPSS programı ile Denklem 17'deki  $v_i$  değer tahmini için yapılan regresyon analizi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5 - Geçmiş İhalelerin Demiryolu Metrajları

Yüksek Hızlı Tren Projesi Üstyapı Ve Elektromekanik İşi	Hat Uzunluğu (m)	Hat Uzunluğu (km)	Demiryolu Uzunluğu (Hat-metre)
Yerköy-Sivas	281.100,00	281,10	517.583,80
Kayaş-Yerköy	172.137,00	172,14	331.378,00
Polatlı-Uşak	329.314,00	329,31	697.660,00

Tablo 6 - Geçmiş İhalelerde Kazanan Tekliflerin Regresyon Analizi Çıktıları

R <sup>2</sup>	ANOVA Anlamlılık Düzeyi	Katsayı Anlamlılık Düzeyi	Doğrusal Denklem
0,999	0,021	0,021	$y = -1,26 * 10^7 + 6,95 * 10^2 * x$

SPSS programında \$ cinsinden kazanan teklifler ile hat-metre cinsinden demiryolu uzunluğu metrajı değişiminin R<sup>2</sup> testine göre %99,90'ı açıklanabilmektedir. Dhakal [27]'a göre regresyon analizinin anlamlı olabilmesi için SPSS program çıktıları olan ANOVA ve katsayıların anlamlılık değerlerinin 0,05'ten küçük olması gerektiğini belirtmiştir. Tablo 3'e göre Denklem 17'deki  $v_i$  değer için Denklem 18 yazılabilir.

$$v_i = -1,26 * 10^7 + 6,95 * 10^2 * L \quad (18)$$

İncelenen üç ihale için YHT Projesi Üstyapı ve Elektromekanik İşi için kazanan teklif tahmini değere eşit kabul edildiğinde,  $\sigma_b = \sigma_v$  denilebilir. Dolayısıyla Denklem 16 aynı zamanda Denklem 19'daki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_v = \sigma_b = \sqrt{\frac{\sigma^2(b_{std})}{\sigma^2(Z_{1;n})}} \quad (19)$$

Bölüm 4'te yapılan tekliflerin normal dağılım incelemesinde SPSS programından elde edilen varyanslar Tablo 7'de verilmiş olup,  $\sigma^2_{bstd}$  değeri ve hat-metre cinsinden demiryolu uzunluğu metrajı değişimi için regresyon analizi sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir. Tablo 8'de yer alan verilerde görüleceği üzere regresyon analizi neticesinde ANOVA ve katsayıların anlamlılık düzeyleri hesaplanamamıştır. Bunun nedeni ise incelenen veri setinin küçük olmasından kaynaklıdır. YHT hatları ile ilgili fazla ihale yapılmadığından sınırlı verilerle yeni ihalelerde hesaplamalar yapılabilmesi için model önerilmiştir. Yeni ihaleler yapıldığında modelin tekrar analiz edilmesi ve katsayıların güncellenmesi gerekmektedir.

Tablo 7 - Geçmiş Tekliflerin Varyanslarının Dolar Cinsinden Değeri

Yüksek Hızlı Tren Projesi Üstyapı Ve Elektromekanik İşi	Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Döviz Satış Kuru	\$/TRY Satış Kuru Tarihi	Normal Dağılımdaki Tekliflerin Standart Sapması (\$)	Normal Dağılımdaki Tekliflerin Varyansı (\$)
Yerköy-Sivas	3,0780	24.10.2016	44.057.919,49	1.941.100.269.787.320,00
Kayaş-Yerköy	3,6193	18.05.2017	21.561.097,60	464.880.929.716.726,00
Polatlı-Uşak	3,8728	13.11.2017	40.656.342,75	1.652.938.205.805.480,00

Tablo 8 - Geçmiş Tekliflerin Varyanslarının Regresyon Analizi Çıktıları

SPSS Programında Geçmiş Kazanan Tekliflerin Varyanslarının Regresyon Analizi Çıktıları			
R <sup>2</sup>	ANOVA Anlamlılık Düzeyi	Katsayı Anlamlılık Düzeyi	Doğrusal Denklem
1,00	-	-	$y = -6,62 * 10^{15} + 3 * 10^{10} * x - 2,6 * 10^4 * x^2$

$\sigma_{bstd}^2$  değeri ve hat-metre cinsinden demiryolu uzunluğu metrajı değişimi için yapılan regresyon analizinde R<sup>2</sup> testinde sonuç %100'dür. Tablo 8'e göre Denklem 19'daki  $\sigma_{bstd}^2$  değeri için Denklem 20 yazılabilir.

$$\sigma_{bstd}^2 = -6,62 * 10^{15} + 3 * 10^{10} * L - 2,6 * 10^4 * L^2 \quad (20)$$

Denklem 18 ve 20'de L yerine hat-metre cinsinden demiryolu uzunluğu metrajları yazılarak elde edilebilir. Yerköy-Sivas, Kayaş-Yerköy ve Polatlı-Uşak ihaleleri için Denklem 17,18 ve 20 kullanılarak düzeltme katsayısı  $\beta$  değeri hesaplanabilir. Bunun için katılımcı sayısı n=12 seçilerek Tablo 6'dan  $E(Z_{1;n}) = -1,62923$  ve  $\sigma^2(Z_{1;n}) = 0,32364$  belirlenir. Hesaplanan  $\beta$  değerleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9 - Geçmiş İhaleler İçin Hesaplanan  $\beta$  Değerleri

Yüksek Hızlı Tren Projesi Üstyapı Ve Elektromekanik İşi	İkinci Teklif, $b^*(v_i)$ (\$)	Hesaplanan Düzeltme Katsayısı $\beta$
Yerköy-Sivas	384.989.928,53	0,23010
Kayaş-Yerköy	233.617.171,80	0,18730
Polatlı-Uşak	502.840.322,25	0,19240

Gelecekte yapılacak olan YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesinde optimum teklif hesabı için düzeltme katsayısı  $\beta$  Tablo 9'a göre belirlenir. Tüm geçmiş ihalelerde hesaplanan teklifin kazanmasını sağlayan  $\beta=0,18730$ 'dur. Tabi ki teklif vericiler  $\beta=[0,1]$  aralığında olduğunu bilerek ve risk olarak daha yüksek bir  $\beta$  seçebilir. Ancak  $\beta=[0, 0,23010]$  aralığında yapılacak seçim kazanan bölge aralığında olabilecektir.

Gelecekte yapılacak olan YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesinde optimum teklif, Tablo 10'daki değerler Denklem 17'ye yazılarak hesaplanabilir.

*Tablo 10 - Optimum Teklif Eşitliği Değerleri*

<b>Değer</b>	<b>Kaynak</b>
L	Gelecekte yapılacak ihalenin ihale dokümanları.
$v_i$	Denklem 18'den hesaplanır.
$\sigma^2_{bstd}$	Denklem 20'den hesaplanır.
n	Geçmiş ihalelerden n=12 tahmin edilir.
$E(Z_{1;n})$	Tablo 4'ten belirlenir.
$\sigma^2(Z_{1;n})$	Tablo 4'ten belirlenir.
$\beta$	Geçmiş ihalelerden $\beta=0,18730$ kullanılabilir.

Tablo 10 ve Denklem 17'ye göre yapılan hesapta gelecekte yapılacak olan YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesindeki  $b^*(v_i)$  değeri kazananın lanetinin minimum tutulmuş olarak \$ cinsinden bulunur. TCDD'ye teklif sunulması öncesi güncel \$/TRY kurunun sonuç ile çarpılmasıyla TCDD'ye sunulacak teklif TRY cinsinden elde edilir.

## **6. SONUÇ**

Bu çalışmada YHT üstyapı ve elektromekanik ihaleleri için Türkiye'deki ihale mevzuatına göre teklif oluşturmada önemli stratejilerden bahsedilmiştir. İncelenen geçmiş üç ihale standardına göre; gelecekte yapılacak YHT üstyapı ve elektromekanik ihaleleri için, oyun teorisi teklif verme modeli kullanılarak, teklif vericiler için rekabetçi teklif oluşturmayı sağlayacak matematiksel model olan Denklem 17 ile sunulmuştur. Denklem 17 ile incelenen geçmiş üç ihale verilerinden oluşturulan Çizelge 10 değerleri yazılarak, teklif vericiler, kazananın lanetinin minimum tutulmuş son teklif tutarını, \$ cinsinden belirleyebilir.

Denklem 17'ye Çizelge 10 değerleri yazılmasıyla geçmiş üç ihale tekliflerine göre teklif bedeli hesaplanabildiğinden dolayı, matematiksel model uygulanabilir ve kabul edilebilirdir. Çünkü matematiksel model geçmiş üç ihaleye göre düzenlenmiş olup; ampirik yaklaşımla düzeltme katsayısı uygulanarak geçmiş üç ihale için hesaplanan teklifin kazanan aralıkta olması sağlanmıştır. Sonrasında geçmiş üç ihalede matematiksel model test edildiğinde matematiksel modelin uygulanabilir olduğu görülebilir. Matematiksel model, günlük uygulamada hesabın kolay yapılabilmesi için olabildiğince sadeleştirilmiştir. Teklif vericiler



matematiksel modeli kullanırken hesap makinelerinden faydalanabileceği gibi, Excel vb. uygulamalar ile de sonuca erişebilirler.

İsteklilerin YHT ihalelerine hazırlanırken, ilgili ihale doküman şartlarını sağlayıp sağlamadıklarını sınamaları gerekmektedir. İstekliler, bölüm 5.1’de anlatılan süreçleri takip etmek suretiyle tekliflerini hazırlamalı ve TCDD’ye sunmalıdırlar.

YHT ihalelerinde TCDD’ye sunulacak tekliflerde ihalenin bilgi yapısına göre strateji geliştirilmelidir. Tam bilgili ihalelerde verilecek teklifler tüm teklif vericiler tarafından tekliflerin dağılımına göre kazanacak teklif çok basit bir şekilde belirlenebilir. Yapılan incelemelerde görüldüğü üzere gelecekteki YHT üstyapı ve elektromekanik işi ihalesi tekliflerinin de normal dağılımda olması beklenebilir. Ancak gerçek hayatta YHT ihaleleri eksik bilgili ihaleler olduğundan dolayı istekliler sadece kendi verecekleri teklifleri bilirler. Dolayısıyla teklif belirleme aynı standartlarda yapılmış geçmiş ihaleler incelenerek gelecekteki ihaleye teklif oluşturulmalıdır.

Bu çalışmada sunulan model ile telekomünikasyon, ulaştırma ve elektrik gibi çeşitli sektörlerde benzer alt ve üst yapı ihalelerine teklif oluşturmak için çalışmalar yapılabilir. İhale prosedürleri benzer olan demiryolu hatları ve şehiriçi raylı hatların üst yapı ve elektromekanik ihalelerine örnek bir çalışmadır. Bu kapsamda ileride benzer alanlarda yapılacak olan ihaleler için çalışmalar yapılabilir.

## **Teşekkür**

Yazar Emre YAZICI, Yöneylem Araştırması alanında Yüksek Öğretim Kurumu tarafından YÖK 100/2000 Doktora Bursu kapsamında bursiyer olarak desteklenmektedir.

## **Semboller**

$T_{ort1}$	Geçerli tekliflerin aritmetik ortalaması
$\Sigma$	Geçerli tekliflerin standart sapması
$\sigma^2$	Geçerli tekliflerin varyansı
$T_i$	Standart sapma aralığında kalan teklifler
$T_{ort2}$	Standart sapma aralığında kalan tekliflerin ( $T_i$ ) aritmetik ortalaması
$C$	İkinci aritmetik ortalamanın yaklaşık maliyete oranı
$K$	$C$ değerine göre bulunan değer
$N$	Sınır değer katsayısı
$n$	İhaleye katılan oyuncu sayısı
$u$	Kazanç fonksiyonu
$u_i$	$i$ oyuncusunun kazanç fonksiyonu
$v$	Tahmini değer vektörü
$v_i$	$i$ oyuncusunun tahmini değer vektörü

$b$	Teklif bedeli
$b_i$	$i$ oyuncusunun teklifi
$\varepsilon$	Epsilon değeri
$d$	Hesaplanan Dixon değeri
$d_{n,\alpha}$	Dixon kritik tablo değeri
$x_{(n)}$	Veri setindeki en büyük veri değeri
$x_{(2)}$	Veri setindeki ikinci küçük veri değeri
$\alpha$	Anlamlılık seviyesi
$x_j$	Dizideki $j$ . değişken
$x_{j:n}$	$n$ sayılı değişkene sahip bir dizideki $j$ . sıra istatistiği
$P(\cdot)$	Olasılık fonksiyonu
$F(\cdot)$	Kümülatif dağılım fonksiyonu
$f(\cdot)$	Yoğunluk fonksiyonu
$Z$	Standart normal dağılıma sahip rasgele değişken
$\mu$	Geçerli tekliflerin ortalaması
$x_{r:n}$	$n$ sayılı değişkene sahip bir dizideki $r$ . sıra istatistiği
$Z_{r:n}$	$x_{r:n}$ değerinin standartlaştırılmış değeri
$E(x_{r:n})$	$r$ . sıra istatistiğinin beklenen değeri
$E(Z_{r:n})$	$Z_{r:n}$ 'nin beklenen değeri
$\sigma^2(Z_{r:n})$	$Z_{r:n}$ 'nin varyansı
$b_{1:n}$	$n$ katılımcılı bir ihalede en düşük teklif bedeli
$v_{1:n}$	$n$ katılımcılı bir ihalede en düşük tahmini değer
$\sigma_v$	İhaledeki tahmini değerlerin standart sapması
$\sigma_b$	İhaledeki teklif bedellerinin standart sapması
$b(\cdot)$	Teklif verme fonksiyonu
$b^*(v_i)$	$i$ oyuncusunun optimal teklifi
$V^*(\cdot)$	Kazananın laneti önlemek için ayarlanmış fonksiyon
$\beta$	Düzeltilme katsayısı
$G(\cdot)$	Standart normal dağılımın kümülatif dağılım fonksiyonu
$g(\cdot)$	Standart normal dağılımın yoğunluk fonksiyonu
$\sigma_{\text{bstd}}^2$	Geçmiş ihaledeki teklif bedellerinin standart normal dağılımdaki varyansı
$L$	Hat-metre cinsinden demiryolu uzunluğu metraji

### **Kaynaklar**

- [1] TCDD, Demiryolu Sektör Raporu 2017. TCDD (2018), <https://www.tcdd.gov.tr/files/istatistik//2017sektorrapor.pdf> (Erişim Tarihi: 03.07.2018)
- [2] TCDD, 2015-2019 İstatistik Yıllığı. TCDD (2020), <https://www.tcdd.gov.tr/files/istatistik//20152019yillik.pdf> (Erişim Tarihi: 10.07.2020)
- [3] Milgrom, P. R. ve Weber, R. J., A theory of auctions and competitive bidding. *Econometrica*, 50 (5): 1089-1122, 1982.
- [4] Dyer, D. ve Kagel, J. H., Bidding in common value auctions: how the commercial construction industry corrects for the winner's curse. *Management Science*, 42 (10): 1463-1475, 1996.
- [5] Chen, H., Competitive bidding strategy in the construction industry : a game theoretic approach. Yüksek Lisans Tezi. New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 1989.
- [6] Jofre-Bonet, M. ve Pesendorfer, M., Estimation of a dynamic auction game. *Econometrica*, 71 (5): 1443-1489, 2003. <https://www.jstor.org/stable/1555508>.
- [7] Athey, S., Levin, J. ve Seira, E., Comparing open and sealed bid auctions: evidence from timber auctions. *The Quarterly Journal of Economics*, 126 (1): 207-257, 2011.. <https://www.jstor.org/stable/10.1086/319558>.
- [8] Ahmed, M. O., El-Adaway, I., Coatney, K. ve Eid, M., Understanding the construction winner's curse using game theory. In *Construction Research Congress*, 2016, San Juan, Puerto Rico, s. 2160-2170, 2016.
- [9] Xu, N., Xu, Q. ve Li, Q., Construction project bidding research based on game theory and target cost pre-control management. In *Proceedings of the 20th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, 2017, Springer, Singapore, s. 875-882, 2017.
- [10] Mohlin, E., Östling, R. ve Wang, J. T.-y., Lowest unique bid auctions with population uncertainty. *Economics Letters*, 134, 53-57, 2015.. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.econlet.2015.06.009>.
- [11] Dağdeviren, U. ve Kaymak, B. Betonarme İstinat Duvarları için Maliyet Tahmin Modelleri, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilim. Derg.* 7, 9–26, 2020. <https://doi.org/10.35193/bseufbd>.
- [12] Uğur, L. O. ve Sivri, A. R., Toplu konut projelerinde maliyetlerin regresyon metodu ile incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2 (1): 251-270, 2014.
- [13] Gülнар, H., Yüksek hızlı tren yatırımlarının gelir ortaklığı senedi ile finansmanı. Uzmanlık Tezi. T.C. Kalkınma Bakanlığı Yıllık Programlar ve Konjktür Değerlendirme Genel Müdürlüğü, Yayın No:2958.195s, 2016.
- [14] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Demiryolu. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/demiryolu/demiryolu.pdf> (Erişim Tarihi: 27.05.2019)

- [15] Karabacak, D. H., Herkes için Oyun Teorisi. Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş., Ankara, 2016
- [16] Ovla, H. D. ve Taşdelen, B., Aykırı Değer Yönetimi. Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 5 (3): 1-12, 2012. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mersinsbd/issue/19531/207962>.
- [17] Verma, S. P. ve Quiroz-Ruiz, A., Critical values for six Dixon tests for outliers in normal samples up to sizes 100, and applications in science and engineering. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23 (2): 133-161, 2006.
- [18] Cheng, S.-F., Reeves, D. M., Vorobeychik, Y. ve Wellman, M. P., Notes on Equilibria in Symmetric Games. Proceedings of the 6th International Workshop On Game Theoretic And Decision Theoretic Agents GTDT , 7, 71-78, 2004.
- [19] Yılmaz, E. *Oyun Teorisi (Gözden Geçirilmiş 2. Basım)*. Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti, İstanbul, 2012.
- [20] Ott, R. L. ve Longnecker, M., An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. Wadsworth Group, Kaliforniya, 2001.
- [21] Pollard, D., Normal Distribution, Department of Statistics and Data Science, Yale University. (1997). <http://www.stat.yale.edu/~pollard/Courses/241.fall97/Normal.pdf>. (Erişim Tarihi: 14.09.2020)
- [22] Orlof, J. ve Bloom, J., Expectation, Variance and Standard Deviation for Continuous Random Variables Class 6, 18.05, MIT OpenCourseWare, Massachusetts Institute of Technology, 2020. [https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-05-introduction-to-probability-and-statistics-spring-2014/readings/MIT18\\_05S14\\_Reading6a.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-05-introduction-to-probability-and-statistics-spring-2014/readings/MIT18_05S14_Reading6a.pdf) (Erişim Tarihi: 09.07.2020).
- [23] Krishnaiah, P. R. ve Sen, P. K., *Handbook of Statistics - Nonparametric Methods*. Volume 4. North Holland, 1984.
- [24] Hakediş.org, Yapım İşleri Fiyat Farkı Endeksleri (Kasım 2013 sonrası işler), Hakediş.org (2020a) çevrimiçi, <https://www.hakedis.org/endeksler/yapim-isleri-fiyat-farki-endeksleri-kasim-2013-sonrasi> (Erişim Tarihi: 18.11.2020)
- [25] Hakediş.org, Yİ - ÜFE Yurt İçi Üretici Fiyat Endeksi ve Değişim Oranı, Hakediş.org (2020b) çevrimiçi, <https://www.hakedis.org/endeksler/yi-ufe-yurtici-uretilci-uyat-endeksi> (Erişim Tarihi: 18.11.2020)
- [26] Muhasebenews, Ortalama Döviz Kuru Programı, Muhasebenews, <https://www.muhasenews.com/ortalama-doviz-kuru-programi/> (Erişim Tarihi: 18.11.2020).
- [27] Dhakal, C. P., Interpreting the basic outputs (SPSS) of multiple linear regression. International Journal of Science and Research (IJSR), 8 (6): 1448-1452, 2018. 1448–1452. <https://doi.org/10.21275/4061901>.

# TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI

## TEKNİK DERGİ YAZIM KURALLARI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210 x 297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalı, kağıdın sol ve sağ yanında 40 mm, üst ve alt yanlarında 52.5 mm boşluk bırakılmalıdır.
2. Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 25 sayfadan, teknik notlar 10 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, DergiPark sistemi üzerinden gönderilmelidir. (<http://dergipark.gov.tr/tekderg>)
4. Metin yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık kısa (en çok 10 kelime) ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) diğer dilde başlık, öz ve anahtar kelimeler, (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. İki dildeki öz çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. Gerekli görüldüğünde, öz(ler) yazara sorulmadan yeniden yazılabilir. En az üç tane anahtar kelime verilmelidir. İki dildeki başlık ve öz ve anahtar kelimeler birinci sayfaya sığdırılmalı, birinci sayfanın altında on satır boş bırakılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır (TS1212).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sıra ile (önce Latin, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, herbirine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.
12. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.
13. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir.
14. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.
15. Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:  
Kaynak makale ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, makalenin tam başlığı, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları, yıl.  
Örnek : Naghdi, P. M., Kalnins, A., On Vibrations of Elastic Spherical Shells. J. Appl. Mech., 29, 65-72, 1962.  
Kaynak kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, kitabın adı, cilt numarası, varsa editörü, yayınlandığı yer, yayınlandığı yıl.  
Örnek : Kraus, H., Thin Elastic Shells, New York. Wiley, 1967.  
Kaynak bildiri ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, bildirinin adı, konferansın adı, yapıldığı yer, yıl.  
Kaynak tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, tezin adı, derecesi, sunulduğu üniversite, yıl.  
Kaynak rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayınlandığı yer, yıl.
16. Teknik Dergi’de yayımlanmış bir yazı ile ilgili tartışma yazıları, en fazla iki sayfa olmalı, değinilen noktaları somut ve kısa biçimde ifade etmeli, yazarı değil içeriği eleştirmeli ve nezaket kurallarına uygun bir dille yazılmalıdır. Yazar yanıtları da yukarıda belirtilen ilkelere uygun olmalıdır.
17. Aynı bir sayfada düzenlenmiş bir bilgi notu yazı ile birlikte gönderilmelidir. Bilgi notunda, (i) yazar adları, iş ve ev adresleri ile telefon numaraları, (ii) yazarların kısa birer özgeçmişleri ve (iii) tüm yazarlarca imzalanmış olan “Bu yazının tümüyle özgün bir çalışmanın ürünü olduğunu ve daha önce, bu veya buna benzer bir biçimiyle, hiçbir yerde yayımlanmadığını, dürüstlük içinde bildiririm.” notu bulunmalıdır.
18. Sorumlu yazar tarafından imzalanmış telif hakkı devir formu da yazı ile birlikte gönderilmelidir.

# İÇİNDEKİLER

**Prof. Dr. M. SÜHEYL AKMAN**

- Yapı Bilgi Modellemesi Kullanımının Sürdürülebilir Yeşil Bina Projeleri  
Üzerine Etkileri..... 11857  
**Ashlı Pelin GÜRGÜN, Kerim KOÇ, Şenay ATABAY**
- Otopark Seçim Davranışlarını Etkileyen Faktörler: İzmir Örneği ..... 11887  
**Mervegül UYSAL, Yalçın ALVER**
- Ultrasonik Yöntemler ile Çelik-lif Takviyeli Betonda Eğilme Çatlaklarının  
Derinlik Tayini..... 11903  
**Ahmet Serhan KIRLANGIÇ**
- Deprem Bölgesinde Bulunan Mevcut Bir Tank Yapısının Geoteknik  
Değerlendirmesi..... 11921  
**E. Ece ESELLER-BAYAT, Onur DENİZ**
- Betonarme Kiriş ve Kolonların Tersinir Çevrimsel Yükler Altındaki Kesme  
Dayanımına Betonun Katkısı Üzerine Deneysel Bir inceleme ..... 11955  
**Cem AYDEMİR, Müberra ESER AYDEMİR, Güray ARSLAN**
- Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı..... 11979  
**Havvanur KILIÇ, Onur DEMİRCİ**
- Yüksek Hızlı Tren Üst Yapı İhaleleri İçin Teklif Değerlerinin Oyun Teorisi ile  
Belirlenmesi..... 12003  
**Hacı Mehmet ALAKAŞ, Cem KACAR, Emre YAZICI**

**ISSN: 1300-3453**