



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

Cilt 31 Sayı 1 Ocak 2020

## 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 31 Number 1 January 2020*

Cilt 31 Sayı 1 Ocak 2020



**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

Cemal GÖKÇE

**Yazı İşleri Müdürü:**

Bahaettin SARI

Cilt 31 - Sayı 1 - Ocak 2020

İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın.

Baskı tarihi: 1 Ocak 2020 / 1.000 adet basılmıştır.

Yayın Kurulu'nun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.

**ISSN: 1300-3453**

---

**Baskı**

Lotus Life Ajans Rek.Tan.Bas.Yay.Org.Amb.İth.İhr.San.ve Tic.Ltd.Şti.

Sokullu Cad. Perçem Sok. No: 9/A Çankaya / Ankara - Tel: 0.312.433 23 10

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

## **Yayın Kurulu:**

Süheyl AKMAN  
Ender ARKUN  
İsmail AYDIN  
Özer ÇİNİCİOĞLU  
Metin GER  
Gürkan Emre GÜRCANLI  
Alper İLKİ  
Cem OĞUZ  
Kutay ORAKÇAL  
Günay ÖZMEN  
Baki ÖZTÜRK  
İsmail ŞAHİN  
Özkan ŞENGÜL  
Tuğrul TANKUT

## **Editör:**

Tuğrul TANKUT

## **Yardımcı Editörler:**

Ender ARKUN  
İsmail AYDIN  
Özer ÇİNİCİOĞLU  
Metin GER  
Gürkan Emre GÜRCANLI  
Alper İLKİ  
Kutay ORAKÇAL  
İsmail ŞAHİN  
Özkan ŞENGÜL

## **Yayın Sekreteri:**

Cemal ÇİMEN

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
- TÜBİTAK / ULAKBİM

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.

## Danışmanlar:

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

Ayda Şafak AĞAR ÖZBEK Perviz AHMEDZADE Ragıp AKBAŞ Sami Öguzhan AKBAŞ Rifat AKBİYİKLİ Özge AKBOĞA KALE Burcu AKÇAY ALDANMAZ Cihan Taylan AKDAĞ Cem AKGÜNER Adem AKPINAR Muhammad Vefa AKPINAR Atakan AKSOY Hafzullah AKSOY Gözün AKYILDIZ ALÇURA Zuhal AKYÜREK Fatih ALEMDAR Pelin ALPKÖKİN Sinan ALTIN Selim ALTUN Adlen ALTUNBAŞ Ahmet Can ALTUNIŞIK Egemen ARAS Fuat ARAS Davit ARDITI Ergin ARIOĞLU Deniz ARTAN İLTER Ali Osman ATAHAH Hakan Nuri ATAHAH Shady ATTIA Abdullah AVEY İsmail AYDIN Mustafa Tamer AYVAZ Ela BABALIK Can Elmar BALAS Lale BALAS Selim BARADAN Türkyay BARAN Bekir Ögüz BARTIN Cemal BAŞARAN Zeynep BAŞARAN BUNDUR Özgür BAŞKAN Cüneyt BAYKAL İdris BEDİRHANOĞLU Mehmet BERİLGİN Saadet Arzu BERİLGİN Niyazi Özgür BEZGİN Selçuk BİLDİK Senem BİLİR MAHÇİÇEK Bariş BİNİCİ Ahmet BİRİNCİ İlknur BOZBEY Zafer BOZKUŞ Burcu BURAK BAKIR Halil İbrahim BURGAN Yusuf CALAYIR Erdem CANBAY Zekai CELEP Cihan CENGİZ Halim CEYLAN Ömer CİVALEK Mustafa CÖMERT Ali Fırat ÇABALAR	Barlas Özden ÇAĞLAYAN Özgür ÇAKIR Melih ÇALAMAK Gülben ÇALIŞ Erkan ÇELEBİ Kutay ÇELEBİOĞLU Ahmet Ozan ÇELİK Oğuz Cem ÇELİK Osman Nuri ÇELİK Semet ÇELİK Hilmi Berk ÇELİKOĞLU Kemal Önder ÇETİN Mecit ÇETİN Reha ÇETİNKAYA Gökhan ÇEVİKBİLEN Mesut ÇİMEN Safiye Fevza ÇİNİCİOĞLU Erdal ÇOKÇA Şevket ÇOKGÖR Atilla DAMCI Yakup DARAMA Kutlu DARILMAZ Cem DEMİR Uğur DEMİR Ender DEMİREL Mehmet Cüneyd DEMİREL Fatih DİKBAŞ Seyyit Ümit DİKMEN İrem DİKMEN TOKER Ali Ersin DİNÇER Ahmet Anıl DİNDAR Emrah DOĞAN Nurhan ECEMİŞ ZEREN Özgür EKİNCİOĞLU Alper ELÇİ Şebnem ELÇİ Murat Altuğ ERBERİK Saffet ERDOĞAN Esin ERGEN PEHLEVAN Aysen ERGİN Gökmen ERGÜN Ebru ERİŞ Esra Ece ESELLER BAYAT Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ Burak FELEKOĞLU Okan FISTIKOĞLU Antonio FORMISANO Nuray GEDİK Abdullah GEDİKLİ Ergun GEDİZLİOĞLU Mohammad Ali GHORBANİ Konuralp GİRĞİN Zehra Canan GİRĞİN İlgin GÖKAŞAR Çağlar GÖKSU Burcu GÜLDÜR ERKAL Fazlı Erol GÜLER Hakan GÜLER İlgin GÜLER Zeynep GÜLERCE Taylan GÜNAY Necmettin GÜNDÜZ	Abdurrahman GÜNER Samet GÜNER Ülker GÜNER BACANLI Mehmet Şükrü GÜNEY Tuba GÜRBÜZ BÜYÜKKAYIKÇI Gürkan Emre GÜRCANLI Aslı Pelin GÜRGÜN İpek GÜRSEL DİNO Gürşans GÜVEN İŞİN Soner HALDENBİLEN Murat HAMDERİ Ufuk HANCILAR Ingo A. HANSEN Abdul HAYIR Nejan HUVAJ SARIHAN Metin HÜSEM Zeynep İŞİK Sabriye Banu İKİZLER Eren İNCİ Pınar İNCİ KOÇAK Erdal İRTEM Nihat KABAY Sedat KABDAŞLI Volkan KAHYA Mehmet Rifat KAHYAOĞLU Volkan KALPAKÇI Alper KANYILMAZ Murat KARACASU Tanay KARADEMİR Erhan KARAESMEN Ali KARAIPEKLİ Himmet KARAMAN Mustafa KARAŞAHİN Zülküf KAYA İlker KAZAZ Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU Elçin KENTEL Mustafa Erol KESKİN Havvanur KILIÇ İsmail Emrah KILIÇ Sami And KILIÇ Fahriye KILINÇKALE Ufuk KIRBAŞ Veysel Şadan Özgür KIRCA Gökhan KIRKIL Niyazi Uğur KOÇKAL Önder KOÇYİĞİT Baha Vural KÖK Metek KÖKEN Fuat KÖKSAL Ali Ümran KÖMÜŞÇÜ Şerife Yurdagül KUMCU Akif KUTLU Semih KÜÇÜKARSLAN Abdullah KÜRKCÜ Hilmi LUŞ Kasım MERMERTAŞ Mehmet Murat MONKUL	Yetiş Şazi MURAT Elif OĞUZ Didem OKTAY Volkan OKUR Mehmet Hakkı OMURTAG Sema ONURLU Engin ORAKDÖĞEN Şeref ORUÇ Okan ÖNAL Akin ÖNALP Halil ÖNDER Aybike ÖNGEL Bihrat ÖNÖZ Ali Hakan ÖREN Bergüzar ÖZBAHÇECİ Ceyhan ÖZÇELİK İlker ÖZDEMİR Murat ÖZEN Pelin ÖZENER Abdullah Tolga ÖZER Eren Arman ÖZGÜVEN Hakkı Oral ÖZHAN Yener ÖZKAN M. Hulusi ÖZKUL Zeynep Huri ÖZKUL BİRGÖREN Beliz ÖZORHON ORAKÇAL Sadık ÖZTOPRAK Turhan ÖZTURAN Baki ÖZTÜRK Hasan Tahsin ÖZTÜRK Mustafa ÖZUYUSAL Tolga Yılmaz ÖZÜDOĞRU Polat ÖZYİĞİT Gülizar ÖZYURT TARAKÇIOĞLU Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU Onur PEKCAN Bekir Yılmaz PEKMEZCİ Cengiz POLAT Şamil Şeref POLAT Gül POLAT TATAR Selim PUL Selçuk SAATÇI Selman SAĞLAM Mehmet SALTAN Altuğ SAYGILI Neslihan SEÇKİN Serdar SELAMET Alper SEZER Faiz Uddin Ahmed SHAIKH Osman SIVRIKAYA Serdar SOYÖZ Aleksandar STEVANOVIĆ Ayşe Filiz SUNAR Erol ŞADOĞLU Remzi ŞAHİN Yuşa ŞAHİN Mustafa ŞAHMARAN Nermin ŞARLAK Burak ŞENGÖZ Aynur ŞENSOY ŞORMAN Ali Arda ŞORMAN	Ali Ünal ŞORMAN Özcan TAN Ali Hamza TANRIKULU Kürşat TANRIOVEN Serhan TANYEL Taha TAŞKIRAN Gökmen TAYFUR İlker TEKİN Beytullah TEMEL Berrak TEYMUR H. Onur TEZCAN Mesut TİĞDEMİR Şahmat TİĞREK Vedat TOĞAN Nabi Kartal TOKER Nuray TOKYAY Ali TOPAL Cem TOPKAYA Selçuk TOPRAK Ahmet TORTUM Gökçe TÖNÜK Nursu TUNALIOĞLU Kağan TUNCAY Eda TURAN Gürsoy TURAN Kaan TÜRKER Cüneyt TÜZÜN Eren UÇKAN Latif Onur UĞUR Mehmet Fevzi UGURYOL Berna UNUTMAZ Volkan Emre UZ Deniz ÜLGEN Aslı ÜLKE KESKİN Cüneyt VATANSEVER Syed Tanvir WASTI Nazmiye YAHNİOĞLU Ahmet YAKUT Cem YALÇIN Aslı YALÇIN DAŞYOOĞLU İsmail Özgür YAMAN A. Melih YANMAZ Mert Yücel YARDIMCI Ufuk YAZGAN Anıl YAZICI Halit YAZICI Kasım YENİGÜN İrem Zeynep YILDIRIM Mehmet YILDIRIMOĞLU Osman YILDIZ Çetin YILMAZ Fatih YILMAZ Koray Kamil YILMAZ M. Tuğrul YILMAZ Mehmet YILMAZ Murat YILMAZ Veysel YILMAZ Yüksel YILMAZ Fatih YONAR Recep YURTAL İsmail YÜCEL Ercan YÜKSEL Yeliz YÜKSELEN AKSOY Nabi YÜZER Ahmet Şahin ZAİMOĞLU
---	--	--	--	---

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

# Teknik Dergi

Cilt: 31 Sayı: 1 Ocak 2020

## İÇİNDEKİLER

- Belirgin Düşey Yük Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Çevrimsel Yükler  
Altındaki Davranışı Üzerine Bir İnceleme ..... 9683  
**Cem AYDEMİR, Müberra ESER AYDEMİR, Pınar YILDIRIM**
- Çoklu Çatlayan Lifli Kompozitlerin Birim Şekil Değişiminin Dijital Görüntü  
Korelasyonu ile Analizi: Parametre Etkilerinin Değerlendirilmesi ..... 9711  
**Tarık YILDIRIM, Muhammer KESKİNATEŞ, Eren GÖDEK,  
Kamile TOSUN FELEKOĞLU, Burak FELEKOĞLU, Okan ÖNAL**
- Betonarme Perdelerin Plandaki Yerleşimlerinin Kirişsiz Döşemeli Yapılara  
Etkisinin İncelenmesi ..... 9733  
**Ali BOZER**
- Ampirik Potansiyel Evapotranspirasyon Tahmin Yöntemlerinin  
Değerlendirilmesi: Uygulama Konya Kapalı Havzası ..... 9755  
**Nermin ŞARLAK, Soner Çağatay BAĞÇACI**
- Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi... 9773  
**Burcu AKÇAY**
- İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline  
Etkisinin İncelenmesi ..... 9789  
**Ezgi KOCAMAN, Merve KURU, Gülben ÇALIŞ**





# Belirgin Düşey Yük Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Çevrimsel Yükler Altındaki Davranışı Üzerine Bir İnceleme

Cem AYDEMİR<sup>1</sup>

Müberra ESER AYDEMİR<sup>2</sup>

Pınar YILDIRIM<sup>3</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada, düşey işletme yükünün betonarme kirişlerin tersinir çevrimsel davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İşletme yükü benzeşimi için kuvvet, deprem yükü benzeşimi için ise çevrimsel ve artan genlikli yer değiştirme kontrollü yükleme geçmişlerinin kullanıldığı deney programında, düşey yük etkisinin belirgin mertebede olmasının plastik mafsallı çalışma biçimi üzerinde etkin olduğu gözlenmiştir. Çalışmada, işletme yükü etkisini içeren ve içermeyen tersinir-çevrimsel yüklemeler uygulanarak elde edilen deneysel sonuçlar birbirleriyle mukayese edilmiş ve ayrıca Türk Deprem Yönetmeliği Hasar Sınırı Yaklaşımı kabulleri yardımıyla elde edilen analitik sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Sınırlı sayıda deney numunesiyle yapılan bu karşılaştırmalarda, düşey yük etkisinin belirgin mertebede olduğu ve yön değiştirmeyen plastik mafsallı davranışının meydana geldiği deney numunelerinde, Türk Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan analitik Göçme Hasar Sınırı yer değiştirme değerinin oldukça ihtiyatlı kalabildiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hasar sınır durumları, malzeme birim şekil değiştirme sınırları, belirgin düşey yük etkisi, yön değiştirmeyen plastik mafsallı.

## ABSTRACT

### An Experimental Research on Hysteretic Behavior of RC Beams under Significant Gravity Loads

In this study, an experimental research to obtain the effects of significant gravity load on the hysteretic behaviors of RC beams is presented. To this purpose, an experimental program is

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 3 Ekim 2017 günü ulaşmıştır. 29 Ağustos 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.341401>

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>

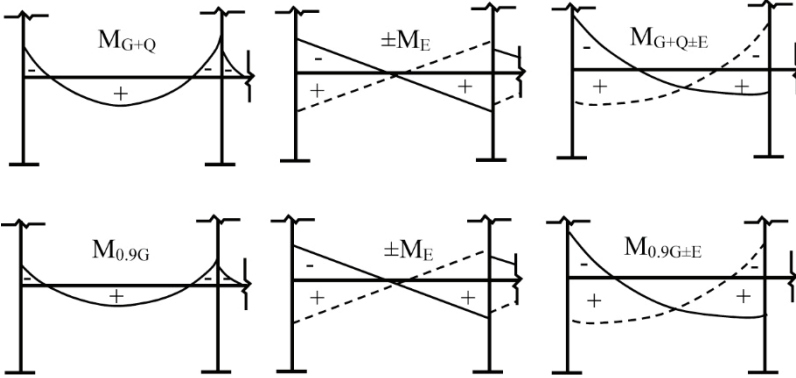
3 İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - pinaryildirim@aydin.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-6667-9365>

carried out in which gravity loads are applied by force controlled test procedure whereas cyclic loads are applied by displacement controlled test procedure. It is found from the experimental results that significant gravity load is an effective parameter on plastic hinge mechanism. The experimental results of specimens with and without significant gravity load are compared to each other. Experimentally observed damage states, plastic hinge zones and deformation demands are also compared with the respective values proposed by Turkish Seismic Design Code. The results of the limited number of test specimens show that, the loading procedure with significant gravity load effect leads to the formation of non-reversing plastic hinge and analytical collapse limit given in Turkish Seismic Design Code remains very conservative.

**Keywords:** Damage limit states, material strain limits, significant gravity load effects, non-reversing plastic hinge.

## 1. GİRİŞ

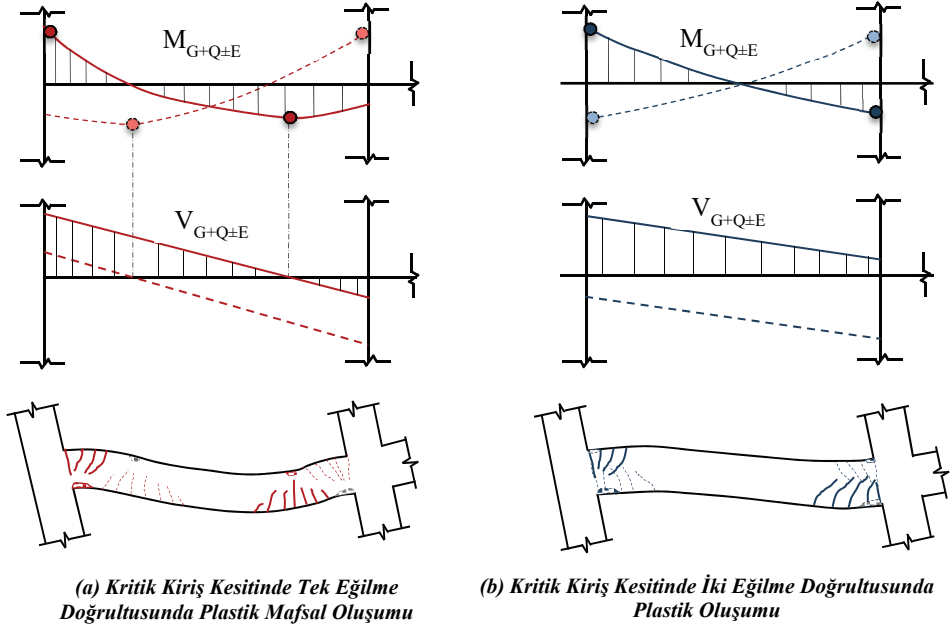
Bilindiği gibi betonarme bir yapının -taşıma gücü sınır durumuna göre- tasarımında, yapının kullanım ömrü boyunca güç tükenmesine uğramaması için tasarımda kullanılan tüm büyüklüklerdeki belirsizliklerin kabul edilebilir risk oranlarına çekilmesi gerekir. Bu amaçla, yönetmeliklerde hesaba dâhil bütün büyüklüklerin muhtemel değişimleri dikkate alınarak, kısmî güvenlik katsayıları tanımlanmıştır. Şekil 1’de düşey yük ve deprem etkisindeki bir kat çerçevesi kirişinin mesnet bölgelerinde eğilme momenti tasarım değerlerinin belirlenmesi için esas alınan yük katsayıları (birleşimleri) gösterilmiştir [1].



Şekil 1 - Düşey yük ve deprem etkisi altındaki kiriş mesnet bölgelerinde eğilme momenti tasarım değerlerinin belirlenmesi için esas alınan yük birleşimleri [1]

Şekilden de görüleceği üzere, düşey yükler altında tek yönlü eğilmeye zorlanan kiriş mesnet kesitleri, düşey yük ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında çift yönlü eğilmeye maruz kalabilir. Bu çift yönlü eğilme zorlarının, kesitin hem pozitif ve hem de negatif akma momenti kapasitesini aşması durumunda çift yönlü (yön değiştiren), sadece bir doğrultuda kesitin akma momenti üzerinde bir talep meydana getirmesi durumunda ise tek yönlü plastik davranışın (yön değiştirmeyen) söz konusu olacağı söylenebilir. Bir başka ifadeyle; sadece

düşey yükten kaynaklanan eğilmenin depremlili durumdaki tasarım değerine nispetle belirgin mertebede olmasının, kiriş mesnet kesitlerindeki potansiyel plastik mafsalları tek ya da çift yönlü olarak ortaya çıkmasına neden olacağı söylenebilir. Çerçeve kirişlerinin potansiyel hasar bölgelerinde eğilme zorları ve plastik moment kapasitesine göre yapılan bu değerlendirmenin yanında, davranış, kiriş eksenini boyunca kesme kuvvetinin işaret değişimine göre de izlenebilir. Deprem etkisinde kiriş eksenini boyunca sabit olan kesme kuvveti, düşey yük ve depremin ortak etkisinde -düşey yük etkisinin belirli mertebede olmasıyla- işaret değiştirebilir. Kesme kuvvetinin işaret değişimi, negatif eğilmeye zorlanan kiriş mesnet kesitinde maksimum eğilme momentinin kolon yüzünde oluşmasına, pozitif eğilmeye zorlanan kiriş mesnet bölgesinde ise maksimum eğilme momentinin mesnetten açıklık bölgesine doğru kaymasına neden olur. Düşey yük etkisinin deprem etkisine göre sınırlı kaldığı durumlarda, kesme kuvvetinin kiriş eksenini boyunca işaret değiştirmemesine bağlı olarak, kirişte oluşacak eğilme momentinin en büyük değerleri daima kolon yüzünde oluşacaktır. Kiriş eksenini boyunca kesme kuvvetindeki değişime bağlı biçimde açıklanan bu farklı plastik mafsalları mekanizması oluşumları ve hasar biçimleri Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2 - Çevrimsel yüklerle zorlanan betonarme çerçeve kirişlerinin kritik kesitlerinde, (a) tek ve (b) çift yönlü plastik mafsalları mekanizması durumları ve hasar biçimleri

Depreme dayanıklı bina tasarım yönetmelikleri, binaların elastik ötesi davranış sergilemesine; yapıların başta gevrek güç tükenmelerine karşı yeterli dayanıma sahip olması, potansiyel hasar noktalarında kabul edilebilir hasar ile enerjiyi tüketebilecek plastik dönme yapabilme yeteneğine sahip olması gibi çeşitli tasarım kurallarının sağlanması şartıyla izin

vermektedir. Yönetmeliklerde uygulanan kuvvetli kolon-zayıf kiriş prensibi, kolon kiriş birleşim bölgesi kesme güvenliği yaklaşımı ve kapasite tasarımı gibi tasarım kuralları [2, 3], yapıda aşırı zorlamalar altında ortaya çıkabilecek potansiyel hasarın eğilmeden kaynaklanmasına ve hasar bölgelerinin yaygın olarak kiriş mesnet kesitlerinde gerçekleşmesine neden olur. Bu nedenle, kiriş mesnet kesimlerinin plastik mafsal dönme kapasitesi, yapısal performansın değerlendirilmesi açısından önem taşır ve uzun süreden beri deneysel çalışmalarda inceleme konusu olmuştur [4~11]. Bu deneysel incelemelerde deprem etkisinin yerdeğiştirme kontrollü tersinir çevrimsel yüklerle benzeştirilerek uygulandığı statik benzeri (Quasi-Statik) testler, -basitliği nedeniyle- yaygın olarak tercih edilmektedir. Numunelerin hem pozitif hem de negatif eğilme yönünde elastik ötesi davranış sergileyecek şekilde zorlandığı bu deneylerde, numunelere çeşitli dokümanlarda [12~14] önerilen çevrimsel yer değiştirme geçmişleri uygulanarak, elastik ötesi zorlanan deney elemanının yük ve yer değiştirme kapasitesi belirlenebilmektedir. Statik benzeri test yönteminin uygulandığı deneysel incelemelerde, yaygın olarak deney numunelerinde hem pozitif hem de negatif eğilme doğrultularında elastik ötesi davranış meydana getiren yükleme geçmişlerinin kullanıldığı, bir başka ifadeyle düşey yük etkisinin belirgin mertebede olmadığına varsayıldığı söylenebilir.

Belirgin düşey yükün davranış üzerindeki etkisine yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır. Meggett ve Fenvick [15] tarafından yapılan deneysel çalışmada, tek açıklıklı betonarme bir çerçeve sistem, yatay çevrimsel yük ve kiriş açıklığına uygulanan düşey yük etkisi altında incelenmiştir. Deneysel incelemede düşey yükün kiriş plastik mafsal çalışma biçimini etkilediği, belirgin mertebedeki düşey yükün tek yönlü plastik mafsal oluşumuna neden olduğu ve düşey yük etkisinin belirginleşmesiyle tek yönlü oluşan kiriş plastik mafsalındaki dönme kapasitesinin büyüdüğü gösterilmiştir. Walker ve Dhakal [16] tarafından yapılan deneysel incelemede, plastik mafsal davranış farklılığının yer değiştirme kapasitesi üzerinde belirgin etkisi olduğu ve tek yönlü plastik mafsal davranışı sergileyen kirişlerin göçme sınır eğrilik sünekliği oranlarının, çift yönlü plastik davranış sergileyen kirişlerin eğrilik sünekliği oranlarının iki katı olarak alınabileceği önerilmiştir. Gião vd. [17] tarafından yapılan deneysel incelemede, belirgin düşey yük etkisine maruz kirişlerde statik benzeri testler için esas alınabilecek bir deney prosedürü geliştirilmiş ve fiziksel deney sonuçları ile analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ülkemizde de belirgin düşey yük etkisi ile birlikte depremi benzeştiren yüklemenin birlikte dikkate alındığı çalışmalar yapılmıştır. Kaya vd. [18] tarafından yapılan deneysel incelemede, düşey işletme yükünden kaynaklanan negatif eğilme momenti, çevrimsel ve artan genlikli yer değiştirme kontrollü yükleme öncesi numunelere uygulanarak, belirgin mertebedeki düşey işletme yükünün plastik mafsal davranış biçimi üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır.

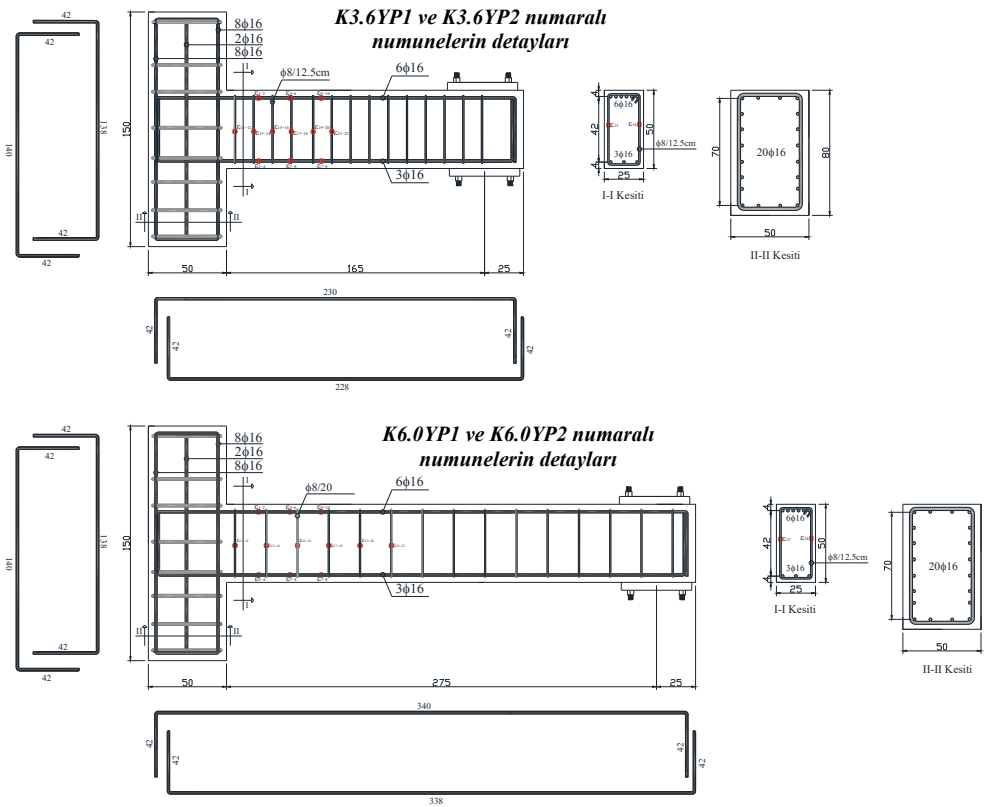
Türk Deprem Yönetmeliği'nde [2] yer alan bazı hesap esasları plastik mafsal davranış biçimine bağlı biçimde değişkenlik gösterebilmektedir. Betonun kesme dayanımına katkısının belirlenmesi bu duruma örnek olarak gösterilebilir. Yönetmelik'e göre; sadece deprem yüklerinden oluşan kesme kuvveti, depremlili durumdaki toplam kesme kuvveti ile karşılaştırılarak, tek yönlü plastik mafsal davranışı durumunda betonun kesme dayanımına katkısı dikkate alınırken; çift yönlü plastik mafsal davranış durumunda ise betonun kesme dayanımına katkısı ihmal edilmektedir. Yönetmelikteki mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi bölümünde ise, farklı hasar düzeylerine karşı gelen yer değiştirme sınırları, plastik mafsal davranış biçiminden bağımsız olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, eğilme kırılmasıyla taşıma gücüne ulaşan betonarme kirişlerde plastik mafsal davranış biçimi

farklılığının Göçme Hasar Sınırı Yer değiştirmesi üzerine etkileri incelenmiştir. Deney programında, yönetmelikte verilen yanal donatı miktar ve aralık sınırlarına uygun olan ve bu koşulların bazılarını sağlayamayan iki farklı deney numunesi kullanılmıştır. Deneysel incelemelerde, numunelerin tek ve çift yönlü plastik mafsal davranışı durumlarındaki hasar sınır yer değiştirmeleri, plastik mafsal boyları, toplam kesit eğrilikleri, malzeme birim şekil değiştirme değerleri ve çeşitli yönetmeliklerde verilen hasar sınırı yaklaşımı [2, 3, 19 ve 20] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

## 2. DENEY PROGRAMI

### 2.1. Deney Numunelerinin Detayları ve Test Düzeni

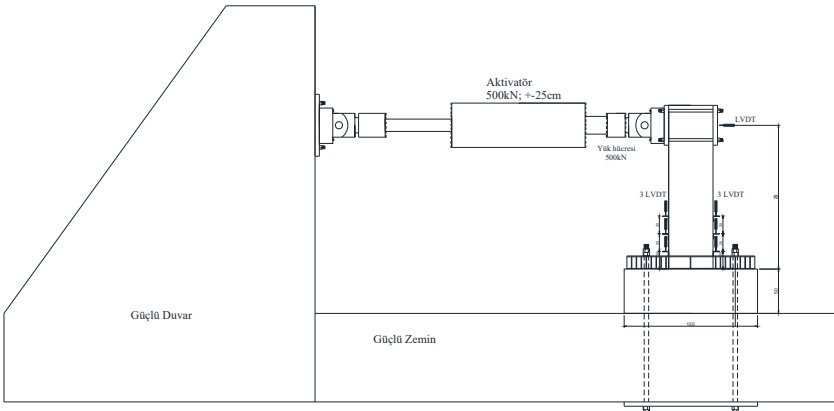
İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında üretilerek test edilen deney numunelerinin geometrisi ve donatı detayları Şekil 3’de, deney programında uygulanan test düzeni ise Şekil 4’de gösterilmiştir. Çevrimsel ve tekrarlanan tür zorlamalarda kiriş plastik mafsal bölgelerinde tabla betonunun çekme etkisiyle çatlamış olacağı kabulüyle deney



Şekil 3 - Numune detayları ve birim şekil değiştirme ölçerlerin konumları

numuneleri çift donatılı dikdörtgen kesit olarak tasarlanmıştır [21]. Ayrıca tabla betonunun çekmeye zorlanması durumunda, döşeme donatılarının eğilme kapasitesini artırıcı etkisi [22] göz önüne alınmamıştır. Konsol olarak üretilen deney numunelerinde yük uygulama noktası gerçek yapıda moment sıfır noktasını, konsol kirişin mesnedi ise gerçek yapıda rijit bir kolonu simgelemektedir. Deney numuneleri, kiriş kesme açıklığı / kesit etkili derinliği oranları (a/d) ve yükleme geçmişleri (YP) kullanılarak isimlendirilmiştir. Kesme açıklığının kesit etkili derinliğine oranı 3.6 ve 6.0 olacak şekilde imal edilen toplam 4 adet deney numunesinin genel özellikleri ise Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Bilindiği üzere Türk Deprem Yönetmeliği’nde [2] göçme hasar sınır durumu için tanımlanan sargılı beton sınır birim şekil değiştirmesi, kirişin yanal donatısının yönetmelikte ön görülen yanal donatı gereksinimine oranlanarak ifade edilmektedir. Deney programında, enine donatı gereksinimi kapasite tasarımı ilkesine göre belirlenen 4 numuneden, a/d oranı 6.0 olan iki numunede -kesme kuvveti talebi diğer numunelere göre düşük mertebede olduğundan- seçilen enine donatı aralığı, yönetmelikte öngörülen sınırların üzerinde tutulmuştur (Bkz. Çizelge 1). Böylece yanal donatı sınırlamasına uygun olmayan kirişler için, yönetmelikte tanımlanan sargılı birim şekil değiştirme sınırının göçme hasar sınırını ne ölçüde betimlediği, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak, irdelenebilecektir.



Şekil 4 - Test düzeni

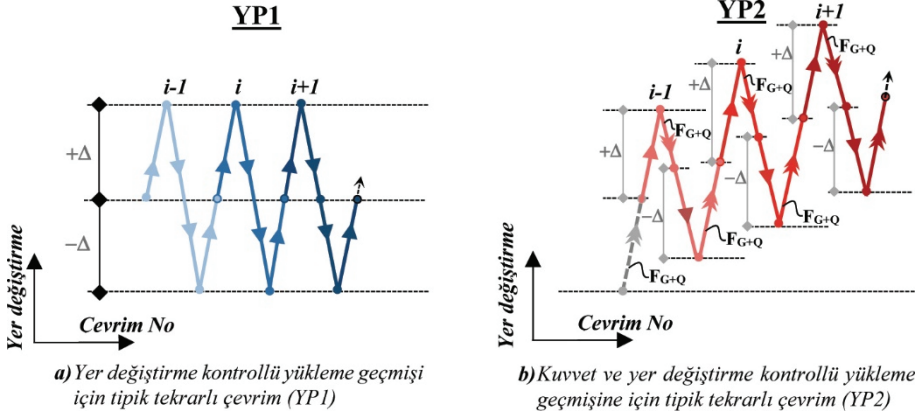
Çizelge 1 - Deney numunelerinin özellikleri

Parametre		Deney Numuneleri							
		K3.6YP1	K6.0YP1	K3.6YP2	K6.0YP2				
Geometri ve Malzeme	b/h/d (cm/cm/cm)	25/50/46	25/50/46	25/50/46	25/50/46				
	a/d (cm/cm)	165/46=3.6	275/46=6.0	165/46=3.6	275/46=6.0				
	$f_c$ (MPa)	45.6	48.6	39.7	44.5				
	$f_y/f_{su}/f_{yw}$ (MPa)	498/602/597	498/602/597	490/688/597	490/688/597				
Donatı Detayı	Üst boy donatı (Oranı)	6 $\phi$ 16 (0.0105)	6 $\phi$ 16 (0.0105)	6 $\phi$ 16 (0.0105)	6 $\phi$ 16 (0.0105)				
	Alt boy donatı (Oranı)	3 $\phi$ 16 (0.0052)	3 $\phi$ 16 (0.0052)	3 $\phi$ 16 (0.0052)	3 $\phi$ 16 (0.0052)				
	Enine Donatı (Oranı)	$\phi$ 8/12.5 (0.0032)	$\phi$ 8/20 (0.002)	$\phi$ 8/12.5 (0.0032)	$\phi$ 8/20 (0.002)				
Yanal Donatı Kontrollü	Enine Donatı Aralık Sınırları <sup>[2]</sup> (Uygunluk oranı)	h/4=125mm (%100)	✓	h/4=125mm (%63)	×	h/4=125mm (%100)	✓	h/4=125mm (%63)	×
		150mm (%100)	✓	150mm (%75)	×	150mm (%100)	✓	150mm (%75)	×
		8 $\phi$ <sub>i</sub> =128mm (%100)	✓	8 $\phi$ <sub>i</sub> =128mm (%64)	×	8 $\phi$ <sub>i</sub> =128mm (%100)	✓	8 $\phi$ <sub>i</sub> =128mm (%64)	×
	Enine Donatının Minimum Oranı <sup>[1]</sup> (Uygunluk Oranı)	0.0014 (%100)	✓	0.0015 (%100)	✓	0.0014 (%100)	✓	0.0014 (%100)	✓

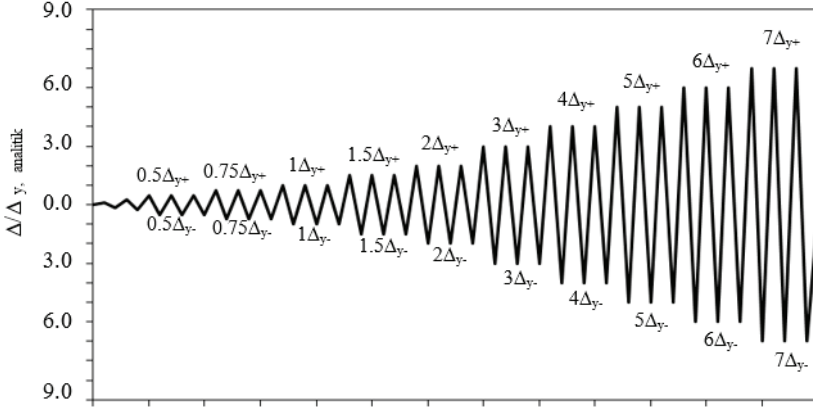
## 2.2. Yükleme Geçmişleri

Deney programında iki ayrı yükleme geçmişi uygulanmıştır. Düşey yük etkisini içermeyen ya da düşey yükün belirgin mertebede olmaması durumu için uygulanan yükleme, YP1 olarak isimlendirilmiştir. YP1 yükleme geçmişi, potansiyel hasar bölgesinde çift yönlü plastik davranış hedeflenerek hazırlanmıştır. Düşey yükün belirgin mertebede olduğu varsayımıyla uygulanan YP2 yükleme geçmişinde ise potansiyel hasar bölgesinde tek yönlü plastik davranış hedeflenmiştir. YP1 yükleme geçmişi sadece yerdeğiştirmenin kontrol edilmesiyle uygulanırken, YP2 yükleme geçmişi hem kuvvet hem de yerdeğiştirmenin birlikte kontrol edilmesiyle uygulanmaktadır. YP1 ve YP2 yükleme geçmişleri arasındaki farklılıkların daha belirgin bir biçimde karşılaştırılabilmesi için her iki yükleme geçmişinin 3 tekrarlı tipik bir çevrimi Şekil 5’de yan yana gösterilmiştir.

Şekil 5.a’da tipik bir çevrimi görülen YP1 isimli yerdeğiştirme kontrollü yükleme, numunelerin analitik akma yerdeğiştirmeleri yardımıyla belirlenen nominal yerdeğiştirme sünekliği oranları hedeflenerek hazırlanmıştır. YP1 yükleme geçmişinde hedef alınan nominal yerdeğiştirme sünekliği oranları Şekil 6’dan görülebilir.



Şekil 5 - Yükleme geçmişlerinin tipik bir çevrimleri (a) YP1, Yer değiştirme kontrollü yükleme (b) YP2, Kuvvet ve yerdeğiştirme kontrolünün birlikte uygulandığı yükleme

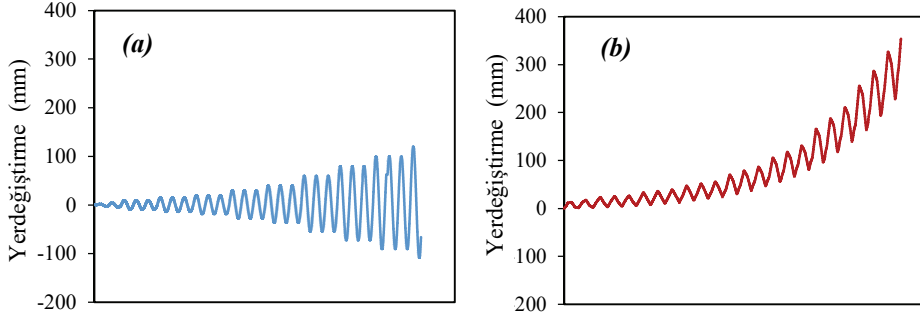


Şekil 6 - YP1 numaralı yükleme geçmişinin yerdeğiştirme sünekliliği ile gösterimi

Düşey yüklerin tek yönlü eğilme etkisinin kuvvet kontrolüyle, depremin tersinir etkisinin yerdeğiştirme kontrolüyle uygulandığı YP2'nin tipik tekrarlı çevrimi Şekil 5.b'de şematik olarak gösterilmiştir. YP2 yüklemesinde ilk adım -kuvvet kontrolünde- düşey işletme yükünün ( $F_{G+Q}$ ) uygulanmasıdır. Şekil 5.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 yer değiştirme cevabının artacağı varsayılarak, şematik olarak çizilmiştir. YP2 yüklemesinde düşey işletme yükün uygulama değeri ( $F_{G+Q}$ ), kesiti akma limit duruma getiren yükün yarısı ( $F_y/2$ ) olarak dikkate alınmıştır [17]. YP2 yükleme geçmişinin tipik bir çevrim uygulamasında izlenen adımlar şu şekilde özetlenebilir. İşletme yükü etkisindeki numuneye yer değiştirme kontrolünde nominal yerdeğiştirme sünekliliği oranına bağlı olarak belirlenen pozitif bir ilave yer değiştirme uygulanır. Yerdeğiştirme kontrollü adımın tamamlanmasının ardından, düşey işletme yükü kuvvet kontrolünde boşaltılır. Kuvvet kontrollü adım sonrası nominal yerdeğiştirme



sünekliliği oranına bağlı olarak belirlenen negatif doğrultudaki yer değiştirme, yer değiştirme kontrollü olarak uygulanır. Yer değiştirme kontrollü yükleme sonrası, işletme yükü numuneye kuvvet kontrolünde uygulanarak yükleme geçmişinin bir çevrimi tamamlanmaktadır [17].



Şekil 7 - Yükleme geçmişleri (a) K6.0YP1 numunesine yer değiştirme kontrollü uygulanan yükleme geçmişi (b) K6.0YP2 numunesine kuvvet ve yer değiştirmenin birlikte kontrollüyle uygulanan yükleme geçmişi

Çizelge 2 - Yükleme geçmişi kontrolünde uygulanan hedef yer değiştirme ve kuvvet değerleri

$\Delta/\Delta_y$	Deney Numunesi							
	K3.6YP1		K6.0YP1		K3.6YP2		K6.0YP2	
	$F_{G+Q}/F_y$	$\Delta$ (mm)	$F_{G+Q}/F_y$	$\Delta$ (mm)	$F_{G+Q}/F_y$	$\Delta$ (mm)	$F_{G+Q}/F_y$	$\Delta$ (mm)
0.5	0.0	3.75	0.0	10	0.5	3.75	0.5	10
-0.5	0.0	-3.25	0.0	-9	0.0	-3.25	0.0	-9
1.0	0.0	7.5	0.0	20	0.5	7.5	0.5	20
-1.0	0.0	-6.5	0.0	-18	0.0	-6.5	0.0	-18
1.5	0.0	11.25	0.0	30	0.5	11.25	0.5	30
-1.5	0.0	-9.75	0.0	-27	0.0	-9.75	0.0	-27
2.0	0.0	15	0.0	40	0.5	15	0.5	40
-2.0	0.0	-13	0.0	-36	0.0	-13	0.0	-36
3.0	0.0	22.5	0.0	60	0.5	22.5	0.5	60
-3.0	0.0	-19.5	0.0	-54	0.0	-19.5	0.0	-54
4.0	0.0	30	0.0	80	0.5	30	0.5	80
-4.0	0.0	-26	0.0	-72	0.0	-26	0.0	-72
5.0	0.0	37.5	0.0	100	0.5	37.5	0.5	100
-5.0	0.0	-32.5	0.0	-90	0.0	-32.5	0.0	-90
6.0	0.0	45	0.0	120	0.5	45	0.5	120
-6.0	0.0	-39	0.0	-108	0.0	-39	0.0	-108
7.0	0.0	52.5	0.0	140	0.5	52.5	0.5	140
-7.0	0.0	-45.5	0.0	-126	0.0	-45.5	0.0	-126

YP1 ve YP2 yükleme geçmişlerinin hazırlanmasında hedef alınan nominal yerdeğiştirme sünekliği oranları, akma yer değiştirmeleri ve düşey işletme yükünün hedef değerleri Çizelge 2’de özetlenmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere, kesme açıklığının kesit etkili derinliğine oranı 3.6 ve 6.0 olan numunelerde yerdeğiştirme hedef değerleri birbirinden farklıdır. K3.6YP1 ve K6.0YP1 numunelerinde yerdeğiştirme hedeflerinin birbirinden farklı olması ve ayrıca itme ve çekme doğrultularında değişkenlik göstermesi, numune boylarının farklı olması ve numunelerde itme ile çekme doğrultularında akma yer değiştirmelerinin farklılık ( $+\Delta_y \neq -\Delta_y$ ) göstermesinden kaynaklanmaktadır.

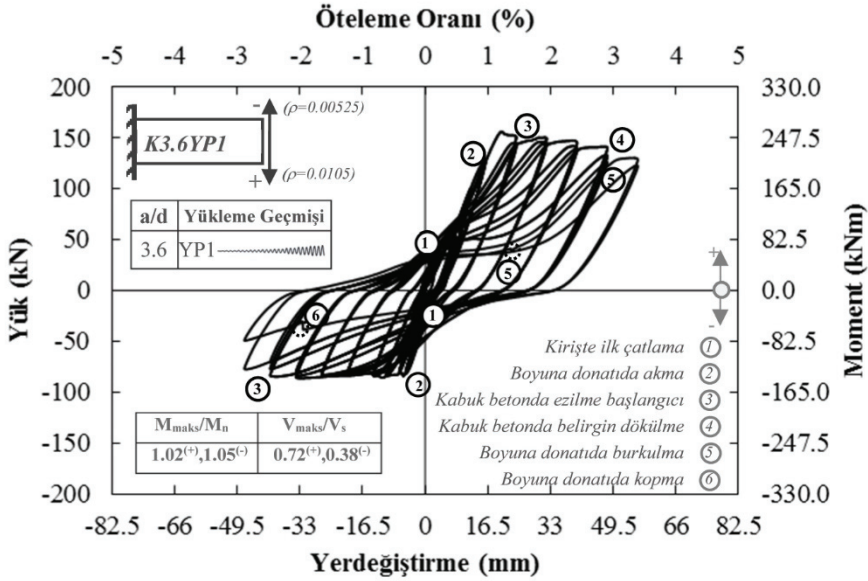
Yerdeğiştirme sünekliği oranları bakımından birbirine özdeş olan ve K6.0YP1 ve K6.0YP2 numunelerine uygulanan YP1 ve YP2 yükleme geçmişleri, Şekil 7’de gösterilmiştir.

### **3. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

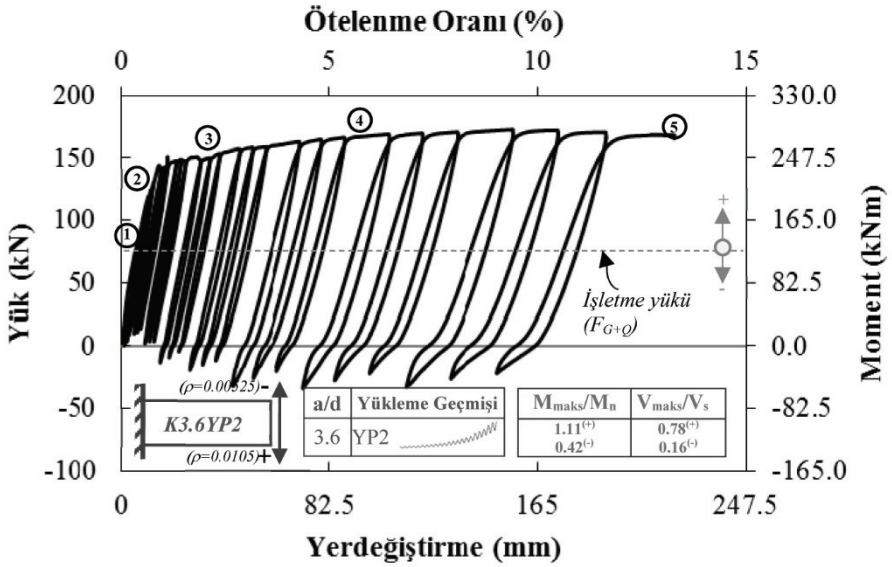
Çalışmanın bu bölümünde, düşey işletme yükünün ihmal edildiği ve belirgin mertebede olduğu kabulleriyle hazırlanan iki farklı tersinir-çevrimsel yüklemeyle göçme durumuna kadar zorlanan numunelerin deneysel sonuçları, karşılaştırmalı olarak irdelenecektir. Deneysel numunelerinin yük-yer değiştirme ve moment-dönme ilişkileri Şekil 8-11’de diyagramlar halinde verilmiştir. Deneysel sırasında meydana gelen ve gelişen hasarı betimlemek amacıyla gözlenen ve/veya ölçülen çeşitli sınır durumlar, bu diyagramlar üzerine işaretlenmiştir. Numunelerin deney sonu göçme biçimleri ise Şekil 12’de verilen fotoğraflar ile topluca gösterilmiştir. Deneysel numunelerinin tamamı taşıma gücü sınır durumuna eğilme kırılmasıyla ulaşmış olup, deney sırasında numunelerde gözlenen hasar durumları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Şekil 8 ve Şekil 10’da verilen yük-yerdeğiştirme ilişkilerinden de görüleceği üzere, K3.6YP1 ve K6.0YP1 numunelerinde, hem pozitif hem de negatif eğilme doğrultusunda yön değiştiren (çift yönlü) plastik mafsallı oluşumu söz konusudur. İki deneysel numunesinde de güç tükenmesi hasar durumları eğilme yönüne göre değişkenlik göstermiştir. Kiriş kesiti üst donatılarını çekmeye çalıştıran eğilme zorlamasında, güç tükenmesi basınç donatılarının burkulmasıyla, tersi yönünde eğilme etkisinde güç tükenmesi ise çekme donatılarında kopma ile meydana gelmiştir. Sözü edilen her iki hasar durumu da, deneysel numunelerinin boyuna donatı oranının düşük olduğu tarafta meydana gelmiştir. Deneysel numunelerinin kuvvet-yer değiştirme davranışının simetrik olmaması ve kesitin alt yüzündeki boyuna donatıda gözlenen hasar durumları, kiriş boyuna donatı düzeninin simetrik olmamasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, yön değiştiren ya da çift yönlü plastik mafsallı oluşumu gözlenen numunelerin rijitliğinde eğilme yönüne göre davranış farklılığı, simetrik olmayan donatı düzeni ve tersinir yüklemede her iki eğilme doğrultusunda da çekme hasarına bağlı gelişen çatlak oluşumundan kaynaklanmaktadır.

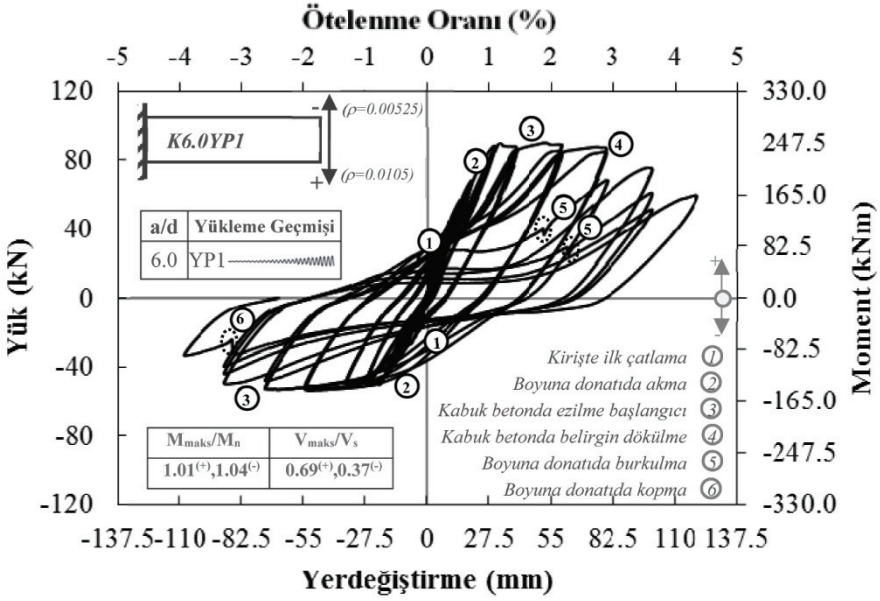
Şekil 9 ve Şekil 11’den de görüleceği üzere K3.6YP2 ve K6.0YP2 numunelerinde yön değiştirmeyen, bir başka ifadeyle tek yönlü plastik mafsallı oluşumu söz konusudur. Bu durum, işletme yükü ve deprem ortak etkisinde kiriş mesnet kesitinin elastik ötesi zorlanması; işletme yükü ve ters yönlü zorlanma yaratan deprem etkisinde ise kesitin plastik moment kapasitesinin altında zorlanması durumuna karşı geldiği yükleme durumlarına benzeştirilebilir. Deneysel numunelerinde göçme davranışı, boyuna donatı oranı düşük olan kesit alt yüz bölgesindeki donatıların burkulmasıyla ortaya çıkmaktadır.



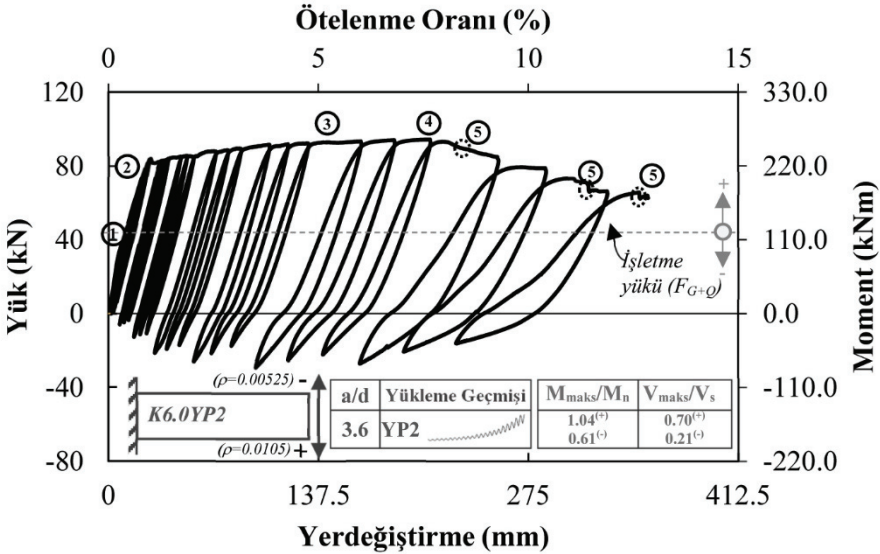
Şekil 8 - K3.6YP1 numunesinde çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 9 - K3.6YP2 numunesinde çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi

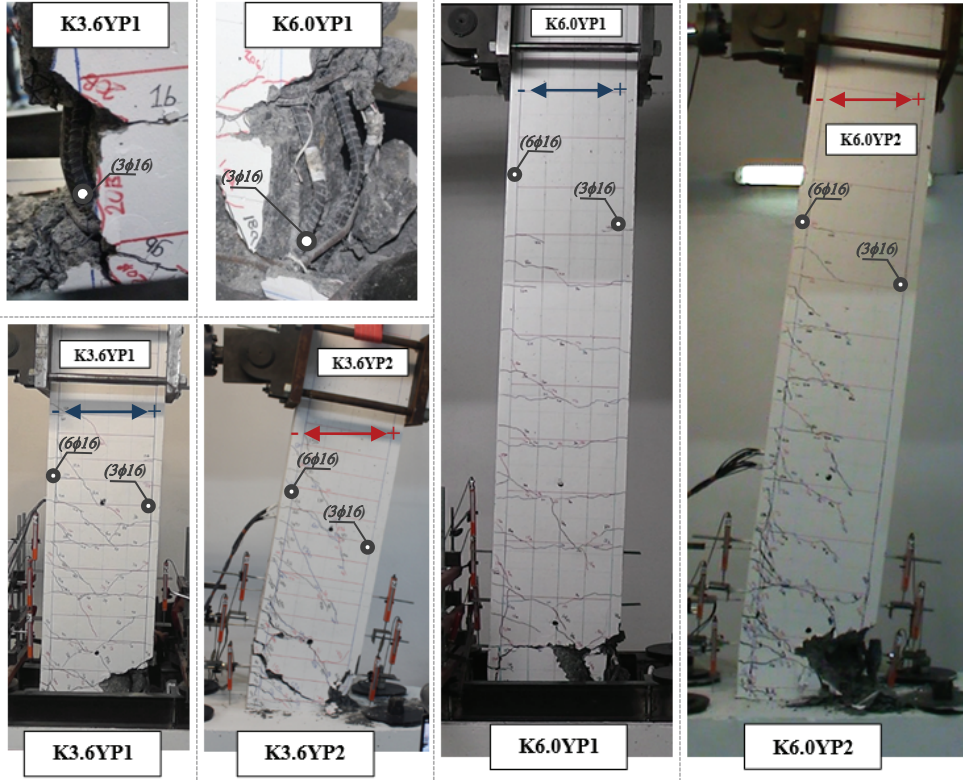


Şekil 10 - K6.0YP1 numunesinde çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 11 - K6.0YP2 numunesinde çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi

K3.6YP2 numaralı numunede burkulmanın, sadece köşe donatıda meydana gelmesi nedeniyle yüklemeye bu noktada son verilmiştir. K6.0YP2 numunesinde ise burkulma sonrası çevrimsel yüklemeye adımlarına bir miktar daha devam edilmiştir ve boyuna donatıda burkulma gözlenen her iki numune de düşey yük etkisini ( $F_{G+Q}$ ) karşılama açısından yeterli kapasiteye sahip olmasına karşın, numunelere uygulanan yer değiştirme yeterli görülerek, deney sonlandırılmıştır.



Şekil 12 - Deney numunelerinin göçme şekilleri

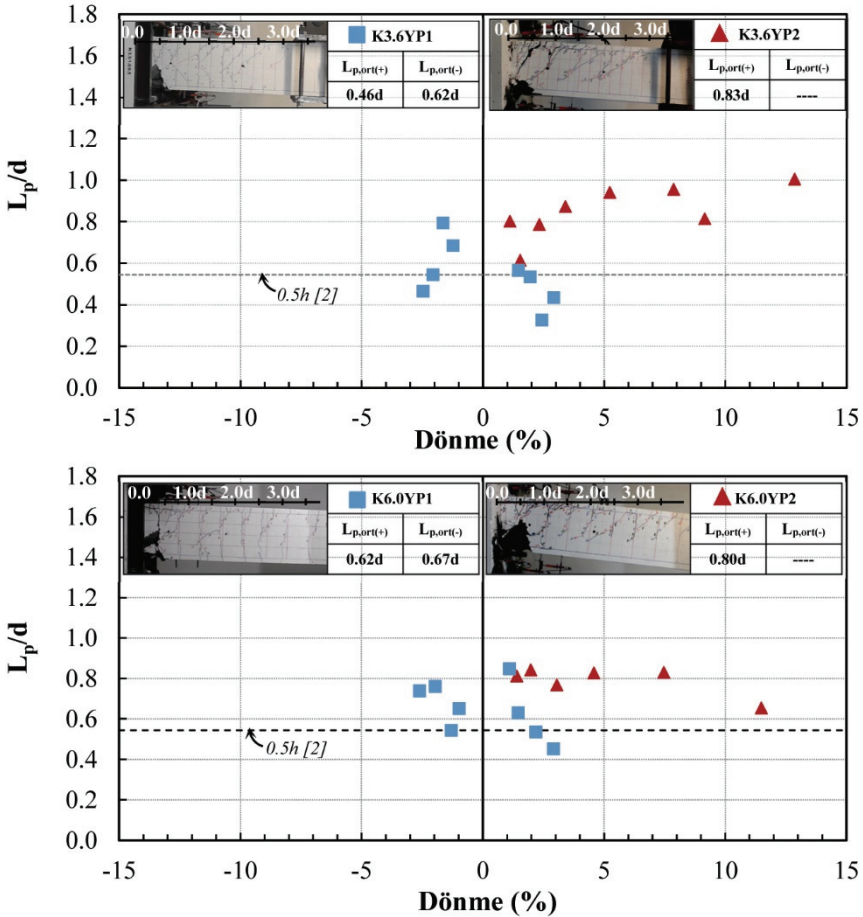
Şekil 8~11'den de görüleceği üzere, tek yönlü (yön değiştirmeyen) plastik mafsallı oluşumu gözlenen deney numunelerinin plastik dönme kapasiteleri, çift yönlü (yön değiştiren) plastik mafsallı oluşumu gözlenen deney numunelerinin plastik dönme kapasitelerinin oldukça üzerindedir. Bu belirgin farklılığa etki eden bileşenlerin değerlendirilmesinde, plastik dönme, plastik mafsallı teoriden [23] yararlanılarak bileşenlerine ayrılacaktır. Bilindiği gibi elastik ötesi zorlanan betonarme bir kesitte plastik dönme ( $\theta_p$ ), kesitin plastik eğriliği ( $\phi_p$ ) ve plastik mafsallı boyuna ( $L_p$ ) bağlı biçimde (1) bağıntısıyla ifade edilebilir.

$$\theta_p = \phi_p \cdot L_p = (\phi_u - \phi_y) \cdot L_p \quad (1)$$

(1) bağıntısında  $\phi_u$  kesitin toplam eğriliğini ve  $\phi_y$  ise kesitin akma eğriliğini göstermektedir. Betonarme bir kesitin birim boyağı dönme açısına karşı gelen toplam kesit eğriliğı, kesitin en dış basınç ve çekme yüzü malzeme birim şekil değıştirmeleri ( $\epsilon_{cm}$ ,  $\epsilon_{sm}$ ) ve tarafsız eksen derinliğıne ( $x$ ) göre (2) bağıntısıyla ifade edilebilir.

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cm}}{x} = \frac{\epsilon_{sm}}{d - x} \quad (2)$$

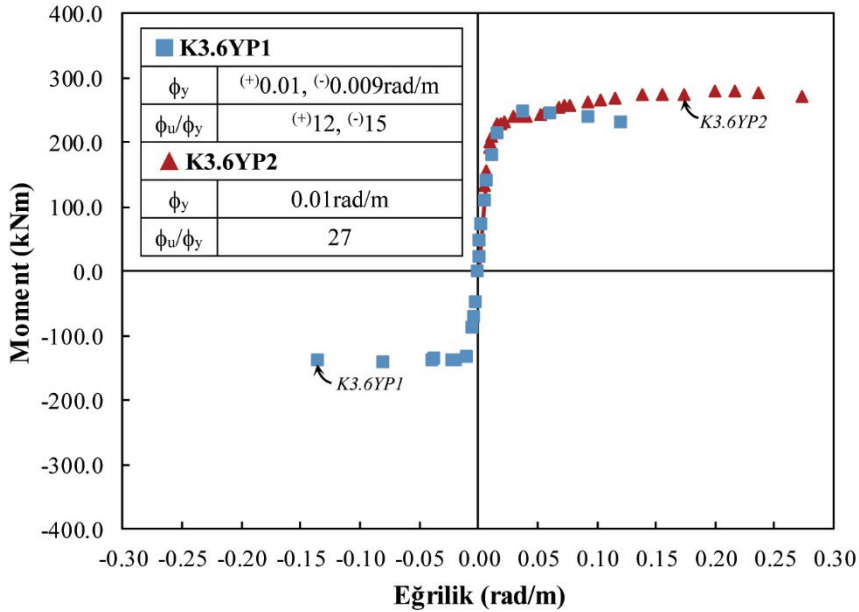
Çift ya da tek yönlü plastik mafsal davranışı sergileyen deney numunelerinde, plastik mafsal boylarının dönme talebine göre değışimleri Şekil 13'deki diyagramlar üzerinde karşılaştırılarak, gösterilmiştir. Deney numunelerinin elastik ötesi davranış sergilediğı bölgede, plastik mafsal boylarının saptanmasında akma limit durum, boyuna donatılara yerleştirilen birim şekil değıştirme ölçerler yardımıyla, toplam eğrilik ise mesnet bölgesinde 3 ayrı ölçüm noktasında yer alan LVDT yer değıştirmeleri yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 13 - Deney numunelerinde plastik mafsal boyunun dönme talebine göre değışimleri

Şekil 13'den de görüleceği üzere, yön değiştiren plastik mafsal davranışı gözlemlenen K3.6YP1 ve K6.0YP1 numunelerinin plastik mafsal boyları, eğilme yönü ve a/d oranına göre farklılık göstermiştir. Numunelerde, donatı oranı yüksek olan yüzdeki boyuna donatıları çekmeye zorlayan eğilme etkisinde  $L_p/d$  oranları, sırasıyla 0.46 ve 0.62, diğer eğilme doğrultusunda ise bu oranlar 0.62 ve 0.67 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler, Türk deprem yönetmeliğindeki  $L_p \approx 0.5h$  [2] kabulüyle karşılaştırıldığında, deneysel ve analitik plastik mafsal boyları arasındaki oranların  $\pm\%15$  arasında değiştiği ve yönetmelik kabulünün, boyuna donatı azaldıkça ya da a/d oranı arttıkça genelde ihtiyatlı sonuçlar verdiği söylenebilir. Tek yönlü (yön değiştirmeyen) plastik mafsal davranışı sergileyen K3.6YP2 ve K6.0YP2 numunelerinin plastik mafsal boyları, yön değiştiren plastik mafsal davranışı gözlenen numunelerin plastik mafsal boylarının üzerindedir. Yönetmelikte [2] verilen yanıl donatı minimum şartlarını sağlayan K3.6YP2 numunesi plastik mafsal boyu, özdeş K3.6YP1 numunesinin plastik mafsal boyuna oranlandığında, ortalama plastik mafsal boyları arasındaki oran 1.8, son limit durumdaki plastik mafsal boyları arasındaki oran ise 2.3'tür. K6.0YP2 numunesinin K6.0YP1 numunesi plastik mafsal boyuna göre sözü edilen oranlar, sırasıyla 1.3 ve 1.7'dir.

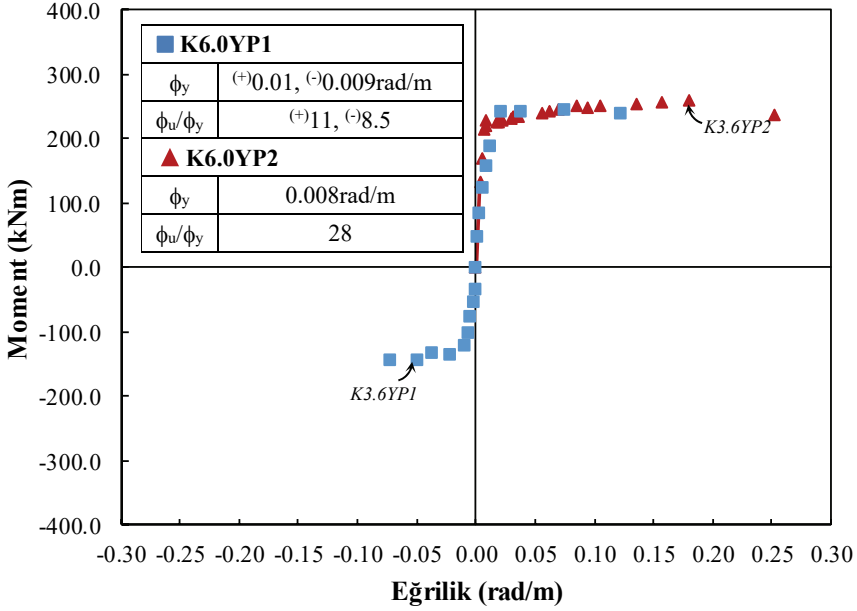
Şekil 14 ve Şekil 15'de tek ve çift yönlü plastik mafsal davranışı sergileyen numunelerin deneysel moment-eğrilik zarf ilişkileri, aynı diyagram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 14 - K3.6YP1 ve K3.6YP2 numunelerinde deneysel moment-eğrilik ilişkileri

Şekillerden de görüleceği üzere, deney numunelerinin akma limit durumuna karşı gelen kesit eğrilikleri birbirine oldukça yakın olmasına karşın, son limit eğriliklerinde belirgin farklılık söz konusudur. Bu farklılıkların daha kolay bir biçimde gözlenebilmesi amacıyla,

numunelerin akma eğrilikleri ve eğrilik süneklik oranları ( $\phi_u/\phi_y$ ) moment-eğrilik diyagramları üzerinde çizelge halinde verilmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri ve son limit durum eğrilik sünekliği oranlarının karşılaştırılmasından, tek yönlü plastik mafsal davranışı sergileyen numunelerin eğrilik sünekliği oranlarının, yön değiştiren plastik mafsal davranışı sergileyen numunelere göre yaklaşık 2 kat daha büyük olduğu söylenebilir.

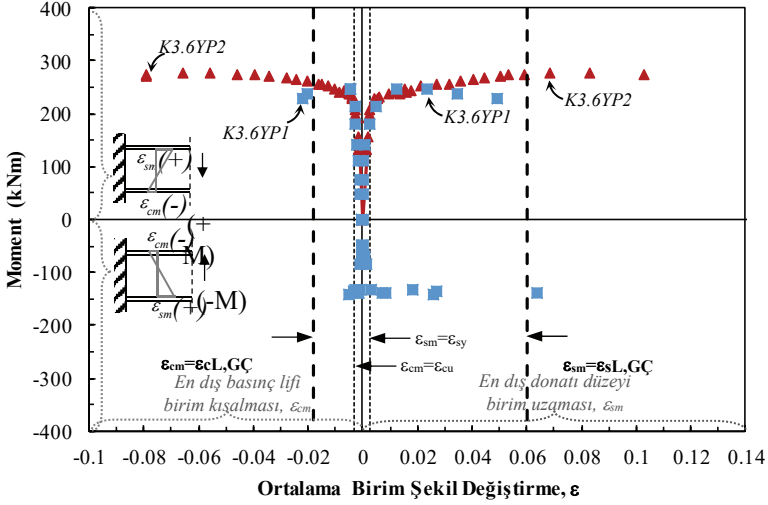


Şekil 15 - K6.0YP1 ve K6.0YP2 numunelerinde deneysel moment-eğrilik ilişkileri

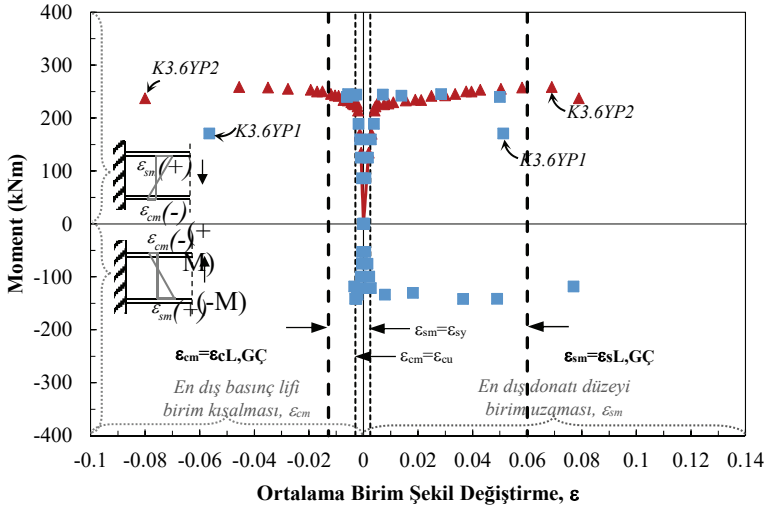
(2) bağıntısından görüleceği gibi, basınç ve/veya çekme bölgesi için tanımlanan malzeme birim şekil değiştirme sınırları, kesitin sınır eğriliğini ve dolayısıyla sınır dönme kapasitesini betimleyen önemli değişkenlerdir. Bu sınır birim şekil değiştirmelerdeki değişim, kesitin yük taşıma kapasitesi üzerinde sınırlı miktarda, plastik dönme kapasitesi üzerinde ise önemli miktarda değişime neden olur. Bu bağlamda, deney numunelerinin mesnet bölgesinde ölçülen malzeme birim şekil değiştirmelerinin eğilme momenti talebi ile değişimi, Şekil 16 ve Şekil 17'de, plastik mafsal davranış farklılığına göre karşılaştırılmıştır. Şekillerden de görüleceği üzere, yön değiştiren plastik mafsal davranışı sergileyen K3.6YP1 ve K6.0YP1 numunelerinde boyuna donatı oranı az olan kiriş yüzünün çekmeye zorlandığı ( $M < 0$ ) elastik ötesi davranışta hasar, *donatı kontrollü* sınır durumla gerçekleşmektedir. Donatı oranının azalmasıyla -kuvvet dengesi gereği- tarafsız eksen derinliğinin küçüleceği ve dolayısıyla çekme donatısındaki birim uzamanın artacağından hareketle bu eğilim doğal karşılanabilir. K3.6YP1 ve K6.0YP1 numunelerinde boyuna donatı oranı yüksek olan kiriş yüzünü çekmeye zorlayan ( $\rho'/\rho = 0.5$ ,  $M > 0$ ) elastik ötesi davranışta, basınç donatılarının burkulmasıyla en dış beton lifindeki birim kısalmada bir sıçrama gözlenmekte ve beton birim kısalması sargılı beton ezilme birim kısalmasının üzerine çıkmaktadır. Bu davranış, özellikle yanal donatı aralığı Türk Deprem Yönetmeliği [2] sınırlamalarını karşılamayan ( $S_e/\phi_{boyuna} = 12.5$ )



K6.0YP1 numunesinde daha belirgin olarak gözlenmektedir. Boyuna donatıdaki burkulma öncesi sargılı beton basınç lifi birim şekil değiştirme istemi, örtü betonu ezilme birim kısalmasına yakinken, donatı burkulmasını takip eden yükleme çevrimi içinde sargılı beton birim kısalma isteminde ani bir sıçrama gerçekleşmekte ve ezilme meydana gelmektedir.



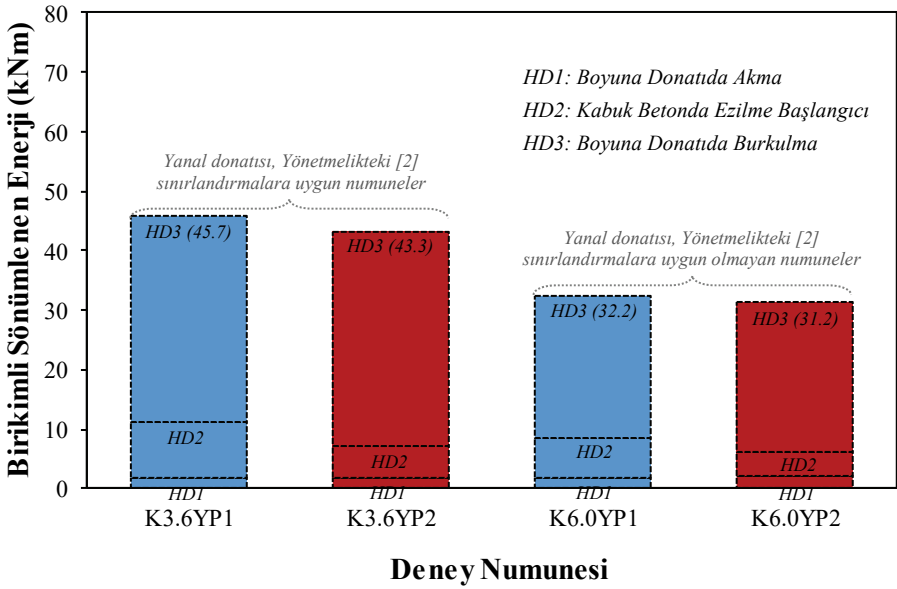
Şekil 16 - K3.6YP1 ve K3.6YP2 numunelerinde deneysel moment-malzeme birim şekil değiştirme ilişkileri



Şekil 17 - K6.0YP1 ve K6.0YP2 numunelerinde deneysel moment-malzeme birim şekil değiştirme ilişkileri

K3.6YP1 numunesi yanal donatı aralığı bakımından ( $s_c/\phi_{boyuna}=8.0$ ) Türk Deprem Yönetmeliği [2] sınırlarını sağlamakla beraber, benzer durum -daha sınırlı miktarda olmakla birlikte- söz konusudur. Tek yönlü plastik davranış sergileyen K3.6YP2 ve K6.0YP2 numunelerinin malzeme birim şekil değiştirmelerinin, çift yönlü plastik mafsal oluşumu gözlenen kontrol numunelerinin birim şekil değiştirmelerinin üzerinde olduğu söylenebilir.

Bilindiği gibi tersinir ve çevrimsel yükler altında zorlanan taşıyıcı elemanların yük-gerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alanların toplamı, birikimli sönmülenen enerji olarak tanımlanır. Deney programında YP1 ve YP2 isimli iki farklı yükleme geçmişinin uygulandığı özdeş deney numuneleri için güç tükenmesi durumundaki sönmülenen enerji kapasiteleri, Şekil 18 üzerinde karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda, deney numunelerinin yük-gerdeğiştirme ilişkileri üzerinde işaretlenen 3 farklı hasar durumuna (donatıda akma, örtü betonda ezilme başlangıcı ve boyuna donatıda burkulma hasar durumları) karşı gelen birikimli sönmülenen enerji değerleri de işaretlenerek, farklı hasar durumdaki enerji kapasitelerinin kıyaslanması amaçlanmıştır.



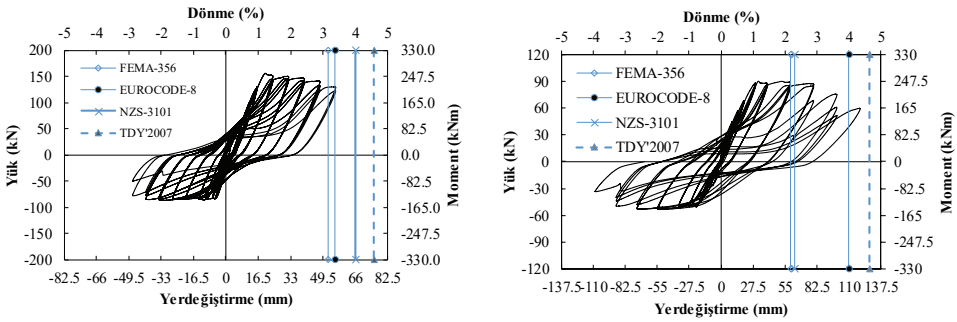
Şekil 18 - YP1 ve YP2 yükleme geçmişlerinin uygulandığı numunelerde güç tükenmesi durumunda birikimli sönmülenen enerji kapasitelerinin karşılaştırılması

Şekil 18’de çevrim sayısından bağımsız olarak yapılan karşılaştırmalardan da görüleceği gibi, YP1 yükleme geçmişinin uygulandığı numunelerde, farklı hasar durumlarına karşı gelen sönmülenen enerji kapasitelerinin, YP2 yükleme geçmişinin uygulandığı numunelerin enerji kapasitesine kıyasla; bir miktar büyük olmakla birlikte, yaklaşık olarak eşit olduğu söylenebilir. Buna karşın, yönetmelikte [2] verilen yanal donatı aralık sınırlarını karşılayan ve karşılamayan numuneler, yükleme geçmişi farklarına göre hasar durumu açısından kıyaslandıklarında, birikimli sönmülenen enerji kapasiteleri arasındaki farklılığın daha belirgin düzeyde olduğu söylenebilir.

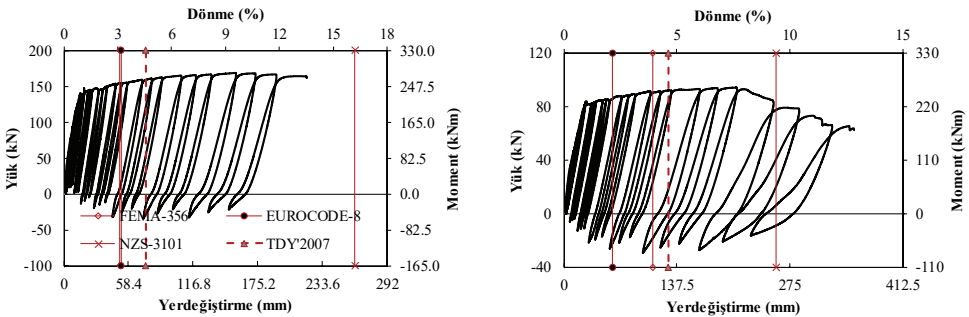
#### 4. DENEYSEL VE ANALİTİK GÖÇME HASAR SINIR DURUMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Performansa dayalı tasarıma yönelik dokümanlarda tanımlanan hasar seviyelerinin nicel ifadesi olarak, sünek taşıyıcı sistem elemanları için plastik şekil değiştirme sınırları kullanılır. Çeşitli tasarım yönetmeliklerinde [2, 3, 19 ve 20] tanımlanan göçme hasar sınırı yer değiştirmelerinin, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, Şekil 19 ve Şekil 20’de verilen diyagramlar üzerinde özetlenmiştir.

Şekil 19’dan da görüleceği gibi, yön değiştiren plastik mafsalsal davranışı sergileyen deney numuneleri için, Eurocode-8 [3] ve FEMA-356 [19] yönetmeliklerince tanımlanan analitik göçme yer değiştirme sınırları, deneysel sonuçlara oldukça yakındır. Yeni Zelanda Betonarme Yapı Standardının (NZS-3101) [20] analitik göçme sınırı tahminleri -elemanın süneklik düzeyine bağlı olması nedeniyle- yanal donatısı sık ve a/d oranı 3.6 olan numunede kapasitenin bir miktar üzerinde, yanal donatısı seyrek ve a/d oranı 6.0 olan numunede ise bir miktar altındadır. Türk Deprem Yönetmeliğinde göçme hasarı için verilen ve yanal donatıya bağlı sargılı beton birim şekil değiştirme sınırı ile belirlenen yer değiştirme kapasitesinin -özellikle yanal donatısı seyrek numunede- deneysel kapasitenin üzerinde olduğu söylenebilir.



Şekil 19 - K3.6YP1 (sol) ve K6.0YP1 (sağ) numunelerinde analitik göçme sınırı tahminlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması



Şekil 20 - K3.6YP2 (sol) ve K6.0YP2 (sağ) numunelerinde analitik göçme sınırı tahminlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Şekil 20'de verilen karşılaştırmalardan da görüleceği üzere, kritik kesitinde yön değiştirmeyen plastik mafsal davranışı söz konusu olan deney numuneleri için Eurocode-8, FEMA-356 ve Türk Deprem Yönetmeliğinin analitik göçme hasar sınırı tahminleri, deneysel sonuçlara göre ihtiyatlı kalmaktadır. NZS-3101 yönetmeliğinin analitik göçme sınırı tahminleri ise -yönetmelik tahmininin, tek ya da çift yönlü plastik mafsal durumu ve süneklik düzeyine bağlı değişmesi nedeniyle- yanal donatısı sık ve a/d oranı düşük olan numunede kapasitenin bir miktar üzerinde; yanal donatısı seyrek ve a/d oranı ise yüksek numunede ise başarılı olduğu söylenebilir.

Türk Deprem Yönetmeliğinin göçme sınırı yer değiştirme kapasitesi tahminleri tek yönlü plastik mafsal davranışı durumunda deneysel kapasitenin altında, çift yönlü plastik mafsal oluşumu durumunda ise deneysel kapasitenin üzerinde sonuçlar verebilmektedir. Yönetmelikte malzeme birim şekil değiştirme üst limitlerine göre tanımlanan Göçme Sınırı Hasar durumunun, aşağıda maddeler halinde verilen öneriler dikkate alınarak geliştirilebileceği değerlendirilmektedir:

- Göçme hasarı için Türk Deprem Yönetmeliğinde [2] sargılı beton basınç lifi için tanımlanan malzeme birim şekil değiştirme ifadesi, basınç bölgesindeki boyuna donatılarda burkulma durumu için tanımlanacak bir üst değer ile sınırlandırılabilir (basınç donatısının beton basınç lifine yakınlığı gözetilerek). Çalışmada basınç donatısı burkulma birim şekil değiştirme sınırının ifade edilmesinde, Aydemir ve Eser [24] tarafından geliştirilen ve basınç etkisi altındaki donatı davranışının araştırıldığı geniş bir deneysel çalışma [25] sonuçlarının kullanıldığı bağıntılardan yararlanılacaktır. Sözü edilen bağıntılar  $f_{su}/f_y \approx 1.3$  kabul edilerek, daha sade bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{s}{\phi_b} \geq 9, \quad \varepsilon'_{s,L(\%5)} &= \varepsilon'_{sy} + 0.02 \cdot e^{\left(1.42 - 0.33 \frac{s}{\phi_b}\right)} \\ 6 \leq \frac{s}{\phi_b} < 9, \quad \varepsilon'_{s,L(\%5)} &= \varepsilon'_{sy} + 0.06 \cdot e^{\left(5 - 0.86 \frac{s}{\phi_b}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) bağıntısında,  $\varepsilon'_{s,L(\%5)}$ , basınç donatısı gerilmesinin akma gerilmesinin %95'ine düştüğü duruma karşı gelen birim şekil değiştirme sınırını,  $\varepsilon'_{sy}$ , basınç donatısı akma birim şekil değiştirmesini ve  $s/\phi_b$  ise burkulma boyunun, boyuna donatı çapına oranını göstermektedir. Bağıntıda yer alan burkulma boyunun (s), etriye aralığına ( $s_e$ ) bağlı bir biçimde belirlenmesinde, Aydemir ve Eser [21] tarafından enerji esaslı bir yöntem kullanılarak [26] geliştirilen bir bağıntıdan yararlanılacaktır.

$$\frac{s}{s_e} = 0.7 + \frac{0.24}{\zeta} \geq 1, \quad \zeta = \frac{32 \cdot \frac{A_{sh}}{d_h} \cdot \left(\frac{s_e}{\phi_b}\right)^2 \cdot s_e}{\pi^4 \cdot A_s' \cdot \sqrt{\frac{f_y}{400}}} \quad (4)$$

(4) bağıntısında,  $A_{sh}$ , göz önüne alınan eğilme doğrultusundaki yanal donatı kollarının en kesit alanları toplamı,  $\phi_b$ , göz önüne alınan eğilme doğrultusundaki basınç donatısı minimum çapı,  $s_e$ , yanal donatı aralığı,  $A_s'$  göz önüne alınan eğilme doğrultusundaki basınç yüzü donatılarının en kesit alanı toplamı,  $f_y$ , donatı akma dayanımıdır. Burkulma boyunun belirlenmesinde kullanılan  $\xi$  parametresinin ifade edildiği bağıntıda, pay ve payda  $(b_w \times d)$ 'ye bölünüp,  $f_y=420\text{MPa}$ ,  $d_h \approx 0.98 \times d$  kabulleri ve  $\rho_w = A_{sh}/(s_e \times b_w)$ ,  $\rho' = A_s'/(b_w \times d)$  kısaltmalarıyla, burkulma boyu ifadesi daha sade bir biçimde aşağıdaki (5) bağıntısıyla da ifade edilebilir.

$$\frac{s}{s_e} = 0.7 \times \left\{ 1 + (1.05 \times \rho') / \left[ \left[ \rho_s \times \left( \frac{s_e}{\phi_b} \right)^2 \times \left( \frac{s_e}{d} \right)^2 \right] \right] \right\} \geq 1, \quad (5)$$

Yukarıda tanımlanan basınç donatısı burkulma birim şekil değiştirme sınırı yardımıyla, Türk Deprem Yönetmeliğindeki Göçme Hasar Sınırı sargılı beton birim şekil değiştirmesi, *sargı koşullarını sağlayan ve sağlamayan elemanlar için aşağıdaki bağıntılar ile ifade edilebilir.*

*Türk Deprem Yönetmeliğinde verilen sargı koşullarını sağlamayan kirişlerde;*

$$\left( \varepsilon_{cg} \right)_{GC} = 0.004 + 0.014 \times \frac{\rho_s}{\rho_{sm}} \leq \varepsilon'_{s,L(\%5)} \quad (6)$$

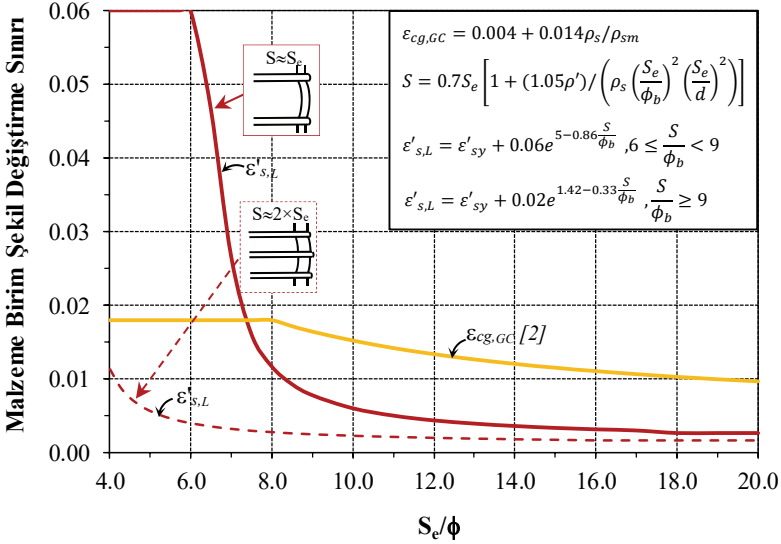
*Türk Deprem Yönetmeliğinde verilen sargı koşullarını sağlayan kirişlerde;*

$$\left( \varepsilon_{cg} \right)_{GC} = 0.018 \leq \varepsilon'_{s,L(\%5)} \quad (7)$$

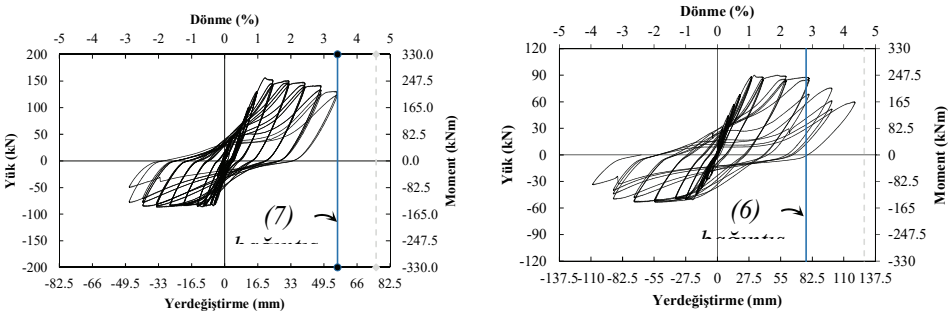
Şekil 21'de basınç bölgesinde hasarın betimlenmesinde kullanılan malzeme birim şekil değiştirme sınırları, aynı diyagram üzerinde gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, donatının 1. mod şekline uygun burkulması ve etriye aralığının basınç donatısı çapının 7 katının üzerinde olması halinde, sargılı beton ve basınç donatısı birim şekil değiştirme sınırları arasında farklılık belirginleşmektedir. Aynı burkulma şeklinde, etriye aralığının basınç donatısı çapının 7 katı ve altında olması durumlarında ise malzeme birim kısalması 0.018'dir. Şekilde kesikli çizgi ile gösterilen donatı birim şekil değiştirme sınırı, donatı burkulma boyunun etriye aralığının iki katına eşit alındığı burkulma şekline karşı gelmektedir. Bu burkulma şekli, basınç yüzündeki donatı miktarının yüksek olduğu, etriye aralığının sık, etriye çapı ve kol sayısının az olduğu durumlarda oluşabilir.

- Çift yönlü plastik davranış sergileyen kirişlerin Göçme Sınırı Hasar yerdeğiştirme kapasitelerinin belirlenmesinde  $L_p \approx 0.5h$  alınabilir [2].
- Tek yönlü plastik davranış sergileyen kirişlerin Göçme Sınırı kesit eğrilikleri ve plastik mafsal boyları, çift yönlü plastik davranış kabullerine göre belirlenen değerlerin 2 katı alınabilir [16, 20].

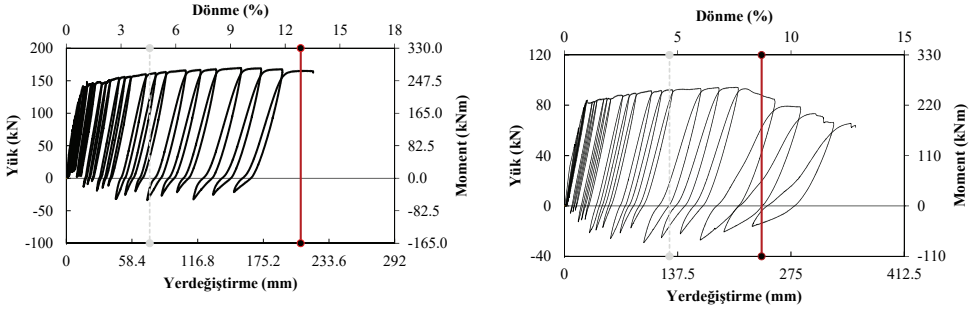
Yukarıda maddeler halinde açıklanan yaklaşımın sonuçlarının, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 22 ve 23'de gösterilmiştir. Önerilen yöntemin literatürdeki çeşitli deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması da Çizelge 3'de özetlenmiştir. Sınırlı sayıda numune ile yapılan bu karşılaştırma sonuçlarından da görüleceği üzere, tek ya da çift yönlü plastik mafsal oluşumu durumlarında önerilen yöntemle belirlenen analitik hasar sınırı yer değiştirme kapasiteleri, deneysel sonuçlara yakın sonuçlar vermektedir.



Şekil 21 - Göçme hasar sınırı durumunda sargılı beton lifi ve basınç donatısı malzeme şekil değiştirme sınırlarının  $s_e/\phi$  oranı ve burkulma boyuna göre değişimleri



Şekil 22 - K3.6YP1 (sol) ve K6.0YP1 (sağ) numunelerinde önerilen yöntemle belirlenen analitik göçme hasar sınırı yer değiştirme kapasitelerini deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması



Şekil 23 - K3.6YP2 (sol) ve K6.0YP2 (sağ) numunelerinde önerilen yöntemle belirlenen analitik göçme hasar sınırı yer değiştirme kapasitelerini deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

Çizelge 3 - Önerilen Göçme Hasar Sınırı yaklaşımının, literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Referans/ Numune	b/h (cm/cm)	$f_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	Boyuna donatı (Ü: üst/A: Alt)	Enine Donatı ( $\phi/s$ )	$\Delta_{maks,deneysel}$ (mm)	$\Delta_{maks,önerilen}$ (mm)
[16]/A1*	25/40	41.8	350	Ü:3 $\phi$ 25/A:3 $\phi$ 25	10/17.5	42.6	54.9
[16]/A2*	25/40	41.8	350	Ü:3 $\phi$ 25/A:3 $\phi$ 25	10/10	56.8	57.6
[16]/C1*	25/40	27.4	350	Ü:5 $\phi$ 25/A:2 $\phi$ 16	10/13	35.5	24.6
[16]/C2**	25/40	27.4	350	Ü:5 $\phi$ 25/A:2 $\phi$ 16	10/13	78.1	79.3
[16]/D1*	41/40	25.6	570	Ü:3 $\phi$ 16/A:3 $\phi$ 16	10/17.5	49.7	40.9
[16]/D2**	41/40	25.6	570	Ü:3 $\phi$ 16/A:3 $\phi$ 16	10/17.5	142	135.5
[17]/VR1*	25/50	41.7	473	Ü:4 $\phi$ 16***/A:2 $\phi$ 16	10/15	26.5	25.9
[17]/VR2**	25/50	44.8	473	Ü:4 $\phi$ 16***/A:2 $\phi$ 16	10/15	87	83.5

(\*) Çift yönlü plastik mafsal davranış durumu,

(\*\*) Tek yönlü plastik mafsal davranış durumu,

(\*\*\*) Tablali kesitte üst boyuna donatıya ilave olarak iki sıra halinde döşeme donatısı mevcuttur.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tersinir-çevrimsel yüklemeler altında zorlanan kirişlerde yön değiştiren ve değiştirmeyen plastik mafsal davranış biçimleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney programında, plastik mafsal davranış biçimindeki farklılığın; kesit eğriliği, plastik mafsal boyu ve göçme sınırı yer değiştirme kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Sınırlı sayıda deney numunesi sonucu esas alınarak yapılan karşılaştırmalardan elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Deprem etkisinde kiriş eksenli boyunca sabit olan kesme kuvveti, sadece düşey işletme yüklerinden oluşan tesirlerin, depremlidurumdaki tasarım değerine kıyasla belirgin mertebede olması durumunda işaret değiştirebilir. Çerçeve kirişlerinde kesme kuvvetinin

işaret değişimi, negatif eğilmeye zorlanan kiriş mesnet kesitinde maksimum eğilme momentinin (plastik mafsal momenti) kolon yüzünde oluşmasına, pozitif eğilmeye zorlanan kiriş mesnet bölgesinde ise maksimum eğilme momentinin mesnetten açıklık bölgesine doğru kaymasına neden olur (Bkz. Şekil 2). Bu durumda çerçeve kirişlerinde meydana gelecek tek yönlü (yön değiştirmeyen) plastik mafsal oluşumu, kirişin kapasite tasarımı hesap esaslarını, boyuna ve enine donatıların detaylandırılması gibi çeşitli hususlar üzerinde değişkenlik yaratabilir.

- Yön değiştirmeyen plastik mafsal davranışının gözlemlendiği deney numunelerinin plastik dönme kapasiteleri, çift yönlü plastik mafsal davranışı gözlenen deney numunelerinin plastik dönme kapasitelerinin üzerindedir (Bkz. Şekil 8~11). Benzer eğilim, plastik mafsal boyu ve toplam kesit eğriliği için de söylenebilir. Göçme Hasar Sınırı için tek yönlü plastik mafsal durumundaki kesit eğriliği ve plastik mafsal boyları, çift yönlü plastik mafsal davranış durumundaki kesit eğriliği ve plastik mafsal boyunun yaklaşık 2 katı üzerinde gerçekleşmiştir (Bkz. Şekil 13~15).
- Çalışmada, plastik mafsal davranış biçimindeki değişkenliğin, Türk Deprem Yönetmeliğinde göçme hasar sınırına karşı gelen yer değiştirme sınırı hesaplarında dikkate alınabilmesi için bazı önerilerde bulunulmuştur. Basınç bölgesinde donatı birim kılma sınırı, yön değiştirmeyen plastik mafsal davranışında kesit eğriliği ve plastik mafsal boyu varsayımlarında yapılan önerilerle belirlenen analitik değerler; sınırlı sayıda numunelerin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve genelde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. (Bkz. Şekil 22 ve Çizelge 3).
- Deney programında konsol kiriş şeklinde uygulanan test düzeni ve deney numunelerinin çift donatılı dikdörtgen kesitli alınabileceği varsayımı, davranışı çok etkilemeyeceği düşünülen basitleştirici kabullerdir. Bununla birlikte, konunun derinleştirilmesi (kiriş mekanizma durumu incelemeleri vb.) amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalarda, çerçeve türü bir yapısal sistemin incelenmesi ve kiriş kesitlerinde tabla betonu ve donatısının bulundurulması önerilmektedir. Ayrıca çalışmada uygulanan işletme yükü kısa süreli yük olarak uygulanmış ve zamana bağlı muhtemel değişimler gözlenememiştir. İşletme yükü tesirinin belirgin mertebede olması ve özellikle basınç bölgesinde beton dayanımının düşük ya da basınç donatısı miktarının az olmasına bağlı olarak, zamana bağlı ilave şekil değiştirmelerin davranış üzerinde etkileri ayrıca incelenmelidir.

### **Semboller**

a : Kirişin kesme açıklığı

$A_{sh}$  : Kesme donatısı toplam kesit alanı

$A_s'$  : Basınç donatısı kesit alanı

b : Kesit genişliği

d : Kesitin etkili derinliği

$d_h$  : yanal donatının mesnet oluşturduğu boyuna donatı eksenleri arası mesafe ( $h-2d'$ )

$f_c$  : Beton basınç dayanımı



- $f_y$  : Donatı akma dayanımı  
 $f_{yw}$  : Sargı donatısı akma dayanımı  
 $f_{su}$  : Donatı çeliği çekme dayanımı  
 $h$  : Kesit yüksekliği  
 $L$  : Kiriş boyu  
 $L_p$  : Plastik mafsal boyu  
 $L_{p,ort}$  : Ortalama eşdeğer plastik mafsal boyu  
 $M_{maks}$  : Deneysel eğilme momentinin maksimum değeri  
 $M_n$  : Deneysel malzeme dayanımları kullanılarak belirlenen eğilme dayanımı  
 $s$  : Burkulma boyu  
 $s_e$  : Plastik mafsal kesiminde yanal donatı aralığı  
 $V_{maks}$  : Deneysel kesme kuvvetinin maksimum değeri  
 $V_s$  : Yanal donatının kesme dayanımına katkısı  
 $\Delta$  : Tepe yer değiştirmesi  
 $\Delta_e$  : Elastik yer değiştirme  
 $\Delta_p$  : Plastik yer değiştirme  
 $\epsilon_o$  : Kiriş eksenine boyunca farklı gözlem aralıklarından ölçülen eğilmeden kaynaklı yerdeğiştirme farklarına göre belirlenen, en dış beton yüzü ( $\epsilon_{cm}$ ) ya da en dış donatı seviyesindeki ( $\epsilon_{cm}$ ) ortalama birim şekil değiştirme.  
 $\epsilon_{cg}$  : Göçme hasar sınırı sargılı beton birim kısalma üst değeri  
 $\epsilon_{cu}$  : TS500-2000'de verilen sargısız beton etkili birim kısalması (0.003)  
 $\epsilon_{sy}$  : Donatı çeliği akma birim şekil değiştirmesi  
 $\epsilon_{sL}$  : Belirli bir hasar sınırında donatı çeliği birim uzama değeri  
 $\epsilon_{s'L}$  : Burkulma hasar sınırı için donatı çeliği birim kısalma sınır değeri  
 $\phi$  : Kesit eğriliği  
 $\phi_b$  : Kesitin basınç yüzündeki en küçük donatı çapı  
 $\phi_L$  : Belirli bir hasar sınırı için toplam kesit eğriliği  
 $\phi_p$  : Plastik Kesit eğriliği  
 $\phi_y$  : Akma eğriliği  
 $\theta_p$  : Plastik dönme  
 $\theta_{p,L}$  : Belirli bir hasar sınırı için plastik dönme

- $\rho$  : Çekme donatısı oranı  
 $\rho_s$  : Yanal donatı oranı  
 $\rho_{sm}$  : Minimum yanıl donatı oranı  
 $\rho'$  : Basınç donatısı oranı

### **Teşekkür**

Bu çalışma, İstanbul Aydın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce BAP2016-01 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Proje çalışmasında değerli emekleri olan Prof. Dr. Metin GER'e, ayrıca deneylerin gerçekleştirilmesine katkı sağlayan Prof. Dr. Güray ARSLAN'a (YTÜ) , İstanbul Aydın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı teknik ekibine ve UTEST'e teşekkürlerimizi sunarız.

### **Kaynaklar**

- [1] Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TS-500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [2] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Mart 2007.
- [3] EN 1998-3, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings, Brussels, 2003.
- [4] Corley, G. W., Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, V. 92, 121-146, 1966
- [5] Baker, A. L. L., and Amarakone, A. M. N., Inelastic Hyperstatic Frame Analysis, Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ACI, SP-12, 85-142, 1967.
- [6] Mattock, A. H., Rotational Capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams, Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ACI, SP-12, 143-181, 1967.
- [7] Eligehausen, R., and Langer, P., Rotation Capacity of Plastic Hinges and Allowable Moment Redistribution, CEB Bulletin, No. 175, 17.9-17.27, 1987.
- [8] Hillerborg, A., Fracture Mechanics Concepts Applied to Moment Capacity and Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams, Engineering Fracture Mechanics, V. 35, 233-240, 1990.
- [9] Bigaj, A. J., Structural Dependence of Rotation Capacity of Plastic Hinges in RC Beams and Slabs, PhD thesis, Delft University, the Netherlands, 1999.
- [10] Bigaj, A. J., and Walraven, J., Size Effects on Plastic Hinges of Reinforced Concrete Members, Heron, V. 47, 53-75, 2002.
- [11] Ma, S.Y.M., Bertore, V.V, and Popov, E.P., Experimental and Analytical Studies On Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams, Report EERC 76-2, University of California, Berkeley, May 1976, 241 pages.

- [12] ECCS, Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads, European Convention for Constructional Steelwork, 1985.
- [13] ACI T1.1-01, Acceptance criteria for moment frames based on structural testing, ACI, 2001.
- [14] ATC Report No. 24, Guidelines for seismic testing of components of steel structures, ATC, 1992.
- [15] Megget, L. M. and Fenwick, R. C., Seismic behaviour of a reinforced concrete portal frame sustaining gravity loads, Bulletin of NZ Society for Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 1, 1989.
- [16] Walker A.F., and Dhakal R.P., Assessment of material strain limits for defining plastic regions in concrete structures, Bulletin of The New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 42, No. 2, 2009.
- [17] 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.
- [18] Kaya E., Kütan C., Sheikh S., and İlki A., Flexural Retrofit of Support Regions of Reinforced Concrete Beams with Anchored FRP Ropes Using NSM and ETS Methods under Reversed Cyclic Loading, J. Compos. Constr., 21(1), 2017.
- [19] Federal Emergency Management Agency, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington (DC): FEMA-356, 2000.
- [20] SANZ Concrete Structures Standard, NZS 3101:2006. Standards Association, Wellington, NZ, 2006.
- [21] Ersoy U., Betonarme Kiriş ve Kolonların Moment Kapasitelerinin Saptanması, Teknik Dergi, 9(4), 1781-97, 1998.
- [22] Aydemir C., Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi, Teknik Dergi, 24(1), 6279-6306, 2013.
- [23] Park, R., and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, New York, 1975.
- [24] Aydemir C., ve Aydemir M.E., Betonarme Kirişlerin Hasar Sınırlarının Deneysel Gözlemlerle İrdelenmesi, Teknik Dergi, 28(4), 8023-49, 2017.
- [25] Mieses, A.M., Inelastic Buckling Behavior of Concrete Reinforcing Bars under Monotonic Uniaxial Compressive Loading, M.S. thesis, The University of Texas at Austin, 2002
- [26] Dhakal, R.P. and Maekawa, K., Reinforcement Stability and Fracture of Cover Concrete in Reinforced Concrete Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, 128(10):1253-1262, 2002.



# Çoklu Çatlayan Lifli Kompozitlerin Birim Şekil Değişiminin Dijital Görüntü Korelasyonu ile Analizi: Parametre Etkilerinin Değerlendirilmesi

Tarık YILDIRIM<sup>1</sup>

Muhammer KESKİNATEŞ<sup>2</sup>

Eren GÖDEK<sup>3</sup>

Kamile TOSUN FELEKOĞLU<sup>4</sup>

Burak FELEKOĞLU<sup>5</sup>

Okan ÖNAL<sup>6</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada çekme yüklemesi altında çoklu çatlak davranışı sergileyen lifli kompozitlerin birim şekil değiştirmeleri geleneksel deformasyon ölçer (LVDT) ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemiyle incelenerek kıyaslanmıştır. DIC yönteminde ışık etkisi (kontrollü aydınlatma varlığı), görüntü çözünürlüğü, alt küme boyutu ve adım aralığı parametreleri ile iki farklı korelasyon yöntemi dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Uygun alt küme boyutunun seçilmesi ve görüntülerin kontrollü aydınlatma ile yüksek çözünürlük koşullarında alınması durumunda, DIC analizi sonucu elde edilen birim şekil değiştirme değerleri, LVDT'lerden elde edilen değerler ile örtüşmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dijital görüntü korelasyonu, aydınlatma, çözünürlük, alt küme, analiz adım aralığı, korelasyon yöntemleri.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22 Şubat.2018 günü ulaşmıştır. 22 Nisan 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.

- 31 Mart 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.397681>

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - yildirimtarik75@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-4184-7932>

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - muhammerkeskinates@hotmail.com  
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman - muhammerkeskinates@kmu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-8334-3073>

3 Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Çorum - erengodek@hitit.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-3427-2317>

4 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - kamile.tosun@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-2191-7793>

5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - burak.felekoglu@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7426-1698>

6 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - okan.onal@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-3089-2711>

## **ABSTRACT**

### **Strain Analysis of Multiple Cracking Fiber Reinforced Composites by Digital Image Correlation: Evaluation of Parameter Effects**

In this study, strain of fiber reinforced composites exhibiting multiple cracking under tensile load was compared by using traditional deformation meter (LVDT-Linear Variable Differential Transformer) and digital image correlation (DIC) method.

In the DIC method, analyzes were performed by taking the influence of light (presence of controlled illumination), image resolution, subset size and step size parameters and two different methods of correlation into account. If appropriate subset size is selected, the strain values obtained by DIC analysis corresponded to the values obtained from LVDTs when images are taken under controlled lighting and high resolution conditions.

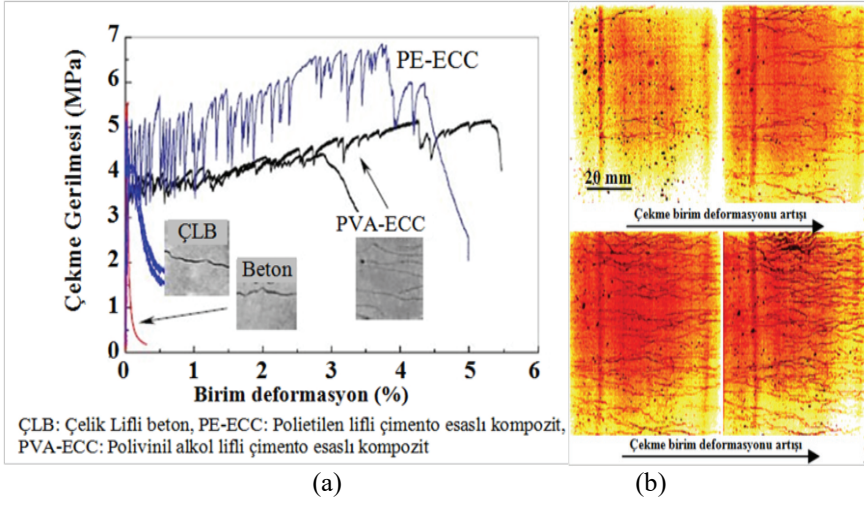
**Keywords:** Digital image correlation, illumination, resolution, subset, step size, correlation methods.

## **1. GİRİŞ**

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (Engineered Cementitious Composites-ECC); çimento, puzolan, su, ince agrega ( $<200\mu\text{m}$ ), az miktarda akışkanlaştırıcı katkı ve genellikle hacimce %2 oranında mikro boyutlu polimerik lif içeren bir kompozit türüdür [1]. ECC, gösterdiği çoklu mikro çatlama davranışı sayesinde yalın beton ve çimento esaslı geleneksel lifli kompozitlere kıyasla yük taşıma yeteneğini kaybetmeden daha fazla şekil değiştirebilen düktil bir kompozittir (Şekil 1.1a) [2,3].

ECC, yük altında metallere benzer şekilde ama farklı bir mekanizmayla şekil değiştirme sertleşme davranışı göstermektedir. ECC tasarımında kullanılan mikro-mekanik teoriye göre, yükleme sırasında kompozitte ortaya çıkan çatlakların kararlı olması beklenmektedir [4]. Bu beklentinin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü ancak numune çatlak gelişiminin takip edilmesi ve bölgesel olarak ölçülmesi ile belirlenebilir [5]. Ancak deneysel çatlak analizinin bazı güçlükleri bulunmaktadır. ECC'nin çatlak analizinin bütünüyle yapılabilmesinde geleneksel ölçüm yöntemleri (noktasal sensörler, çatlak genişliğini ölçen mikro sensörler vb.) yetersiz kalmaktadır. Bu durumun nedeni numune üzerinde çok sayıda ve mikron mertebesinde çatlakların oluşmasıdır. Şekil 1.1b'de sunulan ECC numunesinde %1-2-3-4 çekme birim şekil değişimi değerlerinde çekilen çatlaklı kompozit fotoğrafları görüntülenmektedir. Her bir çatlağın yük altındaki genişleme davranışını incelemek, hem ilk çatlağın hem de açılacak yeni çatlakların kesit üzerinde nerede oluşacağı bilinemediğinden numune üzerine çok sayıda sensör yerleştirilmesini gerektirecektir. Böyle bir deney sisteminin kurulması uygulamada oldukça güçtür. Bu durum, çatlak analizinin eş zamanlı ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için, geniş bir alanda şekil değiştirmeyi mikron mertebesinde inceleyebilecek bir sistemin gerekliliğini ortaya çıkartmıştır [6].

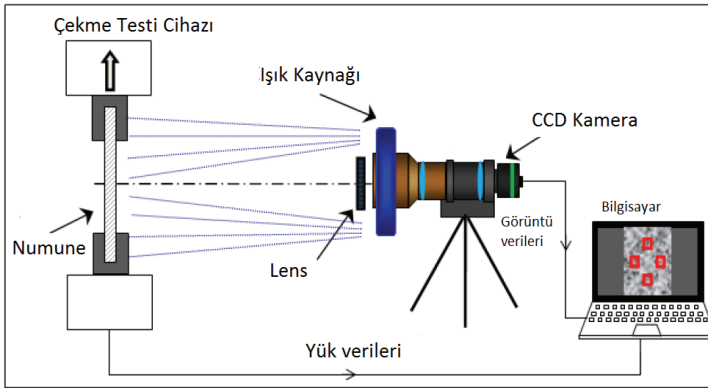
Son yıllarda, malzeme davranışının karakterizasyonu için dijital görüntü korelasyon (DIC) tekniklerinin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bu sistem temassız bir şekilde incelenecek tüm alan üzerindeki, yer değiştirme, birim şekil değiştirme ölçümlerini ve çatlak takibini kolay ve hızlı bir şekilde analize imkân vermektedir [7].



Şekil 1.1 - a) Bazı kompozit türlerinin çekme birim şekil değiştirme kapasitesinin yalın beton ve çelik lifli betonla kıyaslanması, b) ECC numunesinde %1-2-3-4 çekme birim şekil değişimindeki çatlak fotoğrafları [3].

## 2. DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU

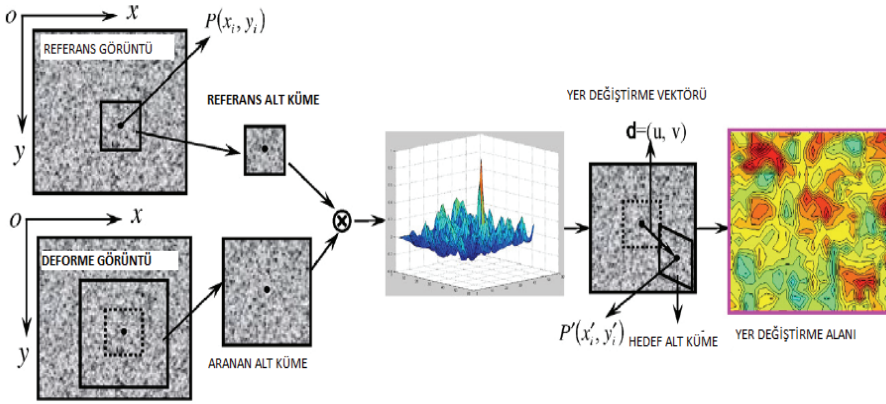
Teknolojinin hızlı ilerleyişi ve optik aletlerin geliştirilmesi, endüstri alanında ve özel uygulamalarda temassız ölçüm tekniklerinin yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Son yıllarda geliştirilen, düşük maliyetli ve esnek bir çözüm sağlayan DIC yöntemi, otomotiv endüstrisi, malzeme testleri ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır [8]. DIC; kullanımı kolay, basit optik içerikli, titreşimden daha az etkilenen, güvenilir ve tüm malzeme sınıflarına uygulanabilir bir deformasyon ölçüm yöntemidir [9]. Uygun çözünürlüğe sahip olan bir kamera seti, beneklenerek hazırlanmış numune, soğuk ışık kaynağı ve analizde kullanılacak programı içeren bir bilgisayar dijital görüntü korelasyonu yönteminin düzeneğini oluşturur (Şekil 2.1) [10].



Şekil 2.1 - DIC ile ölçüm yapılırken kullanılan araçlar [10]

DIC analizi, rastgele benekli desenle kaplanmış numunenin deforme olmadan ve deforme olduktan sonraki iki görüntüsü arasındaki model uyuşması üzerine kuruludur. Buradaki amaç eşleşen görüntü fonksiyonlarının yakalanmasıdır (Şekil 2.2). DIC'nin temel ilkesi, deforme olmamış haldeki numune yüzeyi üzerinde analiz edilecek bölge (region of interest-ROI) içindeki küçük kareler arasında maksimum korelasyonu aramaktır. Bir dizi piksel içeren küçük kare bölüm alt küme, altındaki iki grubun arasındaki mesafe adım aralığı olarak tanımlanır. Alt küme boyutu, yer değiştirme ölçümü için ardışık görüntüler arasında izlenen görüntünün alanını belirler. Adım aralığı ise yer değiştirmeyi tahmin etmek için alt kümenin üzerinde kaydırılması gereken piksel sayısını belirler [9].

Araştırmacılar tarafından korelasyon kriterinin tanımında; normalleştirilmiş çapraz korelasyon, kareler toplamının farkları vb. yöntemler kullanılmıştır [11].



Şekil 2.2 - Referans ve deforme görüntüde alt kümelerin eşlenmesi [11]

DIC analizini etkileyen parametreler şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Düzenek hazırlanırken; numune yüzeyi düz, düzlem dışı şekil değiştirmeler ihmal edilecek kadar küçük (2D), kamera ve numune yüzeyi birbirlerine paralel olmalıdır (Şekil 2.1) [11,12].
- 2) Elde edilen görüntü üzerindeki piksel sayısı (çözünürlük) analiz için doğru olduğunu olumlu yönde etkilemektedir. Daha büyük bir alanı ölçmek için, çalışma mesafesi artırılmalıdır, bu da ölçüm alanındaki efektif çözünürlüğü düşürür [13]. Bu nedenle, analiz edilecek bölge için en yüksek çözünürlüğün elde edileceği en uygun mesafe belirlenmelidir.
- 3) Elde edilen görüntünün kalitesini etkileyen önemli öğelerden biri aydınlatmadır. Kaliteli bir görüntünün eldesi, mekanik deneyler esnasında numune yüzeyinin tüm alanını kapsayan üniform ve uygun bir aydınlatmanın kullanılması ile mümkün olmaktadır [14]. Uygun bir aydınlatma ve benekleme yapılmasının ortak amacı, dijital görüntüde yüksek kontrastlı düşük gürültülü (noise) benek deseni oluşturmaktır.



- 4) Görüntülerin işlenmesi sürecinde analiz sonucunu etkileyen parametrelerin başında alt küme boyutu ve analiz adım aralığı gelmektedir. Alt kümenin temel rolü benekleme desenine bağlı olarak iki bölge arasındaki benzerliği karakterize etmektir. Alt küme seçimi analizin doğruluğu ve zaman açısından önemlidir. Tek bir nokta yerine bir alt kümeyi seçmenin nedeni, kare bir alt kümenin gri seviyesi değerinin tek bir noktayla karşılaştırıldığında daha ayırt edilebilir olmasıdır [15]. Adım aralığının temel rolü ise alt küme taranma sıklığını belirlemektir. Analiz adım aralığı, bir sonraki noktayı hesaplamak için alt kümenin dikey ve yatay yönde kaç piksel yer değiştirdiğini tanımlar [14,16]. DIC yönteminde uygun alt küme boyutunu ve analiz adım aralığını belirlemek için kullanılan genel kabul görmüş bir kural yoktur. Bu yüzden söz konusu parametreler uygulamadan uygulamaya değişkenlik göstermektedir. Büyük alt küme boyutu içerisinde fazla desen içerir ve detaylı tarama yapma ihtiyacını azaltmış olur. Çok küçük alt küme boyutu ise yetersiz sayıda özellik içerir ve görüntü içerisinde diğer alt kümelerden program tarafından ayırt edilmesinde güçlükler yaşanır. Bu nedenle küçük alt küme boyutu güvenilir bir korelasyon sağlamayabilir [17]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, alt küme boyutları analiz açısından ideal alt küme boyutu olarak  $31 \times 31$  –  $51 \times 51$  piksel kümeleri arasında önerilmektedir [15,17,18]. Uygun bir analiz adım aralığı seçimi ise sınırlı sayıda ölçüm noktası için gerçeğe yakın şekil değişimlerin hesabına imkân verir. Küçük analiz adım aralığı da çok sayıda ölçüm noktasına erişilmesini sağlar, ancak elde edilen şekil değişimi bölgesinde hataların artmasına neden olur. Yapılan bir çalışmada, şekil değişimi değişkenliğini azaltmak için analiz adım aralığının en az 1 piksel ile başlaması ve alt küme boyutunun yarısından küçük olması önerilir [16]. Analiz adım aralığı ne kadar küçükse, yer değiştirme verisi o kadar çok olacağı için korelasyonun hesaplama süresi de artacaktır. Bu nedenle en uygun analiz adımı seçimi önerilmektedir [16,19].
- 5) DIC’de şekil değişimi analizi için kullanılan korelasyon yöntemleri, referans ve deforme olmuş görüntü arasındaki benzerliklerin hesaplanmasında oldukça kritik bir öneme sahiptir. Araştırmacılar tarafından korelasyon kriteri için kare farklarının toplamı (sum of squared differences-SSD), normalleştirilmiş kare farklarının toplamı (normalized sum of squared differences-NSSD) ve normalleştirilmiş çapraz korelasyon (normalized cross-correlation-NCC) gibi çeşitli hesaplamalar önerilmiştir [12,20].

Bu çalışma kapsamında, DIC analizinin başarısında önemli rolü olan ve yukarıda sözü edilen parametrelerin ECC’nin birim şekil değiştirmesinin ölçümü için optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu kapsamda; aydınlatma, çözünürlük, alt küme boyutu ve analiz adım aralığı parametreleri ile korelasyon yöntemi değiştirilerek elde edilen sonuçların doğruluğu geleneksel deformasyon ölçme tekniği ile (LVDT ile elde edilen mekanik verilerle) kıyaslanmıştır. Böylece, bu makale kapsamında dâhil olmayan (bir sonraki aşamada gerçekleştirilecek) çoklu çatlak analizi için gerekli lokal birim şekil değişimlerinin sağlıklı bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır.

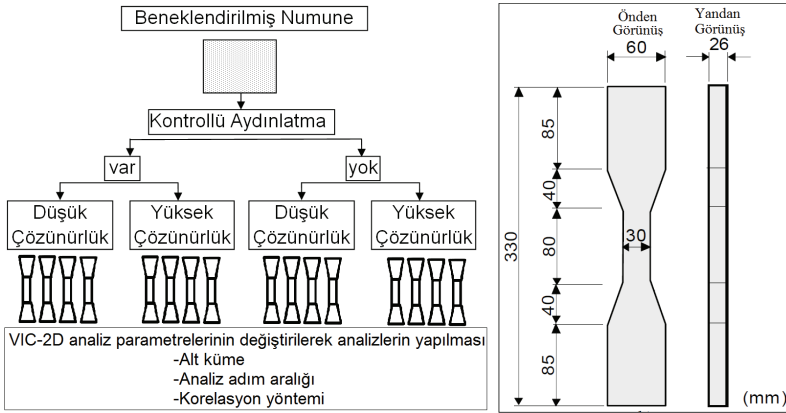
### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Deneysel Yöntem

ECC üretiminde, CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu (YFC), yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP) ve polikarboksilat esaslı bir su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Üretilen taze haldeki lifli matris ile Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu'nun yüksek performanslı lifli kompozitler için önerdiği boyutlarda kemik şeklindeki çekme numuneleri hazırlanmıştır [21]. Hazırlanan numunelerin karışım oranları Tablo 3.1'de sunulmuştur. DIC yöntemi kapsamında araştırılması planlanan parametrelere bağlı olarak numunelerin hazırlanma sistematigi ve numune boyutları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 - Üretilen kompozitlerin karışım oranları.

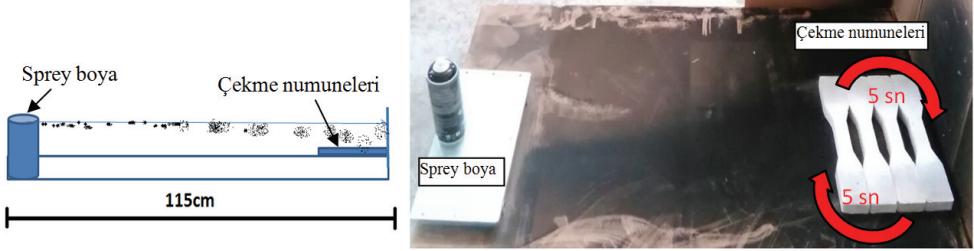
Bileşenler	Çimento	YFC	Su	Süper akışkanlaştırıcı	HTPP lif
Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	424	1059	466	2	18



Şekil 3.1 - DIC yöntemi uygulama sistematigi ve numune boyutları

Beneklendirme ile ilgili belli bir standart henüz bulunmamaktadır. Ön çalışmalar sonucunda elde edilen benek desenlerine göre bu çalışmanın nihai benek deseni belirlenmiştir. Arka planı beyaz boya ile hazırlanmış numuneler üzerine siyah sprey boya ile 115 cm mesafeden karşı yüzeye doğru 5 sn numunenin bir yanından diğer 5 sn öteki yanından olmak üzere toplamda 10 sn boya püskürtülmüştür. 85-115 cm uzaklıktaki bölgeye 4 adet numune koyularak beneklendirme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.2). Beneklendirilmiş numuneler, Şekil 3.1'de sunulan sistematik deney programı dikkate alınarak kodlanmış ve her bir numune için VIC-2D yazılımının önerdiği alt küme boyutu ile DIC analizlerine başlanmıştır. Numune isimlendirmelerinde kullanılan kısaltmalar ve numune isimlendirmeleri her bir numune için Tablo 3.2'te ayrı ayrı verilmiştir. Kontrollü aydınlatmada LED ışıklar ve halojen ışık kaynağı

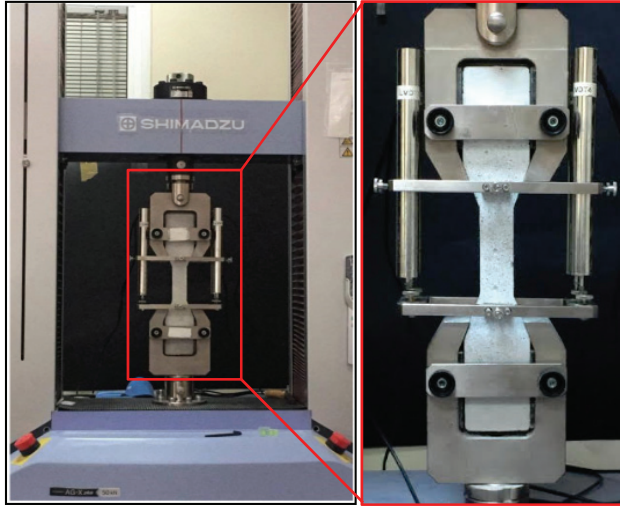
kullanılmıştır. Kontrollü aydınlatmanın olmadığı durumda ise sadece oda içerisinde bulunan floresan ışığından yararlanılmıştır. Yüksek çözünürlük için 2710x3384 piksel ve düşük çözünürlük için 1354x1692 piksel olacak şekilde görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 3.2 - Sprey boya ile benekleme metodu

Tablo 3.2 - Hazırlanan numunelerin isimlendirme sistemi ve açıklamaları

Numune Kodlama	Numune İsimleri
AVYÇ	Kontrollü Aydınlatma var-Yüksek Çözünürlük
AVDÇ	Kontrollü Aydınlatma var-Düşük Çözünürlük
AYYÇ	Kontrollü Aydınlatma yok-Yüksek Çözünürlük
AYDÇ	Kontrollü Aydınlatma yok-Düşük Çözünürlük



Şekil 3.3 - Doğrudan çekme cihazı ile düzeneğe yerleştirilmiş numune ve LVDT'ler

Çekme deneylerinde 50 kN kapasiteli SHIMADZU çekme cihazı kullanılmış ve yükleme hızı 0.5 mm/dk olarak uygulanmıştır. Çekme cihazında 2 adet çene bulunmaktadır ve alt çene sabit olup üst çene ise tek mafsallıdır. İki tanesi numunenin ön yüzünde iki tanesi ise arka yüzünde olmak üzere dört adet LVDT, bir çerçeve yardımıyla numune etrafına yerleştirilmiştir (Şekil 3.3).

DIC analizleri için hazırlanan çekme deneyine bağlı kamera deney düzeneği Şekil 3.4'te sunulmuştur. Kameranın optik aksları numune üzerinde, numuneye dik ve aynı zamanda kamera ile numune yüzeyi birbirine paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bunun için üç eksenli su terazisinden ve lazer hizalayıcıdan faydalanılmıştır. Numune yüzeyini aydınlatmak için soğuk ışık kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 3.4 - Çekme deneyinde kullanılan DIC deney düzeneği

Çekme deneyi süresince CCD sensörlü bir monokrom kamera ile her 5 saniyede bir görüntü kaydedilmiştir. Kullanılan kameranın donanımsal özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 - Kamera özellikleri

Çözünürlük	3384x2710 piksel
Sensör	1" CCD
Lens	Rodegon 80, C-mount
Maksimum kare/sn değeri	10.1 kare/sn
Bit derinliği	8-bit
Çalışma Sıcaklığı	(+5) °C ile (+45) °C arasında
Kamera türü	Monokrom
Alan Derinliği	4.8 mm
Odak uzaklığı	82.29 mm
Uzatma tüpü	48 mm

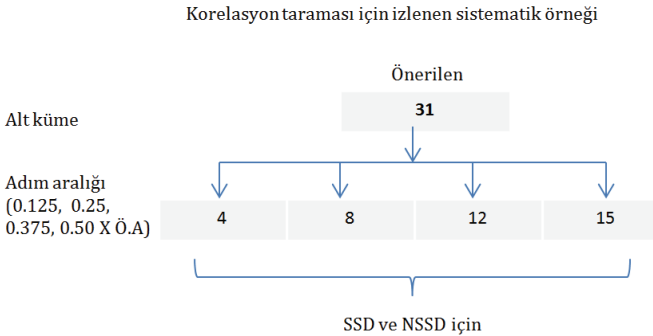
### 3.2. DIC Analiz Parametrelerinin Seçilmesi

VIC-2D yazılımı ile DIC parametrelerinin belirlenmesinde öncelikle analiz yapılacak bölge seçilmiş ve analizin başlaması için referans noktaları belirlenmiştir. Analizde yazılımın seçili bölge için tavsiye ettiği alt küme boyutu dikkate alınarak seçim yapılmıştır.

VIC-2D yazılımına bağlı analiz parametreleri, tüm numunelerin analizlerinde aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Bunlar; eşleşen alt kümedeki piksellerin ağırlıklandırma şekli için Gauss ağırlık özelliği, alt piksel doğruluğu için gri alanları sürekli bir eğri ile temsil eden 8.dereceden bir eğri enterpolasyonudur. Her bir görüntüyü bir önceki görüntü ile ilişkilendiren artımlı korelasyon özelliği (incremental correlation) ve daha ayrıntılı arama (exhaustive search) özelliği kullanılmıştır. Analizlerde alt küme boyutu olarak, her bir numunenin ilk görüntüsü programda analiz edilerek programın önerdiği alt küme boyutları belirlenmiştir. Programın önerdiği alt küme boyutları beneklendirme, ışıklandırma ve çözünürlük değişkenlerine bağlı olarak 17x17-37x37 piksel arasında değişmiştir. Anlamlı bir kıyaslanmanın yapılabilmesi amacıyla programın önerdiği alt küme boyutu ile bu alt kümenin 0.5 ve 2 katı olmak üzere 3 farklı alt küme boyutu makale kapsamında incelenmek için seçilmiştir. Analiz adım aralığı değeri küçüldükçe alt küme eşleştirmeleri daha sık yapılacağından daha fazla korelasyon analizi gerçekleşecektir. Bu durumun deformasyon ölçümlerine doğrudan etki edeceği düşünülmektedir. Bu kapsamda, başlangıç adım aralığı literatürden elde edilen öneriler doğrultusunda alt küme boyutunun yarısı olarak seçilmiş ve 0,125 aralıklarla küçültülerek 3 farklı analiz adım aralığı daha belirlenmiştir [16,19,22]. Korelasyon yönteminin (SSD-NSSD) etkisini incelemek amacıyla sabit alt küme için 4 farklı analiz adım aralığı kullanılmıştır (Şekil 3.5). Analiz tamamlandıktan sonra şekil değişimi haritaları ve alansal birim şekil değişimi değerleri ( $\epsilon_{yy}$ ) (Formül 1) elde edilmiş ve grafikler oluşturulmuştur. DIC’de kullanılan  $\epsilon_{yy}$  değerlerinin görüntü üzerindeki her bir piksel sütunundan elde edildiği Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

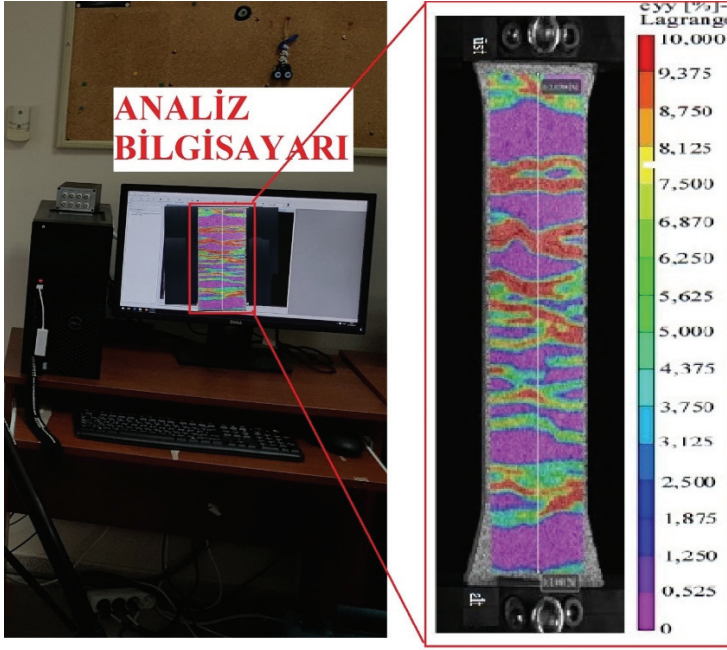
Alt küme taraması için izlenen sistematik örneği

	0.5 X Önerilen	Önerilen	2 X Önerilen
Alt küme	15	31	61
Adım aralığı (0.50 X Ö.A)	8	15	30



Şekil 3.5 - Analiz taraması için kullanılan sistematik

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (1)$$



Şekil 3.6 - DIC’de kullanılan  $\epsilon_{yy}$  değerlerinin görüntü üzerinden elde edilişi

### 3.3. LVDT ve DIC Sonuçlarının Kıyaslanmasında Kullanılan Yöntemler

LVDT ve DIC analiz yöntemleri kullanılarak her bir numune için elde edilen  $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\epsilon_{DIC}$  verileri ile sırasıyla  $\sigma$ - $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\sigma$ - $\epsilon_{DIC}$  eğrileri çizdirilmiştir. AVYÇ1 numunesi için karşılaştırmalı LVDT ve DIC grafiği Şekil 3.7’de sunulmuştur. Alt küme boyutu 31x31 ve adım aralığı 15 olan NSSD korelasyon verilerinden %0.5 aralıklarla elde edilen  $\epsilon_{DIC}$  şekil değişimi haritalarının lokal şekil değiştirmeleri %0-5 arasında ölçeklendirilmiştir.

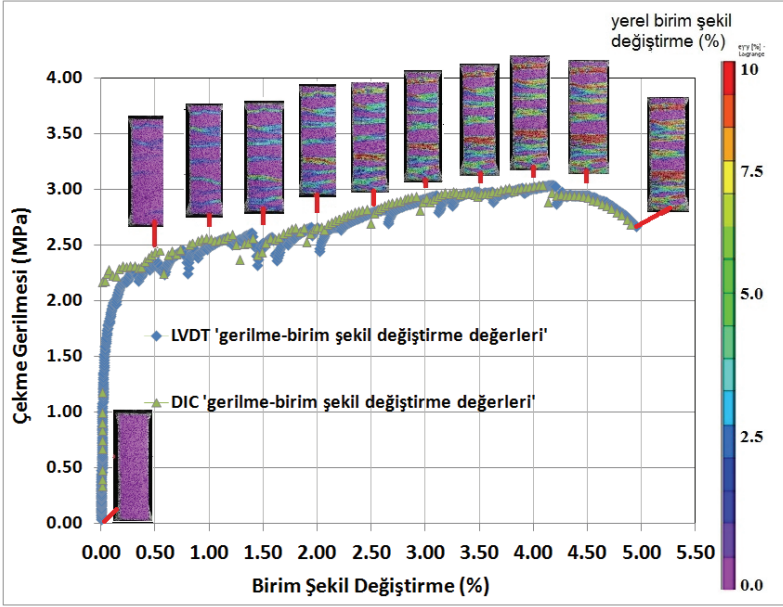
LVDT değerleri referans alınarak aşağıdaki iki yöntem yardımıyla DIC verilerinin birim şekil değişimi analizlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu yöntemler;

1.yöntem; maksimum gerilme noktasına göre birim şekil değiştirmelerin kıyaslanmasıdır.  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında maksimum gerilmeye ( $\sigma_{mak}$ ) karşılık gelen birim şekil değiştirmelerin ( $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\epsilon_{DIC}$ ) kıyaslanmasıdır (Şekil 3.8). Bu yöntemde  $\epsilon_{LVDT}$  değerleri mutlak doğru kabul edilmiş ve  $\epsilon_{DIC}$  değerleri,  $\epsilon_{LVDT}$  değerlerinin yüzdesi olarak ifade edilmiştir ( $(\epsilon_{DIC}/\epsilon_{LVDT}) \times 100$ ). Bu metoda göre aşağıda gösterilen üç farklı durum ortaya çıkmaktadır:

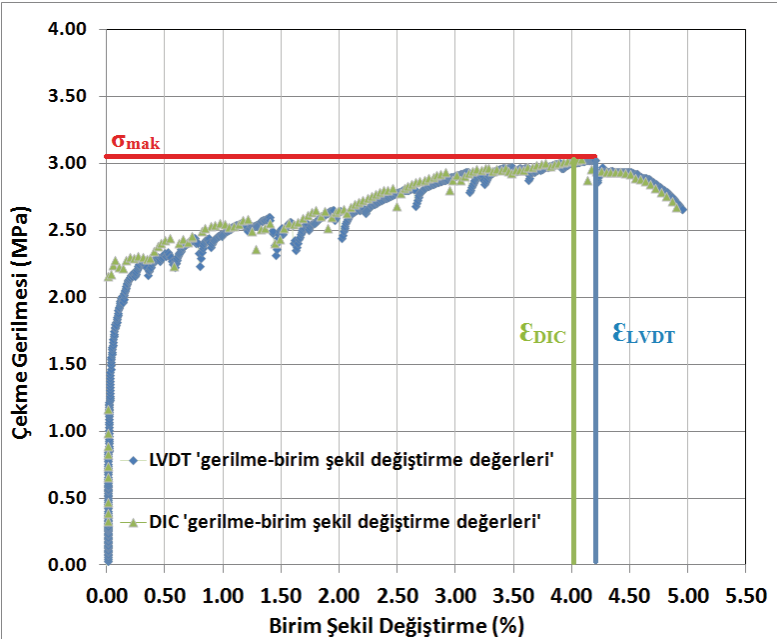
$$(\epsilon_{DIC}/\epsilon_{LVDT}) \times 100 = 100 \rightarrow \epsilon_{DIC} = \epsilon_{LVDT} \text{ (Mükemmel ölçüm)}$$

$$(\epsilon_{DIC}/\epsilon_{LVDT}) \times 100 > 100 \rightarrow \epsilon_{DIC} > \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analiz verilerinin daha büyük olduğu)}$$

$$(\epsilon_{DIC}/\epsilon_{LVDT}) \times 100 < 100 \rightarrow \epsilon_{DIC} < \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analiz verilerinin daha küçük olduğu)}$$



Şekil 3.7 - AVYÇ1 numunesinin LVDT ve DIC-NSSD korelasyonundaki veriler ile elde edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve % 0.5 aralıklı görüntüsü alınmış birim şekil değişimi haritaları



Şekil 3.8 - AVYÇ1 numunesi  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında maksimum gerilmeye ( $\sigma_{mak}$ ) karşılık gelen birim şekil değiştirmeler ( $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\epsilon_{DIC}$ )

2.yöntemde maksimum gerilme noktasına kadar tüm birim şekil değiştirme değerleri kıyaslanmıştır.  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında maksimum gerilmeye kadar her bir gerilme değerindeki LVDT ve DIC'nin birim şekil değiştirme değerlerini kıyaslama metodudur. Bu yöntemde aksel sistemde düşey ekseninde  $\epsilon_{DIC}$  ve yatay ekseninde de karşılık gelen  $\epsilon_{LVDT}$  verilerinden oluşan eğriler çizdirilmiştir. Bu eğrilerin doğrusal denklemi elde edilmiş (Formül 2) ve doğru eğimleri (b) dikkate alınarak aşağıdaki yorumlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Doğru denklemlerine göre;

$$y = a + b.x \rightarrow \epsilon_{DIC} = a + b.\epsilon_{LVDT} \quad (2)$$

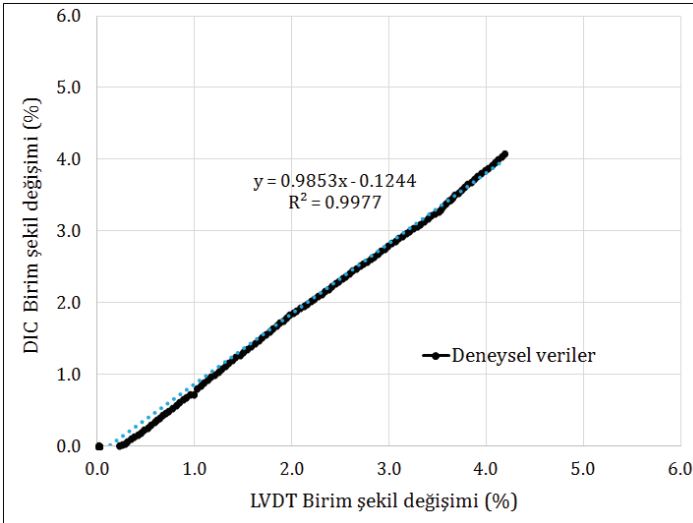
$$b=1 \rightarrow \epsilon_{DIC} = \epsilon_{LVDT} \text{ (Mükemmel ölçüm)}$$

$$b>1 \rightarrow \epsilon_{DIC} > \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analiz verilerinin daha büyük olduğu)}$$

$$b<1 \rightarrow \epsilon_{DIC} < \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analiz verilerinin daha küçük olduğu)}$$

Burada, b değeri 1'e ne kadar yakın olursa,  $\epsilon_{DIC}$  ile  $\epsilon_{LVDT}$  verileri birbiriyle o kadar örtüşecektir. Eğer, b değerleri 1 den fazla olursa DIC analizinde LVDT ölçümlerine kıyasla daha yüksek şekil değişimi değerleri elde edilecektir. b değerinin 1'den az olması durumunda ise DIC analizi ile elde edilen şekil değişimi değerleri LVDT'ye kıyasla daha düşük olacaktır.

Geleneksel lifli kompozitlerin aksine, ECC'nin çoklu çatlama davranışı ve mekanik performansının değerlendirilmesinde  $\sigma_{mak}$ 'dan önceki şekil değiştirme sertleşmesi davranışı bölgesi daha önemlidir. Bu nedenle, her iki yöntemde de  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında  $\sigma_{mak}$ 'dan sonra kararsız durumdaki göçme çatlağının hızlı bir şekilde belirginleşerek kompozitin yük taşıma kapasitesini yitirmeye ve kompozitin şekil değiştirme yumuşaması davranışı göstermeye başladığı göz önünde bulundurularak  $\sigma_{mak}$ 'dan sonraki kısımlar hata hesaplamalarında dikkate alınmamıştır



Şekil 3.9 - AVYÇ1 numunesi LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Yöntemlere Göre Hata Oranlarının Değerlendirilmesi

Önerilen alt kümenin kendisi, yarısı ve iki katı olan alt kümeler kullanılarak ve adım aralığı olarak da alt kümelerin yarısı seçilerek yapılan analizlerin sonuçları Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Önerilen alt kümenin iki katındaki alt küme için yapılan analizlerde hata yüzdesinin genellikle daha az olduğu gözlenmiştir. Önerilen alt kümenin iki katı için yapılan analizlerde hata yüzdesi minimum %2.2 maksimum ise %10.9'dur. Genel olarak önerilen alt kümeden daha yüksek alt kümelerde çalışmak hata yüzdesini düşürürken (%3-7) önerilen alt kümeden daha düşük alt kümelerde çalışmak hata yüzdesini çok yüksek mertebelere çekmektedir (%7-75). Her bir alt küme durumu için hata oranları en az olan analiz koşulları koyu renk ile vurgulanmıştır. Tablo 4.1 ve 4.2'de elde edilen sonuçların ortalamaları dikkate alınarak: Tablo 4.1'in daha rahat ve anlaşılabilir bir şekilde incelenmesi amacıyla Tablo 4.3 ve 4.4; , Tablo 4.2'nin daha rahat ve anlaşılabilir bir şekilde incelenmesi amacıyla Tablo 4.5 ve 4.6 oluşturulmuştur.

Tablo 4.1 - 1.yöntem: Maksimum gerilme noktasına göre LVDT ve DIC birim şekil değiştirmeleri kıyaslama sonuçları (3 farklı alt küme)

No	Numune Kodu	Numune İsimleri	(E <sub>DIC</sub> /E <sub>LVDT</sub> )x100			
			0.5xÖ.A	Ö.A	2XÖ.A	Ort.
1	AVYÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Yüksek çözünürlük (YÇ)	<b>92.8</b>	<b>95.9</b>	<b>97.1</b>	<b>95.3</b>
2	AVDÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Düşük çözünürlük (DÇ)	146.3	115.0	110.9	124.1
3	AYYÇ	Kontrolsüz aydınlatma (AY), Yüksek çözünürlük (YÇ)	<b>106.2</b>	109.1	105.4	106.9
4	AYDÇ	Kontrolsüz aydınlatma (AY), Düşük çözünürlük (DÇ)	138.9	112.1	106.9	119.3

\*Ö.A:Programa tarafından önerilen alt küme

\*\*Her bir değer 12 sayısal değer (4 Numune, 3 farklı alt küme ve her alt küme için 1 adım aralığı) ortalamasını ifade etmektedir.

Tablo 4.2 - 2.yöntem: Tüm Birim Şekil Değiştirme Değerlerine göre LVDT ve DIC kıyaslama sonuçları (3 farklı alt küme)

No	Numune Kodu	Numune İsimleri	b*100			
			0.5xÖ.A	Ö.A	2XÖ.A	Ort.
1	AVYÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Yüksek çözünürlük (YÇ)	<b>93.7</b>	<b>97.3</b>	<b>97.5</b>	<b>96.2</b>
2	AVDÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Düşük çözünürlük (DÇ)	141.1	110.5	110.7	120.8

Tablo 4.2 - 2.yöntem: Tüm Birim Şekil Değiştirme Değerlerine göre LVDT ve DIC kıyaslama sonuçları (3 farklı alt küme) (devam)

No	Numune Kodu	Numune İsimleri	b*100			
3	AYYÇ	KontROLSÜZ aydınlatma (AY), Yüksek çözünürlük (YÇ)	114.4	105.9	<b>102.2</b>	107.5
4	AYDÇ	KontROLSÜZ aydınlatma (AY), Düşük çözünürlük (DÇ)	175.9	111.2	106.2	131.1

\*Ö.A: Programa tarafından önerilen alt küme

\*\*Her bir değer 12 sayısal değer (4 Numune, 3 farklı alt küme ve her alt küme için 1 adım aralığı) ortalamasını ifade etmektedir.

Kontrollü aydınlatma etkisi dikkate alınarak oluşturulan Tablo 4.3 incelendiğinde, yüksek çözünürlük durumunda kontrollü aydınlatma ve düşük çözünürlük durumunda ise kontROLSÜZ aydınlatmanın daha az hata oranları verdiği belirlenmiştir.

Tablo 4.3 - Kontrollü Aydınlatma Etkisi (1. Yöntemin değerlendirilmesi)

İncelenen Sabit Tutulan Parametreler	Tablo 4.1'de Kıyaslanan satırlar	Kontrollü aydınlatma	KontROLSÜZ aydınlatma
Yüksek çözünürlük (YÇ)	1 - 3	+	
Düşük çözünürlük (DÇ)	2 - 4		+

\*+ işareti hatanın daha az olduğu aydınlatma etkisi göstermektedir.

\*\* Kıyaslamalar ortalama hatalara göre yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda oluşturulan Tablo 4.4 değerlendirildiğinde tamamında yüksek çözünürlükte hata oranının daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.4. Çözünürlük Etkisi (1. Yöntemin değerlendirilmesi)

İncelenen Sabit Tutulan Parametreler	Tablo 4.1'de Kıyaslanan satırlar	Yüksek çözünürlük	Düşük çözünürlük
Kontrollü aydınlatma (AV)	1 - 2	+	
KontROLSÜZ aydınlatma (AY)	3 - 4	+	

\*+ işareti hatanın daha az olduğu aydınlatma etkisi göstermektedir.

\*\* Kıyaslamalar ortalama hatalara göre yapılmıştır.

Kontrollü aydınlatma etkisinin değerlendirilmesi için oluşturulan Tablo 4.5 incelendiğinde kontrollü aydınlatmanın daha az hata verdiği görülmüştür.

Tablo 4.5 - Kontrollü Aydınlatma Etkisi (2. Yöntemin değerlendirilmesi)

İncelirken Sabit Tutulan Parametreler	Tablo 4.2’de Kıyaslanan satırlar	Kontrollü aydınlatma	Kontrolsüz aydınlatma
Yüksek çözünürlük (YÇ)	1 - 3	+	
Düşük çözünürlük (DÇ)	2 - 4	+	

\*+ işareti hatanın daha az olduğu aydınlatma etkisi göstermektedir.

\*\* Kıyaslamalar ortalama hatalara göre yapılmıştır.

Tablo 4.6’ya göre aydınlatmanın kontrollü veya kontrolsüz olması durumlarının tamamında yüksek çözünürlükte hata oranının daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.6 - Çözünürlük Etkisi (2. Yöntemin değerlendirilmesi)

İncelirken Sabit Tutulan Parametreler	Tablo 4.2’de Kıyaslanan satırlar	Yüksek çözünürlük	Düşük çözünürlük
Kontrollü aydınlatma (AV)	1 - 2	+	
Kontrolsüz aydınlatma (AY)	3 - 4	+	

\*+ işareti hatanın daha az olduğu aydınlatma etkisi göstermektedir.

\*\* Kıyaslamalar ortalama hatalara göre yapılmıştır.

Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de korelasyon yönteminin etkisini görmek için NSSD ve SSD korelasyonları kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının verileri verilmiştir.

Tablo 4.7 ve 4.8’e göre analizlerde NSSD veya SSD yöntemlerini kullanmak önemsenecek bir farka neden olmamaktadır.

Tablo 4.7 - Maksimum gerilme noktasına göre LVDT ve DIC birim şekil değiştirmeleri kıyaslama sonuçları (SSD)

Satır No	Numune Kodu	Numune İsimleri	$(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100$
1	AVYÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Yüksek çözünürlük (YÇ)	101.4
2	AVDÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Düşük çözünürlük (DÇ)	117.1
3	AYYÇ	Kontrolsüz aydınlatma (AY), Yüksek çözünürlük (YÇ)	112.4
4	AYDÇ	Kontrolsüz aydınlatma (AY), Düşük çözünürlük (DÇ)	114.1

\*Her bir değer 16 sayısal değer (4 Numune, 1 alt küme ve her alt küme için 4 farklı adım aralığı) ortalamasını ifade etmektedir.

Tablo 4.8 - Maksimum gerilme noktasına göre LVDT ve DIC birim şekil değiştirmeleri kıyaslama sonuçları(NSSD)

Satır No	Numune Kodu	Numune İsimleri	$(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100$
1	AVYÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Yüksek çözünürlük (YÇ)	101.3
2	AVDÇ	Kontrollü aydınlatma (AV), Düşük çözünürlük (DÇ)	117.1
3	AYYÇ	Kontrolsüz aydınlatma (AY), Yüksek çözünürlük (YÇ)	112.4
4	AYDÇ	Kontrolsüz aydınlatma (AY), Düşük çözünürlük (DÇ)	114.1

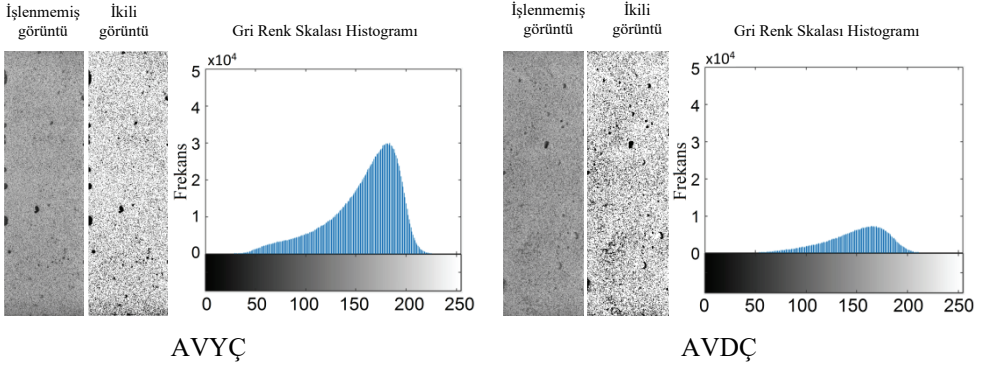
\*Her bir değer 16 sayısal değer (4 Numune, 1 alt küme ve her alt küme için 4 farklı adım aralığı) ortalamasını ifade etmektedir.

#### 4.2. Kontrollü Aydınlatmanın Hata Oranlarına Etkisini Değerlendirmek İçin Yapılan Analizler

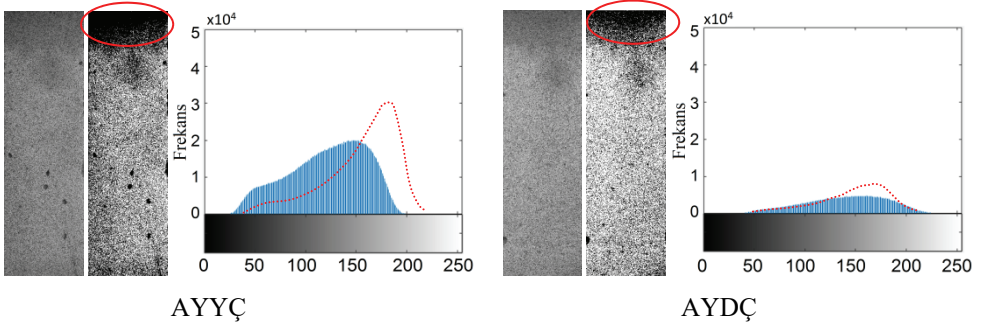
Üretilen numunelerden temsili 4 tanesi (iki tanesi kontrollü aydınlatma yapılan; diğer ikisi kontrollü aydınlatma yapılmayan) üzerinde bir dizi ilave incelemeler gerçekleştirilmiştir. Analiz edilecek bölgelerin gri renk skalalarına ait histogramlar yazılan bir MATLAB algoritması aracılığıyla elde edilmiştir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Ayrıca, benekleme yoğunluklarının hesaplanması amacıyla bu bölgelere ait ikili görüntüler oluşturulmuştur. İkili görüntüler elde edilirken, gri renk skalasının medyan değeri (127) referans alınarak bu değerden küçük ve büyük değerler sırasıyla 0'a ve 255'e ötelenmiştir. İkili görüntü sisteminde 0 değeri siyahı 255 değeri ise beyazı temsil etmektedir. Elde edilen ikili görüntüler kullanılarak, 0 değerine ötelenmiş piksel sayısının tüm piksel sayısına oranına hesaplanmış ve bu değer "benek yoğunluğu" olarak adlandırılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre, kontrollü aydınlatma yapılması durumunda benek yoğunluğu %20 mertebelerinde iken kontrollü aydınlatmanın yapılmadığı durumda benek yoğunluğu %50 olarak belirlenmiştir. Bu durumun temel nedeni kontrolsüz aydınlatma durumunda oda lambasının yukarıda olması nedeniyle numune yüzeyinde meydana gelen gölgelerdir. Oluşan gölgelenmenin, analizde yazılım tarafından hata payını artırıcı ek benekler gibi algılandığı MATLAB algoritması yardımıyla elde edilen ikili görüntüler yardımıyla ispatlanmıştır (Şekil 4.2).

Numunelerde kontrollü aydınlatma sağlandığında, yapay gölgelenmelerin olmadığı ve kontrastın daha belirgin olduğu elde edilen histogramlarda görülmektedir (Şekil 4.1). Kontrolsüz aydınlatma ortamında elde edilmiş görüntülerde ise numune üzerinde gölgelenmelerin oluşması gri ton değerlerinin daha fazla görüldüğü bir histograma neden olmuştur (Şekil 4.2). Bu durum hata oranlarını özellikle yüksek çözünürlükte 12-15 kata kadar arttırmıştır. Diğer taraftan düşük çözünürlükte alınan görüntülerle aydınlatma kontrolünün belirgin bir faydası olmamıştır. Çünkü düşük çözünürlükte alınan görüntülerde zaten analiz verisi kısıtlı olduğu için hata oranı baştan yüksektir.



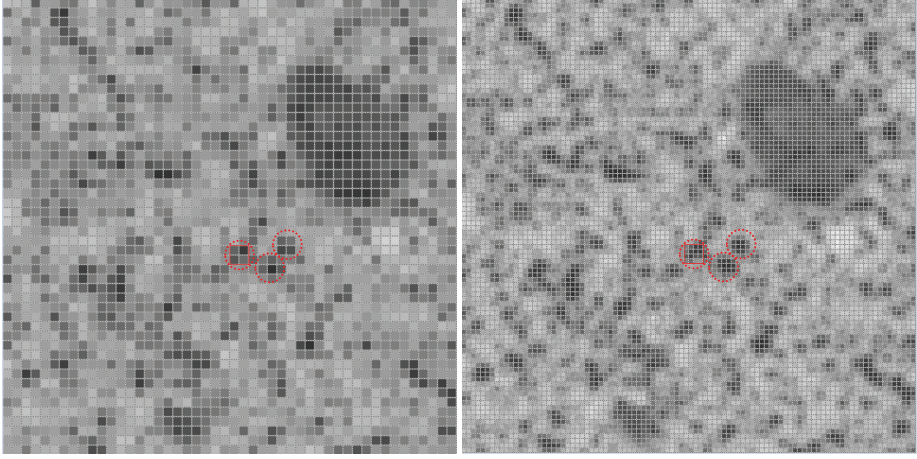
Şekil 4.1 - Kontrollü aydınlatma yapılan numunelerin gri renk skalası histogramları



Şekil 4.2 - Kontrollü aydınlatma yapılmayan numunelerin gri renk skalası histogramları

### 4.3. Çözünürlüğün Hata Oranlarına Etkisi Üzerine Değerlendirilmeler

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki histogramlarda bekleneceği üzere düşük çözünürlüklü numunelerdeki elde edilen veri (piksel) sayısının yüksek çözünürlüğe oranla daha düşük olduğu belirgin olarak görülebilmektedir. Elde edilen veriler düşük çözünürlük için dörtte bir oranındadır. Bu oran Şekil 4.3'de kırmızı renkle işaretlenen bölgelerle ispatlanmıştır. Bu sonuçtan yola çıkılarak, elde edilen verilerin (DIC analizlerinde kullanılan veri noktalarının) yüksek çözünürlüklü görüntülerde düşük çözünürlüklü görüntülere kıyasla 4 kat daha fazla olduğu söylenebilir. Şekil değiştirme sınırlı bir bölgeden başlayan ve yayılım gösteren lokal bir olgudur. Lokal şekil değişimi doğrudan hasar başlangıcı ve gelişimi ile ilgili olduğundan yüksek çözünürlüklü görüntü, şekil değiştirmeyi tespit etmek için bir ihtiyaçtır [23]. Görüntü çözünürlüğündeki artış ile analizlerdeki hata oranlarının azaltılması mümkündür [24]. Bu kapsamda, lokal şekil değişimindeki küçük gelişimlerin tespiti için yüksek çözünürlüklü ölçümler daha hassas sonuçlar verecektir. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen hata oranları incelendiğinde de (Tablo 4.1 ve Tablo 4.2) düşük çözünürlüklü numune analizlerinde her zaman bu hata oranının daha fazla olduğu görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 4.3 - a)Düşük çözünürlük, b)Yüksek çözünürlük (örn: AVDC1 numunesi).

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

DeneySEL çalışma kapsamında 16 adet ECC numunesi üzerinde toplam 2088 adet dijital görüntü işlenerek 112 DIC analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda 2 farklı hata kıyaslama yöntemi kullanılarak şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Önerilen alt küme boyutunun iki katı, yarısı ve kendisi için yapılan analizlerin ortalamaları 1. yöntem (maksimum gerilme noktasına göre kıyaslama) göre değerlendirildiğinde LVDT değerlerine en yakın sonucu %4.7'lik hata ile AVYÇ (Kontrollü Aydınlatma-Yüksek Çözünürlük) numunesi vermiştir.
- Verilerin ortalamaları 2. yöntem (tüm birim şekil değiştirmelere göre kıyaslama) göre değerlendirildiğinde AVYÇ (Kontrollü Aydınlatma-Yüksek Çözünürlük) numunesi %3.8 hata ile LVDT değerlerine yaklaşmıştır.
- Alt küme bazında ise 1. yöntem göre AVYÇ (Kontrollü aydınlatma-Yüksek çözünürlük) numunesi alt küme olarak önerilen alt kümenin iki katı kullanılarak yapılan analizde %2.9'luk hata ile en iyi sonucu vermiştir. Önerilen alt kümenin yarısını kullanmak %6.2 ile %46.3 oranları arasında değişen hatalara sebep olmuştur. Önerilen alt kümenin iki katını kullanmak ise maksimum %10.9'luk hataya neden olmuştur. Bu kıyaslama sonucunda önerilen alt kümenin üzerine çıkmanın DIC değerlerini LVDT'ye büyük oranda yaklaştırdığı tespit edilmiştir. Alt küme boyutunun daha fazla artırılmasının sonuçları ve analiz süresini ne derece değiştireceği ayrıca incelenmelidir.
- Alt küme bazında 2. yöntem göre kıyaslandığında AVYÇ (KontROLSÜZ aydınlatma-Yüksek çözünürlük) numunesi alt küme olarak önerilen alt kümenin iki katı kullanılarak yapılan analizde %2.2'lik hata ile LVDT'ye en yakın sonucu vermiştir. 2.

yönteme göre çoğu numunede en iyi sonucu önerilen alt kümenin iki katının kullanılması vermiştir.

- Çalışma kapsamında elde edilen görüntülerde, yüksek çözünürlüklü görüntülerin düşük çözünürlüklü görüntülere kıyasla 4 kat daha fazla veri içerdiği tespit edilmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak, yüksek çözünürlüklü görüntülerle yapılan analizlerde hata oranlarının daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Korelasyon yönteminin etkisini görmek için NSSD ile SSD yöntemleri kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda iki yöntemin birbiriyle %99 oranında benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada incelenen kontrollü aydınlatma ve yüksek çözünürlük koşullarında her iki korelasyon yönteminin de kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Kontrollü aydınlatma durumunda benek yoğunluğu %20 mertebelerinde iken kontrollü aydınlatmanın yapılmadığı durumda benek yoğunluğu %50 olarak hesaplanmıştır. Kontrolsüz aydınlatma durumunda meydana gelen yapay gölgelenmeler, kontrollü aydınlatma sağlandığında giderilmiş ve görüntü kontrastı daha belirgin hale gelmiştir. Yüksek çözünürlüklü görüntülerde kontrollü aydınlatma hata oranlarını önemli derecede azaltırken, düşük çözünürlüklü görüntülerde aydınlatma kontrolünün belirgin bir etkisi olmamıştır.
- Yüksek çözünürlük ve kontrollü aydınlatma ile elde edilmiş bir görüntüde uygun boyutta alt küme belirlendiği zaman DIC analiz sonuçları gerçek LVDT değerleri ile örtüşmektedir. DIC yönteminde, kontrollü aydınlatma ortamında yüksek çözünürlükle çekilen görüntülerden elde edilen birim şekil değiştirmeleri ile LVDT'lerden elde edilen birim şekil değiştirmelerinin farkı  $\pm\%2-8$  arasında küçük mertebelerde olduğu görülmüştür. Böylece bu makale kapsamına dâhil olmayan, bir sonraki aşamada gerçekleştirilecek çoklu çatlak analizi için gerekli lokal birim şekil değişimlerin DIC yöntemiyle hassas bir şekilde elde edildiği tespit edilmiştir.

## **Teşekkür**

Bu çalışma kapsamındaki deney ve analizler bir TÜBİTAK projesi (Proje No: 115R012) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağladığı ekipman ve maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

## **Kaynaklar**

- [1] Dhawale, A. W., & Joshi, V. P., Engineered cementitious composites for structural applications, International journal of application or Innovation in Engineering & Management, 2, 198-205, 2013.
- [2] Sherir, M. A., Hossain, K. M. A., & Lachemi, M., MAT-731: Mechanical & Durability Properties Of Engineered Cementitious Composites With Different Aggregates, 2016.
- [3] Li, V. C., Can Concrete Be Bendable? The notoriously brittle building material may yet stretch instead of breaking, American Scientist, 100(6), 484-93, 2012.

- [4] Li, V. C, Miahra D.K., Wu H. C., Matrix Design for Pseudo Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites, *Materials and structures*, pp. 586, 1995.
- [5] Ohno, M., & Li, V. C., A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 57, 163-168, 2014.
- [6] Felekoglu, B., & Keskinates, M., Multiple cracking analysis of HTPP-ECC by digital image correlation method, *Computers and Concrete*, 17(6), 831-848, 2016.
- [7] Pérez, J. A., Coppiters, S., & Debruyne, D., Influence of the Paint Coating Thickness in Digital Image Correlation Experiments, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 9(7), 1660-1664, 2015.
- [8] Aydın, M., Wu, X., Çetinkaya, K., Kadı, İ., & Yaşar, M., Application of Digital Image Correlation in Uniaxial Tensile Test, *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 1(1), 2015.
- [9] Kashfuddoja, M., Prasath, R. G. R., & Ramji, M., Study on experimental characterization of carbon fiber reinforced polymer panel using digital image correlation: A sensitivity analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, 62, 17-30, 2014.
- [10] Pan, B., Tian, L., & Song, X., Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation, *NDT & E International*, 79, 73-80, 2016.
- [11] Liu, X. Y., Li, R. L., Zhao, H. W., Cheng, T. H., Cui, G. J., Tan, Q. C., & Meng, G. W., Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(23), 4206-4211, 2015.
- [12] Liang, Z., Yin, B., Liu, H., Mo, J., & Wang, S., Displacement measurement of specimen surfaces with dam aged areas by digital image correlation, *Measurement*, 76, 183-188, 2015.
- [13] Chen, X., Yang, L., Xu, N., Xie, X., Sia, B., & Xu, R., Cluster approach based multi-camera digital image correlation: Methodology and its application in large area high temperature measurement, *Optics & Laser Technology*, 57, 318-326, 2014.
- [14] Haddadi, H., & Belhabib, S., Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique, *Optics and Lasers in Engineering*, 46(2), 185-196, 2008.
- [15] Hedayat, A., & Ashur, S., Digital image correlation and its application in an undergraduate Civil Engineering Materials Laboratory, 2015.
- [16] Cooreman, S., Lecompte, D., Sol, H., Vantomme, J., & Debruyne, D., Identification of mechanical material behavior through inverse modeling and DIC, *Experimental Mechanics*, 48(4), 421-433, 2008.



- [17] Khoo, S. W., Karuppanan, S., & Tan, C. S., A Review of Surface Deformation and Strain Measurement Using Two-Dimensional Digital Image Correlation, *Metrology and Measurement Systems*, 23(3), 461-480, 2016.
- [18] Bomarito, G. F., Hochhalter, J. D., & Cannon, A. H., *Image Correlation Pattern Optimization for Micro-Scale In-Situ Strain Measurements*, 2016.
- [19] Ke, X. D., Schreier, H. W., Sutton, M. A., & Wang, Y. Q., Error assessment in stereo-based deformation measurements, *Experimental Mechanics*, 51(4), 423-441, 2011.
- [20] Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H., *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2009.
- [21] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)*, Tokyo, Japan, 1–88, 2008.
- [22] Reu, P., *Stereo-Rig Design: Creating the Stereo-Rig Layout–Part 1*, *Experimental Techniques*, 36(5), 3-4, 2012.
- [23] Yang, Y., Sun, P., Nagarajaiah, S., Bachilo, S. M., & Weisman, R. B., Full-field, high-spatial-resolution detection of local structural damage from low-resolution random strain field measurements, *Journal of Sound and Vibration*, 399, 75-85, 2017.
- [24] Chu, T. C., Ranson, W. F., & Sutton, M. A., Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, *Experimental mechanics*, 25(3), 232-244, 1985.



# Betonarme Perdelerin Plandaki Yerleşimlerinin Kirişsiz Döşemeli Yapılara Etkisinin İncelenmesi

Ali BOZER<sup>1</sup>

## ÖZ

Bu çalışmada perdelerin plandaki yerleşiminin kirişsiz döşemeli yapıların deprem performansına olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaç ile perdelerin plandaki yerleşimleri burulma düzensizliği yaratmayacak şekilde simetrik ve burulma düzensizliği yaratacak şekilde düzensiz seçilerek iki ayrı 7 katlı kirişsiz döşemeli yapı tasarlanmış ve bu yapıların deprem performansı doğrusal olmayan artımsal itme analizleri ve zaman tanım aralığında analizler ile irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre perdelerin plandaki yerleşimlerinin yapının sünekliği açısından belirleyici olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kirişsiz döşeme, deprem performansı, betonarme perde, artımsal itme analizi, zaman tanım aralığında analizler, doğrusal olmayan davranış.

## ABSTRACT

### Effect of Plan Configuration of Reinforced Concrete Shear Walls on the behavior of Flat Slab Buildings

In this study, the effect of plan configuration of shear walls on the behavior of flat slab building is investigated. For this purpose two seven-story flat slab buildings are designed. In one of the buildings, plan configuration of shear walls is selected symmetrical, whereas in the other building plan configuration is selected to cause torsional irregularity. Seismic performances of both buildings are then investigated by push-over and time-history analyses. It is observed that plan configuration of structural walls has a significant effect on overall ductility of the flat slab buildings.

**Keywords:** flat slab, seismic performance, shear wall, push-over analysis, time history analyses, non-linear behavior.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 14 Mart 2018 günü ulaşmıştır. 12 Kasım 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.406060>

1 Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri - bozerali@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-3632-2605>

## 1. GİRİŞ

Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde bazı büyük şehirlerimizin deprem tehlikesi yüksek olan bölgelerde kuruldukları, nüfusumuzun yarısından fazlasının bu sahalarda yaşadığı göz önüne alındığında Türkiye deprem riski açısından dünyanın en önde gelen ülkelerindendir. Depremden dolayı oluşan hasarlar sadece depremin büyüklüğüne bağlı değil mühendislik yapılarının performansına da bağlıdır. Bu sebeple yapıların doğru taşıyıcı sistem seçilerek tasarlanması ve detaylandırılması oldukça önemlidir.

Deprem kuvvetlerinin yapıya olan etkileri seçilen taşıyıcı sisteme bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Perdelerin plandaki yerleşimleri, seçilen döşeme sistemi ve yapısal düzensizlikler gibi birçok faktör yapının deprem davranışı üzerinde etkili olmaktadır [1]. Kirişsiz döşemeli sistemlerin yapı sünekliğini olumsuz etkilediği bilinmekle birlikte gerek bu sistemlerin imalat kolaylığı ve ekonomik üstünlükleri gerekse mekânları rahat ve etkin kullanma isteği, kirişsiz döşeme sistemlerinin giderek daha çok tercih edilmesine sebebiyet vermiştir.

Kirişsiz döşemeler betonarme plakların kirişlere mesnetlenmeden yüklerini doğrudan kolonlara aktardığı taşıyıcı sistemlerdir. Kirişsiz döşemelerin düşey yükler altındaki davranışı iyi anlaşılmıştır ve bu konu ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Öte yandan kirişsiz döşeme sisteminin özellikle deprem yüklerinin dinamik etkisi altındaki davranışı ile ilgili çalışmalar sınırlı kalmıştır. Mulcahy ve Rotter [2] kirişsiz döşeme ve kolon sisteminin moment-dönme ilişkilerini incelemiş, Chow ve Selna [3] deprem sırasında dengelenmemiş momentlerin döşemede yüksek kayma gerilmeleri oluşturduğunu tespit etmiştir. Hwang ve Moehle [4] tersinir yükler altında döşeme davranışını ve eğilme momentlerinin dağılımını incelemiştir. Erberik ve Elnashai [5] kirişsiz döşemeli sistemler için kırılma analizleri gerçekleştirmiş ve kirişsiz döşemeli sistemlerin çerçeve sistemlere nazaran deprem hasarına daha eğilimli olduğunu tespit etmiştir. Coelho vd. [6] deprem yükleri altında kirişsiz döşeme davranışını değişken kesit ölçüleri ve farklı kolon yerleşimleri için incelemiştir. Almeida vd. [7] kirişsiz döşemelerin zımbalama davranışını tersinir yatay yükler ve düşey yüklerin birleşik etkisi altında irdelemiştir.

Her ne kadar kirişsiz döşeme sistemlerinin geleneksel kirişli döşeme sistemlerine nazaran mimari esneklik, daha az kısıtlanmış alan, daha kolay kalıp işçiliği ve daha hızlı inşa edilebilme gibi üstünlükleri olsa da yapılan çalışmalar göstermektedir ki kirişsiz döşemeli yapıların yanal rijitliği kirişli döşemeli yapılara kıyasla daha az olmaktadır. Bu durumda oluşan aşırı deformasyonlar hem yapısal olmayan elemanların hasar görmesine sebebiyet verebilmekte hem de ikinci mertebete etkilerinin daha fazla olmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte kirişsiz döşemeli yapılarda döşeme içinde sargı donatısı kullanılmadığından döşeme kesitinin sünek davranış kabiliyeti ve enerji yutma kapasitesi oldukça sınırlı kalmakta, %1 - %1.5 görelî öteleme seviyelerinde bile kirişsiz döşemeli sistemlerin yatay yük taşıma kapasitesini kaybettiği gözlemlenmektedir [7, 8, 9]. Bu sebeplerden ötürü Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te (DBYBHY) [10] kirişsiz döşemeli sistemlerin süneklik düzeyi normal sistemler olarak dikkate alınması öngörülmüş, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY) [11] ise kirişsiz döşemeli sistemlerde oluşabilecek hasarları sınırlamak için deprem etkilerinin tamamının betonarme perdeler tarafından karşılanması zorunlu kılınmıştır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında perdelerin temel görevi tersinir deprem yükleri altında yapının yatay öteleme rijitliğini artırmak ve katlar arasında yatay ötelenmeleri sınırlandırmaktır [12]. Yapının deprem esnasında göstereceği davranış yapıdaki perde alanı ve plandaki perde yerleşimi ile ilgilidir. Bir yapıda perde oranları uygun seçilse bile perdelerin planda düzgün yerleştirilmemesi, taşıyıcı sistemin daha çok zorlanmasına sebep olabilmektedir [13].

TBDY [11]'e göre kirişsiz döşemeli betonarme sistemlerde deprem etkilerinin tamamının betonarme perdeler ile karşılanması gerekmektedir. Bu koşulu sağlamak için birinci aşamasında çerçeve kolonlarının alttan ve üstten mafsallı alındığı, ikinci aşamasında ise bu elemanların bağlantılarının monolitik modellendiği iki aşamalı bir hesaplama yöntemi önerilmektedir. Bu koşulu perdeleri planda düzgün yerleştirilmemiş ve burulma düzensizliğine sahip bir yapı için de sağlamak mümkündür. Bu tür bir tasarımda kolonlardan ve kirişsiz döşemelerden oluşan çerçeve sistemin şekildeğiştirme taleplerinin karşılanmasında perdelerin etkinliğinin daha az olacağı düşünülmektedir.

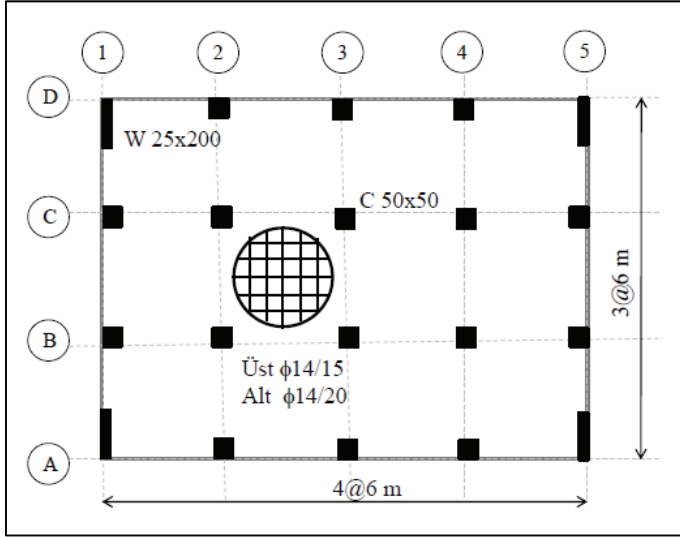
Bu çalışmada plandaki perde yerleşimlerinin kirişsiz döşemeli yapılara olan etkisi incelenmiştir. Perdelerin plandaki yerleşimleri burulma düzensizliği yaratmayacak şekilde simetrik ve burulma düzensizliği yaratacak şekilde düzensiz seçilerek iki ayrı yapı tasarlanmış ve bu yapıların deprem performansı doğrusal olmayan artımsal itme analizleri ve zaman tanım aralığında analizler ile irdelenmiştir.

## **2. KİRİŞSİZ DÖŞEME SİSTEMLERİ'NİN TASARIMI**

Kirişsiz döşemeli sistemlerin analizi ve tasarımı için sonlu elemanlar yöntemi, moment katsayıları yöntemi, eşdeğer çerçeve yöntemi, akma çizgileri yöntemi ve benzeri yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında eşdeğer çerçeve yöntemi, kirişsiz döşemeli sistemlerin analizi için İngiliz (BS8110) [14] ve Amerikan (ACI 318-11) [15] yönetmelikleri gibi uluslararası yönetmeliklerde olduğu gibi ulusal yönetmeliğimizde de (TSE-500) [16] yer bulmuş pratik bir yöntemdir. Düzgün yayılı düşey yükler altında kirişsiz döşeme sisteminde oluşan dönmelerin kolon yüzünden uzaklaştıkça arttığı bilinmektedir. Eşdeğer çerçeve yönteminde döşeme kirişinin faydalı genişliği dönmelerdeki değişimin sabit kabul edilebileceği bir kiriş genişliği belirlenerek hesaplanır. Burada kolonların düzgün bir aks sisteminde yerleştirildiği kabul edilmektedir. Faydalı kiriş genişliği betonarme elemanların rijitlikleri temel alınarak hesaplanmakta, dayanım faktörü ihmal edilmektedir. Yöntem orijinal olarak düşey yükler için geliştirilmiş, 1983 yılından itibaren yanal yükler altındaki davranışı da kapsayacak şekilde genişletilmiştir [17].

Eşdeğer çerçeve yönteminde kirişsiz döşemeler birbirlerine dik doğrultuda çerçeveler olarak idealleştirilirler. Bu yaklaşımda yatay eğilme elemanın genişliği çerçeveye dik iki komşu döşemenin açıklık ortaları arasındaki uzaklık olarak alınır ve her iki doğrultuda döşeme yükünün tamamı hesaba katılır. Çerçeve çözümlemesinden bulunan momentler yönetmelikte tanımlanan moment dağıtma katsayıları oranında kolon ve orta şeritlere dağıtılır. Mevcut binaların güçlendirilmesinde ve değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir standart olan ASCE41-13 [18]'de betonarme kirişsiz döşemelerin doğrusal olmayan davranışının modellenebilmesi için kirişsiz döşemeli sistemlerin eşdeğer çerçeveler olarak idealleştirilmesine izin verilmektedir. Eşdeğer çerçeve yönteminde eşdeğer döşeme kirişlerinin rijitliği bürüt kesit üzerinden hesaplanmaktadır. Öte yandan yapılan araştırmalar

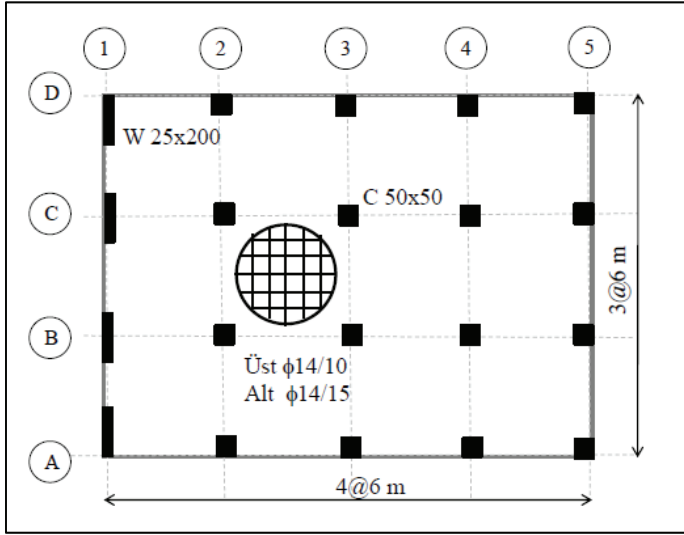
eşdeğer çerçeve yönteminde hesaplanan yatay rijitliklerin, doğrusal olmayan bölgede döşemede oluşacak çatlakların dikkate alınarak düşürülmesi gerektiğini göstermektedir [19,20]. Bu çalışmada kirişsiz döşemelerde tasarım yükleri altında donatı taleplerini belirlemek için sonlu elamanlar yöntemi ile modelleme yapılmış, döşemelerin doğrusal olmayan davranışını inceleyebilmek için eşdeğer çerçeve yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde göz önüne alınan kirişsiz döşeme sistemi için eşdeğer döşeme kirişi genişliği kenar eksenlerde 1.50 m, iç eksenlerde 3.00 m kabul edilmiştir.



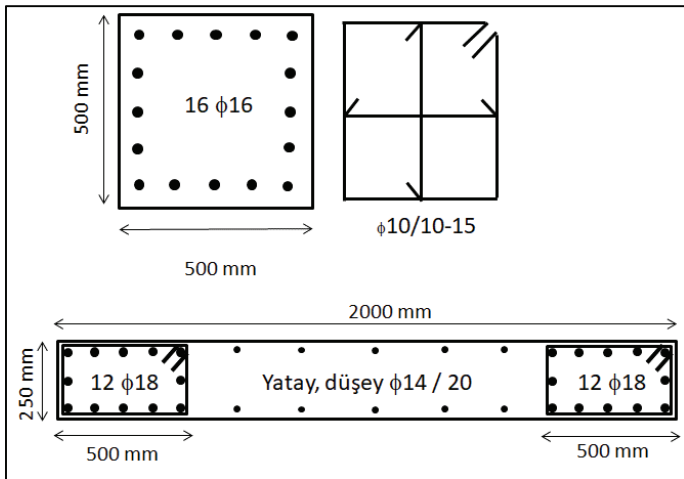
Şekil 1 - Düzenli yapı kat kalıp planı ve döşeme donatı şeması

Perdelerin plandaki yerleşiminin kirişsiz döşemeli yapıların deprem performansına olan etkilerinin araştırılması amacıyla kirişsiz döşemeli 7 katlı iki betonarme yapı tasarlanmıştır. Yapı kat yüksekliği 3.0 m alınmıştır. Yapılar ETABS v.16 [21] yapısal analiz programı kullanılarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Yapılarda C30 beton sınıfı ve S420 donatı sınıfı kullanılmıştır. Döşeme kalınlığı yeterli zımbalama dayanımını sağlayacak şekilde 25 cm seçilmiş, döşemelere gelen kaplama yükü  $2 \text{ kN/m}^2$  ve hareketli yük  $3.5 \text{ kN/m}^2$  (ayırıcı duvar yükleri dahil) alınmıştır. Eğilme etkisi altındaki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin rijitlik çarpanları kolonlar için 0.70, döşemeler için 0.25 ve perdeler için düzlem içi 0.5, düzlem dışı 0.25 alınmıştır. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) ve Yerel Zemin Sınıfı ZC için Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı ( $S_{DS}$ ) 1.0 g, 1.0 s Periyot için Tasarım Spektral İvme Katsayısı ( $S_{D1}$ ) 0.45 g kabul edilmiştir. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı R her iki doğrultuda “Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek boşluksuz betonarme perdeler ile taşındığı” yapı için 6 alınmıştır. Betonarme perdeler her iki yapı için TBDY [11]’de belirtilen perde koşullarını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Bu yapıların birinde (Şekil 1) perdeler planda burulma düzensizliği yaratmayacak şekilde simetrik yerleştirilmiş, diğer yapıda ise (Şekil 2) perdeler planda burulma düzensizliğine sebebiyet verecek şekilde düzenlenmiştir. Yapıya ait parametreler Tablo 1’de, eleman boyutları ve donatı detayları Şekil 3’te verilmiştir.

Düzenli yapıda burulma düzensizliği katsayısı 1.04 olarak, düzensiz yapıda ise 1.73 olarak hesaplanmıştır. Beklenildiği gibi düzensiz yapıda hakim titreşim periyoduna karşılık gelen modal şekil değiştirmelerde öteleme ve burulma etkileri beraber görülmektedir. Bu nedenle düzensiz yapıda öteleme doğrultusunda modal kütle katılım oranı düzenli yapıya göre daha az olmaktadır. Düzensiz yapının burulma rijitliği düzenli yapıya göre daha azdır. Bu durum düzensiz yapıda öteleme ve burulma etkilerinin beraber görüldüğü y doğrultusu hakim titreşim periyodunun düzenli yapıda sadece öteleme etkilerinin bulunduğu hakim titreşim periyoduna kıyasla daha büyük çıkmasıyla da anlaşılabilir. Hakim titreşim periyodundaki farklılığa bağlı olarak yapı toplam taban kesme kuvveti düzenli yapıda düzensiz yapıya oranla daha büyük hesaplanmıştır.



Şekil 2 - Düzensiz yapı kat kalıp planı ve döşeme donatı şeması



Şekil 3 - Kolon ve perde detayları

Tablo 1 - Yapısal Parametreler

Mod Birleştirme Yöntemi Büyütme Katsayısı	Düzenli Yapı	1.01
	Düzensiz Yapı	1.23
Toplam Taban Kesme Kuvveti	Düzenli Yapı	2026 kN
	Düzensiz Yapı	1690 kN
Y doğrultusu Hakim Titreşim periyodu /Y doğrultusu Modal Etkin Kütle Oranı	Düzenli Yapı	1.41 s / %71
	Düzensiz Yapı	1.95 s / %53
Maks. Etkin Görelî Kat Ötelenmesi	Düzenli Yapı	0.011 (Kat 4)
	Düzensiz Yapı	0.019 (Kat 3)
Maks. Burulma Düzensizliği katsayısı $\eta_{bi}$	Düzenli Yapı	1.04
	Düzensiz Yapı	1.73
Perde devrilme momentleri toplamının yapı devrilme momentine oranı $\alpha_s$	Düzenli Yapı	0.39
	Düzensiz Yapı	0.30

Düzensiz yapıda burulma momentleri aynı eksen üzerinde bulunan perdelerin zayıf doğrultularında kuvvet çiftleri oluşturmaktadır. Perdelerin düzlem dışı eğilme rijitliği, düzlem içi eğilme rijitliğine oranla çok düşük kaldığından zayıf doğrultuda oluşan kuvvet çiftleri düzensiz yapıdaki taban burulma momentlerinin perdeler tarafından yeterince karşılanamamasına sebebiyet vermektedir. Bunun bir sonucu olarak kolon ve döşemenin oluşturduğu çerçeve sistemine aktarılan kesme kuvvetleri artmıştır. Bu durumda düzensiz yapıda perde devrilme momentleri toplamının yapı toplam devrilme momentine oranı düzenli yapıya göre daha düşük olmuş ve perdelerin bulunduğu eksenlerden uzaklaştıkça deprem yüklerinin kolon ve döşeme sistemine aktarıldığı görülmüştür. Bu nedenle kirişsiz döşemelerde üst ve alt donatı ihtiyacı düzensiz yapıda düzenli yapıya kıyasla daha fazla olmaktadır. Hesap kolaylığı açısından en fazla donatı talebi belirlenmiş ve bütün döşemede belirlenen donatılar kullanılmıştır (Şekil 1 ve 2).

### 3. ARTIMSAL İTME ANALİZİ

Düzenli ve düzensiz yapıların deprem performansı artımsal itme analizi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sabit yük etkisi (G) ve hareketli yük etkisi (Q) taşıyıcı sisteme doğrusal olmayan statik hesap ile artımsal olarak uygulanmıştır. Bu hesaptan elde edilen iç kuvvetler yatay deprem hesabında başlangıç değerleri olarak göz önüne alınmıştır. Beton gerilme-birim şekil değiştirme bağıntıları için TBDY [11]' de belirtilen Mander modeli, donatı çeliği gerilme-birim şekil değiştirme bağıntıları için ise Park modeli kullanılmıştır.

Betonarme kirişsiz döşemelerin doğrusal olmayan davranışının incelenmesi için döşemeler eşdeğer çerçeve yöntemine [16] göre eşdeğer kirişler olarak idealleştirilmiştir. Betonarme kolonlar ve eşdeğer döşeme kirişleri tek eksenli çubuk elemanlar olarak modellenmiştir. Kolon-kiriş birleşim bölgeleri rijit kabul edilmiş, kayma şekil değiştirmeleri göz önüne alınmamıştır. Betonarme perdeler kabuk sonlu elemanlar ile modellenmiştir.



Betonarme kolon ve kirişlerin doğrusal olmayan davranış modeli için kesit içindeki beton ve donatı çubuklarına ait liflerin doğrusal olmayan aksel gerilme-birim şekil değiştirme bağıntıları ile modellendiği lif (fiber) eleman modelleri kullanılmıştır. Lif eleman modelinde plastik şekil değiştirme bölgesi kolon-kiriş elemanının her iki ucunda tanımlanmış ve iki plastik şekil değiştirme bölgesi arasında kalan kısım elastik eleman olarak kabul edilmiştir. Plastik şekil değiştirme bölgesinin boyu ( $L_p$ ) çalışan doğrultudaki kesit boyutunun ( $h$ ) yarısı olarak alınmıştır [11]. Integrasyon noktası plastik şekil değiştirme bölgesinin ortasında alınmakta ve doğrusal olmayan davranış plastik şekil değiştirme bölgesi ile sınırlı kalmaktadır. Bu durumda doğrusal olmayan şekil değiştirmeler eleman boyunca değil plastik mafsalsal uzunluğu boyunca yayılı (eleman plastik bölgelerinde sınırlı) tarif edilmektedir. Plastik şekil değiştirme bölgesindeki kesit davranışı her bir life ait gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısının toplanması ile elde edilmektedir. Bu yöntemde kesit üzerindeki üç boyutlu aksel kuvvet ve eğilme momenti ilişkisi doğrudan modellenebilmektedir [22]. Kesit davranışı gerilme-birim şekil değiştirme bağıntılarından elde edildiği için kesite ait moment-eğrilik ilişkisinin önceden elde edilmesine gerek yoktur. TBDY [11]'de performans hedefleri dış liflerdeki birim şekil değiştirme ( $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_c$ ) sınırları dikkate alınarak verilmiştir. Lif eleman modelinde bu değerler doğrudan elde edilmektedir.

Betonarme perdelerde kolon-kiriş elemanlarında olduğu gibi kesit içindeki beton ve donatı çubuklarına ait liflerin, doğrusal olmayan aksel gerilme-birim şekil değiştirme bağıntıları ile modellendiği lif (fiber) eleman modelleri kullanılmıştır. Aksel kuvvet/eğilme etkileri her bir life ait gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısının toplanması ile elde edilmektedir. Kesme kuvveti etkileri lif elemanlar ile etkileşimsiz ve doğrusal kabul edilmektedir. Plastik şekil değiştirme bölgesi boyu kabuk eleman yüksekliğinde alınmakta ve integrasyon noktası kabuk elemanın orta noktasında tanımlanmaktadır. Sayısal model oluşturulurken perde elemanlar her biri kat yüksekliğinin yarısı yükseklikte olmak üzere her katta iki kabuk eleman ile tanımlanmıştır. Bu durumda doğrusal olmayan şekil değiştirmeler elemanın uzunluğu boyunca sürekli (yayılı) biçimde göz önüne alındığından ayrıca eleman üzerinde etkin eğilme rijitliği tanımı yapılmamıştır.

Artımsal itme analizinde düzenli yapıda hakim doğal titreşim mod şekli genliği ile orantılı yatay yük dağılımı kullanılmıştır. Düzensiz yapıda hakim titreşim moduna ait etkin kütle oranı %70'in altında kalmaktadır. Düzensiz yapıda burulma modlarının katkılarını da dikkate alabilmek amacıyla artımsal itme analizinin zaman tanım aralığında (quasi-static) çözümü yapılmıştır [21].

Bu yöntemde yapının hareket denklemi, önceden belirlenmiş bir şablona göre uygulanmış yükler altında çözümlenmektedir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \lambda(t)\mathbf{P}_0 \quad (1)$$

Hareket denkleminde  $\mathbf{X}$  yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{P}_0$  nominal yük vektörünü,  $\lambda(t)$  tırmanma (ramp) fonksiyonunu,  $\mathbf{M}$  kütle matrisini,  $\mathbf{C}$  sönüm matrisini ve  $\mathbf{K}$  rijitlik matrisini göstermektedir. Zorlanmış titreşimin sükunetten başladığı kabul edilerek zorlama, tırmanma (ramp) fonksiyonu ile zaman içerisinde artımsal olarak uygulanmakta ve çözümleme kontrol noktasındaki yerdeğiştirme önceden belirlenen değerine ulaşıncaya kadar sürdürülmektedir. Tırmanma fonksiyonunun son değerine ulaşıncaya kadar geçen süre olarak tanımlanan

yükselme zamanı, yapının doğal titreşim periyoduna göre çok küçük alınır ise yapı darbe (impuls) yük etkisine benzer bir yapı cevabı gösterecektir. Öte yandan yapının doğal titreşim periyodundan çok büyük yükselme zamanı alınır ise (oldukça yavaş artan yükleme durumu) dinamik titreşimler küçük ve yapı cevabı statik çözüme yakın olacaktır [23]. Quasi-statik çözümlemede yük artım zaman aralığı 1sn olarak alınmış ve belirlenen tepe yerdeğiştirme değerine ulaşana kadar dinamik çözümleme yapılmıştır.  $P_0$  nominal yük vektörü belirlenirken birinci mod şekline göre hesaplanan kat kuvvetleri yerine, kat kütlelerinin dağılımı ile orantılı bir yük vektörü dikkate alınmıştır.

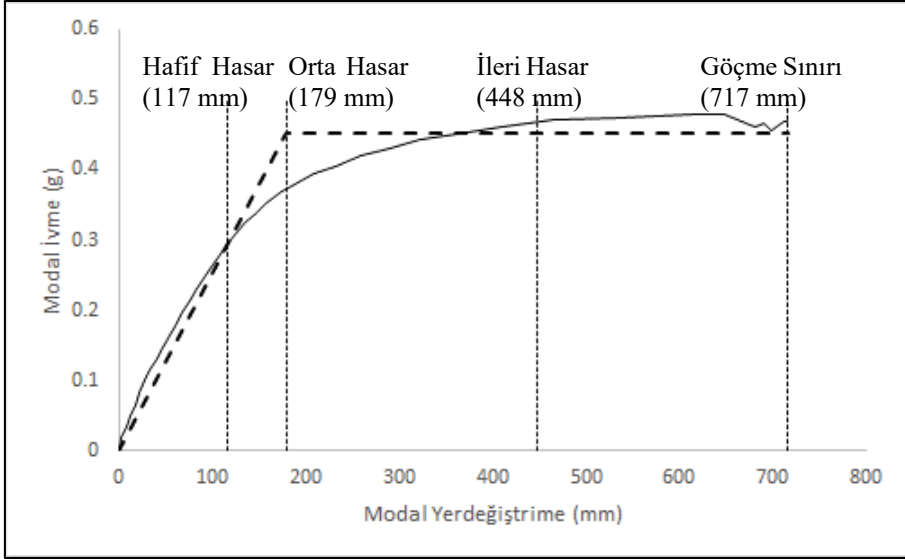
Artımsal itme analizi sonucunda Y-Y doğrultusu taban kesme kuvveti ve Y-Y doğrultusu tepe yerdeğiştirmelerinin çizildiği itme eğrileri elde edilmiş ve itme eğrileri modal kapasite diyagramlarına dönüştürülmüştür. Modal kapasite eğrileri üzerinde hasar sınırlarının belirlenebilmesi için modal kapasite eğrileri elasto-plastik diyagram ile idealleştirilmiştir. İdealleştirilme işleminde diyagramların altında kalan alanların eşitliği esas alınmıştır. Sınır hasar seviyeleri oluşturulmuş modal kapasite diyagramları üzerinden tanımlanmıştır. Modal kapasite diyagramının doğrusallıktan ayrıldığı noktadaki modal yerdeğiştirme değeri Hafif Hasar sınırı olarak belirlenmiştir. Elastik rijitliği ve elastik ötesi rijitliği temsil eden iki doğru parçasının kesiştiği noktadaki modal yerdeğiştirme değeri Orta Hasar sınırı olarak belirlenmiştir. Göçme sınırı ise modal kapasite diyagramındaki modal ivmenin %5'den daha fazla azaldığı ilk modal yerdeğiştirme seviyesi olarak belirlenmiştir. Orta Hasar sınırı ile Göçme sınırı arasındaki bölgenin ortası İleri Hasar sınırı olarak belirlenmiştir [24]. Düzenli ve düzenli olmayan yapılara ait modal kapasite diyagramları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir.

Yapıların yatay yerdeğiştirme cinsinden süneklik kapasiteleri ( $\mu = \delta_u / \delta_y$ ) düzenli yapı için 4.01, düzensiz yapı için 2.81 hesaplanmıştır. Burada  $\delta_y$  orta hasar yerdeğiştirme değerine,  $\delta_u$  göçme sınırı yerdeğiştirme değerine karşılık gelmektedir.  $\delta_y$  değerine karşılık gelen öteleme oranı düzenli yapıda %0.85, düzensiz yapıda %0.72 olarak hesaplanmıştır.  $\delta_u$  değerine karşılık gelen öteleme oranı düzenli yapıda %3.4, düzensiz yapıda %2 olarak hesaplanmıştır. Dayanım fazlalığı katsayısı ( $D = f_y / f_d$ ) düzenli yapı için 1.54, düzensiz yapı için 1.51 hesaplanmıştır. Burada  $f_y$  yapının orta hasar sınırına karşılık gelen dayanımına,  $f_d$  yapının hafif hasar sınırına karşılık gelen dayanımına karşılık gelmektedir. Buna göre deprem yükü azaltma katsayısı ( $R = \mu \times D$ ) düzenli yapı için 6.17, düzensiz yapı için 4.23 hesaplanabilir. Görüldüğü gibi perdeler planda burulma düzensizliği yaratmayacak şekilde yerleştirildiğinde deprem yükü azaltma katsayısı TBDY [11]'de önerilen değeri sağlamaktadır. Perdelerin planda burulma düzensizliği yaratacak şekilde yerleştirilmesi durumunda ise yapının süneklik düzeyi sınırlı bir sistem gibi davrandığı anlaşılmaktadır. Buradan kirişsiz döşemeli sitemlerin süneklik düzeyi yüksek perdeler ile birlikte kullanıldığında, TBDY [11]'de verilen perde koşulları yerine getirilse bile perdelerin plandaki yerleşimlerine dikkat edilmediğinde yapının sünekliğinin hedeflenen seviyelerde olamayabileceği görülmektedir.

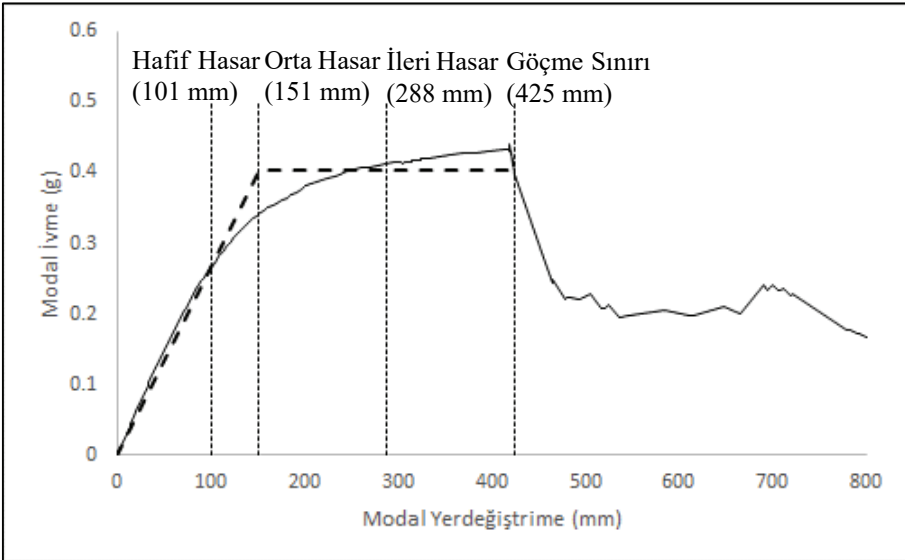
Modal kapasite diyagramlarında farklı hasar sınırlarına karşılık gelen plastik mafsallı oluşumları elde edilmiş ve hesaplanan değerler kolon, perde ve eşdeğer döşeme kirişleri için ayrı ayrı Tablo 2'de verilmiştir.

Hafif hasar seviyesinde hem düzenli yapıda hem de düzensiz yapıda 1. kat kolonlarının alt uçlarında plastik mafsallı oluşumu gözlemlenmiştir. Düzenli yapıda ayrıca eşdeğer döşeme kirişlerinin perdelerle bağlandığı noktalarda ve perdelerin kritik perde bölgelerinde plastik

mafsallar oluşmuştur. Plastik mafsal oluşan kesitlerdeki en dış liflerdeki birim uzamaların kontrollü hasar sınırını (KH) aşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4 - Düzenli yapıya ait modal kapasite diyagramı



Şekil 5 - Düzensiz yapıya ait modal kapasite diyagramı

Orta hasar seviyesinde hem düzenli hem de düzensiz yapıda kolonlardaki mafsal oluşumlarının üst katlara doğru yayıldığı gözlemlenmiştir. Düzenli yapıda perdelerin bulunduğu 1 ve 5 eksenlerinde kolonlara bağlanan eşdeğer döşeme kirişlerinde KH sınırını aşmayan plastik mafsal oluşumları görülmüştür. Eşdeğer döşeme kirişlerinin perdelerle bağlandığı noktalarda hafif hasar seviyesinde gözlemlenmiş olan plastik mafsalların orta hasar seviyesinde 2. ve 3. katlarda KH sınırını aştığı tespit edilmiştir. Düzensiz yapıda plastik mafsalların 5 ve 4 eksenlerinde kolonlara bağlanan eşdeğer döşeme kirişlerinde olduğu gözlemlenmiştir. Plastik mafsal oluşan kesitlerdeki en dış liflerdeki birim uzamaların KH sınırını aşmadığı tespit edilmiştir.

İleri hasar seviyesinde eşdeğer döşeme kirişlerinde çok sayıda plastik mafsal oluşumu gözlemlenmiştir. Eşdeğer döşeme kirişlerinin hemen hepsinde sınırlı hasar (SH) sınırının birçoğunda ise KH sınırının aşıldığı görülmektedir. Ayrıca düzenli yapıda göçmenin önlenmesi performans (GÖ) sınırı 1 ve 5 eksenlerindeki perdelerle bağlanan eşdeğer döşeme kirişlerinde aşılmıştır. Düzenli ve düzensiz yapıda 1. kat kolonlarının alt uçlarında GÖ sınırının aşıldığı kesit zorlanmaları görülmektedir.

Tablo 2 - Yapı Hasar Seviyelerine Karşılık Gelen Plastik Mafsal Oluşumları

Hasar Seviyesi	Betonarme Eleman	Düzenli Yapı			Düzensiz Yapı			Toplam
		SH-KH	KH-GÖ	>GÖ	SH-KH	KH-GÖ	>GÖ	
Hafif Hasar	Kolon	6	0	0	11	0	0	224
	Perde	2	0	0	0	0	0	28
	Eşdeğer Döşeme K.	8	0	0	0	0	0	434
Orta Hasar	Kolon	28	0	0	19	0	0	224
	Perde	2	0	0	0	0	0	28
	Eşdeğer Döşeme K.	18	4	0	10	0	0	434
İleri Hasar	Kolon	39	26	6	21	3	12	224
	Perde	4	0	0	3	0	0	28
	Eşdeğer Döşeme K.	54	94	14	70	22	0	434
Göçme Sınırı	Kolon	52	14	28	92	0	16	224
	Perde	0	4	0	3	0	0	28
	Eşdeğer Döşeme K.	14	82	89	36	90	14	434

SH: Sınırlı Hasar, KH: Kontrollü Hasar, GÖ: Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyleri

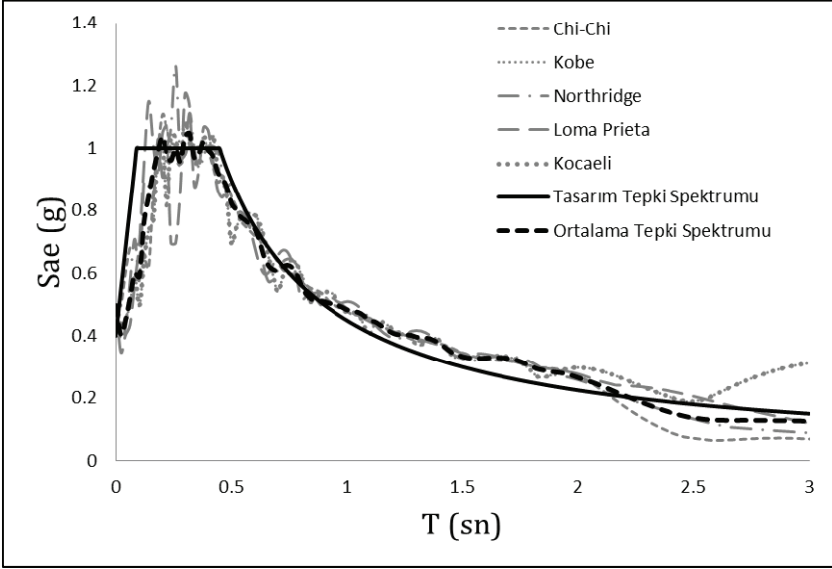
Göçme sınırı seviyesinde düzensiz yapıda 4 ve 5 eksenlerinde bütün kolon ve eşdeğer döşeme kirişlerinin mafsallaştığı mekanizma durumu gözlemlenmektedir. Bu eksenlerde özellikle 1. ve 2. kat kolon ve eşdeğer döşeme kirişlerinde GÖ sınırının aşıldığı kesit zorlanmaları tespit edilmiştir. Düzenli yapıda benzer şekilde eşdeğer döşeme kirişi-kolon çerçeve sisteminde mekanizma durumu gözlemlenmiştir Eşdeğer döşeme kirişlerinin büyük çoğunluğunda ve alt kat kolonlarında GÖ sınırının aşıldığı kesit zorlanmaları tespit edilmiştir. Betonarme perdelerde kritik perde yüksekliği boyunca oluşan plastik mafsallar GÖ sınırını aşmamıştır ve planda simetrik olarak yerleştirilmiş perdeler düzensiz yapıdan farklı olarak yapının yanal stabilitesini sağlamaktadır.

Modal kapasite diyagramları incelendiğinde, modal yerdeğiştirme talebi düzenli yapı için ileri hasar seviyesindeyken bu değer düzensiz yapı için göçme sınırına karşılık gelmektedir. Buradan hareketle düzenli yapıda ileri hasar ve düzensiz yapıda göçme sınırı hasar seviyeleri karşılaştırıldığında, eşdeğer döşeme kirişlerindeki ve kolonlardaki mafsal oluşumlarının sayı ve dağılım olarak benzer olduğu görülmektedir. Temel fark perdelerin plandaki yerleşiminden kaynaklanmıştır. Düzenli yapıda betonarme perdeler, eşdeğer döşeme kirişi ve kolonların oluşturduğu çerçevelerde meydana gelen plastik mafsallar neticesinde oluşan yanal rijitlik ve dayanım kayıplarını üstlenilebilmiştir. Öte yandan düzensiz yapıda betonarme perdelerin burulma rijitliğine katkısı sınırlıdır ve bu sebeple perde ekseninden uzaklaşan eksenlerdeki rijitlik ve dayanım kayıpları telafi edilememiştir. Düzensiz yapı göçme sınırına geldiğinde perdelerden birinde plastik mafsal oluşmamış, diğer perdelerde ise oluşan plastik mafsallar KH sınırını aşmamıştır. Bu durum analizin sonlandığı noktaya kadar değişmemiştir.

#### 4. ZAMAN TANIM ARALIĞINDA ANALİZLER

Çalışmada kullanılan düzenli ve düzensiz yapıların performansları doğrusal elastik olmayan davranış gözönüne alınarak zaman tanım aralığında analizler ile irdelenmiştir. Analizlerde kullanılan güçlü yer hareketi kayıtları Pacific Earthquake Engineering Research Center veri tabanından [25] elde edilmiş ve güçlü yer hareketi kayıtlarının genlikleri tasarım ivme spektrumu ile uyuşacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Seçilen ve ölçeklenmiş güçlü yer hareketi kayıtlarına ait detaylı bilgiler Tablo 3’de ve ölçeklenmiş her kayıta ait tepki spektrumları Şekil 6’da verilmiştir.

Her bir deprem durumuna karşılık gelen en büyük tepe yerdeğiştirmeleri ve görel kat ötelenmeleri elde edilmiştir. Bütün deprem durumları için düzensiz yapıda en büyük tepe yerdeğiştirmesi taleplerinin düzenli yapıya kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir. Tepe yerdeğiştirmeleri arasındaki bu fark Chi Chi depremi için %95 (Şekil 7), Kobe depremi için %45 (Şekil 9), Northridge depremi için %93 (Şekil 11), Loma Prieta depremi için %51 (Şekil 13), ve Kocaeli depremi için %85 (Şekil 15) olarak hesaplanmıştır. Görel kat ötelenmesi taleplerinin düzensiz yapıda, düzenli yapıya kıyasla Chi Chi depremi için %51 (Şekil 8), Kobe depremi için %25 (Şekil 10), Northridge depremi için %105 (Şekil 12), Loma Prieta depremi için %74 (Şekil 14) ve Kocaeli depremi için %107 (Şekil 16) arttığı hesaplanmıştır. Ayrıca düzenli yapıda bütün depremler için görel kat ötelenmelerinin DBYBHY [10]’de verilen 0.02 ve TBDY [11]’de verilen  $0.008 \times DD-2 / DD-3$  (yaklaşık olarak 0.02) sınır değerlerini aşmadığı tespit edilmiştir. Öte yandan düzensiz yapıda Loma Prieta, Northridge ve Kocaeli depremlerinde görel kat ötelenmesi sınır değerinin aşıldığı görülmektedir.



Şekil 6 - Kuvvetli yer hareketleri tepki spektrumları

Tablo 3 - Çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketleri

Kayıt	İstasyon	Yılı	Şiddeti	Orjinal		Ölçekli	
				PGA (g)	PGV (mm/s)	PGA (g)	PGV (mm/s)
Chi-Chi	TCU045	1999	7.62	0.361	215.48	0.498	484.33
Kobe	CUE90	1995	6.9	0.345	276.78	0.349	276.39
Northridge	CDMG090	1994	6.69	0.568	518.27	0.370	438.46
Loma Prieta	CDMG090	1989	6.93	0.367	446.95	0.344	467.54
Kocaeli	KOERI330	1999	7.51	0.349	621.82	0.438	589.72

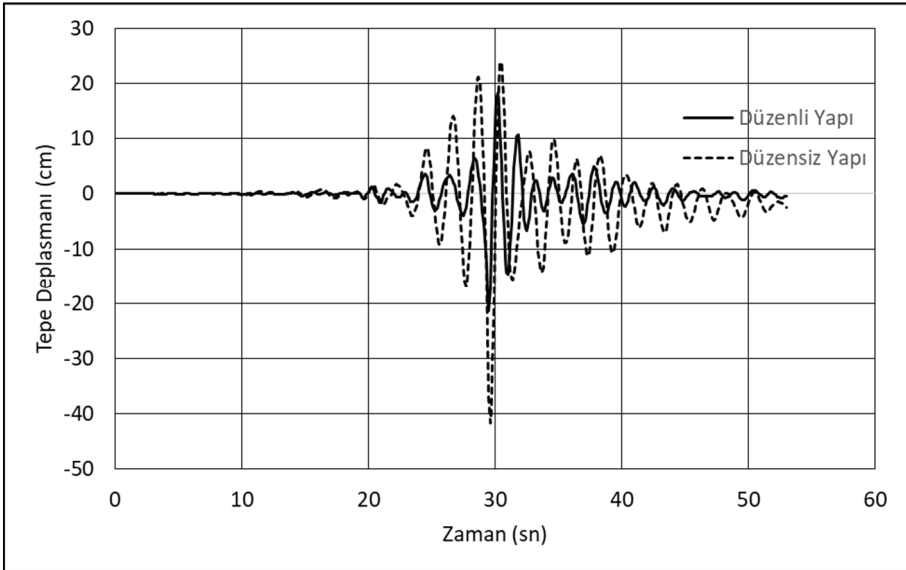
DBYBHY [10] ve TBDY [11]'de kirişsiz döşemeli sistemlerin süneklik düzeyi sınırlı sistemler olarak dikkate alınması öngörülmektedir. Kirişsiz döşemeli sistemlerde oluşabilecek şekildeğışirmeleri sınırlamak için betonarme perde kullanımı zorunlu kılınmıştır. Fakat zaman tanım aralığında doğrusal olmayan analizler neticesinde plandaki yerleşimlerine dikkat edilmediği takdirde perdelerin, şekildeğışirme taleplerini sınırlamak hususunda yetersiz kalabileceği görülmektedir.

Her bir deprem durumuna karşılık gelen plastik mafsalları elde edilmiş, kolon, perde ve eşdeğer döşeme kirişleri için ayrı ayrı Tablo 4'de verilmiştir. DD-2 Düzeyine ölçeklenmiş deprem yer hareketleri altında düzenli yapıda kontrollü hasar performans seviyesini aşan yapısal eleman bulunmamaktadır. Düzenli yapıda kontrollü hasar performans hedefine ulaşılmıştır.

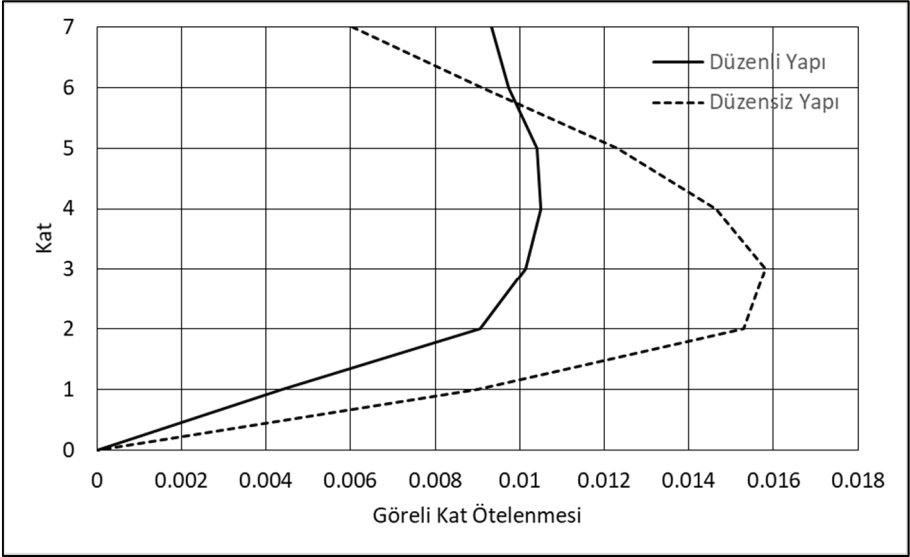
Tablo 4 - DD-2 Düzeyi Deprem Yer Hareketlerine Karşılık Gelen Plastik Mafsal Oluşumları

Güçlü Yer Hareketi	Betonarme Eleman	Düzenli Yapı			Düzensiz Yapı			Toplam
		SH-KH	KH-GÖ	>GÖ	SH-KH	KH-GÖ	>GÖ	
Loma Prieta	Kolon	35	0	0	32	0	14	224
	Perde	4	0	0	4	0	0	28
	Eşdeğer D. K.	154	0	0	149	9	0	434
Northridge	Kolon	16	0	0	36	0	12	224
	Perde	4	0	0	4	0	0	28
	Eşdeğer D. K.	96	0	0	113	14	0	434
Kobe	Kolon	15	0	0	19	0	7	224
	Perde	4	0	0	2	0	0	28
	Eşdeğer D. K.	113	0	0	104	0	0	434
Chi Chi	Kolon	16	0	0	43	0	9	224
	Perde	4	0	0	0	0	0	28
	Eşdeğer D. K.	108	0	0	111	0	0	434
Kocaeli	Kolon	17	0	0	37	0	14	224
	Perde	4	0	0	3	0	0	28
	Eşdeğer D. K.	98	0	0	148	12	0	434

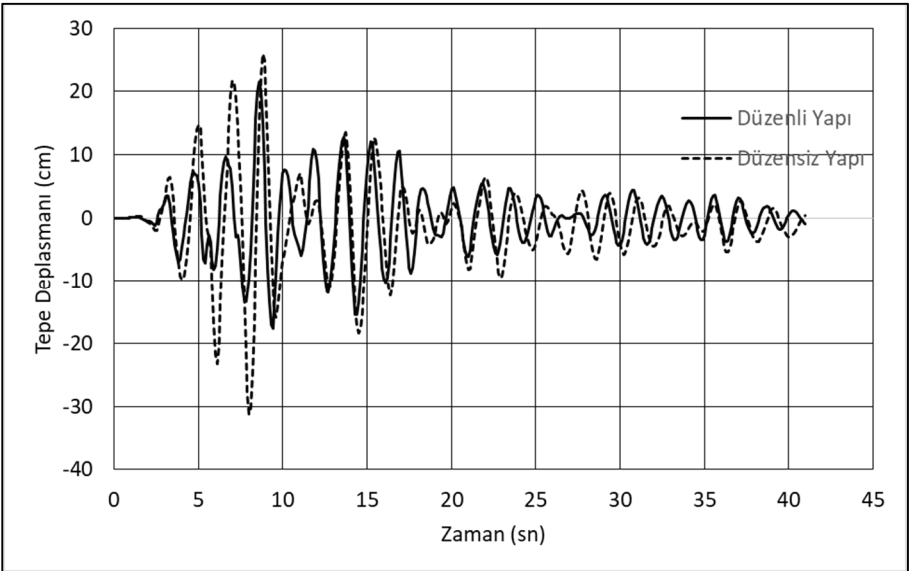
SH: Sınırlı Hasar, KH: Kontrollü Hasar, GÖ: Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyleri



Şekil 7 - Tepe yerdeğiştirmesi – Chi Chi

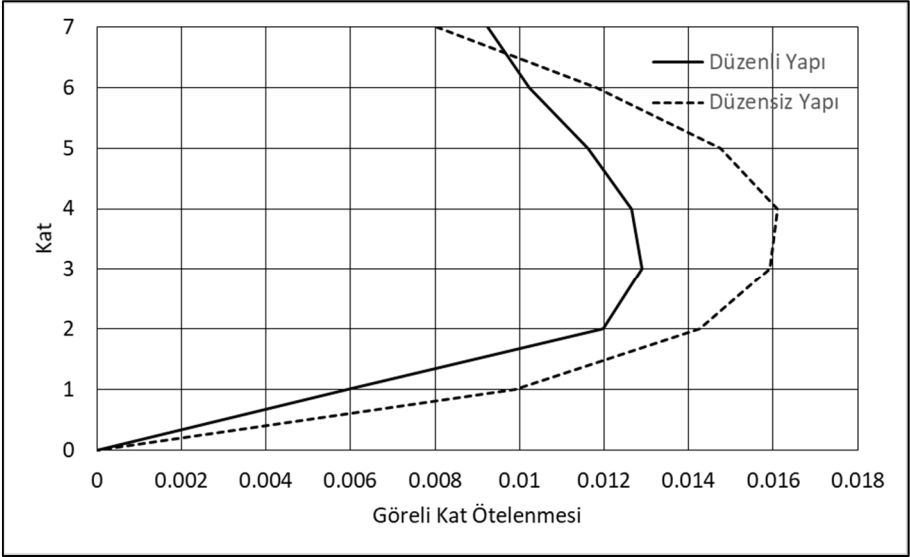


Şekil 8 - Görelî kat ötelenmesi – Chi Chi

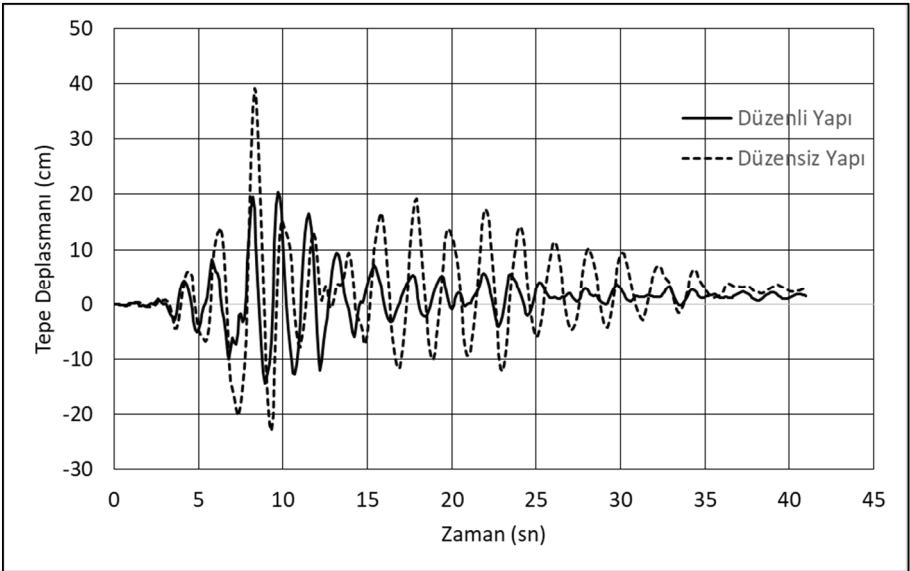


Şekil 9 - Tepe yerdeğıştirmesi – Kobe

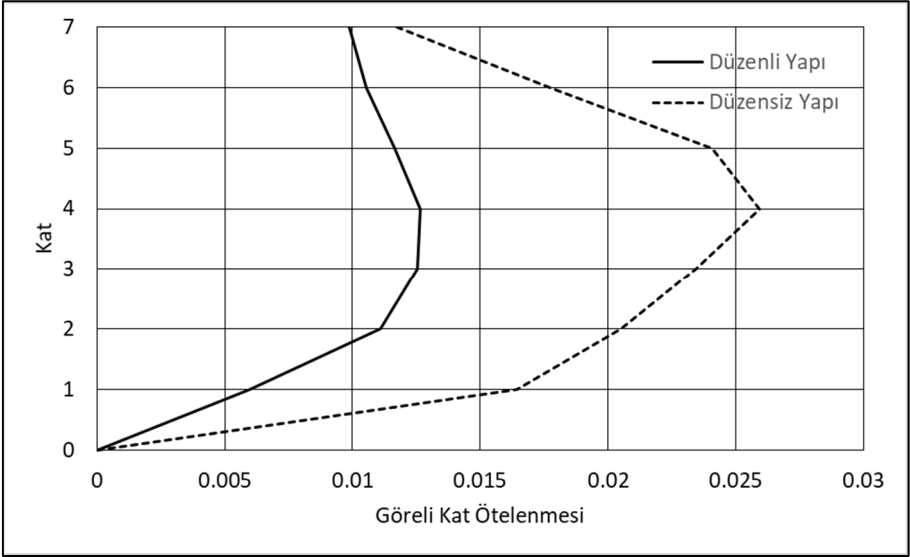




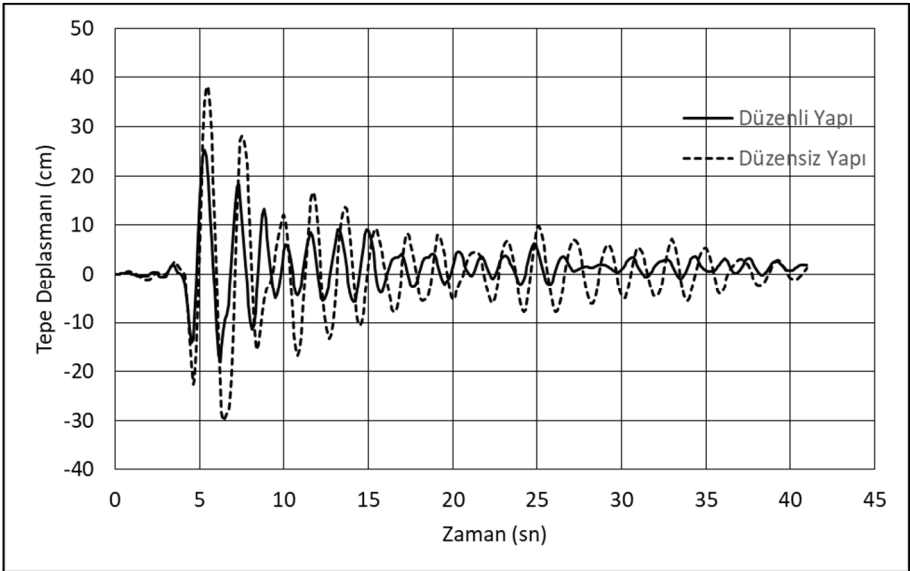
Şekil 10 - Göreli kat ötelenmesi – Kobe



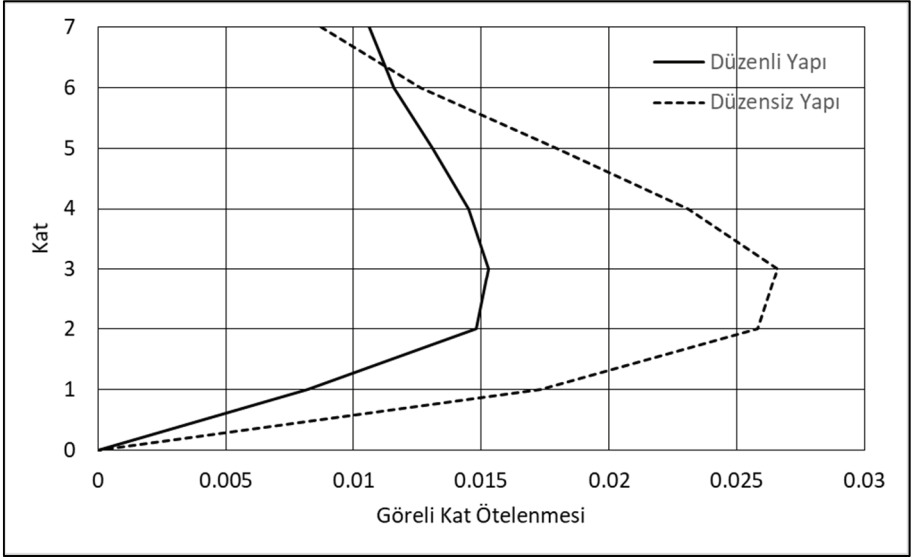
Şekil 11 - Tepe yerdeğiştirmesi – Northridge



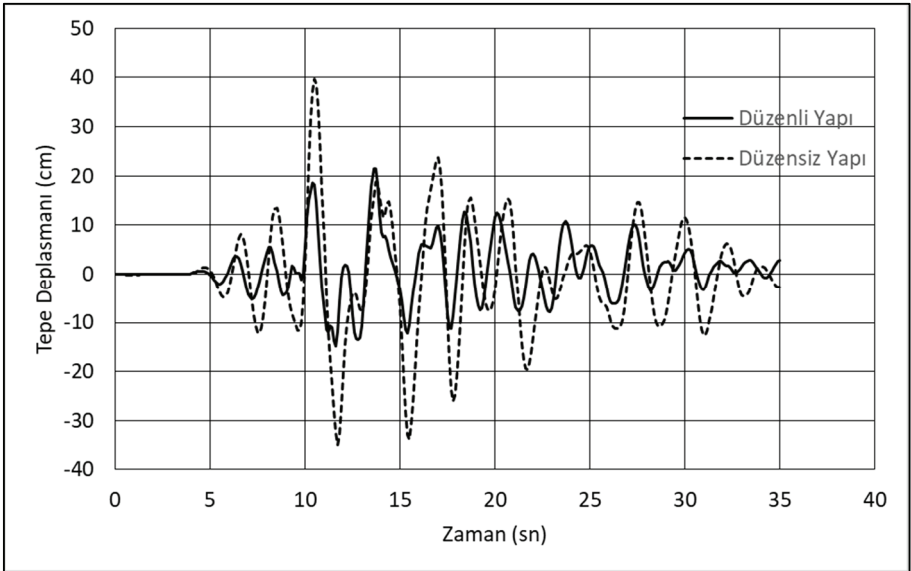
Şekil 12 - Görelî kat ötelenmesi – Northridge



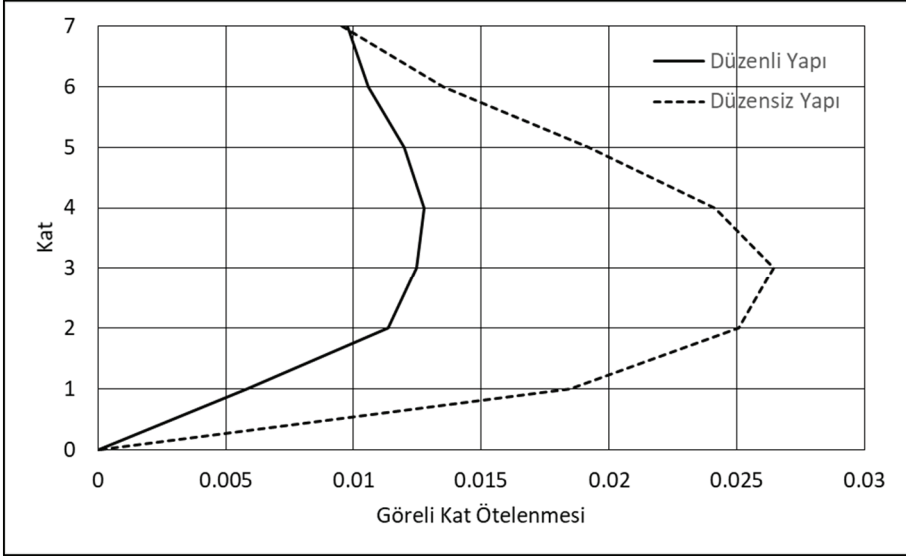
Şekil 13 - Tepe yerdeğıştirmesi – Loma Prieta



Şekil 14 - Görelî kat ötelenmesi – Loma Prieta



Şekil 15 - Tepe yerdeğiştirmesi – Kocaeli



Şekil 16 - Görelî kat ötelenmesi - Kocaeli

DD-2 Düzeyine ölçülenmiş deprem yer hareketleri altında düzensiz yapıda kontrollü hasar performans seviyesini aşan eşdeğer döşeme kirişleri bulunmaktadır. Kirişsiz döşemelerde sargı donatısı bulunmadığı için akma sonrası birim şekil değiştirme kapasitesinin oldukça sınırlı kalacağı ve buna bağlı olarak güç tükenmesin erken gerçekleşeceği beklenmelidir. Bu elemanlar tasarım yükleri altında yeterli zımbalama dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanmalarına rağmen deprem sırasında kontrollü hasar sınırının ötesinde birim şekil değiştirmelere maruz kaldıklarında sargısız betonda meydana gelebilecek hasarların zımbalama riski oluşturabileceği unutulmamalıdır. Düzensiz yapıda ayrıca göçmenin önlenmesi performans seviyesini aşan kolonlar bulunduğu tespit edilmiştir. Bu kolonlar yapıda burulma etkisinin en çok hissedildiği 4 ve 5 eksenlerinde konumlanmışlardır. Burulma ve ikinci mertebe etkilerine bağlı olarak bu kolonlarda özellikle alt katlarda aşırı birim şekil değiştirmeler gözlenmektedir. Göçmenin önlenmesi performans seviyesini aşan kolonlarda ileri düzeyde hasarlar oluşacağı ve bu durumun yapıda kısmi göçmelere sebebiyet vereceği beklenmelidir. Deprem yer hareketlerinin hepsinde göçmenin önlenmesi performans seviyesinin düzensiz yapıda aşıldığı görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, perdelerin plandaki yerleşiminin kirişsiz döşemeli yapıların deprem performansına olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla kirişsiz döşemeli 7 katlı iki betonarme yapı tasarlanmıştır. Perdelerin ve kolonların kesit boyutları, detayları ve miktarları her iki yapıda aynıdır. Perdelerin plandaki yerleşimleri yapılardan birinde burulma düzensizliği yaratmayacak şekilde simetrik (düzenli yapı), diğesinde ise burulma düzensizliği yaratacak şekilde (düzensiz yapı) seçilmiş ve her iki yapının deprem performansı doğrusal olmayan artımsal itme analizleri ve doğrusal olmayan zaman tanım aralığında analizler ile

irdelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen düzenli ve düzensiz iki yapının analiz sonuçlarına göre elde edilen bulgular ve değerlendirmeler sunulmuştur.

Perdeler planda burulma düzensizliği yaratmayacak şekilde yerleştirildiğinde, perdelerin gerekli yanal rijitliği ve dayanımı sağladığı ve yapının kontrollü hasar performans düzeyinde olduğu görülmektedir. Öte yandan perdelerin plandaki yerleşimleri yapıda burulma düzensizliği yaratacak biçimde seçilir ise perdelerin yatay taşıyıcı sistem içindeki etkinliği azalmakta ve sismik yükler sünekliği sınırlı olan kolon-kirişsiz döşeme taşıyıcı sistemi tarafından daha fazla üstlenilmektedir. Bu durumda burulma ve ikinci merteye etkilerine bağlı olarak kolonlarda göçmenin önlenmesi performans seviyesinin üzerinde birim şekildeğiştirmeler gözlemlenmiştir. Kirişsiz döşeme elemanlarında kontrollü hasar sınırının üzerinde birim şekildeğiştirmeler oluştuğu tespit edilmiştir. Düzensiz yapıda kontrollü hasar performans seviyesi sağlanamamakla birlikte göçmenin önlenmesi performans seviyesi aşılmıştır. Örneklem sayısı kısıtlı ve limit bir durumu temsil etmekle beraber kirişsiz döşemeli sistemler için düzensiz yapıda yönetmeliğin tarif ettiği tasarım sınırlarının güvenli bölgenin dışına çıkabileceği görülmektedir.

TBDY [11] 4.3.4.6 maddesine göre süneklik düzeyi sınırlı bir taşıyıcı sistem süneklik düzeyi yüksek perdeler ile birlikte düzenlenerek süneklik düzeyi karma bir sistem olarak yapılır ise perde devrilme momentleri toplamının yapı devrilme momentine oranı %75'i geçmelidir. Öte yandan TBDY [11] 4.3.4.4 maddesine göre sadece kirişsiz döşemeleri içeren taşıyıcı sistemlerde deprem etkilerinin tamamının perdeler tarafından karşılanması istenmektedir. Bu şartı sağlamak için de hesapta çerçeve kolonlarının alttan ve üstten mafsallı alınması istenmektedir. TBDY[11] 4.3.4.6 maddesindeki koşul rijitlik ile ilgili iken TBDY [11] 4.3.4.4 maddesindeki koşul dayanım ile ilgilidir. Buna göre kirişsiz döşemeli sistemlerde perde donatılarını üst limitlere yaklaştırarak daha küçük ebatlarda ve sayıca daha az perde kullanarak bir tasarım gerçekleştirmek mümkündür. Bu durum yapıda daha az yanal rijitliğe ve kolon-kirişsiz döşeme sisteminde daha büyük şekildeğiştirmelere sebebiyet verecektir. Göreli kat ötelenmesi limitleri ile davranış sınırlandırılmakla beraber bu limitlerin yapıların süneklik düzeylerinden bağımsız olduğu ve esnek bağlantılı cephe elemanları kullanılması durumunda iki kat arttığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Doğrusal olmayan analiz sonuçları detaylı incelendiğinde, düzensiz yapıda perde ekseninden uzaklaşan eksenlerde performans yetersizlikleri tespit edilmiştir. Perdeler dış eksenlerdeki yerdeğiştirmeleri yeterince engelleyememiş, bunun neticesinde rijitliği ve sünekliği sınırlı kolon-kirişsiz döşeme sisteminde performans limitlerinin ötesinde şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular yapıda gözlemlenen olumsuzlukların burulma düzensizliğinin mertebesi ile ilintili olduğuna işaret etmektedir hâlbuki burulma düzensizliği TBDY'de sadece hesap yönteminin seçiminde etkili olan bir düzensizliktir, tasarımla ilgili bir sınırlama getirmemektedir. Yapı performans seviyeleri ve burulma düzensizliği arasındaki etkileşimin bir sınır değer belirlenebilmesi açısından teorik/deneysel kapsamlı bir çalışma programı ile incelenmesinin yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

## Semboller

D :Dayanım fazlalığı katsayısı

DD-2 :50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

DD-3	:50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
$f_y$	:Yapının orta hasar sınırına karşılık gelen dayanımı
$f_d$	:Yapının hafif hasar sınırına karşılık gelen dayanımı
G	:Sabit yükler
GÖ	:Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi
H	:Çalışan doğrultudaki kesit boyutu
KH	:Kontrollü Hasar Performans Düzeyi
$L_p$	:Plastik şekil değiştirme bölgesinin boyu
Q	:Hareketli yükler
R	:Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
$S_{D1}$	:1.0 s Periyot için Tasarım Spektral İvme Katsayısı
$S_{DS}$	:Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
SH	:Sınırlı Hasar Performans Düzeyi
$\alpha_s$	:Perde devrilme momentleri toplamının yapı devrilme momentine oranı
$\delta_u$	:Orta hasar sınırı yerdeğiştirme değeri
$\delta_y$	:Göçme sınırı yerdeğiştirme değeri
$\epsilon_s$	:Donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi
$\epsilon_c$	:Beton birim şekildeğiştirmesi
$\eta_{bi}$	:Burulma Düzensizliği Katsayısı
$\mu$	:Yatay yerdeğiştirme cinsinden süneklik kapasitesi

### **Kaynaklar**

- [1] Dogangün, A., Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, İstanbul. Birsen, 2008.
- [2] Mulcahy, J.F., Rotter, J.M., Moment rotation characteristics of flat plate and column systems. ACI Structural Journal, 80(2), 85–92, 1983.
- [3] Chow, H.L., Selna, L.G., Seismic response of nonductile flat plate buildings. ASCE Journal of Structural Engineering, 121(1), 115–23, 1995.
- [4] Hwang, S., Moehle, J. Vertical and lateral load tests of nine-panel flat-plate frame. ACI Structural Journal, 97, 193–203, 2000.
- [5] Erberik, M.A., Elnashai, A.S., Fragility analysis of flat-slab structures. Engineering Structures 26(7), 937-948, 2004.
- [6] Coelho, E., Candeias, P., Anamateros, G., Performance of ductile RC flat slab to steel column connections under cyclic loading. Engineering Structures, 36, 239–57, 2011.

- [7] Almeida, A.F.O., Inácio, M.M.G., Lúcio, V.J.G., Ramos, A.P., Punching behaviour of RC flat slabs under reversed horizontal cyclic loading. *Engineering Structures*, 117, 204–219, 2016.
- [8] Sable, K.S., Ghodechor, N.A., Kandekar, S.B., Comparative Study of Seismic Behavior of Multistory Flat Slab and Conventional Reinforced Concrete Framed Structures. *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, 2(3), 17-26, 2012.
- [9] Lande, P.S., Raut, A.B., Seismic Behavior of Flat Slab System. *Journals of Civil Engineering and Environmental Technology*, 2(10), 7-10, 2015.
- [10] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Türkiye, 2007.
- [11] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Türkiye, 2018.
- [12] Celep, Z., *Betonarme Yapılar*, İstanbul. Beta, 2009.
- [13] Bayülke, N., *Depreme Dayanıklı Betonarme ve Yığma Yapı Tasarımı*, İzmir. İMO İzmir Şubesi, 2001.
- [14] BS 8110, *Structural use of concrete, part 1: code of practice for design and construction*, British Standards Institution, United Kingdom, 1997.
- [15] ACI 318-11, *Building code requirements for structural concrete*, American Concrete Institute, United States, 2011.
- [16] TS 500, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Türkiye, 2000.
- [17] Macgregor, J.G., *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, New Jersey. Prentice-Hall, 1988.
- [18] ASCE 41-13, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, United States, 2014.
- [19] Hwang, S.J., Moehle, J.P., Models for laterally load slabcolumn frames. *ACI Structural Journal*, 97, 345–353, 2000.
- [20] Dovich, L.M., Wight, J.K., Effective slab width model for seismic analysis of flat slab frames. *ACI Structural Journal*, 102(6), 868–875, 2005.
- [21] ETABS 16, *Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems*, Computers and Structures Inc., Berkeley, United States, 2016.
- [22] Bozer, A., Effect of modelling parameters on non-linear seismic response of concrete structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 170(12), 901-916, 2017.
- [23] Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, New Jersey. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [24] Uçar, T., Düzgün, M., *Betonarme Binalar İçin Artımsal İtme Analizi Esaslı Analitik Hasargörebilirlik Eğrilerinin Oluşturulması*. *Teknik Dergi*, 24(3), 6421-6446, 2013.
- [25] PEER, *Ground Motion Database*, University of California, Berkeley, United States, 2015. <http://ngawest2.berkeley.edu>





# Ampirik Potansiyel Evapotranspirasyon Tahmin Yöntemlerinin Değerlendirilmesi: Uygulama Konya Kapalı Havzası

Nermin ŞARLAK<sup>1</sup>  
Soner Çağatay BAĞÇACI<sup>2</sup>

## ÖZ

Evapotranspirasyon, hidrolojik çevrimde kritik bir rol oynar. Ancak havza ve tarla ölçeğinde miktarının tahmini zordur. Bilim insanları, bu konuyu incelemek amacıyla yaygın erişilebilir ölçülmüş değişkenlere dayanan tahminler sağlayan ampirik denklemler geliştirmişlerdir. Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Makkink, Turc, Priestley-Taylor ve Hargreaves-Samani adlı altı ampirik yöntemin performansları, Konya Kapalı Havzası'ndaki beş istasyondan alınan günlük meteorolojik veriler kullanılarak FAO-56 Penman-Monteith yöntemi ile karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Turc, Hargreaves-Samani ve Priestley-Taylor yöntemlerinin FAO-56 Penman-Monteith'e alternatif olarak ön plana çıktığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sulama sezonu dikkate alındığında Turc, altı yöntemden en iyisi olmuştur. Sadece günlük sıcaklık verisine ihtiyaç duyan Hargreaves-Samani yönteminin bölge özelindeki performansının yadsınamayacak derecede başarılı olduğu vurgulanması gereken bir diğer noktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Evapotranspirasyon, ampirik yöntemler, Konya Kapalı Havzası.

## ABSTRACT

### The Assesment of Empirical Potential Evapotranspiration Methods: A Case Study of Konya Closed Basin

Evapotranspiration plays a critical role in hydrologic cycle. However, it is difficult to estimate its quantification at basin and arable land scales. Scientists have developed array of empirical equations that provide estimates of it based on more readily measured quantities in order to analyze this issue. The performance of six empirical methods namely Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Makkink, Turc, Priestley-Taylor and Hargreaves-Samani were

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 20 Mart 2018 günü ulaşmıştır. 2 Ocak 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.408019

1 Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman - nsarlak@kmu.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0003-3632-2725>

2 Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman - scbagcaci@kmu.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-2673-0234>

discussed comparing with FAO-56 Penman-Monteith method using daily meteorological data obtained from five stations in Konya Closed Basin. The results showed that Turc, Hargreaves-Samani ve Priestley-Taylor methods have come into prominence as an alternative to FAO-56 PM. Furthermore, Turc was best among the six methods when the irrigation season was considered. Another point to be emphasized is that the performance of Hargreaves-Samani method, which only needs daily temperature data, was undeniably successful in this region.

**Keywords:** Evapotranspiration, empirical method, Konya Closed Basin.

## 1. GİRİŞ

Hidrolojik çevrimin ölçülmesi en zor bileşeni olan Evapotranspirasyon (ET), terleme ile birlikte toprak, bitki örtüsü ve açık su yüzeyi bulunan alanlardan kaybolan toplam su miktarı olarak tanımlanmaktadır. Su kaybı bitki yüzeyinden terleme (transpirasyon), toprak ve açık su yüzeylerinden doğrudan buharlaşma yoluyla olmaktadır. Terleme bitkinin fotosentez yapabilmesi için gerekli olan karbondioksiti atmosferden temin ederken stomasını açtığı zaman maruz kaldığı bedel veya ceza olarak düşünülebilir [1]. Her iki su kaybını birbirinden ayırmak zor ve gereksiz olduğundan evapotranspirasyon terimi altında birleştirilmişlerdir.

Karasal alana düşen yağışın yaklaşık %62'sinin ET yoluyla atmosfere geri döndüğü tahmin edilmektedir [2]. Tartışmaya yer bırakmayan sıcaklıktaki küresel artışın toplam su kayıplarına etkisi ancak en doğru şekilde tahmin edilen ET miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olabilecektir. Tarla ölçeğinde bakıldığında ise, bitki su tüketiminin (sadece bitki kaplı yüzeylerden olan buharlaşma, terleme ve bitki tarafından kullanılan su) belirlenmesi geliştirilen toprak-su kaynakları projelerinin başarı temeli sayılmaktadır.

Gerek havza ölçeğinde gerekse tarla ölçeğinde bu kadar önemli olan toplam su kaybının ölçülmesi maddi olarak çok büyük yük teşkil etmekle birlikte, fiziki şartlar açısından da oldukça zordur. Buna karşılık, ET tahmini için günümüze kadar çok sayıda yöntem ve model geliştirilmiştir. Söz konusu çalışmalar deneysel, mikro-meteorolojik ve ampirik olarak üç başlık altında toplanabilir. Deneysel çalışmalarda tartılamayan ve tartılı lizimetre kullanılmaktadır. Uygulanması fiziksel açıdan zor ve pahalı olmasının yanı sıra, değişen arazi yapısındaki heterojenliklerden kaynaklı olarak birçok lizimetre düzeneği gerektirmesi ve sonuçlarının yerel olması yöntemin kısıtlamaları olarak sunulmaktadır [3, 4]. Buharlaşma tavaşı ile ET'nin ölçülmesi de deneysel yöntem olarak kabul edilebilir. Tavanın bulunduğu konuma ve bu konumun iklim özelliklerine bağlı birtakım katsayılarla çarpılarak potansiyel evapotranspirasyon (PET) hakkında çıkarımlar yapılabilmektedir [5]. Bu işlem ise lizimetreye göre daha az maliyetli olmasına rağmen arazideki veya daha büyük su kütlelerindeki buharlaşmaları tam olarak temsil edememektedir. Bowen oranı enerji dengesi, Eddy-Kovaryans ve Aerodinamik gibi mikro-meteorolojik yöntemler difüzyon yasasına dayanır. Yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona hareket eden türbülanslı bir ortamdaki gaz molekülünün (CO<sub>2</sub> veya H<sub>2</sub>O gibi), rüzgâr hızının ve hava sıcaklığının düşey değişimini dikkate almaktadırlar [2]. Nem, sıcaklık ve düşey hız değişimlerini yüksek frekansta (10 s<sup>-1</sup>) bir araya getirip kayıt edebilme kapasitesine sahip sensörler kullanıldığında hız profili veya atmosferik denge hakkında varsayımlarda bulunmaya gerek kalmıyacağından, bu yöntemlerden tahmin edilen ET değerleri doğru kabul edilmektedirler. Ancak, pahalı olmaları ve genellikle araştırma yapmak için seçilen nispeten

daha küçük alanlar (1-2 hektar) için kullanılmaları yöntemlerin tercih edilebilirliğini kısıtlamaktadır. Son zamanlarda gelişen uydu teknolojileriyle birlikte, uzaktan algılama yöntemleriyle havza bazında gerçekleşen ET'nin miktarları tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Fakat bu yöntemlerle alınan ölçümler arasındaki zaman adımlarının fazla olması, elde edilen uydu görüntülerinin çözünürlüğünün düşük olması ve bulutluluk, toz fırtınaları gibi atmosferik olayların kızılötesi ölçümlerini imkânsız hale getirmesi bu yöntemlerin kullanılabilirliklerini azaltmaktadır [6]. Bu sebeplerden dolayı özellikle son 60-70 yıl içinde kütle-transferi, enerji dengesi ve her ikisinin beraber göz önüne alındığı yaklaşımlar ile meteorolojik gözlem verilerinden türetilen denklemler kullanılarak, PET'un tahmin edilmesi için ampirik yöntemler geliştirilmiştir [7]. Literatürde en çok kullanılan ampirik yöntemlerden Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hamon, Romanenko, ve Hargreaves sıcaklık değişkeni temelli; Makkink, Jensen-Haise, Priestly-Taylor, Doorenbos ve Pruitt ve Abtew radyasyon değişkeni temelli; Turc ve Hargreaves-Samani sıcaklık ve radyasyon değişkeni temellidir. Enerji bütçesi ve kütle-transferi (aerodinamik) denklemlerin kombinasyonuna dayalı açık yüzey buharlaşma denklemi Penman tarafından 1948 yılında geliştirilmiştir. Dünyanın pek çok yerinde yapılan çalışmalar geliştirilen denklemin açık yüzey buharlaşma tahmininde oldukça başarılı sonuçlar verdiğini gösterdiğinden, denklem bazı sabiteler kullanılarak bitki kaplı yüzeylerde de kullanılması için uyarlanmaya çalışılmıştır. Penman-Monteith (PM) bu çalışmalardan ilkidir [8]. Denklem enerji değişimine ve buna karşılık tekdüze bitki yüzeyinden oluşan gizli ısı akısına (evapotranspirasyon) neden olan tüm parametreleri içermektedir [5]. Priestley ve Taylor, PM denklemini bazı değişkenlerinin etkisini bünyesine alan  $\alpha(=1.26)$  katsayısı ile basitleştirmeye çalışmışlardır [9]. FAO-56 PM denklemi ise, referans bitki yüzeyinden oluşan ET'nin tahmini için geliştirilmiştir [5]. Lemeur ve Zhang, FAO-56 PM yöntemini Çin'de çorak iklim bölgesindeki Xinjiang nehir havzasına uygulamışlar ve su dengesi yaklaşımı ile elde ettikleri gerçek ET değerlerine en yakın sonuçların bu yöntemden elde edildiğini vurgulamışlardır [10]. Lopez-Urrea ve ark., İspanya'nın yarı-çorak iklim bölgesinde yer alan Albacete şehrinde tartılı lizimetre düzeneğinden ve zirai-meteoroloji istasyonundan aldıkları veriler ile yaptıkları çalışmada FAO-56 PM'in en doğru sonuç veren yöntem olduğunu ifade etmişlerdir [11]. Son on yıldan daha uzun süredir farklı bölgelerdeki kısa-yeşil-çim yüzeylerde değerlendirilen FAO-56 PM yöntemi, ölçüm değerlerine en yakın sonuçları tahmin edebilme kapasitesinden dolayı evrensel olarak standart PET yöntemi olarak kabul edilmektedir [2, 12].

Evapotranspirasyon konusunda geçmişten günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, son yıllarda yapılan çalışmaların bazılarını üç grup altında değinilmiştir. Birinci grup çalışmalar, deneysel çalışmalardan gözlemledikleri veya referans olarak kullandıkları FAO-56 PM yöntemi ile daha az değişkene ihtiyaç duyan ampirik yöntemlerden hesapladıkları ET değerlerini kıyaslayarak çalışma alanları için en iyi tahmin yapan ama aynı zamanda daha az değişkene ihtiyaç duyan yöntemi önerme kaygısı taşımaktadırlar [3, 7, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. İkinci grup çalışmalar, uydu verilerini kullanılarak gerçek ET tahmin etme üzerinedir [23, 24, 25]. Üçüncü grup çalışmalarda ise yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi yapay zekâ modelleri ile ampirik denklemler kıyaslanmış ve yapay zekâ modellerinin başarıları öne çıkarılmıştır [26, 27, 28]. Son zamanlarda gözlemlenen güneş radyasyonu ölçüm değerlerinde azalma (havadaki değişen partiküler madde konsantrasyonu, bulutluluk miktarının artması, rüzgâr hızının azalması gibi etmenlerden kaynaklanabilir), sıcaklık ve atmosferdeki CO<sub>2</sub> miktarındaki artış ve ormanların yok olması buna karşılık şehirleşmenin artması ve sulak alanların azalması ile değişen arazi kullanımının çalışma

alanları üzerindeki etkileri değişkenlik arz edeceğinden, ET'nin daha az değişken ile doğru tahmin edilme çabalarının devam etmesi kaçınılmazdır.

Bu çalışmada, ülkemizde tarıma önemli katkılar vermesine rağmen, ülke ortalamasının yarısı kadar yağış alan Konya Kapalı Havzasında oluşan evapotranspirasyonun potansiyel miktarı ampirik yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılacaktır. Bu kapsamda yukarıda vurgulanmaya çalışıldığı gibi, verdiği sonuçların doğruluğu dünyanın farklı iklim tiplerine sahip birçok bölgesinde test edilmiş FAO-56 PM metodu ile ölçülmüş veri ihtiyacı daha az olan Blaney-Cridde, Jensen-Haise, Makkink, Turc, Priestley-Taylor ve Hargreaves-Samani yöntemlerinin bölge özelinde PET tahmin performansları değerlendirilmiştir. Konya Kapalı Havzası iklim koşullarına uygun bölgelerden türetilmemiş olan ampirik yöntemler, literatürde en çok rastlanılan yöntemler olmaları sebebiyle çalışmaya dahil edilmişlerdir.

## 2. ÇALIŞMA SAHASI

Konya Kapalı Havzası, İç Anadolu Bölgemizde 36°51' ve 39°29' kuzey enlemleri ile 31°36' ve 34°52' doğu boylamları arasında yer almaktadır. 5,5 milyon hektarlık yüzölçümü ile Türkiye'nin yaklaşık %7'sini teşkil eden havza, Türkiye'nin tahıl ambarı olarak bilinmektedir. Aksaray, Karaman, Konya, Niğde illerinin merkezleri ve bu illere bağlı olan ilçelerin yanı sıra Ankara, Antalya, Isparta, Mersin, Nevşehir illerine bağlı ilçelerin bir kısmı da havza sınırı içerisinde yer almaktadır. Yarı çorak iklim özelliklerine sahip olan havzaya, yıllık ortalama olarak yaklaşık 315 mm yağış düşmekte ve ortalama sıcaklıklar yine yıllık bazda -0,4°C ile 23°C arasında değişmektedir [29, 30]. Havza, ülkemizde kullanılabilir yüzey suyu kaynaklarının %2'sini, yeraltı suyu kaynaklarının ise yaklaşık %17'sini bünyesinde barındırmakta ve havzadaki toplam yıllık kullanılabilir su kaynağının yaklaşık %90'ı tarımsal sulama için harcanmaktadır [30].

Çalışmada kullanılan minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık (°C), toplam global güneş radyasyonu (cal/cm<sup>2</sup>), ortalama rüzgâr hızı (m/s) ve ortalama nispi nem (%) günlük verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Çizelge 1'de belirtilen gözlem istasyonlarından temin edilmiştir.

*Çizelge 1 - Seçilen meteorolojik gözlem istasyonlarının yeri ve karakteristik özellikleri*

İstasyon Adı	İstasyon No	Enlem	Boylam	Rakım	Çalışma Periyodu
Aksaray	17192	38,37	34	970	2000-2015
Ereğli	17248	37,53	34,05	1046	2000-2010
Karaman	17246	37,19	33,22	1018	2000-2014
Karapınar	17902	37,71	33,53	996	2000-2010
Niğde	17250	37,96	34,68	1211	2000-2010,2013-2015

Meteorolojik gözlem istasyonlarının 2000-2015 yılları arası verileri temin edilmiş olmasına rağmen, bazı değişkenlerde önemli derecede eksik veri bulunduğundan hesaplamalara dâhil edilememiştir. Aksaray istasyonu 2004 yılı Ekim ve 2008 yılı Nisan aylarında; Ereğli

istasyonu 2000 yılı Mart ayında günlük toplam global güneş radyasyonu ölçümleri bulunmadığından, hesaplamalarda kullanılmamıştır. Niğde istasyonu 2011-2012 yıllarında; Ereğli ve Karapınar istasyonlarında ise 2011-2015 yılları arasında günlük toplam global güneş radyasyonu ölçümleri bulunmadığından bu yıllardaki veriler hesaplamalara dahil edilememişlerdir. Karaman istasyonunda ise 2015 yılında, günlük ortalama rüzgâr hızı ölçümlerinin %35'i eksik olduğundan bu yıldaki hiçbir veri hesaplamalarda kullanılmamıştır. Kalan dönemlerdeki eksik veriler, bütün gözlem istasyonları için toplam ölçümlerin %15'ini geçmediğinden, çalışılan ayın kalan günlerindeki gözlem verilerinin ortalaması alınarak tamamlanmıştır. Konya H. istasyonu verisi çalışmaya dahil edilmek istenmiş ancak verisindeki eksikliklerin fazla olmasından dolayı çalışmaya dahil edilememiştir. Kullanılan verilerin güvenilirliğini ölçmek için parametrik olmayan Kruskal-Wallis testi uygulanmış ve verilerin %95 önem seviyesinde homojen olduğu saptanmıştır.

### 3. YÖNTEM

#### Blaney-Criddle (BC)

1942 yılında Blaney ve Morin tarafından önerilmiş ve en son 1952 yılında Blaney ve Criddle tarafından uyarlanarak bilinen halini almıştır [31]. Önerilen bitki su tüketim miktarı ( $v$  (aylık)= $kf$  ve  $V$  (mevsimlik)=toplam  $kf=KF$ ) bitki su tüketim katsayılarının ( $k$ ) elde edilmesi için geliştirilmiştir. Bitki su tüketim miktarını doğru bir şekilde belirlemede göz önüne alınması gereken pek çok faktör bulunmasına rağmen, Blaney ve Criddle sıcaklık ve güneşlenme (foto peryot) süresinin bitki büyümesinde etkili olan en önemli iklim faktörü olduğunu belirtmişlerdir. Bitki su tüketiminin fotosentez yapabilme şansı ile değiştiği bilindiğinden, enlem ile değişen güneşlenme süresinden hesaplanan yıllık gündüz saatlerinin aylık yüzdesi ( $p$ ) geliştirilen denkleme dahil edilmiştir. Sonuç olarak ET tahmin etmek için geliştirilen denklemde sıcaklık, gün uzunluğu ve kaynağına bakılmaksızın (yağış, sulama suyu veya yeraltı suyu olabilir) mevcut su muhtevası değişkenleri kullanılmıştır. Aylık iklim parametresi,  $f$  aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır:

$$f=T*p/100 \quad (1)$$

eşitlikte  $T$  ortalama aylık sıcaklık ( $^{\circ}C$ ),  $p$  ise yıllık gündüz saatlerinin aylık yüzdesidir. Yöntemde yeterli su bulunduğu kabulü ile bitki su tüketiminin bu parametre ile doğru orantılı olarak değiştiği varsayılmıştır. Bir diğer varsayım da toprak veriminin her yerde aynı olduğudur. Metrik birim sisteminde denklem aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$v=kp\left(\frac{45.7T+813}{100}\right) = \text{aylık tüketim miktarı (mm)} \quad (2)$$

Amprik olarak belirlenmiş bitki su tüketim katsayısı ( $k$ ) kullanıldığında, yetiştiği ortamda söz konusu bitki için toplam su tüketim miktarı belirlenebilmektedir. Yöntem basit olmasına karşın, pek çok araştırmacı tarafından çorak (nemli) bölgelerde ölçülmüş ET değerlerinin altında (üstünde) sonuç verdiği tespit edilmiştir [32].

### **Jensen -Haise (JH)**

Blaney - Criddle yöntemini geliştirmek için kullanılan verilere ilaveten sıcaklık ve yağış gibi iklim, temel toprak suyu ile ölçülmüş ET verileri edinilmiştir. Her bir ölçüm periyodu için güneş radyasyonu ( $R_s$ ), özellikle bir veya birden fazla bulutla kaplı istasyonun olduğu veri setlerinden tahmin edilmiştir. Bunun da yaklaşık 1000 ölçülmüş ET verisine karşılık geldiği ifade edilmiştir. Tamamen bitki ile kaplı alanlardan ölçülen verilere yoğunlaşıldığında yaklaşık 100 veri seti çalışmada kullanılabilir bulunmuştur. PET ile  $R_s$  arasında 1962 yılında önerilen bağıntı:

$$\lambda ET = (0.014T - 0.37)R_s \quad (3a)$$

şeklinde ve  $\lambda$  buharlaşma gizli ısı ( $\text{MJkg}^{-1}$ ), T ortalama sıcaklıktır ( $^{\circ}\text{F}$ ).  $R_s$ 'in birimi mm (veya inç)/gün. Literatürde verilen ve bu çalışmada kullanılan bir diğer JH formülü ise aşağıdaki gibidir:

$$\lambda ET = (0.025T + 0.08)R_s \quad (3b)$$

ortalama sıcaklığın birimi  $^{\circ}\text{C}$ . Çalışma buharlaşma için gerekli birincil enerjinin sıcaklık yerine güneş enerjisi olduğunu vurgulaması açısından, önerildiği zaman için önemlidir [33].

### **FAO-56 Penman-Monteith (FAO-56 PM)**

Bir yüzeyden suyun evapotranspirasyon olarak uzaklaşabilmesi için gerekli mekanizmalar enerji kaynağı ve buhar taşınımıdır. Enerji kaynağı suyun sıvı halden buhar haline geçmesini sağlayacak buharlaşma gizli ısı için gereklidir. Buhar taşınım mekanizması ise ortamdaki su buharının yüzeyden uzaklaştırılarak, buharlaşma yüzeyi ve çevreleyen hava arasındaki buhar basıncı değişimini sağlamak için gereklidir. 1950'li yıllara kadar ET tahmini için geliştirilen yöntemler bunlardan sadece birini dikkate alıyorlardı. Enerji dengesine ve kütle transferine (aerodinamik) dayalı yöntemler olarak biliniyorlardı. Penman bu iki yaklaşımı bir arada düşünmüş ilk kişi olup, sadece meteorolojik değişkenlere dayalı olarak ampirik rüzgâr fonksiyonu içeren açık su yüzeyinden buharlaşma tahmini için önerdiği yöntem kombinasyon yöntemi olarak tanımlanmaktadır [34]. Penman ayrıca önerdiği yöntemin kısa-yeşil-çim kaplı alanlardan ET tahmini için kullanılabilirliğini ifade etmiştir. Bunun için serbest yüzey buharlaşma tahmini ile yılın zamanına bağlı olarak 0.6'dan 0.8'e değişen ampirik katsayının çarpılması gerektiğini vurgulamıştır. Penman daha sonra stoma geometrisini yansıtan stoma faktörünü ve stomanın kapanmasına neden olan gün uzunluğu faktörünü hesaba katan yeni bir denklemini 1952'de önermiştir. Geliştirdiği denklemin herhangi kısa-yeşil bitki örtüsü için kullanılabilirliğini, uzun bitki örtüsü için uyarlanmış rüzgâr fonksiyonunun kullanılmasını tavsiye etmiştir. 1963 çalışmasında orijinal denklemine geri dönerek, kısa-yeşil-iyi sulanmış çim referans bitkisinden ET'nin direk hesaplanmasına olanak sağlayan ampirik rüzgâr fonksiyonunun yeni bir kalibrasyonunu önermiştir [34].

Monteith, Penman denkleminin yeni versiyonunu elektriksel analog temelli türetmiştir. Denklemi tamamen fiziksel temelli olup iki direnç terimi içermektedir. Aerodinamik direnç ampirik rüzgâr fonksiyonu yerini alırken, yüzey direnci Penman'ın stoma ve gün uzunluğu faktörü yerini almıştır [34]. Allen ve ark. yaptıkları çalışmada, Penman-Monteith (PM)

denklemini 0.23 albedo ve 70 s/m sabit yüzey direncine sahip 12 cm yüksekliğinde olduğu varsayılan referans bitkiye göre uyarlamışlardır. Yeşil çim yüzeyinin tekdüze yükseklikte, büyüme evresinde ve yeterli suya sahip olduğu varsayılmıştır. FAO-56 PM referans (potansiyel) ET denklemi, PM denklemi, aerodinamik ve yüzey direnci denklemleri kullanılarak elde edilmiştir [5]:

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \left(\frac{900}{T+273}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (4)$$

eşitlikteki  $R_n$  net güneş radyasyonu ( $MJm^{-2}gün^{-1}$ );  $G$  toprak ısı akısı ( $MJm^{-2}gün^{-1}$ );  $e_s$  buharlaşma yüzeyindeki ve  $e_a$  havadaki buhar basıncı;  $u_2$  2 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızı (m/s);  $\gamma$  psikrometrik sabiti ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ );  $\Delta$  doymuş buhar basıncı sıcaklık eğrisinin eğimidir ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ ). Kullanılacak meteorolojik verilerin su sıkıntısı çekmeyen, toprağı kaplamış yeşil çim yüzeyin 2m üzerinden ölçülmüş olması gerekmektedir [5].

### Makkink (MK)

Hollanda'nın soğuk ve nemli iklim koşullarında çim kaplı yüzeylerden gerçekleşen ET'yi iklim verileri ve güneş radyasyonundan ampirik olarak hesaplamak için Makkink tarafından önerilmiştir [35]:

$$PET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (5)$$

Yöntem sadece güneş radyasyonu ve sıcaklık verisi gerektirmektedir.  $\Delta$  sıcaklıktan türetilirken,  $\gamma$  (psikrometrik) sabitine söz konusu bölgenin yükseklik ve enlemine göre karar verilmektedir.

### Turc (TC)

Turc evapotranspirasyon miktarının güneş radyasyonu, sıcaklık ve nispi nem değişkenleri ile ampirik olarak hesaplanabilmesi için Batı Avrupa nemli iklim koşulları altındaki verilerini kullanarak ampirik bir denklem geliştirmiştir [36]:

$$PET = 0.013C \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \quad (6)$$

C parametresi nispi nem (RH) ile ilişkilendirilmiş olup nispi nem %50'den büyük ise bir (1), küçük ise  $1 + (50 - RH_{ort})/70$  olarak tanımlanmıştır. Yöntemin ortalama sıcaklığın  $10^{\circ}C$ 'den küçük olduğu durumlarda kullanılmaması önerilmiştir. C parametresi için önerilen formülasyon fiziksel olarak yorumlandığında, nispi nem %50 kesme seviyesinin altına düştükçe verilen sıcaklık ve radyasyonda ET'nin lineer olarak artacağı anlaşılmaktadır. Buradan C katsayısının Penman-Monteith denkleminde tanımlanan buhar eksikliği terimi ile ilişkilendirilmeye çalışıldığı anlaşılmaktadır. Yüksek nispi nemli ortamlarda nispi nemin ET üzerinde etkisi olmadığı varsayılmıştır.

### Priestley-Taylor (PT)

Priestley ve Taylor, tamamen suya doymun yüzeylerde buharlaşma gizli ısı (LE) ile hissedilir ısı (H) arasında aşağıdaki eşitliği önermişlerdir [9]:

$$\frac{LE}{LE+H} = \alpha \left( \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \right) \quad (7)$$

$\alpha$  katsayısının suya doymun olmayan yüzeylerde de kullanılabilceğini, bu durumda suya doymun yüzeylerdekinden daha küçük bir değer almasının beklenmesi gerektiğini, Dodds ve ark., ise onların aksine daha az nemli ortamlarda  $\alpha$  katsayısının artırılarak kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir [37]. Aslında Priestley ve Taylor, Penman'ın doymun toprak yüzeyinden buharlaşma oranını bulmak için 1948 yılında önerdiği formüldeki:

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} h(e_s - e_a) \quad (8)$$

enerji (birinci) bileşenin aerodinamik (ikinci) bileşenine baskın olduğu durumlar için yeni bir buharlaşma tahmin formülü geliştirmişlerdir. Bu durumda  $LE+H=R_n-G$ . Adveksiyon (yatay hava hareketi) oluşmaması durumunda bu denklemin olası günlük ortalama buharlaşma oranı üzerinde sınırlar konulabilmesini sağladığını iddia etmişlerdir. İlk sınır koşul, H negatif bir değer alamayacağı için  $LE < R_n - G$  ise  $\alpha < (1+\gamma/\Delta)$  olmak durumundadır. İkinci sınır koşul, aerodinamik bileşendeki doymunluk açığının ( $e_s - e_a$ ) negatif olması ve dolayısıyla yoğunlaşma olma olasılığı düşük olduğundan yoğunlaşma oluşmaması gerekliliğidir. Bu durumda,  $LE > \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} (R_n - G)$  olması gerektiğinden  $\alpha > 1$  olmalıdır.  $\Delta/(\Delta+\gamma)$  teriminin 10°C yüzey sıcaklığında 0.56'dan 35°C de 0.82'ye değiştiğini ve belirttikleri iki koşulun adveksiyon etkinin bulunmaması için minimum kriter olarak alınabileceğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak bu yöntemde adveksiyon değerlerinin oldukça küçük olduğu varsayımı yapılarak, Penman metodunun kütle transferi bileşenlerinin etkisi bir katsayıya ( $\alpha$ ) indirgenmiştir [17]. Literatürde paylaşılan suya doymun karasal alanlardan ve açık su yüzeylerinde gözlemlenen veriler kullanılarak  $\alpha$  değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan gözlemlerden en iyi tahminin (kara ve su) 1.26 olduğu belirtilmiştir [9]. Morton, karasal alanlarda  $\alpha=1.26$  katsayısı kullanıldığında ET'nin düşük tahmin edildiğini ileri sürmüş ve buna sebep olarak karasal alanların açık yüzeylere göre daha heterojen ve engebeli olmasını göstermiştir. Karasal alanlar için  $\alpha$  katsayısının 1.32 olarak alınmasının daha uygun olacağını belirtmiştir [37, 38].  $\alpha$  katsayısı üzerine çalışmalara devam edilmesine karşın, yöntem geniş ormanlık alanlar ve nemli ortamlar için daha uygun olmakla birlikte az veriye ihtiyaç duyması sebebiyle önerilen şekliyle kullanılmaya devam etmektedir. Yöntemin enerjinin yatay olarak taşınımını ifade eden adveksiyonun etkin olduğu durumlarda daha az evapotranspirasyon değeri tahmin edebildiği unutulmamalıdır [32].

### Hargreaves-Samani (HS)

Hargreaves, 8-15 cm arasında yüksekliğe sahip kırılmış otlak alandan iki bin dokuz yüz bir (2 901) W.O. Pruitt (yayımlanmamış) tarafından Kaliforniya Davis'de alta fescue referans bitkisi için kurulan tartılabilir lizimetre düzeneğinden ölçülen evapotranspirasyon ( $ET_g$ )



değerleri ile ortalama sıcaklık (Fahrenheit) ve yüzeyde ölçülen global güneş radyasyon ( $R_s$ ) çarpımı arasında lineer bir ilişki elde etmeye çalışmıştır. Elde ettiği lineer denklemin  $ET_g$  değerlerinin %94'ünü açıkladığını saptamıştır [39]:

$$PET=0.0075 R_s TF \quad (9)$$

Sıcaklık birimi olarak derece kullanıldığında denklem;

$$PET=0.0135 R_s (TC+17.8) \quad (10)$$

halini almaktadır. Rüzgâr hızının ( $u_2$ ) ve bağıl nemin (RH)  $ET$ 'ye olan fiziksel etkilerini ortaya koymak için  $ET/ET_g$  oranı ile sırasıyla  $u_2$  ve RH arasında ilişki aranmıştır. Rüzgârın söz konusu oranın %10'unu, RH'in %9'unu açıkladığı saptandığından, bu iki değişken veri gerekliliğini azaltmak ve denklemin basitliğini bozmamak adına dahil edilmemiştir. 1977 yılındaki çalışmasında elindeki gözlem verilerinin analizinden ve literatürde araştırmacıların karşılaştığı zorluklardan  $R_s$ 'in mümkün güneşlenme (S) yüzdesi ve uzay radyasyonundan ( $R_a$ ) hesaplanabileceği sonucuna varmış ve aşağıdaki denklemi önermiştir [40]:

$$R_s=0.075R_aS^{0.50} \quad (11)$$

S, güneşlenme saatinin yüz ile çarpılıp mümkün güneşlenme saatleri sayısına bölünmesiyle ölçülen değişkendir. Hargreaves ve Samani çalışmalarında  $R_s$ 'in hesaplamasını sıcaklık değişkenine bağlamıştır [41]:

$$R_s=K_{RS}R_aTR^{0.50} \quad (12)$$

eşitlikteki TR ortalama günlük maksimum ve minimum sıcaklık farkı;  $K_{RS}$  empirik katsayıdır. Hargreaves, Senegal nehir havzasından aldığı iklim verilerini kullanarak bu değeri 0.16 olarak bulmuştur ve denklem 10 ve 12'den  $K_{RS}=0.16$  alınarak, aşağıdaki denklemi elde etmiştir [42]:

$$PET=0.0022 R_a (TC+17.8) TR^{0.50} \quad (13)$$

Hargreaves ve Samani, pik taleplerin olduğu aylar için katsayının 0.0023'e yükseltilmesini önermişlerdir. Bu uyarılama ile elde edilen denklem 1985 Hargreaves-Samani denklemi olarak bilinmektedir [43]:

$$PET=0.0023 R_a (TC+17.8) TR^{0.50} \quad (14)$$

Yöntem basit, minimum veri gereksinimi olması ve kolay hesaplanabilmesi bakımından tercih edilmektedir. Özellikle sadece sıcaklık verisinin bulunduğu bölgelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Allen çalışmasında Hargreaves-Samani denklemini geliştirmeyi amaçlayarak aşağıdaki eşitliği önermiştir:

$$PET=0.0029 R_a (TC+20) TR^{0.40} \quad (15)$$

1964-1972 günlük Davis veri setini kullandığında önerdiği denklem için  $r^2=0.96$  ve hata miktarını  $0.93 \text{ mmgün}^{-1}$  bulurken, orijinal denklem için bu değerlerin sırasıyla  $0.95$  ve  $0.98 \text{ mmgün}^{-1}$  olduğunu tespit etmiştir. Elde edilen iyileşmenin önemli olmadığı kanısına varılarak orijinal denklemin kullanılabilirliği ifade edilmiştir [44].

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Konya Kapalı Havzasından seçilen beş istasyondan alınan Mart-Kasım dönemlerine ait günlük meteorolojik veriler ile istasyon bazlı PET tahminleri ampirik yöntemler ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan meteorolojik değişkenlerin uzun yıllar günlük ortalama değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

*Çizelge 2 - Çalışma dönemi (Mart-Kasım) için meteorolojik değişkenlerin uzun yıllar günlük ortalama değerleri*

<b>İstasyon Adı</b>	<b><math>T_{mak}</math> (°C)</b>	<b><math>T_{min}</math> (°C)</b>	<b><math>T_{ort}</math> (°C)</b>	<b><math>RH</math> (%)</b>	<b><math>u_2</math> (m/sn)</b>	<b><math>R_s</math> (cal/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P (mm)</b>
Aksaray	30,0	3,9	16,6	50,2	2,5	14376	232,6
Ereğli	30,7	3,0	16,5	55,4	1,9	14796	211,7
Karaman	30,2	2,4	15,9	53,7	2,2	14202	201,9
Karapınar	30,7	0,5	15,3	56,7	2,2	14882	196,2
Niğde	28,6	3,5	15,5	52,5	2,5	15910	241,5

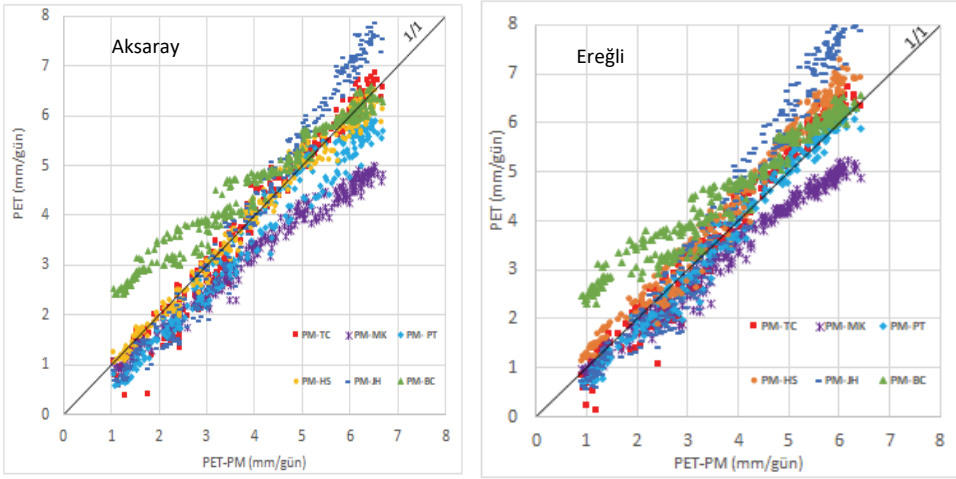
FAO-56 PM yönteminden elde edilen tahminler referans olarak kullanılarak, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Makkink, Turc, Priestley-Taylor ve Hargreaves-Samani ampirik yöntemlerinin bölge için PET tahmin performansları değerlendirilmiştir. Değerlendirme ortalama hata kareleri karekökü (RMSE) ve belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ile yapılmış ve Çizelge 3’te sunulmuştur. Belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi ifade eden lineer çizgiye yakın olan verilerin yüzdesini belirlemek için kullanılmıştır. Aksaray ve Ereğli istasyonları için görsel olarak kıyaslama Şekil 1’de sunulmuştur.

FAO-56 PM ile ampirik yöntemler arasındaki ilişkinin incelenmesinden, MK yöntemi tahminlerinin genel olarak daha düşük kaldığı tespit edilmiştir. Ancak, Aksaray istasyonu haricindeki diğer istasyonlar için yapılan tahminlerin  $2 \text{ mm}$ ’ye kadar FAO-56 PM tahminleri ile uyumlu olduğu saptanmıştır. İran’da dört farklı iklim etkisi altındaki istasyonlarda yapılan çalışmada da soğuk nemli iklim bölgesi haricindeki istasyonlarda MK yönteminin FAO-56 PM’e kıyasla düşük tahminlerde bulunduğu tespit edilmiştir [17].

JH ampirik yöntemi genel olarak  $4 \text{ mm}$ ’nin üzerindeki tahminlerde daha yüksek kalırken,  $4 \text{ mm}$  altındaki tahminlerde daha düşük kalmıştır. Nemli iklim koşulları için geliştirilen bir yöntem olması gözönünde tutulduğunda, yüksek tahminlerin elde edilmesi şaşırtıcı değildir. BC yöntemi genel olarak FAO-56 PM tahminlerinden daha yüksek tahminlerde bulunmuştur. Aksaray, Karapınar ve Niğde istasyonlarında  $5.5 \text{ mm}$ ’nin üzerinde ise daha düşük tahminlere

rastlanmıştır. Yöntemin, Burkino Faso-Afrika gibi kuru tropik iklim [45], Kaliforniya-ABD ve İran gibi çorak iklim [46, 47], İspanya gibi yarı çorak iklim [11] bölgelerinde de yüksek tahminler verdiği rapor edilmiştir. TC yöntemi 4 mm'ye kadar genel olarak daha düşük tahminler vermiştir. 4 mm'den daha yüksek değerlerdeki tahminleri Aksaray, Karaman ve Karapınar istasyonlarında FAO-56 PM tahminlerine oldukça yakınken, diğer istasyonlarda tahminler yüksek kalmıştır. 4 mm'ye kadar olan ET tahminleri karşılaştırılan yöntem ile en yakın olan HS yöntemidir. Aksaray ve Niğde istasyonları için yaptığı tahminler genel olarak başarılıyken, diğer istasyonlarda 4 mm üzerinde yüksek tahminler elde edildiği saptanmıştır. Yapılan çalışmalar HS yönteminin ılıman, nemli ve yarı çorak iklimlerde yüksek tahminler verdiğini ortaya koymasına rağmen, yarı çorak iklim etkisi altındaki rüzgarlı bölgelerde iyi sonuçlar verdiğini yadsınamışlardır [16]. Bu bilgi yarı çorak iklim etkisi altında, diğer istasyonlara nazaran rüzgarlı sayılabilecek Aksaray ve Niğde istasyonlarından elde edilen sonuçlar ile tutarlıdır. PT yönteminin tüm istasyonlarda 4 mm'ye kadar daha düşük tahmin yapma eğiliminde olduğu saptanmıştır. Yöntem Aksaray haricindeki istasyonlarda genel olarak oldukça yakın sonuçlar verirken, söz konusu istasyondaki tahminler FAO-56 PM yönteminden daha düşük kalmıştır.

Hesaplanan RMSE değerleri gözönüne alındığında Ereğli, Karaman ve Karapınar istasyonları için FAO-56 PM yöntemine en yakın tahminler PT ampirik yönteminden; Aksaray ve Niğde istasyonları için en yakın tahminler ise HS ampirik yöntemi ile elde edilmiştir. Aksaray ve Ereğli istasyonları için ampirik yöntemlerin uzun yıllar günlük ortalama PET tahminlerinin aylık ortalama değer kıyaslamaları Şekil 2'de sunulmuştur.

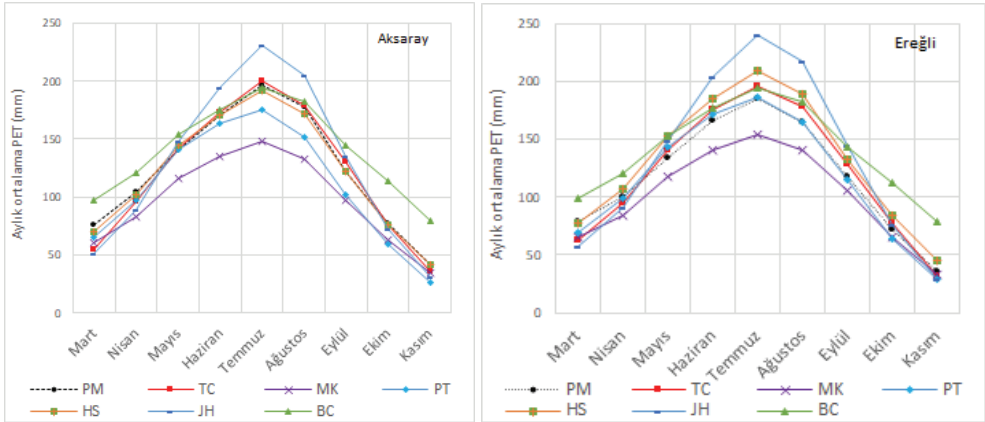


Şekil 1 - Aksaray ve Ereğli istasyonları için ampirik yöntemlerin FAO-56 PM ile kıyaslaması

Çizelge 3 - Ampirik yöntemlerin FAO56-PM ile kıyaslanması

İstasyon adı/ Yöntem		Aksaray	Ereğli	Karaman	Karapınar	Niğde
TC	RMSE	0,34	0,37	0,37	0,36	0,43
	R <sup>2</sup>	0,98	0,98	0,97	0,97	0,98
MK	RMSE	1,07	0,64	0,82	0,71	0,70
	R <sup>2</sup>	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99
PT	RMSE	0,64	0,27*	0,33*	0,26*	0,34
	R <sup>2</sup>	0,96	0,98*	0,98*	0,98*	0,98
HS	RMSE	0,27*	0,55	0,44	0,58	0,29*
	R <sup>2</sup>	0,98*	0,98	0,98	0,98	0,99*
JH	RMSE	0,62	1,03	0,75	0,81	0,91
	R <sup>2</sup>	0,98	0,96	0,97	0,97	0,97
BC	RMSE	0,73	0,87	0,82	0,79	0,66
	R <sup>2</sup>	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97

Not: \* işareti RMSE için en küçük değeri, R<sup>2</sup> için en yüksek değeri göstermektedir.



Şekil 2 - Aksaray ve Ereğli istasyonları aylık ortalama bazında ampirik yöntem tahminlerinin kıyaslanması

Aylık ortalama PET bazında bakıldığında tüm istasyonlar için MK yöntemi ile FAO-56 PM yöntemine göre daha düşük tahminler yapılırken, BC yöntemi ile daha yüksek tahminlerde bulunulmuştur. JH yöntemi ise Mayıs-Eylül aylarında yüksek, diğer aylarda ise düşük tahminler vermiştir. TC, PT ve HS yöntemlerinden elde edilen tahminler gözönüne alındığında FAO-56 PM yöntemine alternatif olabilecekleri tespit edilmiştir. Aksaray

istasyonu için Haziran-Kasım ayları tahmin değerleri dikkate alındığında en yakın tahminler TC yönteminden, Mart-Haziran ve Eylül-Kasım ayları tahmin değerleri dikkate alındığında ise en yakın tahminler HS yönteminden elde edilmiştir. PT yöntemi tahminleri bu istasyon için düşük kalmıştır. Ereğli istasyonunda Mayıs-Kasım ayları için TC ve HS yöntemlerinden yüksek tahminler elde edilmiş, en iyi tahminlere PT yöntemi ile ulaşılmıştır. Karaman istasyonunda Mayıs-Kasım ayları için FAO-56 PM yöntemine yakın tahminlerde bulunan TC yöntemidir. HS yöntemi tahminleri yüksek, PT tahminleri düşük kalmıştır. Karapınar istasyonu için en iyi tahmin PT yönteminden elde edilirken, TC sadece Mart-Nisan aylarında düşük tahminde bulunmuştur. HS ise neredeyse tüm aylarda FAO-56 PM tahminlerinin üzerinde kalmıştır. Niğde istasyonunda en iyi tahminler Temmuz ayına kadar PT, Temmuz ayından sonra HS yönteminden elde edilmiştir. TC yöntemi Haziran-Ağustos aylarında yüksek, Mart-Nisan aylarında düşük tahminlerde bulunmuştur.

Sulama sezonunun Mayıs-Ekim ayları arası olduğu düşünülürse TC yönteminin Aksaray, Karaman ve Karapınar istasyonları için, PT yönteminin ise Ereğli ve Niğde istasyonları için önerilebileceği sonucuna varılmıştır. PT yöntemi Niğde istasyonunda Aksaray, Karaman ve Karapınar istasyonlarında olduğu gibi daha düşük tahminlerde bulunmasına rağmen, FAO-56 PM yöntemi tahminlerine TC'den daha yakın sonuçlar verdiği için önerilmiştir. Sonuçlar yorumlandığında bölge için FAO-56 PM'e alternatif evapotranspirasyonu yöntemi olarak PT önerilecekse, bölgedeki diğer meteorolojik istasyon verileri edinilerek bölgesel  $\alpha$  katsayısının bulunması gerektiği sonucuna varılmıştır. Literatürde yöntemin karasal alanlarda orijinal hali ile kullanılması durumunda düşük tahminler elde edileceği bulgusu çalışılan bölge için de geçerli olmuştur.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dünyanın birçok bölgesinde yaygın bir şekilde kullanılan ve güvenilir PET tahminleri yaptığı iddia edilen ampirik yöntemler tanıtarak, Konya Kapalı Havzası özelinde kullanılarak sonuçları irdelenmiştir. İstatistiksel olarak bakıldığında FAO-56 PM'ye en yakın tahminlerin elde edildiği ikinci yöntem istasyon bazında değişse dahi TC yöntemidir (Niğde istasyonu haricinde). HS yöntemi Aksaray ve Niğde istasyonları için birinci, Ereğli, Karaman ve Karapınar istasyonları için üçüncü sırada yer almıştır. PT yöntemi ise Ereğli, Karaman ve Karapınar istasyonları için birinci, Niğde istasyonu için ikinci sırada yer almıştır.

Sonuç olarak Konya Kapalı Havzasında çalışmaya dahil edilen istasyonlar için yapılan incelemede, günlük PET tahminlerinde elde yeteri kadar ölçülmüş günlük meteorolojik gözlem verisinin bulunmaması durumunda TC, HS ve PT yöntemleri FAO-56 PM'e alternatif olarak ön plana çıkmıştır. Mayıs-Kasım ayları dikkate alındığında PET tahminleri için önerilen TC yöntemidir. Bölgedeki üç istasyonda FAO-56 PM ile en yakın tahminleri yapan birinci yöntem olarak PT bulunmasına rağmen, yöntemden genellikle düşük tahminler elde edildiğinden  $\alpha$  katsayısının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sadece günlük sıcaklık verisine ihtiyaç duyan HS yönteminin bölge özelindeki performansının yadsınamayacak derecede başarılı olduğu belirtilmeden geçilemez. MK, BC ve JH yöntemlerinin bölge bazında başarılı olmadığı tespit edilmiştir. Havzayı temsil etmekte beş istasyonun yeterli olamayabileceği akıld tutularak, çalışmanın önemli tarımsal faaliyetlere ev sahipliği yapan havzada yapılacak tarımsal sulama planlamaları, su bütçesi, yağış-akış

modelleri, kuraklık ve iklim değişikliği çalışmalarında seçilecek PET tahmin yöntemini belirlemede yararlı olacağı inancı taşınmaktadır.

### **Semboller**

$\alpha$	: Priestley-Taylor katsayısı,
$\Delta$	: Doygun buhar basıncı sıcaklık eğrisinin eğimi,
$\lambda$	: Buharlaşma gizli ısı katsayısı,
$\gamma$	: Psikrometrik sabit,
BC	: Blaney Criddle,
C	: Sabit katsayı,
E	: Buhar basıncı,
ET	: Evapotranspirasyon,
f	: İklim parametresi,
FAO	: Gıda ve Tarım Organizasyonu,
G	: Toprak ısı akısı,
H	: Hissedilir ısı,
HS	: Hargreaves-Samani,
JH	: Jensen Haise,
k	: Bitki su tüketim katsayısı,
$K_{RS}$	: Ampirik katsayı,
LE	: Buharlaşma gizli ısısı,
MK	: Makkink,
p	: Gündüz saatlerinin aylık yüzdesi,
PET	: Potansiyel Evapotranspirasyon,
PM	: Penman-Monteith,
PT	: Priestley-Taylor,
$R_a$	: Uzay radyasyonu,
$R_n$	: Net güneş radyasyonu,
$R_s$	: Güneş radyasyonu,
$R^2$	: Belirleme katsayısı,

RH	: Nispi nem,
RMSE	: Ortalama hata kareleri karekökü,
S	: Mümkün güneşlenme yüzdesi,
T	: Sıcaklık,
TR	: Ortalama günlük maksimum minimum sıcaklık farkı,
u <sub>2</sub>	: 2 m yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı,
v	: Aylık su tüketimi
V	: Mevsimlik su tüketimi.

### Kaynaklar

- [1] Katul, G.G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., Parlange, M.B., Evapotranspiration: A process Driving Mass Transport and Energy Exchange in the Soil-Plant-Atmosphere-Climate System. Rev. Geophys., 50, RG3002, 2012.
- [2] Dingman, S.L., Physical Hydrology, Long Grove, Waveland Press, Inc., 2008.
- [3] Akpolat, A., Mikrometeorolojik ve Lizimetre Yöntemleriyle Belirlenen Buğday Bitki Su Tüketimlerinin Karşılaştırılması. Master Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2011.
- [4] Abdulkareem, J.H., Abdulkadir, A., Abdu, N., A Review of Different Types of Lysimeter Used in Solute Transport Studies. International Journal of Plant & Soil Science 8(3), 1-14, 2015.
- [5] Allen, R.G, Periera, L.S, Raes, D., Smith, M., Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy, 1998.
- [6] Lingling, Z., Jun, X., Chong-yu, X., Zhonggen, W., Leszek, S., Cangrui, L., Evapotranspiration Estimation Methods in Hydrological Models, J. Geogr. Sci., 23(2), 359-369, 2013.
- [7] Alexandris, S., Stricevic, R., Petkovic, S., *Comparative Analysis of Reference Evapotranspiration from the Surface of Rainfed Grass in central Serbia, Calculated by Six Empirical Methods against the Penman-Monteith Formula*. European Water, 21/22, 17-28, 2008.
- [8] Monteith, J.L., Evaporation and the Environment. XIX th Symposium Society for Experimental Biology, Swansea, Cambridge University, Cambridge, England, 205-234, 1965.
- [9] Priestley, C.H.B, Taylor, R.J., On the Assessment of the Surface Heat Flux and Evaporation using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review, 100, 81-92, 1972.
- [10] Lemeur, R., Zhang, L., Evaluation of Three Evapotranspiration Models in terms of their Applicability for an Arid Region. Journal of Hydrology, 114 (3-4), 395-411,1990.

- [11] Lopez-Urrea, R., De Santo Olalla, F. M., Fabeiro, C., Moratalla, A., An Evaluation of Two Hourly Reference Evapotranspiration Equations for Semi-arid Conditions. *Agricultural Water Management*, 86(3), 277-282, 2006.
- [12] Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Santos, E.A., Evaluation of FAO Penman-Monteith and Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration with Missing Data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97, 635-644, 2010.
- [13] Salih, A.M.A., Sendil, U., Evapotranspiration Under Extremely Arid Environment. *J Irrig Drain Eng.*, 110(3), 289-303, 1983.
- [14] Beyazgül, M., Kayam, Y., Engelsman, F., Estimation Methods for Crop Water Requirements in the Gediz Basin of Western Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 19-26, 2000.
- [15] Şahin, Ü., Angın, İ., Anapalı, Ö., Evaluation of Reference Evapotranspiration Calculation Methods Applied to the Climatic Conditions of Turkey. *J Hydrol. Hydromech.*, 52 (2), 125-133, 2004.
- [16] Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M., A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional use in the Southeastern United States. *JAWRA*, 41(3), 621-633, 2005.
- [17] Tabari, H., Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates. *Water Resour. Manag.*, 24, 2311-2337, 2010.
- [18] Tukimat, N.N.A., Harun, S., Shahid, S., Comparison of Different Methods in Estimating Potential Evapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 113 (1), 77-85, 2012.
- [19] Fisher, D.K., Pringle III, H.C., Evaluation of Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, 4(8A), 51-60, 2013.
- [20] Efthimiou, N., Alexandris, S., Karavitis, C., Mamassis, N., Comparative Analysis of Reference Evapotranspiration Estimation between Various Methods and the FAO56 Penman-Monteith Procedure. *European Water*, 42, 19-34, 2013.
- [21] Uçar, Y., Kazaz, S., İnal, F.G., Baydar, H., Empirical Models Likely to be Used to Estimate the Evapotranspiration of Oil Rose (*Rosa damascena* Mill.), *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 1-10, 2017.
- [22] Kişi, Ö., Comparison of Different Empirical Methods for Estimating Daily Reference Evapotranspiration in Mediterranean Climate, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140 (1), 04013002, 2014.
- [23] Zhang, K., Kimball, J.S., Nemani, R.R., Running, S.W., A Continuous Satellite-Derived Global Record of Land Surface Evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resour. Res.*, 46, W09522, 2010.
- [24] Aksu, H., Arıkan, A., Satellite-based Estimation of Actual Evapotranspiration in the Büyük Menderes Basin, Turkey. *Hydrology Research*, 48(2), 559-570, 2017.



- [25] Peng, J., Loew, A., Chen, X., Ma, Y., Su, Z., Comparison of Satellite-Based Evapotranspiration Estimates over the Tibetan Plateau. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 3167-3182, 2016.
- [26] Citakoglu, H., Cobaner, M., Haktanir, T., Kisi, O., Estimation of Monthly Mean Reference Evapotranspiration in Turkey. *Water Resour. Management*, 28, 99–113, 2014.
- [27] Falamarzi, Y., Palizdan, N., Huang, Y.F., Lee, T.S., Estimating Evapotranspiration from Temperature and Wind Speed Data using Artificial and Wavelet Neural Networks (WNNs). *Agricultural Water Management*, 140 (C), 26-36, 2014.
- [28] Partal, T., Comparison of Wavelet Based Hybrid Models for Daily Evapotranspiration Estimation using Meteorological Data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (5), 2050-2058, 2016.
- [29] Yılmaz, S., Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması Projesi Konya Kapalı Havzası, 5098115-ÇE.10.49, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Çevre Enstitüsü, 2010.
- [30] Berke, M.Ö., Dıvrak, B.B., Sarısoy, H.D., Konya’da Suyun Bugünü Raporu., WWF Türkiye, 2014.
- [31] Blaney, H.F., Criddle, W.D., Determining Consumptive Use and Irrigation Water Requirements. *Agricultural Research Service, Tech. Bull.*, 1275, 1962.
- [32] Subedi, A., Chavez, J.L., Crop Evapotranspiration (ET) Estimation Models: A Review and Discussion of the Applicability and Limitations of ET Methods. *Journal of Agricultural Science*, 7 (6), 50-68, 2015.
- [33] Jensen, M.E., Historical Evaluation of ET Estimating Methods. *CSU/ARS Evapotranspiration Workshop, Fort Collins, CO, 12 March 2010.*
- [34] Vanderkimpfen P. J., Estimation of Crop Evapotranspiration by Means of the Penman-Monteith Equation. PhD Thesis, Utah State University, Logan, Utah, 1991.
- [35] Makkink, G.F., Testing the Penman Formula by means of Lysimeters. *J Inst. Water Eng.* 11(3), 277–288, 1957.
- [36] Turc, L., Water Requirements Assessment of Irrigation, Potential Evapotranspiration: Simplified and updated Climatic Formula. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49, 1961.
- [37] Dodds, P.E., Meyer, W.S., Barton, A., A Review of Methods to Estimate Irrigated Reference Crop Evapotranspiration Across Australia. *CRC for Irrigation Futures Technical Report No. 04/05. 2005.*
- [38] Morton, F.I., Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Their Significance to the Science and Practice of Hydrology. *Journal of Hydrology*, 66, 1-76, 1983.
- [39] Hargreaves, G.H., Moisture Availability and Crop Production. *Transaction of the ASAE*, 18(5), 980–984, 1975.
- [40] Hargreaves, G.H., *World Water for Agriculture.* Agency for International Development, 177, 1977.

- [41] Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., Estimation of Potential Evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 108 (3), 225–230, 1982.
- [42] Hargreaves, G.L., Water Requirements and Agricultural Benefits for the Senegal River Basin. Master Thesis, Utah State University, Logan, Utah, 1983.
- [43] Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1(2), 96-99, 1985.
- [44] Hargreaves, G.H., Allen, R.G., History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(1), 53-63, 2003.
- [45] Wang, Y.M., Traore, S., Kerh, T., Determination of a Reference Model for Estimating Evapotranspiration in Burkina Faso. In Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Corfu Island, 16-19 Feb. 2007.
- [46] George, B.A., Reddy, B.R.S., Raghuwanshi, N. S., Wallender, W.W., Decision Support System for Estimating Reference Evapotranspiration. *J Irrig. Drain. Eng.*, 128 (1), 1-10, 2002a.
- [47] Heydari, M.M., Tajamoli, A., Ghoreishi, S.H., Darbe-Esfahani, M.K., Gilasi, H., Evaluation and Calibration of Blaney- Criddle Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Semiarid and Arid Regions. *Environ Earth Sci.*, 74, 4053-4063, 2015.

# Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi

Burcu AKÇAY<sup>1</sup>

## ÖZ

Karma lifli betonların kırılmasında lif hacmi ve lif boyutunun etkisi tek eksenli çekme deneyi ile belirlenmiştir. Kemik şeklindeki numuneler serbest dönen mafsallı yükleme düzeneğinde tek eksenli çekme altında yüklenmiştir. Deney sonuçları lif hacmi arttıkça hem çekme dayanımının hem de betonun tokluğunun (yük-deplasman grafiğinin altında kalan alanın) arttığını göstermiştir. Kısa liflerin yalnızca tepe yükünü arttırmadığı uzun lifler ile birlikte karma olarak kullanıldığında tepe yükünden sonraki davranışa da etkiyerek tokluğu da arttırdığı görülmüştür. Görüntü analizleri karma lifli betonlarda çatlağın hiçbir zaman doğrusal olmadığını, betonun iç kısımlarına ilerledikçe dış yüzeyde görünmeyen çoklu çatlamanın, dallanma ve köprülenmenin bulunduğunu göstermiştir. Kısa lifler arttıkça ortalama çatlak alanı belirgin bir şekilde artarken uzun liflerin miktarı arttıkça en büyük çatlak açıklığının arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çatlak yapısı, dijital görüntü analizi, karma lifli beton, lif geometrisi, lif hacmi, tek eksenli çekme deneyi.

## ABSTRACT

### Crack Pattern Investigation of Hybrid Fibre Reinforced Concrete under Uniaxial Tension

The effect of size and volume of fibres on the fracture of hybrid fibre reinforced concrete was determined by applying uniaxial tensile test. The bone shaped specimens were loaded under uniaxial tension by using freely rotated support loading test setup. The test results showed that the increase in fibre volume results in an increase in both tensile strength and the area under the load displacement curve, which is the measure of the material toughness. It was shown that the use of short fibres not only increased the peak load but also affected the post-peak behaviour and increased the toughness especially when they were used together with long fibres. The image analyses pointed out that in hybrid fibre reinforced concrete the crack patterns are not in general linear. Instead, the cracks propagate inside the samples

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30 Nisan 2018 günü ulaşmıştır. 24 Aralık 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.419819>

1 Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - burcu.akcay@kocaeli.edu.tr  
<https://orcid.org/0000-0002-8730-6621>

forming multiple cracks and crack branches as well as developing bridging, though these features are not observed on the surface of the samples. The results showed that with increasing amount of short fibres the average crack area was increased, while the use of long fibres in more abundance increased the width of the largest crack.

**Keywords:** Crack pattern, digital image analysis, hybrid fibre reinforced concrete, fibre geometry, fibre volume, uniaxial tensile test.

## 1. GİRİŞ

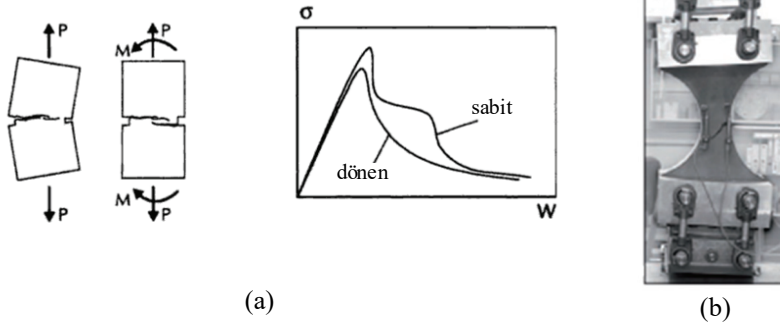
Beton en çok kullanılan yapı malzemesi olmasına rağmen hala bazı yetersizlikleri bulunmaktadır. Basınç gerilmelerine karşı çok iyi bir direnç gösterebilse de çekme gerilmelerinde aynı performansı gösterememektedir. Yüksek olmayan çekme gerilmelerine maruz kaldığında beton çatlak; bir kez çatladığında bu çatlak çok hızlı genişler ve ilerler, bu durum da düşük tokluk özeliğine neden olur. Bu sorunu çözebilmek için betona değişik tipte lifler katılabilmektedir. Birçok çeşit lif ilave edildiğinde betonun yalnızca tokluğu artarken, çekme dayanımında belirgin bir artış olmamaktadır. Her iki özeliğe de iyileştirmeler elde edebilmek amacıyla oluşturulan karma lifli betonlarda kısa lifler çekme dayanımını artırırken uzun lifler şekil değiştirme kapasitesini ve böylece betonun sünekliğini artırır [1-11]. Karma lifli betonlarda liflerin etkin bir şekilde çalışabilmesini sağlayabilmek için beton fazının da iyi optimize edilmiş, yoğun bir mikro yapıda olması gerekir. Böyle bir karışımı oluşturabilmek için işlenebilirliğin de gerekli seviyede olması sağlanır. Bu şekilde tasarlanmış karışımlar ile yüksek/ultra yüksek performanslı betonlar elde edilebilir ve böylece imalat ile servis ömrü boyunca üstün nitelikler gerektiren yapı ve yapı elemanlarında kullanılabilir.

Karma lifli betonların gerilme-şekil değiştirme davranışının Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği ya da Lineer Olmayan Elastik Kırılma Mekanikliği (kohezif modeller) ile tanımlamak malzemenin sünek olması nedeni ile kolay değildir. Van Mier [12, 13] lifli betonların gerilme-şekil değiştirme davranışının elastik, mikro çatlama (stabil), makro çatlama (stabil olmayan) ve köprülenme olmak üzere dört ayrı bölgede incelenebileceğini göstermiştir. Bilindiği gibi kısa ince lifler tepe yükü öncesi mikro çatlama bölgesindeki mikro çatlakları önler ve köprülerken, uzun lifler köprülenme bölgesindeki makro çatlakları önlerler. Bu iyileştirmelerin kombinasyonu ile karma lifli betonlar, gelişmiş mekanik ve kırılma özellikleri gösterirler. Bu tip malzemenin kırılma davranışını belirleyebilmek için deneysel veriler üzerinde çalışılması ve üst düzey kalite kontrol yapılması gerekir. Gerilme-şekil değiştirme davranışı yapısal etkilerden arındırılmış doğal hali ile belirlenerek yapısal eleman analizlerine doğru veriler aktarılmalıdır. Bu durumda da deney yöntemleri önem kazanmaktadır.

Yapısal etkileri en aza indirebilmek için tek eksenli çekme yükleme durumu tercih edilir [14]. Bu durumda Mod-I açılma tipi kırılma görüleceği için yarı gevrek betonların ve sünek lifli betonların gerçek davranışı elde edilebilir. Bu tip deneylerde dikkate alınması gereken diğer konu da deneyde uygulanan sınır şartlarının etkisidir. Tek eksenli çekme deneyinde temel olarak tercih edilebilen sabit sınır ya da serbest dönen sınır şartları olabildiği gibi kontrollü sınır şartları olarak anılan üçüncü bir tip de bulunmaktadır [15]. Dönen sınır şartları numunenin uçlarının deney boyunca serbestçe dönebildiği durum iken sabit sınır şartlarında bu dönme deney düzeneğindeki eğilme rijitliği ile önlenir. Kontrollü sınır şartlarında ise üç

hidrolik yük vericiler ve deformasyon ölçerler (LVDT) kullanılarak deney boyunca numunenin paralel durması sağlanır. Bazı durumlarda kontrol edilen bölge numunenin tamamı veya numunenin sadece orta kısmı olabilir. Kontrollü sınır şartları diğer iki yöntemle göre daha az tercih edilen bir yöntem olmuştur [15].

Sabit ve dönen sınır şartlarının numunenin tek eksenli çekme altındaki davranışı üzerindeki etkisi Şekil 1.1'de görülmektedir [16]. Sabit sınır şartları altında eksantrik dış yükler nedeniyle çatlak oluşumu numunenin bir yüzünde başlar ve deney düzeneğinin eğilme momenti karşılığı ile devam eder. Bu eğilme momenti nedeni ile numunenin diğer yüzünde ikinci bir çatlak oluşumu başlar. Bu durum yük-deplasman eğrisinin yumuşama kısmının tipik platosunu oluşturur. Diğer yandan dönen sınır şartları uygulandığında, önleyici eğilme momentleri oluşmayacağından tek bir ana çatlak oluşur ve numune boyunca devam eder. Kontrollü sınır şartlarında ise yapısal etkiler sabit sınır şartlarından bile daha belirgindir ve üniform deformasyon dağılımı oluşur. Gerçekte yapı içerisinde iki sınır uç paralel tutulsa dahi deformasyon dağılımı üniform olmamaktadır. Van Mier vd. [17] her üç yöntemi karşılaştırdığında kontrollü sınır şartlarının diğer iki yöntemle göre kırılma enerjisini çok büyük hesapladığını göstermiştir. En düşük değerin dönen sınır şartlarında bulunması bu yöntemde sınır değer şartlarının etkisinin minimize edildiğini göstermiştir. Hem dönen hem de sabit sınır şartlı tek eksenli çekme deneyinin bazı avantaj ve dezavantajları olduğundan hangisinin uygulanabileceği hala tartışma konusudur [18]. Ancak, bugüne kadar henüz standart bir çekme deneyi belirlenmediği gibi standart çekme deney numunesi de tanımlanmamıştır. Prizma, silindir (çentikli veya çentiksiz), kalın veya ince kemik ve halter (dambıl) şeklinde numuneler üzerinde çekme deneyi yapılmaktadır.



Şekil 1.1 - (a) Tek eksenli çekme deneyinde sınır şartlarının etkisi ve (b) serbest dönen sınır şartlı deney düzeneğinde kırılmış numune [17].

Kırılma enerjisinin yanında, tepe yükü de sınır değer şartlarından etkilenir. Dönen sınır şartlarında göçme numunenin en zayıf noktasında sınır değer şartlarından bağımsız olarak oluşur [19, 20]. Aynı zamanda dönen sınır şartlarında sonuçların dağılımı sabit sınır şartlarından daha yüksek olması da numunenin kendi iç yapısından etkilendiğini, sınır şartlarının etkisinin olmadığını göstermektedir. Her ne kadar dağılım yüksek olsa da dönen sınır şartlarının çatlak oluşumu ve kırılma davranışını incelemede tercih edilebilme nedenleri: deformasyonun üniform olmaması; sınır şartlarının etkisinin minimize olması; deney düzeneğinden gelen eğilme rijitliğinin neden olduğu yapısal etkilerin altında olmaması

olarak sıralanabilir. Belirgin bir toklaşma bölgesi gösteren lifli betonlarda kırılma davranışını inceleyebilmek için yapısal etkilerin azaltılması gerekir. Özellikle lifli betonlarda çatlak oluşumundan sonra deformasyon dağılımının değişmesi ile çatlağın genişlemesine ve ilerlemesine karşı duran liflerin çalışmasının etkisini görebilmek için de dönen sınır şartları yöntemi faydalı olacaktır. Literatürde daha çok sabit sınır şartları altında lifli betonun performansı incelenmiş [10, 21, 22], dönen sınır şartlarında ise incelemeler sınırlı kalmıştır. Naaman vd. [22] ince numunelerde farklı çekme deneyi sonuçlarını incelemiş ve farklı mesnet şartlarının (sabit ve dönen) ile numune şekillerinin (çentikli ve çentiksiz) lifli betonların farklı çeşitlerinde kullanılabilceğini önermiştir. Karma lifli betonlarda ise çentiksiz numunelerin kullanılması ve dönen sınır şartlarını kesinlikle önermiştir.

Daha önce yapılan çalışmada serbest dönen mesnetli tek eksenli çekme altında üç farklı lif hacmi içeren dört farklı boyuttaki kemik şeklindeki karma lifli betonların boyut etkisi detaylı olarak incelenmiştir [23]. Bu çalışmada ise seçilen tek bir boyuttaki karma lifli betonların deney sonuçları verildikten sonra yük-deplasman davranışı çatlak ilerleme mekanizmaları ile incelenmiş, çatlak yapısının sayısal ve analitik karşılaştırmaları ile lif miktarının etkisi irdelenmiştir.

## **2. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **2.1. Karma Lifli Beton Karışımları**

Bu çalışmada kullanılan deneysel veriler önceki bir çalışma [23] kapsamında gerçekleştirilen tek eksenli çekme deneyi sonuçlarından alınmıştır. Beton karışımları, numune özellikleri ve tek eksenli çekme deneyi ile ilgili bilgiler Akcay [23] tarafından detaylı olarak sunulmuş olduğundan bu yazıda bu bilgilere kısaca yer verilecektir. Benzer matriste ancak hacimce %3, 4 ve 5 gibi farklı miktarlarda lif içeren üç değişik karışım hazırlanmıştır. Düz uçlu benzer çekme dayanımında (2400 MPa) olan çelik lifler, iki farklı geometrik narinlik oranında kullanılmıştır. Kısa liflerin çapları 0.15 mm ve boyları 6 mm iken uzun liflerin çapları

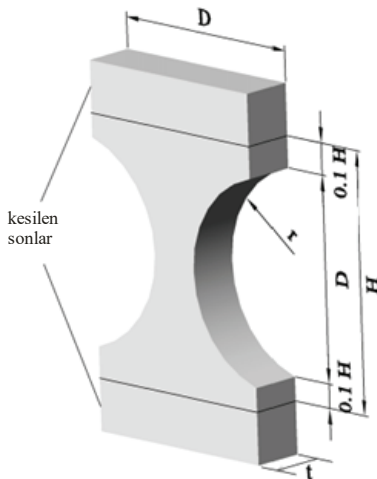
*Tablo 2.1 - Karma lifli betonların karışım miktarları ve bazı mekanik özellikleri.*

	KLB-%3 [2+1]	KLB-%4 [2+2]	KLB-%5 [4+1]
Çimento (CEM I 52.5)	960	968	958
Silis dumanı	91	92	91
Uçucu kül	161	162	161
Kum (0-1 mm)	724	731	722
Su	218	220	217
Yüksek oranda su azaltıcı katkı	20.93	22.16	23.95
Kısa lif	150.80	153.78	309.01
Uzun lif	75.40	153.78	79.23
Akış çapı [mm]	63	45	45
Basınç dayanımı [MPa]	130	134	133
Elastisite Modülü [GPa]	36.3	36.6	37.8

0.2 mm ve boyları 12 mm'dir. Su/çimento oranı (0.23) ve su/bağlayıcı oranı (0.18) sabit olan matris CEM I 52.5 çimentosu, silis dumanı ve uçucu külden üretilmiş ve yüksek oranda su azaltıcı katkı ile kıvamı ve işlenebilirliği yeterli, homojen karışımlar elde edilmiştir. Karışım oranlarının verildiği Tablo 2.1'de görüldüğü gibi ilk karışım (KLB-%3) %2 kısa lif ve %1 uzun lif içerirken, ikinci karışım (KLB-%4) %2 kısa ve %2 uzun lif içermektedir. Üçüncü karışım (KLB-%5) ise %4 kısa lif ve %1 uzun lif ilavesi ile üretilmiştir. Böylece hem toplam lif miktarının hem de lif geometrisinin etkisi incelenmiştir. KLB-%3 ve KLB-%4 serilerinin karşılaştırılması ile uzun lif miktarı arttırdığındaki etkiler, KLB-%3 ve KLB-%5 serilerinin karşılaştırılmasında ise kısa lif miktarı arttırıldığındaki etkiler belirgin bir şekilde ortaya konulmuştur. Her bir seri tek seferde üretilmiştir. Betonların işlenebilirliğini istenen seviyelere getirebilmek için büyük miktarlarda yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. % 3 oranında lif içeren karışımın akış çapı 63 mm iken, diğer iki seride daha fazla katkı kullanılmamak için akış çapı 45 cm olacak şekilde üretilmiştir.

## 2.2. Numune Özellikleri

Karma lifli betonlarda tek eksenli çekme deneyi yapabilmek için kemik şeklinde numuneler kullanılmıştır. Bu tip numunelerin çekme dayanımını belirlemede tercih edilen bir yöntem olduğu bilinmektedir [14, 17, 24, 25]. Olası duvar etkilerini azaltmak ve gerilme ile şekil değiştirme gibi sürekli değişkenleri temsil edebilecek hacme ulaşabilmek için numune kesitinin en küçük boyutunun kullanılan lif uzunluğunun en az üç katı olmasına dikkat edilmesi gerekir [21]. Kemik numunelerinde diğer önemli bir konu da numunede oluşturulacak olan körfözler ile keskin kenarlardan eğimli kenarlara geçişin sağlanarak gerilme yığılmalarının önlenmesidir [14]. Bu nitelikler göz önüne alınarak en küçük kesiti 100 mm × 100 mm, boyu 500 mm olan Şekil 2.1'de şematik olarak da görülebilen numuneler üretilmiştir. Numunelerin alt ve üst sonları kesildikten sonra bir yapıştırıcı ile alüminyum plakalar yapıştırılmıştır. Bu plakalar ile daha sonra yükleme düzeneğine bulonlar yardımıyla bağlanmıştır.



$H=500 \text{ mm}$   
 $D=400 \text{ mm}$   
 $r=200 \text{ mm}$   
 $t=100 \text{ mm}$

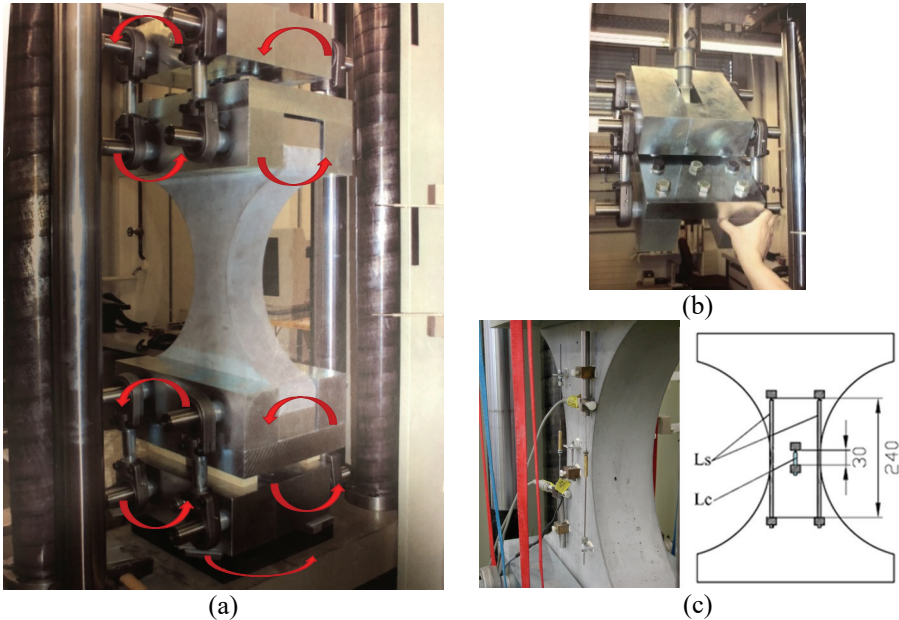


Şekil 2.1 - Tek eksenli çekme deneyi için hazırlanmış kemik numunelerin biçim ve boyutları.

Basınç dayanımını ve elastisite modülünü belirlemek için ise 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler puzolan içerdikleri için üretimden 56 gün sonra test edilmiştir. Her bir serinin basınç dayanımı ve elastisite modülü sonuçları Tablo 2.1’de verilmiştir. Bulunan değerler beş numunenin ortalamasıdır. Tabloda da görüldüğü gibi yüksek dayanımlı bir beton fazı karışımların hepsinde elde edilmiştir.

### 2.3. Tek Eksenli Çekme Deneyi

Kemik şeklindeki numunelerde tek eksenli çekme deneyi dönen sınır şartlarında yapılabilmesi için pandül çubuklar kullanılarak kuvvetlerin merkezi kalması ve mesnetlerin serbestçe dönebilmesi sağlanmıştır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi sekiz adet pandül çubuk kullanılmış ve bu çubuklar üst ve alt mesnetleri birbirine bağlamıştır. Yükleme çerçevesi içerisine numune sonlarındaki iki ortogonal doğrultuda serbestçe dönebilen mafsallar yerleştirilmiştir. Numune sonları iki yatay geçiş çubuğu ve dörder pandül çubuk ile mafsalları yapısına bağlanmıştır. Pandül çubukların bu geçiş çubuklarına mafsallar ile bağlanması ile sistemin 360° düzlem içi yönünde, 8° düzlem dışı yönünde dönmesine izin verilmiştir. Bu pandül çubuklar sayesinde hidrolik yükleyiciden gelen kuvvet pandül çubuklarda dört kuvvete bölünmüş ve yükleme plakasına bağlı olan geçiş çubuğu ile numune kalınlığı boyunca dağılmıştır. Her bir pandül çubuğun uzunluğu 270 mm’dir. Mesnetin dönme eksen merkezi numune ve yapıştırılan plakanın ara yüzeyinin ortası olarak belirlenmiştir. Benzer deney düzeneği daha önce birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [14, 23, 26, 27, 28]. Test aletinin yükleme hücresinin kapasitesi 200 kN’dur.



*Şekil 2.2 - (a) Tek eksenli yükleme deney düzeneği (oklar numunenin dönme merkezi etrafındaki döneli hareketini göstermektedir), (b) serbest dönebilen mafsal sistemi ve (c) LVDT'lerin yerleşimi.*



Numunedeki deformasyonları ölçmek için her bir yüze üçer tane LVDT eklenmiştir (Şekil 2.2). Numune yüzeyinin kenarlarında olan LVDT'lerin ( $L_s$ ) ölçü boyu 240 mm iken tam merkeze yerleştirilmiş olan LVDT'nin ( $L_c$ ) ölçü boyu 30 mm'dir. Merkeze yerleştirilen LVDT'ler küçük deplasmanlarda deneyler arasındaki tutarlılığı gözlemlemek için kullanılmıştır.

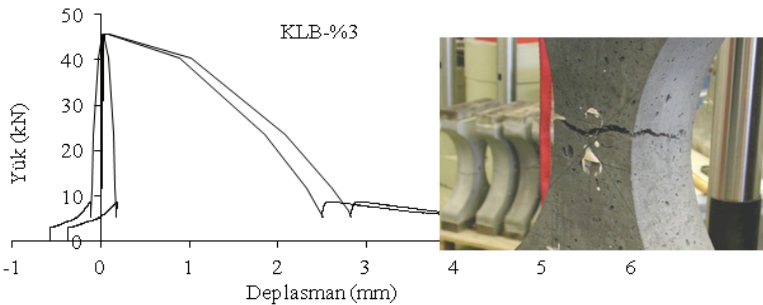
## 2.4. Çatlak yapısı incelemeleri

Çekme deneyi sonrasında oluşan çatlakları ve hasarı belirleyebilmek için vakum doyurma yöntemi uygulanmıştır [16]. Yüklemeden sonra boyun bölgesindeki kırılmış kısım elmas daire ile kesilerek bir kutunun içerisinde vakuma yerleştirilmiştir. Daha sonra kutu vakum altında yeteri süre bekletildikten sonra flüoresans epoksi reçine ile doldurulmuştur. Böylece numune içerisindeki tüm boşluk, kusur ve çatlaklar bu reçine ile doyurulmuştur. Reçine sertleştikten sonra elmas daire ile örnekler yükleme doğrultusuna dört paralel dilime ayrılmıştır. Her bir dilimin her iki yüzeyi de mor ötesi ışık altında dijital olarak görüntülenmiştir. Daha sonra görüntü inceleme programları ile analiz edilerek, çatlak ve kusurların yerleri ve geometrik özellikleri tespit edilmiştir.

## 3. SONUÇLARIN İRDELENMESİ

### 3.1. Yük-Deplasman Eğrileri

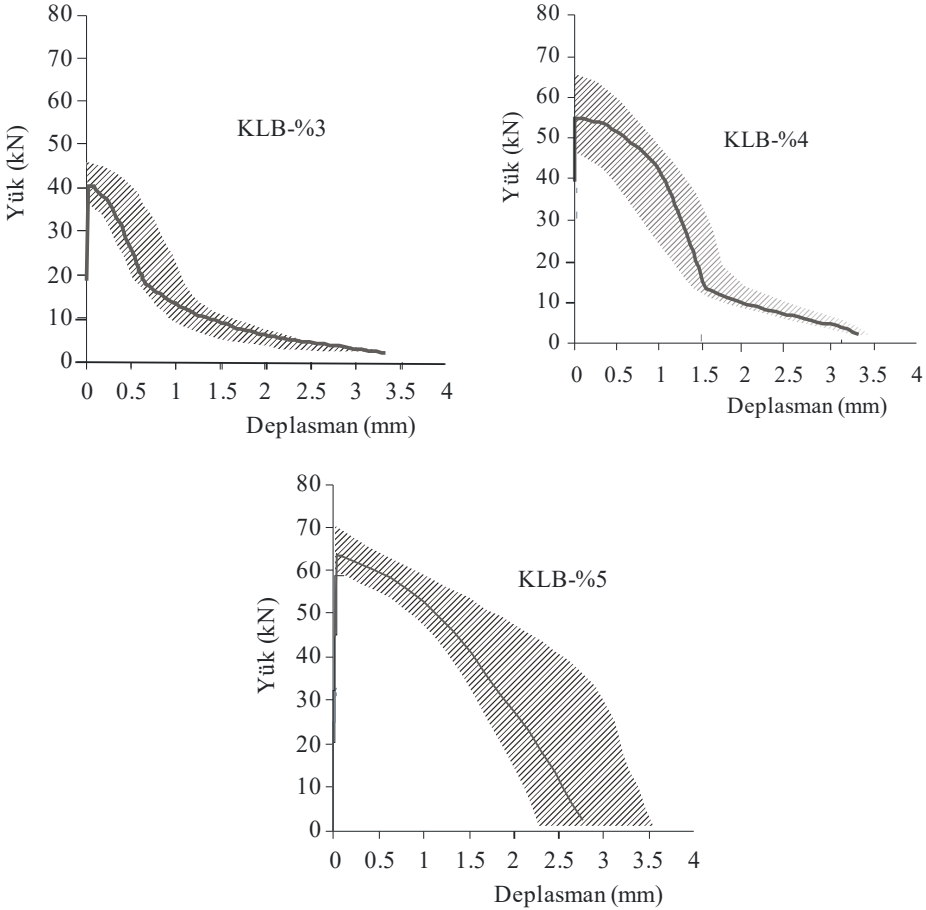
Yukarıda da belirtildiği gibi bu yazıdaki deney sonuçları, önceki bir çalışmada [23] sunulan beton örneklerinin tek eksenli çekme altındaki yük-deplasman eğrilerinden alınmıştır. Bu çalışmada ise bu deneysel veriler kullanılarak lifli betonların tokluk parametreleri elde edilmiş, yükleme altında oluşan çatlakların incelenmesi ile elde edilen çatlak alanı ve en büyük çatlak açıklığı değerleri irdelenerek yeni sonuçlara ulaşılması amaçlanmıştır. Şekil 3.1'de %2 kısa ve %1 uzun lif içeren KLB-%3 serisine ait bir numunenin yük-deplasman eğrisi görülmektedir. Bu diyagramda numunenin hem arka hem de ön yüzüne iliştirilmiş olan LVDT sonuçları farklı değerler göstermektedir. Pandül çubuklar sayesinde serbestçe dönebilen mesnetler yardımıyla Mod-I çatlak açılmasının olduğu görülmektedir. Çatlağın açıldığı yüzdeki LVDT ölçümleri uzama gösterirken çatlak ağzının arka tarafında kısılma göstermiştir. LVDT'lerin kısılma göstermesi çatlak açılmasının arkasındaki bölgelerin basınç altında olduğuna işaret eder [23].



Şekil 3.1 - KLB-%3 serisine ait bir örneğin yük-deplasman eğrisi

Çatlak numunenin ön yüzünden arka yüzüne doğru ilerlemiştir. Bazı durumlarda arkadaki LVDT'ler hızla kısalma değeri verirken ön yüzdeki LVDT'lerin tepe yükünde çok sivri olmayan değerler vermesi durumunda ise ön yüzden arka yüze doğru çatlak ilerlerken başka bir çatlakın da ilerlemesi gözükür. Diğer bir kırılma şeklinde ise tüm LVDT'lerde uzama değerleri alınır ancak arka yüzdeki LVDT'lerdeki bu değerler ön yüzdekine göre daha düşüktür. Bu durum tüm kesitin simetrik olarak çekme altında olduğunu, ön yüzün her iki tarafında da çatlakların başlayıp arka yüze doğru ilerlediğini gösterir. Son duruma özellikle yüksek oranda lif kullanıldığı zaman karşılaşılmıştır. Deneyler, tepe yükten önce oluşan çoklu çatlakların, tepe yükten sonra tek bir ana çatlakta yerleştiğini göstermiştir. Çoklu çatlama ince kısa liflerin miktarının artırılması ile elde edilebilirken uzun lifler yerleşmiş makro çatlakın köprülenme miktarını çoğaltmıştır.

Şekil 3.2 üretilen tüm karma lifli betonların LVDT'lerden alınan ortalama deplasman değerlerine göre belirlenmiş yük-deplasman diyagramlarını göstermektedir. Diyagramlardaki eğriler ortalamayı temsil eden numuneyi, taralı alanlar ise diğer numunelerin eğrilerinin bulunduğu alanları belirlemektedir.



Şekil 3.2 - Tüm karışımların yük-deplasman eğrileri [23].

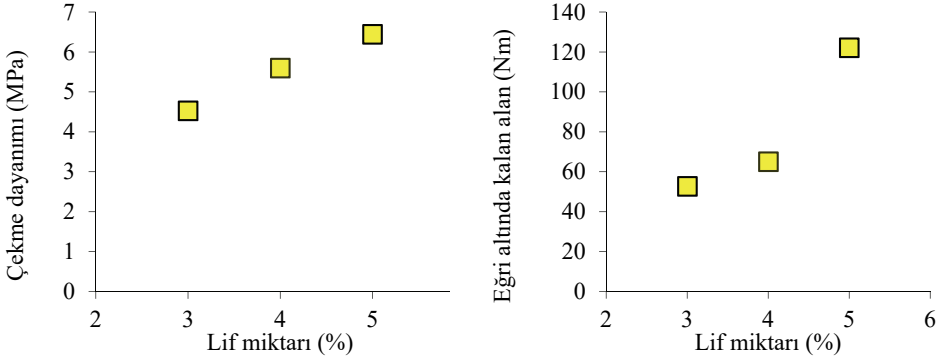
Sonuçlar, artan lif miktarı ile tepe yükün arttığını göstermektedir. Beklenildiği gibi, tepe yükteki deplasman ve tepe yük sonrası köprülenme bölgesi artan lif miktarı ile artmıştır. Bu üç beton benzer matrise sahip olsa da (Tablo 2.1’de verildiği gibi benzer basınç dayanımına sahiptirler), çatlama alanındaki artan lif miktarı daha fazla lif köprülenmesi ile sonuçlanmıştır. Diğer yandan, sıyrılan lif miktarı çatlama mekanizmasındaki diğer bir faktördür. Çekip-çıkarma süreci rijitliği azaltır ve yük-deplasman eğrisinde tepe yükten önce lineer olmayan davranışa neden olur [23].

Tüm karışımların deney sonuçları ile her bir serinin ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi lif hacmi arttıkça hem çekme dayanımı hem de betonun tokluğu artmıştır. Uzun liflerin hacminin %1’den %2’ye artması ile çekme dayanımı 4.53 MPa’dan 5.60 MPa’a yükselirken, kısa liflerin hacminin %2’den %4’e çıkması çekme dayanımını 6.44 MPa seviyesine, tokluğunu da iki katından fazla bir seviyeye getirmiştir.

Tablo 3.1 - Tüm numunelerin deney sonuçları, ortalama ve standart sapma değerleri.

	numune no	Çekme dayanımı (MPa)	Yük-deplasman eğrisinin altında kalan alan (Nm)	Tepe yükü deplasmanı (mm)
KLB-%3	1	5.22	64.4	0.0337
	2	4.38	51.7	0.0920
	3	4.55	49.5	0.0550
	4	4.02	40.9	0.0254
	5	4.46	57.1	0.0323
	ortalama	4.53	52.7	0.0477
	standart sapma	0.44	8.7	0.0272
KLB-%4	1	5.26	67.8	0.0356
	2	4.56	52.0	0.1798
	3	6.46	85.9	0.0658
	4	5.39	87.4	0.0326
	5	6.32	32.2	0.0433
	ortalama	5.60	65.1	0.0714
	standart sapma	0.8	23.4	0.0620
KLB-%5	1	6.84	57.9	0.0338
	2	6.35	109.0	0.0446
	3	7.03	163.4	0.0382
	4	6.13	190.8	0.0926
	5	5.87	89.3	0.0325
	ortalama	6.44	122.1	0.0483
	standart sapma	0.5	54.3	0.0252

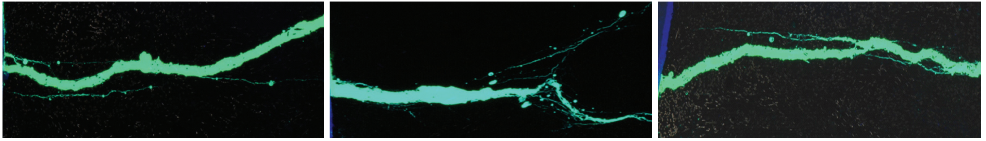
Kısa liflerin yalnızca tepe yükünü arttırmadığı uzun lifler ile birlikte karma olarak kullanıldığında tepe yükünden sonraki davranışa da etkiyerek tokluğu da artırdığı görülmüştür (Şekil 3.3). Numune geometrisinde seçilen eğrisel körfezler sayesinde taze haldeki karma lifli beton kalıbın boyun bölgesinden hızla geçmiştir ve böylece liflerin önemli bir kısmı yüklenme doğrultusuna paralel yönelmiştir. Prizmatik numunelerde görülen duvar etkisiyle lif yöneliminin değişmesinin mekanik performans üzerindeki etkisi kemik numunelerde kullanılan geometrik biçim nedeniyle daha azdır. Serbest dönen mafsal sisteminde daha önce de bahsedildiği gibi malzemedeki çatlak oluşumu yapısal etkilerden arındırıldığı için içyapı kontrolünde kırılır ve bu yüzden sonuçlar dağınık çıkmaktadır. Standart sapma değerleri yüksek de olsa uzun liflerin hacminin artmasıyla tepe yükündeki deplasman değerinin de arttığı söylenebilir.



*Şekil 3.3 - Lif miktarının çekme dayanımı ve yük-deplasman eğrisinin altında kalan alan ile ilişkisi.*

### **3.2. Çatlak Yapısının İncelenmesi**

Şekil 3.4'te her bir karma lifli beton serisinden çatlak açılmanın başladığı yüze paralel alınan ilk kesitteki mor ötesi ışık altındaki çatlak yapıları görülmektedir. Mod-I açılma şeklindeki çatlakların üç karma lifli beton serisinde de görüldüğü belirlenmiştir [23].



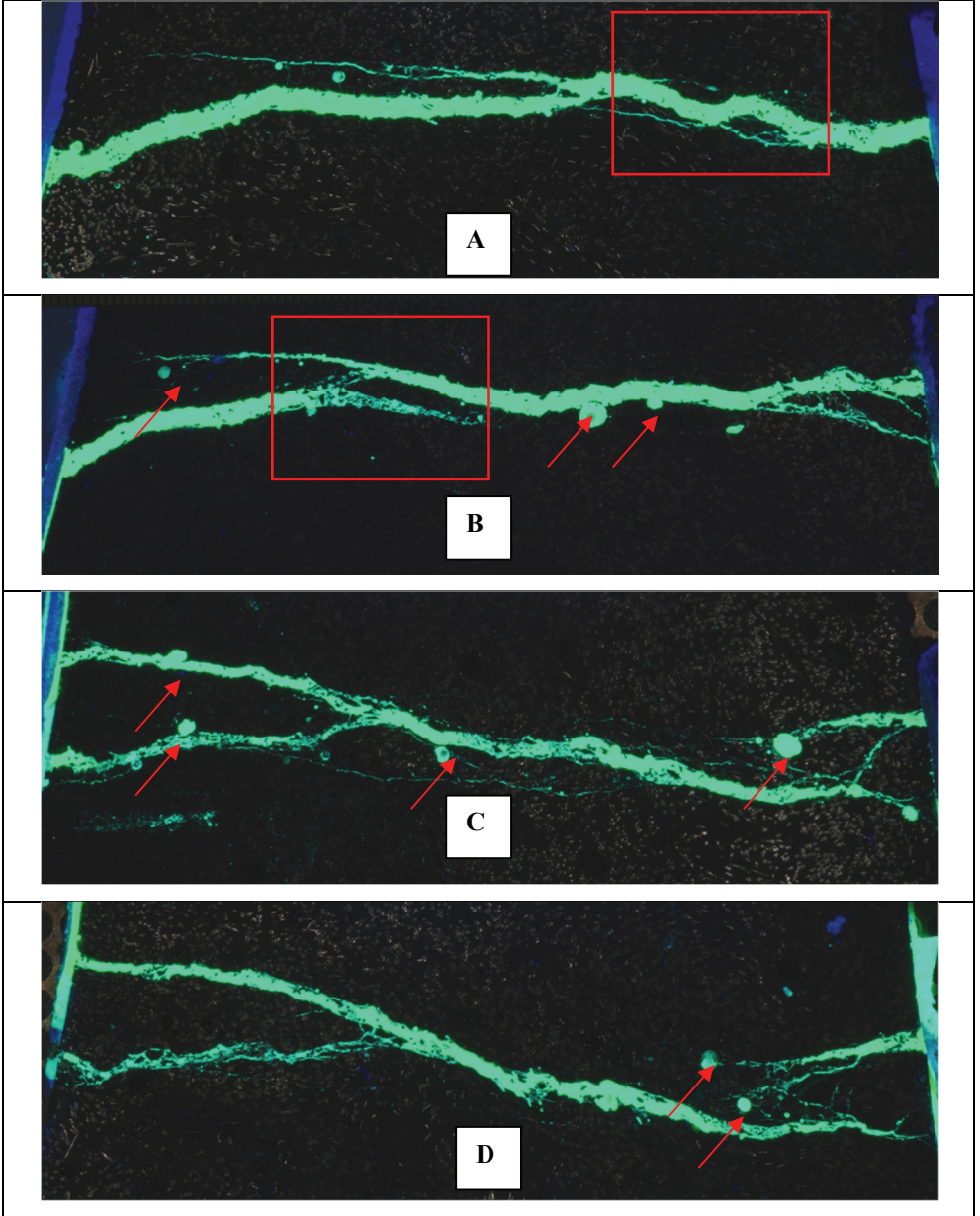
KLB-%3

KLB-%4

KLB-%5

*Şekil 3.4 - Karışımların çatlak açılmanın olduğu ön yüzdeki ilk kesitlerinin görüntüleri [23].*

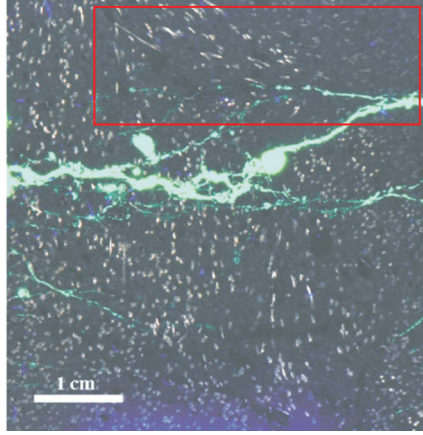
Çatlak ilerlemesinin karma lifli betonun içyapısı ve lif dağılımı ile ilişkisi KLB-%5 serisinde açıklanmıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi hacimce %5 oranında lif içeren karışımda lif dağılımı çatlak ilerleme mekanizmasında etkili olmuştur.



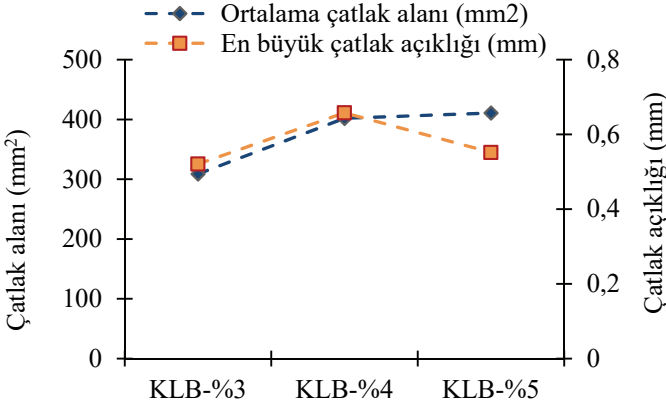
Şekil 3.5 - KLB-%5 serisinde kırılma alanından alınan dört dilimdeki çatlak yapıları.

Çatlak ağzı açılmasının başladığı A kesitinde dikdörtgen ile belirtilen yerde liflerin yüklemeye paralel doğrultuya yakın yönelmeleri ve lif miktarının beton matrisin diğer bölgelerine göre az olması nedeni ile çatlakın yön değiştirdiği görülmektedir (Bu etki Şekil 3.6'da verilen fotoğrafta daha belirgin bir şekilde görülmektedir). Çatlak ağzından

uzaklaştıkça Şekil 3.5'teki B, C ve D kesitlerinde çatlak dallanma mekanizmalarının çalıştığı beton matris fazı içerisindeki boşluklara (bir kısmı kırmızı oklar ile belirtilen) doğru yeni kollar oluştuğu görülmektedir. Buradan çatlak yönünü belirleyen etkili faktörün liflerden daha çok boşluklar olduğu söylenebilir. Çatlaklar büyük oranda matris fazındaki boşlukları birleştirecek şekilde yönelim göstermektedir. B kesitinde ise liflerin çatlak köprülenme mekanizmasına etkisi görülmektedir. Lifler çatlakları açılmasını önleyecek şekilde köprüler. Bu görüntüler aynı zamanda beton dış yüzeyinde sadece tekil bir çatlak görünmesine rağmen betonun iç kısımlarına ilerledikçe dış yüzeyde görünmeyen farklı çatlakların oluştuğunu, dallandığını ve köprülendiğini de göstermiştir.



*Şekil 3.6 - Çatlak yönelmesi ve dallanmasının lif dağılımından etkilenmesi.*



*Şekil 3.7 - Üretilen karma lifli betonların dijital görüntü analizleri ile bulunan çatlak alanı ve çatlak açıklığı değerleri (Her bir değer iki farklı numuneden alınan sonuçların ortalamasıdır).*

Her bir karma lifli beton karışımının iki numunesinde görüntü analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde görüntülerdeki çatlak alanları ve yüklemeye paralel yöndeki en büyük çatlak açıklıkları belirlenmiştir. Her bir dilimdeki görüntüler önce ikili hale getirilerek gri skalalı alanlar ile çatlakların yerleri ve geometrileri belirlenmiş, daha sonra bu alanlar yazılım sayesinde hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda numuneler içindeki çeşitli boşluklar da çatlak veya kusur olarak algılanarak hesaplamalara katılmıştır. Yükleme bittikten sonra çatlakların bir kısmı elastik toparlanma sonucu kapansa da bu durum her seride bulunacağından karşılaştırmalara etkisi çok az olacaktır. Dört farklı dilimdeki çatlak alanlarının ortalaması alınarak seriyi temsil eden çatlak alanı bulunmuş ve kırılma özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi uzun liflerin oranı %1'den %2'ye artırıldığında çatlak alanı ve en büyük çatlak boyu belirgin bir şekilde artmıştır. KLB-%3 serisi ile KLB-%5 serisinde uzun lifler aynı hacimde iken KLB-%5 serisinde kısa liflerin oranının %4'e çıkmasıyla ortalama çatlak alanı %33, en büyük çatlak açıklığı %6 oranında artmıştır. Bu artış da çekme dayanımı ve tokluktaki belirgin artışla tutarlı bir sonuç vermiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Üretilen karma lifli betonlarda yapılan deneysel çalışmalar ve dijital görüntü analizleri ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Yapısal etkileri en aza indirecek şekilde tasarlanan deney düzeneği ile üç farklı lif içeriğindeki karma lifli betonlarda tek eksenli çekme yüklemeleri ile çatlama numunenin bir yüzünde başlamış ve göçme en doğal formunda sürmüştür. Lif hacmi arttıkça hem çekme dayanımı hem de betonun tokluğu artmıştır. Beklenildiği gibi, tepe yükteki deplasman ve tepe yükü sonrası köprülenme bölgesi artan lif miktarı ile artmıştır. Artan uzun lif miktarı ile çatlak açıklıkları yani deplasmanlar belirgin bir şekilde artmıştır. Kısa lif miktarının artması ise büyük miktarlarda tepe yükün artması ile sonuçlanmıştır. Çatlama alanındaki toplam lif miktarının artması ise liflerin köprülenmesi ve dolayısıyla çoklu-çatlama ile sonuçlanmıştır. Kısa liflerin yalnızca tepe yükünü arttırmadığı uzun lifler ile birlikte karma olarak kullanıldığında tepe yükünden sonraki davranışa da etkileyerek tokluğu da arttırdığı görülmüştür.
- Görüntü analizleri karma lifli betonlarda çatlağın hiçbir zaman doğrusal olmadığını betonun iç kısımlarına ilerledikçe dış yüzeyde görünmeyen çoklu çatlamanın, çatlak dallanmalarının ve çatlak köprülenmelerinin bulunduğunu göstermiştir. Kısa lifler arttıkça ortalama çatlak alanı belirgin bir şekilde artarken uzun liflerin miktarı arttıkça en büyük çatlak açıklığının arttığı belirlenmiştir. Çoklu çatlamanın fazla olması daha yüksek tokluğu oluşturmuştur. Böylece betonda belli bir değerdeki tokluk ve çekme dayanımının, lif hacim ve biçimlerinin değişik oranları ile elde edilebileceği görülmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışmadaki deneyler ETH-Zurich, Institute for Building Materials laboratuvarlarında sürdürülmüştür.

### **Kaynaklar**

- [1] Rossi, P., Acker, P., Mallier, Y., Effect of steel fibres at two stages: the material and the structure. *Mater. Struct.*, 20, 436-439, 1987.
- [2] Mobasher, B., Li, C.Y., Mechanical properties of hybrid cement-based composites. *ACI Mater. J.*, 93(3), 284-292, 1996.
- [3] Yao, W., Li, J., Wu, K., Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cem. Conc. Res.*, 33(1), 27-30, 2003.
- [4] Lawler, J.S., Wilhelm, T., Zampini, D., Shah, S.P., Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar. *Mater. Struct.*, 36(257), 197-208, 2003.
- [5] Banthia, N., Gupta, R., Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. *Mater. Struct.*, 37(274), 707-716, 2004.
- [6] Banthia, N., Sappakittipakorn, M., Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cem. Conc. Res.*, 37(9), 1366-1372, 2007.
- [7] Sahmaran, M., Yaman, I.O., Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. *Cons. Build. Mater.*, 21(1), 150-156, 2007.
- [8] Kim, D.J., Park, S.H., Ryu, G.S., Koh, K.T., Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Cons. Build. Mater.*, 25(11), 4144-4155, 2011.
- [9] Kim, D.J., Park, S.H., Ryu, G.S., Koh, K.T., Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Cem. Conc. Compos.*, 34(2), 172-184, 2012.
- [10] Akcay, B., Tasdemir, M.A., Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Cons. Build. Mater.*, 28(1), 287-293, 2012.
- [11] Markovic, I., van Mier, J.G.M., Walraven, J.C., Development of high performance hybrid fibre concrete, Proceedings 4th International RILEM Workshop on High Performance Hybrid Fibre Concrete HPRCC-4 (Naaman, A.E., Reinhardt, H.W., Eds.), RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, Mainz, Germany, 277-300. 2003.
- [12] van Mier, J.G.M., Reality behind the fictitious crack?, Proceedings of International Conference on Fracture of Concrete and Concrete Structures-FraMCoS 5, Evanston, Illinois, 11-30, 2004.
- [13] van Mier, J.G.M., Framework for a generalized four-stage fracture model of cement-based materials. *Eng. Fract. Mech.*, 75(118), 5072-86, 2008.
- [14] van Vliet, M.R.A., Size effect in tensile fracture of concrete and rock, PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2000.
- [15] Ferro, G., Effetti di scala sulla resistenza a trazione dei materiali (Scale effects on tensile properties of materials), PhD thesis, Politecnico di Torino, 1994.



- [16] van Mier, J.G.M., Mode I fracture of concrete: discontinuous crack growth and crack interface grain bridging. *Cem. Concr. Res.*, 21(1), 1-15, 1991.
- [17] van Mier, J.G.M., Vervuurt, A., Schlangen, E., Boundary and size effects in uniaxial tensile tests: a numerical and experimental study, *Proceedings of International Conference on Fracture and Damage of Quasi-Brittle Structures* (Bazant, Z.P., Bittnar, Z., Jirasec, M., Mazars, J., Eds), E&FN Spon, London/NewYork, I 289–302, 1994.
- [18] van Mier, J. G.M., Mechtcherine, V., Minimum demands for deformation-controlled uniaxial tensile tests, RILEM TC 187-SOC, *Experimental Determination of the Stress-Crack Opening Curve for Concrete in Tension* (Planas, J. Ed.), Report 39, RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, 5-12, 2007.
- [19] Gjørsv, O.E., Sorenson, S., Arnesen, A., Notch sensitive and fracture toughness of concrete. *Cem. Conc. Res.*, 7, 333-344, 1977.
- [20] van Mier, J.G.M, Schlangen, E., Vervuur,t A., Tensile cracking in concrete and sandstone. Part II-effect of boundary conditions. *Mater. Struct.*, 29(186), 87-96, 1996.
- [21] Mechtcherine, V., Testing behaviour of strain hardening cement-based composites in tension - summary of recent research, *Proceedings 5th international conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPRCC-5* (Reinhardt, H.W., Naaman, A.E., Eds.), RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, Mainz, Germany, 3-12, 2007.
- [22] Naaman, A. E., Fischer, G., Krstulovic-Opara, N., Measurement of tensile properties of fibre reinforced concrete: Draft submitted to ACI Committee 544. *Proceedings 5th international conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPRCC-5* (Reinhardt, H.W., Naaman, A.E., Eds.), RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, Mainz, Germany, 3-12, 2007.
- [23] Akcay, B., Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete. *Compos. Part B- Eng.*, 43(2), 766-778, 2012.
- [24] Markovic, I., *High Performance Hybrid Fibre Concrete-Development and Utilisation*, PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2006.
- [25] Carpinteri, A., Ferro, G., Size effects on tensile fracture properties: a united explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure. *Mater. Struct.*, 10(2), 563-571, 1994.
- [26] Schlangen, E., *Experimental ad numerical analysis of fracture process in concrete*, PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1993.
- [27] Stähli, P., van Mier, J. G. M., Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. *Eng. Fract. Mech.*, 74, 223-242, 2007.
- [28] Vořechovský, M., Interplay of size effects in concrete specimens under tension studied via computational stochastic fracture mechanics. *Int. J. of Solids and Struct.*, 44(9), 2715-2731, 2007.



# İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline Etkisinin İncelenmesi

Ezgi KOCAMAN<sup>1</sup>  
Merve KURU<sup>2</sup>  
Gülben ÇALIŞ<sup>3</sup>

## ÖZ

Bu çalışmanın amacı (1) sözleşme bedeli ve ihale usulü; (2) sözleşme bedeli ve ihale eşik değer durumu; (3) sözleşme bedeli ve sözleşme türü; (4) sözleşme bedeli/yaklaşık maliyet oranı ve ihale usulü arasındaki ilişkinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, 2007 ve 2017 yılları arasında yaklaşık 169.9 milyon USD tutarlı açık ihale usulü, yaklaşık 25.9 milyon USD tutarlı belli istekliler arasında ihale usulü, yaklaşık 25.6 milyon USD tutarlı pazarlık usulü olarak gerçekleştirilen toplam 219.546 adet yapım işi ihale verisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, ihale usulü, ihale eşik değer durumu ve sözleşme türünün sözleşme bedelleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, pazarlık usulü, sözleşme bedeli/yaklaşık maliyet oranında istatistiksel olarak farka neden olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapım işi, sözleşme bedeli, yaklaşık maliyet, ihale usulü, sözleşme türü.

## ABSTRACT

### Investigating the Effect of Tendering Procedure and Contract Type on the Construction Contract Price

This study aims at investigating the relationship between (1) contract price and tendering procedure (2) contract price and threshold value (3) contract price and contract type (4) contract price/approximate cost ratio and tendering procedure. Within this context, a total of 219.546 tender procedures of construction work data between the years 2007 and 2017, which involves open tender procedures worth approximately 169.9 million USD, restricted

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 7 Eylül 2018 günü ulaştırılmıştır. 18 Mart 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.458054>

1 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ezgkcmn@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-1013-0904>

2 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - mervekuru25@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-2698-6491>

3 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - gulben.calis@ege.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3056-4870>

tender procedures worth 25.9 million USD, negotiated tender procedures worth approximately 25.6 USD, were analyzed. The results show that tendering procedure, threshold value and the contract type have a statistically significant effect on the contract prices. In addition, negotiated tender procedure causes a statistical significance on the contract price/approximate cost ratio.

**Keywords:** Construction work, contract price, approximate cost, tendering procedure, contract type.

## 1. GİRİŞ

Kamu ihtiyaçlarının en iyi şekilde, uygun şartlarla zamanında karşılanması ve ihalede açıklık ve rekabet koşullarının sağlanması Türk kamu ihale sisteminin temelini oluşturmaktadır. 2002 yılında yürürlüğe giren 4734 sayılı Kamu İhale Kanunu ile kanunda belirtilen görevleri yapmak üzere, kamu tüzel kişiliğine haiz, idari ve malî özerkliğe sahip Kamu İhale Kurumu (KİK) oluşturulmuştur. Böylece kamu ihalelerindeki uygulamaları yönlendirecek, şikâyetleri çözüme bağlayacak, hukuken ve idari olarak bağımsız ve tarafsız bir kurum oluşturulmuş olmaktadır. 4734 sayılı Kamu İhale Kanunu madde 2 gereğince Kanunda belirtilen idarelerin kullanımında bulunan her türlü kaynaktan karşılanan mal veya hizmet alımları ile yapım işlerinin ihaleleri bu Kanun hükümlerine göre yürütülür. Mal alımı satın alınan her türlü ihtiyaç maddeleri ile taşınır ve taşınmaz mal ve haklarını; hizmet alımı ise taşınır ve taşınmaz mal ve hakların kiralanması ve benzeri diğer hizmetlerini ifade etmektedir. Yapım işi bina, karayolu, demiryolu, otoyol, liman, baraj, alt yapı ve benzeri yapım işlerini ifade etmektedir.

4734 sayılı Kamu İhale Kanunu madde 18 idarelerce mal veya hizmet alımları ile yapım işlerinin ihalelerinde açık ihale, belli istekliler arasında ve pazarlık usullerinden birinin uygulanacağını belirtir. Açık ihale usulü bütün isteklilerin teklif verebildiği; belli istekliler arasında ihale usulü ön yeterlilik değerlendirmesi sonucunda idare tarafından davet edilen isteklilerin teklif verebildiği; pazarlık usulü ise idarenin ihale konusu için teknik detayları ile gerçekleştirme yöntemlerini ve belli hallerde fiyatı isteklilerle görüştüğü usuldür.

4735 sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanunu 6. Maddesi ihaleler sonucunda yapılacak sözleşme türlerini tanımlanmaktadır. Anahtar teslimi götürü bedel sözleşme yapım işlerinde işin tamamı için isteklinin teklif ettiği toplam bedel üzerinden düzenlenen; götürü bedel sözleşme mal veya hizmet alımı işlerinde işin tamamı için isteklinin teklif ettiği toplam bedel üzerinden düzenlenen; birim fiyat sözleşme yapım işlerinde her bir iş kaleminin miktarı ile bu iş kalemleri için istekli tarafından teklif edilen birim fiyatların çarpımı sonucu bulunan toplam bedel üzerinden düzenlenen; karma sözleşme ise yapım işlerinde iş kalemlerinin bir kısmı için anahtar teslimi götürü bedel, bir kısmı için birim fiyat teklifi alma yöntemleri ile gerçekleştirilen ihaleler sonucunda düzenlenen sözleşmelerdir. Sözleşme türünün seçimi proje riskleri açısından önem taşımaktadır. Götürü bedelli sözleşmeler ve birim fiyatlı sözleşmelerin mal sahibi (idare) ve yüklenici firma açısından risklerin dağılımı Çizelge 1’de verilmektedir.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde bireylerin ihtiyaçları değişim ve gelişim göstermektedir. Kamu kurumlarının da ihtiyaçları tıpkı bireyler gibi değişmekte ve gelişmektedir. Bu değişim ve gelişim sonucunda kamu hizmetlerinde meydana gelen

Çizelge 1 - Sözleşme türlerindeki risklerin dağılımı [1]

	<b>Götürü Bedelli</b>	<b>Birim Fiyat</b>
	<b>Sözleşmeler</b>	<b>Sözleşmeler</b>
<b>Projelerin ihale aşamasında</b>	İhale aşamasından önce tasarım ve detayların hazırlanması gereklidir.	İşin özelliği değişmemek kaydıyla tüm detayların hazır olması gerekmeyebilir.
<b>Proje değişikliği nedeniyle keşif artışında esneklik</b>	Çok kısıtlı	Belirli bir oranda iş artışı veya eksilişi olabilir.
<b>Önerilen değişiklik nedeniyle çıkabilecek anlaşmazlıklar</b>	Değişikliklerden kaynaklanan anlaşmazlık olasılığı yüksektir.	Değişiklikler sözleşmede belirlenen fiyatları kapsayacağından, değişikliklerden kaynaklanan anlaşmazlık olasılığı genellikle düşüktür.
<b>Toplam maliyet</b>	Önceden belirlenmiştir. Maliyetin önceden belirlenmiş olması işveren için bir avantajdır.	Maliyet iş artış veya eksilişine göre değişiklik gösterebilir.
<b>Yüklenicinin riskler için yaptığı düzenleme</b>	İhale öncesinde teklif hazırlanırken olası riskler göz önünde bulundurulmalı ve maliyete bir risk toleransı dahil edilmelidir.	Yüklenici olası riskleri göz önünde bulundurmalıdır. Bununla birlikte olası fiyat artışlarını talep edebilir.
<b>İşin süresi</b>	Yüklenici en kısa sürede işini bitirmeyi amaçlar. Sürenin uzaması işin yönetimi için bir risktir.	Yükleniciden kaynaklanan bir süre uzaması durumunda, yüklenici cezai şartlara tabi olacağından işi belirtilen sürede bitirmeyi amaçlar. İşin süresinin uzaması finansal risklere yol açabilir.
<b>İşveren denetimi</b>	Belirli bir kalite standardının sağlanması açısından sürekli ve ciddi bir denetim gereklidir.	Yapılan işin sözleşme ve ekleri ile fen ve sanat kurallarına uygunluğunun denetimi gereklidir.

genişlemeye bağlı olarak kamu alımlarının gayri safi yurtiçi hasıladan (GSYH) aldığı pay artmaktadır. Kamu alımlarının ekonomideki bu öneminden ötürü kamu kaynaklarının etkin ve verimli kullanılması gerekmektedir. Buna paralel olarak yapım işi ihaleleri de yıldan yıla artış göstermektedir. Yapım işi ihalelerinde kamu kaynağı ihtiyacının belirlenmesinde temel

faktör, önceden planlanan yapım işine ilişkin, idareler tarafından her türlü fiyat araştırması yapılarak ve katma değer vergisi (KDV) hariç tutularak belirlenen tahmini maliyet olan yaklaşık maliyettir (YM). İdarelerce gerçekleştirilen yapım işlerine ait YM belirleme yöntemi, başta T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı olmak üzere birim fiyat belirleme görev ve yetkisi bulunan diğer kamu kurumları tarafından belirlenen kamu birim fiyat sistemine dayanmaktadır [2]. Ayrıca, idareler yatırımın henüz uygulama projeleri hazırlamadan yatırım programına alınması aşamasında bütçeye ödenek konulabilmesi için parametrik yöntem kullanmaktadır. Bu yöntem, proje maliyetlerini hesaplayabilmek ve tahmin edebilmek için proje özelliklerini bir matematik modelde kullanmayı içermektedir [3]. Kanit ve Baykan [4] kamuya ait bina yatırımları arasında sağlık ocaklarını örnekleyerek bölge, süre, ihale indirimi ve tahmini m<sup>2</sup> maliyet parametrelerinin YM ile ilişkisini araştırmak için çoklu doğrusal regresyon analizini kullanmışlardır. Sonuçlar, geçmiş maliyet verileriyle geleceğe yönelik güvenilir tahminler yapılabileceğini göstermiştir. Uğur vd. [5] çalışmalarında, tek katlı bir yağma konut projesi dizayn etmiş ve yapay sinir ağı modelini oluşturarak YM tahmini yapmışlardır. Çalışma sonucunda yapay sinir ağı modeli ile %5'lik hata oranı dahilinde kabul edilebilir maliyet değerleri elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada [6], statik ve betonarme analizler ile elde edilen beton, kalıp, ve donatı metraj değerleri yapay sinir ağları ile programlanarak kaba inşaat YM hesaplanmış ve %98 doğruluk oranı elde edilmiştir. Aksoy [2], YM tespitinde piyasa fiyatlarının esas alınması ya da bölgesel düzeyde birim fiyat tespit edilmesi ve kullanılması gibi alternatif YM tespit yöntemlerinin ekonomik faydalarına dikkat çekmiştir.

Yapım işi kamu alımlarında yaklaşık maliyetin gerçekçi ve doğru hesaplanması kamu kaynaklarının etkin kullanımı ve ihaleye en uygun sözleşme bedelinin (SB) seçilmesi açısından önemlidir. Sözleşme bedeli yaklaşık maliyet oranı (SB/YM) kamunun gerçekleştirilen ihalelerden ne kadar tasarruf ettiğini ve istekliler açısından rekabetin nasıl yaşandığını belirleyen çok önemli bir göstergedir. Bu nedenle literatürde sözleşme bedelinin tahminlenmesi ve ihalelerde rekabetin sağlanması üzerine yapılan çalışmalara rastlanılmaktadır. Elhag vd. [7] ihale öncesi sözleşme bedelinin tahminlenmesinde 6 farklı faktörün etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, ihale öncesi sözleşme bedeli tahminini sırasıyla danışman ve tasarım parametreleri, müşteri karakteristiği, proje karakteristiği, dış faktörler ve pazar durumu, sözleşme prosedürleri ve ihale ile ilgili yöntemler ve yüklenici özelliklerinin etkilediğini göstermektedir. Skitmore ve Ng [8] sözleşme türünün inşaat maliyeti ve sözleşme bedeline etkisini regresyon analizi ile araştırmışlardır. Sonuçlar dizayn, proje ve inşaat aşamaları için ayrı ayrı ihaleye çıkılmasının, proje süresi ve maliyetinin azalmasını sağladığını göstermektedir. Drew vd. [9] sözleşme tipi, sözleşme büyüklüğü ve iş sahibinin türünün (kamu/özel sektör), sözleşme bedeline olan etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar sözleşmenin büyüklüğünün, ihale sonucunda ortaya çıkacak sözleşme bedelini en çok etkileyen faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ihale öncesi sözleşme bedelinin tahminlenmesine ilişkin yapılan eski çalışmalar Skitmore [10] tarafından özetlenmektedir. Her ne kadar yapılan çalışmalarda sözleşme bedeline bazı faktörlerin etkisi incelenmiş olsa da, sözleşme bedelinin idarelerce 4734 sayılı kanunda belirtilen ihale usullerinden, ihale eşik değer durumundan; 4735 sayılı kanuna göre yapacakları sözleşme türünden ve/veya idarelerce hesaplanan yaklaşık maliyetten etkilenip etkilenmediği konusunda yapılan bir çalışmaya rastlanılmamaktadır. Bu çalışmada (1) sözleşme bedeli ve ihale usulü (2) sözleşme bedeli ve ihale eşik değer durumu (3) sözleşme bedeli ve sözleşme türü (4) sözleşme bedeli yaklaşık maliyet oranı ve ihale usulü arasındaki ilişkinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu

kapsamda, 2007-2017 yılları arasında 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işlerine ait veriler ihale usulü ve sözleşme türüne göre derlenmiş ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde sırasıyla materyal, yöntem, analizler ve sonuçlar sunulmaktadır.

## 2. MATERYAL

KİK tarafından her yıl yayımlanan Kamu Alımları İzleme Raporları'nda, çevrimiçi veri girişine imkân sağlayan Elektronik Kamu Alımları Platformu'na kayıtlı idarelerin yürüttükleri ihalelere ilişkin bilgi ve verileri derlemektedir. Çalışma kapsamında 2007-2017 yılları arasında 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işi verileri KİK raporlarından elde edilmiştir [11]. Raporlarda yapım işi ihale adetleri ve Türk Lirası (TL) cinsinden sözleşme bedelleri yer almaktadır. Bu çalışmada, sözleşme bedeline ilişkin veriler, US doları (USD) karşılığı hesaplanarak düzenlenmiştir. USD karşılığı hesaplanırken, ilgili kamu izleme raporunu takip eden yılın ilk iş günündeki Merkez Bankası dolar döviz satış kuru dikkate alınmıştır.

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin adet ve USD karşılığı sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre dağılımı Çizelge 2'de verilmektedir. Çizelge'de adet ve sözleşme bedeli yıl içi yüzde oranları, ihale usullerinin o yıl içerisinde gerçekleşen toplam ihale adedi ve sözleşme bedeline oranını göstermekte olup ilgili yıla ait veriler dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 2 - 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin ihale usullerine göre dağılımı

Yıllar	İhale Usulleri	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2007	Açık İhale Usulü	19.765	95,49	17.928.802	88,41	907,1
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	43	0,21	1.258.085	6,20	29257,8
	Pazarlık Usulü	890	4,30	1.091.150	5,38	1226,0
	<b>Toplam</b>	<b>20.698</b>	<b>100,00</b>	<b>20.278.036</b>	<b>100,00</b>	-
2008	Açık İhale Usulü	20.937	95,24	15.338.485	90,51	732,6
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	43	0,20	749.893	4,42	17439,4
	Pazarlık Usulü	1.003	4,56	858.948	5,07	856,4
	<b>Toplam</b>	<b>21.983</b>	<b>100,00</b>	<b>16.947.326</b>	<b>100,00</b>	-

*İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline Etkisinin İncelenmesi*

Yıllar	İhale Usulleri	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2009	Açık İhale Usulü	16.330	94,31	11.686.144	87,77	715,6
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	37	0,21	541.622	4,07	14638,4
	Pazarlık Usulü	949	5,48	1.086.166	8,16	1144,5
	<b>Toplam</b>	<b>17.316</b>	<b>100,00</b>	<b>13.313.931</b>	<b>100,00</b>	-
2010	Açık İhale Usulü	16.268	94,90	9.632.071	80,05	592,1
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	92	0,54	1.251.775	10,40	13606,3
	Pazarlık Usulü	782	4,56	1.149.335	9,55	1469,7
	<b>Toplam</b>	<b>17.142</b>	<b>100,00</b>	<b>12.033.181</b>	<b>100,00</b>	-
2011	Açık İhale Usulü	20.826	95,35	14.103.385	80,45	677,2
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	111	0,51	2.831.775	16,15	25511,5
	Pazarlık Usulü	904	4,14	594.488	3,39	657,6
	<b>Toplam</b>	<b>21.841</b>	<b>100,00</b>	<b>17.529.648</b>	<b>100,00</b>	-
2012	Açık İhale Usulü	19.387	93,81	18.602.834	75,56	959,6
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	144	0,70	4.007.066	16,28	27826,8
	Pazarlık Usulü	1.135	5,49	2.009.057	8,16	1770,1
	<b>Toplam</b>	<b>20.666</b>	<b>100,00</b>	<b>24.618.957</b>	<b>100,00</b>	-
2013	Açık İhale Usulü	21.145	94,09	17.901.419	73,37	846,6
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	127	0,57	3.882.416	15,91	30570,2
	Pazarlık Usulü	1.201	5,34	2.613.996	10,71	2176,5
	<b>Toplam</b>	<b>22.473</b>	<b>100,00</b>	<b>24.397.831</b>	<b>100,00</b>	-
2014	Açık İhale Usulü	15.587	94,14	14.230.319	84,73	913,0
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	55	0,33	1.696.982	10,10	30854,2
	Pazarlık Usulü	916	5,53	867.905	5,17	947,5
	<b>Toplam</b>	<b>16.558</b>	<b>100,00</b>	<b>16.795.206</b>	<b>100,00</b>	-



Yıllar	İhale Usulleri	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2015	Açık İhale Usulü	18.657	94,10	15.050.876	82,45	806,7
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	68	0,34	1.675.597	9,18	24641,1
	Pazarlık Usulü	1.101	5,55	1.529.001	8,38	1388,7
	<b>Toplam</b>	<b>19.826</b>	<b>100,00</b>	<b>18.255.473</b>	<b>100,00</b>	-
2016	Açık İhale Usulü	18.347	93,26	16.406.493	72,88	894,2
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	44	0,22	2.079.299	9,24	47256,8
	Pazarlık Usulü	1.283	6,52	4.025.360	17,88	3137,5
	<b>Toplam</b>	<b>19.674</b>	<b>100,00</b>	<b>22.511.152</b>	<b>100,00</b>	-
2017	Açık İhale Usulü	19.135	89,55	19.057.959	54,85	996,0
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	71	0,33	5.908.778	17,01	83222,2
	Pazarlık Usulü	2.163	10,12	9.775.963	28,14	4519,6
	<b>Toplam</b>	<b>21.369</b>	<b>100,00</b>	<b>34.742.700</b>	<b>100,00</b>	-

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işleri yıllara göre incelendiğinde, en fazla yapım işinin 22.473 adet ile 2013 yılında, en az yapım işinin ise 16.558 adet ile 2014 yılında gerçekleştirildiği görülmektedir. Ayrıca, en yüksek yapım işi sözleşme bedeli 34.742.700 USD ile 2017 yılında gerçekleştirilmiş olup, en düşük yapım işi sözleşme bedeli 12.033.181 USD ile 2010 yılında gerçekleşmiştir. 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin ihale usullerine göre dağılımı incelendiğinde, tüm yıllarda yapım işi ihalelerinin en fazla açık ihale usulü olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Pazarlık usulünün yapım işlerinde, açık ihale usulünden sonra en fazla tercih edilen ihale usulü olduğu, en az tercih edilen usulün ise belli istekliler arasında ihale usulü olduğu belirtilmelidir. Bunun yanında, tüm yıllarda en yüksek sözleşme bedeline sahip yapım işlerinin açık ihale usulü olarak gerçekleştirildiği dikkat çekmektedir. Buna karşın, tüm yıllarda en yüksek birim sözleşme bedeli belli istekliler arasında ihale usulü gerçekleştirilen yapım işlerinde görülmektedir.

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin adet ve USD karşılığı sözleşme bedellerinin eşik değer durumuna göre dağılımı Çizelge 3'de verilmektedir. Çizelge'de adet ve sözleşme bedeli yıl içi yüzde oranları, sözleşme türlerinin o yıl içerisinde gerçekleşen toplam sözleşme adedi ve sözleşme bedeline oranını göstermekte olup ilgili yıla ait veriler dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 3 - 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin eşik değer durumuna göre dağılımı

Yıllar	Eşik Değer Durumu	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2007	Altında	20.514	99.09	8.707.197	42.94	424.45
	Üstünde	189	0.91	11.570.839	57.06	61221.37
	<b>Toplam</b>	<b>20.703</b>	<b>100.00</b>	<b>20.278.036</b>	<b>100.00</b>	-
2008	Altında	22.179	99.00	7.523.222	43.08	339.20
	Üstünde	223	1.00	9.938.631	56.92	44567.85
	<b>Toplam</b>	<b>22.402</b>	<b>100.00</b>	<b>17.461.853</b>	<b>100.00</b>	-
2009	Altında	17.309	98.78	6.497.627	47.61	375.39
	Üstünde	213	1.22	7.150.525	52.39	33570.54
	<b>Toplam</b>	<b>17.522</b>	<b>100.00</b>	<b>13.648.151</b>	<b>100.00</b>	-
2010	Altında	16.983	99.07	7.764.789	64.53	457.21
	Üstünde	159	0.93	4.268.392	35.47	26845.23
	<b>Toplam</b>	<b>17.142</b>	<b>100.00</b>	<b>12.033.181</b>	<b>100.00</b>	-
2011	Altında	21.479	98.34	9.246.143	52.75	430.47
	Üstünde	362	1.66	8.283.504	47.25	22882.61
	<b>Toplam</b>	<b>21.841</b>	<b>100.00</b>	<b>17.529.648</b>	<b>100.00</b>	-
2012	Altında	20.250	97.99	11.511.835	46.76	568.49
	Üstünde	416	2.01	13.107.121	53.24	31507.50
	<b>Toplam</b>	<b>20.666</b>	<b>100.00</b>	<b>24.618.956</b>	<b>100.00</b>	-
2013	Altında	22.067	98.19	11.632.795	47.68	527.16
	Üstünde	406	1.81	12.765.036	52.32	31440.97
	<b>Toplam</b>	<b>22.473</b>	<b>100.00</b>	<b>24.397.831</b>	<b>100.00</b>	-
2014	Altında	16.290	98.38	8.612.691	51.28	528.71
	Üstünde	268	1.62	8.182.514	48.72	30531.77
	<b>Toplam</b>	<b>16.558</b>	<b>100.00</b>	<b>16.795.205</b>	<b>100.00</b>	-
2015	Altında	19.452	98.11	8.775.262	48.07	451.12
	Üstünde	374	1.89	9.480.210	51.93	25348.16
	<b>Toplam</b>	<b>19.826</b>	<b>100.00</b>	<b>18.255.472</b>	<b>100.00</b>	-

Yıllar	Eşik Değer Durumu	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2016	Altında	19.221	97.70	8.582.485	38.13	446.52
	Üstünde	453	2.30	13.928.666	61.87	30747.61
	<b>Toplam</b>	<b>19.674</b>	<b>100.00</b>	<b>22.511.152</b>	<b>100.00</b>	-
2017	Altında	20.704	96.89	11.168.058	32.15	539.42
	Üstünde	665	3.11	23.574.642	67.85	35450.59
	<b>Toplam</b>	<b>21.369</b>	<b>100.00</b>	<b>34.742.700</b>	<b>100.00</b>	-

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin eşik değer durumuna göre dağılımı incelendiğinde, tüm yıllarda yapım işi ihalelerinin çoğunun eşik değerinin altında olduğu görülmektedir. Buna karşın tüm yıllarda eşik değerinin üstünde olan ihalelerin sözleşme bedelleri eşik değerinin altında olan ihalelerin sözleşme bedellerinden daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir.

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin adet ve USD karşılığı sözleşme bedellerinin sözleşme türlerine göre dağılımı Çizelge 4'de verilmektedir. Çizelge'de adet ve sözleşme bedeli yıl içi yüzde oranları, sözleşme türlerinin o yıl içerisinde gerçekleşen toplam sözleşme adedi ve sözleşme bedeline oranını göstermekte olup ilgili yıla ait veriler dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 4 - 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin sözleşme türlerine göre dağılımı

Yıllar	Sözleşme Türleri	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2007	Birim Fiyat	7.482	36,15	10.494.985	51,76	1402,7
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	13.216	63,85	9.783.051	48,24	740,2
	Karma	-	-	-	-	-
	<b>Toplam</b>	<b>20.698</b>	<b>100,00</b>	<b>20.278.036</b>	<b>100,00</b>	-
2008	Birim Fiyat	8.530	38,80	9.156.471	54,03	1073,4
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	13.453	61,20	7.790.855	45,97	579,1
	Karma	-	-	-	-	-
	<b>Toplam</b>	<b>21.983</b>	<b>100,00</b>	<b>16.947.326</b>	<b>100,00</b>	-

*İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline Etkisinin İncelenmesi*

Yıllar	Sözleşme Türleri	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2009	Birim Fiyat	5.827	33,65	6.127.950	46,03	1051,6
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	11.489	66,35	7.185.981	53,97	625,5
	Karma	-	-	-	-	-
	<b>Toplam</b>	<b>17.316</b>	<b>100,00</b>	<b>13.313.931</b>	<b>100,00</b>	-
2010	Birim Fiyat	6.815	39,76	6.658.718	55,34	977,1
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	10.327	60,24	5.374.463	44,66	520,4
	Karma	-	-	-	-	-
	<b>Toplam</b>	<b>17.142</b>	<b>100,00</b>	<b>12.033.181</b>	<b>100,00</b>	-
2011	Birim Fiyat	8.816	40,36	10.117.931	57,72	1147,7
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	12.924	59,17	7.055.355	40,25	545,9
	Karma	101	0,46	356.361	2,03	3528,3
	<b>Toplam</b>	<b>21.841</b>	<b>100,00</b>	<b>17.529.648</b>	<b>100,00</b>	-
2012	Birim Fiyat	8.432	40,80	14.155.558	57,50	1678,8
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	12.131	58,70	9.976.297	40,52	822,4
	Karma	103	0,50	487.101	1,98	4729,1
	<b>Toplam</b>	<b>20.666</b>	<b>100,00</b>	<b>24.618.956</b>	<b>100,00</b>	-
2013	Birim Fiyat	9.539	42,45	13.559.535	55,58	1421,5
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	12.819	57,04	9.896.493	40,56	772,0
	Karma	115	0,51	941.803	3,86	8189,6
	<b>Toplam</b>	<b>22.473</b>	<b>100,00</b>	<b>24.397.831</b>	<b>100,00</b>	-
2014	Birim Fiyat	6.681	40,35	8.791.120	52,34	1315,8
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	9.801	59,19	7.644.414	45,52	780,0
	Karma	76	0,46	359.672	2,14	4732,5
	<b>Toplam</b>	<b>16.558</b>	<b>100,00</b>	<b>16.795.206</b>	<b>100,00</b>	-

Yıllar	Sözleşme Türleri	Adet	Adet Yıl İçi %	Sözleşme Bedeli (USD)	SB Yıl İçi %	Birim Sözleşme Bedeli (USD)
2015	Birim Fiyat	9.106	45,93	11.941.431	65,41	1311,4
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	10.607	53,50	5.734.589	31,41	540,6
	Karma	113	0,57	579.453	3,17	5127,9
	<b>Toplam</b>	<b>19.826</b>	<b>100,00</b>	<b>18.255.473</b>	<b>100,00</b>	-
2016	Birim Fiyat	9.338	47,46	14.756.308	65,55	1580,2
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	10.209	51,89	7.020.255	31,19	687,7
	Karma	127	0,65	734.589	3,26	5784,2
	<b>Toplam</b>	<b>19.674</b>	<b>100,00</b>	<b>22.511.152</b>	<b>100,00</b>	-
2017	Birim Fiyat	9.941	46,52	22.859.659	65,80	2299,5
	Anahtar Teslimi Götürü Bedel	11.290	52,83	10.049.727	28,93	890,1
	Karma	138	0,65	1.833.314	5,28	13284,9
	<b>Toplam</b>	<b>21.369</b>	<b>100,00</b>	<b>34.742.700</b>	<b>100,00</b>	-

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin sözleşme türlerine göre dağılımı incelendiğinde, tüm yıllarda yapım işi sözleşmelerinin en fazla anahtar teslimi götürü bedel sözleşme ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Birim fiyat sözleşmelerinin yapım işlerinde, anahtar teslimi götürü bedel sözleşmelerden sonra en fazla tercih edilen sözleşme türü olduğu, en az tercih edilen sözleşme türünün ise karma sözleşmeler olduğu belirtilmelidir. Tüm yıllarda en yüksek sözleşme bedelinin ve 2007-2010 yılları arası en yüksek birim sözleşme bedelinin birim fiyat sözleşme ile gerçekleştirilen yapım işlerine ait olduğu görülmektedir. Buna karşın, 2011-2017 yılları arası en yüksek birim sözleşme bedelinin karma sözleşmelerde olduğu dikkat çekmektedir.

Çizelge 5'de 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin sözleşme bedelinin yaklaşık maliyete oranı ile yaklaşık maliyet sözleşme bedeli farkı verilmektedir. Sözleşme bedeli ve yaklaşık maliyete ait veriler KİK raporlarından elde edilmiştir [11].

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinde sözleşme bedelinin yaklaşık maliyete oranı incelendiğinde en yüksek oran % 80,79 ile 2008 yılında, en düşük oran % 66,46 ile 2011 yılında görülmektedir. İdarelerin ihale öncesinde ihale konusu iş için hesapladıkları yaklaşık maliyetlerin doğru olduğu varsayımı altında, 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işinden elde edilen tasarruf, sözleşme bedeli ile yaklaşık maliyet arasındaki fark olup, en yüksek 11.014.952 USD 2011 yılında görülmektedir. 2007-2017 yılları arası gerçekleştirilen yapım işlerinden elde edilen toplam tasarruf tutarı

## *İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline Etkisinin İncelenmesi*

78.849.487 USD ve sözleşme bedelinin yaklaşık maliyete oranının % 73,74 olduğu görülmektedir.

*Çizelge 5 - 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin sözleşme bedelinin yaklaşık maliyete oranı*

<b>Yıllar</b>	<b>Sözleşme Bedeli (USD)</b>	<b>Yaklaşık Maliyet (USD)</b>	<b>YM – SB (USD)</b>	<b>SB/YM (%)</b>
<b>2007</b>	20.278.035	25.100.296	4.822.261	80,79
<b>2008</b>	16.947.326	21.846.833	4.899.507	77,57
<b>2009</b>	13.313.931	18.529.405	5.215.473	71,85
<b>2010</b>	12.033.181	16.514.114	4.480.933	72,87
<b>2011</b>	17.529.649	26.377.556	8.847.907	66,46
<b>2012</b>	24.618.957	35.633.908	11.014.952	69,09
<b>2013</b>	24.397.831	33.961.839	9.564.008	71,84
<b>2014</b>	16.795.206	23.042.297	6.247.091	72,89
<b>2015</b>	18.255.473	25.395.956	7.140.483	71,88
<b>2016</b>	22.511.152	29.753.344	7.242.193	75,66
<b>2017</b>	34.742.700	44.117.381	9.374.680	78,75
<b>Toplam</b>	<b>221.423.441</b>	<b>300.272.928</b>	<b>78.849.487</b>	<b>73,74</b>
<b>Ortalama</b>	<b>20.129.403,73</b>	<b>27.297.538,91</b>	<b>7.168.135,18</b>	<b>73,74</b>

Toplam sözleşme bedelinin toplam yaklaşık maliyete oranı 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinde idarece belirlenen 100 TL tutarındaki yaklaşık maliyetin 73,74 TL'sinin harcandığını veya işi yapan yükleniciye ödendiğini, kalan 26,26 TL'nin ise kullanılmadığını göstermektedir. Kullanılmayan 26,26 TL, ihalede istekliler tarafından en fazla %26,26 oranında indirim yapıldığını göz önüne koymaktadır. SB/YM oranının %73,74 olması isteklilerin idarelerce hesaplanan yaklaşık maliyetin altında teklif hazırladıklarını, dolayısıyla ihaleyi kazanmak için gerekli rekabet ortamının sağlandığını göstermektedir. Sonuç olarak 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde mevcut duruma göre idarelerce hesaplanan yaklaşık maliyetin sözleşme fiyatının üstünde olduğu görülmektedir.

Çizelge 6'da 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin SB/YM oranının ihale usullerine göre verilmektedir.

Çizelge 6 - 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin SB/YM oranının ihale usullerine göre dağılımı

Yıllar	İhale Usulü	Sözleşme Bedeli (USD)	Yaklaşık Maliyet (USD)	SB/YM %
2007	Açık İhale Usulü	17.928.802	22.403.064	80,03
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	1.258.084	1.420.493	88,57
	Pazarlık Usulü	1.091.150	1.276.739	85,46
	<b>Toplam</b>	<b>20.278.035</b>	<b>25.100.296</b>	<b>80,79</b>
2008	Açık İhale Usulü	15.338.485	19.987.279	76,74
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	749.893	930.161	80,62
	Pazarlık Usulü	858.948	929.393	92,42
	<b>Toplam</b>	<b>16.947.326</b>	<b>21.846.833</b>	<b>77,57</b>
2009	Açık İhale Usulü	11.686.144	16.376.249	71,36
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	541.622	941.929	57,50
	Pazarlık Usulü	1.086.166	1.211.227	89,67
	<b>Toplam</b>	<b>13.313.931</b>	<b>18.529.405</b>	<b>71,85</b>
2010	Açık İhale Usulü	9.632.071	13.307.588	72,38
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	1.251.775	1.926.910	64,96
	Pazarlık Usulü	1.149.335	1.279.616	89,82
	<b>Toplam</b>	<b>12.033.181</b>	<b>16.514.114</b>	<b>72,87</b>
2011	Açık İhale Usulü	14.103.385	21.463.020	65,71
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	2.831.776	4.235.933	66,85
	Pazarlık Usulü	594.488	678.602	87,60
	<b>Toplam</b>	<b>17.529.649</b>	<b>26.377.556</b>	<b>66,46</b>
2012	Açık İhale Usulü	18.602.833	27.591.756	67,42
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	4.007.066	5.752.910	69,65
	Pazarlık Usulü	2.009.057	2.289.242	87,76
	<b>Toplam</b>	<b>24.618.957</b>	<b>35.633.908</b>	<b>69,09</b>

*İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline Etkisinin İncelenmesi*

Yıllar	İhale Usulü	Sözleşme Bedeli (USD)	Yaklaşık Maliyet (USD)	SB/YM %
2013	Açık İhale Usulü	17.901.419	25.654.046	69,78
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	3.882.416	5.284.235	73,47
	Pazarlık Usulü	2.613.996	3.023.558	86,45
	<b>Toplam</b>	<b>24.397.831</b>	<b>33.961.839</b>	<b>71,84</b>
2014	Açık İhale Usulü	14.230.319	19.800.361	71,87
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	1.696.982	2.221.136	76,40
	Pazarlık Usulü	867.905	1.020.799	85,02
	<b>Toplam</b>	<b>16.795.206</b>	<b>23.042.297</b>	<b>72,89</b>
2015	Açık İhale Usulü	15.050.876	21.461.883	70,13
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	1.675.597	2.236.865	74,91
	Pazarlık Usulü	1.529.001	1.697.208	90,09
	<b>Toplam</b>	<b>18.255.473</b>	<b>25.395.956</b>	<b>71,88</b>
2016	Açık İhale Usulü	16.406.493	22.552.871	72,75
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	2.079.299	2.550.297	81,53
	Pazarlık Usulü	4.025.360	4.650.176	86,56
	<b>Toplam</b>	<b>22.511.152</b>	<b>29.753.344</b>	<b>75,66</b>
2017	Açık İhale Usulü	19.057.959	25.908.081	73,56
	Belli İstekliler Arasında İhale Usulü	5.908.778	6.675.867	88,51
	Pazarlık Usulü	9.775.963	11.533.433	84,76
	<b>Toplam</b>	<b>34.742.700</b>	<b>44.117.381</b>	<b>78,75</b>

2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işlerinin SB/YM oranının ihale usullerine göre dağılımı incelendiğinde, yıllara göre değişmekle beraber genellikle en yüksek oranın pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde, en düşük oranın ise açık ihale usulü gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde olduğu görülmektedir. Buna göre, genellikle en fazla indirim açık ihale usulü gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde, en az indirim ise pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde olduğu yorumu yapılabilmektedir.



### 3. YÖNTEM

Çalışma kapsamında,

- ihale usulünün yapım işlerine ait birim sözleşme bedellerine etkisi,
- ihale eşik değer durumunun yapım işlerine ait birim sözleşme bedellerine etkisi
- sözleşme türünün yapım işlerine ait birim sözleşme bedellerine etkisi,
- ihale usulünün yapım işlerine ait SB/YM oranlarına etkisi

istatistiksel analizler aracılığıyla incelenmiştir.

İstatistiksel testlerden bazılarının teorisi, veri gruplarının normal dağılıma uygun olması ve homojen olması varsayımı üzerine kurulmuştur [12]. Bu nedenle, doğru testin belirlenmesi için öncelikle veri gruplarının normal dağılıma uyup uymadığının ve varyanslarının homojen olup olmadığının araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilecek analizler için ilk olarak, her yıla ait birim sözleşme bedelleri hesaplanmıştır. Daha sonra, birim sözleşme bedellerinin (1) ihale usullerine, (2) sözleşme türlerine ve (3) SB/YM oranlarının ihale usullerine göre normal dağılıp dağılmadığı normallik testleri ile belirlenmiştir. Normallik testleri arasında Wilk tarafından geliştirilen Shapiro-Wilk testi en güçlü testlerden biri olarak gösterilmektedir [13]. Shapiro-Wilk testinin kullanılabilmesi için örnek hacminin 7'den büyük veya 2000'den küçük veya 2000'e eşit olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri sayısı (N=11) Shapiro-Wilk testinin kullanılabilmesi için uygun olduğundan normallik bu yöntem ile test edilmiştir. Normallik testlerinin sonuçlarına bağlı olarak SB/YM oranının ihale usullerine göre varyanslarının homojenliğinin araştırması gerekmekte olup bunun için Levene testi gerçekleştirilmiştir. Bu test, N adet örneklemin, alındığı kitlelerin varyanslarının eşit olup olmadığını test eden parametrik olmayan bir testtir [12] ve istatistiksel paket programları (örn. SPSS, minitab) homojenlik testi için bu testi kullanmaktadır. Bu testlerin sonuçlarına göre, analizler için uygun istatistiksel testler belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen normallik testlerinin sonuçlarına göre, birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine ve sözleşme türlerine göre normal dağılmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine ve sözleşme türlerine göre anlamlı bir şekilde farklılaşıp farklılaşmadığını test etmek amacıyla oldukça güçlü olan ve sıklıkla kullanılan parametrik olmayan Kruskal-Wallis testi gerçekleştirilmiştir [14-20]. Bu test tek yönlü varyans analizi yöntemi olup n bağımsız örneklemin x puanlarının dağılımının benzer ortanca değerli toplumların rasgele örnekleri olup olmadığını test etmek için kullanılır [13]. Bu testte veri değerleri sıralı hale getirilir, sıra toplamları grup büyüklüğüne bölünerek sıra ortalamaları hesaplanır ve bu ortalamalar karşılaştırılır [21]. Ortalamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edildiğinde bu farklılığın kaynağını bulmak için parametrik olmayan testlerde yaygın kullanılan çoklu karşılaştırma testi olmaması nedeniyle, başka çalışmalarda olduğu gibi ihale usulleri ve sözleşme türlerinin ikili grupları için Mann-Whitney U testleri gerçekleştirilmiştir [16-18, 22, 23]. Mann-Whitney U test sadece iki grup arasında yapılabilen ve grupların medyanlarını karşılaştıran bir testtir. Böylece, iki grup arasındaki sıralamanın farklı olup olmadığını değerlendirir [15].

İhale usullerinin SB/YM oranlarına etkisinin analizinde ise normallik dağılımı koşulu sağlanması ancak varyansların homojenliği şartının sağlanmaması nedeniyle heterojen varyanslılığa karşı dayanıklı parametre dışı olan ve uygulamalarda sıklıkla kullanılan Welch

testi gerçekleştirilmiştir [24-26]. Bu test sayesinde SB/YM oranlarının ihale usullerine göre ortalamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı belirlenmiştir. Daha sonra bu farkın hangi ihale usulleri arasındaki farklılardan kaynaklandığının tespiti için, varyansların homojenliği varsayımının sağlanmadığı durumlarda kullanılan çoklu karşılaştırma testlerinden biri olan Games-Howell testi gerçekleştirilmiştir [23, 25-27].

#### 4. ANALİZLER

##### 4.1. Sözleşme Bedelinin İhale Usullerine Göre Analizi

Birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre dağılımları için Shapiro-Wilk normallik testi gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 7'de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, belli istekliler arasında ihale ve pazarlık usullerine göre birim sözleşme bedellerinin  $p$  değerlerinin sırasıyla, 0,003 ve 0,0019 olduğu görülmektedir. Bu değerler, 0,05 anlamlılık düzeyinden küçük olduğu için bu usullere ait birim sözleşme bedellerinin normal dağılmadıkları tespit edilmiştir.

*Çizelge 7 - Birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre Shapiro-Wilk test sonuçları*

İhale usulü	İstatistik	Serbestlik derecesi (sd)	$p$
Açık ihale usulü	0,954	11	0,700
Belli istekliler arasında ihale usulü	0,760	11	0,003
Pazarlık usulü	0,823	11	0,019

Birim sözleşme bedelleri tüm ihale usullerine göre normallik şartını sağlamadığı için birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre anlamlı bir şekilde farklılaşıp farklılaşmadığını test etmek amacıyla parametrik olmayan Kruskal-Wallis testi seçilmiş ve sonuçları Çizelge 8'de verilmektedir.

*Çizelge 8 - Birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre Kruskal-Wallis test sonuçları*

Boyut	İhale Usulü	N	Sıra ortalama	Sd	Ki-kare	$p$
Birim Sözleşme Bedeli	Açık ihale usulü	11	7,55	2	25,033	0,000
	Belli istekliler arasında ihale usulü	11	28,00			
	Pazarlık usulü	11	15,45			

Grupların Çizelge 8’deki sıra ortalamaları incelendiğinde, belli istekliler arasında ihale usulü gerçekleştirilen yapım işlerinde birim sözleşme bedelinin, açık ihale ve pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işlerindeki göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işlerinde birim sözleşme bedelinin açık ihale usulü gerçekleştirilen yapım işlerinden daha yüksek olduğu ifade edilebilir. Kruskal-Wallis test sonuçları incelendiğinde, açık ihale, belli istekliler arasında ihale ve pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işlerinin birim sözleşme bedelleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir ( $p=0,000$ ;  $p<0,05$ ).

Farklılığın kaynağını anlayabilmek için Mann-Whitney U testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları Çizelge 9’da sunulmaktadır. Elde edilen  $p$  değerlerinin hepsi 0,05’den küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı farklılık tüm ihale usulleri arasında tespit edilmiştir. Bu durumda, ihale usulünün yapım işleri birim sözleşme bedelleri üzerine istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Çizelge 9 - Birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre Mann-Whitney U test sonuçları

		İhale Usulü		
		Açık ihale usulü	Belli istekliler arasında ihale usulü	Pazarlık usulü
İhale Usulü	Açık ihale usulü	-	0,000	0,004
	Belli istekliler arasında ihale usulü	0,000	-	0,000
	Pazarlık usulü	0,004	0,000	-

#### 4.2. Sözleşme Bedelinin Eşik Değer Durumuna Göre Analizi

Birim sözleşme bedellerinin eşik değere göre dağılımları için Shapiro-Wilk normallik testi gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 10’da sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, ihale bedelinin eşik değerinin altında ve üstünde olması durumuna göre birim sözleşme bedellerinin  $p$  değerlerinin sırasıyla, 0,643 ve 0,11 olduğu görülmektedir. Bu durumda ihale bedelleri eşik değerinin altında olan ihalelerin birim sözleşme bedelleri normal dağılırken ( $p=0,643>0,05$ ) ihale bedelleri eşik değerinin üstünde olan birim sözleşme bedellerinin normal dağılmadıkları ( $p=0,11<0,05$ ) tespit edilmiştir.

Çizelge 10 - Birim sözleşme bedellerinin eşik değerine göre Shapiro-Wilk test sonuçları

İhale Bedeli	İstatistik	Serbestlik derecesi (sd)	$p$
Eşik değeri altında	0,950	11	0,643
Eşik değeri üstünde	0,804	11	0,11

Birim sözleşme bedelleri tüm ihale bedellerine göre normallik şartını sağlamadığı için birim sözleşme bedellerinin ihale bedelinin eşik değerinin altında veya üstünde olmasına göre anlamlı bir şekilde farklılaşıp farklılaşmadığını test etmek amacıyla parametrik olmayan Mann-Whitney U testi seçilmiş olup sonuçları Çizelge 11’de verilmektedir.

*Çizelge 11 - Birim sözleşme bedellerinin ihale bedeline göre Mann-Whitney U test sonuçları*

<b>Boyut</b>	<b>İhale Bedeli</b>	<b>N</b>	<b>Sıra ortalama</b>	<b>Mann-Whitney U</b>	<b>p</b>
Birim Sözleşme Bedeli	Eşik değeri altında	11	6,00	0,000	0,000
	Eşik değeri üstünde	11	17,00		

Grupların Çizelge 11’deki sıra ortalamaları incelendiğinde, ihale bedelinin eşik değerinin üstünde olduğu birim sözleşme bedelinin, ihale bedelinin eşik değerinin altında olduğu duruma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Mann-Whitney U test sonuçları incelendiğinde, ihale bedelinin eşik değeri altında veya üstünde olmasının birim sözleşme bedelleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yarattığı görülmektedir ( $p=0,000$ ;  $p<0,05$ ).

#### **4.3. Sözleşme Bedelinin Sözleşme Türlerine Göre Analizi**

Birim sözleşme bedellerinin ihale usullerine göre dağılımları için Shapiro-Wilk normallik testi gerçekleştirilmiş olup sonuçları Çizelge 12’de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, karma sözleşme türüne ait  $p$  değerinin (0,039) 0,05 anlamlılık değerinden küçük olduğu ve bu nedenle normal dağılmadığı görülmektedir.

*Çizelge 12 - Birim sözleşme bedellerinin sözleşme türlerine göre Shapiro-Wilk test sonuçları*

<b>Sözleşme türü</b>	<b>İstatistik</b>	<b>Sd</b>	<b>p</b>
Birim fiyat	0,876	11	0,092
Anahtar teslimi götürü bedel	0,931	11	0,420
Karma	0,798	7	0,039

Birim sözleşme bedelleri tüm sözleşme türlerine göre normallik şartını sağlamadığı için birim sözleşme bedellerinin sözleşme türlerine göre anlamlı bir şekilde farklılaşıp farklılaşmadığını test etmek amacıyla parametrik olmayan Kruskal-Wallis testi seçilmiş olup sonuçlar Çizelge 13’de verilmektedir.

Çizelge 13 - Birim sözleşme bedellerinin sözleşme türlerine göre Kruskal-Wallis test sonuçları

Boyut	Sözleşme türü	N	Sıra ortalama	Sd	Ki-kare	<i>p</i>
Birim Sözleşme Bedeli	Birim fiyat	11	17	2	24,579	0,000
	Anahtar teslimi götürü bedel	11	6			
	Karma	7	26			

Grupların Çizelge 13'deki sıra ortalamaları dikkate alındığında karma sözleşme ile gerçekleştirilen yapım işlerinin birim sözleşme bedellerinin birim fiyat ve anahtar teslimi götürü bedel ile gerçekleştirilen yapım işlerindeki göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanında, birim fiyat sözleşme ile gerçekleştirilen yapım işlerinin birim sözleşme bedellerinin anahtar teslim götürü bedel ile gerçekleştirilen yapım işlerinininkinden daha yüksek olduğu belirtilmelidir. Kruskal Wallis testinin sonucu incelendiğinde birim fiyat, anahtar teslim götürü bedel ve karma sözleşme ile gerçekleştirilen yapım işlerinin birim sözleşme bedelleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir ( $p=0,000$ ;  $p<0,05$ ).

Farklılığın kaynağını anlayabilmek Mann-Whitney U testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonuçları Çizelge 14'de sunulmaktadır. Elde edilen *p* değerlerinin hepsi 0,05'den küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı farklılığın tüm sözleşme türleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, sözleşme türünün yapım işleri birim sözleşme bedelleri üzerine istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Çizelge 14 - Birim sözleşme bedellerinin sözleşme türlerine göre Mann-Whitney U test sonuçları

		Sözleşme Türü		
		Birim fiyat	Anahtar teslimi götürü bedel	Karma
Sözleşme Türü	Birim fiyat	-	0,000	0,000
	Anahtar teslimi götürü bedel	0,000	-	0,000
	Karma	0,000	0,000	-

#### 4.4. Sözleşme Bedeli Yaklaşık Maliyet Oranının İhale Usullerine Göre Analizi

SB/YM oranlarının ihale usullerine göre dağılımları için Shapiro-Wilk normallik testi gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 15'de sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, ihale usullerine göre SB/YM oranlarının *p* değerlerinin 0,05 anlamlılık düzeyinden büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, SB/YM oranlarının ihale usullerine göre normal dağıldığı varsayımı kabul edilebilmektedir. Normallik şartının sağlanması nedeniyle, verilerin

varyanslarının homojenliği, Levene'nin testi ile kontrol edilmiştir. Test sonucundaki  $p$  değeri 0,002 olarak elde edilmiştir. Bu değer, 0,05 anlamlılık düzeyinden küçük olduğu için ihale usullerine göre SB/YM oranlarının varyanslarının homojen olduğu varsayımı reddedilmiştir.

*Çizelge 15 - SM/YM oranlarının sözleşme türlerine göre Shapiro-Wilk ve Levene'nin test sonuçları*

İhale usulü	Shapiro-Wilk Test			Levene'nin Testi			
	İstatistik	Sd	$p$	İstatistik	Sd1	Sd2	$p$
Açık ihale usulü	0,954	11	0,700	7,413	2	30	0,002
Belli istekliler arasında ihale usulü	0,760	11	0,003				
Pazarlık usulü	0,823	11	0,019				

Normallik şartı sağlandığı ancak homojenlik şartı sağlanmadığı için SB/YM oranlarının ihale usullerine göre anlamlı bir şekilde farklılaşp farklılaşmadığını test etmek amacıyla Welch testi seçilmiş olup sonuçları Çizelge 16'da sunulmaktadır.

*Çizelge 16 - SM/YM oranlarının sözleşme türlerine göre Welch test sonuçları*

Boyut	İhale Usulü	N	Ortalama	Sd1	Sd2	Asimptotik F	$p$
SB/YM	Açık ihale usulü	11	0,72	2	17,17	64,32	0,0
	Belli istekliler arasında ihale usulü	11	0,75				
	Pazarlık usulü	11	0,88				

Çizelge 16'da ihale usullerine göre SB/YM oranları karşılaştırıldığında en yüksek ortalamanın (0,88) pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işlerine ait olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, belli istekliler arasında ihale usulü gerçekleştirilen yapım işlerinin SB/YM oranlarının ortalamasının (0,75) açık ihale usulü gerçekleştirilen yapım işlerinin ortalamasına (0,72) göre yüksek olduğu ancak aradaki farkın çok fazla olmadığı görülmektedir. Welch testinin sonuçları incelendiğinde, asimptotik F istatistiği için  $p$  değeri 0,000 olarak elde edilmiştir. Bu değer, 0,05 anlamlılık düzeyinden küçük olduğu için ihale usullerine göre SB/YM oranlarının ortalaması arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir.

Farklılığın kaynağını anlayabilmek için çoklu karşılaştırma testlerinden Games-Howell testi kullanılmıştır. Bu teste ait sonuçlar Çizelge 17'de görülmektedir. Açık ihale usulü ile pazarlık usulü ve belli istekliler arasında ihale usulü ile pazarlık usulü arasındaki  $p$  değerleri sırasıyla 0,000 ve 0,003 olarak elde edilmiştir. Bu iki değer 0,05 anlamlılık düzeyinden küçük olduğu

için farklılığın yönü açık ihale usulü-pazarlık usulü ve belli istekliler arasında ihale usulü-pazarlık usulü olarak bulunmuştur. Bu durumda, pazarlık usulünün SB/YM oranının farklılaşmasına neden olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Çizelge 17 - SB/YM oranlarının ihale usullerine göre Games-Howell test sonuçları

		İhale Usulü		
		Açık ihale usulü	Belli istekliler arasında ihale usulü	Pazarlık usulü
İhale Usulü	Açık ihale usulü	-	0,652	0,000
	Belli istekliler arasında ihale usulü	0,652	-	0,003
	Pazarlık usulü	0,000	0,003	-

## 5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, 2007-2017 yılları arasında 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işi kamu alım istatistikleri incelenmiştir. Yapılan değerlendirmelerden elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmaktadır;

- 2007-2017 yılları arasında yapım işlerinde en yüksek toplam sözleşme bedeli (34.742.700 USD) 2017 yılında, en düşük sözleşme bedeli (12.033.181 USD) ise 2010 yılında görülmektedir.
- 2007-2017 yılları arasında en yüksek sözleşme bedeli açık ihale usulü olarak gerçekleştirilen yapım işlerinde görülmekte iken en yüksek birim sözleşme bedeli belli istekliler arasında ihale usulü olarak gerçekleştirilen yapım işlerinde görülmektedir.
- 2007-2017 yılları arasında gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinin çoğunun eşik değerinin altında olduğu görülmektedir.
- 2007-2017 yılları arasında eşik değerinin üstünde olan yapım işi ihalelerinin sözleşme bedellerinin eşik değerinin altında olan yapım işi ihalelerinin sözleşme bedellerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.
- 2007-2017 yılları arasında en yüksek sözleşme bedelinin ve 2007-2010 yılları arası en yüksek birim sözleşme bedelinin birim fiyat sözleşme ile gerçekleştirilen yapım işlerine ait olduğu görülmektedir. Buna karşın, 2011-2017 yılları arası en yüksek birim sözleşme bedelinin karma sözleşmelerde olduğu dikkat çekmektedir.
- 2007-2017 yılları arasında yapım işlerinde SB/YM oranı en fazla (% 80,79) 2008 yılında, en az ise (% 66,46) 2011 yılında görülmektedir.
- 2007-2017 yılları arasında yapım işlerinde en yüksek tasarruf (11.014.952 USD) 2011 yılına görülmektedir.

- 2007-2017 yılları arasında SB/YM oranı yıllara göre değişmekle beraber en yüksek pazarlık usulü olarak gerçekleştirilen, en düşük açık ihale usulü olarak gerçekleştirilen yapım işlerinde görülmektedir.
- Genellikle en fazla indirimin açık ihale usulü gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde, en az indirimin ise pazarlık usulü gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bunun yanında, (1) sözleşme bedeline ihale usulünün, (2) sözleşme bedeli ve ihale eşik değer durumu (3) sözleşme bedeline sözleşme türünün ve (4) SB/YM oranına ihale usulünün etkisinin olup olmadığı istatistiksel analizler yardımıyla incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, sözleşme türünün yapım işleri sözleşme bedelleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Elhag vd. [7], Skitmore ve Ng [8], Drew vd. [9] sözleşme türünün, sözleşme bedeli üzerinde etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Literatürde yer alan çalışmalar, sözleşme bedeli üzerinde etkisi olan bir diğer faktörün sözleşme büyüklüğü olduğunu göstermektedir [7-9]. Özellikle, proje büyüklüğünün ihale sonucunda ortaya çıkacak sözleşme bedelini en çok etkileyen faktör olduğu ortaya konulmuştur [9]. Bu çalışmanın sonuçları da literatürdeki sonuçlar ile paralellik göstermiş ve ihale bedelinin eşik değeri altında veya üstünde olmasının, bir başka deyişle proje büyüklüğünün, sözleşme bedelleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yarattığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bir başka sonuç, ihale usulünün yapım işleri sözleşme bedelleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki yarattığıdır. Bunun yanında ihale usulünün SB/YM oranına etkisi olduğu da görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, pazarlık usulü ile yapılan ihaleler diğer usullere göre SB/YM oranında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratırken, açık ihale usulü veya belli istekliler arasında ihale usulü tercih edilerek yapılan ihalelerin sözleşme bedelinde bir fark yaratmadığı görülmektedir. Benzer şekilde, Elhag vd. [7] ihale öncesi bedel tahminlemede, ihale yöntemlerinin etkili olduğunu söylemektedir.

Sonuç olarak, 2007-2017 yılları arasında 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işi kamu alım istatistiklerinin analiz edilmesiyle bulunan sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

## **6. SONUÇ**

Bu çalışmada, 2007-2017 yılları arasında 4734 sayılı kanun kapsamında gerçekleştirilen yapım işleri sözleşme bedellerine ait veriler ihale usulü, ihale eşik bedel durumu ve sözleşme türüne göre; SB/YM oranları ihale usullerine göre tablolar halinde derlenmiş ve mevcut durum ortaya konmuştur. Yapılan çalışma, idarelerce gerçekleştirilen yapım işi ihalelerinde 4734 sayılı kanunda belirtilen açık, belli istekliler ve pazarlık usulü ihale usullerinin seçiminin teklif edilen en uygun bedel bir başka deyişle sözleşme bedeli üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Bunun yanında, ihale sonucunda 4735 sayılı kanuna göre imzalanacak sözleşmenin birim fiyat, anahtar teslimi götürü bedel veya karma sözleşme olmasının ihaleye katılanların teklif bedellerini yani sözleşme bedelini etkilediği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarının, idarelere en uygun bedelle iş yaptırmak ve dolayısıyla kamu kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmak için dikkat etmeleri gereken hususlar konusunda yardımcı olacağı düşünülmektedir.



### **Kaynaklar**

- [1] Birgönül, M. Talat, İrem Dikmen. "İnşaat projelerinin risk yönetimi." İMO Teknik Dergi 7.4 (1996): 1305-1326.
- [2] Aksoy, M., Yapım İşi Kamu Alimlerinde Yaklaşık Maliyet Belirleme Usulünün Sözleşme Bedeli Ve Etkin Kaynak Kullanımına Etkisi, Kirikkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 5, 1, 65-88, 2015.
- [3] Gencer, H., Yaklaşık Maliyet Hesaplama Esasları, Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri, Uluslararası Katılımlı 7. İnşaat Yönetimi Kongresi, Samsun, 2017.
- [4] Kanıt, R., Baykan, U.N., Bina Yaklaşık Maliyetinin Çoklu Doğrusal Regresyon ile Belirlenmesi, Politeknik Dergisi, 7, 4, 359-367, 2004.
- [5] Uğur, L.D., Baykan, U.N, Korkmaz, S., Yığma Konutların Maliyet Tahmininde Yapay Sinir Ağlarının (YSA) Kullanılması, 6. İnşaat Yönetim Kongresi, Bursa, 2011.
- [6] Gülçiçek, Ü., Yapı Parametrelerinin Değişimi ile Yaklaşık Kaba İnşaat Maliyet Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [7] Elhag, T.M.S., Boussabaine, A.H., Ballal, T.M.A., Critical Determinants of Construction Tendering Costs: Quantity Surveyors' Standpoint, International Journal of Project Management, 23, 538-545, 2005.
- [8] Skitmore, R.M., Ng, S.T., Forecast Models For Actual Construction Time and Cost, Building and Environment, 38, 1075-1083, 2003.
- [9] Drew, D., Skitmore, M., Po Lo, H., The Effect Of Client and Type and Size Of Construction Work on a Contractor's Bidding Strategy, Building and Environment, 36, 393-406, 2001
- [10] Skitmore, R.M., Early Stage Construction Price Forecasting: A Review of Performance, Surveyors Publication, London, 1991.
- [11] Kamu İhale Kurumu, Kamu Alımları İzleme Raporu, Kurumsal Gelişim ve Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2007-2017.
- [12] Kuş, C., Keskin, İ., Levene ve Bartlett Testleri Üzerine Bir İnceleme, Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 22, 44, 78-83, 2008.
- [13] Özdamar, K., Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi, 9. Baskı, Nisan Kitabevi, Ankara, 2013.
- [14] Er, F., Sönmez, H., Üniversite Öğrencilerinde Mükemmeliyetçilik: Anadolu Üniversitesi Örneği, Akü Fen Bilimleri Dergisi, 11-16, 2009.
- [15] Karagöz, Y., Nonparametrik Tekniklerin Güç Ve Etkinlikleri?, Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 9, 33, 18-40, 2010.
- [16] Calis, G., Kuru, M., Mouawad, J., To Participate Or Not To Participate ? Selecting the Right Participant Profile for Thermal and Visual Comfort Studies, Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SIMAUD), Delft, The Netherlands, 139-143, 2018.

- [17] İslatince, N., In Turkey and Participation Banks Deposit Banks (2010 -2017) Period Comparison with the Kruskal-Wallis Test and The All Pairwise Comparison Methods Of Financial Performance Differences, *Journal Of Current Researches On Social Sciences*, 8, 4, 255–262, 2018.
- [18] Özcan, B., Sever, S., Sosyo- Demografik Değişkenler Açısından Alkol Kullanımı Ve Çeşitli Kriterlere Göre Analizi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2, 1, 261–276, 2017.
- [19] Zengin, N., Yıldız, Z., Sel, A., Katılım Bankalarının Dağıttığı Aylık Kâr Payı Oranlarının Karşılaştırmalı Analizi: (2010-2017), *C.Ü. İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 19, 2, 555–565, 2018.
- [20] Özbek, C.Y., Türkiye’de Bankalarda Lisansüstü Eğitime Sahip Yönetim Kurulu Üyelerinin Bankaların Kârlilikleri Üzerindeki Etkisi: Borsa İstanbul Bankalar Ve Özel Finans Kurumları Sektörü Örneği, *Muhasebe Ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 12, 1, 147–166, 2019.
- [21] Doymuş, K., Non-Parametrik Testler, K.K.E.F İlköğretim Bölümü, Ders Notu. Erişim: <https://Kemaldoymus.Files.Wordpress.Com/2009/12/Non-Parametrik-Testler1.Ppt.>, 2009.
- [22] Bal, A. P., Doğanay, A., İlköğretim Beşinci Sınıf Öğrencilerinin Matematik Dersinde Yapılandırmacı Öğrenme Ortamına Bakış Açıları, *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18, 2, 156–171, 2009.
- [23] Çalış, G., Becerik-Gerber, B., Göktepe, A.B., Li, S., Li, N., Analysis of the Variability Of RSSI Values For Active RFID-Based Indoor Applications, *Turkish Journal Of Engineering and Environmental Sciences*, 37, 2, 186–210, 2013.
- [24] Yiğit, E., Gamgam, H., Homojen Olmayan Varyans Varsayımı Altında Ortalamaların Eşitliği İçin Bazi Test İstatistikleri Ve Karşılaştırmaları, *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi –B Teorik Bilimler*, 1, 1, 57–71, 2011.
- [25] Taysi, M.R., Çelik, Ş., Homojen Olmayan Varyans Varsayımı Altında Ortalamaların Eşitliği İçin Brown-Forsythe ve Welch İstatistiklerinin Mısır Verimi Örneğine Uygulanması, *Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi*, 30, 1, 23–27, 2018.
- [26] McLaren, B. M., Van Gog, T., Ganoe, C., Karabinos, M., Yaron, D., The Efficiency Of Worked Examples Compared To Erroneous Examples, Tutored Problem Solving, And Problem Solving In Computer-Based Learning Environments, *Computers In Human Behavior*. Elsevier Ltd, 55, 87–99, 2016.
- [27] Calis, G., Kuru, M., Statistical Significance of Gender and Age on Thermal Comfort : A Case Study In Turkey, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability*, 172, 1, 40-51, 2019.

# 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 6 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 verilmiş 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, yayımlandığı yer, yayımlandığı 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, yayımlandığı 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

Belirgin Düşey Yük Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Çevrimsel Yükler Altındaki Davranışı Üzerine Bir İnceleme .....	9683
<b>Cem AYDEMİR, Müberra ESER AYDEMİR, Pınar YILDIRIM</b>	
Çoklu Çatlayan Lifli Kompozitlerin Birim Şekil Değişiminin Dijital Görüntü Korelasyonu ile Analizi: Parametre Etkilerinin Değerlendirilmesi.....	9711
<b>Tarık YILDIRIM, Muhammer KESKİNATEŞ, Eren GÖDEK, Kamile TOSUN FELEKOĞLU, Burak FELEKOĞLU, Okan ÖNAL</b>	
Betonarme Perdelerin Plandaki Yerleşimlerinin Kirişsiz Döşemeli Yapılara Etkisinin İncelenmesi .....	9733
<b>Ali BOZER</b>	
Ampirik Potansiyel Evapotranspirasyon Tahmin Yöntemlerinin Değerlendirilmesi: Uygulama Konya Kapalı Havzası.....	9755
<b>Nermin ŞARLAK, Soner Çağatay BAĞCACI</b>	
Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi... ..	9773
<b>Burcu AKÇAY</b>	
İhale Usulü ve Sözleşme Türünün Yapım İşi Sözleşme Bedeline Etkisinin İncelenmesi .....	9789
<b>Ezgi KOCAMAN, Merve KURU, Gülben ÇALIŞ</b>	