

**T.C.  
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN  
GÜÇLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan  
Hadiye Sema SAKLAVÇI**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV  
II. Danışman  
Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ**

**Kasım 2025  
KAYSERİ**

|                      |                                    |                    |      |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|------|
| HADİYE SEMA SAKLAVÇI | İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI | YÜKSEK LİSANS TEZİ | 2025 |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|------|

**T.C.  
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN  
GÜÇLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan  
Hadiye Sema SAKLAVÇI**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV  
II. Danışman  
Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ**

**Kasım 2025  
KAYSERİ**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Dr.Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV** danışmanlığında **Hadiye Sema SAKLAVÇI** tarafından hazırlanan “**Boşluklu Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

..... / ..... / 20...

**Tez Danışmanı** : Dr. Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV .....

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Şaban Suat ÖZSARIYILDIZ .....

**Üye** : Doç. Dr. Ali BOZER .....

### ONAY

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun ..... tarih ve ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.... / .... / 20....

Doç. Dr. Burcu ORALHAN

Enstitü Müdürü

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYAN

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Nuh Naci Yazgan Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanıma hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Kütüphanesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

oEnstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. (1)

oEnstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren ... ay ertelenmiştir. (2)

oTezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. (3)

...../...../.....

(İmza)

Hadiye Sema SAKLAVÇI

“**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**”

(1)Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez **danışmanının önerisi** ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

(2)Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez **danışmanının önerisi** ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulunun** gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

(3)Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, **tezin yapıldığı kurum** tarafından verilir \*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, **ilgili kurum ve kuruluşun önerisi** ile **enstitü** veya **fakültenin** uygun görüşü üzerine **üniversite yönetim kurulu** tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir; gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

\* Tez **danışmanının önerisi** ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** tarafından karar verilir.

## ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, *Dr. Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV* danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna göre yazıldığını beyan ederim.

(İmza)

*Hadiye Sema SAKLAVÇI*

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda engin bilgisi ve desteklerinden dolayı değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV' e ve yardımcı danışmanım Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ' ye çok teşekkür ediyorum.

Çalışmamda yardımlarını hiç esirgemeyen babam Op. Dr. Nuh SAKLAVÇI, abim İnş. Müh. Emrecan SAKLAVÇI, Sayın Ferhat ÜNAL, İnş. Yüksek Müh. Hakan YILMAZ, İnş. Yüksek Müh. Ersin YİĞİT, Sayın Ahmet ERDEN, Arş. Gör. Hüseyin Hilmi ASLANBAY, Arş. Gör. Merve ARPACIKTAŞ ve İnş Müh. Samet ARPACIKTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Yardımları ve desteklerinden dolayı Mavi Yapı Laboratuvarı Sayın Ebru ARİFOĞLU, Sayın Sait ARİFOĞLU ve Sayın Murat TOK'a ve ayrıca malzeme desteği sağlayan Tetraglobe Yapı Malzemeleri Pazarlama A.Ş.ye teşekkür ederim.

Desteklerini ve varlıklarını her zaman yanımda hissettiğim değerli aileme; annem Kültür Bakanlığı Sanatkarı Dr. Fatmagül SAKLAVÇI, İkiz kardeşim Mimar Ayşe Sima SAKLAVÇI, küçük kardeşim RD. Fzt. Cemre SAKLAVÇI ve Hrt. Müh. Cennet SAKLAVÇI'ya çok teşekkür ediyorum. (Kayseri, Kasım 2025).

Hadiye Sema SAKLAVÇI

# **BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Hadiye Sema SAKLAVÇI**

**Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi, Kasım 2025**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ertan SÜLEV**

## **ÖZET**

Betonarme kirişlerin tasarım aşamasında öngörülebilir veya öngörülemez elektrik veya mekanik tesisat ihtiyaçları için boşluklar bırakılabilmekte veya sonradan mekanik olarak çok farklı ölçü ve ebatla genellikle dairesel ve dikdörtgen boşluklar açılabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında boşluklu betonarme kirişlerin farklı güçlendirme metodları ile güçlendirilmesinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Kirişler 1/1 ölçekte sık kullanılan ebatlarda ve reel ölçülerde üretilmiştir. Bu çalışmada, gerçek kiriş davranışını yansıtabilmek için ankastre mesnet şartlarında, dört noktalı eğilme yükleme düzeneği kullanılmıştır. 25x60x350 cm ölçülerinde C25 beton ve donatı düzeni birbiri ile aynı B420Ç donatı sınıfında, altı adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Numunelerden bir adedi boşluksuz referans olacak şekilde, 5 adedi sonradan karot marifeti ile 30cm çaplı dairesel boşluk açılmak sureti ile boşluklu hale getirilmiştir. Boşluklu kirişlerden bir tanesi boşluklu referans kiriş olarak diğer bir tanesine ise boşluk bölgesine yakın fiziksel olarak eğilme çatlağı formunda kesit hasarı verdirilmesi suretiyle hasarlı numune olarak kabulü yapılmıştır. Hasar verilen boşluklu kiriş ile diğer boşluklu kirişlerden bir tanesi FRP kumaş ile 3 tarafı sargılı biçimde güçlendirilmiş; diğer üç adet boşluklu betonarme kiriş farklı FRP (Fiber Reinforced polymer) uygulamaları kullanılarak güçlendirilmesi yapılarak deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarında kiriş elemanların orta bölgelerindeki gövdede açılan boşlukların FRP ile farklı uygulama yöntemleriyle güçlendirildiği takdirde salt eğilme altında kaybettiği dayanım ve sünekliğinde kaydadeğer bir geri kazanım elde edildiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluklu betonarme kiriş, kiriş güçlendirme, karbon fiber(CFRP),

# **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE STRENGTHENING OF HOLLOW REINFORCED CONCRETE BEAMS**

**Hadiye Sema SAKLAVÇI**

**Nuh Naci Yazgan University, Institute of Graduate Studies**

**Master of Science (M. Sc.) Thesis, November 2025**

**Supervisor: Asst. Prof. Ertan SÜLEV**

During the design phase of reinforced concrete (RC) beams, openings may be intentionally provided to accommodate anticipated or unanticipated electrical and mechanical service requirements. Alternatively, circular or rectangular openings of various sizes may be introduced at later stages through mechanical drilling.

The objective of this study is to experimentally investigate the strengthening behavior of RC beams with web openings using different fiber-reinforced polymer (FRP) strengthening techniques. All beam specimens were manufactured at full scale (1:1) using commonly adopted practical dimensions. To realistically simulate actual beam behavior, a four-point bending test configuration was employed under fixed-end support conditions. A total of six RC beam specimens with dimensions of  $25 \times 60 \times 350$  cm were cast using C25 concrete and identical reinforcement layouts consisting of B420C reinforcing steel. One specimen was produced as a solid reference beam without openings, while five specimens were rendered hollow by introducing a circular web opening with a diameter of 300 mm through core drilling after casting. Among the beams with web openings, one specimen was designated as the hollow reference beam, while another specimen was classified as a damaged beam by intentionally inducing sectional damage in the form of a flexural crack near the opening region. The damaged hollow beam and one additional hollow beam were strengthened using three-sided FRP fabric wrapping. The remaining three hollow RC beams were strengthened using different FRP application configurations and subsequently subjected to experimental testing.

The experimental results demonstrated that strengthening the midspan web openings using various FRP techniques resulted in a significant recovery of both load-carrying capacity and ductility that had been lost under pure bending conditions.

**Keywords:** Reinforced concrete beam with web opening, carbon fiber fabric, beam retrofit

# İÇİNDEKİLER

## BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

### Sayfa

|                                                |      |
|------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY SAYFASI.....                     | i    |
| YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYAN..... | ii   |
| ETİK BEYAN .....                               | iii  |
| TEŞEKKÜR .....                                 | iv   |
| ÖZET .....                                     | v    |
| İÇİNDEKİLER.....                               | vii  |
| KISALTMA VE SİMGELER LİSTESİ.....              | x    |
| TABLolar LİSTESİ .....                         | xiii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                          | xiv  |

### 1. BÖLÜM: GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1.1. Giriş .....                    | 1 |
| 1.2. Genel Bilgiler.....            | 2 |
| 1.3. Çalışmanın Amacı.....          | 2 |
| 1.4. İlgili Literatür Özetleri..... | 3 |

### 2. BÖLÜM: MATERYAL VE YÖNTEM

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Deney Numuneleri .....                                                            | 20 |
| 2.1.1. Boyut, Geometrik ve Diğer Parametrelerinin Belirlenmesi .....                   | 21 |
| 2.1.1.1. Referans Kirişler .....                                                       | 23 |
| 2.1.1.2. U Şeklinde Sargılama ile Güçlendirilen Hasarlı Numune .....                   | 23 |
| 2.1.1.3. U Şeklinde Sargılama ile Güçlendirilen Numune.....                            | 23 |
| 2.1.1.4. FRP Halat ile Güçlendirilen Numune .....                                      | 23 |
| 2.1.1.5. FRP Plaka, FRP Kumaş ve FRP Kask ile Güçlendirilen<br>Numune .....            | 24 |
| 2.1.2. Beton Sınıfı, Donatı Bilgileri ve Detayları .....                               | 24 |
| 2.1.2.1. Kiriş Donatılarının Belirlenmesi ve Yönetmelik Kriterlerine<br>Uygunluğu..... | 24 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.2.2. Numunelerin Donatı Düzeni ve Bilgileri .....                   | 25 |
| 2.2. Deney Numunelerinin Üretilmesi .....                               | 26 |
| 2.2.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri .....         | 29 |
| 2.2.1.1. Beton Basınç Deneyleri.....                                    | 30 |
| 2.2.1.2. Karot Deneyleri .....                                          | 31 |
| 2.2.1.3. Kullanılan Güçlendirme Malzemelerinin Teknik Özellikleri ..... | 32 |
| 2.2.1.3.1. CFRP Kumaş.....                                              | 32 |
| 2.2.1.3.2. CFRP Plaka .....                                             | 33 |
| 2.2.1.3.3. CFRP Halat .....                                             | 34 |
| 2.2.1.3.4. Karbon Plaka Yapıştırıcı Epoksi.....                         | 35 |
| 2.2.1.3.5. Karbon Kumaş Yapıştırıcı Epoksi .....                        | 36 |
| 2.3. Betonarme Kiriş Deneyleri .....                                    | 37 |
| 2.3.1. Deney Düzeneği.....                                              | 37 |
| 2.3.1.1. Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar ve Cihazlar.....              | 40 |
| 2.3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....                           | 43 |
| 2.3.2.1. Güçlendirme yapılan Deney Numunelerinin Hazırlanması .....     | 43 |

### 3. BÖLÜM: DENEYLER VE BULGULAR

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Deneyler.....                                                                      | 48 |
| 3.1.1. Deney Numunelerine Ait Sonuçlardan Elde Edilecek Veriler ve Grafikler .....      | 48 |
| 3.1.1.1. Yük-Deplasman Eğrilerinin Çizilmesi .....                                      | 48 |
| 3.1.1.2. Rijitlik Grafiklerinin Çizilmesi .....                                         | 49 |
| 3.1.1.3. Moment-Eğrilik Grafiklerinin Çizilmesi.....                                    | 50 |
| 3.1.1.4. Süneklik Değerlerinin Elde Edilmesi.....                                       | 51 |
| 3.1.1.4.1. İdealleştirilmiş Zarf Eğrisi ve Enerji Tüketimi Grafiklerinin Çizilmesi..... | 51 |
| 3.2. Deney Sonuçları.....                                                               | 52 |
| 3.2.1. B-REF Deney Numunesi .....                                                       | 52 |
| 3.2.2. B-REF-WO Deney Numunesi .....                                                    | 57 |
| 3.2.3. B1-DEF- RET -WO Deney Numunesi .....                                             | 62 |
| 3.2.4. B2-RET-WO Deney Numunesi .....                                                   | 68 |
| 3.2.5. B4-RET-PL2-WO Deney Numunesi .....                                               | 73 |
| 3.2.6. B5-RET-ROP-WO Deney Numunesi.....                                                | 79 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 3.3. Enerji Tüketimi .....                                | 83 |
| 3.3.1. B-REF Deney Numunesi Enerji Tüketimi.....          | 83 |
| 3.3.2. B-REF-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi.....       | 83 |
| 3.3.3. B1-DEF-RET-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi.....  | 84 |
| 3.3.4. B2-RET-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi .....     | 84 |
| 3.3.5. B4-RET-PL2-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi ..... | 85 |
| 3.3.6. B5-RET-ROP-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi ..... | 85 |

#### **4. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER**

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1. Sonuçlar .....                                                      | 86        |
| 4.1.1. Yük- Orta nokta Deplasman Karşılaştırılması.....                  | 86        |
| 4.1.2. Süneklik-Enerji Tüketim-Akma Kuvveti Karşılaştırması .....        | 91        |
| 4.2. Öneriler .....                                                      | 92        |
| <b>KAYNAKÇA.....</b>                                                     | <b>93</b> |
| <b>EKLER .....</b>                                                       | <b>98</b> |
| EK 1. Numunelerde Yüklemeyle Bağlı Olarak Çatlak Gelişim Durumları ..... | 98        |

## KISALTMA VE SİMGELER LİSTESİ

### Simgeler

|                              |                                                                    |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>h</b>                     | Kiriş yüksekliği                                                   |
| <b>a</b>                     | Kesme Açıklığı                                                     |
| <b><math>\Delta u</math></b> | Nihai Deplasman                                                    |
| <b><math>\Delta y</math></b> | Akma Deplasmanı                                                    |
| <b><math>\mu</math></b>      | Süneklik Oranı                                                     |
| <b>As</b>                    | Kiriş çekme donatısı alanı                                         |
| <b>A's</b>                   | Kiriş basınç donatısı alanı                                        |
| <b>Asw</b>                   | Kesme donatısı toplam kesme alanı                                  |
| <b>bw</b>                    | Kiriş genişliği                                                    |
| <b>c</b>                     | Tarafsız eksen derinliği                                           |
| <b>C25</b>                   | 28 gün suda bekletilmiş silindir basınç dayanımı 25 MPa olan beton |
| <b>d</b>                     | Kiriş faydalı yüksekliği                                           |
| <b>d'</b>                    | Pas payı                                                           |
| <b>E</b>                     | Elastisite Modülü                                                  |
| <b>fcd</b>                   | Betonun tasarım silindir basınç dayanımı                           |
| <b>fck</b>                   | Betonun karakteristik silindir basınç dayanımı                     |
| <b>fctd</b>                  | Betonun tasarım çekme dayanımı                                     |
| <b>fctk</b>                  | Betonun karakteristik çekme dayanımı                               |
| <b>fcd</b>                   | Donatının tasarım akma dayanımı                                    |
| <b>fnet</b>                  | Net eğilme dayanımı                                                |
| <b>fyk</b>                   | Donatının karakteristik akma dayanımı                              |
| <b>fywd</b>                  | Enine donatının tasarım akma dayanımı                              |
| <b>h</b>                     | Kiriş yüksekliği                                                   |
| <b>K</b>                     | Eğrilik                                                            |
| <b>k1</b>                    | Beton sınıfına bağlı olan katsayı                                  |
| <b>K<sub>lk</sub></b>        | Deney numunesindeki ilk yüklemede ölçülen rijitlik değeri          |
| <b>K<sub>j</sub></b>         | Deney numunesindeki i' inci yüklemede ölçülen rijitlik değeri      |
| <b>kN</b>                    | Kilo Newton                                                        |
| <b>L</b>                     | Kiriş boyu                                                         |
| <b>LOP</b>                   | Orantısız sınır (MPa)                                              |

|                |                                                            |
|----------------|------------------------------------------------------------|
| <b>M</b>       | Eğilme momenti                                             |
| <b>m</b>       | Metre                                                      |
| <b>mm</b>      | Milimetre                                                  |
| <b>Mpa</b>     | Mega Pascal                                                |
| <b>Mr</b>      | Taşıma gücü momenti                                        |
| <b>P</b>       | Kirişe uygulanan yük                                       |
| <b>rad</b>     | Radyan                                                     |
| <b>s</b>       | Enine donatı (ettriye) aralığı                             |
| <b>TBDY</b>    | Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği                            |
| <b>V</b>       | Kesme kuvveti                                              |
| <b>Vc</b>      | Kesme dayanımına beton katkısı                             |
| <b>Vcr</b>     | Kesitin kesmede çatlama dayanımı                           |
| <b>Vr</b>      | Kesme dayanımı                                             |
| <b>Vw</b>      | Kesme dayanımına enine donatı (ettriye) katkısı            |
| $\Delta$       | Deney elemanında meydana gelen deplasman                   |
| $\delta_i$     | i' inci yüklemede deney elemanında meydana gelen deplasman |
| $\delta_{max}$ | Deney elemanında elde edilen maksimum deplasman            |
| $\delta_u$     | Göçme anında ölçülen deplasman                             |
| $\delta_y$     | Akma anında ölçülen deplasman                              |
| $\varepsilon$  | Şekil değiştirme                                           |
| $\emptyset$    | Donatı çapı                                                |
| $\rho_b$       | Dengeli donatı oranı                                       |
| $\rho_{max}$   | Maksimum donatı oranı                                      |
| $\rho_{min}$   | Minimum donatı oranı                                       |
| $\sigma$       | Gerilme                                                    |

## **Kısaltmalar**

|                      |                                                                                                                           |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ACI</b>           | American concrete institute                                                                                               |
| <b>LVDT</b>          | Elektronik deplasman ölçer                                                                                                |
| <b>PC</b>            | Potansiyometrik Cetvel                                                                                                    |
| <b>TBDY 2018</b>     | Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik<br>TS 500 (2000) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları |
| <b>FRP</b>           | Fiber Reinforced Polymer                                                                                                  |
| <b>CFRP</b>          | Carbon Fiber Reinforced Polymer(Karbon Fiber)                                                                             |
| <b>B-REF</b>         | Referans kiriş                                                                                                            |
| <b>B-REF-WO</b>      | Referans boşluklu kiriş                                                                                                   |
| <b>B1-DEF-RET-WO</b> | Ön hasarlı, U şekilli FRP kumaş ile güçlendirilmiş kiriş                                                                  |
| <b>B2-RET-WO</b>     | U şekilli FRP kumaş ile güçlendirilmiş kiriş                                                                              |
| <b>B5-RET-ROP-WO</b> | FRP halat ile güçlendirilmiş kiriş                                                                                        |
| <b>B4-RET-PL2-WO</b> | FRP plaka, kumaş ve kasnak ile güçlendirilmiş kiriş                                                                       |

## TABLÖLER LİSTESİ

### Sayfa

|           |                                                                                          |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.  | Kiriş numunelerinin boyut özellikleri ve adlandırılması.....                             | 21 |
| Tablo 2.  | Beton ve donatının mekanik özellikleri.....                                              | 24 |
| Tablo 3.  | Deney numunelerine ait donatı özellikleri .....                                          | 25 |
| Tablo 4.  | Donatı Çekme Deneyi Sonuçları.....                                                       | 30 |
| Tablo 5.  | Beton Basınç Dayanımı Test Sonuçları.....                                                | 31 |
| Tablo 6.  | Karot sonuçları .....                                                                    | 32 |
| Tablo 7.  | Çift Yönlü 600gr CFRP Karbon kumaşların teknik özellikleri.....                          | 33 |
| Tablo 8.  | CFRP plakanın teknik özellikleri .....                                                   | 34 |
| Tablo 9.  | CFRP halatın teknik özellikleri .....                                                    | 35 |
| Tablo 10. | TETRAPOX EPCP epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri.....                              | 36 |
| Tablo 11. | TETRAPOX EPCP epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri.....                              | 37 |
| Tablo 12. | B REF - B REF WO - B2 RET WO süneklik ve enerji tüketim<br>kıyaslaması .....             | 87 |
| Tablo 13. | B REF WO - B1 DEF RET WO - B2 RET WO süneklik ve enerji tüketim<br>kıyaslaması .....     | 88 |
| Tablo 14. | B2 RET WO – B4 RET PL2 WO – B5 RET ROP WO süneklik ve enerji<br>tüketim kıyaslaması..... | 89 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 1. Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünümü .....                                 | 19           |
| Şekil 2. LVDT ve PC'lerin kiriş üzerindeki konumlandırılması.....                   | 20           |
| Şekil 3. Kiriş yükleme durumu.....                                                  | 22           |
| Şekil 4. Kiriş kesme kuvveti grafiği.....                                           | 22           |
| Şekil 5. Kiriş moment grafiği .....                                                 | 22           |
| Şekil 6. Kirişlerin kesit ve donatı detayları .....                                 | 26           |
| Şekil 7. Donatı hazırlığı ve ahşap kalıpların kurulması.....                        | 27           |
| Şekil 8. Beton dökümü ve vibratör uygulaması .....                                  | 27           |
| Şekil 9. Silindir numuneler .....                                                   | 28           |
| Şekil 10. Kiriş numunelerden karot alınması .....                                   | 28           |
| Şekil 11. Kiriş numunelerinin laboratuvara taşınması.....                           | 29           |
| Şekil 12. Donatı çelikleri ve Çekme Deneyi .....                                    | 29           |
| Şekil 13. Basınç Dayanımı Testi .....                                               | 31           |
| Şekil 14. Karot numuneleri.....                                                     | 32           |
| Şekil 15. Çift yönlü karbon fiber kumaş.....                                        | 33           |
| Şekil 16. CFRP plaka.....                                                           | 34           |
| Şekil 17. CFRP Halat.....                                                           | 35           |
| Şekil 18. TETRAPOX EPCP epoksi yapıştırıcı .....                                    | 36           |
| Şekil 19. TETRAPOX EPFB epoksi yapıştırıcı .....                                    | 37           |
| Şekil 20. Çelikten imal edilmiş mesnet ayakları ve vinç ile düzeneğe yerleşimi..... | 38           |
| Şekil 21. Deneylerde kullanılan deplasman ölçüm aletleri .....                      | 39           |
| Şekil 22. Çatlak ölçüm cetveli.....                                                 | 39           |
| Şekil 23. Betonarme kiriş yükleme düzeneği.....                                     | 40           |
| Şekil 24. Yükleme kirişi, yük hücresi ve hidrolik piston .....                      | 41           |
| Şekil 25. Elektrikli motor .....                                                    | 42           |
| Şekil 26. Veri toplama cihazı .....                                                 | 42           |
| Şekil 27. Deplasman ölçerlerin deney düzeneğindeki konumu.....                      | 43           |
| Şekil 28. B1-DEF-RET-WO kiriş numunesinin ön hasarı .....                           | 43           |
| Şekil 29. Epoksi harcının hazırlanması .....                                        | 44           |
| Şekil 30. B1-DEF-RET-WO kiriş numunesinin güçlendirme aşamaları .....               | 45           |
| Şekil 31. B2-RET-WO kiriş numunesinin güçlendirilmesi.....                          | 46           |

|           |                                                                          |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 32. | B4-RET-PL2-WO kiriş numunesinin güçlendirme aşamaları .....              | 46 |
| Şekil 33. | B4-RET-PL2-WO kiriş numunesinin güçlendirme aşamaları .....              | 47 |
| Şekil 34. | B5-RET-ROP-WO kiriş numunesinin güçlendirilmiş hali .....                | 47 |
| Şekil 35. | Rijitliklerin Elde Edilmesi.....                                         | 49 |
| Şekil 36. | Kiriş numunelerinin eğriliklerinin belirlenmesi .....                    | 50 |
| Şekil 37. | Süneklik değerinin elde edilmesi .....                                   | 51 |
| Şekil 38. | B-REF numunesinin deney öncesi görünümü.....                             | 53 |
| Şekil 39. | B-REF numunesinin deney sonrası görünümü.....                            | 54 |
| Şekil 40. | B-REF numunesinin çatlak dağılımı .....                                  | 54 |
| Şekil 41. | B-REF numunesinin arkasındaki çatlak dağılımı.....                       | 55 |
| Şekil 42. | B-REF kirişi yük orta deplasman grafiği .....                            | 55 |
| Şekil 43. | B-REF kirişi rijitlik değişimi grafiği .....                             | 56 |
| Şekil 44. | B-REF kirişi moment-eğrilik grafiği .....                                | 56 |
| Şekil 45. | B-REF kirişi iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği .....       | 57 |
| Şekil 46. | B-REF-WO numunesinin deney öncesi görünümü.....                          | 57 |
| Şekil 47. | B-REF-WO numunesinin deney sonrası görünümü.....                         | 58 |
| Şekil 48. | B-REF-WO numunesinin deney sonrası eğilme çatlağı.....                   | 59 |
| Şekil 49. | B-REF-WO numunesinin çatlaklarının ölçülmesi .....                       | 59 |
| Şekil 50. | B-REF-WO numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü.....     | 60 |
| Şekil 51. | B-REF-WO kirişi yük orta deplasman grafiği .....                         | 60 |
| Şekil 52. | B-REF-WO kirişi rijitlik değişim grafiği .....                           | 61 |
| Şekil 53. | B-REF-WO kirişi moment-eğrilik grafiği .....                             | 61 |
| Şekil 54. | B-REF-WO kirişi iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği .....    | 62 |
| Şekil 55. | B1-DEF- RET –WO numunesinin deney öncesi görünümü .....                  | 62 |
| Şekil 56. | B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası görünümü.....                  | 64 |
| Şekil 57. | B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası çatların görünümü.....         | 64 |
| Şekil 58. | B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası hasarlı görünümü .....         | 65 |
| Şekil 59. | B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası hasarlı görünümü .....         | 65 |
| Şekil 60. | B1-DEF-RET-WO kirişi yük orta deplasman grafiği .....                    | 66 |
| Şekil 61. | B1-DEF-RET-WO kirişi rijitlik değişimi grafiği.....                      | 66 |
| Şekil 62. | B1-DEF-RET-WO kirişi moment-eğrilik grafiği.....                         | 67 |
| Şekil 63. | B1-DEF-RET-WO kirişi 4 eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği ..... | 67 |
| Şekil 64. | B2-RET-WO numunesinin deney öncesi görünümü.....                         | 68 |
| Şekil 65. | B2-RET-WO numunesinin deney sonrası görünümü .....                       | 70 |

|           |                                                                                   |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 66. | B2-RET-WO numunesinin hasar dağılımları.....                                      | 70 |
| Şekil 67. | B2-RET-WO numunesinin hasar dağılımları.....                                      | 71 |
| Şekil 68. | B2-RET-WO kirişi yük orta deplasman grafiği .....                                 | 71 |
| Şekil 69. | B2-RET-WO rijitlik değişimi grafiği .....                                         | 72 |
| Şekil 70. | B2-RET-WO moment-eğrilik grafiği.....                                             | 72 |
| Şekil 71. | B2-RET-WO kirişi 4 eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği .....              | 73 |
| Şekil 72. | B4-RET-PL2-WO numunesinin deney öncesi görünümü.....                              | 73 |
| Şekil 73. | B4-RET-PL2-WO numunesinin deney sonrası görünümü .....                            | 75 |
| Şekil 74. | B4-RET-PL2-WO numunesinin deney sonrası görünümü .....                            | 75 |
| Şekil 75. | B4-RET-PL2-WO numunesinin deney sonrası görünümü .....                            | 76 |
| Şekil 76. | B4-RET-PL2-WO kirişi yük orta deplasman grafiği .....                             | 77 |
| Şekil 77. | B4-RET-PL2-WO kirişi rijitlik değişimi grafiği.....                               | 77 |
| Şekil 78. | B4-RET-PL2-WO kirişi moment-eğrilik grafiği.....                                  | 78 |
| Şekil 79. | B4-RET-PL2-WO kirişi 4 eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği .....          | 78 |
| Şekil 80. | B5-RET-ROP-WO numunesinin deney öncesi görünümü .....                             | 79 |
| Şekil 81. | B5-RET-ROP-WO numunesinin deney sonrası görünümü .....                            | 80 |
| Şekil 82. | B5-RET-ROP-WO numunesinin hasar görünümleri .....                                 | 80 |
| Şekil 83. | B5-RET-ROP-WO kirişi yük orta deplasman grafiği .....                             | 81 |
| Şekil 84. | B5-RET-ROP-WO kirişi rijitlik değişim grafiği.....                                | 81 |
| Şekil 85. | B5-RET-ROP-WO kirişi moment-eğrilik grafiği.....                                  | 82 |
| Şekil 86. | B5-RET-ROP-WO kirişi iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği.....         | 82 |
| Şekil 87. | B-REF deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği.....                 | 83 |
| Şekil 88. | B-REF-Wo deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği.....              | 83 |
| Şekil 89. | B1-DEF-RET-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği..            | 84 |
| Şekil 90. | B2-RET-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği.....             | 84 |
| Şekil 91. | B4-RET-PL2-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği...           | 85 |
| Şekil 92. | B5-RET-ROP-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği..            | 85 |
| Şekil 93. | Yük Orta nokta deplasman grafiği .....                                            | 86 |
| Şekil 94. | B REF-B REF WO-B2 RET WO deneylerinin karşılaştırma grafiği .....                 | 87 |
| Şekil 95. | B REF WO - B1 DEF RET WO - B2 RET WO deneylerinin karşılaştırma grafiği .....     | 89 |
| Şekil 96. | B2 RET WO – B4 RET PL2 WO – B5 RET ROP WO deneylerinin karşılaştırma grafiği..... | 90 |
| Şekil 97. | Süneklik karşılaştırma grafiği .....                                              | 91 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 98. Enerji tüketim karşılaştırma grafiği.....        | 91 |
| Şekil 99. Tüm girişler akma noktaları karşılatırması ..... | 92 |



# 1. BÖLÜM:

## GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 1.1. Giriş

İnsanın can güvenliği en önemli unsurlardan biridir. İnsanlık var olduğu sürece yaşamak için barınmaya ihtiyaç duyulmuştur bunun için insanlar yaşanan tarihin coğrafya ve şartlarına göre, elindeki malzemeyle kendine uygun, yaşanabilir bir yapı inşa etmiştir. Günümüz koşullarında sıklıkla beton ve çeliğin birlikte kullanılması ile ‘betonarme’ yapılar inşa edilmektedir. Bu betonarme yapının özellikleri standartlar ve yönetmeliklerle belirlenmektedir. Betonarme binaların tasarımında yük taşıma kapasitesi, malzeme özellikleri, çevresel faktörler gibi ekonomik olması bina tasarımını etkileyen faktörlerdendir. Betonarme yapılarda yükü iletip, bu yükün dağılımını sağlayan yatay bir taşıyıcı elemanlardan biri olan kirişler hem elemanın taşıma kapasitesini arttırmak hem de mevcut yapının güvenliğini sağlamak amacı ile güçlendirilebilir. Bazı durumlarda da kirişlere sonradan boşluklar açılabilmekte ve kirişin hesaplanan kapasiteleri düşebilmektedir. Bu gibi öngörülemeyen durumlarda da güçlendirme işlemi fayda sağlayacaktır. Güçlendirme işlemi, kirişin kullanım amacına, istenen taşıma kapasitesine ve mevcut durumuna bağlı olarak çeşitli metotlarla gerçekleştirilebilir. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için genelde kullanılan metotlar: kirişlere çelik levha veya şerit eklenmesi, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) uygulaması, prekast beton veya ekstra beton katmanları eklenmesi, kirişin dışına mikro çiviler veya çelik çivilerle takviyeler yapılması, epoksi reçine ve diğer yapı kimyasalları ile dış yüzey güçlendirmesi şeklinde olabilmektedir. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılacak metod kiriş davranış özelliklerine göre ve betonarme sistemin ihtiyaçlarına uygun olarak seçilmelidir. Bu çalışma kapsamında birbirinden farklı yöntemlerle güçlendirilmiş ve ankastre mesnet şartlarında, dört noktalı eğilme yükleme düzeneği kullanılarak, üretilmiş olan gerçek boyutlu altı adet betonarme kiriş numunesi teste tabi tutulmuştur. İmal edilen betonarme kirişlerin güçlendirme sonrası davranış ve kapasite değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 1.2. Genel Bilgiler

Deprem etkisi altında betonarme yapıların yatay yükleri düşey taşıyıcı elemanlara aktaran ve yapı rijitliğine katkı sağlayan önemli yapı elemanlarından biri olan kirişlerin taşıma kapasitesi ve davranışının araştırılması önem arz etmektedir. Betonarme kirişlerin tasarım aşamasında öngörülebilir veya öngörülemez elektrik veya mekanik tesisat ihtiyaçları için boşluklar bırakılabilmekte veya sonradan açılabilir. Çok farklı ölçü ve ebatla boşluk şekli mümkün olmasına rağmen genellikle dairesel ve dikdörtgen boşluklar sıkça ihtiyaç duyulan rezervasyon şekilleridir. Boşluklu betonarme kirişler ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda boşluk oranı, bulunduğu konum, şekli, kiriş ölçüleri, mesnetlenme koşulları gibi faktörler farklılık göstermekle birlikte boşluklu kirişlerin güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar kısıtlıdır. Bu çalışmada, ankastre mesnet şartlarında, dört noktalı eğilme yükleme düzeneğinde 25\*60\*350 cm ölçülerinde C25 beton sınıfında donatı düzeni birbiri ile aynı altı adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Numunelerden bir adedi boşluksuz referans olacak şekilde, 5 adedi sonradan karot marifeti ile dairesel boşluk açılmak sureti ile boşluklu hale getirilmiştir. Boşluklu kirişlerden bir tanesine hasar verilerek hasarlı numune olarak, bir tanesi boşluklu referans kiriş olarak değerlendirilmiştir. Hasar verilen boşluklu kiriş ile diğer boşluklu kirişlerden bir tanesi FRP'nin aynı uygulama şekli ile güçlendirilmiş ve sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Dört adet boşluklu kiriş FRP kullanılarak farklı şekillerde güçlendirilerek test edilmiştir. Deneyler sonucunda bulgular referans numuneler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

## 1.3. Çalışmanın Amacı

Taşıyıcı sistem tasarımında mekanik ve elektrik tesisat gereksinimleri nedeni ile ihtiyaç duyulan boşlukların bırakılması durumunda betonarme kiriş ve döşemelerde takviye edici tedbirler alınabilmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) betonarme döşemeler ve perdelerde boşluk bırakılabilmesi için gerekli koşullar belirtilmektedir. Boşluğun büyüklüğü, yeri ve uygulanması durumunda takviye edici tedbirlere yönetmelikte yer verilmiştir. Betonarme kirişler ile ilgili benzer tanımlamalar yönetmelikte yer almamaktadır. Betonarme kirişlerde boşluğa ihtiyaç olunması durumunda kirişin tasarım aşamasında hesaplama yapılarak bırakılabileceği gibi sonradan boşluk açılması durumunda kirişin farklı yollarla güçlendirilmesi önem arz etmektedir. Ankastre mesnetli betonarme kirişlerde açıklık ortası moment değeri mesnet noktalarına oranla daha düşük olacağı için boşluğun eğilme bölgesinde bırakılmasının

daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Kolon kiriş birleşim bölgesinin davranışını en iyi yansıtan mesnetlenme koşulu ankastre mesnet olacağından çalışmada ankastre mesnet şartları sağlanması hedeflenmiştir. Dört noktalı eğilme düzeneği kullanılarak üretilen kirişler test edilmiştir. Çekme donatısı 3Ø14, basınç donatısı 2Ø14, kesme donatısı Ø8/10, gövde donatısı 2Ø12 donatı düzeninde 25\*60\*350 cm ebatlarında 6 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Numunelerden bir adedi boşluksuz referans olacak şekilde, 5 adedi sonradan karot marifeti ile 30 cm dairesel boşluk açılmak sureti ile boşluklu hale getirilmiştir. Boşluklu kirişlerden bir tanesi referans kiriş olarak belirlenmiştir. Dört adet boşluklu betonarme kiriş FRP (Fiber Reinforced Polymer) malzemesi kullanılarak farklı şekillerde güçlendirilmesi ile kapasitelerinin tasarım aşamasındaki kapasitelerine yaklaştırılması amaçlanmıştır. Deneyler sonucunda bulgular referans numuneler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

#### 1.4. İlgili Literatür Özetleri

**Mohammady ve ark. [1]**, çalışmalarında, boşluğa sahip betonarme kirişlerin CFRP nin farklı uygulamaları ile onarılması adına deneysel çalışma yapmışlardır. Bu amaçla 3 adet kiriş numunesinin ilkinde CFRP nin boşluk etrafına U şekilli sarma yöntemi ile ikinci numuneye U şekilli sarma üstüne çapraz FRP sarılması ile üçüncü numunede de U şekilli FRP sarma üstüne çapraz FRP sarma, onunda üstüne de FRP ankraj uygulayıp test etmişlerdir. Sonuçlar, CFRP kumaş ile yapılan onarımların kirişlerin davranışlarında büyük katkısının olduğunu göstermiştir. Yapılan güçlendirme neticesinde 3 numunede de kapasite artışı olduğu fakat en çok üçüncü numunede performans artışı gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin enerji tüketim değerlerinde ve sünekliliklerinde artış oluştururken rijitlik değerlerini çok etkilememiştir.

**Abuwarda [2]**, çalışmasında dıştan sargı takviyesi tekniği (EBR), geliştirilen sürtünme hibrit bağlantı tekniği (FHB) ve yüzeyde montaj tekniği (NSM) olmak üzere 3 farklı metod ile 25\*50\*170 boyutlarında 8 adet betonarme kirişi güçlendirmiş, 1.3 a/h oranı, iki uçtan ankastre mesnet ve dört noktalı eğilme düzeneğinde deneylerini yapmış ve performanslarını araştırmıştır. Kirişlerinden birini referans olması adına güçlendirmemiş, diğerlerini geleneksel donatı veya CFRP ile farklı şekillerle güçlendirmiştir. Deneyin parametreleri uygulanan güçlendirme metodları olmak üzere CFRP sargı EBR tekniğinde, kullanılan malzemenin özelliği ile NSM çelik çubukların ankraj uçları da NSM tekniğindedir. Çalışmanın sonuçlarında kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde referans kirişe göre EBR, FHB ve NSM tekniklerinde sırasıyla %18.4-

37.2, %45.4, %35.3-53.6 aralıklarında yükselme görülmüştür. Tüm metodlarla güçlendirilen kirişlerin düktilitelerinde önemli bir artış olmuştur. Çalışmanın sonuçlarında uç kısmı ankrajlı olan NSM çelik çubuklu uygulamanın taşıma gücü ve düktilite açısından en iyi performansı verdiği görülmüştür. Çalışmanın sonucunda uygulanan güçlendirme metodlarının betonarme derin kirişlerinin performansının artırılmasında her bakımdan oldukça etkisinin olduğu görülmüştür.

**Alhamdan [3]**, çalışmasında betonarme kirişlerde güçlendirmeye katkısı olacak bazı malzemeler ve tekniklerin belirlenmesini amaçlamıştır. Bu amaçla NSM, EBR, FHB ve hibrit metodu önerileri; CFRP sargı ve çubuk ile geleneksel donatılarla kirişlerin güçlendirilmesini ve performanslarını artırmak amacı ile kullanmıştır. Yedi adet tam ölçekli kiriş üretmiş ve iki uçtan ankastre mesnetli, dört noktalı eğilme düzeneğinde deneylerini yapmıştır. Kirişlerden ilki referans olmak üzere diğer 6 kirişi farklı metodlarla güçlendirmiştir. Deney sonuçlarında, NSM/Çelik metodu kirişlerin yük taşıma kapasitesini, referans kirişe göre %23-25 oranında artırırken, EBR/CFRP' de %12 ve FHB/CFRP tekniğinde %11 oranında artırdığını görmüştür. Bununla birlikte, betonun ezilme dayanımında NSM/Çelik'te %59 ve FHB/CFRP metodunda %45,5 artış gösterirken, akma dayanımında da sırası ile %66.4, %69.2 artış sağladığını görmüştür. Çalışmasının sonucunda önerilen metotların kirişlerin performansının artırımında büyük etkisinin olduğu görülmüştür.

**Demiral [4]**, çalışmasında kirişin sıklaştırma bölgesinde, tarafsız eksende kirişin yüksekliğinin %20'si, %40'ı ve %60'ı oranında boşlukları olan kirişlerin simetrik tekil yükler altındaki davranışlarını deneyler sonucu araştırmıştır. Diğer kirişlerle karşılaştırmak için 2 adedini boşluksuz referans olarak, kalan 6 adet kirişi de 2h bölgesinde %20'si, %40'ı ve %60'ı oranında boşluğu olan ikişer adet betonarme kiriş ile deneylerini yapmıştır. Deneyin parametresi boşluk oranıdır ve deneylerini ankastre mesnet ile yapmıştır. Çalışmanın sonunda, referans kirişler ile %20 boşluk oranı olan kirişlerin yeterli dayanım ile süneklik gösterdiğini ancak diğer boşluk oranları olan kirişlerin istenen performansı sağlamadığını ortaya koymuştur. Boşluk oranlarına bağlı olarak orta nokta deplasmanların değerlerinin azaldığı görülmüştür. Deneylerin sonucunda, referans kiriş ile %20 boşluk oranı olan kirişlerde enerji tüketme kapasitesi yaklaşık olarak aynı değerde kalırken, %40 ile %60 boşluk oranı olan kirişlerin enerji tüketme kapasitesi önemli miktarda azalmıştır. Kirişlerin yük taşıma kapasitesi karşılaştırılmıştır. Referans kiriş, teorik hesaplamaya göre ortalama %23 oranında artmış, %20 boşluğu olan kiriş teorik hesaplamaya göre ortalama %27 oranında artmış, %40

boşluğu olan kiriş teorik hesaplamaya göre ortalama %10,5 oranında artmış olup %60 boşluğu olan kiriş teorik hesaplamaya göre ortalama %13,5 oranında azalmıştır. Deneylerin sonucunda deney koşulları baz alınacak şekilde %20 boşluk bırakılmasının bir sakınca oluşturmadığını fakat daha çok oranda boşluğun bırakılmasının sakıncalı olduğu görülmüştür. Deney şartlarına göre, %20 oranından daha çok boşluğun bırakılması kirişin taşıma gücünü ve sünekliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

**Aslanbay [5]**, çalışmasında kirişte bırakılan boşlukların kirişin davranışına etkilerini incelemeyi hedeflemiştir. Boşlukları dairesel biçimde, kirişin açıklık ortası yani eğilme bölgesinde konumlandırmıştır. Kiriş numunelerini 1/1 ölçekte 4 tip olarak, ikisi referans olacak şekilde, diğer kirişler de boşluklar her orandan ikişer adet olacak şekilde kirişin yüksekliğinin %20'si, %40'ı ve %60'ı oranında 8 adet imal etmiş ve deneyleri ankastre mesnet ile dört noktalı eğilme düzeneğinde gerçekleştirmiştir. ABAQUS programı ile de kirişleri nümerik analizini yapmıştır. Çalışmanın sonucunda boşluk oranının artması boşluğun belli bir yüzdesine kadar süneklik açısından artış oluşturmuştur. Boşluğun yüksekliğinin %40'ın üstünde olması halinde süneklik azalmış, ani kırılmalar görülmüştür. Boşluk üstü et kalınlığının kirişin yüksekliğinin %20'sinden çok olması, beton ve donatıdaki gerilme yığılmalarını azaltmıştır. Nümerik analizleri yapılan 4 tip kiriş numunesinde deneyle kıyasla akma yükü ile maksimum yük kapasitelerinde artış gözlemlenmiştir. 4 tip kiriş numunesinin elastik bölge davranışları benzerdir. Elastik bölge sonrasında numunelerin hepsi sünek davranış sergilemiştir. Referans, %20, %40 boşluklu kiriş numuneleri benzer davranış sergilerken %60 boşluğu olan numunelerde, yük kapasitelerinde, deplasman değerleri ve enerji tüketme kapasitelerinde ciddi azalmalar olduğu sonucuna ulaşmıştır.

**Tokgöz ve Dünder [6]**, çalışmalarında kirişleri alt ve yan yüzeylerinde CFRP ile güçlendirmeyi amaçlamış, bu amaçla 9 adet kiriş üretmişlerdir. Kesme bakımından yetersiz şekilde ürettikleri üçer adet kirişin kesme bölgelerine 90° ile 45°'lik açılarla CFRP tekstili yapıştırmışlardır bu uygulamanın sonucunda kirişlerin kesme kapasitelerinin yaklaşık %60 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak, 45° ve 90° uygulamaları arasında çok büyük bir fark tespit edilmemiştir.

**Kaya ve ark. [7]**, çalışmalarında betonun basınç ile eğilme dayanımlarına CFRP etkisini araştırmak amacıyla beton sınıfı C30 olan, 150x150x150 mm boyutlarında küp beton ile 100x100x500 mm boyutlarında betonarme kirişler üretmişlerdir. Ürettikleri küp numunelerin yan yüzlerine tek doğrultulu ve farklı şekillerle yapıştırdıkları CFRP şeritleriyle 6 ayrı numune oluşturmuşlardır. Kirişlerin çekme yüzeyinin merkezlerine de

50-75 mm genişlik ile 50, 150, 300 ve 450 mm boyutlarında hazırladıkları CFRP şeritleri numunelere epoksi ile yapıştırmış ve kirişleri güçlendirmişlerdir. Ürettikleri küp numunelerine tek eksenli basınç deneyi, kiriş numunelerine ise dört nokta eğilme deneyi yapmışlardır. Basınç dayanımlarına bakıldığında, CFRP' nin uygulama miktarının en çok olduğu numunelerde en iyi dayanımı gösterdiği, uygulama miktarlarının aynı olması halinde farklı yerlerde bile olsa yaklaşık olarak aynı dayanım değerlerini gösterdiği görülmüştür. Sonuçta CFRP uygulamasının eğilme ile basınç dayanımlarını artırdığı gibi, betonda sünekliliğe katkısının olacağı ve ani şekilde göçmesini engelleyeceği anlaşılmıştır.

**Sayın ve ark. [8],** çalışmalarında, alt yüzeylerine FRP yapıştırılmış betonarme kirişlere, FRP' nin etkilerini analitik şekilde araştırmışlardır. Aynı zamanda, yapıştırıcı kalınlığındaki değişimlerin, taşıma gücü ile eğilme rijitliklerindeki etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Dört adet farklı yapıştırıcı kalınlıklarında FRP'li kiriş ile karşılaştırma amacıyla referans kiriş numunesi kullanılmıştır. FRP kullanımının betonarme kirişlerde eğilme rijitliğini artırdığı görülmüştür. FRP' li kirişlerde FRP'nin gevrek davranım göstermesine neden olduğu ve sonucunda ani göçmelere sebep olacağı anlaşılmıştır. Buna göre tasarım aşamasındayken kullanılacak olan FRP miktarlarının dikkate alınması gerekli görülmüştür. Çalışma sonucunda yapıştırıcı kalınlığındaki artışların eğilme rijitliği ile taşıma gücüne büyük bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. FRP'li kirişlerin taşıma gücünün referans kirişinkine göre yaklaşık olarak 2.5 katı fazlası olduğu görülmüştür. FRP' nin eğilme etkilerine karşı, kirişin taşıma gücünün artırılması için uygun bir güçlendirilme metodu olduğunu belirlemişlerdir. FRP' deki maksimum gerilmelere bakıldığında, maksimum çekme gerilmesine ulaşılmadığı, buna rağmen çekme donatısının akma sınırına ulaştığı görülmüştür. Bu durumda, göçme biçimi olarak, FRP-beton arayüz ayrışmasının gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

**Öncü ve ark. [9],** çalışmalarını analitik ve deneysel olarak 2 bölümle yapmışlardır. Çalışmalarının analitik bölümünde kolonlara tek yönde CFRP sarılmasıyla basınç dayanımının 2 katına kadar çıkarılabileceği görülmüştür. Deneysel çalışmalarındaysa düşük beton dayanımlı kolonların CFRP ile sarıldıktan sonra basınç dayanımlarının CFRP sarılmamış dayanımlarına göre dört katına çıkabildiğini gözlemlemişlerdir. Analitik kısımda teorik bir şekilde elde ettikleri CFRP'li dayanım değeri deney sonuçları ile uyumlu olmuştur. Bu durum, CFRP ile sarmanın düşük dayanıma sahip betonların bile taşıma gücüne olumlu katkısı olduğunu gözlemlemiştir.

Analitik çalışmalarında CFRP' nin kolonlarda süneklik değerlerini artırdığını, böylelikle binanın deprem dayanımına katkısının olacağını değerlendirmiştir.

**Karaahmetli [10]**, çalışmasında GFRP (cam elyaf takviyeli polimer) donatılı derin kirişlerde kesme davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel çalışmasında; aynı boy ve kesit özelliklerinde 12 adet betonarme derin kiriş numunesini dört nokta yükleme etkisi altında test etmiştir.  $a/d$  (Kesme açıklık/derinlik oranı), donatı oranı ve beton çelik lif oranının GFRP donatılı derin kirişlerin kesme davranışı üzerine etkilerini araştırmıştır. Yaptığı deneylerde, tüm kirişlerde kemer davranışı etkin olmuş ve kesme altında diyagonal basınç çubuğu kırılmasıyla taşıma gücüne ulaşmışlardır. Derin kirişlerin kesme davranışında  $a/d$ , donatı oranı ve beton çelik lif oranlarının oldukça etkili olduğunu gözlemlemiştir. Sayısal çalışmasında; basınç ve çekme çubuğu modelini (strut-and-tie model, STM) ele almıştır. Derin kiriş nihai kesme dayanımı tahmininde önemli rol oynayan, diyagonal basınç çubuğu dayanım azaltma faktörünü ( $\beta_s$ ) etkileyen parametreleri incelemiş ve yaptığı analizler sonucunda ACI 318-19 ve CSA S806 için doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri önermiştir. Analizleri sonucunda, araştırdığı parametrelerin GFRP donatılı derin kirişlerin kesme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. Literatürde yer alan deney sonuçlarını sayısal sonuçlar ile karşılaştırdığında, derin kiriş taşıma gücü kapasitelerini ACI 318-19 modeli ile daha yüksek elde ederken, CSA S806 modeli ile daha düşük ve güvenli tarafta elde etmiştir. Çalışması kapsamında önerdiği  $\beta_s$  modelleri, derin kiriş nihai kesme dayanımı tahmininde oldukça başarılı performans göstermiştir.

**Can ve Tokgöz [11]**, çalışmalarında üç farklı metotla (birinci metotta alttan U şeklinde etriye ile iki adet donatı ilavesi, ikinci metotta kiriş çevresinin tam etriye ile altından ve üstünden ikişer adet donatı ilavesiyle mantolama yapmışlardır. Üçüncü metotta ise kirişin kesitinde değişiklik yapmadan sadece kiriş çekme bölgesinde eğilmede çelik lama ile takviye ederek güçlendirmesini yapmışlardır.) onarılan kirişleri hem şahit numuneler ile hem de birbirleriyle kıyaslamışlardır. Toplam 18 adet kirişte yük-deplasman ilişkisi, rijitlik, süneklik ve enerji tüketme kapasitelerini araştırmışlardır. Bütün deney numunelerinde hedefledikleri dayanımlara çok az farklarla ulaşmışlardır. Bütün numunelerde referans kirişlere kıyasla yeterli rijitlik elde etmişlerdir fakat süneklik bakımından mantolanan kirişlerde kesit büyümesinden dolayı süneklik azalmıştır. Onarılmış bütün numunelerin enerji tüketme kapasiteleri, onarım öncesindeki kesitteki referans kirişin enerji tüketme kapasitesini aşmıştır. Onardıkları kirişlerin dayanımları referans kirişlerden daha fazladır. Kirişin yan yüzeylerine yapıştırdıkları plakalar kirişin

eğilmesinde pek etkili olmamıştır fakat kirişlerin alt yüzeyine yapıştırdıkları çelik levhaların davranışa önemli etkisi olmuştur. Bu durumda ikinci metodun diğerlerine göre avantajlı olduğu ve kiriş onarımlarında kullanılabileceği söylenebilir.

**Akkaya [12]**, çalışmasında; FRP (lif elyaf takviyeli polimer) ile güçlendirilmiş betonarme derin kirişlerin kesme davranışını değerlendirmek amacıyla deneysel çalışma yapmıştır. Deneysel çalışmasında, referans kirişleri ve FRP şeritler ile tam sargılı şekilde güçlendirdiği kirişlerin sonuçlarını karşılaştırarak değerlendirmiştir. Kesme açıklığının kirişin etkili derinliğine oranı ( $av/d$ ), düşey ve yatay kesme donatısı oranı, güçlendirilen kirişlerde FRP tipi, şeritler arasındaki açıklık ve katman sayısı çalışmasındaki değişken parametrelerdir. Ürettiği kirişleri üç gruba ayırıp sonuçlarını ayrı ayrı değerlendirmiştir. Birinci grup kirişler: kesme donatısız derin kirişler, ikinci grup kirişler: kesme donatılı derin kirişler, üçüncü grup ise kesme donatılarla FRP arasındaki etkileşimdir.  $av/d$  oranı arttıkça kirişlerin kesme kapasitesinin azalmış ve deplasman kapasitesinin artmış olduğunu görmüştür. FRP şeritlerin derin kirişlerde kesme ve deplasman kapasitesini artırmış olduğunu, kesme donatısı olmayan kirişlerde  $av/d$  oranı arttıkça FRP şeritlerin kirişin kesme kapasitesini artırdığını fakat kesme donatılı kirişlerde ise bu artışı tersi olarak bulduğunu görmüştür. Kesme donatısı olan ve olmayan kirişlerde  $av/d$  oranı arttıkça deplasman kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilk kesme çatlama yükünde önemli derecede değişiklikler görmemiştir.  $av/d$  oranı arttıkça ana kesme çatlağı açısı da azalmaktadır. Düşey kesme donatısının artması FRP şeritlerin etkinliğine olumsuz yönde katkı yapmasına rağmen, yatay kesme donatısının artması FRP şeritlerin etkinliğine olumlu yönde katkı yapmıştır. Yaptığı analitik çalışmada, FRP şeritlerin, kirişlerin kesme kapasitesine katkısını hesaplayan yeni bir bağıntı önermiştir. Bağıntının doğruluğunu araştırmak için literatürde sunulan deneysel çalışmalardan kapsamlı bir veri seti oluşturmuştur. Önerilen, yönetmelikler ve araştırmacıların tahminleri ile deneysel sonuçları karşılaştırmış, önerilen bağıntının istatistiksel olarak daha iyi tahminde bulunduğunu görmüştür.

**Qaderi [13]**, çalışmasında betonarme kirişin gövdesinde açılan boşluk adedi ve yatay doğrultusundaki konum değişiminin kiriş davranışındaki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla bir adedi boşluksuz referans numune, gerisi dairesel boşluklu olmak üzere 9 adet betonarme kiriş eleman üretmiş ve dört nokta eğilme deneylerini yapmıştır. Boşluklu kiriş elemanlarında boşlukların adedini ve yerini değiştirmiş, parametrelerin kirişlerin davranışlarındaki etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak boşlukların artmasıyla ve boşluğun

konumu mesnete yaklaştıkça kirişin taşıma gücünü ve şekil değiştirme özelliğini önemli derecede azalttığı sonucuna varmıştır.

**Atay [14]**, çalışmasında, ilk olarak yapıların depremlerde zarar görmesi ve yıkılmasının sebeplerini araştırmıştır. Yaptığı araştırmalar, yapının depremlerde zarar görmesinin, zemin seçiminden, projelendirme aşamasına, malzeme tercihlerinden inşaat sürecindeki işçilik hatalarına kadar birçok faktörden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Yapının güçlendirilme metotlarının genel olarak sistem ve eleman düzeyinde incelenebilir olduğunu görmüştür. Sistem seviyesinde güçlendirme, genellikle yeni perdeler eklemek, bölme duvarlarını güçlendirmek veya elik levhalar ilave etmek yoluyla gerçekleştirilir, bu metotların seçimlerinde, yapının kullanım amacı, yeni elemanların yaratacağı ek yükler ve mevcuttakilerle yeni elemanların uyum içinde çalışmasını sağlayacak detayların dikkate alınması gerekmektedir. Eleman seviyesinde güçlendirme metotları kapsamında, kolon, kiriş elemanları ve düğüm noktalarının güçlendirilmesi ele alınmaktadır. Bu elemanlarda, betonarme manto ve FRP (lifli polimerler) ile güçlendirme metotları kullanılmaktadır. Söz konusu metotlar, giderilmesi gereken zayıflıklara bağlı olarak farklı şekillerde uygulanmaktadır. Mantolama ile güçlendirilmiş elemanlarda, kapasitede ve enerji yutma kapasitesinde önemli iyileşmeler sağlandığını görmüştür. Eğer yapı kolonunun sünekliğinin artırılması isteniyorsa, manto eleman boyunca süneklik ile birlikte dayanımın da geliştirilmesi gerektiği durumlarda, boyuna donatılarda kat geçişlerinin donatı bindirme boyunca uzatılmasını önermektedir. Mantolama işlemlerinde bir diğer kritik nokta ise donatıların kenetlenmesidir. FRP levhalar ile yapılan güçlendirme metotları da başarı göstermiştir. Bu metotun uygulama şekline bağlı olarak farklı zayıflıklara karşı etkili olduğunu düşünmektedir. Ayrıyeten, FRP (lifli polimerler) veya CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) ile güçlendirilen elemanlarda, eğilme ve kesme kapasitesinde önemli artışlar sağlanabilirken, süneklik problemlerinin de hafifletilebildiğini görmüştür. alışmasının sonucunda, yapıda meydana gelen hasarın tipine ve yapının taşıyıcı sistemine göre güçlendirme yöntemi seçiminin güçlendirilmiş yapının performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu tespit etmiştir.

**Aykaç ve Yılmaz [15]**, çalışmalarında gövdelerinde düzenli boşlukları olan kirişlerin davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Toplam 9 adet kirişle üçünün gövdesinde daire, diğer üç kirişin gövdesinde de üçgen şeklinde boşluklar bulunacak şekilde altı kiriş ile karşılaştırmak için referans olan boşluksuz üç kiriş hazırlayıp deneylerini yapmışlardır. Deneyin değişkenleri boşluk geometrisi ve çekme bölgesindeki

donatı oranıdır. Çalışmalarının sonucunda az sayıda, normal çekme donatısına sahip kirişlerin yeterli dayanımla süneklik gösterdiğini ancak çok donatılı kirişlerin ise yeterli bir başarı elde edemediğini tespit etmişlerdir. Bu sebeple donatının çok olduğu kirişler için değişik donatı düzenleme yöntemleriyle çalışmaların devam edilmesine karar vermişlerdir. Dayanımla süneklik açısından dairesel boşluklu olanlar, üçgen boşluklulara göre daha iyi performans sergilemiştir.

**Smarzewski [16]**, çalışmasında, güçlendirilmiş, boşluklu, yüksek performanslı beton (HPC) kirişlerin performansını artırmak amacıyla hibrid çelik-polipropilen kullanımıyla ilgili testlerin sonuçlarını değerlendirmiştir. Altı adet basit mesnetli kirişi üç noktalı eğilme altında test etmiştir. Kesme bölgesinde, üç kirişte orta noktalara simetrik olarak iki kare boşluk yerleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, hibrit lif içeriği %1'in üzerinde olan boşluksuz kirişler ve %1,6'nın üzerinde lif eklenen boşluklu kirişler, en yüksek verim ve maksimum performansı sergilemiştir. Hibrit lif oranındaki artış, kirişlerin ilk çatlama yükünü, nihai yük kapasitesini, tokluğunu ve sünekliğini artırmıştır. Ancak, standart betonarme kirişlere kıyasla, çatlaklar arası mesafe, çatlak genişliği ve yükte bir azalma gözlemlenmiştir. Elyafli kirişlerde en büyük etkiyi gözlemlenmiş ve bu etkiyi en az sırasıyla %1 ve %1,6'lık oranlarında görmüştür. Düşük lif oranına sahip kirişlerde ise, nihai yükte bir azalma ve ani kesme kırılması gözlemlenmiştir. Hibrit lifli kirişlerde minimum/ortalama çatlak aralığı ile maksimum/ortalama çatlak aralığı oranları benzerlik göstermektedir. Ayrıca boşlukların, çatlak aralığı, tokluk ve süneklik değerlerinin azalması yönünden önemli etkilerinin olduğunu tespit etmiştir.

**Jasim ve ark. [17]**, çalışmalarında, boşlukların boyutu ile konumlarının betonarme derin kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve performansı üzerindeki etkilerini hem deneysel hem de nümerik yöntemlerle incelemiştir. Kesme bölgelerinde yer alan iki büyük boşluğa sahip beş adet tam ölçekli, basit mesnetli betonarme derin kirişi kırılma yüküne kadar test etmişlerdir. Kesme açıklığının toplam derinliğe oranı 1.1 olarak belirlenmiştir. Kare şeklindeki boşluklar, kesme açıklığının orta noktasında veya iç bölgelerde simetrik olarak yerleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, ilk diyagonal çatlak yükü %8-9 arasında değişirken, ilk eğilme çatlak yükü %17-23 civarında artmış ve kırılma yükü de %3-11 oranlarında değişim göstermiştir.

**Hassan ve ark. [18]**, yüksek mukavemetli kendiliğinden yerleşen beton kullanılarak üretilen betonarme derin kirişlerde boşlukların kiriş davranışına etkilerini inceleyen bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. 75 mm ve 50 mm boyutlarında kare,

dairesel ve yeni tür “eşkenar dörtgen” şekillerinde boşluklar tasarlamışlar ve toplamda 61 adet derin kiriş test etmişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre, derin kirişler dar bir genişliğe sahip ve yoğun bir takviye içermektedir. Bu özellikleri göz önüne alındığında, kendiliğinden yerleşen betonun derin kirişler için en uygun malzeme olduğuna kanaat getirmişlerdir. Boşluklu derin kirişlerin nihai ve çatlak yüklerinin, boşluksuz derin kirişlere kıyasla %5 ile %55 arasında azaldığını gözlemlemişlerdir. Tüm boşluklu derin kirişlerde kesme kapasitesinde eksiklikler tespit edilmiştir. Boşluk boyutunun artmasıyla birlikte, nihai ve çatlak yüklerinde azalma meydana geldiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, nihai ve çatlak yük değerleriyle enerji tüketimi açısından, eşkenar dörtgen şeklindeki boşlukların her durumda genel olarak kare şekliyle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiğini, dairesele boşlukların ise bu sonuçlara yakın veriler sağladığını ortaya koymuşlardır. Boşlukların yerleşimleri bakımından ise, simetrik boşlukların nihai ve çatlak yüklerindeki en büyük azalmayı oluşturduğu, bunu asimetrik boşlukların izlediği ve ortalanmış boşlukların ise en düşük azalmayı oluşturduğu sonucuna ulaşmışlardır.

**Senthil ve ark. [19]**, Araştırmalarında, sayısal modellerin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, statik monotonik yüklemeye tabi tutulan derin kirişler üzerinde sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarını ABAQUS/CAE yazılımı ile simüle ederek elde ettikleri verileri, literatürdeki mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Altı kirişin basit mesnetli olduğu modelde, kirişin merkezinde, üstünde ve altında 200 ile 250 mm arasında değişen uzunluklara sahip iki dikdörtgen boşluk oluşturmuşlardır. Ayrıca, 17 farklı kiriş üzerinde, boşluğun konumu, boyutu, şekli, yüksekliği ve boşluk ile kesme açıklığının derinlik oranının etkilerini incelemek amacıyla, statik yükleme altında simülasyonlar yapmışlardır. Genel olarak, sayısal analizlerinin deformasyon ve yer değiştirme modüllerini doğru bir biçimde tahmin ettiği ve deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Boşluk boyutunda, 200 ile 250 mm arasında bir artışın, kayma mukavemetinde ortalama %35'lik bir azalmaya yol açtığı bulunmuştur. Derinliğin 500 mm'den 550 mm'ye artması ise sehimde ortalama %78 azalmaya yol açmıştır. Dairesel boşluklar, daha az deformasyon gösterdiği için kare boşluklara göre daha fazla tercih edilmektedir. Bu gözlemleri, dairesele boşlukların derin kirişlerde kare boşluklardan daha etkili sonuçlarının olduğu sonucuna varmalarına yol açmıştır.

**Osman [20]**, çalışmalarında, lif takviyesiyle güçlendirilmiş boşluklu betonarme kirişlerin yüzeyine uygulanan polimer malzemeler aracılığıyla, beton yapıların ağır yükleri taşıyabilecek biçimde tasarlanmasına yönelik etkili bir çözüm sunmuşlardır.

Deney kapsamında, ikisi kontrol grubu olmak üzere güçlendirilmemiş dört kiriş ile birlikte, önceden çatlatılmadan güçlendirilmiş bir kiriş test edilmiştir. Elde edilen bulgular, hem mevcut hasar düzeyinin hem de FRP malzemenin yerleştirilme yönünün, yapısal iyileştirme ve hasar kontrolü üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle AFRP levhalarla takviye edilmiş ve önceden çatlakları olan boşluklu derin kirişlerin, daha yüksek rijitlik ve süneklik özellikleri gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu iyileşmenin temel nedenini, AFRP uygulamasından önce epoksi reçine kullanılarak kesme çatlaklarının ilerlemesinin engellenmiş olması olarak açıklamışlardır. Genel olarak, güçlendirilmiş tüm numunelerin, aynı koşullardaki takviyesiz kontrol kirişlerine göre daha yüksek taşıma kapasitelerine ulaştığı sonucuna varmışlardır.

**Smarzewski [21]**, çalışmasında, hibrit çelik ve polipropilen liflerle güçlendirilmiş yüksek performanslı beton kullanarak ürettiği boşluklu ve boşluksuz derin kirişlerin taşıma kapasitesi ve yapısal davranışını hem deneysel hem de analitik yöntemlerle incelemiştir. Kirişlere üç noktalı eğilme testleri uygulamış ve tüm testleri, aynı basit mesnetli destek şartlarında gerçekleştirmiştir. Araştırmada donatıların miktarı ve cinsi üzerine odaklanmıştır. Çalışmasında hibrit lif katkısının çatlak genişliklerinin azaltılmasında etkili olduğunu ve boşluklu derin kirişlerin taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediği sonucuna varmıştır. Deney ve kuramsal analizlerinden elde ettiği verilere dayanarak şu sonuca ulaşmıştır: %1 ile %1,5 oranında çelik lif ve %0.05 ile %0,1 oranında polipropilen lif içeren hibrit lifli boşluklu kirişler, %28 oranında daha yüksek nihai dayanım sergilemiştir. Özellikle boşluk çevresine yerleştirilen liflerin, kirişin genel dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

**Dündar [22]**, çalışmasında, kirişin üzerinde tek yerde zayıf nokta oluşturmak yerine kirişte düzenli boşluklar oluşturup, boşluğun oluşturduğu zayıflamanın kirişin bütününe yayılmasını hedeflemiştir. Toplamda dörder adet kare ve dairesel kiriş, 2 adet de referans kirişi yayılı yük altında deneye tabi tutmuştur. Deneysel parametreler olarak boyuna donatıların oranı, boşluk şekli, çapraz donatı kullanım oranı ve dikmelerde etriye kullanımı gibi değişkenleri dikkate almıştır. Deney sonuçlarına göre, kare boşluklu ve etriye bulunmayan dikme bölgesine sahip kirişlerin, referans kirişlerle benzer dayanım ve davranış özellikleri gösterdiğini tespit etmiştir. Düzenli boşluk içeren kirişlerin, eğilme etkisi altında davranış sergilediğini gözlemlemiştir. Ayrıca, dairesel boşluklu kirişlerin, kare boşluklu kirişlere kıyasla daha yüksek süneklik ve rijitlik özellikleri taşıdığını belirlemiştir. Çapraz donatının, ilerleyen deplasman aşamalarında gerilerek kirişin başlıkları arasında etkin bir yük aktarımı sağladığını tespit etmiştir.

**Altın [23]**, çalışmalarında sahada kolaylıkla uygulanabilecek bir kelepçe türü geliştirmeyi amaçlamışlardır bunun için beş adet betonarme kirişi, geliştirdikleri kelepçeler ile güçlendirip test etmişlerdir. Deneylerinden elde edilen sonuçları değerlendirerek, güçlendirme metodunun deney elemanlarının dayanımı, rijitliği, sünekliği ve enerji tüketiminin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Geliştirdikleri kelepçelerle kesme çatlaklarının başarılı bir şekilde kontrol edilip çatlakların genişlemesi engellenmiş ve kirişlerde sünek eğilme davranışı gelişmesi sağlanmıştır. Kirişlerin dışından geçirilen kelepçeler ile kesme dayanımının yetersizliğinin giderilmesi metodu başarılı olmuştur. Kesme dayanımları yetersiz olan kirişlerde kesme kırılması şeklinde beklenen davranış, kirişlerin güçlendirilmeleri ile değişerek sünek eğilme davranışı göstermesi sağlanmıştır. Kelepçelerle güçlendirilen kirişlerde maksimum kesme dayanımları, referans kiriş dayanıma yaklaşmıştır. Kesme dayanımının yetersizliği sebebi ile hasar almış betonarme kirişlerde de kelepçelemenin başarı sağladığı görülmüştür.

**Arathy ve George [24]**, çalışmalarında, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin özelliklerini, güçlendirilmemiş olan kontrol kirişlerle karşılaştırmışlardır. Çalışma için M20 sınıfı nominal beton karışımı tasarlamışlardır. Güçlendirme uygulamasını iki farklı şema altında ele almışlardır: Birinci şemada, GFRP levha ve şeritlerini kullanarak dıştan yapıştırma (EBR) ve yüzey içi yerleştirme (NSM) teknikleri ile eğilme (moment) güçlendirmesi yapmışlardır. İkinci şemada, yine EBR ve NSM tekniklerini kullanarak kesme güçlendirmesi uygulamışlardır. Testlerde iki noktalı yükleme sistemini kullanmışlardır. Her yük artışından sonra kirişlerde oluşan sehim gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin ve kontrol kirişlerinin davranışlarını; ilk çatlak yükü, maksimum taşıma yükü ve yük-sehim grafikleri gibi kriterler üzerinden karşılaştırarak analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda GFRP levha ile güçlendirilen kirişlerin taşıma kapasitesinin arttığını, GFRP levha katman sayısının arttıkça, kirişin taşıma kapasitesinin de arttığını görmüşlerdir. NSM güçlendirme tekniği kullanıldığında, kirişin taşıma kapasitesinin arttığını ve NSM yönteminin EBR yöntemine göre daha ekonomik olduğunu tespit etmişlerdir. NSM yöntemini kullandıklarında güçlendirilmiş yapının estetiğinin bozulmadan korunduğunu görmüşlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerin enerji yutma kapasitesi ve sünekliğinin, kontrol kirişlerine göre daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

**Saleem Abdul-Razzaq [25]**, araştırmalarında içinde boşluklar bulunan betonarme (BA) derin kirişlerin çelik levhalar kullanılarak güçlendirilmesinin kullanım potansiyeline etkilerini incelemiştir. Çalışmaları kapsamında, kare, daire, yatay ve düşey

dikdörtgen şeklinde oluşturulan boşluklara sahip toplam 13 adet derin kirişi, iki noktalı yükleme yöntemiyle test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, boşlukların boşluksuz referans kirişlerle kıyaslandığında maksimum taşıma kapasitelerinde azalmaya sebep olduğunu fakat bu boşlukların çelik levhalarla takviye edilmesinin, BA derin kirişlerin kesme dayanımını önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir. Güçlendirilmiş boşluklara sahip kirişlerin, güçlendirilmemiş olanlara kıyasla yaklaşık %10 oranında daha yüksek mukavemete ulaştığını belirlemişlerdir. Ayrıca, kare şeklindeki boşlukların boyutlarının %25 ile %50 arasında küçültülmesi durumunda maksimum yük kapasitesinin %11 ile %17 oranında arttığını saptamışlardır. Çalışmalarında ayrıca, kullanılan çelik levha kalınlığının artırılmasının, taşıma kapasitesine olumlu katkı sağladığını da ortaya koymuşlardır.

**Aksoylu ve ark. [26]**, çalışmalarında, kirişlerin güçlendirilmesi amacıyla iki farklı CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) uygulama yöntemi kullanmışlardır. Araştırmaları, dairesel boşluklar içeren ve 11 farklı ölçekli numuneden oluşan bir deney programını kapsamaktadır. Delik çapı (D) ile kiriş yüksekliği (H) oranı (D/H) belirli oranlarda olan kirişlerde, kesme bölgesine simetrik olarak yerleştirilen boşlukları, düşey yükleme altında test etmişlerdir. 0.30 D/H oranına sahip kirişlerde, yalnızca yük taşıma kapasitesinde bir azalma gözlemlerken, kirişin sünekliğinde artış tespit etmişlerdir. Boşluk çapının büyümesiyle birlikte, yük taşıma kapasitesinde belirgin bir azalma meydana geldiğini görmüşlerdir. Bununla birlikte, CFRP takviyesi uygulanan numunelerde, yük taşıma kapasitesi ve sünekliğin önemli ölçüde iyileştiğini görmüşlerdir. Boşluk çapının ve kullanılan CFRP güçlendirme yöntemlerinin, kirişlerin güçlendirilmesinde kritik parametreler olduğuna kanaat getirmişlerdir. CFRP güçlendirme ile başarı elde edilen, D/H oranı 0.64 olan kirişlerde güçlendirme alternatifi olmadan istenen sonuçları almışlardır. Ayrıca, makro ve mikro düzeyde ayrıntılı hasar analizleri sunmuş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda güçlendirme stratejilerinin etkinliğini değerlendirmişlerdir.

**Salama ve ark. [27]**, çalışmaları kapsamında, burulma etkisi altındaki T-şekilli betonarme kirişlerde yer alan dikdörtgen boşlukların yapısal davranış üzerindeki etkilerini deneysel yöntemlerle araştırmış ve elde ettikleri bulguları sunmuşlardır. Araştırmalarında, boşlukların çatlama momentine, nihai moment kapasitesine, çatlak oluşumu sırasındaki dönme açısına, nihai dönme kapasitesine ve hasar oluşum mekanizmalarına olan etkilerini detaylı biçimde incelemişlerdir. Deneysel verilerin analizi doğrultusunda, T-şekilli betonarme kirişler için çeşitli yapısal iyileştirme ve

tasarım önerileri geliştirmiş, ayrıca bazı kritik yapısal hususları vurgulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarla, kiriş geometrisine ilişkin parametrelerin burulma davranışı üzerinde belirgin ve önemli etkiler oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında ayrıca, burulma etkisine maruz kalan ve büyük açıklıklı boşluklara sahip T-kirişlerin analizinde, yumuşatılmış kafes (softened truss model) modelini ardışık olarak uygulamış; bu model ile elde ettikleri analitik moment-dönme eğrilerini, deneysel sonuçlarla karşılaştırarak doğruluk değerlendirmesi yapmışlardır.

**Saleh [28]**, yürüttükleri çalışmada, boşluk içeren betonarme kirişlerin yapısal performansını; boşlukların konumları ve çelik levhalarla takviye edilip edilmemeleri doğrultusunda değerlendirmişlerdir. İncelemelerinde; çatlak oluşum mekanizmaları, kırılma yükleri, rijitlikteki azalma, donatı çeliğindeki gerilme düzeyleri, enerji tüketimi, yük-deplasman eğrileri, taşıma kapasitesi ve süneklik gibi parametrelerin, betonarme kiriş-kolon birleşim bölgesine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, üç adet büyük ölçekli kiriş-kolon birleşimi numunesini, tekrarlı yükleme altında test etmişlerdir. Deneylerinin bulgularında, çelik plakalarla güçlendirilmiş boşluklu kirişlerin boşluğunun birleşime yakın konumda bulunması birleşim bölgesinin enerji tüketim kapasitesini, nihai taşıma gücünü, deplasman kapasitesini ve rijitliğini düşürdüğünü ortaya koymuşlardır.

**Shoeib ve Sedawy [29]**, çalışmaları kapsamında, dikdörtgen kesitli toplam 15 adet betonarme kiriş numunesini deneysel olarak test etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular, kirişlerde yer alan boşlukların kirişin rijitliğinde azalmaya yol açtığını ortaya koymuştur. Özellikle boşlukları doğrudan yükleme bölgesine yerleştirmeleri durumunda, taşıma kapasitesindeki düşüşün daha belirgin hâle geldiğini ve rijitliğin daha da düştüğünü görmüşlerdir. Test sonuçlarının analiziyle mevcut yapılar için betonarme kirişlerde açılan boşlukların kesme kuvveti üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu görmüşlerdir. Kritik bölgelerde yer alan boşlukların, bu alanlarda meydana gelen makaslama etkileri nedeniyle ani ve kırılğan hasar türlerine yol açabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, boşlukların varlığının kirişlerin genel taşıma kapasitesini düşürdüğünü; boşluk açma yöntemi ve konumuna bağlı olarak, özellikle servis yükleri altında sistem davranışında daha fazla değişikliğin meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, çelik donatı takviyesinin ve boşluk çevresine yerleştirilen harici takviye elemanlarının etkisini daha iyi anlayabilmek için ek deneysel ve analitik çalışmalara ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır.

**Mansur ve ark. [30]**, çalışmalarında, geniş açıklıklı boşluklara sahip dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numuneleri için, kesme ve eğilme etkileri altındaki yapısal

davranışlarını değerlendirmeye yönelik özgün bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemlerinin temel amacı, gövdede yer alan boşluğun ve bu boşluğun kiriş içindeki konumunun, özellikle üst ve alt bölgelerdeki kesme kuvveti dağılımına olan etkisini analiz etmektir. Bu kapsamda, toplamda 12 adet betonarme kiriş numunesini, monotonik tek nokta yüklemesi altında deneysel olarak test etmişlerdir. Çalışmalarındaki değişken parametreler boşluk genişliği, konumu, çevresel donatı düzenlemeleri ve donatı miktarlarıdır. Bulgularında, boşluk varlığının genel yük taşıma kapasitesinde olumsuz bir etkisinin olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, boşluğun üstü ve altının Vierendeel kiriş davranışı sergilediğini ve bu bölgelerde yoğun çatlak oluşumlarının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Boşluk çevresindeki kesitlerin yeterli şekilde donatılması durumunda, bu bölgelerde plastik mafsallar gelişerek kirişin göçme mekanizmasına ulaşabileceğini ifade etmişlerdir.

**Tan ve ark. [31]**, çalışmalarında, dairesel boşluklar içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımına yönelik ACI yönetmeliğinin tasarım yaklaşımının yeterliliğini incelemişlerdir. Çalışmaları kapsamında, T kesitli 7 adet kirişi, aşırı kesme kuvvetini azaltacak şekilde planlanan elemanlarla test etmişlerdir. Deneysel bulgularına göre, dairesel boşluklu kirişlerin ACI yönetmeliği kapsamında tasarlanabileceğini ve tasarımda kullanılan çapraz donatının, çatlakların belirli bir seviyede tutulmasında önemli bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, yerleştirilen çapraz donatının, kirişin kesme kapasitesini en az %50 oranında taşıyacak seviyede olması gerektiğini vurgulamışlardır. Dolu gövdeli kirişlerde ise ACI yönetmeliğinin, maksimum kesme kuvvetinin sınırlandırılmasında etkili iken, küçük boşluklara sahip kirişlerde aynı yönetmeliğin uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

**Sayed [32]**, çalışmada, betonarme kirişlerde kesme bölgesine yerleştirilen dairesel boşlukların yapısal kesme performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Analizlerini ANSYS sonlu elemanlar yöntemi (FEM) yazılımı kullanarak gerçekleştirmiş ve toplamda 41 farklı kirişi değerlendirmiştir. Elde ettiği sonuçlarla, geliştirilen yeni sonlu eleman modelinin, betonarme kirişlerin taşıma kapasitesini tahmin etmede ve kırılma modlarını doğru biçimde öngörmede güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Analizlerinde özellikle dikey yönde yerleştirilen dairesel boşlukların çapının, kirişin genişliği üzerindeki etkisinin, boşluk sayısına kıyasla daha belirleyici olduğunu görmüştür. Bu bulgu doğrultusunda, boşluk çapının, kesme dayanımı açısından, boşluk adedine oranla daha etkili bir parametre olduğu sonucuna ulaşmıştır. Çalışmasındaki parametrik çalışmalarını boşlukların konumları, büyüklükleri, adedi ve uygulanan

yükleme koşulları gibi değişkenlerin, kiriş davranışına olan etkilerini görmek için yapmıştır. Boşluğun çapının sayısına göre daha etkili olduğunu görmüştür.

**Mansur ve ark. [33]**, çalışmalarında, gövdelerinde geniş açıklıklı boşluklar bulunan sekiz adet betonarme kiriş numunesi üzerinde deneysel bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Tüm numuneleri dikdörtgen kesitlidir ve eşit miktarda boyuna donatıları vardır. Araştırmalarının temel değişken parametreleri; boşlukların boyutu, sayısı ve kiriş üzerindeki yerleşim bölgeleridir. Deney bulgularında, sürekli kiriş davranışının yük-sehim eğrisinde dört belirgin farklı davranış aşamasının olduğunu görmüşlerdir. Boşlukların genişliğinde ve uzunluğundaki artışın kirişlerin hem rijitliğini hem de dayanımını olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Özellikle, boşlukların uç bölgelerinin plastik mafsalları oluşumları açısından en zayıf bölgeler olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, boşluk boyutundaki büyümenin erken çatlak oluşumunu hızlandırdığını ve daha büyük deformasyona yol açtığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, gövdede açılan boşlukların çatlama yüküne olan etkisinin oldukça sınırlı olduğu sonucuna ulaşmış, moment etkisinin yüksek olduğu bölgelerde yer alan boşlukların, kirişlerin daha düşük yük seviyelerinde göçme davranışı sergilemesine ve daha fazla yer değiştirme meydana gelmesine neden olduğunu da deneysel olarak doğrulamışlardır.

**Ashour ve ark. [34]**, çalışmalarında, gövdelerinde ikişer adet boşluk bulunan toplam 16 betonarme kiriş numunesini deneysel olarak incelemişlerdir. Tüm kirişleri aynı en-boy kesitinde eşit basınç ve çekme donatıları ile üretmişlerdir. Deneylerinin değişken parametreleri; boşluk boyutları, boşlukların kiriş içindeki konumları ve bu bölgelerde uygulanan donatı düzenlemeleridir. Elde ettikleri bulgularla, boşluk bölgesinde donatı miktarının ve diziliminin dikkate alınmadığı zaman yalnızca boşluğun konumuna bağlı iki farklı göçme mekanizmasının ortaya çıktığını görmüşlerdir. Boşluk çevresine yerleştirilen boyuna donatıların, enine donatılara kıyasla kesme dayanımının artırılmasında daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, mesnet tepkilerinin, boşlukların geometrik özelliklerine ve konumlarına bağlı olarak anlamlı düzeyde değiştiğini tespit etmişlerdir. Özellikle kesme bölgesinde küçük boyutlu boşluklar içeren sürekli derin kirişlerin, boşluksuz kirişlere benzer bir yapısal davranış sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bu tür kirişlerin performansının önceden verilen, sürekli derin kirişler için önerilen teorik bağıntılarla büyük ölçüde uyum gösterdiğini görmüşlerdir.

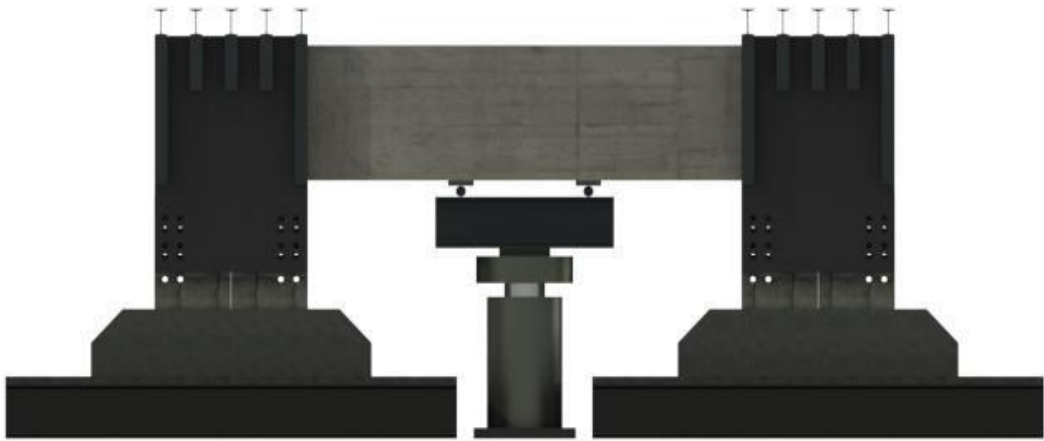
**Tan ve ark. [35]**, Bu çalışmada, bir kısmı negatif moment etkisi altında, diğer kısmı ise pozitif moment etkisi altında kalan ve büyük gövde boşluğu içeren betonarme kirişlerin davranışını deneysel olarak incelemiştir. Araştırma kapsamında toplam 15 adet

T kesitli sürekli betonarme kiriş kullanılmıştır. Çalışmada, kirişlerin yapısal davranışlarını analiz etmek için M.A. Mansur, L.M. Huang, K.H. Tan ve S.L. Lee tarafından geliştirilen analitik bir yöntem uygulanmıştır.

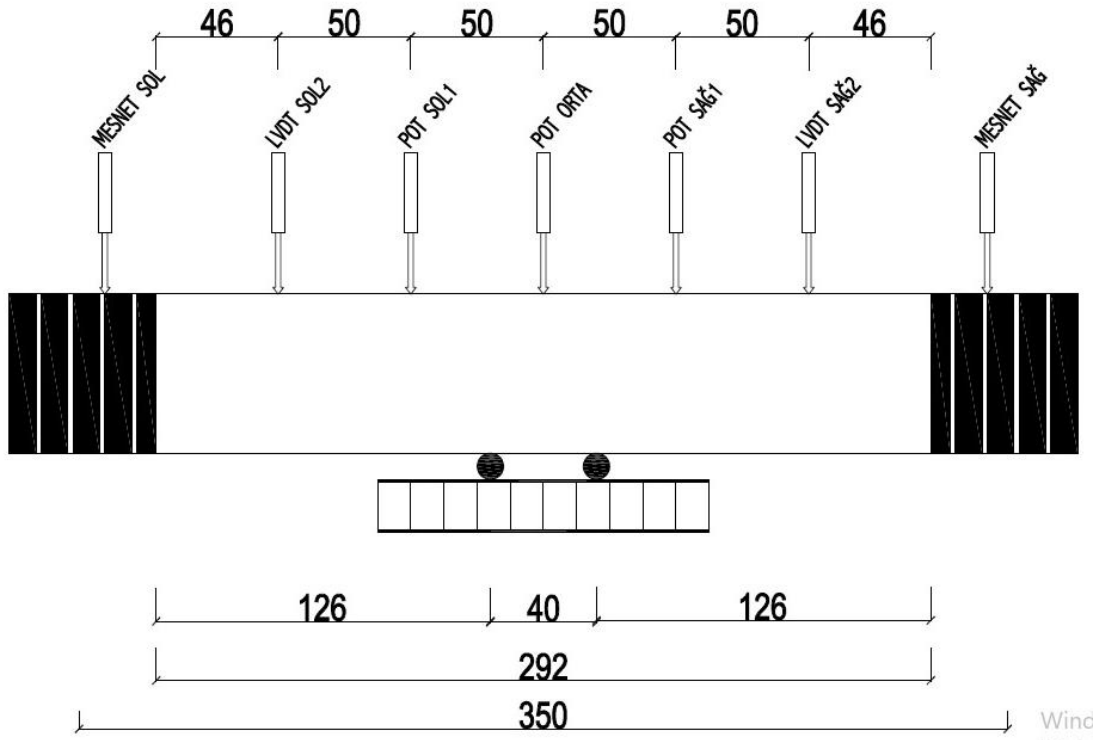
**Shather ve ark. [36]**, araştırmalarında, çelik levhalar ile desteklenen boşluklu betonarme derin kirişlerin kullanım potansiyelini incelemişlerdir. 13 adet kare boşluklu derin kirişin iki noktalı yükleme altında deneylerini yapmışlardır. Her bir kirişin kesit alanı 100 mm x 400 mm olup, toplam uzunluğu 1000 mm'dir. Boşlukları, her kesme bölgesinde birer adet olacak şekilde, 2 boşluk olarak kirişin ortasında simetrik olarak yerleştirmişlerdir. Boşluklu derin kirişlerde, ilk diyagonal çatlaklar deneysel olarak %28 oranında, ilk çatlama gerilmesi ise sonlu eleman yazılımı olan ABAQUS ile yapılan simülasyonlarda %30 seviyelerinde gözlemlenmiştir. Ayrıca, güçlendirilmemiş boşlukların yakın mesafesinin, ABAQUS sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, numunelerin orta boşluk sapmasını %8 oranında azalttığını tespit etmişlerdir.

## 2. BÖLÜM: MATERYAL VE YÖNTEM

Literatür araştırmasında yapılan çalışmaların bir kısmının ölçekli numuneler üzerinde çalışıldığı bir kısmının ise birebir gerçek boyutlu numuneler üretilerek test edildiği görülmüştür. Bu çalışmada 1/1 ölçekli; 25\*60\*350 cm ebatlarında betonarme kirişler kullanılmıştır. Bazı araştırmacılar basit mesnetli deney düzenekleri kullanırken önemli bir kısmı da ankastre mesnet şartlarında deneylerini yapmışlardır. Kolon kiriş birleşim bölgesi bağlantısına en yakın davranışı gösteren ankastre mesnet şartları sağlanarak deneyler yapılmıştır. Bunun için Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarında bulunan dört noktalı eğilme yükleme düzeneği kullanılmıştır. Şekil 1’de görüldüğü üzere çelik levha ve profiller kullanılarak hazırlanmış zemine sabitlenebilen mesnet elemanları tasarlanan serbest kiriş açıklığına uygun olarak yerleştirildikten sonra çelik başlıklar kiriş üzerine konularak cıvatalarla sabitlenerek ankastre mesnet şartları sağlanmıştır. Yükleme esnasında oluşacak deplasmanları potansiyometrik cetveller ve elektronik deplasman ölçerler (LVDT) kullanılarak ölçülecektir. Şekil 2’de LVDT ve PLC’lerin kiriş üzerindeki konumlandırılması gösterilmiştir. Çift noktadan monotonik yükleme uygulanacaktır. Yükleme için elektrikli hidrolik kriko kullanılarak pompa başlığında bulunan yük hücresinden ve LVDT ve PCL’lerden okunan veriler bilgisayara aktararak ölçümler kaydedilecektir. Tüm çalışmalar için Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarı kullanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünümü



Şekil 2. LVDT ve PC'lerin kiriş üzerindeki konumlandırılması

### 2.1. Deney Numuneleri

Tez çalışmasında 6 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerin donatı düzeni Çekme donatısı 3Ø14, basınç donatısı 2Ø14, kesme donatısı Ø8/10, gövde donatısı 2Ø12 olup tüm kirişler aynı donatı düzenine sahiptir. Deney numuneleri hazırlanırken, T500-2000 ve TBDY2018 şartları dikkate alınarak tasarım ve üretim yapılmıştır. Numunelerden bir adedi boşluksuz referans olacak şekilde, 5 adedi sonradan karot marifeti ile 30 cm dairesel boşluk açılmak sureti ile boşluklu hale getirilmiştir. Boşluklu kirişlerden bir tanesi referans kiriş olarak, diğer bir tanesi de hasar verilerek ön hasarlı güçlendirilmiş boşluklu numune olarak belirlenmiştir. Diğer 3 kiriş numunesinin, bir adedi U şekilli sarma yöntemi ile FRP ile güçlendirilmiş, bir adedi FRP halat ile güçlendirilmiş ve bir adedi de FRP plaka, FRP kumaş ve FRP' nin kasnak şekli ile güçlendirilerek üretilmiştir. Numunelerin adlandırılmış ve kodlanmış hali Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kiriş numunelerinin boyut özellikleri ve adlandırılması.

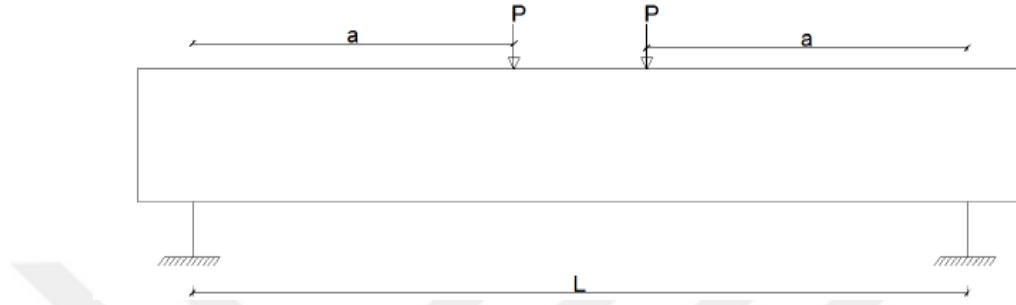
| Kiriş Adı     | Boyutları (mm) | Uzunluğu (mm) | Güçlendirme Metodu                    | Boşluk Çapı (mm) | Boşluk Adedi |
|---------------|----------------|---------------|---------------------------------------|------------------|--------------|
| B-REF         | 250/600        | 3500          | Güçlendirilmemiş (Boşluksuz referans) | -                | -            |
| B-REF-WO      | 250/600        | 3500          | Güçlendirilmemiş (Boşluklu referans)  | 300              | 1            |
| B1-DEF-RET-WO | 250/600        | 3500          | U şekilli CFRP sargı (hasarlı numune) | 300              | 1            |
| B2-RET-WO     | 250/600        | 3500          | U şekilli CFRP sargı                  | 300              | 1            |
| B4-RET-PL2-WO | 250/600        | 3500          | Plaka, kumaş ve kasnaklı              | 300              | 1            |
| B5-RET-ROP-WO | 250/600        | 3500          | Karbon halatlı                        | 300              | 1            |

Deney numuneleri adlandırılırken önce kiriş kelimesinin İngilizcesi olan “beam” kelimesinin ilk harfi kullanılmıştır. Boşluksuz referans kiriş, referans kelimesinin kısaltması ile “B-REF” olarak isimlendirilmiştir. Boşluklu referans kiriş with opening kelimelerinin kısaltması şeklinde “WO” eki ile “B-REF-WO” olarak isimlendirilmiştir. Ön hasarlı ve boşluklu olan, FRP kumaş ile U şeklinde sargılama yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunesi deformasyonlu anlamına gelen “DEF” kısaltması ile ve güçlendirme anlamına gelen retrofit kelimesinin “RET” hecesi ile “B1-DEF-RET-WO” olarak isimlendirilmiştir. U şeklinde FRP sargılama yöntemi ile güçlendirilen numune “B2-RET-WO” olarak isimlendirilmiştir. Karbon halat ile güçlendirilen numune halatı ifade etmesi açısından İngilizce “rope” kelimesinin ilk 3 harfi kullanılarak “B5-RET-ROP-WO” şeklinde isimlendirilmiştir. Sonuncu numune de plakalı olarak güçlendirilmiş ve “B4-RET-PL2-WO” şeklinde isimlendirilmiştir.

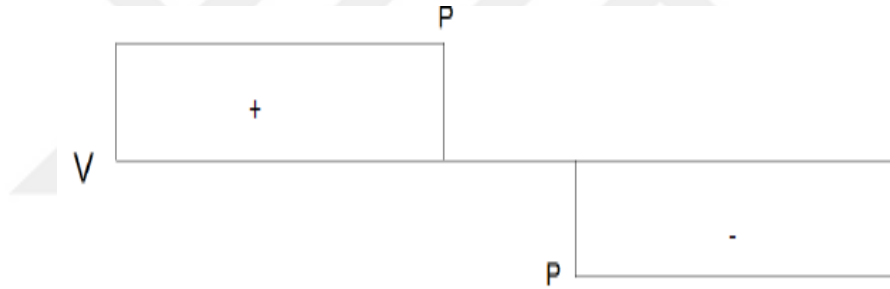
### 2.1.1. Boyut, Geometrik ve Diğer Parametrelerinin Belirlenmesi

Betonarme taşıyıcı sistemlerinin önemli bir parçası olan betonarme kirişlerin güçlendirilmesi hakkında bir çok araştırma yapılmasına karşın, güçlendirme işlemi, kirişin kullanım amacına, istenen taşıma kapasitesine ve mevcut durumuna bağlı olarak çeşitli metotlarla gerçekleştirilebilir. Literatür araştırmasında yapılan çalışmaların bir kısmının ölçekli numuneler üzerinde çalışıldığı bir kısmının ise birebir gerçek boyutlu numuneler üretilerek test edildiği görülmüştür. Bu çalışmada 1/1 ölçekli 25\*60\*350 cm ebatlarında sıklıkla kullanılan kiriş boyutları seçilmiştir. Ayrıca bu boyutların uygunluğunda T500-2000 ve TBDY2018 şartları dikkate alınmıştır. Kolon kiriş birleşim

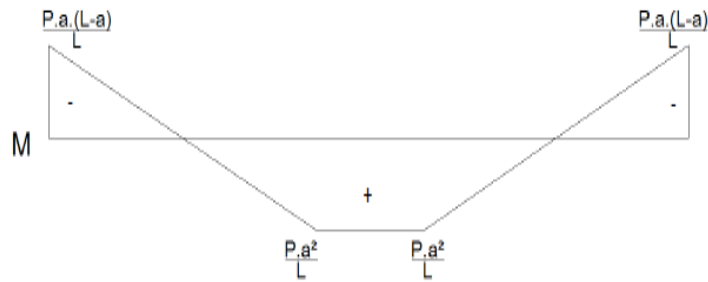
bölgesinin davranışını en iyi yansıtan mesnetlenme koşulu ankastre mesnet olacağından çalışmada ankastre mesnet şartları sağlanması hedeflenmiştir. Ankastre mesnetli betonarme kirişlerde açıklık ortası moment değeri mesnet noktalarına oranla daha düşük olacağı için boşluğun eğilme bölgesinde açılması daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Şekil 3'te iki noktalı kiriş yükleme durumu gösterilirken, şekil 4'te oluşacak yükleme altındaki kesme kuvveti grafiği, şekil 5'te ise oluşacak moment grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3. Kiriş yükleme durumu



Şekil 4. Kiriş kesme kuvveti grafiği



Şekil 5. Kiriş moment grafiği

İlgili yönetmelik ve standarta göre gerekli minimum koşullarına göre;

$b_w$ : kiriş genişliği,  $h$ : kiriş yüksekliği olmak üzere;

$$b_w = 250 \text{ mm} \geq 250 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm} \geq 300 \text{ mm}$$

$$h = 600 \text{ mm} \geq 3h_f \text{ (} h_f \text{ döşeme kalınlığını ifade etmektedir. Döşeme kalınlığı)}$$

TS500' e göre min 80mm dir. Fakat çoğunlukla 150 mm olarak uygulanmaktadır. Bu durumda;

$$h=600\text{mm} \geq 450\text{mm} (3 \times 150\text{mm})$$

$$h= 600\text{mm} \leq 3,5 \text{ bw}= 875 \text{ mm}$$

$$\max S = 60\text{cm}/2=30\text{cm} \geq 100\text{mm} \text{ tüm kiriş boyunca sıklaştırma yapılmıştır.}$$

$$\max SK = 600/4=150\text{mm} \geq 100\text{mm} \text{ tüm kiriş boyunca sıklaştırma yapılmıştır.}$$

$$\max SK = 8 \times 14 = 112\text{mm} \geq 100\text{mm} \text{ tüm kiriş boyunca sıklaştırma yapılmıştır.}$$

Yukarıdaki koşullar dikkate alınarak 25cm x 60cm kesitinde 350cm uzunluğundaki kirişimizin kriterlere uygun olduğu görülmüştür.

#### **2.1.1.1. Referans Kirişler**

Güçlendirilmiş numuneler ile kıyaslanabilmesi için bir adedi boşluksuz, bir adedi boşluklu olmak üzere 2 adet referans kiriş oluşturulmuştur.

#### **2.1.1.2. U Şeklinde Sargılama ile Güçlendirilen Hasarlı Numune**

Kiriş orta bölgesinde 30 cm çapında oluşturulan boşluğun çevresi U şeklinde FRP sargılama yöntemi ile içinden de FRP kumaş ile güçlendirilmiş bu numune boşluk çevresinden hasar almış ve B1- DEF-RET-WO olarak isimlendirilmiştir. FRP kumaş parçaları kesilip kumaşın her iki tarafına ve kiriş yüzeyine epoksi harç sürülerek yapıştırılmıştır.

#### **2.1.1.3. U Şeklinde Sargılama ile Güçlendirilen Numune**

Kiriş orta bölgesinde 30 cm çapında oluşturulan boşluğun çevresi U şeklinde FRP sargılama yöntemi ile içinden de FRP kumaş ile güçlendirilmiş bu numune B2-RET-WO olarak isimlendirilmiştir. FRP kumaş parçaları kesilip kumaşın her iki tarafına ve kiriş yüzeyine epoksi harç sürülerek yapıştırılmıştır.

#### **2.1.1.4. FRP Halat ile Güçlendirilen Numune**

Deneyisel çalışmadaki bir diğer boşluklu kiriş numunesi FRP' nin halat şekli ile güçlendirilmiş B5-RET-ROP-WO numunesidir. 2 adet FRP halatın kirişin üstüne kiriş boyunca açılan 2 oyukun içerisine halata epoksi harcının yedirilmesi ile yerleştirilmiştir. Aynı şekilde kirişin boşluğunun içine de epoksi harç yedirilmiş halatlar yerleştirilmiştir.

### 2.1.1.5. FRP Plaka, FRP Kumaş ve FRP Kasnak ile Güçlendirilen Numune

Deneysel çalışmadaki son güçlendirilen kiriş numunesi FRP plaka, FRP kumaş ve FRP kasnak şekli ile güçlendirilmiş B4-RET-PL2-WO numunesidir. Kiriş uzunluğunca 2 adet FRP plaka epoksi harç sürülerek kirişin üstüne yapıştırılmıştır. Plakaların üzerinden FRP kumaş parçaları U şeklinde uygulanmıştır. Boşluğun içine de 5 adet FRP kasnak epoksi harç sürülerek yerleştirilmiştir.

### 2.1.2. Beton Sınıfı, Donatı Bilgileri ve Detayları

Betonarme yapılarda TBDY 2018’de beton dayanımının kriterine göre C25 beton sınıfından küçük dayanımlı beton kullanılamaz. Bu kriter gereğince beton sınıfı C25/30 olarak seçilmiştir. TBDY 2018 ve TS 708’ e uygun olarak donatı sınıfı B420C seçilmiştir.

#### 2.1.2.1. Kiriş Donatılarının Belirlenmesi ve Yönetmelik Kriterlerine Uygunluğu

Bu deneysel çalışmada kullanılacak betonarme kirişlerin tasarımında kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Malzeme özelliklerine göre TS500 ve TBDY2018’ de verilen hesaplamalar kullanılarak çekme donatısı, basınç donatısı, gövde donatısı ve kesme donatısının minimum koşulları sağladığı gösterilmiştir.

Tablo 2. Beton ve donatının mekanik özellikleri

| Malzeme | $f_{ck}$ (MPa) | $f_{cd}$ (MPa) | $f_{ctk}$ (MPa) | $f_{ctd}$ (MPa) | $E_c$ (MPa) |
|---------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| C25/30  | 25             | 17             | 1.8             | 1.2             | 30000       |
| Malzeme | $f_{yk}$ (MPa) | $f_{yd}$ (MPa) | $E_s$ (MPa)     | $f_{ywd}$ (MPa) |             |
| B420C   | 420            | 365            | 210000          | 365             |             |

Betonarme kiriş numunelerinin tasarımında TBDY 2018’e göre Kiriş mesnetlerinde çekme donatılarının minimum oranı denklem 2.1’de verilmiştir.

$$\rho_{min} = 0.8 \times (f_{ctd} / f_{yd}) \quad \text{Denklem (2.1)}$$

$$\rho_{min} = 0.8 \times (1.2/365) = 0.00263 \text{ bulunur.}$$

TS 500 ve TBDY2018’e göre max. Boyuna donatı oranının sınırlanması gereklidir. Kirişlerde çekme ve basınç donatı oranları farkı, dengeli donatı oranının 0,85 katından fazla olamaz

$$\rho - \rho' \leq \rho_{max} = 0.85 \times \rho_b \quad \text{Denklem (2.2)}$$

Ayrıca, çekme donatısı oranı, aşağıdaki sınırı geçemez.

$$\rho \leq 0.02 \quad \text{Denklem (2.3)}$$

Dengeli donatı oranı;

$$\rho_b = 0.85 \times k_1 \times (f_{ctd} / f_{yd}) \times (0.0035 \times E_s / (0.0035 \times E_s + f_{yd})) = 0.0015$$

Kirişlerde kullanılacak donatıya göre;

$$\rho = A_s / b_w d = 0.0032 \geq 0.002$$

$$\rho' = A'_s / b_w d = 0.0022$$

$$0.0032 - 0.0022 = 0.001 \leq 0.00128$$

$$A_{sw} / s \geq 0.3 \times (f_{ctd} / f_{ywd}) \times b_w \text{ den } s = 240,5 \text{ mm} \quad \text{Denklem(2.4)}$$

Minimum gövde donatısı oranı;

$$A_{sl} = 0.001 b_w d = 0.001 \times 250 \times 570 = 142.5 \text{ mm}^2 \quad \text{Denklem(2.5)}$$

$$2 \times \emptyset 12 = 2 \times 113 \text{ mm} = 226 \text{ mm seçilmiştir.}$$

Sarılma bölgesinde;

$$s \leq 150 \text{ mm}$$

$$s \leq 8\emptyset = 8 \times 14 = 112 \text{ mm}$$

$$s \leq d/4 = 570/4 = 142.5 \text{ mm}$$

$$\text{orta bölgede; } s \leq d/2 = 570/2 = 285 \text{ mm}$$

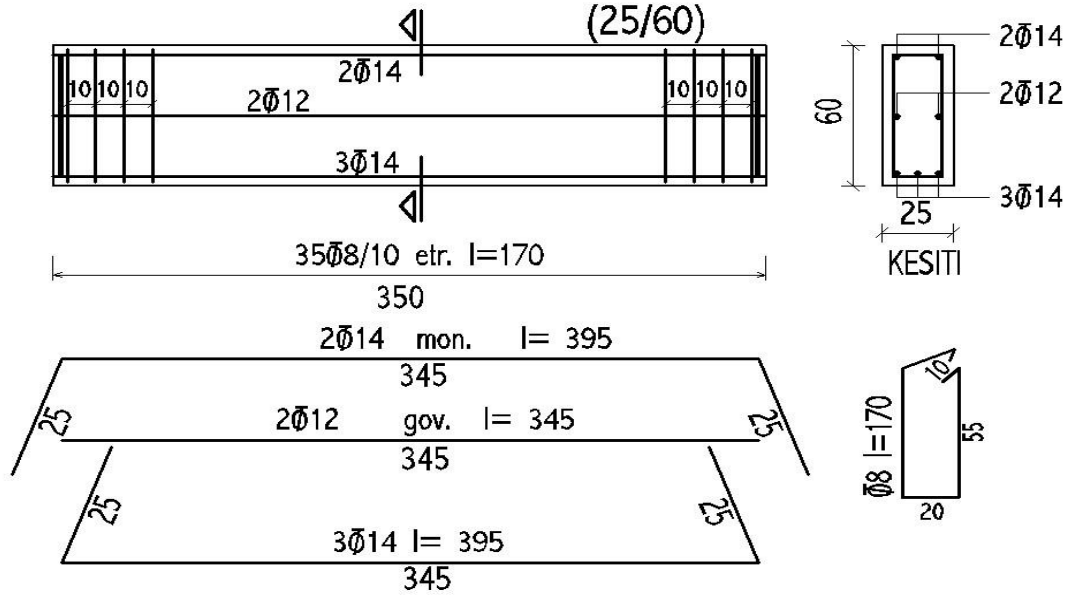
yukarıdaki hesaplamalara göre kiriş numunelerinin etriye aralığı Ø8/10 olarak sıkılaştırma ve orta bölgede kullanılmıştır. Her bir numuneye ait donatı bilgileri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Deney numunelerine ait donatı özellikleri

| Numune No | Numune Adı    | Sarılma Bölgesi | Orta Bölge | Basınç Donatısı | Gövde Donatısı | Çekme Donatısı |
|-----------|---------------|-----------------|------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1         | B-REF         | Ø8/100          | Ø8/100     | 2Ø14            | 2Ø12           | 3Ø14           |
| 2         | B-REF-WO      | Ø8/100          | Ø8/100     | 2Ø14            | 2Ø12           | 3Ø14           |
| 3         | B1-DEF-RET-WO | Ø8/100          | Ø8/100     | 2Ø14            | 2Ø12           | 3Ø14           |
| 4         | B2-RET-WO     | Ø8/100          | Ø8/100     | 2Ø14            | 2Ø12           | 3Ø14           |
| 5         | B5-RET-ROP-WO | Ø8/100          | Ø8/100     | 2Ø14            | 2Ø12           | 3Ø14           |
| 6         | B4-RET-PL2-WO | Ø8/100          | Ø8/100     | 2Ø14            | 2Ø12           | 3Ø14           |

#### 2.1.2.2. Numunelerin Donatı Düzeni ve Bilgileri

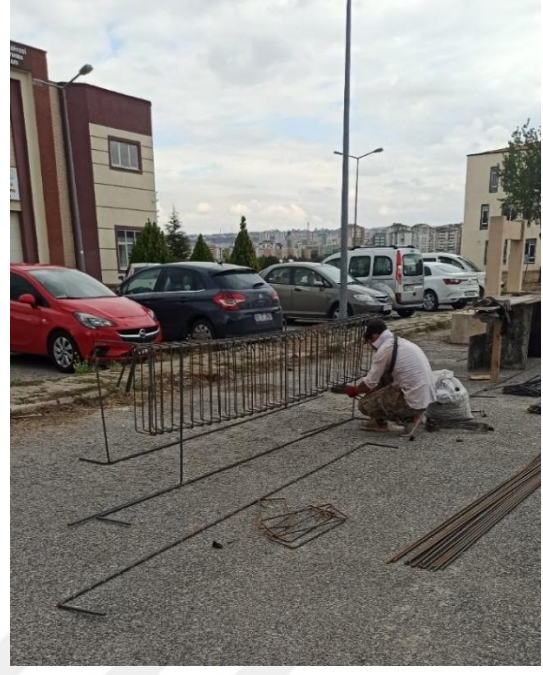
Üretilen numunelerin hepsi aynı donatı düzeni ve şemasına sahiptir. Numunelerin çekme bölgesinde 3Ø14 boyuna donatı, basınç bölgesinde de 2Ø14 basınç donatısı seçilmiştir. Kesme donatısı olarak Ø8/10 etriye bulunmaktadır. Donatı detayı ve düzeni şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Kirişlerin kesit ve donatı detayları

## 2.2. Deney Numunelerinin Üretilmesi

Tez çalışmasında betonarme kiriş numunelerinin üretimi Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin kalıpları için playwood kullanılmıştır. Belirlenen ölçülere uygun olarak uygun zeminde kalıplar kurularak beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Betonarme kirişler donatı detayına uygun olarak belirlenen ölçülerine göre hazırlanmış ve 3 cm pas payı kullanılarak kalıpların içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 7’de beton dökümü sırasında standartlara uygun 3 adet silindir numune alınmıştır. Hazır beton firmasından mikserli sevkedilen C25/30 sınıfı hazır beton kalıplara dökülerek vibratör yardımı ile yerleştirilmiştir. Yapılan işlemler şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Donatı hazırlığı ve ahşap kalıpların kurulması



Şekil 8. Beton dökümü ve vibratör uygulaması

Hazır betondan 3 adet silindir numune alınmıştır. Bu numuneler bir gün alındığı bölgede bekletildikten sonra kür havuzuna nakledilmiştir. Şekil 9’da numune görünüşleri verilmiştir. Beton numuneleri 28 günlük iken basınç testine tabi tutularak sonuçları Tablo 5’de verilmiştir.



Şekil 9. Silindir numuneler

Kür süresi tamamlanan betonarme kiriş numunelerden bir adet betonarme kiriş referans numune olacak şekilde diğer beş adet numunede boşluklar oluşturulması için kirişlerin orta bölgelerinden 30 cm çapında tahribatlı yöntemle karotlar alınmıştır. Daha sonra deneyler için hazır olan kirişler forklift ile Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarına taşınmıştır (Şekil 10-11).



Şekil 10. Kiriş numunelerden karot alınması



Şekil 11. Kiriş numunelerinin laboratuvara taşınması

### 2.2.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Kiriş numunelerinin üretiminde C25/30 beton sınıfı brüt beton kullanılırken donatı olarak B420C standardında  $\varnothing 8, \varnothing 12, \varnothing 14$  çaplarında donatı kullanılmıştır. Donatıların ise T8 708 standardına göre çelik çekme deneyleri yapılmış şekil 12’ de verilmiştir. Deney sonuçları Tablo 4’ te sunulmuştur.



Şekil 12. Donatı çelikleri ve Çekme Deneyi



Şekil 12. Donatı çelikleri ve Çekme Deneyi (Devamı)

Tablo 4. Donatı Çekme Deneyi Sonuçları

| DENEY SONUCU BULUNANLAR |                |            |               |                |                  |                 |                               |              | TS 708/MART 2016 Standart Sınır Değerler |               |                  |                     |                                   |                   |       |
|-------------------------|----------------|------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|--------------|------------------------------------------|---------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|-------|
| No                      | Anma Çapı d mm | Kütle Kg/m | Akma (Re) MPa | Çekme (Rm) MPa | Çekme/Akma Rm/Re | Re act / Re nom | Kopma Uz. % (A <sub>5</sub> ) | Çelik Sınıfı | Akma MPa Min                             | Çekme MPa Min | Çekme/Akma Rm/Re | Re act / Re nom Max | Kopma Uz. % (A <sub>5</sub> ) Min | Anma Kütleşi Kg/m |       |
|                         |                |            |               |                |                  |                 |                               |              |                                          |               |                  |                     |                                   | Min               | Max.  |
| 1                       | 8.0            | 0.388      | 495           | 604            | 1.22             | 1.18            | 22.3                          | B420C        | 420                                      | 0             | >1.15            | 1.30                | 12                                | 0.371             | 0.419 |
| 2                       |                | 0.396      | 541           | 637            | 1.18             | 1.29            | 20.5                          | B420C        | 420                                      | 0             | <1.35            | 1.30                | 12                                |                   |       |
| 3                       |                | 0.400      | 523           | 612            | 1.17             | 1.25            | 21.6                          | B420C        | 420                                      | 0             | <1.35            | 1.30                | 12                                |                   |       |
| 4                       | 12.0           | 0.869      | 461           | 572            | 1.24             | 1.10            | 21.4                          | B420C        | 420                                      | 0             | >1.15            | 1.30                | 12                                | 0.848             | 0.928 |
| 5                       |                | 0.871      | 468           | 576            | 1.23             | 1.11            | 21.1                          | B420C        | 420                                      | 0             | <1.35            | 1.30                | 12                                |                   |       |
| 6                       |                | 0.888      | 452           | 559            | 1.24             | 1.08            | 22.8                          | B420C        | 420                                      | 0             | <1.35            | 1.30                | 12                                |                   |       |
| 7                       | 14.0           | 1.209      | 454           | 583            | 1.29             | 1.08            | 24.3                          | B420C        | 420                                      | 0             | >1.15            | 1.30                | 12                                | 1.156             | 1.264 |
| 8                       |                | 1.204      | 498           | 597            | 1.20             | 1.19            | 19.0                          | B420C        | 420                                      | 0             | <1.35            | 1.30                | 12                                |                   |       |
| 9                       |                | 1.226      | 431           | 561            | 1.30             | 1.03            | 26.9                          | B420C        | 420                                      | 0             | <1.35            | 1.30                | 12                                |                   |       |
| 10                      |                |            |               |                |                  |                 |                               |              |                                          |               | >1.15            |                     |                                   |                   |       |
| 11                      |                |            |               |                |                  |                 |                               |              |                                          |               | <1.35            |                     |                                   |                   |       |
| 12                      |                |            |               |                |                  |                 |                               |              |                                          |               |                  |                     |                                   |                   |       |

### 2.2.1.1. Beton Basınç Deneyleri

Kiriş numunelerinin üretimi esnasında sahaya getirilen hazır betondan alınan üç adet silindirik beton numunesi 28 günlük bekleme süresinden sonra Erciyes Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarında bulunan beton basınç dayanım cihazında test edilmiştir. Şekil 13’de basınç testine ait görseller verilmiştir. Numuneler TS EN 12390-3

standartına göre basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Tablo 5’ te testin sonuçları verilmiştir.



Şekil 13. Basınç Dayanımı Testi

Tablo 5. Beton Basınç Dayanımı Test Sonuçları

| Numune No | Yük (kN) | Kesit Alanı (cm <sup>2</sup> ) | Silindir Dayanımı (MPa) | Ort. Dayanım (MPa) |
|-----------|----------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1         | 466      | 176.71                         | 26.37                   | 24,26              |
| 2         | 392      | 176.71                         | 22.18                   |                    |
| 3         | 428      | 176.71                         | 24,22                   |                    |

#### 2.2.1.2. Karot Deneyleri

Deneylerde kullanılan betonarme kirişlerin beton sınıfının ve reel dayanımının belirlenmesi amacı ile her bir kirişten TS EN 13791-2019 standartına göre birer adet karot beton numunesi alınmıştır. Karotlara ait görseller ve karot sonuçları Tablo 6’ da verilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. Karot numuneleri

Tablo 6. Karot sonuçları

| KAROT NO                       | NUMUNE ADI       | KAROT    |               | KIRILMA YÜKÜ | BASINÇ DAYANIMI |
|--------------------------------|------------------|----------|---------------|--------------|-----------------|
|                                |                  | ÇAPI (d) | YÜKSEKLİK (h) |              |                 |
|                                |                  | (mm)     | (mm)          |              |                 |
| 1                              | B-REF-WO K1      | 80.0     | 80.0          | 158.8        | 31.58           |
| 2                              | B2-RET-WO K2     | 80.0     | 80.0          | 137.7        | 27.39           |
| 3                              | B1-DEF-RET-WO K3 | 80.0     | 80.0          | 148.3        | 29.50           |
| 4                              | B-REF K4         | 80.0     | 80.0          | 145.9        | 29.03           |
| 5                              | B5-RET-ROP-WO K5 | 80.0     | 80.0          | 137.6        | 27.37           |
| 6                              | B4-RET-PL2-WO K6 | 80.0     | 80.0          | 149.9        | 29.81           |
| 7                              |                  |          |               |              |                 |
| 8                              |                  |          |               |              |                 |
| KAROT DONATI BİLGİLERİ (VARSA) |                  |          | ORTALAMA:     |              | 28.70           |

### 2.2.1.3. Kullanılan Güçlendirme Malzemelerinin Teknik Özellikleri

#### 2.2.1.3.1. CFRP Kumaş

Çift yönlü karbon elyaf kumaş, yüksek performanslı özellikleri sayesinde FRP (Fiberle Güçlendirilmiş Polimer) sistemlerinde epoksi reçinelerle birlikte kullanılan ileri teknoloji bir güçlendirme malzemesidir (Şekil 15).

- Yüksek çekme dayanımı ve üstün dayanıklılık (dürabilite) özellikleri sunar.
- FRP tabanlı yapısal güçlendirme uygulamalarında etkin biçimde kullanılabilir.
- Uzun hizmet ömrüne sahiptir ve çevresel etkilere karşı dirençlidir.
- Uygulama yapıldığı yapı elemanının deprem performansını önemli ölçüde artırır.

Tablo 7. Çift Yönlü 600gr CFRP Karbon kumaşların teknik özellikleri[40]

|                        |                                  |
|------------------------|----------------------------------|
| Tetraglobe CFB PLN 600 |                                  |
| Ağırlık – Yön          | 600 gr/m <sup>2</sup> – Çift Yön |
| Kalınlık               | 0,35 mm                          |
| Çekme Dayanımı         | 4900 MPa                         |
| Elastisite Modülü      | 230,000 N/mm <sup>2</sup>        |
| Kopmada Uzama          | 2,10%                            |



Şekil 15. Çift yönlü karbon fiber kumaş

#### 2.2.1.3.2. CFRP Plaka

Karbon liflerinden imal edilen bu malzeme, yapıların güçlendirilmesi için kullanılan ileri düzey yapısal bir takviye elemanıdır (Şekil 16).

- Betonarme yapı elemanlarıyla uyumlu fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir.
- Yüksek çekme dayanımı ve uzun süreli dayanıklılığı sayesinde yapısal bütünlüğü destekler.
- FRP (Fiberle Güçlendirilmiş Polimer) sistemleri kapsamında güçlendirme uygulamalarında etkin olarak kullanılabilir.
- Servis ömrü uzundur ve çevresel koşullara karşı yüksek direnç gösterir.
- Uygulandığı yapıların deprem performansını iyileştirir.

Tablo 8. CFRP plakanın teknik özellikleri [41].

|                      | CPL 50 –<br>1,2              | CPL 50 –<br>1,4              | CPL 100 –<br>1,2             | CPL 100 –<br>1,4             |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Genişlik             | 50                           | 50                           | 100                          | 100                          |
| Kalınlık             | 1,2                          | 1,4                          | 1,2                          | 1,4                          |
| Çekme<br>Dayanımı    | 2500 MPa                     | 2500 MPa                     | 2500 MPa                     | 2500 MPa                     |
| Elastisite<br>Modülü | 165.000<br>N/mm <sup>2</sup> | 165.000<br>N/mm <sup>2</sup> | 165.000<br>N/mm <sup>2</sup> | 165.000<br>N/mm <sup>2</sup> |
| Kopmada<br>Uzama     | 1,50%                        | 1,50%                        | 1,50%                        | 1,50%                        |



Şekil 16. CFRP plaka

#### 2.2.1.3.3. CFRP Halat

Yüksek çekme dayanımı ve düşük birim ağırlık özelliklerine sahip karbon halatlar, yapıların güçlendirilmesi ve sismik performanslarının iyileştirilmesinde kullanılan ileri teknoloji FRP donatı elemanlarıdır. Esnek yapıları sayesinde uygulama kolaylığı sağlarlar; ayrıca yüksek aderans kapasiteleri ve uzun süreli dayanım özellikleri ile öne çıkarlar (Şekil 17).

- Yüksek çekme dayanımı sayesinde taşıyıcı sistemlerin performansını artırır.
- Düşük özgül ağırlıkları, yapıya ek yük getirmeden takviye imkanı sunar.
- Esnek yapıları, dar alanlarda kolay uygulanabilirlik sağlar.
- Korozyona karşı dirençli olmaları uzun süreli dayanım kazandırır.
- Yüksek aderans kapasiteleri, beton ile güçlü bir bağ oluşturur.
- İleri teknoloji FRP sistemleriyle uyumlu olmaları, çeşitli güçlendirme uygulamalarında kolaylık sağlar.
- Uzun ömürlü performansları sayesinde çevreye karşı dirençlidir.

Tablo 9. CFRP halatın teknik özellikleri [42].

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| Çekme Dayanımı    | 4900 MPa               |
| Elastisite Modülü | 240 GPa                |
| Kopma Uzaması     | % 2.0                  |
| Yoğunluk          | 1.80 g/cm <sup>3</sup> |
| Reçine Uyumluluğu | Epoksi Reçine          |



Şekil 17. CFRP Halat

#### 2.2.1.3.4. Karbon Plaka Yapıştırıcı Epoksi

EPCP, solvent içermeyen ve iki bileşenli epoksi bazlı bir yapıştırıcı olup, karbon plaka ile birlikte betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu malzeme, FRP (Fiberle Güçlendirilmiş Polimer) sistemleri kapsamında hem yapısal onarım süreçlerinde hem de taşıyıcı elemanların dayanımının artırılmasına yönelik güçlendirme uygulamalarında donatılarla birlikte kullanılmaktadır (Şekil 18).

Tablo 10. TETRAPOX EPCP epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri [43].

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Yoğunluk                      | 1,10 ± 0,05    |
| Renk                          | Gri            |
| Viskozite (25°C)              | 700 – 800 mPas |
| Dokunma Süresi                | 24 saat        |
| Karışım Ömrü (25°C , 100 ml)  | >30 dk         |
| Tam Sertleşme (25°C , %55 Rh) | 7 gün          |
| HDT                           | 75-80°C        |
| Shore-D Sertliği              | 82             |
| Çekme Dayanımı (MPa)          | >20            |
| Eğilme Dayanımı (MPa)         | >100           |



Şekil 18. TETRAPOX EPCP epoksi yapıştırıcı

#### 2.2.1.3.5. Karbon Kumaş Yapıştırıcı Epoksi

EPFB, solvent içermeyen ve iki bileşenli epoksi esaslı bir yapıştırıcı olup, karbon fiber kumaş ile birlikte betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu bağlayıcı malzeme, FRP sistemleri kapsamında hem yapısal onarım uygulamalarında hem de taşıyıcı sistem elemanlarının performansını artırmaya yönelik güçlendirme çalışmalarında donatı elemanlarıyla birlikte kullanılmaktadır (Şekil 19).

Tablo 11. TETRAPOX EPCP epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri [44].

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Yoğunluk                      | 1,22 ± 0,05    |
| Renk                          | Gri            |
| Viskozite (25°C)              | 500 – 600 mPas |
| Karışım Ömrü (25°C , 100 ml)  | 180 ± 60 dk    |
| Tam Sertleşme (25°C , %55 Rh) | 7 gün          |
| Shore-D Sertliği              | 89             |
| HDT                           | 75-80 °C       |
| Çekme Dayanımı (MPa)          | >65            |
| Çekme Dayanımı (MPa)          | >20            |
| Eğilme Dayanımı (MPa)         | >100           |
| Dokunma Süresi                | 24 saat        |



Şekil 19. TETRAPOX EPFB epoksi yapıştırıcı

## 2.3. Betonarme Kiriş Deneyleri

### 2.3.1. Deney Düzeneği

Mesnetlenme şekli ankastre mesnet olacak şekilde deney düzeneği kurulmuştur. Ankastre mesnet koşulunun laboratuvar ortamında doğru biçimde sağlanabilmesi için, şekil 20’da detayları verilen çelikten imal edilmiş mesnet ayakları kullanılmıştır.



Şekil 20. Çelikten imal edilmiş mesnet ayakları ve vinç ile düzeneğe yerleşimi

Forklift ile laboratuvara taşınan betonarme kirişlerde önce kirişlerin kolay taşınabilmesi için üstünde bulunan demir parçaları spiral ile kesilmiştir. Sonra tavan vinci ile deneyler için tek tek düzeneğe oturtulmuştur (Şekil 20). Mesnetlerin üst bağlantı parçaları da kirişin sağ ve sol iki yanının üstüne gelecek şekilde vinç ile taşınıp konmuştur. Bu mesnetler cıvatarlarla sağlamlaştırılıp sıkıştırılmıştır. Çalışmamız ankastre mesnet üzerine olduğu için mesnetlerin yerinden oynamamasına dikkat edilmiştir. Deney sırasında oluşacak çatlakların daha iyi görünebilmesi için kiriş yüzeyi beyaz boya ile boyanmıştır. Kiriş mesnetten hesaplanan mesafelerine göre işaretlenip karelaj yapılmıştır. LVDT (doğrusal değişken diferansiyel transformatör) ve potansiyometrelerin yerleri belirlenip mesafelerine göre yerleştirilmiştir. Deplasman ölçerlere ait görseller şekil 21’te verilmiştir. LVDT ve potansiyometrelerin kiriş üzerinden kaymaması için altlarına plastik PVC ve mika parçalar yapıştırılmış ve deneye başlanmıştır. Kirişe yük verdikçe kirişte çatlaklar oluşmuş olup hangi yükte hangi çatlak oluştuysa keçeli kalem ile çizilip kenarına yazılmıştır, çatlak genişlikleri milimetrik cetvel ile ölçülmüştür (Şekil 22). Deplasman, çekme çubuğu kırılması, basınç kabuğu ayrılması gibi değerler kaydedilmiştir. Güçlendirilen kirişlerde de güçlendirme yapılmadan önce kirişlerin pürüzlü yerleri giderilmiş ve yüzeyi ıslak bez ile temizlenmiştir. Güçlendirme malzemelerinden hangisi hangi kirişte uygulanacak ise belirlenmiş, hazırlanmış ve kirişler farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Güçlendirme yapılan kirişler bir hafta prizini aldıktan sonra aynı

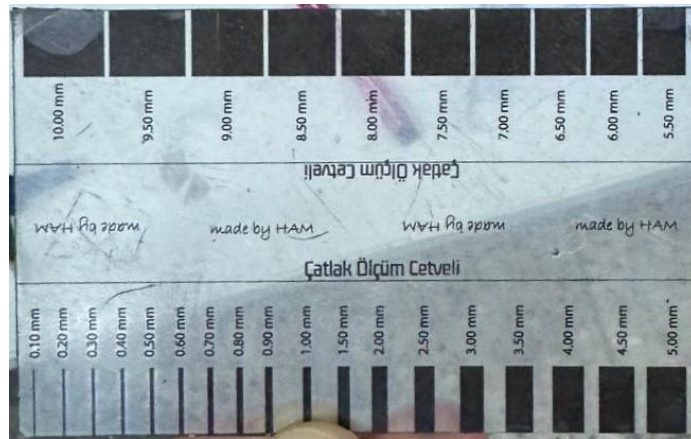
şekilde deney düzeneğine yerleştirilip aynı işlemler doğrultusunda deneyleri yapılmıştır. Deney düzeneği şekil 23’ daki gibidir.

Yükleme süreci boyunca kirişin belirli noktalarında meydana gelen yer değiştirmeleri anlık olarak izlemek amacıyla, şekil 21’de gösterilen deplasman ölçerler (LVDT potansiyometre) kullanılmıştır. Büyük deplasmanların olacağı düşünülen kirişin orta bölgelerinde deplasman kapasitesinin büyük olduğu ölçüm cihazları kullanılmıştır.

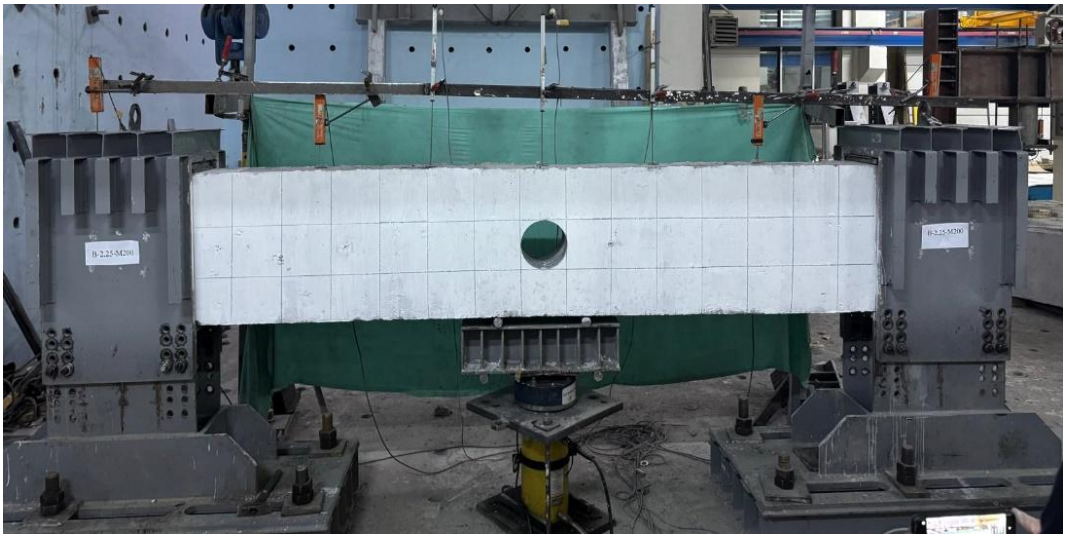


Şekil 21. Deneylerde kullanılan deplasman ölçüm aletleri

Yük arttıkça betonarme kirişte oluşacak çatlakların genişliğini ölçmeye yarayan çatlak ölçme cetveli kullanılmıştır. Çatlak ölçüm cetveli şekil 22’ te gösterilmiştir.



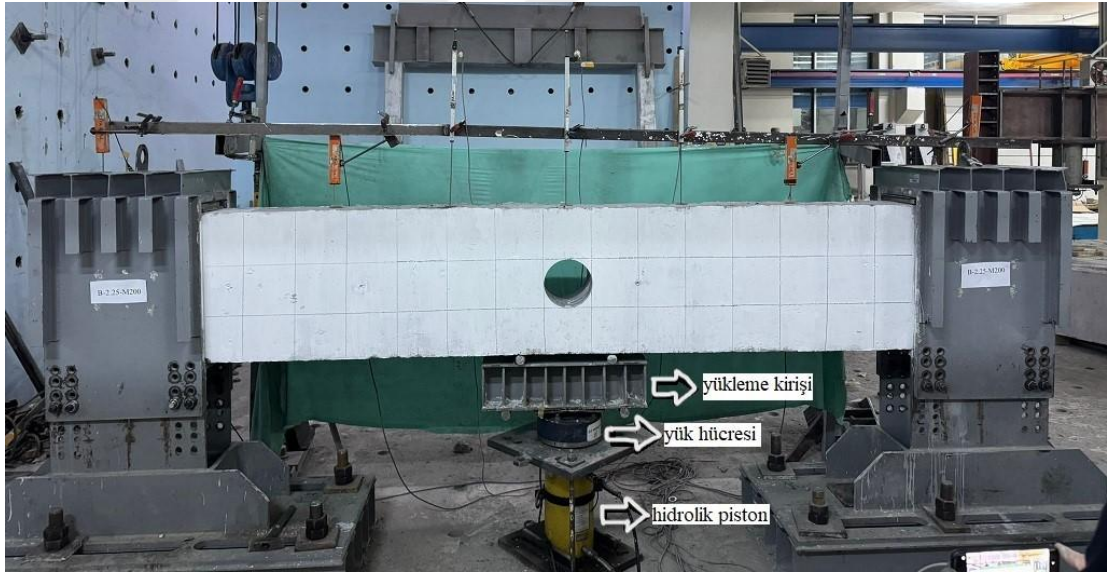
Şekil 22. Çatlak ölçüm cetveli



Şekil 23. Betonarme kiriş yükleme düzeneği

#### 2.3.1.1. Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar ve Cihazlar

Deney düzeneğinde yüklemeyi gerçekleştirmesi için 150 ton kapasiteli hidrolik piston bulunmaktadır. Hidrolik pistonun üstünde yükün bilgisayara verilerin aktarımını gerçekleştirecek 100 ton kapasiteye sahip yük hücresi ile yükleme kirişi bulunmaktadır. Yükleme kirişi, yük hücresi ve hidrolik piston ve şekil 24’de sunulmuştur.



Şekil 24. Yükleme kirişı, yük hücresi ve hidrolik piston

Hidrolik pistonda yükleme işleminin gerçekleşmesi için elektrikli motor kullanılmıştır (Şekil 25).



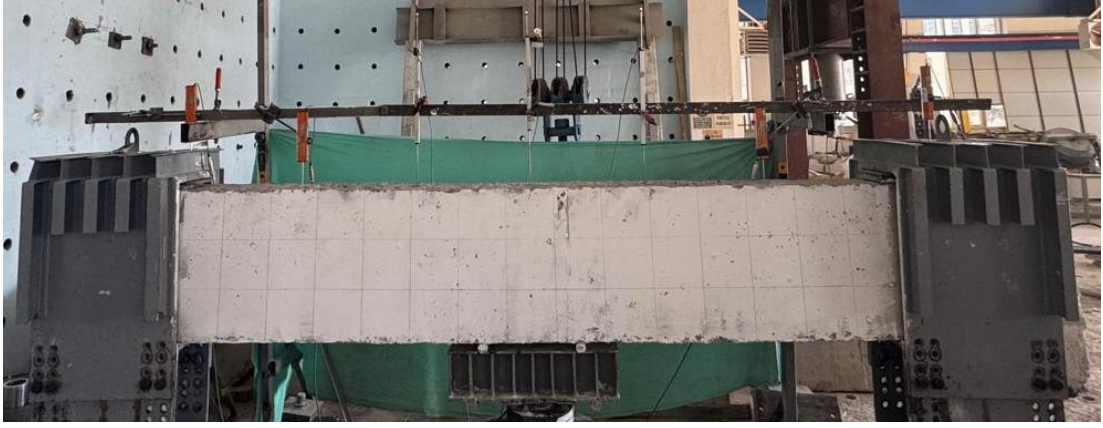
Şekil 25. Elektrikli motor

Yük hücresi, LVDT ve potansiyometrik deplasman ölçerlerden elde edilen verilerin dijital ortama aktarılabilmesi amacıyla bir veri toplama sistemi (datalogger) kullanılmıştır (Şekil 26).



Şekil 26. Veri toplama cihazı

Deplasman ölçerlerin deney düzeneğindeki konumu şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27. Deplasman ölçerlerin deney düzeneğindeki konumu

### 2.3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

#### 2.3.2.1. Güçlendirme yapılan Deney Numunelerinin Hazırlanması

6 adet kirişten ilki boşluksuz, ikincisi boşluklu referans numune olacak şekilde kalan 4 adedine güçlendirme yapılmıştır

İlk güçlendirilen numune “B1-DEF-RET-WO” kiriş numunesidir. Bu kiriş ön hasarlı olup hasar görünümü şekil 28’de gösterilmiştir.



Şekil 28. B1-DEF-RET-WO kiriş numunesinin ön hasarı

Güçlendirme işlemi için ilk önce epoksi ve sertleştiricisi mikser ile karıştırılmıştır (Şekil 29).



Şekil 29. Epoksi harcının hazırlanması

U şekilli FRP sargılama yöntemi ile kirişte güçlendirme yapmak için öncelikle FRP kumaştan belirli ölçülerde kesilmiştir. Hazırlanan epoksi harcı ile FRP kumaşın ön ve arka yüzüne epoksi sürülmüştür. Kiriş yüzeyi temizlendikten sonra FRP kumaşın geleceği yerler de epoksiye doyurulmuştur. Sarılma işlemi için hazır olan FRP kumaş U şeklinde, kirişin üstünden iki yanı dahil olacak şekilde kirişe sarılmıştır. Kiriş boşluğu için de boşluk ebatına göre kumaş kesilip aynı şekilde kumaş ve boşluk yüzeyi epoksiye doyurularak boşluğun içine yapıştırılmıştır. B1-DEF-RET-WO kirişinin güçlendirme görüntüleri şekil 30’da verilmiştir.



Şekil 30. B1-DEF-RET-WO kiriş numunesinin güçlendirme aşamaları

B2-RET-WO kiriş numunesi de B1-DEF-RET-WO numunesi gibi U şekilli FRP sargılama yöntemi ile güçlendirilmiştir ve kiriş görünümleri aynıdır. Kirişin güçlendirilme görüntüleri şekil 31’teki gibidir.



Şekil 31. B2-RET-WO kiriş numunesinin güçlendirilmesi

Güçlendirme işlemi yapılan bir diğer kiriş B4-RET-PL2-WO numunesidir. Bu kirişe önce 2 adet FRP plaka kiriş uzunluğu boyunca epoksi harç ile kirişin üstüne yapıştırılmıştır. Plakların üstünden kirişin mesnet konumlarına kadar U şeklinde olacak şekilde FRP kumaş parçaları da aynı şekilde epoksi sürülerek yapıştırılmıştır. Kirişin boşluğu için de 5 adet FRP kasnak epoksi ile boşluğun içini tamamen saracak şekilde yerleştirilip yapıştırılmıştır. Kirişe ait güçlendirme malzeme ve görüntüleri şekil 32’ de verilmiştir.



Şekil 32. B4-RET-PL2-WO kiriş numunesinin güçlendirme aşamaları



Şekil 33. B4-RET-PL2-WO kiriş numunesinin güçlendirme aşamaları

B5-RET-ROP-WO kiriş numunesi FRP halat ile güçlendirilmiştir. Kiriş uzunluğu boyunca kirişin üstüne açılan 2 adet oyukun içerisine epoksi ile empreye edilmiş FRP halat yapıştırılmıştır. Kirişin boşluğuna da epoksi ile empreye edilmiş FRP iplerle çevrelenmiştir. B5-RET-ROP-WO kiriş numunesine ait güçlendirme görüntüsü verilmiştir (Şekil 34).



Şekil 34. B5-RET-ROP-WO kiriş numunesinin güçlendirilmiş hali

### **3. BÖLÜM:**

## **DENEYLER VE BULGULAR**

#### **3.1. Deneyler**

Bu bölümde numunelerin deney sonuçları, deney sonuçlarına göre elde edilen veriler ve grafikler her numune için ayrı ayrı incelenmiştir. Deneylerde yükleme işlemi çift noktadan, monotonik şekilde yapılmıştır. Yükleme işleminde, kirişlerde yük kontrollü şekilde başlanmış, akma gerçekleştikten sonrası bölge itibari ile deplasman kontrollü şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, numunelerde belirgin deplasman oluşması ve taşıma kapasitelerinin son sınırına, yani göçme yüküne ulaşılması aşamasına kadar devam ettirilmiştir. Toplam 6 adet numunenin deneyi gerçekleştirilmiştir. Yükleme süreci boyunca oluşan çatlaklar gözlemlenmiş, çatlak gelişimi takip edilerek kayıt altına alınmış ve uygun yöntemlerle görselleştirilmiştir. Deney sonrasında çatlakların genişlikleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Yük artışı sırasında oluşan çatlakların da hangi yük değerinde oluştukları yazılarak eğilme ve kesme çatlakları belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Deney numunelerinin karşılaştırılması için her numunede yükleme esnasında çatlak gelişimleri ve yük durumları yazılmış, kirişlerin deney öncesi ve sonrası hallerinin fotoğrafları çekilip kaydedilmiştir.

##### **3.1.1. Deney Numunelerine Ait Sonuçlardan Elde Edilecek Veriler ve Grafikler**

Deney numunelerinin her birinde 3 adedi lineer potansiyometre, 4 adedi de LVDT olmak üzere 7 adet deplasman ölçer kullanılmıştır. Deney sonuçları doğrultusunda elde edilen veriler ile oluşturulan grafikler şu şekildedir;

- Yük- Orta Nokta Deplasman Grafiği
- Rijitlik değişim Grafiği
- Moment Eğrilik Grafiği
- Süneklik Değeri
- İdealleştirilmiş Zarf Eğrisi ve Enerji Tüketimi Grafiklerinin Çizilmesi

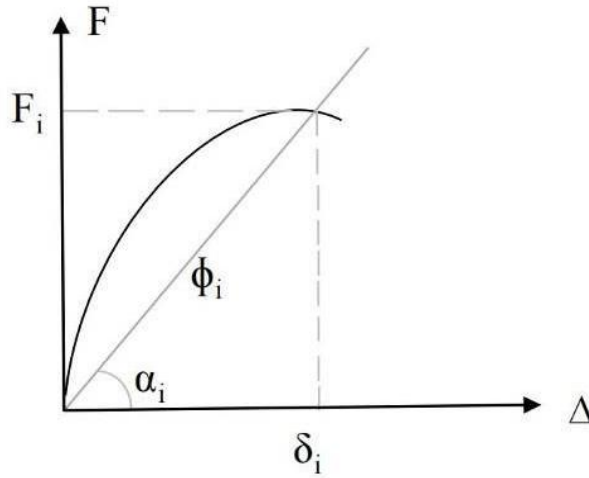
##### **3.1.1.1. Yük-Deplasman Eğrilerinin Çizilmesi**

Yük–orta nokta deplasman eğrilerinin çiziminde, yük hücresinden ve deney numunesinin orta noktasına yerleştirilen deplasman ölçerlerden elde edilip bilgisayar

ortamına aktarılan veriler kullanılmıştır. Grafikte, düşey eksende yük hücresinden elde edilen yük değerleri (P), yatay eksen ise ölçüm cihazları aracılığıyla kaydedilen deplasman değerleri gösterilmektedir.

### 3.1.1.2. Rijitlik Grafiklerinin Çizilmesi

Yapı elemanlarının yer değiştirmeye karşı gösterdiği direnç, rijitlik olarak adlandırılır. Elemanlar üzerlerine gelen yüklerle hasar aldıkça, rijitliklerinde azalma meydana gelir. Deney numunelerinde rijitlik davranışlarını değerlendirebilmek amacıyla üç farklı grafik oluşturulmuştur. Bu grafikler; rijitlik azalım grafikleri,  $\phi_j / \phi_{ilk}$  (veya  $K_j / K_{ilk}$ ) oranları grafikleri ve eğim açısı grafikleridir. Şekil 35’de yer alan grafikte, her bir yükleme adımında uygulanan  $F_i$  yükünün karşılık geldiği  $\delta_i$  deplasmanına oranı, ilgili adımın rijitliğini temsil etmektedir. Bu işlem tüm yükleme adımları için tekrarlanarak numuneye ait tüm rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Rijitlik azalım grafiklerinde, düşey eksen rijitlik değerlerini, yatay eksen ise ilgili yükleme adımındaki orta nokta deplasmanını göstermektedir.



Şekil 35. Rijitliklerin Elde Edilmesi

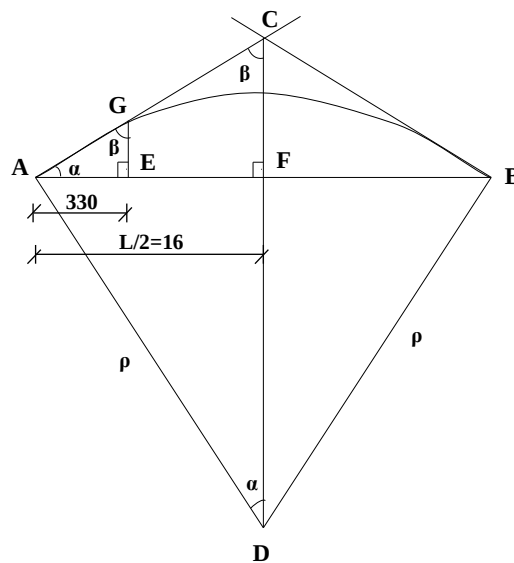
$$\text{Rijitlik } (\phi_i) = F_i / \delta_i$$

Denklem (3.1)

$\phi_j / \phi_{ilk}$  (veya  $K_j / K_{ilk}$ ) grafiklerinin çiziminde, her bir yükleme adımında elde edilen rijitlik değerleri, ilk yüklemedeki başlangıç rijitliğine oranlanarak hesaplanmıştır. Bu oran başlangıçta 1 olacak şekilde başlamakta ve yüklemeler ilerledikçe azalma göstermektedir. Böylece numunenin rijitliğindeki göreceli azalma miktarı değerlendirilmiştir. Bu grafiklerde, düşey eksen her yüklemedeki rijitliğin başlangıç rijitliğine oranını ( $\phi_j / \phi_{ilk}$  ya da  $K_j / K_{ilk}$ ) gösterirken, yatay eksen ilgili yükleme adımında ölçülen orta nokta deplasmanını ifade etmektedir.

### 3.1.1.3. Moment-Eğrilik Grafiklerinin Çizilmesi

Deney numunelerine ait moment değerleri, deneysel veriler doğrultusunda ankastre mesnetlenme koşulları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu denklemde,  $P/2$  ifadesi yükün her bir uygulama noktasına aktarılan miktarını,  $P$  ise numune üzerine uygulanan toplam yükü temsil etmektedir. Numunelere ait moment değerleri belirlendikten sonra, şekil 36' dan yararlanılarak eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Bu şekil üzerinde: AB doğrusu, kirişin eğilmeden önceki açıklığını, AB yayı, eğildikten sonraki açıklığını, AE doğrusu, mesnet ile ilk ölçüm alınan nokta arasındaki mesafeyi, AF doğrusu, mesnet ile orta nokta arasındaki mesafeyi, AD doğrusu ise eğrilik yarıçapını ( $\rho$ ) temsil etmektedir. Eğrilik,  $1/\rho$  şeklinde tanımlanır ve bu değer elde edilebilmesi için öncelikle eğrilik yarıçapının geometrik olarak hesaplanması gerekmektedir. Kirişe yük uygulandığında düzlemde bir ötelenme meydana gelir. Bu durumda, A ve B noktalarından eğilmiş kirişe teğet çizilerek AC ve BC doğruları elde edilir. Bu doğrular yardımıyla oluşan AGE, AFC ve ADC üçgenleri birbirine benzer üçgenlerdir. İlk olarak, AGE ve AFC üçgenlerinin benzerliğinden yararlanılarak CF uzunluğu hesaplanmıştır. Daha sonra, bulunan bu değerler kullanılarak AFC ve ADC üçgenlerinin benzerliğinden faydalanılarak AD uzunluğu, yani eğrilik yarıçapı ( $\rho$ ) bulunmuştur. Böylece eğrilik değeri de belirlenmiştir (Ünal A., 2016). Elde edilen bu verilerle oluşturulan moment–eğrilik grafiklerinde, düşey eksen moment değerlerini, yatay eksen ise ilgili momente karşılık gelen eğrilik değerlerini göstermektedir.

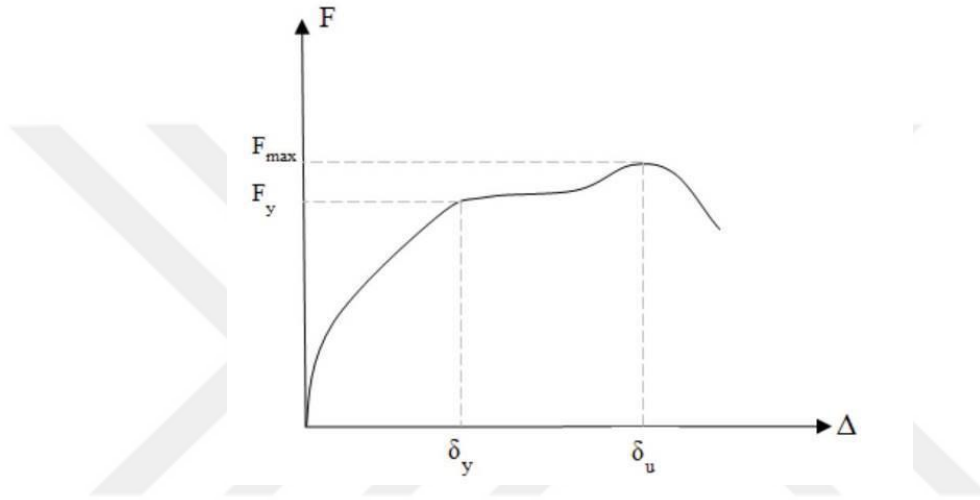


Şekil 36. Kiriş numunelerinin eğriliklerinin belirlenmesi [45].

#### 3.1.1.4. Süneklik Değerlerinin Elde Edilmesi

Süneklik değeri, yük–orta nokta deplasman grafiği kullanılarak belirlenmiştir. Bu grafikte, maksimum yük yapının göçme yükünü, bu yüke karşılık gelen deplasman değeri ise göçme anı deplasmanı olarak tanımlanır. Göçme anındaki deplasman değerinin, akma anı deplasmanına oranı, numunenin süneklik katsayısını verir (Şekil 37). Süneklik değeri, Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad \text{Denklem (3.2)}$$



Şekil 37. Süneklik değerinin elde edilmesi

##### 3.1.1.4.1 İdealleştirilmiş Zarf Eğrisi ve Enerji Tüketimi Grafiklerinin Çizilmesi

Bu çalışmada süneklik hesabı yapılırken numunelerin kuvvet-deplasman eğrilerinin dağılımına göre 2 yöntem kullanılmıştır. Tüm numunelerin aynı idealleştirme yerine 2 farklı metod ile idealleştirme yapılmasının temel nedeni; güçlendirilmiş bazı numunelerin davranışının 4 eğrili lineer omurga davranışına; bazılarının davranışında 2 eğrili lineer omurga davranışına uygun olmasıdır. 2 eğrili lineer omurga davranışını ASCE 41-17(46) temel alınarak belirlenmiştir. Buna göre süneklik (ductility), yapı elemanlarının plastik deformasyon yapabilme kapasitesini tanımlanır. Bu kavram, deprem mühendisliğinde kritik öneme sahiptir çünkü sünek elemanlar, ani kırılmadan önce enerji sönümleyerek deprem enerjisini absorbe edebilir ve yapının göçmesini önler.

ASCE 41-17'e göre deneysel yük-şekil değiştirme eğrisini, enerji (alan) bakımından eşdeğer olan iki eğimli; ilk (elastik) eğim, ikinci eğim (düzlük veya zayıflaşma / limit) eğim eğrisiyle temsil edilmektedir. Sonuç olarak etkin akma

deplasmanı  $\Delta y$  elde edilir. Modelleme prensibi temelde eş-enerji koşulu: gerçek eğrinin altında kalan alanın (enerji) her bir eğrinin altında kalan alana eşit olması sağlamaya dayanır. Bu modelde nihai yük ve deplasman olarak test numunelerinin maksimum yükünün %80'ine düştüğü kuvvet noktası ve karşılık gelen deplasman değeri seçilir. Ayrıca yine söz konusu yönetmelikte sekant rijitliği olarak akma dayanımının %60'ı kabul edilir. Sekant rijitliği olarak; Kuvvet-Deplasman eğrisi 0'dan başlayan ve akma dayanımının %60'ından geçen lineer bir doğru kabulü yapılarak çizdirilir.

4 eğrili lineer omurga eğrisi ise Ibarra–Medina–Krawinkler(47) tarafından; bileşen davranışını akma, akma sonrası rijitliği azalan dayanım artışı, dayanım azalması(capping) ve arta kalan(rezidüel) plato olmak üzere dört ayrı segmentle tanımlar. Akma noktasından sonra eleman önce hafif rijitlik artışı gösterir, sonra belirli bir deformasyon oranında tepe dayanımı ( $F_{maks.}$ ) oluşur. Tepe dayanımından sonra model,  $\lambda\theta$  (negatif eğride azalma) ve  $\lambda F$  (dayanım azalması) parametreleriyle tanımlanan kapasite düşüşü bölgesine girer. Daha ileri deformasyonlarda kuvvet, belirli bir düzeyde rezidüel dayanım  $F_r$  seviyesine iner ve bu plato son deformasyona kadar korunur. Sonuç olarak tüm bu segmentler, deneysel enerji tüketimiyle tutarlı olacak şekilde idealize edilir ve testteki enerji tüketimi ile lineer eğrilerin altında kalan alanlar birbirine eşitlenmesi üzerine 4 eğrili lineer omurga çizdirilir. Enerji tüketim değerleri eşit olur. Böylelikle monotonik envelope + çevrimsel bozunma davranışını gerçekçi şekilde yakalanmıştır.

### **3.2. Deney Sonuçları**

Deney sonuçlarının kapsamında bu deney sonuçları bölümünde numuneler ile deneylere ait görseller, grafikler (yük-orta nokta deplasman, toplam tüketilen enerji, moment-eğrilik ilişkisi, rijitlik ve süneklik) bulunmaktadır. Her numunenin sonucu ayrı ayrı değerlendirilip yorumlanmıştır. Ayrıca numunelerin sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilip grafikleri gösterilmiştir.

#### **3.2.1. B-REF Deney Numunesi**

Çalışmada deneye tabii tutulan ilk kiriş numunesi boşluksuz olan ve diğer boşluklu numunelerle karşılaştırma amacıyla üretilen B-REF numunesidir. Referans numunesinde boşluk yoktur ve donatı dağılımı diğer numunelerdeki gibi çekme donatısı 3Ø14, basınç donatısı 2Ø14 ve kesme donatısı da Ø8/10 şeklindedir. Kiriş numunesinin deney öncesi görünümü (Şekil 38).



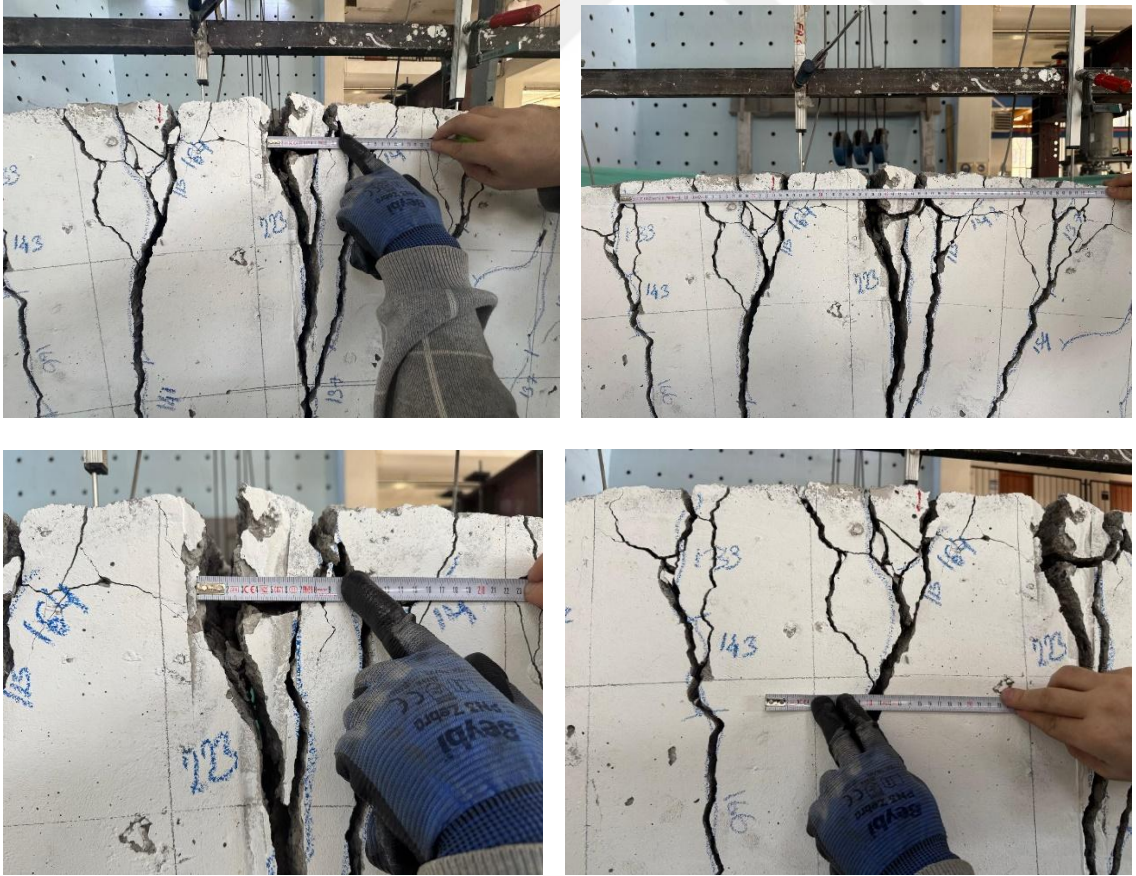
Şekil 38. B-REF numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra oluşan ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde, 115 kN yük değerinde yükleme noktaları arasında görülmüştür. Artan yükleme ile çatlakların sayıları artmış olup eğilme bölgesinde oluşmuş olan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. İkinci çatlak 117 kN yük değerinde, üçüncü çatlak 123 kN yük değerinde, mesnetle yükleme noktaları arasında ve dördüncü çatlak 124 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Kiriş numunesinde akma değerine 100-125 kN seviye bölgesinde ulaşılmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 7,2 mm'dir. İlk geniş çatlak 205 kN yük değerinde 0,8 mm genişliğinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 226 kN değerinde 2 mm genişliğinde görülmüştür. 242 kN yük değerinde 2 adet 4 mm genişliğinde geniş çatlak oluşmuştur. 270 kN yük değerinde yükleme noktaları arasında 4 adet 4-5 mm genişliğinde çatlaklar oluşmuştur ve 274 kN yük değerinde açıklıkta 1 cm'ye ulaşmıştır. 289 kN yük değerinde basınç bölgesinde ezilme başlamıştır. 295 kN yük değerinde çatlaklar basınç bölgesine ulaşmış olup, çatlak genişlikleri 12 mm ye ulaşmıştır. 308 kN da pompa kasmaya başlamış, 310 kN da basınç bölgesinde kabuk beton atmak üzeredir ve 340 kN yük değerinde ilk patlama gerçekleşmiştir. Yük düşmeye başlamış, basınç bölgesi ve donatı kopmuştur. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 340 kN'dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 150 mm'dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü şekil 39'da gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek

şekilde çizilerek her biri çatlak ölçüm cetveli yardımıyla ölçölüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali şekil 40 ve numunenin arkasındaki çatlak görünümü şekil 41’de gösterilmiştir.



Şekil 39. B-REF numunesinin deney sonrası görünümü

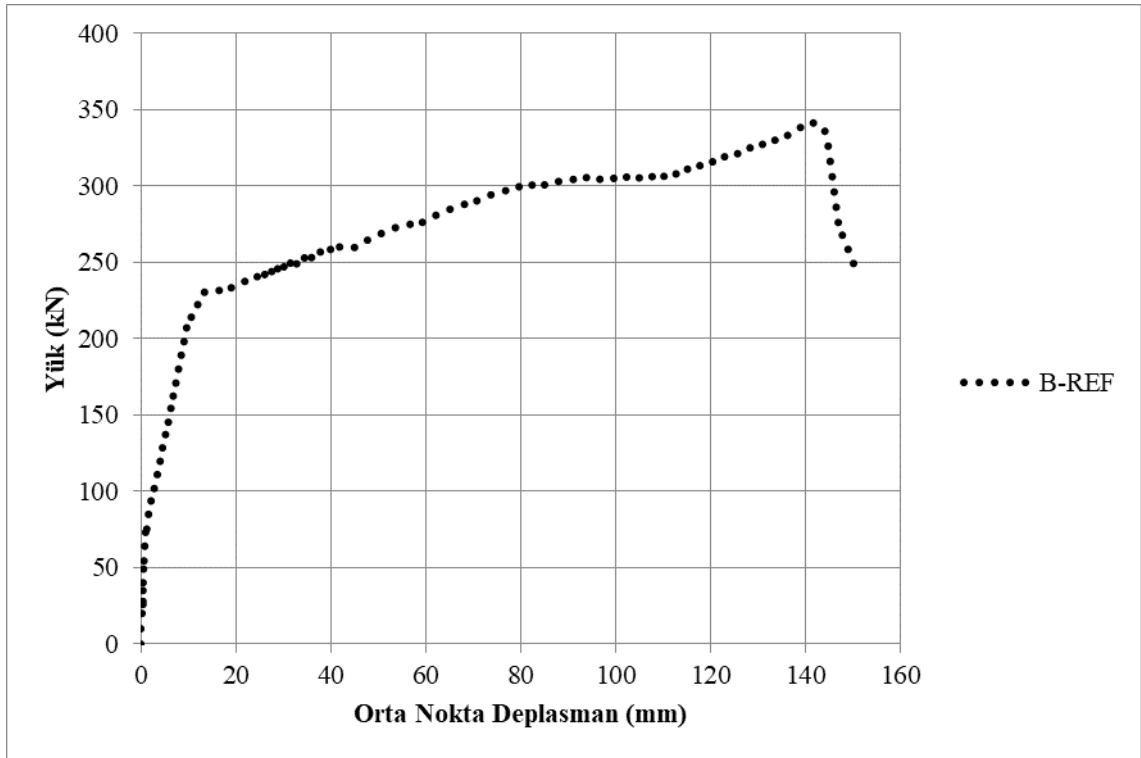


Şekil 40. B-REF numunesinin çatlak dağılımı

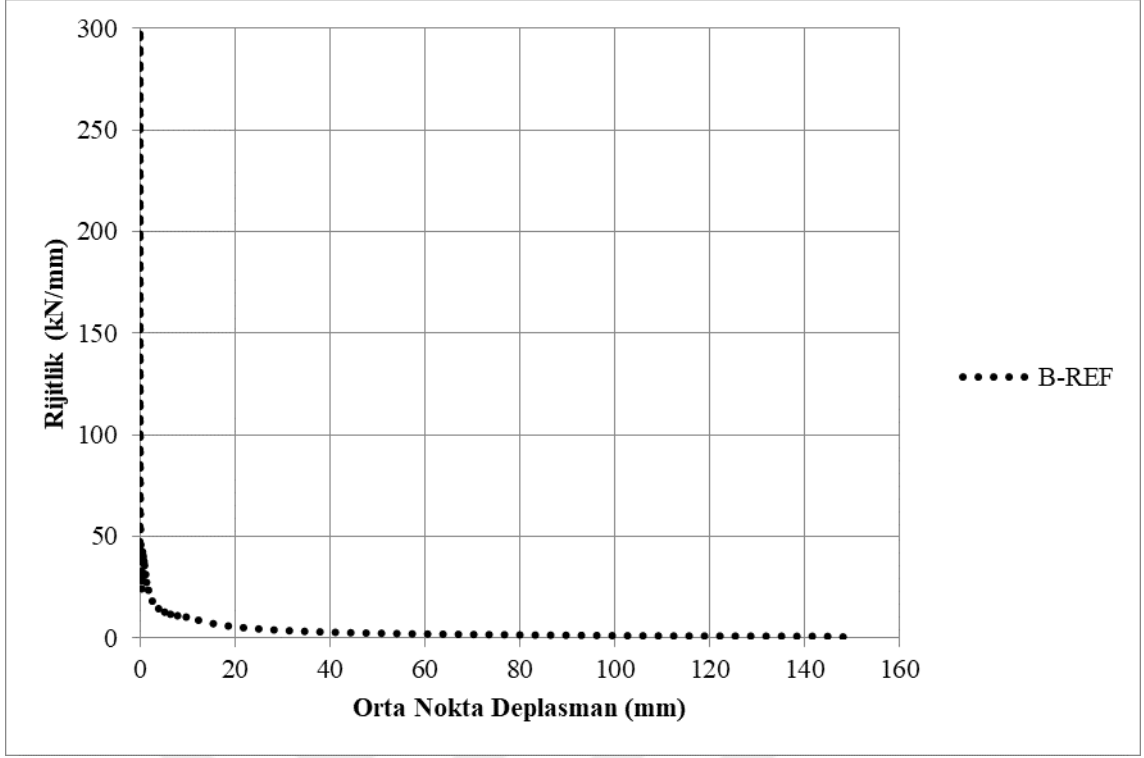


Şekil 41. B-REF numunesinin arkasındaki çatlak dağılımı

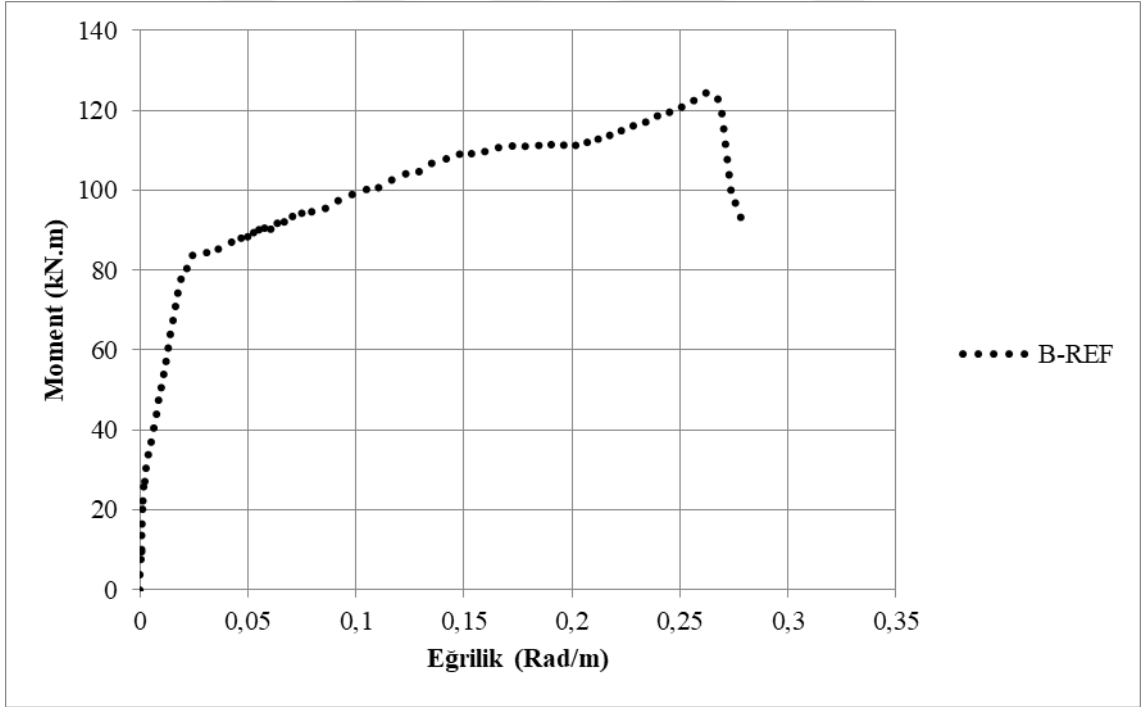
Deney esnasında yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden bilgisayara aktarılan veriler kullanılarak yük-orta nokta deplasman grafiği şekil 42’de, rijitlik değişimi grafiği 43’ de, moment eğrilik grafiği şekil 44’de ve iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği şekil 45’de verilmiştir.



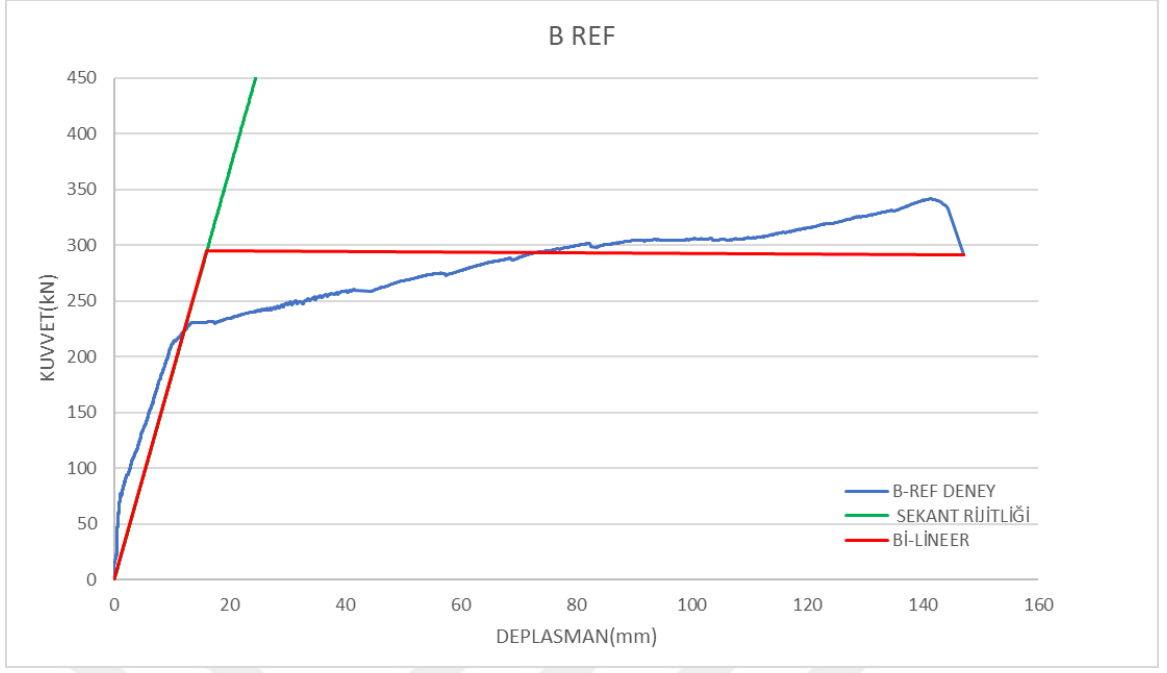
Şekil 42. B-REF kirişi yük orta deplasman grafiği



Şekil 43. B-REF kirişi rijitlik değişimi grafiği



Şekil 44. B-REF kirişi moment-eğrilik grafiği



Şekil 45. B-REF kirişi iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği

### 3.2.2. B-REF-WO Deney Numunesi

Kiriş deneylerinin ikinci numunesi boşluğun olduğu, üzerinde herhangi bir güçlendirmenin yapılmadığı ve diğer güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacıyla üretilen B-REF-WO numunesidir. Bu numunede güçlendirme bulunmazken donatıların dizaynı ise tüm kirişlerde olduğu gibi aynıdır. Kiriş numunesinin deney öncesi görünümü şekil 46’da gösterilmiştir.



Şekil 46. B-REF-WO numunesinin deney öncesi görünümü

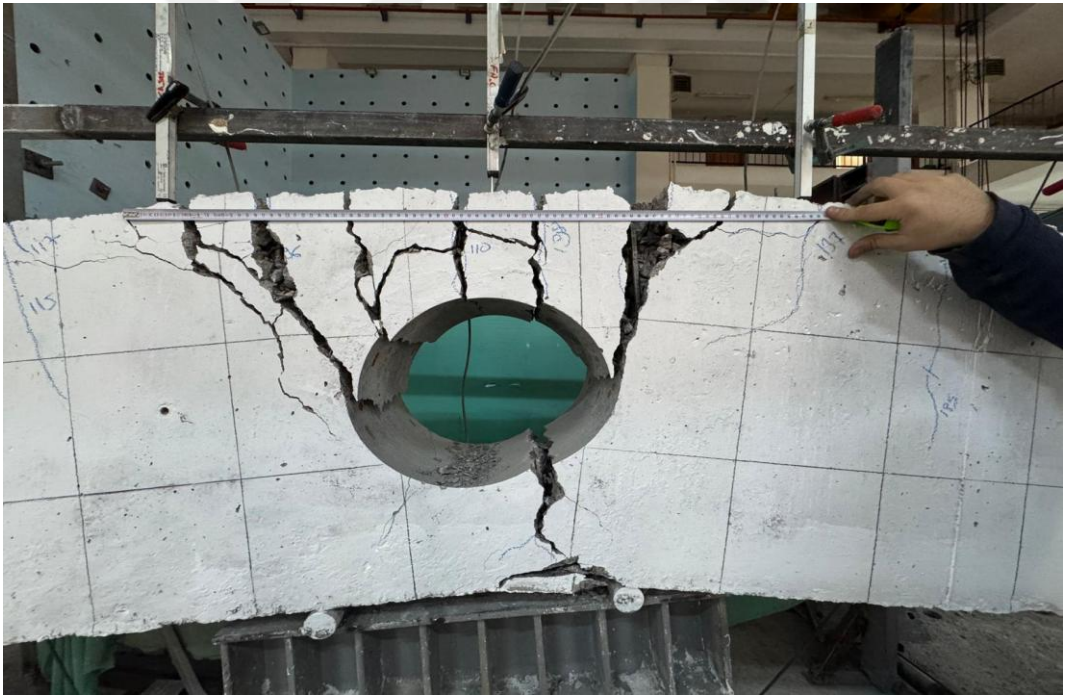
Kiriş numunesinde ilk çatlak yükleme yapılmaya başlandıktan sonra 96 kN yük değerinde eğilme çatlakları biçiminde görülmüştür. Artan yükleme ile beraber çatlak sayıları artmış olup eğilme bölgesinde görülen çatlaklar basınç bölgesi doğrultusunda ilerleme göstermiştir. 110 kN yük değerinde 2. çatlak görülmüştür. 3. çatlak değeri 115 kN yük değerinde 4. çatlak 117 kN değerinde görülmüştür. 130 kN'da 5. çatlak, 132 kN'da da 6. çatlak görülmüştür. Söz konusu çatlakların tamamı eğilme etkisi sonucu oluşmuş çatlaklardır. 185 kN yük değerinde çatlaklarda dallanmalar başlamıştır. Kiriş numunesinde akma değerine 150-175 kN seviye bölgesinde ulaşılmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 20-30 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 190 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. 220 kN yük değerinde çatlaklar basınç bölgesine ulaşmıştır. 235 kN' da çatlak genişliği 1 cm'yi geçmiştir ve basınç bölgesi betonu ezilmiştir. 240 kN yük değerinde bütün çatlaklar boşluk çevresinde yoğunlaşmıştır. 280 kN' da basınç bölgesinde kabuk betonu atmıştır. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 289 kN'dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 110 mm'dir. Kiriş numunesi, uygulanan yükleme süresince esas olarak eğilme etkisi altında davranış sergilemiştir. Gözlemlenen çatlakların çoğu, kirişin ortasında eğilme bölgesinde oluşmuştur. Yükün uygulandığı basınç bölgesinde beton ezilmesi gözlemlenmiştir. Numunenin, maksimum yük kapasitesine ulaştıktan sonra yükün tahliyesiyle oluşan görünümü şekil 47'de gösterilmektedir. Çatlaklar, belirgin şekilde görünür hâle getirilerek işaretlenmiş, her biri metre ile ölçülerek genişlikleri kaydedilmiştir. Numaralandırılmış çatlaklar şekil 48'de, çatlak ölçüm süreci ise şekil 49'da gösterilmektedir.



Şekil 47. B-REF-WO numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 48. B-REF-WO numunesinin deney sonrası eğilme çatlağı



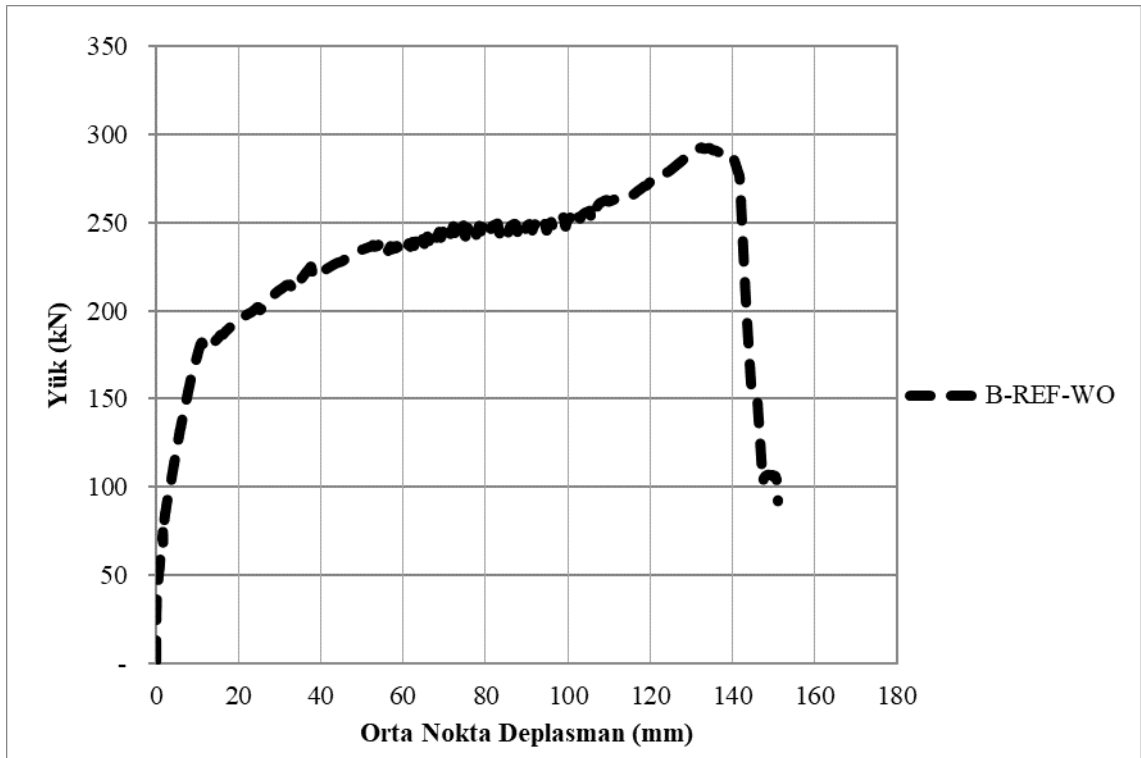
Şekil 49. B-REF-WO numunesinin çatlaklarının ölçülmesi

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde, uygulanan yüklemeye bağlı olarak meydana gelen çatlakların görünümü ile hasar mekanizması altındaki kirişin durumu şekil 50’de sunulmuştur.

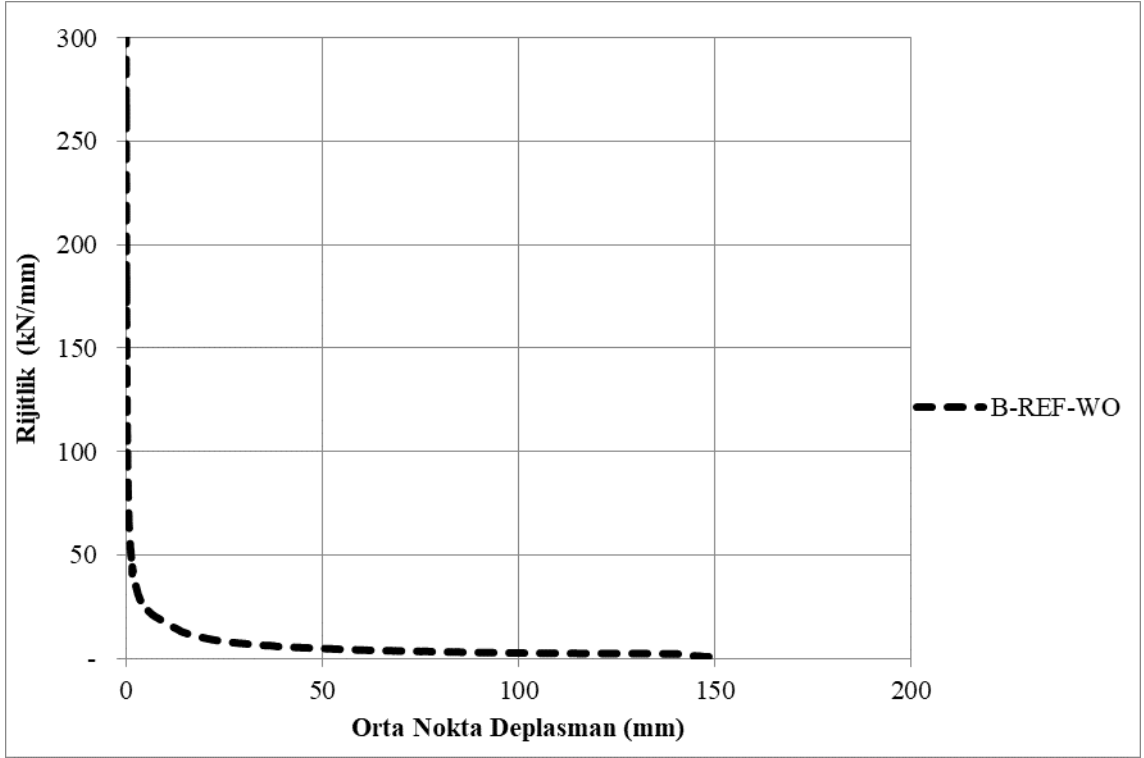


Şekil 50. B-REF-WO numunesinin arka yüzeyinde oluşan çatlakların görünümü

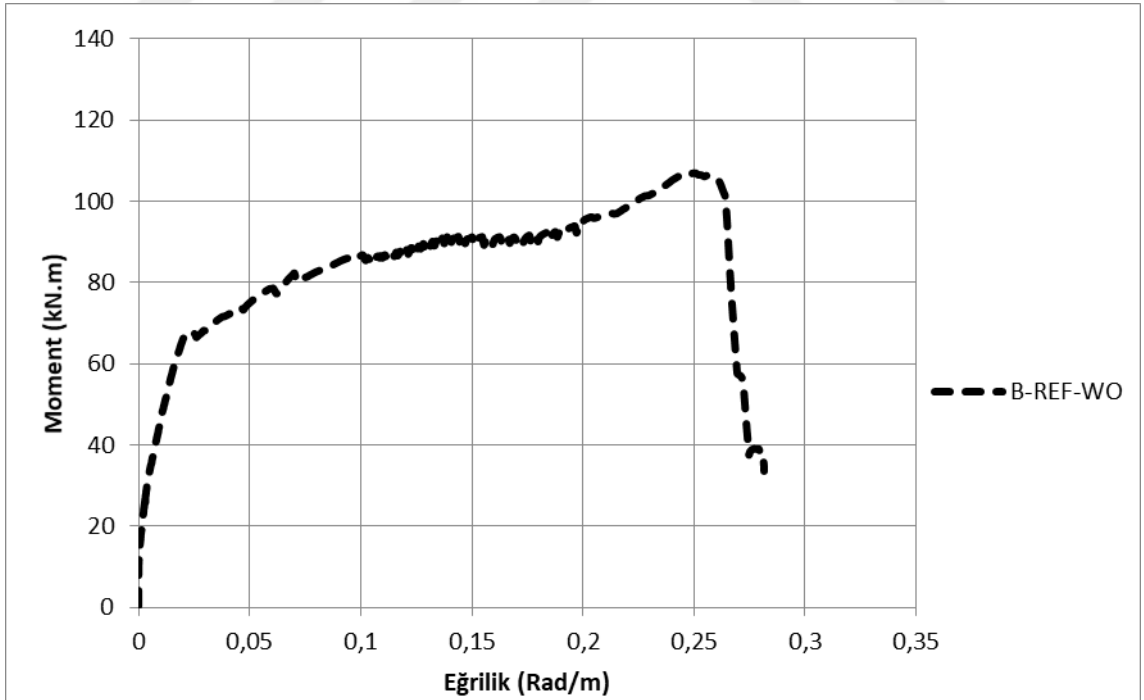
Deney esnasında yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden bilgisayara aktarılan veriler kullanılarak yük-orta nokta deplasman grafiği şekil 51’ de, rijitlik değişimi grafiği şekil 52’ de, moment eğrilik grafiği şekil 53’da ve iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği şekil 54’de verilmiştir.



Şekil 51. B-REF-WO kirişi yük orta deplasman grafiği



Şekil 52. B-REF-WO kirişi rijitlik değişim grafiği



Şekil 53. B-REF-WO kirişi moment-eğrilik grafiği



Şekil 54. B-REF-WO kirişi iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği

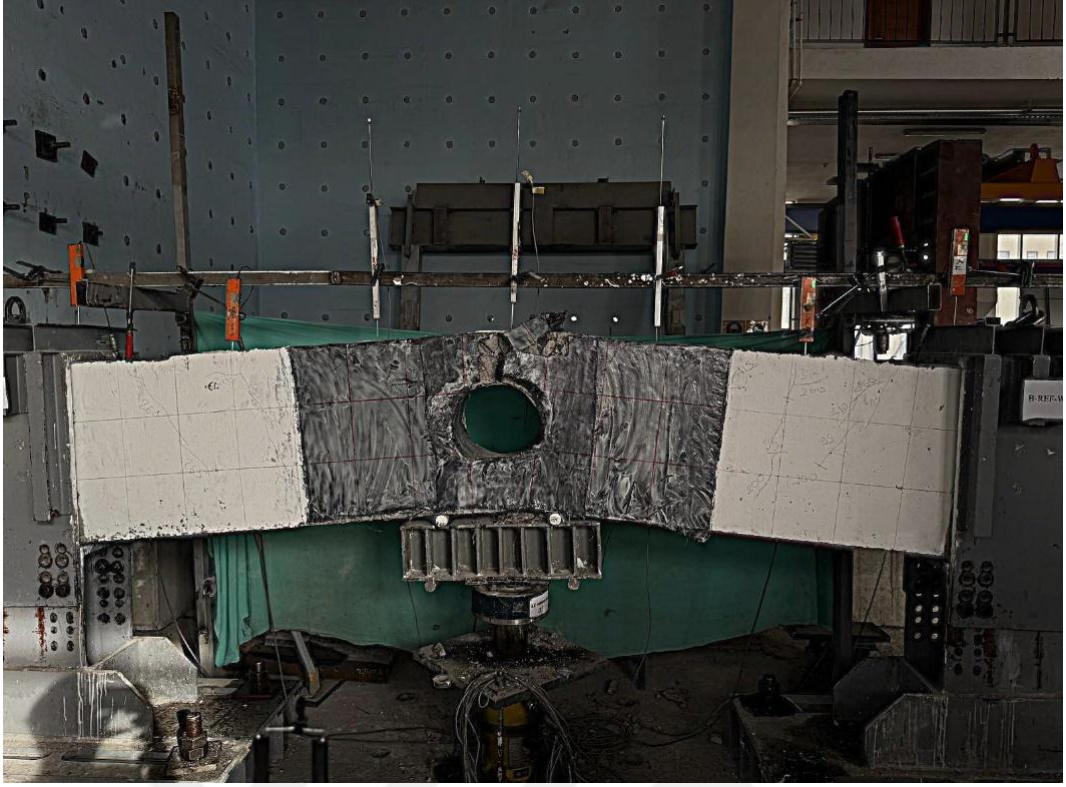
### 3.2.3. B1-DEF- RET -WO Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 3. sırada deneyi gerçekleştirilen numune boşluğun olduğu aynı zamanda deformasyonlu olan U şeklinde sargılama yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunesidir. Boşluklu, deformasyonlu ve U şeklinde sargılama ile FRP kumaş ile güçlendirilen B1-DEF-RET-WO numunesinde donatı düzeni ise tüm numunelerde olduğu gibi aynıdır. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 58’ de gösterilmiştir.



Şekil 55. B1-DEF- RET –WO numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra İlk ve ikinci çatlak 30 kN yük değerinde güçlendirmenin olduğu yerin yanında görülmüştür. 3. çatlak 40 kN değerinde görülmüştür ve çatlaklar mesnete doğru artmaya başlamıştır. 80 kN'da 40 kN'da oluşan 3. çatlak ve mesnete yakın bölgelerde oluşan çatlaklar ilerlemiştir. 120 kN yük değerinde FRP malzemenin bittiği yerde, simetrisinde de çatlak oluşmuştur. 150 kN yük değerinde 30 kN'da iken oluşan çatlak devam etmiştir. 220 kN yük değerinde FRP'lerden ayrılma sesleri gelmeye başlamıştır. 250 kN'da boşluk etrafında FRP'lerde ayrışmalar gözlenmiştir. 255 kN'da çekme bölgesinde ayrışmalar gözlenmiş olup kiriş altında çatlaklar devam etmiştir. 260 kN'da mesnete yakın bölgelerde çatlaklar devam etmiş ve çatlaklar dallanmaya başlamıştır. 265 kN'da boşluk etrafındaki FRP'lerden ses gelip ayrışma gözlenmiştir. 290 kN'da çekme bölgesinde ayrışmalar olup FRP'lerden ses gelip kopmaya başlamıştır. 300 kN'da kiriş altında ayrışmalar devam etmiştir. FRP'nin bitim yerinde sağ tarafta kiriş altında 3 mm, sol tarafta da 2 mm boyuna çatlak genişliği ölçülmüştür, kırılmalar artmıştır. 312 kN'da FRP'nin yanındaki çatlaklar genişlemiştir, sağdaki çatlak 4 mm olmuştur. Açıklık ortasında boşluğun üstünde yırtılma gerçekleşmiştir. 257 kN'da 50 mm deplasmana ulaştığında boşluk üstündeki yırtılmalar artmıştır. 250 kN'da 60 mm deplasmandayken 2. genişlik oluşmuştur ve 2. Yırtılma gerçekleşmiştir. 245 kN'da deplasman 89 mm'deyken yırtılma devam etmiştir. 235 kN'da deplasman 105 mm'deyken yırtılma devam etmiştir. 156 mm deplasmanda donatı kopmuştur. Kiriş numunesinde akma değeri 150-175 kN seviye değerlerinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 20-30 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 225 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak ise 250 kN değerinde belirmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 350 kN'dur. Göçme yük değeri altında yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 110,17 mm'dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde sağ boşluk çevrelerinde meydana gelmiştir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü şekil 56'da gösterilmiştir. Çatlaklar belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Basınç bölgesinde betonda ciddi ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesinde çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmişlerdir. Çatlakların numaralandırılmış hali şekil 57'de gösterilirken hasar dağılımı da şekil 58'de gösterilmiştir.



Şekil 56. B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası görünümü



Şekil 57. B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası çatların görünümü



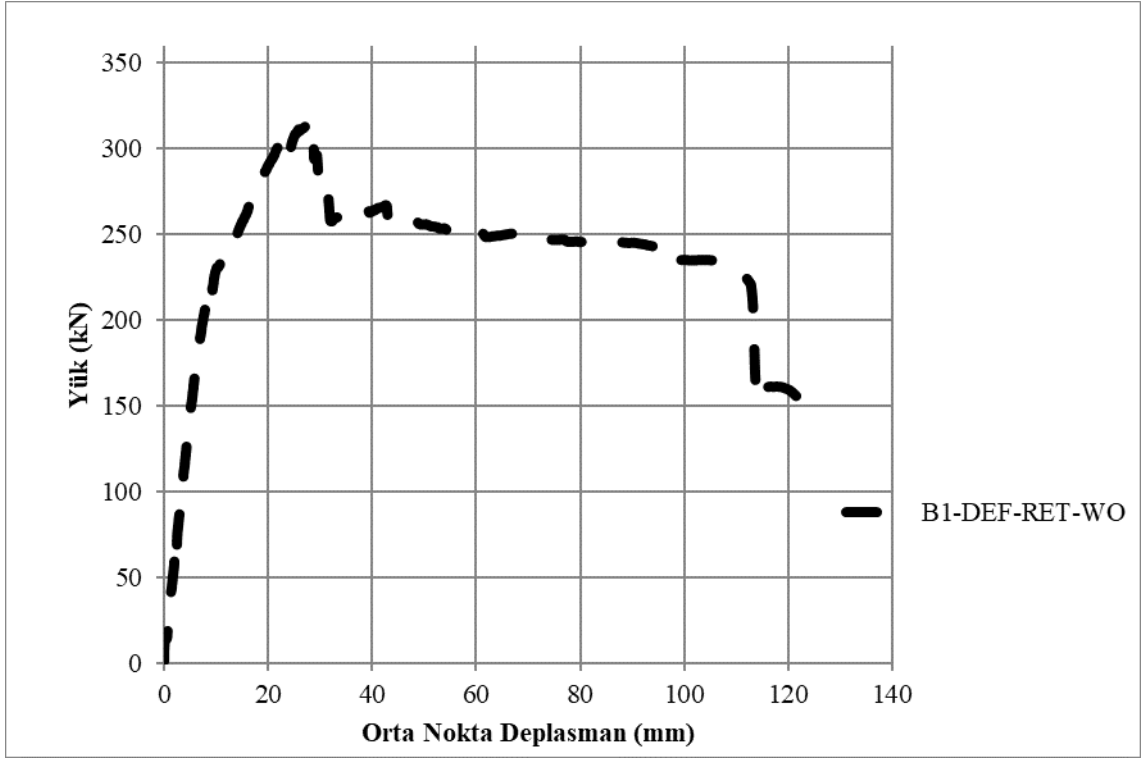
Şekil 58. B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası hasarlı görünümü

Kiriş numunesinin arka yüzeyinde yüklemeye bağlı olarak oluşan çatlakların görünümü ve hasarlı mekanizma durumundaki kiriş numunesi şekil 59’da gösterilmiştir.

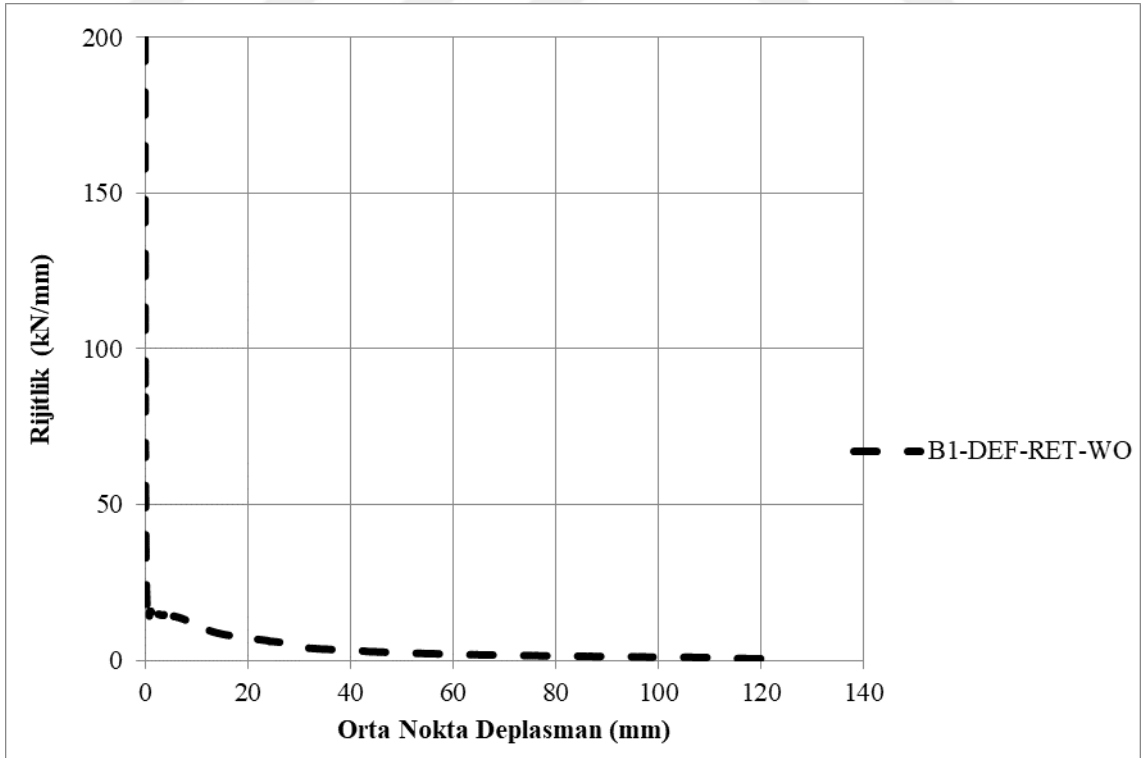


Şekil 59. B1-DEF- RET –WO numunesinin deney sonrası hasarlı görünümü

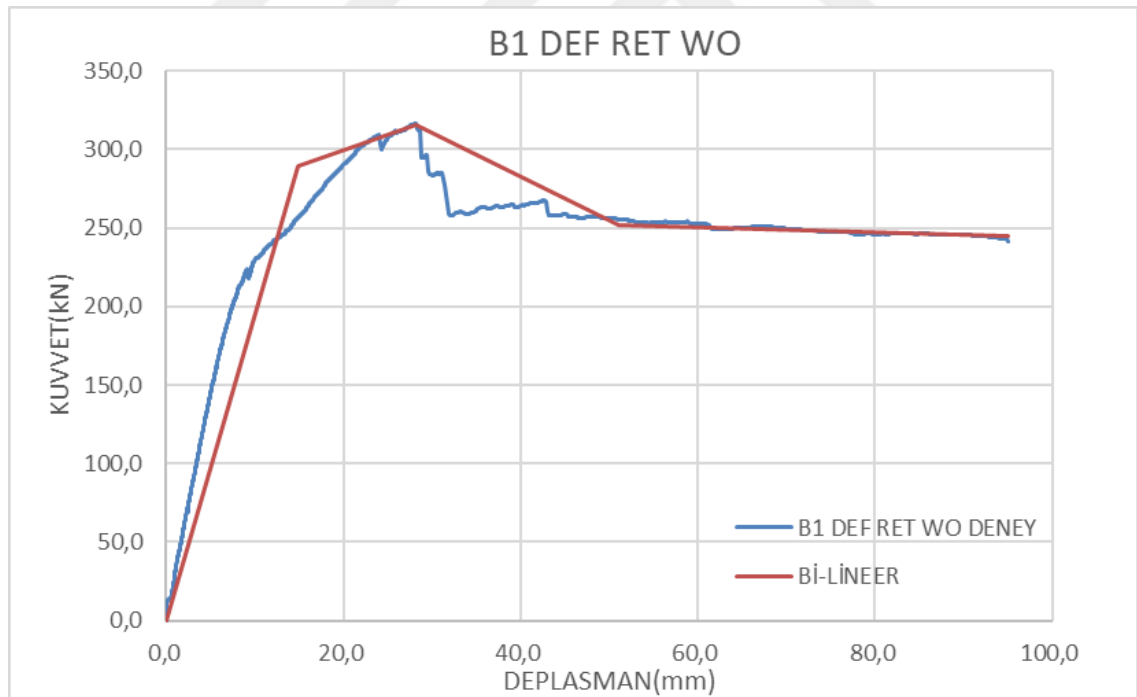
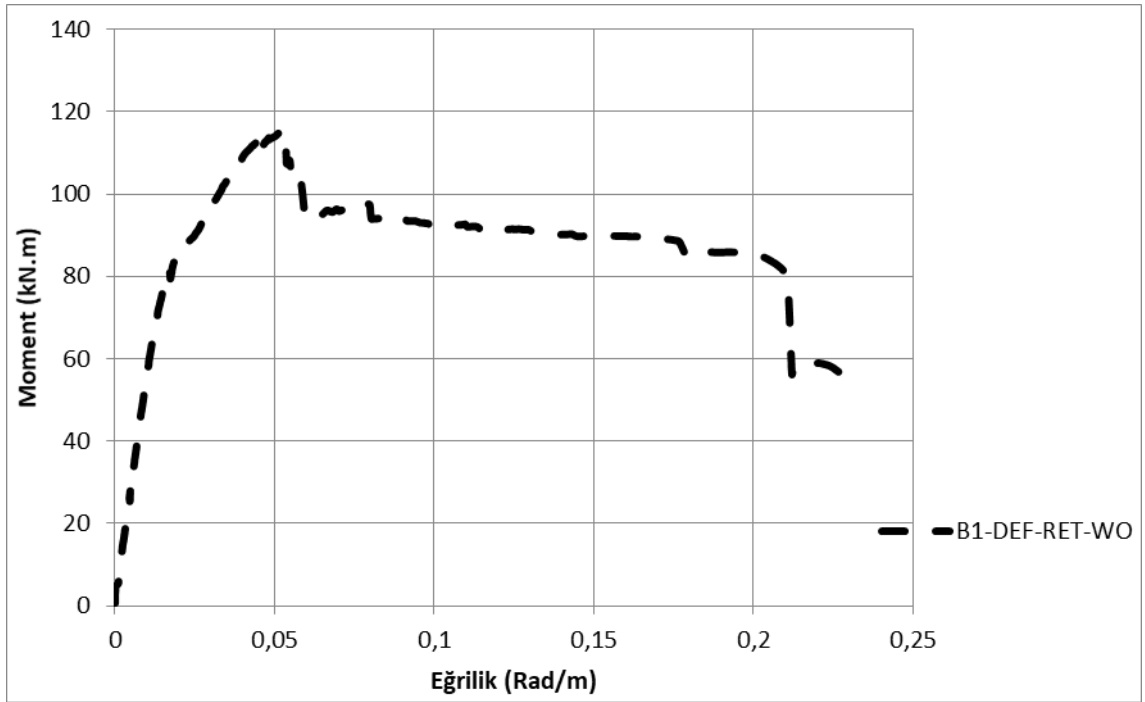
Deney esnasında yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden bilgisayara aktarılan veriler kullanılarak yük-orta nokta deplasman grafiği şekil 60’ de, rijitlik değişimi grafiği şekil 61’ de, moment eğrilik grafiği şekil 62’de ve iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği şekil 63’de verilmiştir.



Şekil 60. B1-DEF-RET-WO kirişi yük orta deplasman grafiği



Şekil 61. B1-DEF-RET-WO kirişi rijitlik değişimi grafiği



### 3.2.4. B2-RET-WO Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 4. olarak deneyi gerçekleştirilen numune boşluklu, U şeklinde FRP kumaşla sargılama yöntemi ile güçlendirilen B2-RET-WO kiriş numunesidir. Boşluklu B2-RET-WO numunesinde donatı düzeni ise tüm numunelerde olduğu gibi aynıdır. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 64’ de gösterilmiştir.



Şekil 64. B2-RET-WO numunesinin deney öncesi görünümü

Kiriş numunesinde yükleme uygulanmaya başlandıktan sonra ilk çatlak kirişin orta bölgesinde eğilme çatlağı şeklinde görülmüştür. İlk çatlak 92 kN yük değerinde gözlemlenmiştir. Giderek artan yüklemeye bağlı olarak çatlak sayıları artmış ve eğilme bölgesinde oluşan çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerleme kaydetmiştir. İkinci çatlak kirişin sağ tarafında 100 kN yük değerinde gözlemlenmiştir, sol tarafta çatlak gelişimi olmamıştır. 105 kN’da 2. çatlak ilerlemiştir. 115 kN’da orta bölgede FRP’den ses gelmiştir, ayrılmalar başlamıştır. 121 kN’da sol tarafta ilk çatlak gelişimi gözlenmiştir. 125 kN’da sol tarafta oluşan ilk çatlak ilerleme göstermiştir. 130 kN’da iken 92 kN’da oluşan ilk çatlak ilerleme göstermiştir ve deplasman 6 mm’dir. Çatlak genişlikleri artmaya başlamıştır. 145 kN yük değerinde 125 kN’da oluşan çatlak uzamıştır. 148, 150, 155 kN’larda çatlaklar oluşmuştur. 155 kN’da iken sol ve sağda 3. Sektörde çatlak oluşmuştur. 160 kN’da 155 çatlağı sol sektörde ilerlemiştir. FRP’de sıyrılma olmamıştır. 170 kN’da ilk oluşan çatlak genişlikleri 0,60 mm ye ulaşmıştır. FRP’de sıyrılmalar başlamıştır. 175 kN’da çatlaklar genişlemiştir, kiriş altında FRP’lerde ayrışmalar başlamıştır. 180 kN’da 155 kN’da oluşan çatlak 0,60 mm ye ulaşmış ve yataydan mesnete doğru ilerlemiştir. 190 kN’da 148 kN’da oluşan çatlak ilerlemiştir. 195 kN’da kiriş

üstünde FRP'lerden sıyrılma sesleri duyulmuştur. 200 kN'da ilk çatlak 1 mm genişliğe ulaşmıştır. 155 kN'da oluşan çatlak da 0,60 mm ye ulaşmıştır. 210 kN'da sağ tarafta çatlaklar mesnete doğru ilerlemiştir, FRP'lerden ses gelmiştir, kiriş üstünde FRP'ler atmaya başlamıştır. 220 kN'da sağ tarafta 105 kN'da oluşan çatlak FRP altına ilerlemiştir. 225 kN'da 225 çatlağı FRP altına ilerlemiş ve genişliği 1 mm ye ulaşmıştır. 235 kN'da kiriş üstünde ilk oluşan çatlaklar açılmaya başlamıştır. 240 kN'da kirişin üstündeki ilk çatlağın genişliği 1,5 mm ye ulaşmıştır. 245 kN'da sağda ve solda yeni çatlaklar oluşmuştur, sağda 245 kN' da oluşan çatlak ilk çatlaktan itibaren mesnete doğru ilerlemiştir. 250 kN'da sol tarafta yeni çatlak oluşmuştur. FRP'lerde hem kiriş yüzünde hem de kiriş altında atmalar gözlenmiştir. 255 kN'da sağ tarafta mesnete yakın çatlak oluşmuştur ve bu çatlak 260 kN'da ilerlemiştir. 260 kN'daki çatlak 4.sektörde mesnetten kiriş basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Çatlak genişlikleri sol tarafta 0,6- 0,7 mm mertebelerine ulaşmıştır. 275 kN'da FRP'lerden atma sesi duyulmuştur, üst çatlaklar genişleyip mesnet kiriş altında 2 mm ye yaklaşmıştır. 280 kN'da delik üst bölgesinde ve kiriş üstünde FRP'lerde atmalar devam etmesine rağmen bütünlük korunmuştur. Eğri hafif yataya dönmeye başlamıştır. FRP atmaları çoğalmıştır. 3. sektörde kiriş üstünde hem sol hem sağ tarafta yeni çatlak gözlenmiştir. 295 kN'da tüm çatlaklar genişlemiştir. Sol tarafta FRP'nin bitiminde kiriş üstünde çatlak genişliği 3 mm'ye ulaşmış, beton ayrılmaya başlamıştır. 300 kN'da sol tarafta sıyrılma gerçekleşmiştir. FRP kiriş gövdesinden ve diğer gövdesinden ayrılmıştır. FRP sol tarafta basınç bölgesine kadar ayrılmış ve deliğe doğru devam etmiştir, FRP'nin açıldığı gözlenmiştir. Sağ tarafta FRP halen yapışık durumdadır. Betonda ezilme gerçekleşmiş ve kopmuştur. Alt tarafta ezilme gerçekleşmiştir, beton dökülmüştür, çatlaklarda genişleme olmuştur. Betonda ayrılma gözlenmiştir, FRP yapıştığı betonu kaldırmıştır. Boşluk geometrisinde bozulma gerçekleşmiştir, boşluk içinde sıyrılma olmuştur. Sol tarafta boşlukta FRP sıyrılmıştır. Sol tarafta atmalar yoğunlaşmıştır, sağ tarafta henüz herhangi bir atma olmamıştır. Kuvvet düşmeye başlamıştır, ciddi bir atma sesi duyulmuştur ve donatı kopmuştur. Boşluğun sol tarafı, sol mesnet tarafına doğru FRP betonu yolup almıştır. Delik çevresindeki beton yolunmuştur aynı zamanda FRP kırılmıştır. Kiriş arkasında da sol taraftan başlayan hem boşluğun çeperinde hem de kirişin yüzeyindeki ayrılmalar kirişin arkasında da devam etmiş yani boşluğun sağ ucuna kadar FRP sıyrılmış durumdadır, sol ucunda sıyrılma olmamıştır. Kiriş numunesinde akma değeri 150 kN seviye değerinde ulaşmıştır. Bu yük değerinde orta noktanın ulaştığı deplasman değeri 20-30 mm değerindedir. İlk geniş çatlak 245 kN yük değerinde gözlemlenirken ikinci geniş çatlak

ise 300 kN değerinde gözlenmiştir. Deney numunesinin yükleme altında ulaştığı maksimum yük değeri 300 kN'dur. Göçme yük değeri altında y k boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deplasman değeri 130-140 mm'dir. Deney numunesine yükleme boyunca eğilme davranışı hakimdir. Çatlakların büyük bir bölümü kirişin orta noktalarında eğilme bölgesinde sağ boşluk çevresinde meydana gelmiştir. Sağ boşluğun üst kısmında basınç bölgesinde betonda ezilme ve kopmalar meydana gelmiştir. Çatlaklar asimetrik olarak sağ boşluğun bulunduğu bölgede yoğunlaşmıştır. Sağ boşluğun alt kısmında çatlakların çok fazla genişlemesiyle betonda kopma ve ayrılmalar meydana gelmiştir. Basınç bölgesinde betonda ciddi ezilmeler meydana gelirken çekme bölgesinde çatlaklar kesitin zayıf olduğu boşluğa doğru yönelmişlerdir. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü şekil 65'de gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla  l l p genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali şekil 66'da gösterilirken hasar dağılımı da şekil 67'de gösterilmiştir.



şekil 65. B2-RET-WO numunesinin deney sonrası görünümü

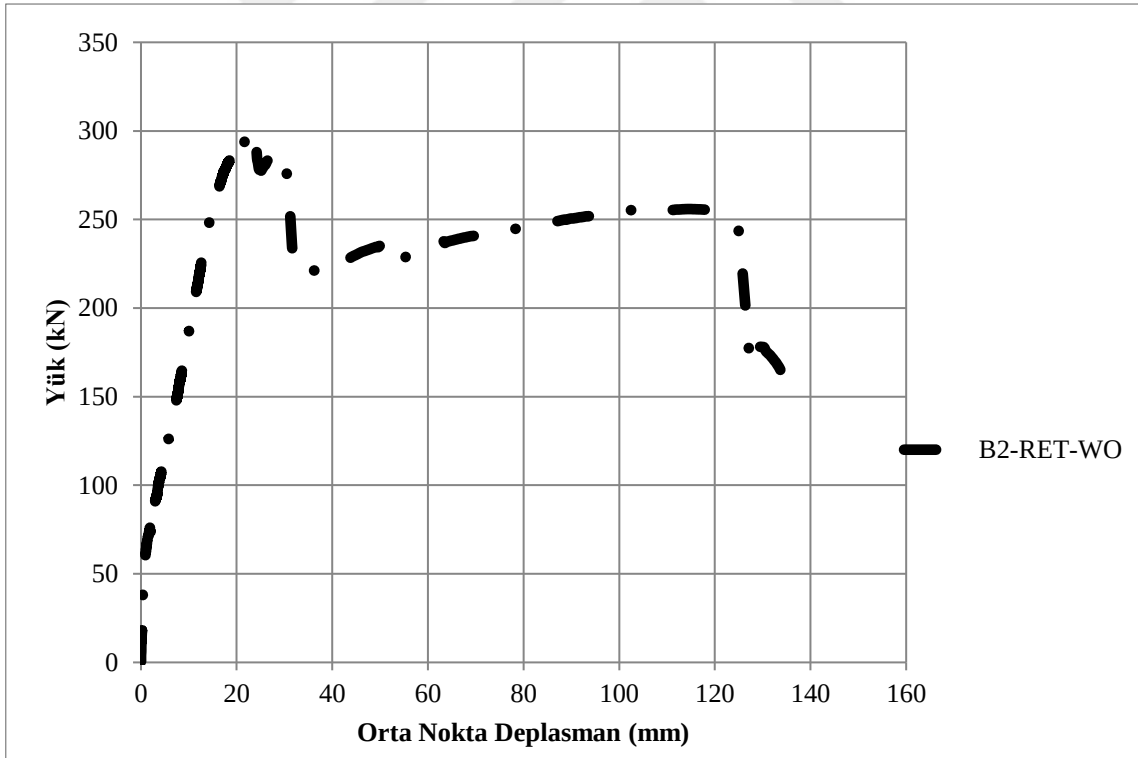


şekil 66. B2-RET-WO numunesinin hasar dağılımları

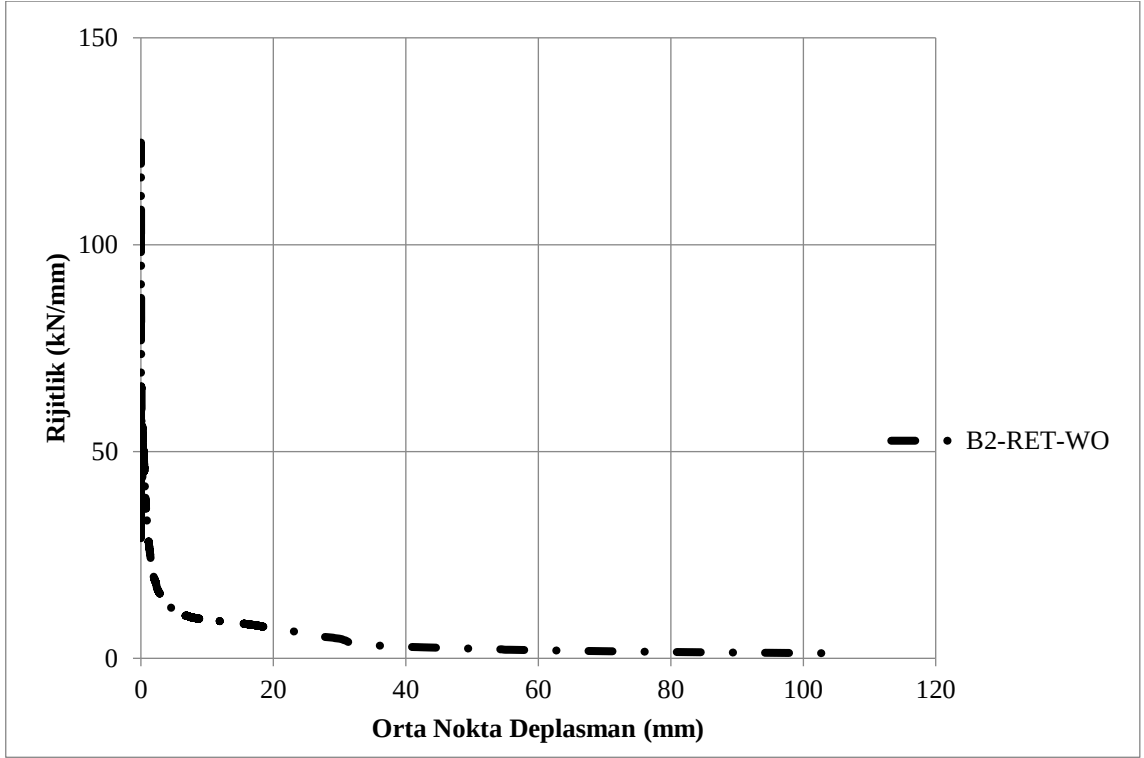


Şekil 67. B2-RET-WO numunesinin hasar dağılımları

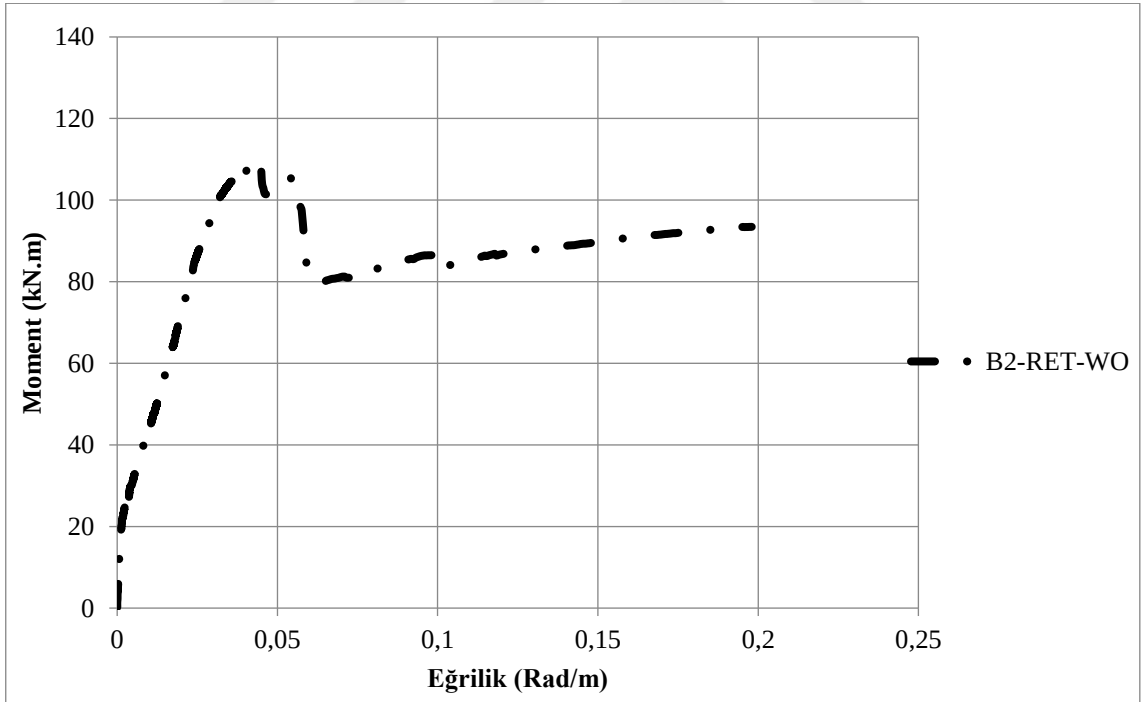
Deney esnasında yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden bilgisayara aktarılan veriler kullanılarak yük-orta nokta deplasman grafiği şekil 68’de, rijitlik değişimi grafiği şekil 69’da, moment eğrilik grafiği şekil 70’de ve iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği şekil 71’de verilmiştir.



Şekil 68. B2-RET-WO kirişi yük orta deplasman grafiği



Şekil 69. B2-RET-WO rijitlik değişimi grafiği



Şekil 70. B2-RET-WO moment-eğrilik grafiği



Şekil 71. B2-RET-WO kirişi 4 eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği

### 3.2.5. B4-RET-PL2-WO Deney Numunesi

Kiriş deneylerinde 5. olarak deneyi gerçekleştirilen numune boşluklu, FRP plaka, FRP kumaş ve FRP kasnak ile güçlendirilen B4-RET-PL2-WO kiriş numunesidir. Bu numunede de donatı düzeni tüm numunelerde olduğu gibi aynıdır. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 72’de gösterilmiştir.



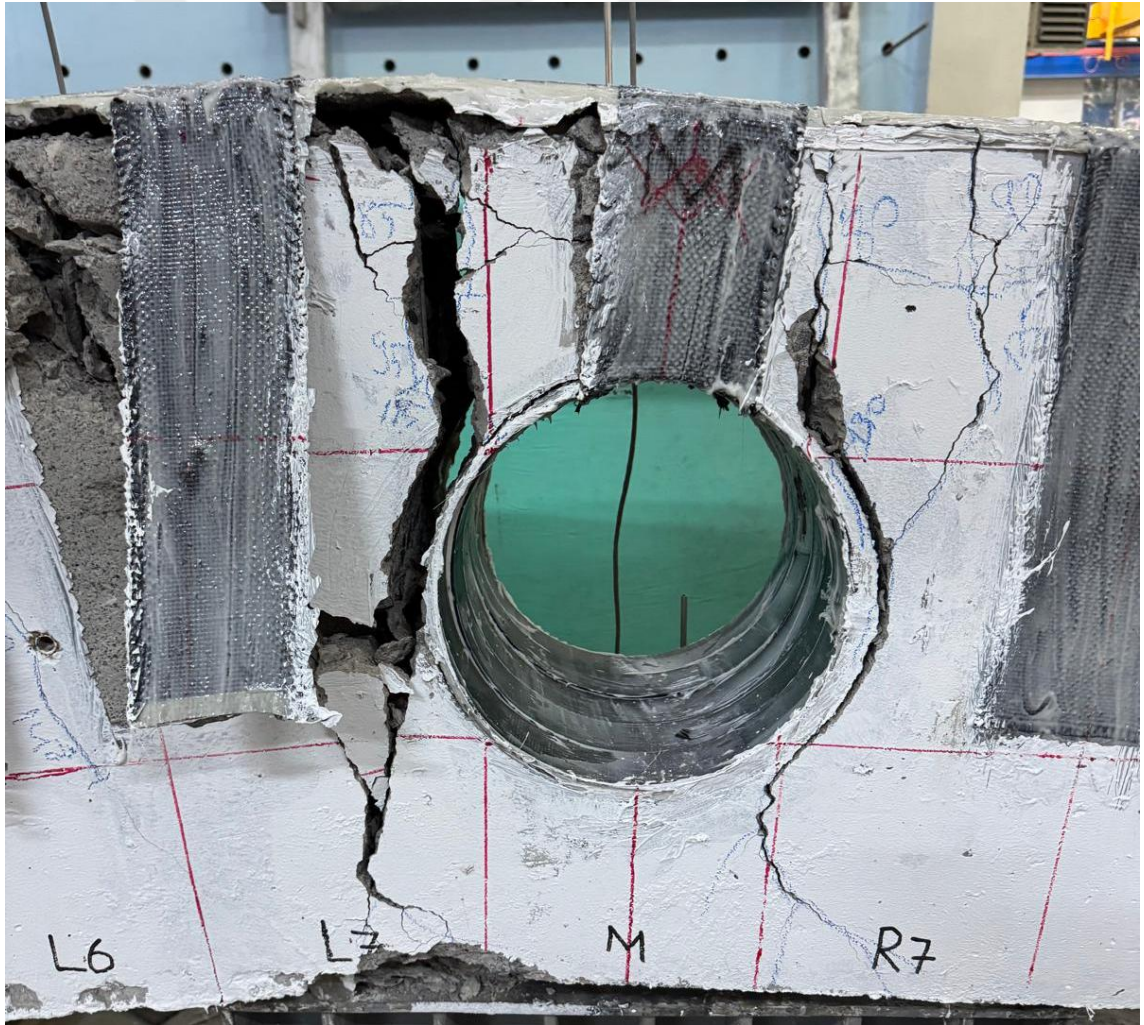
Şekil 72. B4-RET-PL2-WO numunesinin deney öncesi görünümü

Deney numunesinde ilk çatlak M sektöründe 80 kN yük mertebesinde görülmüştür. 90 kN’da R7’de çatlak oluşmuştur. 90 kN’da çatlak ilerlemiştir. 100 kN’da

yüzeydeki epoksilerden ses gelmiştir. 120 kN'da R6 da çatlak oluşmuştur. 125 kN'da 90 kN'da olan R7 çatlağı ilerlemiş ve R4'te yeni çatlak oluşmuştur. 130 kN'da 80 kN'da oluşan M'deki çatlak ilerlemiştir. 135 kN'da üst plakalardan ayrılma sesleri gelmiştir. 140 kN'da R3 ve R4'te yeni çatlak oluşmuştur. 145 kN'da R6'daki çatlaklar ilerlemiş ve genişlemiştir. 150 kN'da L6'daki çatlak boşluğun altına kadar ilerlemiştir. 155 kN'da R4'teki çatlak ilerlemiştir. 160 kN'da R4'te yeni çatlak oluşmuştur. 170 kN'da R6'da çatlak ilerlemesi vardır, L3'te yeni çatlak oluşmuştur. 175 kN'da R4'teki çatlak ilerlemiş ve genişlemiştir. 180 kN'da boşluktaki plakalardan sesler gelmiştir. 185 kN'da R3-R4 arası kesme çatlağı oluşmuştur. 190 kN'da L3'te yeni çatlak oluşmuştur. 200 kN'da boşluğun kenarında R7 sektöründe çatlak oluşmuştur. 215 kN'da R5-L5 sektörlerinde FRP sargılardan atma sesleri gelmiştir. 260 kN'da R7-L7 çatlaklarında ufak açılmalar olmuştur. 265 kN'da R3-R2 arasında kesme çatlağı oluşmuştur. 275 kN'da açıklık ortasında plaka ve FRP sargılardan ayrılma sesleri gelmiştir. Basınç bölgesinde ezilme görülmemiştir. 295 kN'da mevcut çatlaklarda ilerleme L6 sektöründen görünüyor. 300 kN'da L2 sektöründe de mesnetten başlayan kesme çatlağı oluşmuştur. 320 kN'da çatlaklarda açılmalar olmuştur özellikle M, L7 ve R7' de. 325 kN'da sesler çoğalmıştır. 330 kN'da çekme bölgesindeki plakalarda gerilmeler mevcuttur. 365 kN'da R1'de başlayan A sektöründe kesme çatlakları görünmüştür. Sağ tarafta R1 sektöründe de mesnetten kesme çatlakları görünmüştür. 370 kN'da sol tarafta atmalar mevcuttur. L3, L6, L7 FRP'leri atmıştır, artık giriş yüzünü tutmamaktadır. Plakalar kopmak üzeredir, halen yük almaktadır. Çatlak genişlikleri çok fazladır, özellikle L7 de. Deplasman artışı hızla devam etmektedir. 250 kN'da çatlak genişlikleri 2 cm'ye kadar ulaşmıştır. 260 kN'da boşluk etrafında da dairesel formda ilerleyen çatlak gözlenmiştir. 270 kN'da iken halen dairesel platelerde bir hasar görünmemektedir ama sesler gelmektedir. 275 kN'da L7-L6 arasındaki deplasman en yüksektir, çatlak da bu bölgede gelişmiştir. Çatlakta ilerleme görünmüyor. Kesme çatlaklarında ilerlemeler durmuştur, donatılar kopmuştur. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü şekil 73'de gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Çatlakların numaralandırılmış hali şekil 74'de gösterilirken hasar dağılımı da şekil 75'de gösterilmiştir.



Şekil 73. B4-RET-PL2-WO numunesinin deney sonrası görünümü

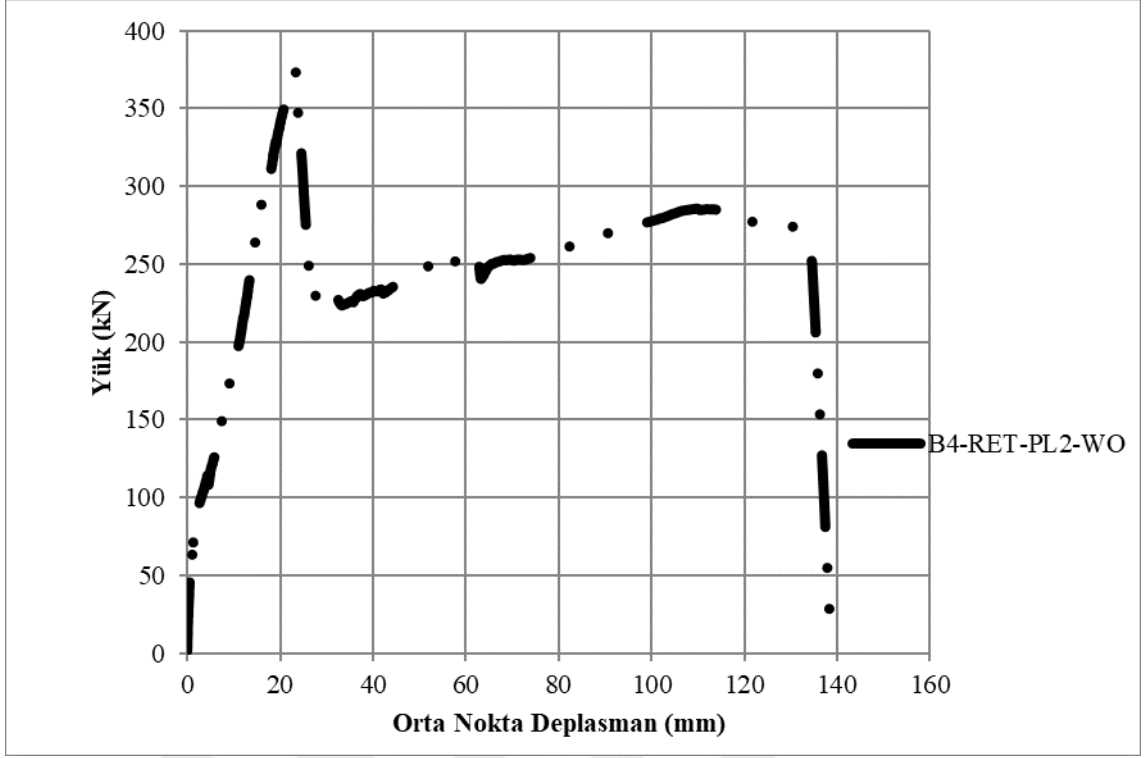


Şekil 74. B4-RET-PL2-WO numunesinin deney sonrası görünümü

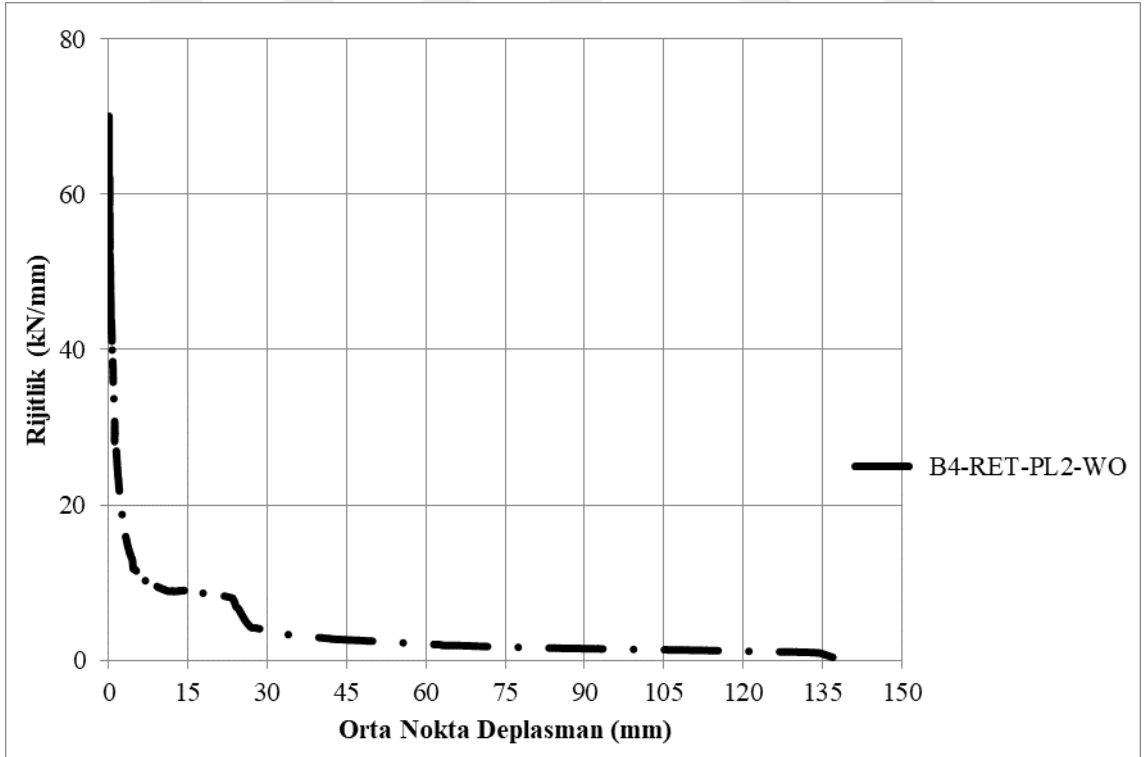


Şekil 75. B4-RET-PL2-WO numunesinin deney sonrası görünümü

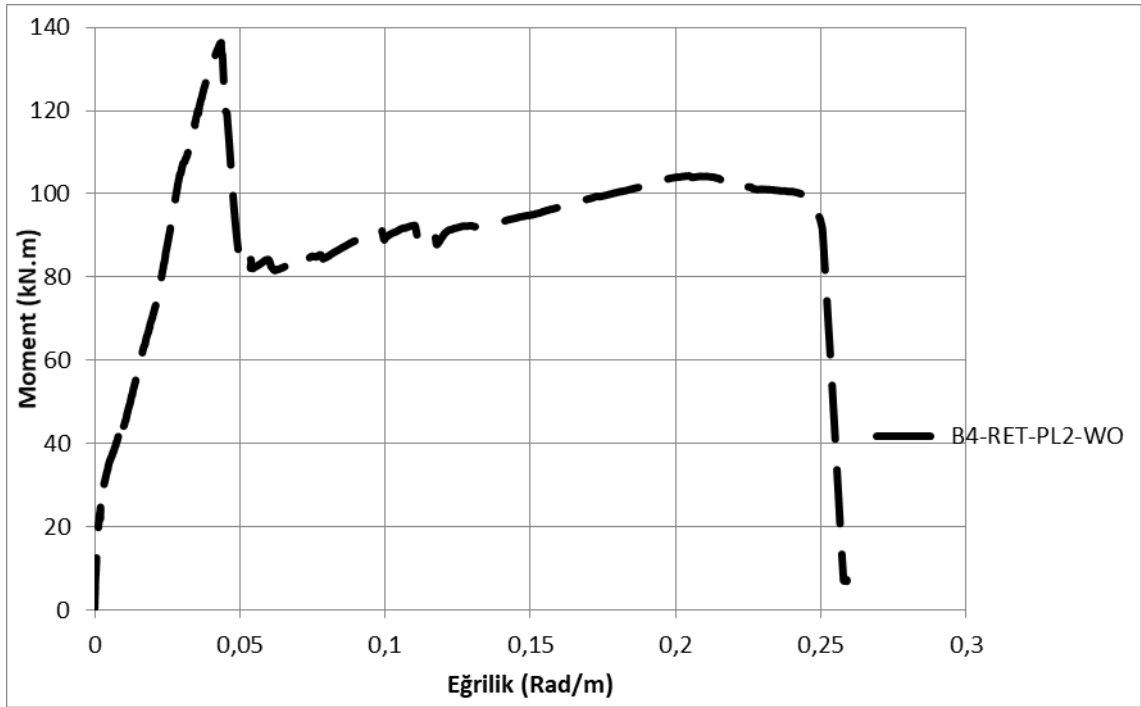
Deney esnasında yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden bilgisayara aktarılan veriler kullanılarak yük-orta nokta deplasman grafiği şekil 76’da, rijitlik değişimi grafiği şekil 77’de, moment eğrilik grafiği şekil 78’de ve iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği şekil 79’da verilmiştir.



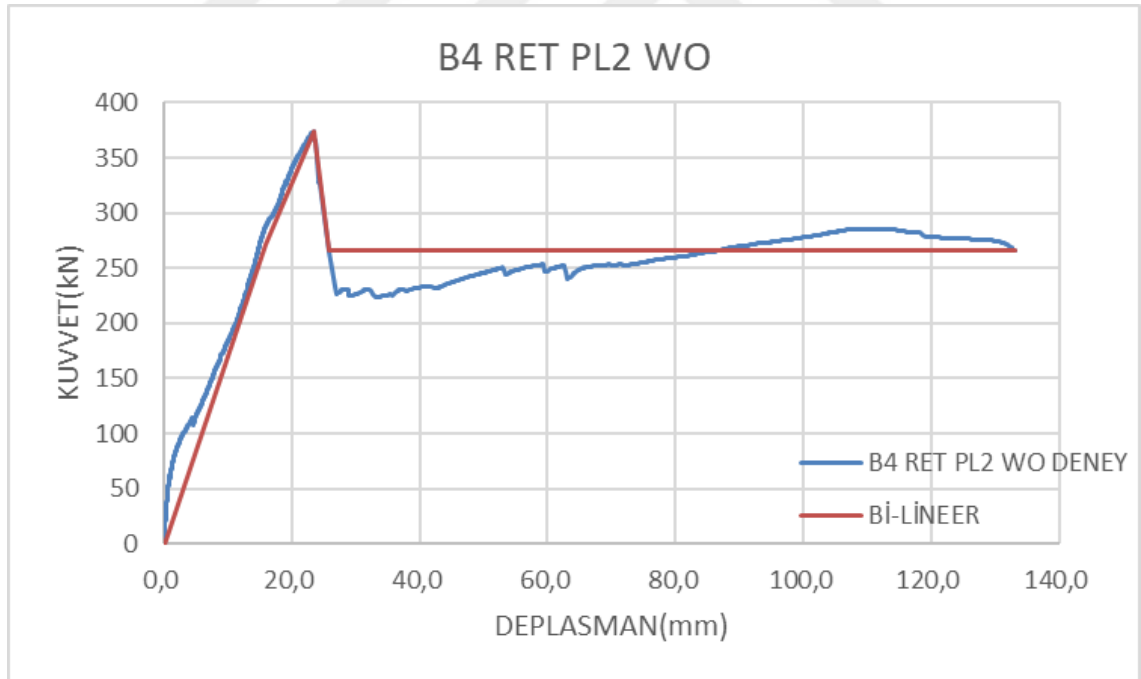
Şekil 76. B4-RET-PL2-WO kirişi yük orta deplasman grafiği



Şekil 77. B4-RET-PL2-WO kirişi rijitlik değişimi grafiği



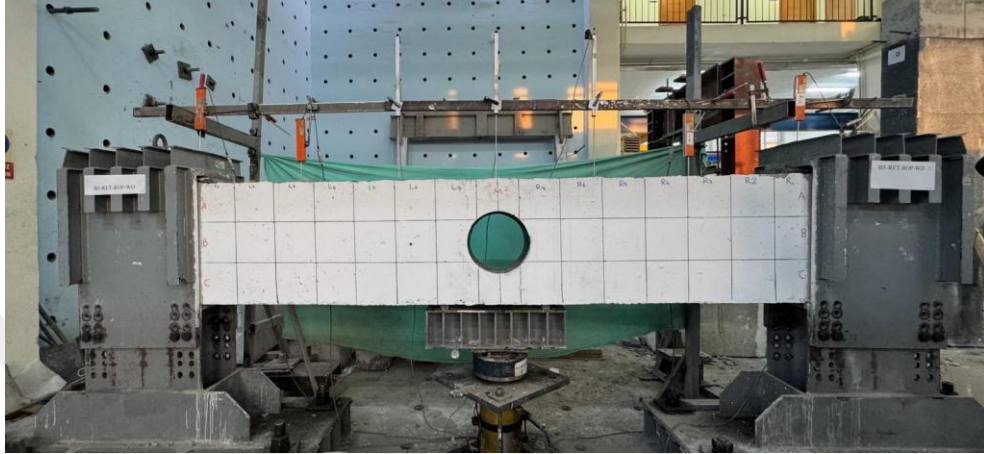
Şekil 78. B4-RET-PL2-WO kirişi moment-eğrilik grafiği



Şekil 79. B4-RET-PL2-WO kirişi 4 eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği

### 3.2.6. B5-RET-ROP-WO Deney Numunesi

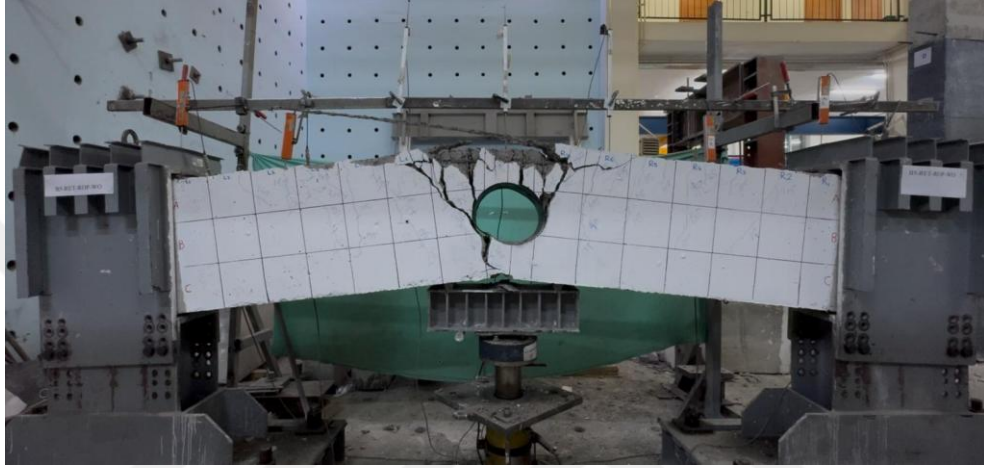
Kiriş deneylerinde 6. olarak deneyi gerçekleştirilen numune boşluklu, FRP halat ile güçlendirilen B5-RET-ROP-WO kiriş numunesidir. Bu numunede de donatı dizaynı tüm numunelerde olduğu gibi aynıdır. Kiriş numunesinin deneyden önceki görünümü şekil 80’ de gösterilmiştir.



Şekil 80. B5-RET-ROP-WO numunesinin deney öncesi görünümü

Deneyde ilk çatlak 70 kN değerinde oluşmuştur. 80 kN’ da iken boşluktaki liflerden ses gelmiştir. 85 kN’da L6-R6 arası çatlak oluşmuştur. 90 kN’da “M” bölgesinde ilk çatlak oluşmuştur. 105 kN’da çatlak ilerlemiştir. 190 kN’da R6-7-M sektörlerinde 0,3 mm çatlak genişliği olmuştur. 195 kN’da boşluktaki sargıdan ve üst liflerden ses gelmiştir. 200 kN’da mevcut çatlaklar ilerlemiştir. 210 kN’ da R3 sektöründe yeni çatlak gelişmiştir. 215 kN’da R2-R3 arası mesnet bölgesine yakın kesme çatlağı oluşmuştur. 225 kN’da çatlaklar genişlemiştir. 230 kN’da R6 sektöründe çatlak genişliği 0,4 mm olmuştur. 240 kN’da “M” bölgesinde çatlak genişliği 2 mm olmuştur. 245 kN’da R5-R6 çatlakları yükleme temas noktalarına doğru basınç bölgesine ilerlemiştir. M bölgesinde boşluk altında yeni çatlaklar oluşmuştur. R7 deki çatlak boşluğa kadar ulaşmıştır. 250 kN’da R7 deki çatlak genişliği 1,5 mm dir. 255 kN’da L7 deki çatlak 0,4 mm dir. 258 kN’da M deki çatlak 2,5 mm dir. 260 kN’da çatlaklar genişlemiştir henüz boşlukta bir hasar oluşmamıştır. 270 kN 7 sektörü M sektörü üzerinde çatlak genişlikleri yüzeyde olduğu gibi kiriş üstünde de devam etmiştir. 274 kN’da boşlukta lif ayrılmıştır. 275 kN’da L7-M arası kesişim noktasında lif ayrılmıştır. 280 kN’da tam orta noktada lif kopması olmuştur. 265 kN’da R6-R5 arası çatlak genişlikleri artmıştır. 253 kN’da L7-M sektörleri birleşiminde boşluk içerisindeki liflerde de kopma olmuştur. R6’dan başlayan çatlak boşluk kenarından basınç bölgesine kadar ilerlemiştir. Kirişin yükleme bölgesindeki

basınç alanında ezilmeler mevcuttur. Yukarıda her 2 lif de kopmuş durumda ve havada durmaktadır. Donatı yük almaktadır. Çatlakta gelişmeler devam etmektedir, yeni çatlak oluşmamıştır. Mevcut çatlaklarda yığılmalar olmuştur. Çekme bölgesindeki betonda da pas payında dökülmeler vardır. Donatı kopmuştur. Deney numunesinin maksimum yüke ulaştıktan sonra yükün boşaltılması ile oluşan görünümü şekil 81’de gösterilmiştir. Çatlakları belirgin bir şekilde görülecek şekilde çizilerek her biri kumpas yardımıyla ölçülüp genişlikleri not edilmiştir. Hasar dağılımı da şekil 82’de gösterilmiştir.



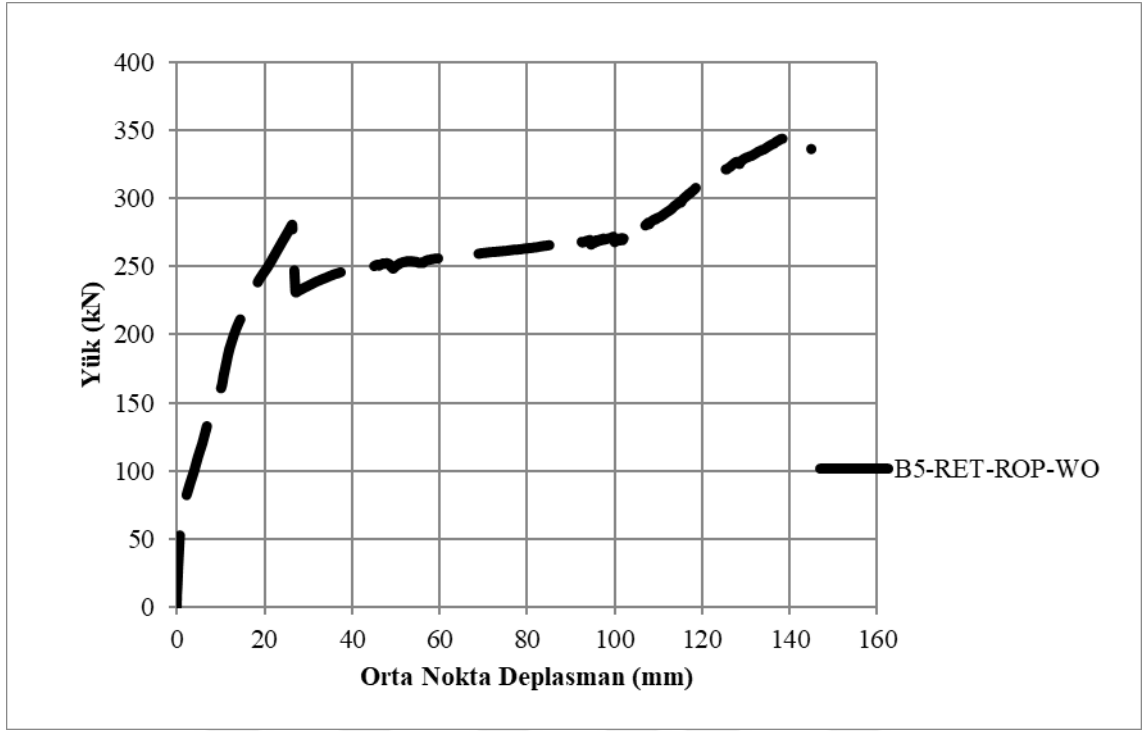
Şekil 81. B5-RET-ROP-WO numunesinin deney sonrası görünümü



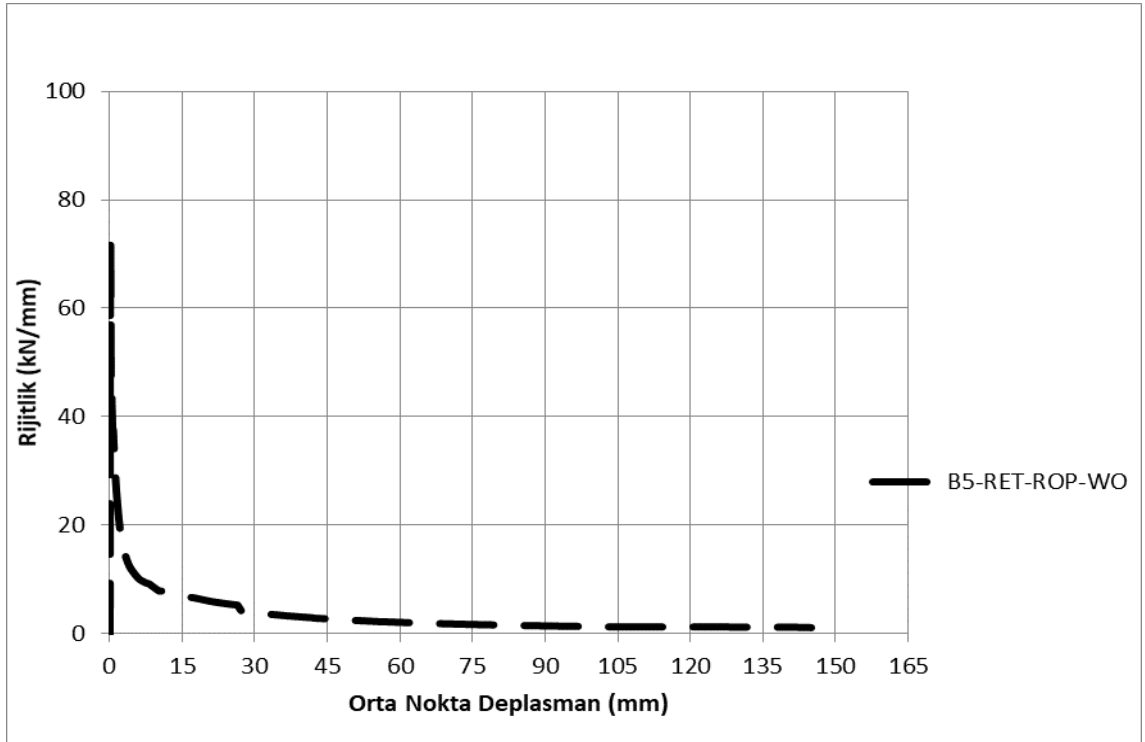
Şekil 82. B5-RET-ROP-WO numunesinin hasar görünümü

Deney esnasında yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden bilgisayara aktarılan veriler kullanılarak yük-orta nokta deplasman grafiği şekil 83’de, rijitlik değişimi grafiği

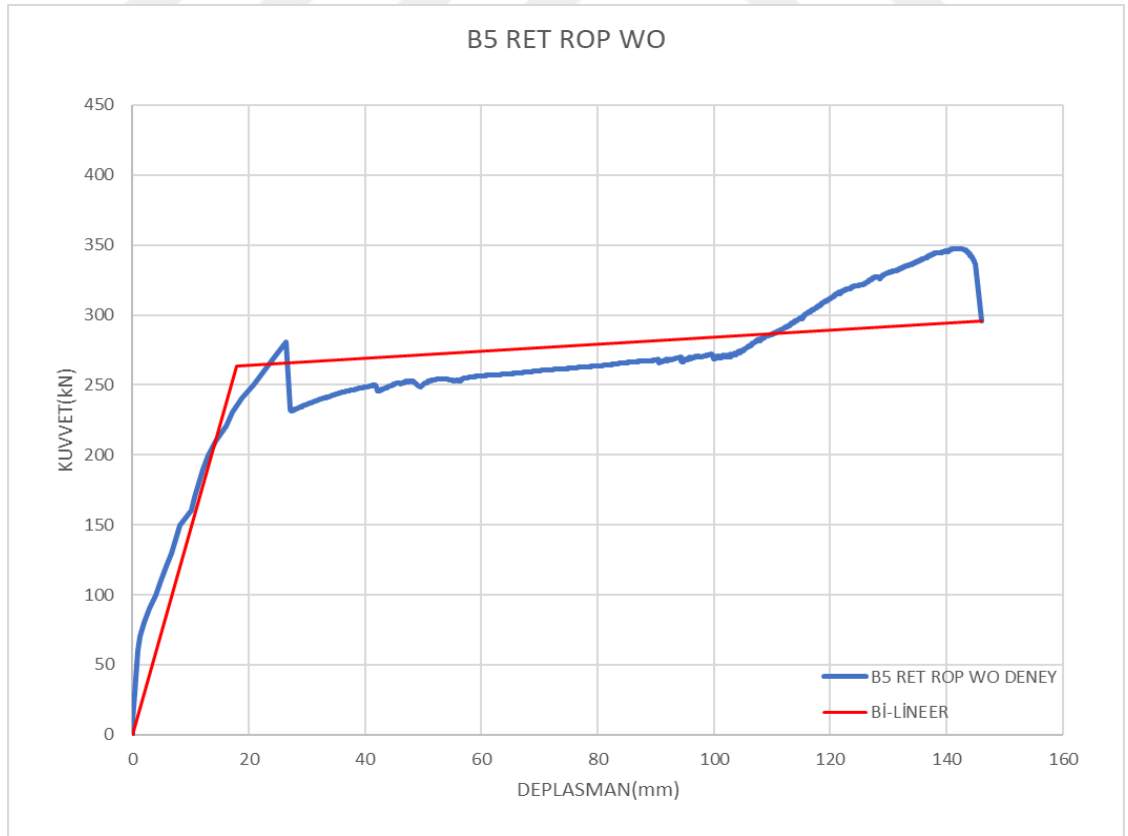
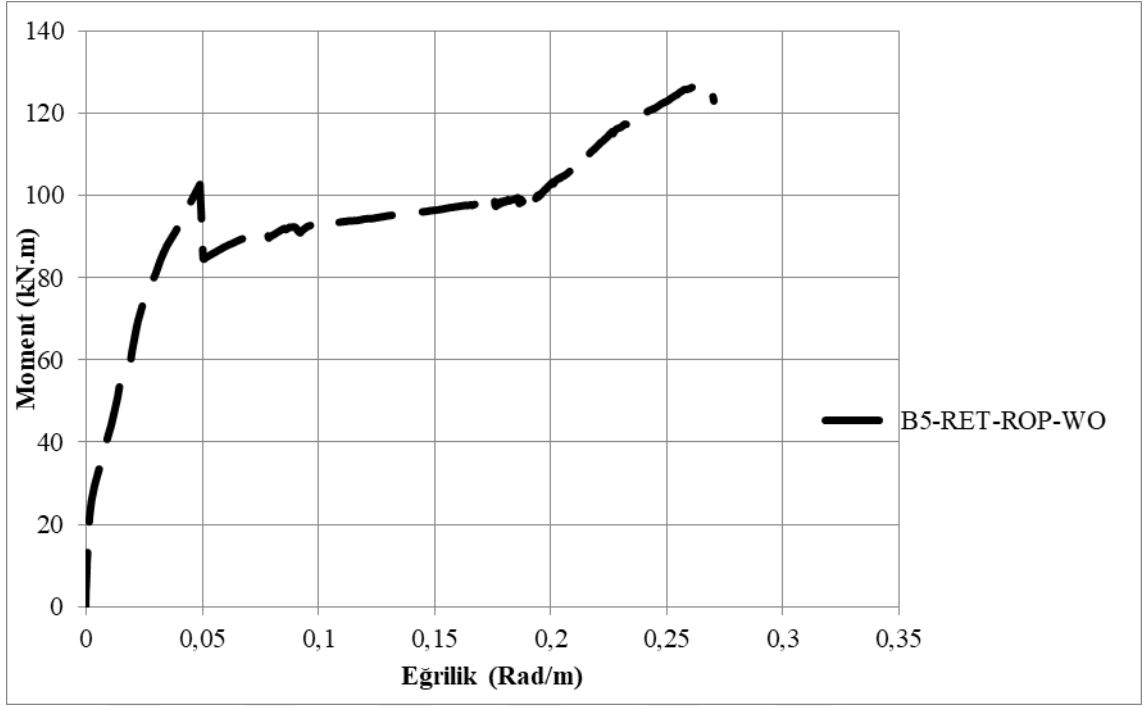
şekil 84’de, moment eğrilik grafiği şekil 85’de ve iki eğrili idealleştirilmiş zarf eğrisi grafiği şekil 89’de verilmiştir



Şekil 83. B5-RET-ROP-WO kirişi yük orta deplasman grafiği



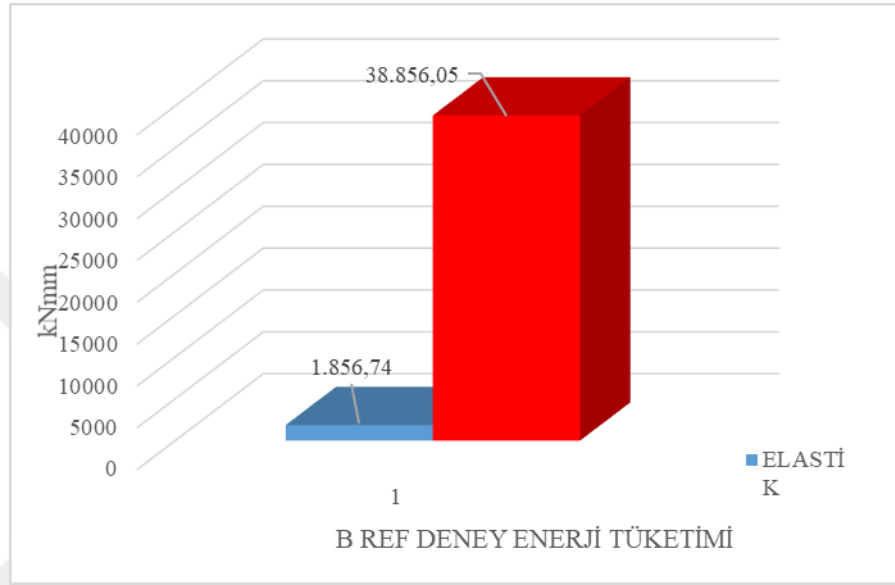
Şekil 84. B5-RET-ROP-WO kirişi rijitlik değişim grafiği



### 3.3. Enerji Tüketimi

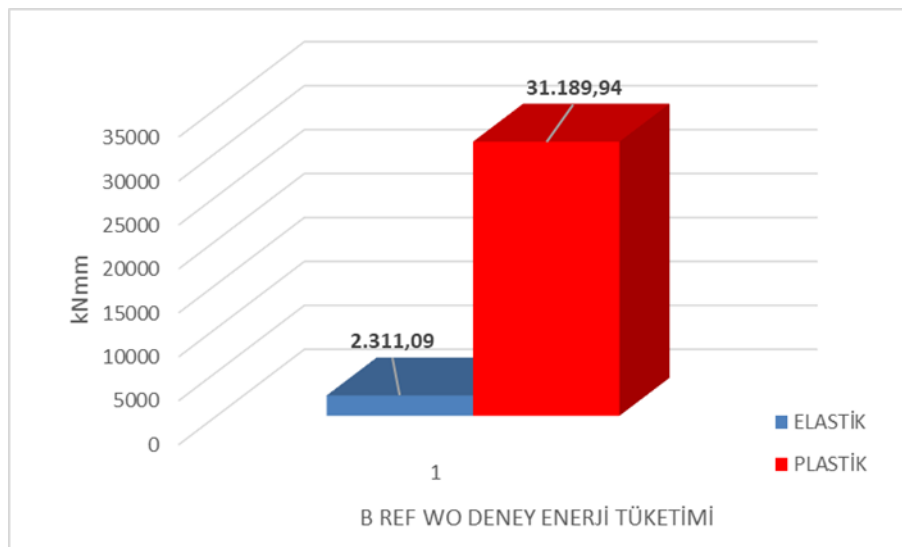
Elastik bölge olarak akmanın başlangıcı seçilir ve bu noktaya kadarki enerji tüketimi Elastik Enerji Tüketimi olarak kabul edilir. Bu noktadan deney sonu nihai yük-deplasman seviyesi arasında kalan enerji tüketimine de Plastik Enerji bölgesi kabulü yapılır.

#### 3.3.1. B-REF Deney Numunesi Enerji Tüketimi



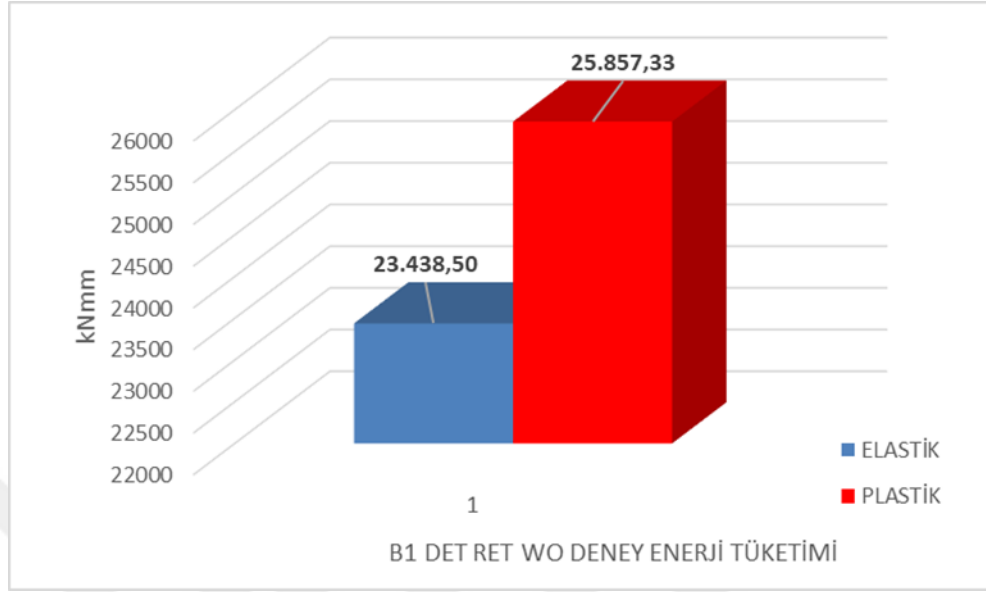
Şekil 87. B-REF deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği

#### 3.3.2. B-REF-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi



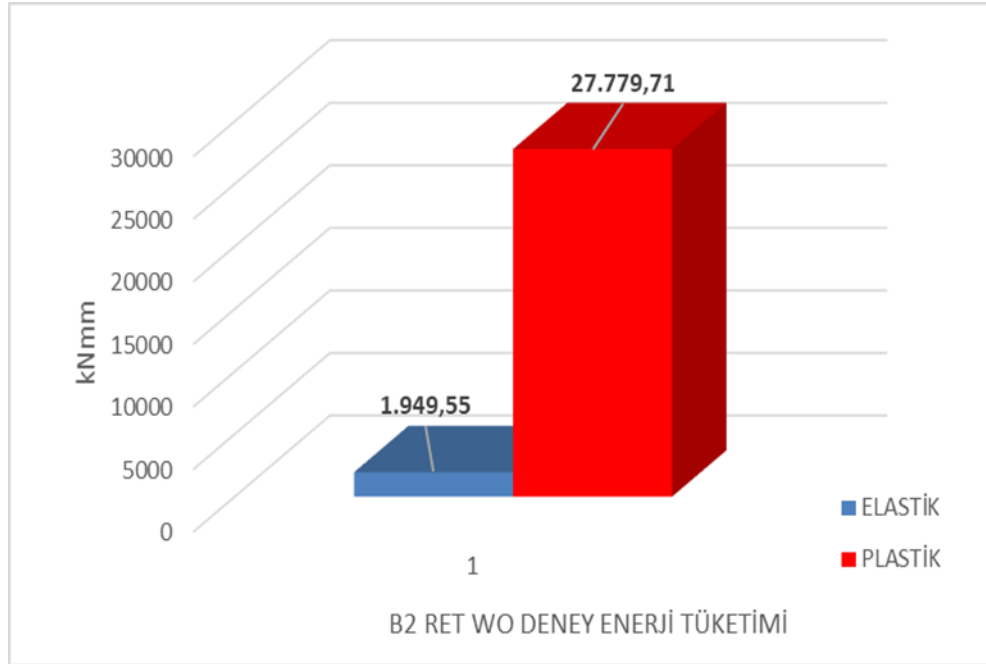
Şekil 88. B-REF-Wo deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği

### 3.3.3. B1-DEF-RET-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi



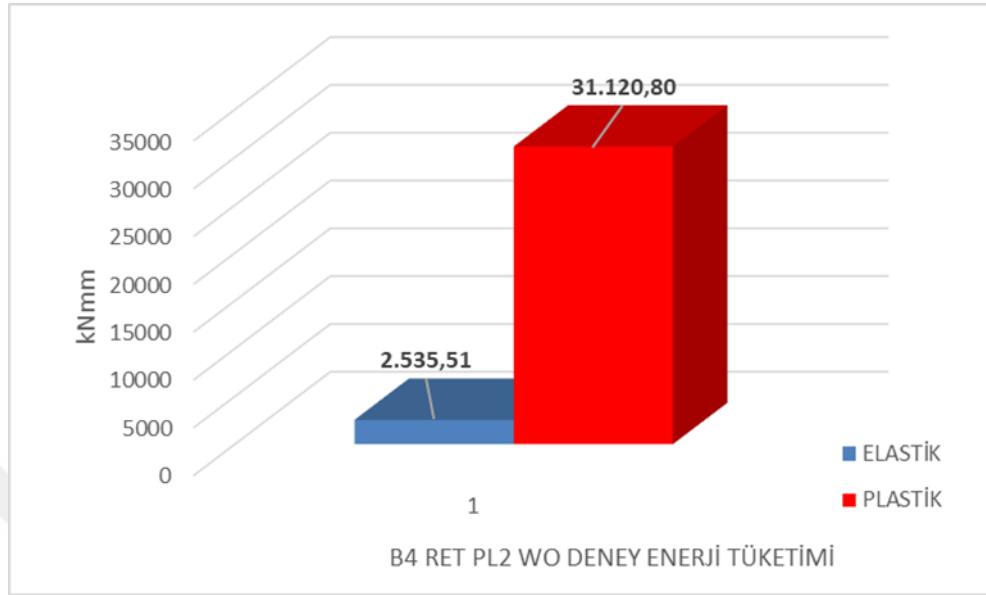
Şekil 89. B1-DEF-RET-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği

### 3.3.4. B2-RET-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi



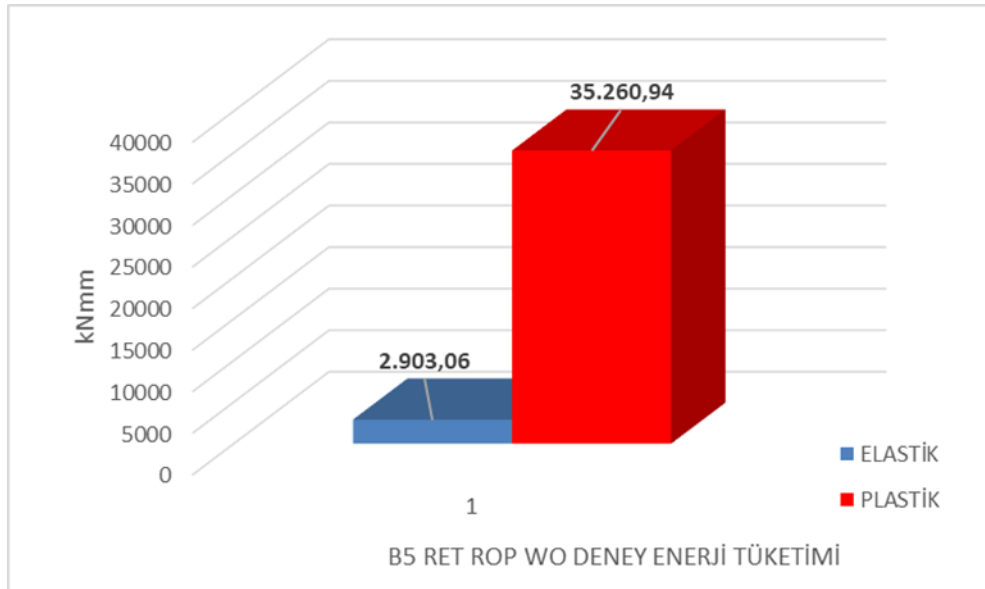
Şekil 90. B2-RET-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği

### 3.3.5. B4-RET-PL2-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi



Şekil 91. B4-RET-PL2-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği

### 3.3.6. B5-RET-ROP-WO Deney Numunesi Enerji Tüketimi



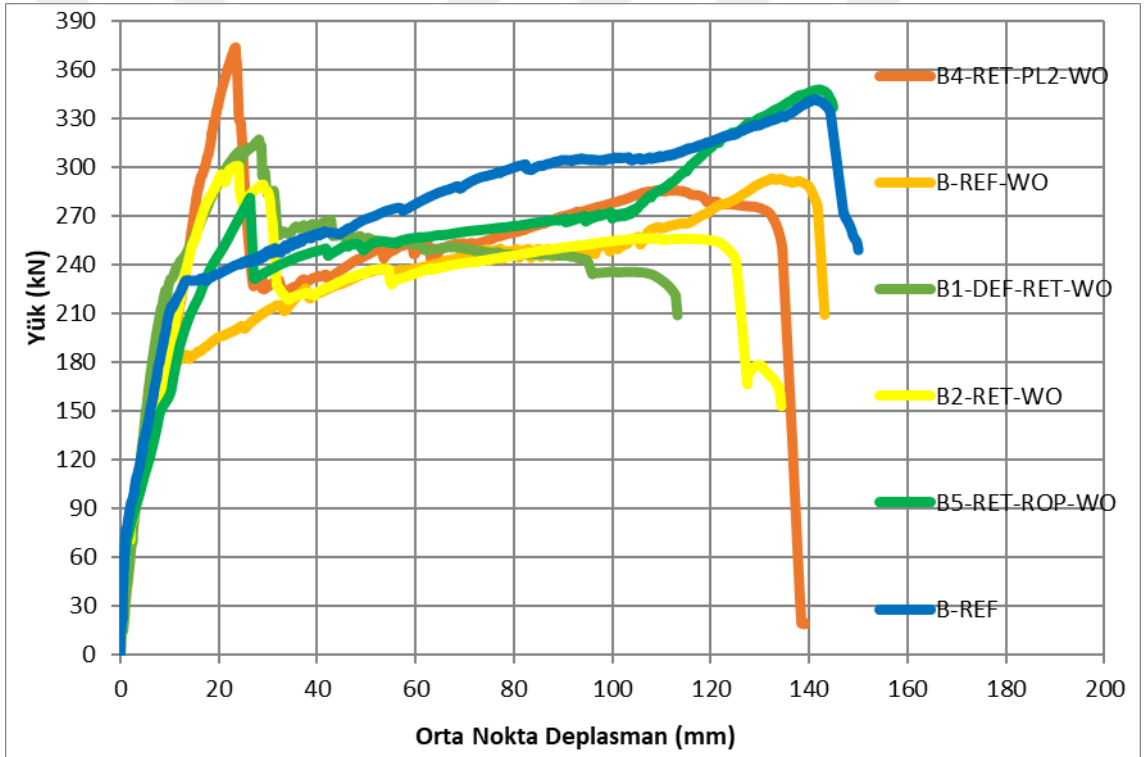
Şekil 92. B5-RET-ROP-WO deney numunesi elastik-plastik enerji tüketimi grafiği

## 4. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER

### 4.1. Sonuçlar

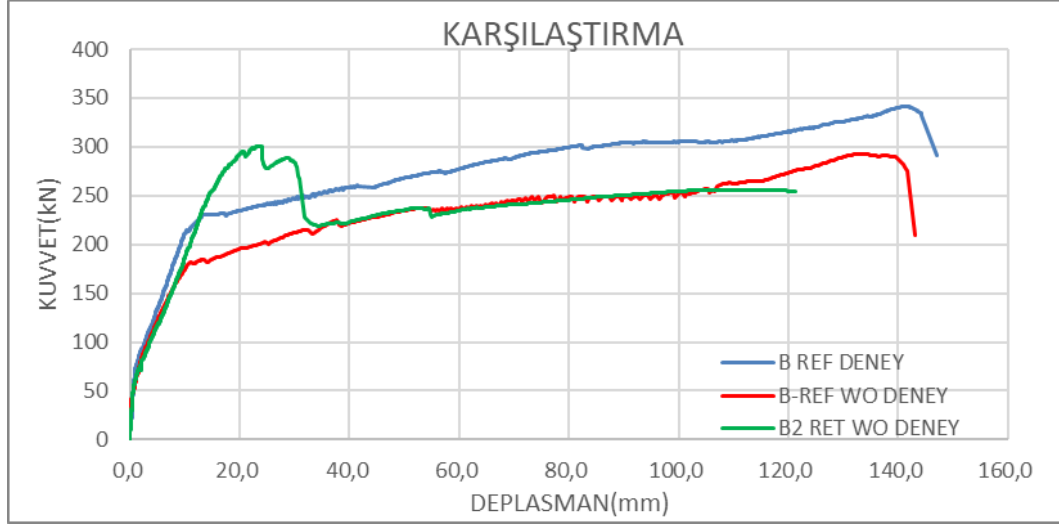
#### 4.1.1. Yük- Orta nokta Deplasman Karşılaştırılması

Aşağıdaki grafikte de görüleceği üzere güçlendirme yapılan tüm numuneler güçlendirme yapılan elemanın kapasitesi aşıldıktan sonra mevcut donatı ile yük almaya devam etmiştir. Bu durumdaki şekil değiştirme referans numuneye göre daha düşük taşıma gücünde kalmasına rağmen şekil değiştirme kapasitesi önemlenecek kadar yüksektir.



Şekil 93. Yük Orta nokta deplasman grafiği

Boşluklu referans kirişin şekil değiştirme miktarı boşluksuz referans kirişe göre sınırlı miktarda düşüş göstermiştir. Bu durum boşluğun konumunun olabilecek en ideal noktada ve maksimum ölçüde seçilmiş olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 94. B REF-B REF WO-B2 RET WO deneylerinin karşılaştırma grafiği

Tablo 12. B REF - B REF WO - B2 RET WO süneklik ve enerji tüketim kıyaslaması

| Numune İsmi                   | B REF    | B REF WO | B2 RET WO |
|-------------------------------|----------|----------|-----------|
| Süneklik                      | 9,18     | 7,89     | 7,96      |
| Toplam Enerji Tüketimi(kNmm)  | 40712,80 | 33501,03 | 28732,40  |
| Elastik Enerji Tüketimi(kNmm) | 1856,74  | 2311,09  | 1949,55   |
| Plastik Enerji Tüketimi(kNmm) | 38856,05 | 31189,94 | 27779,71  |
| Akma Noktası(mm)              | 12,44    | 15,76    | 16,80     |
| Rijitlik                      | 23,10    | 17,89    | 19,25     |
| Maksimum Dayanım(kN)          | 341,49   | 293,00   | 300,59    |

Tablo 12’de görüleceği üzere içi dolu boşluksuz kiriş hem enerji tüketimi ile hemde süneklik olarak en büyük numunedir. Güçlendirilmiş gövdesi boşluklu numune ise güçlendirilmemiş numuneye oranla süneklik oranı daha yüksek çıkmıştır. Ancak görüleceği üzere gövdesi boşluklu bu iki numuneden güçlendirilmiş olan özellikle karbon elyaf kumaşın etkisi ile 40mm ye kadar büyük bir dayanım kazanmış olup deformasyonla kumaşın kirişten ayrılması ile birlikte kiriş ortası boşluklu B Ref Wo isimli kiriş ile aynı davranışı göstermektedir. Tek fark olarak karbon elyaf güçlendirmeye bağlı olarak donatıları daha geç akmış olması nedeniyle B Ref Wo numunesine oranla daha erken güç tüketmesi yaşamış ve dayanım azalması görüldüğü düşünülmektedir. Güçlendirilmiş kirişin eğilme donatılarının daha erken kırılması ile kiriş eleman yük düşmesine geçmiştir. Ancak B Ref Wo numunesi ise yaklaşık 100mm mertebesinde eğilme donatılarının pekleşmeye başlaması ile bir miktar daha rijitliğini artırıp kuvvet-deplasman

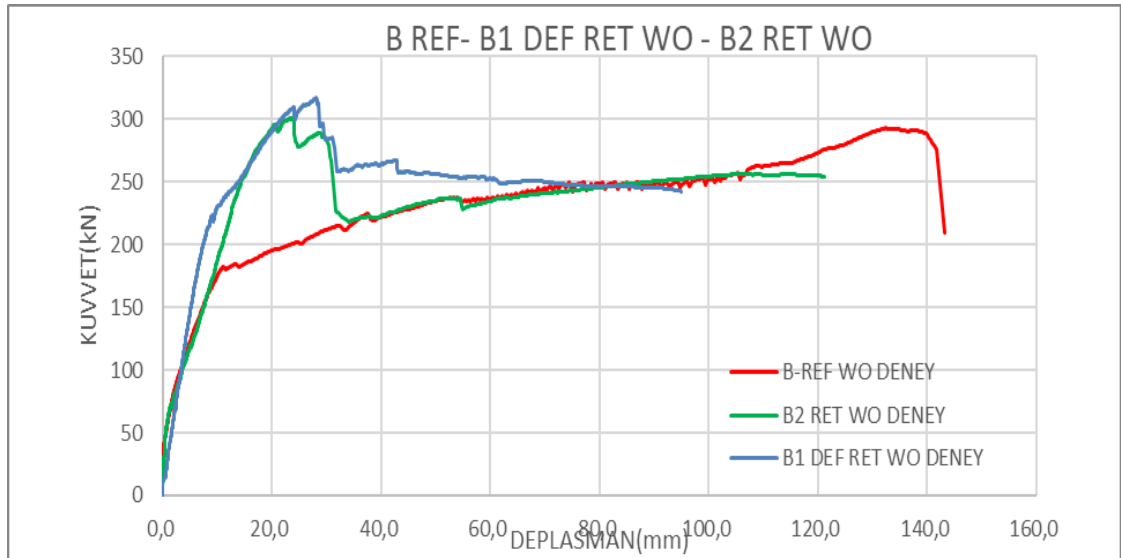
grafisinde pozitif yönde yükselerek eğilme donatısı kopana kadar kuvvet almıştır (Şekil 94).

Tablo 13. B REF WO - B1 DEF RET WO - B2 RET WO süneklik ve enerji tüketim kıyaslaması

| Numune İsmi                   | B REF WO | B1 DEF RET WO | B2 RET WO |
|-------------------------------|----------|---------------|-----------|
| Süneklik                      | 7,89     | 6,37          | 7,96      |
| Toplam Enerji Tüketimi(kNmm)  | 33501,03 | 23438,50      | 28732,40  |
| Elastik Enerji Tüketimi(kNmm) | 2311,09  | 1329,33       | 1949,55   |
| Plastik Enerji Tüketimi(kNmm) | 31189,94 | 25857,33      | 27779,71  |
| Akma Noktası(mm)              | 15,76    | 9,89          | 16,80     |
| Rijitlik                      | 17,89    | 28,50         | 19,25     |
| Maksimum Dayanım(kN)          | 293,00   | 316,92        | 300,59    |

Tablo 13’de görüleceği üzere B1 DEF RET WO numunesinin hem süneklik mertebesi hem de enerji tüketim seviyesi olarak diğer numunelerden daha düşük çıkmaktadır. Bunun en büyük nedeni söz konusu numunenin labortatuvara yerleştirilme aşamasında gövde boşluğunun olduğu bölgede kirişin tüm yüksekliği boyunca çatlak oluşturacak biçimde hasar almasıdır. Bununla birlikte bu kirişin karbon elyaf ile güçlendirilmesi B2-RET-WO numunesinin güçlendirilme uygulaması ile aynı metod seçilerek uygulama yapılmıştır.

Ancak B1 DEF RET WO numunesinde ilaveten kirişin gövdesindeki sonradan açılmış olan 30mm çaplı boşlukta karbon elyaf kumaş ile güçlendirilmesidir. Bu sebeptendir ki bu kiriş B REF WO numunesine oranla daha büyük yük kapasitesine ulaşmaktadır.



Şekil 95. B REF WO - B1 DEF RET WO - B2 RET WO deneylerinin karşılaştırma grafiği

Tablo 14. B2 RET WO – B4 RET PL2 WO – B5 RET ROP WO süneklik ve enerji tüketim kıyaslaması

| Numune İsmi                   | B2 RET WO | B4 RET PL 2 WO | B5 RET ROP WO |
|-------------------------------|-----------|----------------|---------------|
| Süneklik                      | 7,96      | 8,40           | 8,16          |
| Toplam Enerji Tüketimi(kNmm)  | 28732,40  | 33656,31       | 38164,00      |
| Elastik Enerji Tüketimi(kNmm) | 1949,55   | 2535,51        | 2903,06       |
| Plastik Enerji Tüketimi(kNmm) | 27779,71  | 31120,80       | 35260,94      |
| Akma Noktası(mm)              | 16,80     | 15,84          | 17,89         |
| Rijitlik                      | 19,25     | 17,15          | 14,72         |
| Maksimum Dayanım(kN)          | 300,59    | 373,58         | 347,55        |

B2 RET WO numunesinin karbon elyafı ile güçlendirilmiş diğer iki numuneye oranla daha az sünek ve daha az enerji tüketimi gerçekleştirdiği Tablo 14’de görülmektedir. Diğer iki numune olan B4 ve B5 numunelerinin kendi aralarındaki süneklik ve enerji tüketim farkları ise karbon elyaf ile güçlendirme metodlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Hem süneklik mertebesi hem de enerji tüketim seviyesi olarak diğer numunelerden daha düşük çıkmaktadır.

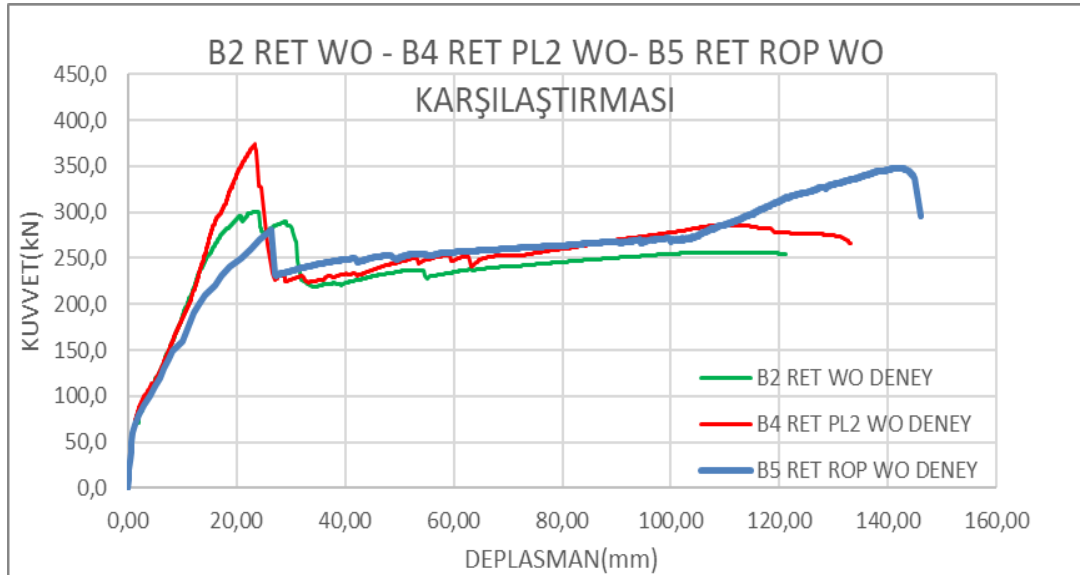
Bunun en büyük nedeni söz konusu numunenin labortatuvara yerleştirilme aşamasında gövde boşluğunun olduğu bölgede kirişin tüm yüksekliği boyunca çatlak oluşturacak biçimde hasar almasıdır. Bununla birlikte bu kirişin karbon elyaf ile

güçlendirilmesi B2-RET-WO numunesinin güçlendirilme uygulaması ile aynı metod seçilerek uygulama yapılmıştır.

Bununla birlikte B5 RET WO numunesinde eğilme yönünde kirişin içine 10mm derinlikte açılan kanalın içerine yerleştirilmiş karbon elyaf iplerin kanala yerleştirme yapmadan dışarıda burularak hazırlanıp kanal içinde epoksi ile montajının yapılması, kiriş mesnet bölgelerine doğru bu kanal içindeli karbon halatın kirişin etriyesine paralel olacak biçimde 150mm ankre edilmesi ile bir nevi kirişin eğilme yönündeki çelik donatılarına ilave bir eğilme donatısı modellenmiş oldu. Sonuç olarakta bu ilave eğilme donatısı katkısı enerji tüketiminde diğer yöntemlere oranla daha fazla katkı sağlamıştır numuneye.

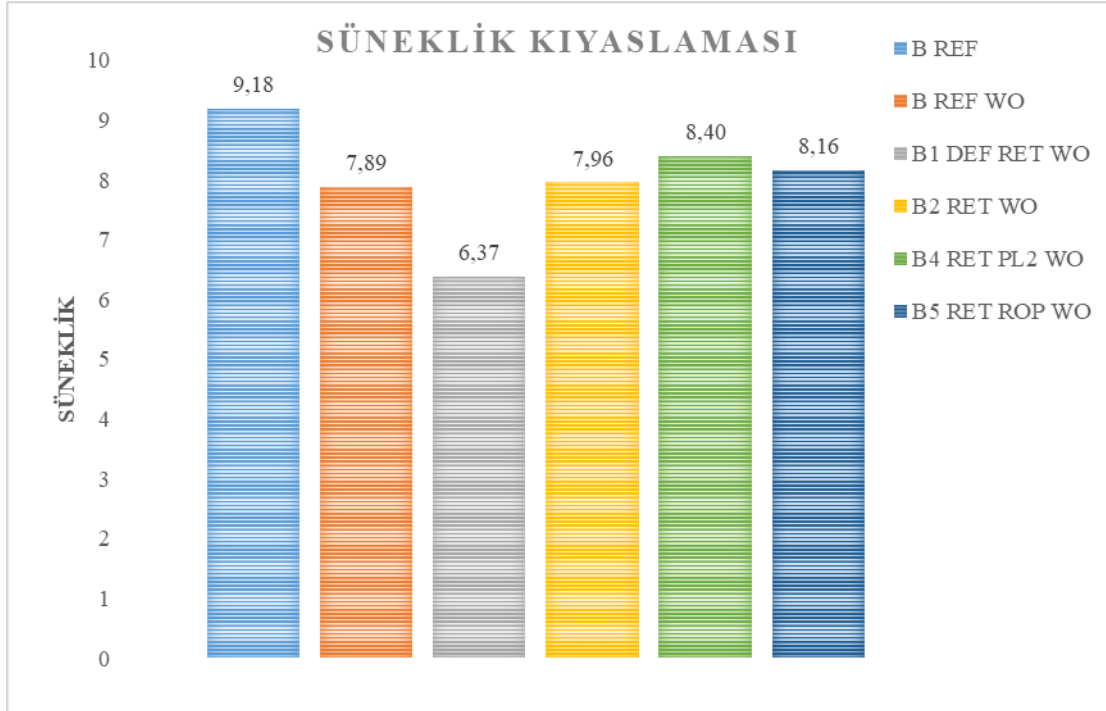
Benzer şekilde B4 RET PL2 WO numunesinde uygulanan karbon plakaların kirişin eğilme yönündeki donatılara katkı sağlaması nedeniyle diğer B2 RET WO numesini güçlendirme metoduna oranla daha sünek ve daha fazla enerji tüketen bir kiriş haline getirmiştir.

Ancak B4 kirişinde ve B5 kirişinde deneylerin belli bir mertebeye ulaştığında karbon elyaf plakaların ve halatın kopması ile kirişin eğilme yüzeyinden ayrılması durumu görülmüş olup, bu ayrılmaların kuvvet-deplasman grafiklerinde ani yük düşmesi olarak yansması görülmektedir.

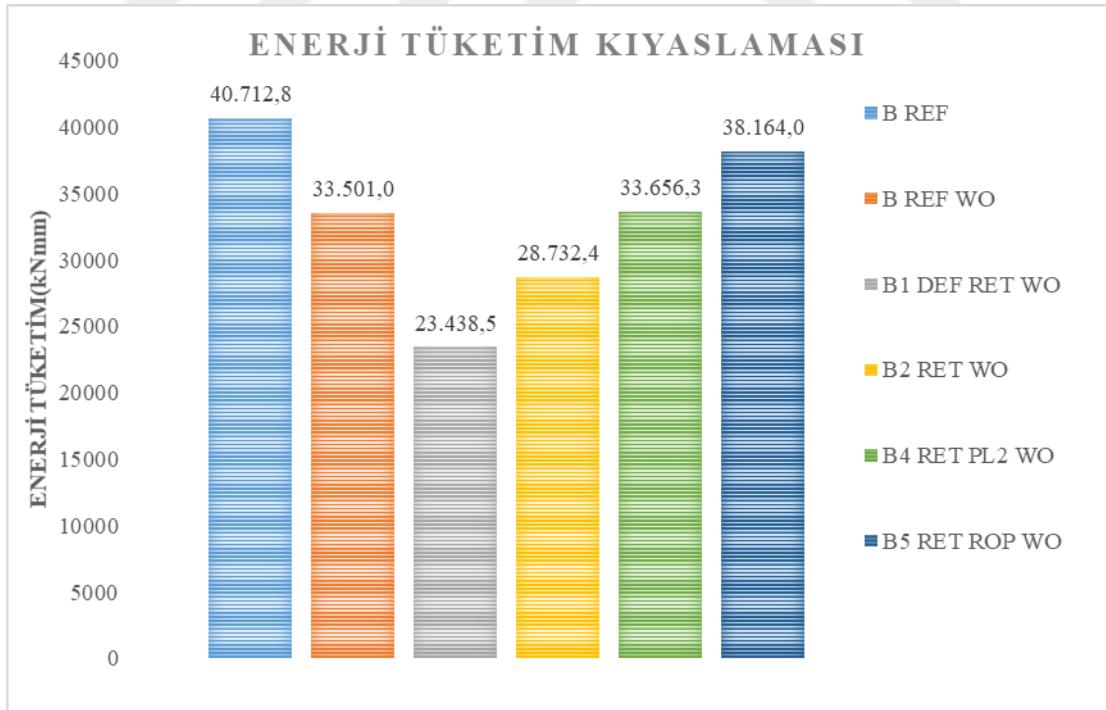


Şekil 96. B2 RET WO – B4 RET PL2 WO – B5 RET ROP WO deneylerinin karşılaştırma grafiği

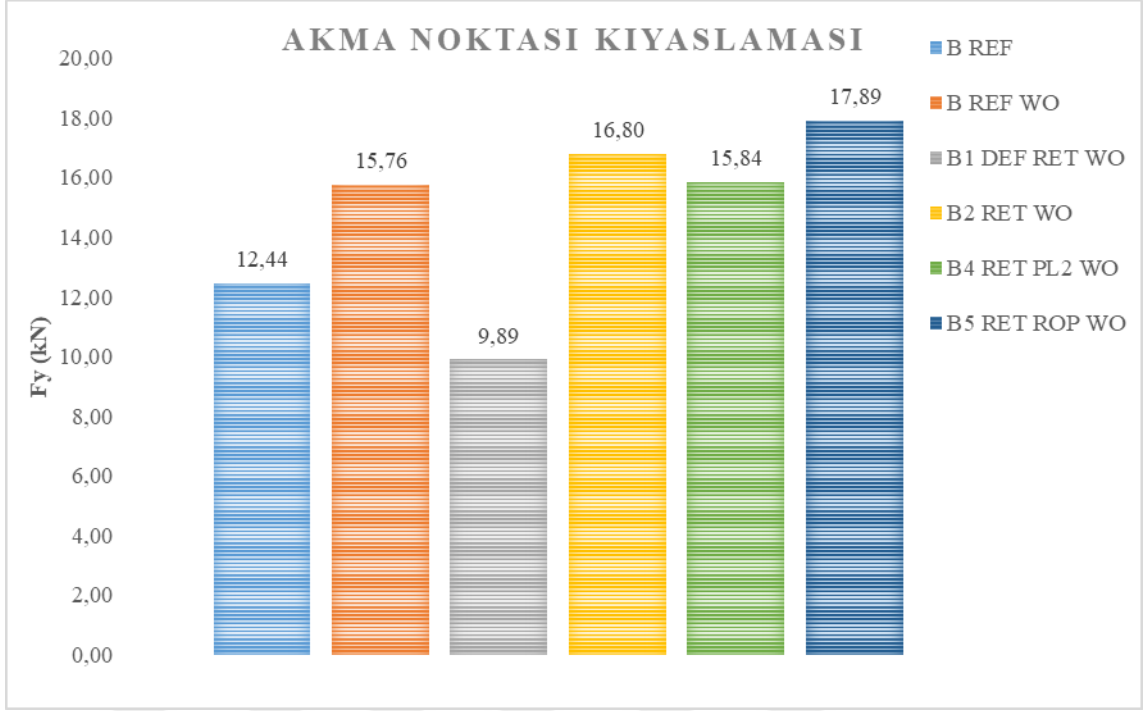
#### 4.1.2. Süneklik-Enerji Tüketim-Akma Kuvveti Karşılaştırması



Şekil 97. Süneklik karşılaştırma grafiği



Şekil 98. Enerji tüketim karşılaştırma grafiği



Şekil 99. Tüm kirişler akma noktaları karşılaştırması

#### 4.2. Öneriler

Kirişlerde planlanarak veya daha sonra ihtiyaç duyulması durumunda boşluk bırakılmak istendiğinde en ideal bölgenin kiriş orta bölgesi olduğu, bunun dışındaki bölgelerde boşluk büyüklüğü ve şeklinin kiriş davranışı üzerindeki olumsuzlukları arttırabileceği değerlendirilmiştir. Kısa kirişlerde boşluklardan kaçınılmalı, sıklaştırma bölgesi ve çekme bölgesinden uzaklaşarak rezervasyon ve boşluk bırakılması önemlidir. Güçlendirilecek kirişlerde kiriş davranışına uygun güçlendirme metodunun seçilmesi kapasite ve davranış açısından istenilen sonucun elde edilmesi için zaruridir. Bununla beraber sonradan kiriş ortasında açılacak boşluklarda kirişin orta bölgesindeki kesme donatılarının kesilmesi ile kirişin orta bölgesinde kesme dayanımlarının düşeceği ön görülmektedir. Bu kesilen bölgedeki dairenin içlerindeki plakalar ve/veya karbon kumaşlar ile sargılanmasının çatlak gelişimine faydasını bu deneysel çalışmada çok net görülmüştür. Bu sebepten güçlendirmenin deliğin içerisinde uygulanması çok önemle tavsiye olunur. Aynı zamanda kiriş yüzeyine yapılacak karbon elyaf kumaş ve/veya plakaların muhakkak ankrajlarla kirişe montaj edilmesi gerekmektedir. Böylelikle güçlendirme ürünleri kiriş yüzeyinden deplasman sırasında ayrılmayıp, tam aderans sağlayarak kirişin kesme kapasitesi ile birlikte eğilme kapasitesinde artmasına katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- [1] Mohammady, Y., Yaman, S., Gündoğay, A., Yüksel, C., Negash, N., A., & Kabaş, H., T., 2022. CFRP lif takviyesi ile onarılan boşluklu betonarme kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi. **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 11(3):736–743.
- [2] Abuwarda A. M. I., 2019. Betonarme Derin Kirişlerin Güçlendirilmesine İlişkin Bazı Önerilerin Deneysel Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 237 s.
- [3] Alhamdan Y., 2019. Eğilme Etkisi Altındaki Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesine Yönelik Bazı Önerilerin Deneysel Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 213 s.
- [4] Demiral T., 2018. Betonarme Kiriş Boşluklarının Davranışa Etkisinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 127.
- [5] Aslanbay H. H., 2021. Ankastre Mesnetli Betonarme Kirişlerde Açıklık Ortası Dairesel Boşlukların Davranışa Olan Etkisinin Deneysel ve Nümerik Analizi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 185 s.
- [6] Tokgöz, H., & Dünder, B., 2014. Kesme yönünden yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilerek kesme kapasitelerinin artırılması. **İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi**, 3(2):87-97.
- [7] Kaya, T., Aras, M., & Çalışkan, Ö., 2017. Beton basınç ve eğilme dayanımlarına CFRP'nin etkisi. **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 20(3): 1-9.
- [8] Sayın, B., Yıldızlar. B., & Özyazgan, C., 2010. Fiber takviyeli polimer (FRP) uygulanan betonarme kirişlerde moment-eğrilik ilişkisi. **Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 6(2): 42-56.
- [9] Öncü, M., E., Karaşin, A., & Yılmaz, S., 2010. CFRP ile güçlendirilmiş kesitlerin eksenel yük altındaki davranışı. **Engineering Sciences**, 5(3): 515-525.

- [10] Karaahmetli S., 2023. GFRP Donatılı Beton Derin Kirişlerin Kesme Davranışının İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 296 s.
- [11] Can, Ö., & Tokgöz, H., 2008. Çeşitli yöntemlerle güçlendirilen hasar görmüş betonarme kirişlerde performansların karşılaştırılması. **e-Journal of New World Sciences Academy**, 3(4): 656-665.
- [12] Akkaya H.C., 2023. Betonarme Derin Kirişlerin Farklı Lifli Polimerlerle Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 133 s.
- [13] Qaderi A., 2020. Eğilme Etkisindeki Büyük Dairesel Boşluklu Kirişlerin Davranışının Deneysel İncelemesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 65 s.
- [14] Atay H., 2010. Depremde Hasar Görmüş Yapıların Güçlendirme Yöntemleri Ve Güçlendirmede Kullanılan Malzemeler, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 115 s.
- [15] Aykaç, S., & Yılmaz, M.C., 2011. Düzenli üçgen veya dairesele boşluklara sahip betonarme kirişlerin davranış ve dayanımı. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 26(3): 711- 718.
- [16] Smarzewski, P., 2019. Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings. **Materials**, 12(1): 101.
- [17] Jasim, W. A., Allawi, A. A., & Oukaili, N. K., 2019. Effect of size and location of square web openings on the entire behavior of reinforced concrete deep beams. **Civil Engineering Journal**, 5(1): 209-226.
- [18] Hassan, H. M., Arab, M. & Ismail el-kassas, A., (2019). Behavior of high strength self compacted openings. **Heliyon**, 5(4): e01524.
- [19] Senthil, K., Gupta, A., & Singh, S. P., 2018. Computation of stress-deformation of deep beam with openings using finite element method. **Advances in concrete Construction**, 6(3): 245-257.
- [20] Osman, B. H., Wu, E., Ji, B., & Abdulhameed, S. S., 2017. Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) Beams with openings strengthened using FRP sheets

- under sustained load. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, **11**(1): 171-183.
- [21] Smarzewski, P., 2018. Hybrid fibres as shear reinforcement in high-performance concrete beams with and without openings. **Applied Sciences**, **8**(11): 2070-2084.
- [22] Dündar, S.B., 2008. Düzenli Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 124 s.
- [23] Altın, S., Anıl, Ö., & Gökten, Y., 2004. Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde bir kelepçe uygulaması. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, **19**(4): 415-422.
- [24] Arathy A.R. & George, T., Strengthening of RC Beam Using GFRP with EBR and NSM Techniques. (Web Sayfası: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37350984/Arathy\\_NET2014\\_2-libre.pdf?](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37350984/Arathy_NET2014_2-libre.pdf?) (Erişim Tarihi: Nisan 2025)).
- [25] Abdul-Razzaq, K. S., Ali, H. I., & Abdul-Kareem, M. M. 2017. A new strengthening technique for deep beam openings using steel plates. **International Journal of Applied Engineering Research**, **12**(24): 15935-15947.
- [26] Aksoylu, C., Yazman, İ., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., & Arslan, M. H., 2020. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. **Composite Structures**, **249**: 112561.
- [27] Salama, A. E., Kassem, M. E., & Mahmoud, A. A., 2018. Torsional behavior of T shaped reinforced concrete beams with large web openings. **Journal of Building Engineering**, **18**: 84-94.
- [28] Saleh, A., Hamad, M., Elzeny, S., Elwan, S.K., & Deifalla, A., 2017. The Behavior of RC Beam-Column Joint with Beam Reinforced Web Opening under Cyclic Loading Abstract. **Introduction : Research Significance and Previous Work Test Set-up**. **39**:191-200.
- [29] Shoeib, A. E. K., & Sedawy, A. E. S., 2017. Shear strength reduction due to introduced opening in loaded RC beams. **Journal of Building Engineering**, **13**, 28-40.

- [30] Mansur, M. A., Tan, K. H., & Lee, S. L., 1985. Design method for reinforced concrete beams with large openings. **Journal Proceedings**, **82**(4): 517-524.
- [31] Tan, K. H., Mansur, M. A., & Wei, W., 2001. Design of reinforced concrete beams with circular openings. **Structural Journal**, **98**(3): 407-415.
- [32] Sayed, A.M., 2019. Numerical study using FE simulation on rectangular RC beams with vertical circular web openings in the shear zones. **Engineering Structures**, **198**: 109471.
- [33] Mansur, M. A., Lee, Y. F., Tan, K. H., & Lee, S. L., 1991. Tests on RC continuous beams with openings. **Journal of Structural Engineering**, **117**(6): 1593-1606.
- [34] Ashour, A.F., & Rishi, G., 2000. Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings. **Structural Journal**, **97**(3): 418-426.
- [35] Tan, K. H., Mansur, M. A., & Huang, L. M., 1996. Reinforced concrete T-beams with large web openings in positive and negative moment regions. **Structural Journal**, **93**(3): 277-289.
- [36] Shather, L. M., Hussein, S. N., & Hasan, L. F., 2018. Theoretical evaluation of RC deep beam with web opening by using nonlinear finite element software [ABAQUS]. **Int. J. Sci. Eng. Res**, **9**(5):413-421.
- [37] Doğangün, A., 2019. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul, 844 s.
- [38] TS500-2000, 2000. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [39] TSE, 2016. TS 708, Çelik- Betonarme için-Donatı Çeliği, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [40] CFB PLN. t.y., Çift Yön Karbon Kumaş. (Web Sayfası: <https://www.tetraglobe.com/urunler/guclendirme-donati-urunleri/cfb-pln> Erişim Tarihi: Mayıs 2025).
- [41] CFB PLN. t.y., Karbon Plaka. (Web Sayfası: <https://www.tetraglobe.com/urunler/guclendirme-donati-urunleri/cpl> Erişim Tarihi: Mayıs 2025).
- [42] Tetraglobe Yapı Malzemeleri Pazarlama A.Ş., t.y., (Web Sayfası: <https://www.tetraglobe.com/urunler/guclendirme-ankrajlari/tetraglobe-cfb25/> (Erişim Tarihi: Mayıs 2025)).

- [43] Tetraglobe Yapı Malzemeleri Pazarlama A.Ş., t.y., TETRAPOX EPCP Karbon Plaka Yapıştırıcı Epoksi (Web Sayfası: <https://www.tetraglobe.com/urunler/epoksi-esasli-urunler/tetrapox-epcp/>) (Erişim Tarihi: Mayıs 2025).
- [44] Tetraglobe Yapı Malzemeleri Pazarlama A.Ş., t.y., TETRAPOX EPFP Karbon Kumaş Yapıştırıcı Epoksi (Web Sayfası: <https://www.tetraglobe.com/urunler/epoksi-esasli-urunler/tetrapox-epfb/>) (Erişim Tarihi: Mayıs 2025).
- [45] Ünal A., 2016. Sabit Dikdörtgen Kesitli Kirişlerin Farklı Mesnet Koşullarında Kesme Kapasitesinin Araştırılması. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya. 386 s.
- [46] ASCE41-17 (2017), Seismic Evaluation and Retrofit of Existing American Society Civil Engineers, USA.
- [47] L. F. Ibarra, R. A. Medina, H. Krawinkler. “Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration.” Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005.

## EKLER

### EK 1. Numunelerde Yüklemeye Bağlı Olarak Çatlak Gelişim Durumları

Tablo Ek 1.1. B-REF numunesinde çatlak ve hasar oluşumu

| YÜK<br>(kN) | DEPLASMAN<br>(MM) | AÇIKLAMA                                                                              |
|-------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 0                 | Deney başlangıcı                                                                      |
| 20          | 0,298516          | Çatlak yok                                                                            |
| 40          | 0,466431          | Çatlak yok                                                                            |
| 60          | 0,74629           | Çatlak yok                                                                            |
| 80          | 1,43661           | Çatlak yok                                                                            |
| 100         | 2,80791           | Çatlak yok                                                                            |
| 115         | 3,78742           | İlk çatlak yükleme noktasının arasında 2 adet simetrik                                |
| 120         | 4,10459           |                                                                                       |
| 140         | 5,4106            | Çatlaklar ilerledi.                                                                   |
| 158         | 6,59533           | Mesnetle yükleme noktaları arasında geniş çatlaklar oluştu.                           |
| 160         | 6,75392           |                                                                                       |
| 170         | 7,3323            | Mevcut çatlaklar basınç bölgesine gidiyor. Yeni çatlaklar oluştu.                     |
| 180         | 7,94798           | Mesnet bölgesine yakın çatlaklar oluştu.                                              |
| 200         | 9,26332           | Çatlaklar dallanarak ilerledi.                                                        |
| 205         | 9,52452           | Maksimum çatlak genişliği 0,8 mm                                                      |
| 220         | 11,5861           |                                                                                       |
| 226         | 12,5936           | Maksimum çatlak genişliği 2,0 mm                                                      |
| 240         | 23,8813           |                                                                                       |
| 242         | 25,4858           | Yükleme noktaları arasında 2 tane geniş çatlak oluştu.                                |
| 255         | 36,3816           | Maksimum çatlak genişliği 5 mm'yi geçti.                                              |
| 260         | 41,3444           |                                                                                       |
| 270         | 51,8391           | Yükleme noktaları arasında 4 tane geniş büyüklükte 4-5 mm genişliğinde çatlak oluştu. |
| 280         | 61,7088           | Açıklık 1 cm'ye ulaştı.                                                               |
| 290         | 70,683            | Basınç bölgesinde ezilme başladı.                                                     |
| 295         | 75,0861           | Çatlaklar basınç bölgesine ulaştı.                                                    |
| 300         | 80,3661           | Basınç bölgesi eziliyor. Çatlak genişliği 1 cm ' yi geçti. 12 mm                      |
| 310         | 114,425           | Basınç bölgesinde kabuk beton atmak üzere                                             |
| 320         | 124,658           |                                                                                       |
| 330         | 133,688           | Basınç bölgesi kabuk betonu döküldü.                                                  |
| 340         | 139,901           | Çekme donatısı koptu. Deney sonlandırıldı.                                            |

Tablo Ek 1.2. B-REF-WO numunesinde çatlak ve hasar oluşumu

| YÜK<br>(kN) | DEPLASMAN<br>(MM) | AÇIKLAMA                                                                                                          |
|-------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 0                 | Deney başlangıcı                                                                                                  |
| 20          | 0                 | Çatlak yok                                                                                                        |
| 40          | 0,26              | Çatlak yok                                                                                                        |
| 60          | 1,04              | Çatlak yok                                                                                                        |
| 80          | 1,99              | Çatlak yok                                                                                                        |
| 96          | 3,03              | İlk eğilme çatlağı oluştu.                                                                                        |
| 110         | 4,12              | İkinci eğilme çatlağı oluştu.                                                                                     |
| 115         | 4,51              | Üçüncü eğilme çatlağı oluştu. İlk Çatlaklar dallanmaya başladı.                                                   |
| 117         | 4,64              | Dördüncü çatlak oluştu.                                                                                           |
| 130         | 5,62              | Beşinci çatlak oluştu.                                                                                            |
| 132         | 5,80              | Altıncı çatlak oluştu.                                                                                            |
| 150         | 7,43              | Çatlaklar dallanmaya devam ediyor.                                                                                |
| 185         | 15,25             | Çatlaklarda dallanmalar artıyor.                                                                                  |
| 190         | 17,84             | Geniş çatlaklar oluştu.                                                                                           |
| 220         | 35,88             | Çatlaklar basınç bölgesine ulaştı.                                                                                |
| 235         | 50,37             | Çatlak genişlikleri 7-8 mm ile 1 cm'yi geçti. Basınç bölgesi betonu ezildi, basınç bölgesindeki kabuk atmak üzere |
| 240         | 64,78             | Bütün çatlaklar boşluk çevresinde yoğunlaştı.                                                                     |
| 245         | 68,77             | Çatlak genişliği 15 mm civarında.                                                                                 |
| 280         | 124,94            | Basınç bölgesinde kabuk betonu attı, donatı kopmak üzere                                                          |
| 292         | 131,86            | Maksimum yüke ulaştı ve çekme donatıları koptu. Deney sonlandırıldı.                                              |

Tablo Ek 1.3. B1-DEF-RET-WO numunesinde çatlak ve hasar oluşumu

| YÜK<br>(kN) | DEPLASMAN<br>(MM) | AÇIKLAMA                                                                                                                                                   |
|-------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 0                 | Deney başlangıcı                                                                                                                                           |
| 20          | 0,718304          | Çatlak yok                                                                                                                                                 |
| 30          | 0,960848          | İlk çatlak FRP'nin yanında görüldü. İkinci eğilme çatlağı da görüldü.                                                                                      |
| 40          | 1,26869           | üçüncü eğilme çatlağı görüldü. Çatlaklar mesnete doğru artmaya başladı.                                                                                    |
| 60          | 1,99632           |                                                                                                                                                            |
| 80          | 2,68664           |                                                                                                                                                            |
| 100         | 3,40495           | Çatlaklar ilerliyor.                                                                                                                                       |
| 115         | 3,91802           |                                                                                                                                                            |
| 120         | 4,10459           | FRP' nin bittiği yerde ve simetriğinde de çatlak oluştu.                                                                                                   |
| 140         | 4,83222           |                                                                                                                                                            |
| 150         | 5,16806           | 30 kN'da oluşan çatlak devam etti.                                                                                                                         |
| 160         | 5,6065            |                                                                                                                                                            |
| 180         | 6,44608           |                                                                                                                                                            |
| 200         | 7,4629            | İlk oluşan çatlaklar ilerliyor.                                                                                                                            |
| 220         | 8,82487           | FRP'lerden ayrılma sesleri gelmeye başladı.                                                                                                                |
| 230         | 10,0376           |                                                                                                                                                            |
| 240         | 11,9406           |                                                                                                                                                            |
| 245         | 13,0134           | FRP'lerde ayrışmalar var.                                                                                                                                  |
| 250         | 13,937            | Boşluk etrafında FRP'lerde ayrışmalar var.                                                                                                                 |
| 255         | 14,6273           | Çekme bölgesinde ayrışmalar var, kiriş altında çatlaklar devam ediyor                                                                                      |
| 260         | 15,4202           | Mesnete yakın bölgelerde çatlaklar devam ediyor. Çatlaklar dallanmaya başladı.                                                                             |
| 265         | 16,1105           | Boşluk etrafındaki FRP'lerden ses gelip ayrışmaya başladı.                                                                                                 |
| 270         | 16,8382           |                                                                                                                                                            |
| 280         | 18,2281           |                                                                                                                                                            |
| 290         | 19,9259           | Çekme bölgesinde ayrışmalar var. FRP'lerden ses gelip kopmaya başladı.                                                                                     |
| 300         | 21,6331           | Kiriş altında ayrışmalar devam ediyor. Sağ tarafta FRP'nin bitim yerinde kiriş altında boyuna çatlak genişliği 3 mm, sol tarafta da 2 mm.Kırılmalar arttı, |
| 312         | 26,6052           | FRP'nin yanındaki çalaklar genişledi, sağdaki 4 mm oldu.                                                                                                   |
|             |                   | Açıklık ortasında boşluğun üstünde yırtılma gerçekleşti.                                                                                                   |
| 257         | 43,1076           | Boşluk üstündeki yırtılmalar artıyor.                                                                                                                      |
| 250         | 61,4103           | 2. yırtılma gerçekleşti.                                                                                                                                   |
| 245         | 86,4576           | Yırtılma devam ediyor.                                                                                                                                     |
| 227         | 111,001           | Donatı koptu.                                                                                                                                              |

Tablo Ek 1.4. B2-RET-WO numunesinde çatlak ve hasar oluşumu

| YÜK<br>(kN) | DEPLASMAN<br>(MM) | AÇIKLAMA                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 0                 | Deney başlangıcı                                                                                                                                                                                                              |
| 20          | 0,195901          | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                    |
| 40          | 0,401131          | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                    |
| 60          | 0,839576          | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                    |
| 80          | 2,12693           | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                    |
| 92          | 3,08777           | İlk çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                                            |
| 100         | 3,62883           | Sağ tarafta 2. çatlak oluştu, sol tarafta çatlak gelişimi yok.                                                                                                                                                                |
| 105         | 4,03929           | 2. çatlak ilerledi                                                                                                                                                                                                            |
| 115         | 4,78558           | FRP'den ses geldi, orta bölgede FRP'den ses geldi, ayrışmalar başladı.                                                                                                                                                        |
| 121         | 5,42926           | Sol tarafta ilk çatlak gelişimi oluştu.                                                                                                                                                                                       |
| 125         | 5,71844           | İlk çatlak ilerledi.                                                                                                                                                                                                          |
| 130         | 6,04495           | Sağ tarafta 92 çatlağı ilerledi                                                                                                                                                                                               |
| 145         | 7,10841           | Çatlak genişlikleri artmaya başladı.                                                                                                                                                                                          |
| 150         | 7,55618           |                                                                                                                                                                                                                               |
| 155         | 7,86403           | Sol ve sağda 3. sektörde çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                       |
| 160         | 8,25583           | 155 çatlağı sol sektörde ilerledi. FRP'de sıyrılma yok.                                                                                                                                                                       |
| 170         | 8,90883           | Çatlak genişlikleri 0,60 mm'ye ulaştı, FRP'de sıyrılmalar başladı.                                                                                                                                                            |
| 175         | 9,26332           | Kiriş altında, yüzünde ve gövde üstünde FRP'lerde ayrışmalar var.                                                                                                                                                             |
| 180         | 9,61781           | 155 çatlağı 0,60 mm'ye ulaştı, yataydan mesnete doğru ilerledi.                                                                                                                                                               |
| 190         | 10,2055           | 148 çatlağı ilerledi, FRP'lerde tam bir sıyrılma yok.                                                                                                                                                                         |
| 195         | 10,504            | Kiriş üstünde sıyrılma sesleri duyuluyor.                                                                                                                                                                                     |
| 200         | 10,9611           | İlk çatlak 1 mm'ye ulaştı, 155 çatlağı da 0,60 mm'ye ulaştı.                                                                                                                                                                  |
| 210         | 11,6048           | Sağ tarafta çatlaklar mesnete doğru ilerliyor, FRP'lerden ses geliyor, kiriş üstünde FRP'ler atmaya başladı.                                                                                                                  |
| 220         | 12,2765           | 105 çatlağı FRP altına ilerledi sağ tarafta.                                                                                                                                                                                  |
| 225         | 12,5843           | 225 çatlağı FRP altına ilerledi ve 1 mm'ye ulaştı.                                                                                                                                                                            |
| 235         | 13,1813           | Kiriş üstünde çatlaklar açılmaya başladı.                                                                                                                                                                                     |
| 240         | 13,6291           | Kirişin üstündeki ilk çatlakların genişlikleri 1,5 mm'ye ulaştı.                                                                                                                                                              |
| 245         | 14,0023           | Sağda ve solda yeni çatlaklar oluştu. Sağda da 245 çatlağı ilk çatlaktan itibaren mesnete doğru ilerledi.                                                                                                                     |
| 250         | 14,3847           | Sol tarafta yeni çatlak oluştu. FRP'lerde kiriş yüzünde ve altında atmalar gözleniyor.                                                                                                                                        |
| 255         | 15,0284           | Sağ tarafta mesnete yakın çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                      |
| 260         | 15,5788           | 255 çatlağı genişledi.4. sektörde 260 çatlağı mesnetten kiriş basınç bölgesine doğru ilerledi. Çatlak genişlikleri sol ve sağ tarafta 0,6-0,7 mertebelerine ulaştı.                                                           |
| 275         | 17,146            | FRP'lerde atma sesi duyuluyor. Üst çatlak genişliği kiriş altında 2 mm'ye yaklaştı.                                                                                                                                           |
| 280         | 17,8736           | Boşluk üst bölgesinde ve kiriş üstünde FRP'lerde akmalar devam ediyor ama hala bütünlük korunuyor, eğri hafif yataya dönmeye başladı, FRP atmaları çoğaldı,3. sektörde kiriş üstünde sol ve sağ tarafta yeni çatlak gözlendi. |

|     |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 295 | 20,3457 | Tüm çatlaklar genişliyor, sol tarafta FRP'nin bitiminde giriş üstünde çatlak genişliği 3 mm'ye ulaştı, beton ayrılıyor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 300 | 23,0324 | Sol tarafta sıyrılma gerçekleşti. FRP giriş gövdesinden ayrıldı, sol tarafta FRP basınç bölgesine kadar ayrıldı, ayrılma boşluğa doğru devam ediyor, FRP'nin açıldığı gözleniyor. Sağ tarafta FRP hala yapışık durumda, betonda ezilme gerçekleşti, beton dökülüyor, çatlaklarda genişleme var, sol tarafta betonda ayrılma gözleniyor, FRP yapıştığı betonu kaldırdı, boşluk geometrisinde bozulma gözlemlendi, boşluk içerisinde sıyrılma var, özellikle sol tarafta. Sol tarafta boşlukta FRP sıyrıldı, sol tarafta atmalar yoğunlaştı, sağ tarafta herhangi bir atma şuan için gözlenmiyor, kuvvet düşüyor, düşmeye devam ediyor, ciddi bir atma sesi geldi. Donatı koptu. Boşluğun sol tarafı, sol mesnet tarafına doğru FRP betonu yoldu aldı. Boşluk çevresindeki beton yolundu aynı zamanda FRP kırıldı. Giriş arkasında da sol taraftan başlayan hem boşluğun çeperinde hem de girişin yüzeyindeki ayrılmalar girişin arkasında da devam etmiş yani boşluğun sağ ucuna kadar FRP sıyrılmış durumda, sol ucunda sıyrılma yok. |

Tablo Ek 1.5. B5-RET-ROP-WO numunesinde çatlak ve hasar oluşumu

| YÜK<br>(kN) | DEPLASMAN<br>(MM) | AÇIKLAMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 0                 | Deney başlangıcı                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 20          | 0,23              | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 40          | 0,53              | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 60          | 0,92              | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 70          | 1,34              | İlk çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 80          | 2,05              | Boşluktaki liflerden ses geldi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 85          | 2,61              | L6-R6 çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 90          | 2,99              | "M" de ilk çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 105         | 4,43              | Çatlaklar ilerliyor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 120         | 5,84              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 140         | 7,43              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 160         | 10,07             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 180         | 11,38             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 190         | 12,07             | R6-7- M sektörlerinde 0,3 mm çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 195         | 12,46             | Boşluktaki sargıdan ve üst liflerden sesler geliyor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 200         | 13,07             | Önceki çatlaklar genişledi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 210         | 14,31             | R3'te çatlak gelişimi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 215         | 15,03             | R2-R3 arası mesnet bölgesine yakın kesme çatlağı oluştu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 225         | 16,47             | Çatlaklar genişliyor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 230         | 17,16             | Çatlak genişlikleri R6'da 0,40 mm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 240         | 18,69             | "M" bölgesinde çatlak ilerliyor. 2 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 245         | 19,66             | R5-R6 çatlakları yükleme temas noktalarına doğru basınç bölgesine ilerledi. M bölgesinde boşluk altından yeni çatlaklar oluştu.R7'deki çatlak deliğe kadar ulaştı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 250         | 20,83             | R7'deki çatlak 1,5 mm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 255         | 21,75             | L7'deki çatlak 0,40 mm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 258         | 22,2              | M'deki çatlak 2,5 mm.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 260         | 22,58             | Çatlaklar genişliyor. Daha boşlukta hasar yok.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 270         | 24,37             | 7 sektörü M sektörü üzerinde çatlak genişlikleri yüzeyde olduğu gibi giriş üstünde de devam ediyor.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 274         | 25,18             | Boşlukta lif ayrıldı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 275         | 25,49             | L7-M arası kesişim noktasında lif ayrıldı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 280         | 26,15             | Tam orta noktada lif kopması gerçekleşti.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 265         | 38,52             | R6-R5 arası çatlak genişlikleri arttı.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 253         | 61,22             | L7-M sektörleri birleşiminde boşluk içerisindeki liflerde de kopma var, deforme oldu.R62'dan başlayan çatlak boşluk kenarından basınç bölgesine kadar ilerledi. Kirişin yükleme bölgesindeki basınç alanında ezilmeler mevcut. Yukarıda şuan her 2 lif de kopmuş durumda. Lifler havada duruyor. Donatı yük alıyor şuan. Çatlakta gelişmeler devam ediyor. Yeni çatlak oluşmadı. Mevcut çatlaklarda yığılmalar var. Çekme bölgesindeki betonda da pas payında dökülmeler var. Grafiğe bakılırsa donatıda akma gerçekleşiyor. |
| 347         | 152,196           | Donatı koptu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

Tablo Ek 1.6. B4-RET-PL2-WO numunesinde çatlak ve hasar oluşumu

| YÜK<br>(kN) | DEPLASMAN<br>(MM) | AÇIKLAMA                                                                                                                                                                                                     |
|-------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 0                 | Deney başlangıcı                                                                                                                                                                                             |
| 20          | 0,186572          | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                   |
| 40          | 0,457102          | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                   |
| 60          | 0,867562          | Çatlak yok                                                                                                                                                                                                   |
| 80          | 1,62318           | İlk çatlak M sektöründe gerçekleşti.                                                                                                                                                                         |
| 90          | 2,22021           | R7'de çatlak oluşmuştur.                                                                                                                                                                                     |
| 95          | 2,56537           | R7'de çatlak ilerledi.                                                                                                                                                                                       |
| 110         | 4,01131           | Yüzeydeki FRP'lerden ses geliyor.                                                                                                                                                                            |
| 120         | 5,24268           | R6'da çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                         |
| 125         | 5,7371            | 90 kN'da oluşan R7 çatlağı ilerledi, R4'te yeni çatlak oluştu.                                                                                                                                               |
| 130         | 6,09159           | 80 kN'da oluşan M'deki çatlak ilerledi.                                                                                                                                                                      |
| 135         | 6,47406           | Üst plakalardan ayrılma sesleri geliyor.                                                                                                                                                                     |
| 140         | 6,79124           | R3 ve R4'te çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                   |
| 145         | 7,14572           | R6'daki çatlaklar ilerledi, genişledi.                                                                                                                                                                       |
| 150         | 7,5282            | L6'daki çatlak boşluğun altına kadar ilerledi.                                                                                                                                                               |
| 155         | 7,80805           | R4'teki çatlak ilerledi.                                                                                                                                                                                     |
| 160         | 8,1812            | R4'te yeni çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                    |
| 170         | 8,87152           | R6'da çatlak ilerlemesi var, L3'te yeni çatlak oluştu.                                                                                                                                                       |
| 175         | 9,31929           | R4'teki çatlak ilerledi ve genişledi.                                                                                                                                                                        |
| 180         | 9,62714           | Boşluktaki plakalardan sesler geliyor.                                                                                                                                                                       |
| 185         | 10,0749           | R3-R4 arası kesme çatlağı oluştu.                                                                                                                                                                            |
| 190         | 10,4387           | L3'te yeni çatlak oluştu.                                                                                                                                                                                    |
| 200         | 11,241            | Boşluğun kenarında R7 sektöründe çatlak var.                                                                                                                                                                 |
| 215         | 12,0712           | R5-L5 FRP sargılardan atma sesleri geliyor.                                                                                                                                                                  |
| 260         | 14,4034           | R7-L7 çatlaklarında ufak açılmalar var.                                                                                                                                                                      |
| 265         | 14,6739           | R3-R2 arasında kesme çatlağı oluştu.                                                                                                                                                                         |
| 275         | 15,1403           | Açıklık ortasında plakalar ve FRP sargılardan ayrılma sesleri geliyor.                                                                                                                                       |
| 280         | 15,3642           | Basınç bölgesinde ezilme görülmedi.                                                                                                                                                                          |
| 295         | 16,549            | L6 sektöründe mevcut çatlaklarda ilerleme görülüyor.                                                                                                                                                         |
| 300         | 17,1553           | L2 sektöründe de mesnetten başlayan kesme çatlağı var.                                                                                                                                                       |
| 320         | 18,4893           | Çatlaklarda açılmalar var, özellikle M sektöründe, L7 ve R7'de.                                                                                                                                              |
| 325         | 18,8625           | Sesler çoğaldı.                                                                                                                                                                                              |
| 330         | 19,3102           | Çekme bölgesindeki plakalarda gerilmeler mevcut.                                                                                                                                                             |
| 365         | 22,2954           | R1'de başlayan A sektöründe kesme çatlakları görüldü. Sağ tarafta R1 sektöründe de mesnetten kesme çatlakları görüldü.                                                                                       |
| 370         | 22,8551           | Sol tarafta atmalar var. L3, L6, L7 FRP'leri attı, artık giriş yüzünü tutmuyor. Plakalar kopmak üzere, hala yük alıyor, çatlak genişlikleri çok fazla. L7'de özellikle. deplasman artışı hızla devam ediyor. |
| 250         | 52,6414           | Çatlak genişlikleri 2 cm'ye kadar ulaştı.                                                                                                                                                                    |
| 260         | 80,5153           | Boşluk etrafında da dairesel formda ilerleyen çatlak gözlemlendi.                                                                                                                                            |
| 270         | 90,4783           | Dairesel plakalarda bir hasar görünmüyor ama sesler geliyor.                                                                                                                                                 |
| 275         | 96,7471           | L7-L6 arasındaki deplasman en yüksek çatlak da bu bölgede gelişti.                                                                                                                                           |
| 285         | 107,718           | Çatlakta ilerleme görünmüyor. Kesme çatlaklarında ilerlemeler durdu. Donatılar koptu.                                                                                                                        |

# HADIYE SEMA SAKLAVÇI

## Hadiye\_Sema\_Saklavçı\_Tez\_24.11.25.docx

 Rıdvan Yakut

 nny inşaat

 Nuh Naci Yazgan Üniversitesi

### Belge Ayrıntıları

Gönderi Kimliği

trn:oid:::1:3450507749

Gönderi Tarihi

24 Ara 2025 16:19 GMT+3

İndirme Tarihi

24 Ara 2025 16:30 GMT+3

Dosya Adı

Hadiye\_Sema\_Saklavçı\_Tez\_24.11.25.docx

Dosya Boyutu

18.2 MB

129 Sayfa

19.444 Sözcük

132.036 Karakter

# 12% Genel Benzerlik

Her veri tabanı için çakışan kaynaklar da dâhil tüm eşleşmelerin kombine toplamı.

## Ön Sıradaki Kaynaklar

- 11%  İnternet kaynakları
- 6%  Yayınlar
- 7%  Gönderilen çalışmalar (Öğrenci Makaleleri)

## Bütünlük Bayrakları

### İnceleme için 1 Bütünlük Bayrağı



#### Değiştirilen Karakterler

8 sayfada 23 şüpheli karakter

Harfler başka bir alfabeden benzer karakterlerle değiştirilir.

Sistemimizin algoritmaları bir belgede, onu normal bir gönderiden ayırabilecek her türlü tutarsızlığı derinlemesine inceler. Tuhaf bir şey fark edersek incelemeniz için bayrak ekleriz.

Bir Bayrak mutlaka bir sorun olduğunu göstermez. Ancak daha fazla inceleme için dikkatinizi vermenizi öneririz.

## Ön Sıradaki Kaynaklar

- 11%  İnternet kaynakları
- 6%  Yayınlar
- 7%  Gönderilen çalışmalar (Öğrenci Makaleleri)

## Ön Sıradaki Kaynaklar

Gönderi içinde en yüksek eşleşme sayısına sahip kaynaklar. Çakışan kaynaklar görüntülenmeyecektir.

|    |                    |                                                                     |     |
|----|--------------------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 1  | İnternet           | acikbilim.yok.gov.tr                                                | 4%  |
| 2  | Öğrenci makaleleri | The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) | <1% |
| 3  | İnternet           | dergipark.org.tr                                                    | <1% |
| 4  | Öğrenci makaleleri | Karadeniz Teknik University                                         | <1% |
| 5  | İnternet           | docplayer.biz.tr                                                    | <1% |
| 6  | İnternet           | polen.itu.edu.tr                                                    | <1% |
| 7  | İnternet           | dspace.gazi.edu.tr                                                  | <1% |
| 8  | Öğrenci makaleleri | Erciyes Üniversitesi                                                | <1% |
| 9  | İnternet           | lib.buet.ac.bd:8080                                                 | <1% |
| 10 | İnternet           | gcris.ktun.edu.tr                                                   | <1% |
| 11 | İnternet           | jes.ksu.edu.tr                                                      | <1% |

|    |                    |                                                                                       |     |
|----|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12 | İnternet           | civilejournal.org                                                                     | <1% |
| 13 | Öğrenci makaleleri | Curtin University of Technology                                                       | <1% |
| 14 | Yayın              | M.A. Mansur. "Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in ...    | <1% |
| 15 | İnternet           | acikerisim.iku.edu.tr                                                                 | <1% |
| 16 | Öğrenci makaleleri | University of Newcastle upon Tyne                                                     | <1% |
| 17 | İnternet           | journal.ump.edu.my                                                                    | <1% |
| 18 | İnternet           | easpublisher.com                                                                      | <1% |
| 19 | İnternet           | www.iensci.org                                                                        | <1% |
| 20 | İnternet           | www.scribd.com                                                                        | <1% |
| 21 | İnternet           | tez.sdu.edu.tr                                                                        | <1% |
| 22 | İnternet           | umpir.ump.edu.my                                                                      | <1% |
| 23 | Yayın              | Linlin Li, Jingran Zhang, Ruifeng Li, Xiangyong Ni. "Design oriented shear strengt... | <1% |
| 24 | Yayın              | Saleh Amin, S.K. Elwan, S. Elzeiny, M. Hamad, A. Deifalla. "Numerical Modeling the... | <1% |
| 25 | İnternet           | core.ac.uk                                                                            | <1% |

|    |                    |                                                                                   |     |
|----|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 26 | İnternet           | koreascience.or.kr                                                                | <1% |
| 27 | Öğrenci makaleleri | Nevşehir Üniversitesi                                                             | <1% |
| 28 | İnternet           | sbe.nny.edu.tr                                                                    | <1% |
| 29 | İnternet           | polen.itu.edu.tr:8443                                                             | <1% |
| 30 | Öğrenci makaleleri | Omer Halisdemir University                                                        | <1% |
| 31 | İnternet           | avesis.erciyes.edu.tr                                                             | <1% |
| 32 | İnternet           | ebs.aydin.edu.tr                                                                  | <1% |
| 33 | İnternet           | secureservercdn.net                                                               | <1% |
| 34 | Yayın              | Mohamed A. Farouk, Ahmed M.R. Moubarak, Ahmed Ibrahim, Hytham Elwardany...        | <1% |
| 35 | İnternet           | 9lib.net                                                                          | <1% |
| 36 | Yayın              | Karabulut, Mehmet Yavuz. "Sentetik Lifin Ultra Yüksek Dayanımlı Betonarme Kiri... | <1% |
| 37 | İnternet           | utpedia.utp.edu.my                                                                | <1% |
| 38 | İnternet           | www.yumpu.com                                                                     | <1% |
| 39 | İnternet           | e-spacio.uned.es                                                                  | <1% |

|    |          |                                                                                          |     |
|----|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 40 | İnternet | lisansustu.nny.edu.tr                                                                    | <1% |
| 41 | İnternet | www.resmigazete.gov.tr                                                                   | <1% |
| 42 | Yayın    | Ünalın, Eda. "Türkiye'Deki üniversite kütüphanelerinde çalışan kütüphanecilerin ...      | <1% |
| 43 | Yayın    | Gürel, Saliha Berrin. "Alümina esaslı bağlayıcı matriks sisteminin geliştirilmesi ve ... | <1% |
| 44 | Yayın    | Hamid Karimizadeh, Abolfazl Arabzadeh. "A STM-based analytical model for predi...        | <1% |
| 45 | İnternet | dergipark.ulakbim.gov.tr                                                                 | <1% |
| 46 | İnternet | hrcak.srce.hr                                                                            | <1% |
| 47 | İnternet | madencilikrehberi.files.wordpress.com                                                    | <1% |
| 48 | Yayın    | Nama, Esra. "Türkiye' de 2007 Yılından Önce Güçlendirilmiş Betonarme Yapıların ...       | <1% |
| 49 | Yayın    | Rania Salih, Nadeem Abbas, Fangyuan Zhou. "Experimental and Numerical invest...          | <1% |
| 50 | İnternet | dspace.ut.ee                                                                             | <1% |
| 51 | İnternet | irjet.net                                                                                | <1% |
| 52 | İnternet | www.researchgate.net                                                                     | <1% |