



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT LEVHALAR  
KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE KESME  
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELEMESİ**

**Sadeq Alı Hamood AL-SHALIF**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ŞUBAT- 2022**

**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Sadeq AL-SHALIF

Tarih:

**ÖZET**  
**YÜKSEK LİSANS**

**CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT LEVHALAR  
KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE KESME  
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELEMESİ**

**SADEQ ALI HAMOOD AL-SHALIF**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN  
Yardımcı Danışman: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN**

**2022, 107**

**Jüri  
Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN  
Dr. Öğr. Üyesi A. Serdar ECEMİŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Ceyhun AKSOYLU**

Betonarme yapılar deprem, kasırga gibi doğal afetler ve patlama gibi ani yüklere maruz kaldığında büyük hasarlar alabilmektedir. Bu etkiler sonucunda hasar alan yapılar incelendiğinde yapı elemanlarındaki göçmenin çoğunlukla kesme hasarından kaynaklandığı görülmektedir. Kesme göçmesi ise çeşitli sebeplerden oluşmaktadır. Bunlar; kesme donatısında yetersizlik, paslanma nedeniyle takviye bölgesinde azalma, servis yüklerinde artış vb. olarak sıralanabilir. Yürütülen tez çalışması kapsamında Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) şeritleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme davranışı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Bu amaçla, kesme göçmesini belirlemek üzere uzunlamasına donatı çubuklarıyla donatılmış 9 adet betonarme T- kiriş numune imal edilmiştir. Bütün deney numunelerinde geometri ve donatı özellikleri aynı seçilmiştir. Kiriş numunelerinden bir tanesi referans olarak üretilmiştir. 6 kiriş farklı sargılama şekillerinde tek kat GFRP ile sargılanmıştır. Şeritli GFRP uygulamasında güçlendirmelerin iki tanesinde cam fiber farklı açılardan ( $45^{\circ}$  ve  $90^{\circ}$ ) spike tipi ankrajlarla kirişe sabitlenmiştir. Tüm numuneler 10 kN'luk periyotlarla artan yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve deplasman değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001 tarafından önerilen amprik bağıntılardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler cam fiber takviyeli polimer kompozitler ile güçlendirme yönteminin betonarme kirişlerde kesme deformasyonunu azaltmada rolü olduğunu göstermiştir. Ayrıca uygulanan güçlendirme yönteminin bazı sargılama modellerinde kırılma modunun değişmesine sebep olduğu görülmüştür. Güçlendirme uygulanan TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinde kesme hasarı meydana gelirken, TB-4, TB-5, TB-6, TB-7 ve TB-8 numuneleri sünek davranış göstermiş ve eğilme nedeniyle kırılmıştır. Çalışma sonucunda deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılmasıyla ampirik bağıntıların deneysel sonuçlara göre oldukça tutucu değerler verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme Kiriş, Cam fiber takviyeli polimer (GFRP), Güçlendirme, Kesme davranışı, Polimer Kompozitler (FRP)

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF SHEAR BEHAVIOR IN REINFORCED CONCRETE BEAMS USING GLASS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE SHEETS**

**SADEQ ALI HAMOOD AL-SHALIF**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN**

**Co-Advisor: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN**

**2022, 107**

#### **Jury**

**Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN  
Dr. Öğr. Üyesi A. Serdar ECEMİŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Ceyhun AKSOYLU**

When reinforced concrete structures are exposed to natural disasters such as earthquakes, hurricanes and sudden loads such as explosions, they can suffer great damage. When the damaged structures as a result of these effects are examined, it is seen that the migration in the building elements is mostly caused by shear damage. Shear failure is caused by various reasons. From these reasons; insufficiency of shear reinforcement, decrease in reinforcement area due to corrosion, increase in service loads etc. can be listed as Within the scope of this thesis study, the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with Glass Fiber strengthened Polymer (GFRP) strips was investigated experimentally and analytically. For this purpose, 9 reinforced concrete T-beam specimens equipped with longitudinal reinforcing bars were fabricated to determine shear failure. Geometry and reinforcement properties were chosen the same in all test specimens. One of the beam samples was produced as a reference. The other 6 beams are wrapped with a single layer of GFRP in different wrapping styles. In the remaining two reinforcements in the partial GFRP application, the glass fiber was fixed to the beam with anchors at different angles (45o and 90o). The load and displacement values of all specimens were recorded until they broke under an increasing load in 10 kN periods. The experimental results obtained were compared with the empirical regulations provided by ACI 440.2R-17, TBEC-2019 and FIB-2001. Experiments have shown that the reinforcement method with glass fiber strengthened polymer composites has a role in reducing shear deformation in reinforced concrete beams. In addition, the applied strengthening method caused the breaking mode to change in some winding models. While shear damage occurred in strengthened TB-1, TB-2 and TB-3 samples, TB-4, TB-5, TB-6, TB-7 and TB-8 samples showed ductile behavior and broke due to bending. As a result of the study, by comparing the experimental and analytical results, it was seen that the empirical relations gave very conservative values compared to the experimental results.

**Keywords:** Reinforced Concrete Beams, Glass Fiber strengthened Polymer (GFRP), Fiber strengthened Polymer (FRP), Shear Behavior, Reinforcement.



## **ÖNSÖZ**

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Betonarme kirişlerin cam fiberli polimerlerle (GFRP) güçlendirilmesinin çalışılmasını amaçladığımız tezimin her aşamasında yardım, tezin hazırlanması sürecinde bana çok değerli vakitlerini ayırarak teorik bilgilendirme, bilimsel katkı, teşvik ve yönlendirmede bulunarak hızlıca yol almamı sağlayan, beni cesaretlendiren ve desteğini benden esirgemeyen, saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Arife AKIN'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca yüksek lisans tez aşamamda ikinci danışman olarak görevlendirilen Prof. Dr. Musa HAKAN'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez konusuyla ilgili kaynakların taramasında ve deneysel ve analitik çalışmalarımın başından sonuna kadar her aşamasında destek olan bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Ceyhun AKSOYLU'ya teşekkür ederim. Ayrıca, tezi zamanında tamamlamamıza yardımcı olan yapıştırıcıları temin etmemizdeki yardımları için Mapei Firmasına teşekkür ederim. Son olarak, tez çalışmam boyunca benimle birlikte tüm zorluklara göğüs geren, hayatımın her aşamasında yanımda olan ve her aşamada bana yardımcı olan sevgili aileme teşekkür ederim.

**SADEQ ALI HAMOOD AL-SHALIF**

**KONYA- 2022**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                        | iii  |
| ABSTRACT .....                                                    | iv   |
| ÖNSÖZ .....                                                       | v    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                 | vi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                      | viii |
| 1.GİRİŞ .....                                                     | 1    |
| 1.1.Tezin Amacı .....                                             | 4    |
| 1.2.Tezin Önemi.....                                              | 4    |
| 1.3.Fiberle Güçlendirilmiş Polimer Kompozitler (FRPC) .....       | 5    |
| 1.3.1.Fiber Çeşitleri .....                                       | 6    |
| 1.3.1.1.Karbon fiberler .....                                     | 7    |
| 1.3.1.2.Cam fiberler .....                                        | 8    |
| 1.3.1.3.Aramid fiberler .....                                     | 9    |
| 1.3.1.4.Bazalt fiberler .....                                     | 9    |
| 1.3.2.Matris .....                                                | 10   |
| 1.3.2.1.Termoplastik Matris .....                                 | 11   |
| 1.3.2.2.Termoset Matris .....                                     | 11   |
| 1.3.3.FRP'nin Avantajları ve Dezavantajları .....                 | 13   |
| 1.3.3.1.FRP'nin Avantajları.....                                  | 13   |
| 1.3.3.2.FRP'nin Dezavantajları.....                               | 14   |
| 1.4.Betonarme Kirişlerin FRP ile Güçlendirme Yöntemleri .....     | 15   |
| 1.4.1.Eğilmeye karşı güçlendirme yöntemleri .....                 | 15   |
| 1.4.1.1.Betonarme Elemanlarda Eğilme Etkisi ve Davranışı .....    | 15   |
| 1.4.1.2.Betonarme Elemanların Eğilmeye Karşı Güçlendirilmesi..... | 15   |
| 1.4.2.Kesmeye Karşı Güçlendirme Yöntemleri .....                  | 17   |
| 1.4.2.1.Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi ve Davranışı.....      | 17   |
| 1.4.2.2.Betonarme Elemanların Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi ..... | 18   |
| 2.KAYNAK ARAŞTIRMASI .....                                        | 20   |
| 3.MATERYAL VE YÖNTEM.....                                         | 35   |
| 3.1.Deney numuneleri .....                                        | 36   |
| 3.1.1.Deney numunelerinin boyutları .....                         | 37   |
| 3.1.2.Deney numunelerinin detayları.....                          | 39   |
| 3.1.3.Deney numunelerinin malzeme özellikleri.....                | 41   |
| 3.1.3.1.Beton.....                                                | 41   |
| 3.1.3.2.Donatı.....                                               | 43   |
| 3.1.3.3.Cam Fiber.....                                            | 44   |
| 3.1.3.4.Epoksi .....                                              | 45   |
| 3.2.Güçlendirme Metodolojisi .....                                | 48   |
| 3.2.1.Kirişlerin hazırlanması .....                               | 48   |
| 3.2.2.GFRP kumaşların hazırlanması .....                          | 49   |

|                                                                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.Tablalı Kirişlerin GFRP Kumaşları ile Güçlendirilmesi .....                                                 | 53         |
| 3.3.1.Kirişin iki taraflı güçlendirilmesi (TB-1) .....                                                          | 53         |
| 3.3.2.Gövde Yüksekliğinin Yarısının U-Şekli Sargılaması (TB-2) .....                                            | 54         |
| 3.3.3.Gövdenin Tüm Yüksekliğini U-Sargılama (TB-3).....                                                         | 54         |
| 3.3.4.Gövdenin Tüm Yüksekliği ve Flanş Altındaki Alanını U-Şekli<br>güçlendirme (TB-4) .....                    | 55         |
| 3.3.5.Kirişin tam sargılama ile güçlendirilmesi (TB-5).....                                                     | 56         |
| 3.3.6.90 ° Açılı GFRP Ankraj Kullanılarak Flanş Altındaki Alan ile beraber U-<br>Şekli Güçlendirme (TB-6) ..... | 58         |
| 3.3.7.45 ° Açılı GFRP Ankraj Kullanılarak Flanş Altındaki Alan ile beraber U-<br>Şekli Güçlendirme (TB-7) ..... | 60         |
| 3.3.8.Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğinde Sürekli GFRP Kumaşlar ile U-<br>Şekli Güçlendirme (TB-8) .....         | 61         |
| <b>4.DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>                                                                                 | <b>62</b>  |
| 4.1.Giriş .....                                                                                                 | 62         |
| 4.2.Deneysel Çalışma Sonuçları ve Hasar Analizi .....                                                           | 65         |
| 4.2.1.Referans Numunesi (TB-0) .....                                                                            | 67         |
| 4.2.2.Deney Numunesi TB-1.....                                                                                  | 68         |
| 4.2.3.Deney Numunesi TB-2.....                                                                                  | 70         |
| 4.2.4.Deney Numunesi TB-3 .....                                                                                 | 72         |
| 4.2.5.Deney Numunesi TB-4.....                                                                                  | 74         |
| 4.2.6.Deney Numunesi TB-5.....                                                                                  | 76         |
| 4.2.7.Deney Numunesi TB-6.....                                                                                  | 79         |
| 4.2.8.Deney Numunesi TB-7 .....                                                                                 | 81         |
| 4.2.9.Deney Numunesi TB-8.....                                                                                  | 84         |
| 4.3.Güçlendirilmiş Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması .....                                       | 87         |
| 4.3.1.Sünekliğin değerlendirilmesi .....                                                                        | 87         |
| 4.3.2.Enerji tüketme kapasitesinin değerlendirilmesi.....                                                       | 88         |
| 4.3.3.Rijitlik .....                                                                                            | 89         |
| <b>5. ANALİTİK ÇALIŞMASI.....</b>                                                                               | <b>92</b>  |
| <b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                                                             | <b>99</b>  |
| 6.1.Sonuçların Değerlendirilmesi .....                                                                          | 99         |
| 6.2.Öneriler .....                                                                                              | 102        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                          | <b>103</b> |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                 |                                                        |
|-----------------|--------------------------------------------------------|
| $a$             | : Kesme açıklığı                                       |
| $a_v$           | : Eleman kesme açıklığı                                |
| $A_s$           | : Çekme donatısı alanı                                 |
| $A_c$           | : Beton alanı                                          |
| $b_w$           | : Gövde genişliği                                      |
| $b$             | : Tabla genişliği                                      |
| $d_c$           | : Basınç hasar rijitliğini azaltma parametresi         |
| $d_t$           | : Çekme hasar rijitliğini azaltma parametresi          |
| $t$             | : Tabla kalınlığı                                      |
| $h$             | : Elemanın yüksekliği                                  |
| $E_s$           | : Çelik elastisite modülü                              |
| $E_c$           | : Betonun elastisite modülü                            |
| $E_f$           | : FRP'in elastisite modülü                             |
| $E_{fu}$        | : FRP'in kopma uzaması                                 |
| $f_c$           | : Beton basınç dayanımı                                |
| $P, F$          | : Deney elemanlarına uygulanan yatay yük               |
| $V_c$           | : Beton kesitin kesme dayanımı                         |
| $V_s$           | : Betonarme kesitin kesme donatısının kesmeye katkısı  |
| $V_f$           | : Betonarme kesitte kullanılacak fiberin kesme katkısı |
| $V_r$           | : Elemanın kesme dayanımı                              |
| $V_n$           | : Nominal kesme dayanımı                               |
| $n_f$           | : Kirişin tek yüzünde bulunan fiber sayısını           |
| $W_F$           | : FRP genişliği                                        |
| $S_f$           | : FRP şeritler eksenler arası mesafeyi                 |
| $\epsilon_f$    | : Etkili birim uzama limiti                            |
| $\epsilon_{fu}$ | : FRP'nin şekil değiştirmesi                           |
| $\Phi$          | : Donatı çapı                                          |
| $\phi$          | : Eğrilik                                              |
| $\delta$        | : Süneklik katsayısı                                   |
| $\delta_u$      | : Kopma anındaki şekil değiştirme                      |
| $\delta_y$      | : Akma anındaki şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.   |

## Kısaltmalar

|           |                                                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| AFRP      | Aramid Fiberle Güçlendirilmiş Polimer                     |
| BFRP      | Bazalt Fiberle Güçlendirilmiş Polimer                     |
| FRP       | Fiberle Güçlendirilmiş Polimer                            |
| CFRP      | Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Polimer                     |
| GFRP      | Cam Fiberle Güçlendirilmiş Polimer                        |
| CAD       | Bilgisayar destekli tasarım                               |
| LVDT      | Elektronik Deplasman Ölçer Aleti                          |
| SEM       | Sonlu Eleman Metodu                                       |
| RC        | Betonarme                                                 |
| ACI       | Amerikan Beton Enstitüsü Standardı                        |
| TBDY-2019 | Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019                      |
| FIB-2001  | Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu (FİB) as Bülten 14 |

## 1. GİRİŞ

Yapısal elemanların bakımı ve güçlendirilmesi, inşaat mühendisliği uygulamalarında en önemli sorunlar arasındadır. Eski yönetmeliklerin yürürlükte olduğu dönemlerde inşa edilmiş olan yapılar, günümüzde geçerli olan şartnamelere uygun olmayan, yapısal olarak güvensiz yerlerdir. Bu yapıların yıkılıp, yerlerine yenilerinin yapılması fazla miktarda maliyet ve zaman gerektirdiğinden, güçlendirilerek yük taşıma kapasitelerini artırmak ve böylece hizmet ömürlerini uzatmak çoğu durumda kabul edilebilir bir yol olarak görülmektedir. Bu nedenle, güçlendirme, yapıların hizmet ömürlerini uzatma ve yüklere dayanım kapasitesini iyileştirmenin kabul edilebilir bir yöntemi haline gelmiştir. Binaların ve yapıların vaktinden önce bozulmasının neden olduğu altyapı çürümesi, onarım veya güçlendirme amacıyla çeşitli işlemlerin araştırılmasına yol açmıştır. Beton yapıların güçlendirilmesindeki zorluklardan biri, inşa edilebilirlik, yapı işlemleri ve bütçe gibi sınırlamaları ele alırken yapının sağlamlığını ve hizmet verebilirliğini artıracak bir güçlendirme yönteminin seçilmesidir (Sarıbyık ve ark, 2021). Pek çok farklı durum nedeniyle yapısal güçlendirme gerekli olabilmektedir.

Beton elemanların yapı üzerinde daha yüksek yüklerin yerleştirilmesine izin vermek için ek dayanım kazanmaları gerekebilmektedir. Bu genellikle yapının kullanımı değiştiğinde veya daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi gerektiğinde gereklidir. Bu durum aynı zamanda yapıya ek mekanik ekipman eklendiğinde meydana gelebilmektedir (Rafeeq, 2016).

Yapının orijinal tasarımı beklenmeyen yüklere dayanmasını sağlamak için güçlendirmeye ihtiyaç duyulabilir. Rüzgâr ve sismik kuvvetlerden kaynaklanan yükler için veya patlama yüklemesine karşı direnci artırmak için yapısal güçlendirme gerektiğinde bu durumla karşılaşılabilir (Sen ve Reddy, 2013).

Yapının orijinal tasarım yüklerini taşıma kabiliyetindeki bir eksiklik nedeniyle ek mukavemet gerekebilir. Eksiklikler, bozulma (ör. Çelik donatı korozyonu ve beton bölümün kaybı), yapısal hasar (ör. Araç çarpması, aşırı aşınma, aşırı yükleme ve yangın) veya orijinal tasarım veya yapım aşamasında yapılan hatalar olabilmektedir (örn. yanlış yerleştirilmiş veya eksik takviye çeliği ve yetersiz beton dayanımı) (Grace ve ark, 1999).

Güçlendirme işlerinde, her projenin kendi kısıtlamaları ve talepleri vardır. Alan kısıtlamalarını, inşa edilebilirlik kısıtlamalarını, dayanıklılık taleplerini veya diğer birçok sorunu ele almak ve iyi bir çözüme ulaşabilmek için büyük gayret göstermek gerekmektedir.

Yapısal güçlendirme, yapısal elemanın yüklemenin neden olduğu iç kuvvetlerin birine veya daha fazlasına güvenli bir şekilde dayanım yeteneğini geliştirmeyi içermektedir. Bu iç kuvvetler eğilme, kesme, eksenel ve burulmadan oluşabilmektedir. Güçlendirme ya bu kuvvetlerin büyüklüğünü azaltarak ya da elemanın bunlara karşı dayanımını artırarak gerçekleştirilmektedir. Kesit büyütme, harici olarak bağlanmış güçlendirme, sonradan gerdirme ve tamamlayıcı destekler gibi tipik güçlendirme teknikleri, gelişmiş mukavemet ve servis kolaylığı elde etmek için kullanılabilir (Lamanna ve ark,2004).

Güçlendirme sistemleri, mevcut yapının iç kuvvetlere karşı dayanımını pasif veya aktif olarak artırabilir. Pasif güçlendirme sistemleri, tipik olarak, tasarım aşaması sırasında mevcut olanların haricinde ek yükler yapıya etkidiğinde devreye girmektedir. Yapısal elemanlara çelik levhaların veya fiberlerle güçlendirilmiş polimer (FRP) kompozitlerin yapıştırılması, pasif güçlendirme sistemlerinin örnekleridir. Aktif güçlendirme sistemleri tipik olarak yapıya anında bağlanır ve iç kuvvetlerin etkilerine karşı koyan elemana dış kuvvetler getirilerek gerçekleştirilebilir. Bunun örnekleri, harici ardgerme sistemlerinin kullanımı veya mevcut yükü hafifletmek veya transfer etmek için elemanın krikoyla kaldırılmasını içermektedir. İster pasif ister aktif olsun, asıl zorluk mevcut yapı ile yeni güçlendirme unsurları arasında bileşik davranışa ulaşmaktır.

Güçlendirme için en uygun yöntemin seçimi, aşağıdaki mühendislik konuları da dahil olmak üzere birçok faktörün dikkatlice değerlendirilmesini gerektirmektedir.

- Kuvvet artışı.
- Elemanların sertliğindeki değişikliklerin etkisi, örneğin elastisite modülü ve malzemenin kendisinin sertliği.
- Proje boyutu (özel malzemeler ve yöntemler içeren küçük projelerde daha az maliyet etkin olabilir).
- Çevresel koşullar (yapıştırıcı kullanan yöntemler yüksek sıcaklık ortamlarındaki uygulamalar için uygun olmayabilir, dıştan çelik eleman ekleme yöntemleri korozyon bulunan ortamlarda uygun olmayabilir).

- Yerinde beton dayanımı ve alt tabaka bütünlüğü (mevcut betona bağlanmaya dayanan yöntemlerin etkinliği, düşük beton dayanımı ile önemli ölçüde sınırlandırılabilir).
- Boyutsal / açıklık kısıtlamaları (bölüm genişlemesi, genişlemenin çevredeki açık alana ne kadar zarar verebileceğiyle sınırlı olabilir).
- Ulaşılabilirlik.
- Operasyonel kısıtlamalar (daha uzun inşaat süresi gerektiren yöntemler, inşaat sırasında bina fonksiyonunun kapatılması gereken uygulamalar için daha az istenebilir) (Awadhesh ve Nitin, 2017).

Betonarme yapılarda çelik donatı korozyonunun yarattığı sorunlardan kaçınmak için araştırmalar, çelik donatı yerine fiber takviyeli polimer (FRP) donatı kullanılabileceğini göstermiştir. Betonarme yapılarda çelik donatının korozyonu hem çeliğin hem de betonun dayanımını etkiler. Korozyona uğramış çelik takviye çubuğunun mukavemeti, çelik çubuğun enine kesit alanındaki azalma nedeniyle azalır. Çelik donatı çubukları aşınırken, korozyon ürünlerinin genişlemesinden dolayı beton kaplamanın çatlaması nedeniyle beton bütünlüğü bozulur.

Altyapıların rehabilitasyonu için son yirmi yıldır dünya çapında çeşitli projeler gerçekleştirilmiştir. Mevcut betonarme elemanları güçlendirmek için kullanılan tekniklerden biri, iki bileşenli epoksi yapıştırıcılar aracılığıyla çelik plakaların dıştan yapıştırılmasını içermektedir. Bu şekilde bir elemanın mekanik performansını iyileştirmek mümkündür. Binalar ve köprüler dahil olmak üzere çeşitli yapılar için bu yöntemin geniş kullanımı, verimliliği ve rahatlığı görülmüştür. Bu gerçeğe rağmen, levha yapıştırma tekniği çeliğin güçlendirici malzeme olarak kullanılmasından dolayı bazı dezavantajlar sunmaktadır. Çeliğin başlıca dezavantajları, plakaların sahada taşınmasında zorluklara neden olan yüksek ağırlığı ve korozif ortamlara karşı savunmasızlığıdır. Dahası, çelik plakaların teslimat uzunlukları sınırlıdır ve bu nedenle ek yerleri gerektirirler. Aksine, süneklik ve dayanım açısından yetersiz olan betonarme elemanların güçlendirilmesinde FRP kullanımı hafiflik, yüksek mukavemet, kolay ve hızlı uygulanabilme, korozyona karşı direnç vs. gibi önemli avantajlarından dolayı oldukça popülerdir. FRP kompozit üretiminde karbon, cam, aramid ve bazalt (CFRP, GFRP, AFRP and BFRP) gibi malzemeler kullanılmaktadır.



### 1.1. Tezin Amacı

Yapılmış olan bu deneysel çalışmanın temel amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Betonarme T-kirişlerin statik yük koşullarında yapısal davranışlarını incelemek.
- Farklı GFRP sargı modellerinin ve yapışma yüzey alanı boyutlarının kirişin davranışı üzerindeki etkisini; göçme modları, yük taşıma kapasitesinin artırılması açısından incelemek.
- GFRP levhaların kirişlere ankraj ile bağlanmasının kesme davranışına etkisini araştırmak.

Bu amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilmiş deneyler sonucunda, güçlendirilmiş betonarme T-kirişlerde GFRP levhaların sarılma şekil ve özelliklerinin kesme dayanımı artışına ve göçme modlarına etkileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca dıştan GFRP levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişler için ACI 440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001 standartları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş, kesme dayanımı ve göçme modları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece deneysel uygulamaların, analitik hesaplarla uyumluluğu kontrol edilmiştir.

### 1.2. Tezin Önemi

Türkiye aktif ve tehlikeli olan fay hatları üzerinde yer aldığından depremlerin sıklıkla yaşandığı bir ülkedir. Bu nedenle Türkiye'deki yapılar sürekli depreme maruz kalabilmekte ve bunun sonucunda farklı boyutlarda hasarlar alabilmektedir. Deprem sonrası hasar almış ve yıkılması gereken yapıların fazla olması ve bu yapıların yıkılıp tekrar yapılması ülke ekonomisi için ciddi boyutta maliyete yol açabilmektedir. Yapıların yıkılması yerine hasarlı yapı elemanlarının FRP ile güçlendirilerek kullanılabilmesi durumunda hem ülke ekonomisi açısından hem de zamandan tasarruf yapılabilmesi hedeflenmektedir. Yapısal elemanların fiber takviyeli polimerler (FRP) ile harici takviyesi, yapılarda kesme nedenli göçmeyi önlemek için son yirmi yıldır uygulanan yeni bir teknik olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, dış çelik levha yapıştırma veya yapısal elemanların boyutlarının arttırılması gibi geleneksel teknolojiyi kullanmak yerine, hasarlı betonarme yapıların güçlendirilmesi ve rehabilitasyonunu en uygun seçenek haline getiren önemli özelliklere sahiptir (Dash, 2009).

Bu çalışma, etkili bir yöntem olması ve bu alanda büyük başarıya sahip olması nedeniyle, binaların yıkılıp yeniden inşa edilmesine gerek kalmadan bakım ve rehabilitasyonu ile ilgilenenlere faydalı olmayı amaçlamaktadır. Ancak güçlendirme yönteminin başarısı için taşıyıcı sistemin bütün olarak ve eleman bazlı zafiyetinin iyi tespit edilmesi gerekmektedir. Bu tespit mevcut yapıların değerlendirilmesi kısmında deprem yönetmeliklerinde yer bulmaktadır. Bu tespiti yaptıktan sonra zafiyetin türüne göre (süneklik, dayanım ve rijitlik) gerekli önlemler alınmalıdır. Eleman bazlı alınan bu önlemler yapının bütüncül performansını da pozitif yönde etkilemelidir.

Polimerik fiberler, korozyona direnmedeki avantajları nedeniyle yapı çeliğine en iyi alternatif olabilmektedir. Bu çalışma sırasında, yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle GFRP kullanılmıştır. GFRP kumaşın düşük kesme kapasiteli kirişlerde uygulama bulmasının en önemli sebebi uygulaması kolay ve etkili bir güçlendirme yöntemi olmasıdır. Ayrıca polimerik cam fiberlerin kullanıldığı güçlendirme teknolojisi, betonarme elemanlarda korozyonu engelleyerek binaların ömrünü uzatmakta ve bu çalışmayı inşaat sektöründe çalışan herkes için bir rehber haline getirebilmektedir.

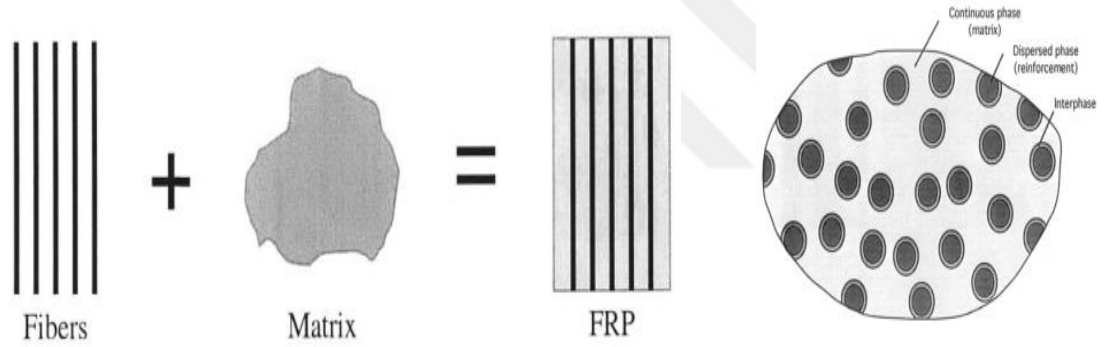
### **1.3. Fiberle Güçlendirilmiş Polimer Kompozitler (FRPC)**

Sadece son birkaç yıl öncesinden beri inşaat sektörü ahşap, çelik ve beton gibi diğer inşaat malzemeleriyle birlikte yapısal güçlendirme için FRP'yi kullanmaya başlamıştır. FRP'ler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek sertlik-ağırlık oranı, tasarımda esneklik, aşınmama, yüksek yorulma mukavemeti ve uygulama kolaylığı gibi çeşitli gelişmiş özellikler sergiler. Betonarme kirişlere yapıştırılmış FRP levhaların veya plakaların kullanımı birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir. Fiber takviyeli polimer kompozitler ile güçlendirme, kolonlar, kirişler, levhalar ve duvarlar gibi birçok betonarme yapı elemanına uygulanabilen etkili bir yöntemdir. FRP malzemeleri aşındırıcı olmadığı, manyetik olmadığı ve çeşitli kimyasallara dayanıklı olduğu için, mevcut betonarme yapıların dıştan takviyesi için giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Fiberle Güçlendirilmiş Polimer (FRP), iki veya daha fazla malzemenin yeni bir özellik kombinasyonu sağlamak için birleştirilmesiyle elde edilen kompozit bir malzemedir. Kompozitler, fiber ve matris olmak üzere iki bileşenden oluşur (Şekil 1.1).

Fiberler, kompozit hacmin %30 ile %70'ini ve ağırlığının yaklaşık %50'sini oluşturur. Fiberlerin başlıca görevi yükü taşımak, polimeri güçlendirmek ve FRP'ye sertlik, mukavemet, termal stabilite ve diğer yapısal özellikleri sağlamaktır. Fiberler, temel olarak mukavemet ve sertlik özelliklerinden sorumlu olmakla birlikte, polimerik matris yük aktarımına katkıda bulunur ve çevrenin korunmasını sağlar (Das ve Nizam, 2014; Sonnenschein vd., 2016).

Düşük mukavemetli polimerik bir matrisin yüksek mukavemetli ve düşük elastisite modülüne sahip fiberler ile güçlendirilmesinde, yükün fibere aktarılması için matrisin gerilme altında viskoelastik yer değiştirmesinden yararlanır. Kombinasyonun amacı, sertliği belirleyen birincil fazın fiberler tarafından oluşturulduğu, zayıf bir ikincil faz tarafından sınırlandırıldığı ve korunduğu iki fazlı bir malzeme üretmektir.



Şekil 1.1. Fiberle güçlendirilmiş polimer kompozitlerin oluşumu (Sarker ve ark., 2011).

### 1.3.1. Fiber Çeşitleri

Fiberler, FRP malzemenin mukavemetini ve sertliğini sağlar. FRP kompozitlerde kullanılan fiberler, istenilen özellikleri elde etmek için farklı doğrultularda yerleştirilebilmektedir.

FRP kompozitlerdeki fiberler, yüksek elastik modülüne, yüksek nihai mukavemete, fiberler arasında düşük mukavemet değişimine, taşıma sırasında mukavemetlerinin yüksek

stabilitesine ve lifler arasında çap ve yüzey boyutunun homojenliğine sahip olmalıdır (Badora, 2009).

Genel anlamda fiber, aşağıda belirtilen hususlar çerçevesinde değişen performansa dayalı olarak farklı şekilde kullanılır:

- Bir yönde mukavemet ve sertlik açısından en yüksek performans, fiberler paralel olduğunda ve tek yönde mümkün olan maksimum performanslarını verdiğinde tek yönlü kompozitler elde edilir.
- Fiberleri bir örme halinde düzenleyerek, mukavemet daha fazla yönde elde edilebilir.
- Fiberlerin kısa uzunluklarda kesilmesi ve rastgele düzenlenmesi ile her yönde eşit mukavemet elde edilir. Kullanılan bu teknik, genellikle yapısal olarak zorlamanın en düşük olduğu durumlarda tercih edilen bir tekniktir (Sonnenschein ve ark., 2016).

Yapısal mühendislik uygulamalarında kullanılan başlıca dört çeşit fiber bulunmaktadır:

- Karbon fiberler (CFRP)
- Cam fiberler (GFRP)
- Aramid fiberler (AFRP)
- Bazalt fiberler (BFRP)

Bu fiberlerin her birinin kendine has bir takım avantajları ve dezavantajları vardır. Spesifik bir uygulamaya yönelik bir fiber seçilirken, aşağıdaki faktörlerin dikkate alınması gerekir:

- İstenen dayanım
- Sertlik
- Dayanıklılık hususları
- Maliyet kısıtları
- Bileřen malzemelerinin varlığı.

#### **1.3.1.1. Karbon fiberler**

Karbon, petrol zifti, yapay ipek veya poliakrilonitril (PAN) nc filamentlerinden üretilir. PAN, yüksek kalitesi ve mukavemet özellikleri nedeniyle CFRP ile yapısal takviye ve güçlendirmede kullanılır. Karbon fiberler, yüksek gerilme mukavemetine ve elastik

modülüne sahip olsa da, zararlı ortamlara ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı değildir. İki tür karbon fiber vardır:

- Yüksek mukavemetli karbon fiberler (HS)
- Yüksek elastisite modüllü karbon fiberler (HM).

Karbon fiberler güçlendirme yöntemine göre çeşitli şekillerde üretilirler (Şekil 1.2).



a) Dış ve iç güçlendirmek için kullanılır

b) Dış güçlendirmek için kullanılır

Şekil 1.2. Güçlendirmenin yöntemine göre karbon fiber

### 1.3.1.2. Cam fiberler

Cam fiberler genellikle doğrudan eritme süreci adı verilen bir işlemle üretilir. Bu işlemde 3 ila 25 mikron çapında fiberler, bir cam eriyiğinden hızlı ve sürekli çekme ile oluşturulur. Betonarme yapılarda kullanılan cam fiberlere şu örnekler verilebilir:

- E-cam (en sık kullanılan)
- S-cam (korozyon direncine sahip, daha lifli ve daha sert fiber)
- R-cam (daha yüksek mukavemet direnci)
- AR-cam (betonarme için kullanılan alkaliye dayanıklı bir cam)

Cam fiberlerin başlıca özellikleri, yüksek mukavemet, orta elastisite modülü, kusursuz ısı ve elektrik yalıtkanlıklarıdır. Cam fiberler, diğer çeşitlere nazaran daha düşük fiyatlarda olmaları nedeniyle kompozitlerin büyük çoğunluğunda kullanılmaktadır. Cam fiber levhaları genellikle köprüler, kubbeler ve bina çerçeveleri gibi yapısal elemanlarda kullanıldığı gibi yapısal olmayan yığma duvarlar gibi ikincil yapıların güçlendirilmesinde de kullanılmaktadır (Şekil 1.3).



Şekil1.3. Binaların çatılarında cam fiber kullanımı

#### 1.3.1.3. Aramid fiberler

Aramid, polimer aromatik poliamidden yapılmış sentetik bir fiberdir. Başlıca özellikleri yüksek mukavemet, enerji tüketme kapasitesi sayesinde darbe dayanımı, orta elastisite modüllü ve düşük yoğunlukta olmasıdır. Aramidler, ultraviyole ışık ve nemin etkisiyle hızla bozundukları için kaplanmalı veya boyanmalıdır. Bununla birlikte aramidler, asitlere ve alkalilere karşı direnç gösterirler.

#### 1.3.1.4. Bazalt fiberler

Bazalt fiberler, kırılmış volkanik lav yataklarının eritilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Bazalt fiberler, cam fiberlerden daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip, karbon fibere nazaran önemli ölçüde daha düşük maliyetlidir. Bazalt lifleri yüksek potansiyele ve bir takım avantajlara sahiptir.

Bazalt fiberlerin başlıca özellikleri şunlardır:

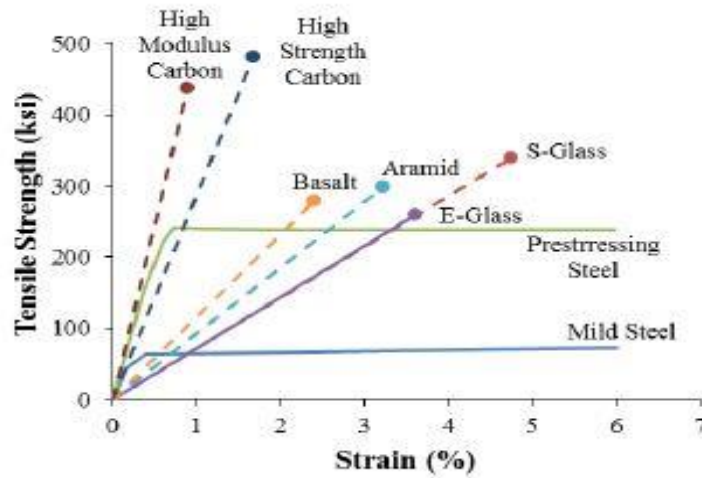
- Ateşe ve korozyona dayanıklılık
- Akustik yalıtım ve kimyasal ortamlara karşı bağışıklık

Fiberler, çelikle karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir çekme dayanımına sahip oldukları görülmektedir. Ancak, fiberlerin deformasyon yapma yetenekleri düşük olduğundan gevrek davranış gösterirler. Çizelge 1.1'de verilen karşılaştırmada fiberlerin

genelde hafiflik ve durabilite yönüyle oldukça iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 1.4, en yaygın takviye fiberleri için çekme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Çizelge 1.1. FRP Kompozitler için fiber özellikleri (Sonnenschein ve d., 2016).

| Fiber Tipi | Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> ) | Çekme Dayanımı (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Cam        | 2.4- 2.6                      | 2400- 4600           | 70-88                   |
| Karbon     | 1.7- 1.9                      | 2100- 3600           | 200-400                 |
| Aramid     | 1.4-1.5                       | 3100- 3600           | 70-130                  |
| Bazalt     | 2.6-2.8                       | 4200- 4800           | 90-200                  |



Şekil 1.4. Çekme dayanımı ve şekil değiştirme arasındaki ilişki

### 1.3.2. Matris

FRP'nin bağlayıcısı olan matris, reçine, dolgu maddesi ve katkı maddeleri olmak üzere üç bileşenden oluşur. Matrisin sahip olduğu kritik fonksiyonlar şunlardır:

- Fiberleri birbirine bağlamak için
- Fiberlerin çevresel etkilere korunması

- Fiberleri yerinde tutmak ve sıkıştırıldığında burkulmalarını önlemek
- Fiberler arasındaki yük aktarımı ve gerilme dağılımı.

FRP kompozitlerde kullanılabilecek birçok farklı polimer matrisi bulunsa da, yapısal mühendislikte daha az sayıda kullanılmaktadır. Yapısına göre, (i) termoplastik (ısıl plastik) ve (ii) termoset (ısıl sertleşim) olmak üzere iki tür polimer matrisi vardır (ACI 440R 1996).

#### **1.3.2.1. Termoplastik Matris**

Termoplastikler, nispeten zayıf Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulan, ancak tek tek moleküller içinde son derece güçlü bağlara sahip uzun zincirli moleküllerden oluşan polimerlerdir. Bu malzemelerde, moleküller yüksek sıcaklıklarda birbiri üzerinde kayar ve bu nedenle termoplastikler, moleküler yapılarını önemli ölçüde değiştirmeden ısıtma ve soğutma ile tekrar tekrar yumuşatılabilir ve sertleştirilebilir.

#### **1.3.2.2. Termoset Matris**

Isıyla sertleşen polimerler ayrıca monomerlerden yapılmış uzun zincirli moleküllerdir, ancak bu malzemeler içinde moleküler zincirler birincil kimyasal bağlar yoluyla çapraz bağlanır. Bu yüzden, termosetler tersinir şekilde yumuşatılamaz ve yüksek sıcaklıklarda geri dönüşü olmayan bir şekilde bozulur. Günümüz yapısal mühendislik uygulamalarında neredeyse sadece termosetler kullanılmaktadır. Bu polimerler genellikle servis sıcaklıklarında iyi termal stabiliteye, iyi kimyasal dirence sahiptir ve çoğu termoplastik ile karşılaştırıldığında düşük sünme ve gevşeme özellikleri sergilerler. Altyapı kompozitlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan üç tip termoset reçinesi vardır:

- Polyester reçine
- Epoksi reçine
- Vinil ester reçine



### **Polyester Reçinesi**

Polyesterler, sahip oldukları özellikler sayesinde, altyapı uygulamaları için FRP bileşenlerinin imalatında en yaygın kullanılan termoset matris malzemesidir.

Polyesterlerin başlıca özellikleri şunlardır:

- Düşük masraf
- Hafif ağırlık
- Çevresel etkilere dayanım
- 120 °C'ye kadar ısı aralığı.

### **Epoksi Reçine**

Epoksi reçineleri, termoset reçine ailesi içinde en iyi özellikleri veren reçinelerdir. Hem mekanik özellikleri hem de çevre direnci çok iyidir, bu yüzden havacılık ve havacılık benzeri sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Epoksi reçinelerinin çeşitli avantajları vardır. Bunlar:

- Viskoziteleri düşüktür ve bu sayede, oda sıcaklığında uygun boşlukları doldurmak için kullanılabilirler.
- Düşük büzülme değerleri gösterirler, bir başka ifadeyle, çapraz bağlamadan sonra kalan gerilmeler düşük bir seviyede tutulabilir. Bu tip reçineler nispeten yüksek maliyetlidir.

### **Vinil Ester Reçinesi**

Vinil esterler, epoksi reçineleri ile benzer mekanik ve çalışma özelliklerine ve doymamış polyesterlerinkine eşdeğer işleme tekniklerine sahiptir. Vinil esterler, güçlü asitlere ve alkalilere karşı dayanıklıdır, bu da beton için FRP takviye çubuklarının imalatında yaygın olarak kullanılmalarının bir nedenidir. Ayrıca polyesterlerle karşılaştırıldığında daha az nem emme ve büzülme sağlarlar.

FRP kompozit üretiminde kullanılan polimerik termoset reçinelerin özellikleri Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. FRP'lerin polimerik matrislerinin özellikleri

| Özellik                       | Polyester | Vinil ester | Epoksi  |
|-------------------------------|-----------|-------------|---------|
| Çekme Dayanımı [MPa]          | 20-70     | 68-82       | 60-80   |
| Elastisite modülü [GPa]       | 2-3       | 3.5         | 2-4     |
| Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ] | 1.2-1.3   | 1.12-1.16   | 1.2-1.6 |
| Geçiş sıcaklığı [OC ]         | 70-120    | 102-150     | 100-270 |

### 1.3.3. FRP'nin Avantajları ve Dezavantajları

#### 1.3.3.1. FRP'nin Avantajları

FRP'nin başlıca avantajları şunlardır:

- Hafiflik

FRP, eşdeğer çelik hacminden çok daha az yoğun ve dolayısıyla daha hafiftir. FRP'nin düşük ağırlığı, montajı ve taşınması çeliğe göre önemli ölçüde kolaydır. Bu özellikler, kurulum sıkışık yerlerde yapıldığında özellikle önemlidir. Köprüler ve bina döşeme levhaları üzerindeki çalışmalar gibi diğer işler, tam iskele yerine insan erişim platformlarından gerçekleştirilir. Fiber kompozitlerin kullanımı, yapının ağırlığını veya elemanın boyutlarını önemli ölçüde arttırmaz. Hafif olmalarından ötürü, FRP malzemelerin taşınmasının çevreye olan etkisi asgari düzeydedir (Gökçen, 2019).

- Mekanik dayanım

FRP, alüminyum veya çeliğin 3,5 ila 5 katı seviyesinde maksimum malzeme sertliği/yoğunluk oranı sağlayabilir. FRP, ağırlığına göre oldukça güçlü ve sert olup, diğer malzemelere üstün gelebilir.

- Şekillendirilebilirlik

Malzeme, beton yüzey şeklindeki düzensizlikleri giderebilir. Hemen hemen istenilen şekle göre kalıplanabilir. Çoğu şekil kolaylıkla oluşturabilir veya kopyalayabilir.

- Kimyasallara Dayanıklılık

FRP minimal seviyede reaktif olup, bu sayede kimyasal maddelerin bulunduğu yüzeylerde koruyucu bir kaplama sağlanması için ideal bir malzemedir.

- Ek Yerleri

Sargı ve ek yerleri gerekmez.

- Korozyon Direnci

Metalin aksine FRP, paslanmaz ve uzun ömürlü yapılar oluşturmak için kullanılabilir (Gökçen,2019).

- Düşük bakım ihtiyacı

FRP, bir kez monte edildikten sonra, minimum bakım gerektirir. Malzemenin fiberleri ve reçineleri doğru şekilde oluşturulursa dayanıklı olur ve bu sayede daha az bakım gerektirir. Kullanım esnasında hasar görmeleri halinde, ek bir katman ekleyerek bunları onarmak nispeten kolaydır.

- Uzun ömür

Yorulmaya karşı yüksek dirence sahiptir ve son 50 yılda mükemmel dayanıklılık göstermiştir.

- Kolay uygulanabilirlik

FRP plaka veya saç malzemenin uygulanması duvar kâğıdının uygulanması gibidir; sıkışan havayı ve fazla yapıştırıcıyı çıkarmak için dikkatlice yuvarlanmalı ve ardından destekler alınmalıdır. Çelik levha genellikle 6 m ile sınırlıyken, fiber kompozit malzemeler çok daha uzun boyutlarda mevcuttur. Sonuç olarak bu faktörler, çelik bir levha kullanmaya göre önemli ölçüde daha basit ve daha hızlı bir güçlendirme sürecine yol açar (Kıyasöz,2018).

### 1.3.3.2. FRP'nin Dezavantajları

FRP malzemelerin önemli bir dezavantajı, ahşap veya boyasız düşük karbonlu çeliğe kıyasla nispeten yüksek maliyetleridir. Sahip olduğu diğer dezavantajları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Ahşap veya çelik ile birlikte kullanılanlardan farklı olarak, testere bıçaklarına ve matkap uçlarına ihtiyaç duyulması.

- Köprünün düşmesini (FRP malzemelerinin esnekliği nedeniyle) önlemek için gereken kuvvetten ziyade sapma miktarı ile kontrol edilen köprü tasarımları.
- Özel standartlardaki köprü tasarımları (standart spesifikasyonlara dayalı tasarımlar yerine).
- Çevre-mekanik performans sınırlamaları.
  - Yüksek sıcaklıklarda, malzemenin mukavemeti azalır ve sapma artar.
  - Bu malzemeler ağır, sürekli yükler altında sürünmeye devam eder .
  - Çarpışmalar sırasındaki darbe yüklemesi bu malzemelere zarar verebilir.
- İnşaat tasarım endüstrisinde FRP malzemelerine yönelik sınırlı deneyim.
- Tasarım standartlarının ve kodların olmaması (Kısasöz,2018).

#### **1.4. Betonarme Kirişlerin FRP ile Güçlendirme Yöntemleri**

##### **1.4.1. Eğilmeye karşı güçlendirme yöntemleri**

###### **1.4.1.1. Betonarme Elemanlarda Eğilme Etkisi ve Davranışı**

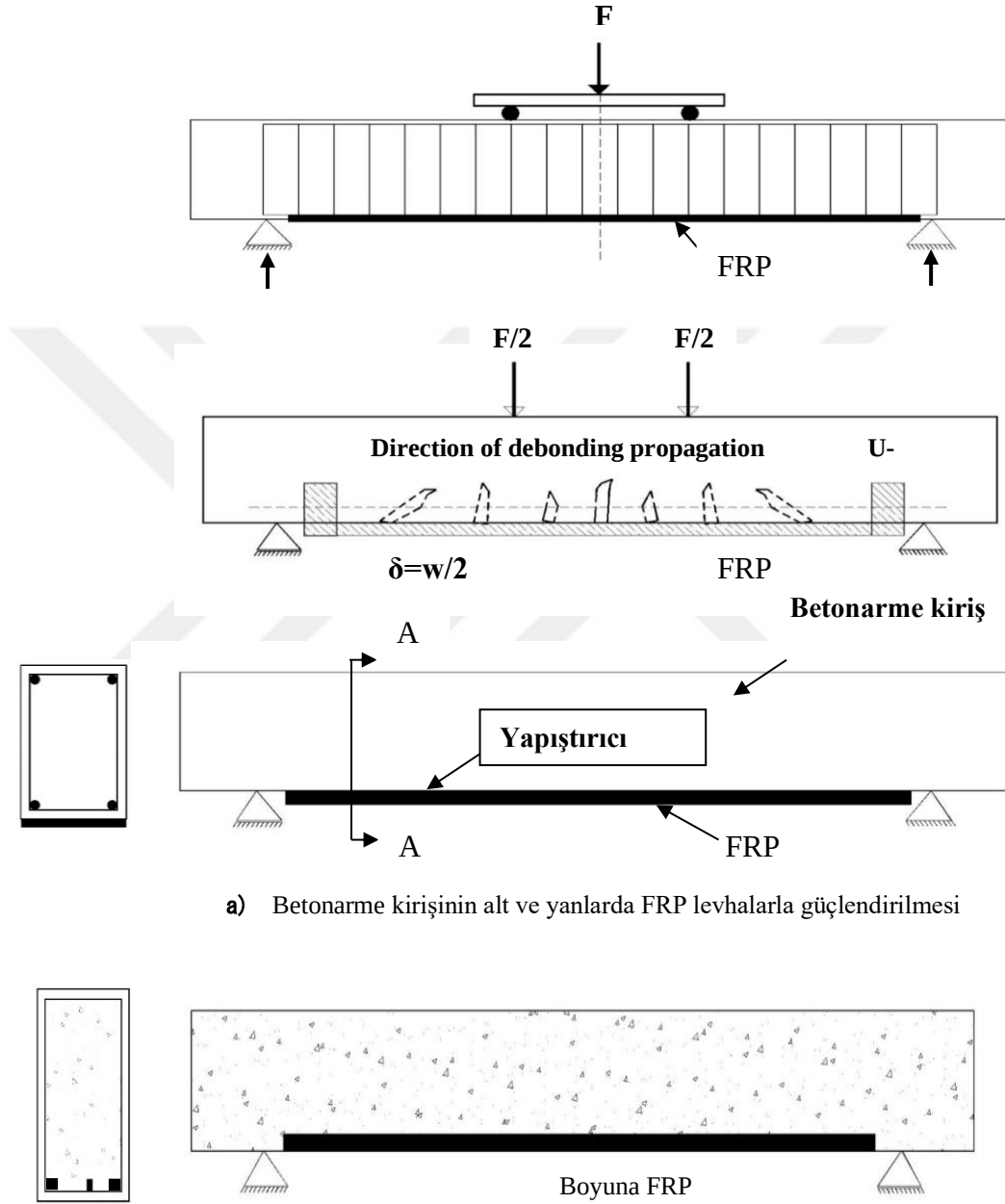
Eğilmede göçme türü, kiriş üzerindeki yükler eğilme kapasitesini aştığında ortaya çıkmaktadır. Betonarme kirişlerde eğilme göçmesi, kesme göçmesinden belirgin şekilde farklıdır. Betonarme kirişlerde eğilme göçmesi elastik bir nitelikte olmasına karşın kesme göçmesi kırılğan ve yıkıcıdır. Bu nedenle eğilme göçmesi daha az hasarlı kabul edilmektedir. Betonarme kirişlerin eğilme kırılması, çekme alanında dikey çatlaklar olarak da ortaya çıkar. Genel olarak eğilme göçmesi, çekme alanında çelik donatı eksikliği, betonarme kiriş uzunluğu ve betonun ezilmesinin sonucu olmak üzere çeşitli nedenlerle ortaya çıkmaktadır (Sarıbiyık, 2013).

###### **1.4.1.2. Betonarme Elemanların Eğilmeye Karşı Güçlendirilmesi**

Yapısal uygulama için FRP olarak iki şekilde kullanabiliriz.

- FRP'nin hasarlı yapısal elemanı güçlendirmek için uygulanan 1. Yol: Bir levha veya plaka olarak kullanımıdır. Betonarme kirişler alt yüzeyine ve kirişin boyuna yönünde tutturularak etkin bir şekilde güçlendirilebilir (Şekil 1.5a).

- Yol ise FRP'nin çelik donatı yerine betonarme elemanlarda donatı olarak kullanımındır (Şekil 1.5b).

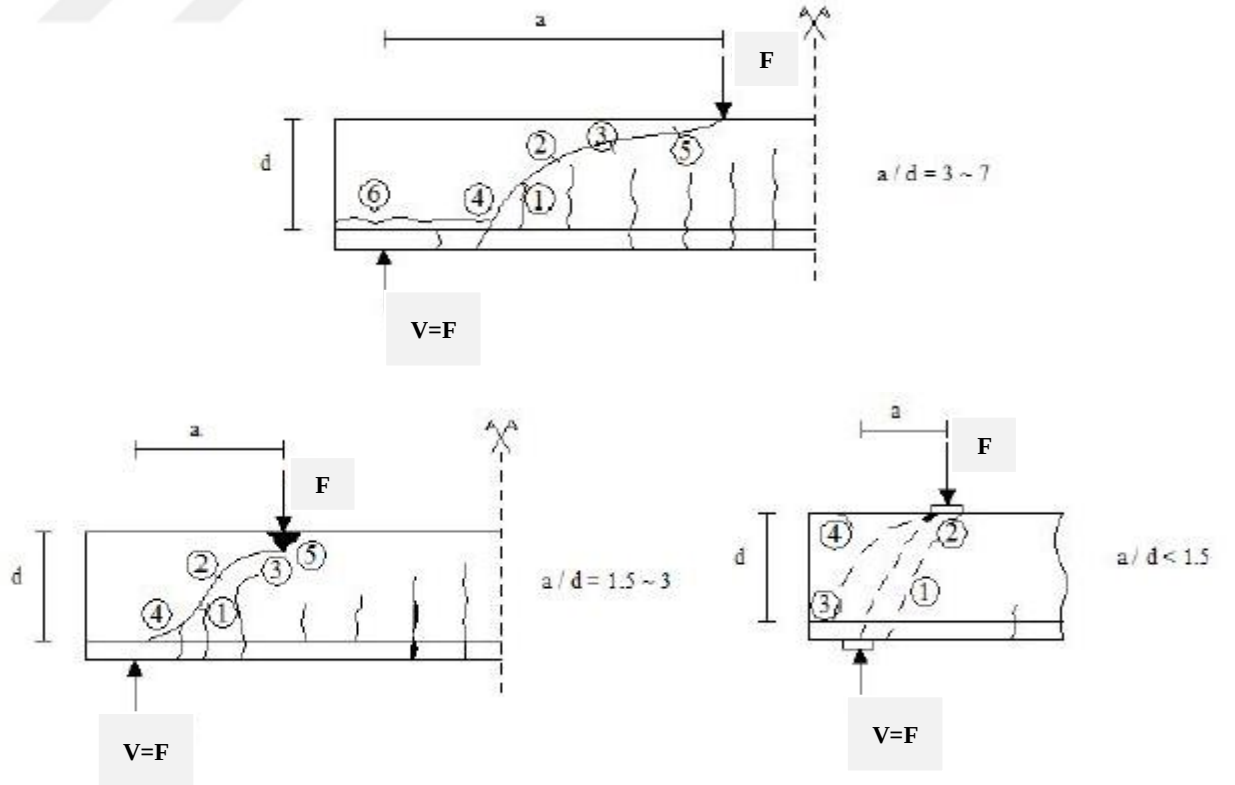


Şekil 1.5. Betonarme kirişlerin eğilmeye karşı FRP levha ve şeritlerle güçlendirilmesi

## 1.4.2. Kesmeye Karşı Güçlendirme Yöntemleri

### 1.4.2.1. Betonarme Elemanlarda Kesme Etkisi ve Davranışı

Beton içerdiği özellikler açısından yüksek basınç ve kesme dayanımı göstermektedir. Buna karşın çekme dayanımı ise bu değerlerle karşılaştırıldığında daha düşük olmaktadır. Basit kesme durumunda asal basınç ve çekme gerilmeleri kesme gerilmesine eşitlenir. Çekme dayanımının da düşük olması nedeniyle kırılma, gevrek bir şekilde çekmeden dolayı oluşur. Asal çekme gerilmeleri, kesme gerilme yüzeylerine  $45^\circ$ 'lik bir açı ile gelir. Kırılma sürecinde kirişin alt yüzünden üst yüze uzanan eğik çatlaklar asal çekme gerilmelerine dik olarak görülür. Bu çatlaklara eğik çekme çatlakları denmektedir. Dolayısıyla eğik çekme çatlaklarının oluşma sebebinin kesme gerilmesinden değil, asal çekme gerilmesinden olduğu görülmektedir. Bu durumdan ötürü alınması gereken önlemler asal çekme gerilmesine göre alınmalıdır. Asal çekme gerilmesinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının oluşumu Şekil 1.6'da gösterilmektedir (Ersoy, 2000).



Şekil 1.6. Asal çekme gerilmesinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının oluşumu (Ersoy,2000).

Beton malzemenin çekme dayanımının düşük olması nedeniyle kirişler aniden çöker ve kesme etkisi ile kırılma hale gelmektedir. Bu geçişi önlemek için standartlar ve yönetmelikler kirişlerde kesme donatısı yani etriyeler bulundurulmasını gerektirmektedir. Etriye donatısının kullanılmasıyla kiriş, sünek bir davranış gösterebilmektedir. Etriyeler, asal çekme gerilmelerinden dolayı oluşan eğik çekme çatlaklarının büyümesini ve artmasını engeller. Etriye donatısının önemini veya başka bir deyişle betonarme kirişin kesme etkisi davranışını anlayabilmek için birçok çalışmada kesme dayanımı yetersiz elemanlar test edilmiştir ve modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Kesme davranışının betonarme kirişler üzerindeki etkisini anlayabilmek için bu davranışı etkileyen faktörleri de bilmemiz gerekmektedir. Bu faktörlerden biri, kesme açıklığının (a) faydalı yüksekliğe (d) bölünmesiyle elde edilen (a/d) oranıdır. Kesme açıklığı (a), kiriş üzerindeki yükün destekten olan mesafesidir. Bu oran aralığında farklı dayanım, göçme ve çatlak oluşumları gözlenmektedir (Ersoy, 2000).

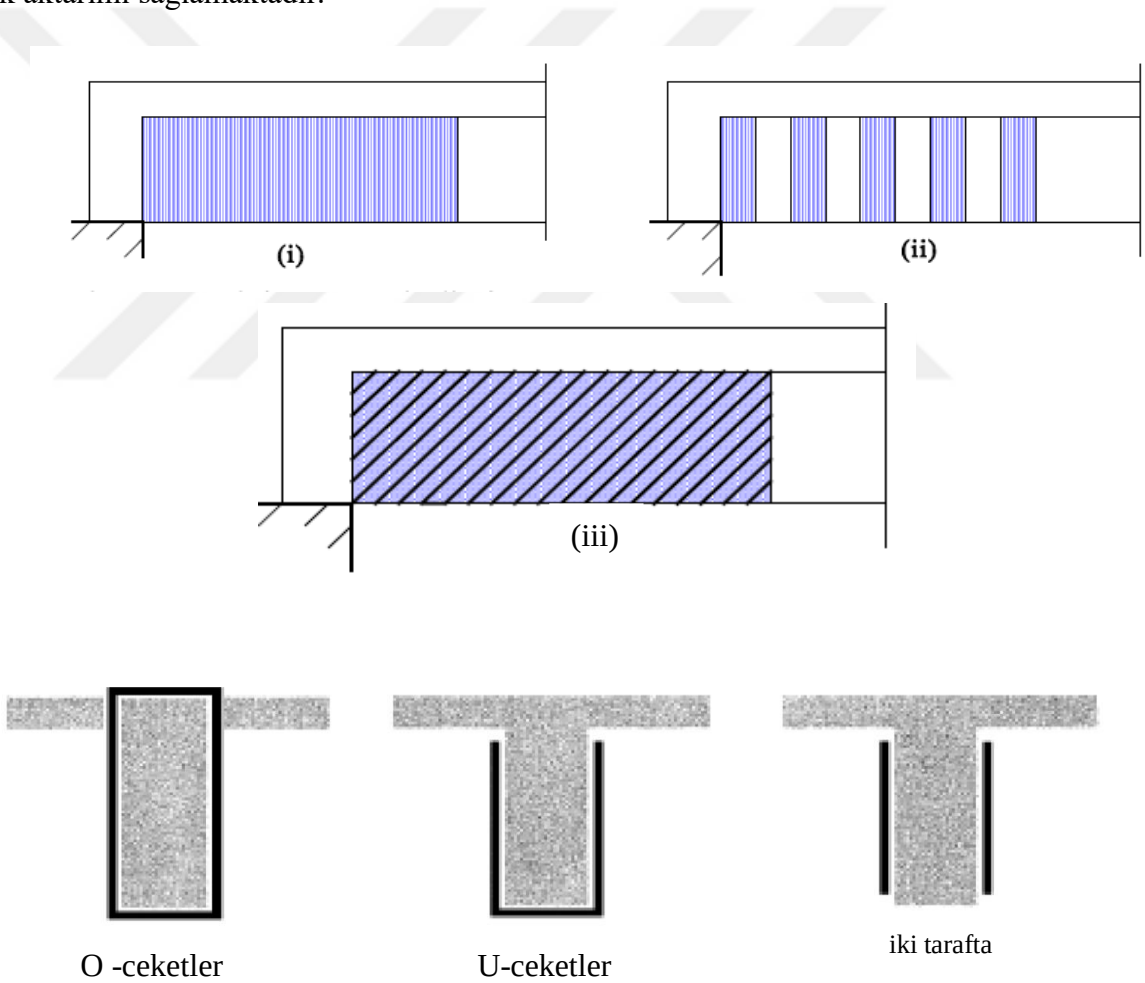
#### **1.4.2.2. Betonarme Elemanların Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi**

Türkiye, deprem kuşağındaki varlığı nedeniyle depreme maruz ülkelerden biri olarak kabul edilmektedir. Geçmişte yaşanan büyük çaplı depremler maalesef hala hafızalarda bulunmaktadır. Bu büyük depremlerde yaşanan can ve mal kayıpları inşaat mühendislerinin sorunu haline gelmiştir. Günümüzde deprem etkisi ile hasar gören yapılarda, proje veya yapının uygulama safhasında yapılan hataların onarılmasında, tarihi yapıların restorasyonunda, gelişen standart ve şartnamelere uyum sağlamak amacıyla onarım ve güçlendirme çalışmaları önem kazanmıştır. Betonarme yapılar rijitlik, süneklik ve dayanım gibi tasarım koşullarını sağlamak için çeşitli yöntemlerle güçlendirilmektedir. Ani ve gevrek olan kesme kırılması, yapı güvenliğinin sağlanması adına kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Bu kırılma şekli yerine sünek bir göçme için tasarımlar yapılmaktadır. Bu nedenle betonarme elemanların kesmeye karşı güçlendirilmesine yönelik çalışmalar her geçen gün artmaktadır.

Bugüne kadar yapılan çalışmalar ışığında betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi için birçok yöntemin geliştirildiği, çeşitli matematiksel yöntemler ve bilgisayar modellerinin test sonuçlarıyla desteklenmeye çalışıldığı görülmektedir.

Mantolama yöntemi, kelepçeleme yöntemi, kiriş yüzeylerine dıştan çelik plaka veya fiber takviyeli polimerler (FRP) uygulaması gibi yöntemler kullanılmaktadır.

FRP levhalarla güçlendirme çalışmaları son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum FRP levhalarının üstün özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Hafiflikleri nedeniyle elemana ve yapıya ek bir yük getirmemektedirler. Bu fiberler, artan yük sonucu beton elemanlarda oluşan çatlakları azaltmak ve dayanımı artırmak için kesim bölgesinde kullanılabilir (Şekil 1.7). Bu malzemeler, epoksi esaslı yapıştırıcılar ile betonarme elemanların yüzeylerine uygulanır. Bu yapıştırıcılar FRP'deki fiberleri bir arada tutar ve yük aktarımı sağlamaktadır.



Şekil 1.7. Kesme bölgesini güçlendirmek için polimerik fiberlerin kullanımı (Khalifa ve Nanni,2000)



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mevcut betonarme yapıların bozulma durumu, dünya çapında yapı mühendisleri için en büyük endişelerden biridir. Mevcut yapılara uygulanan yenileme stratejileri, rehabilitasyon ve komple değiştirilme yöntemlerinden oluşmaktadır. Bunlardan ikincisi büyük bir harcama ve zaman gerektirmektedir. Bu nedenle rehabilitasyon mevcut tek seçenektir. Fiber takviyeli polimerler (FRP), mevcut yapıların rehabilitasyonunda ve yeni yapıların güçlendirilmesinde gelecek vaat eden malzemelerdir.

Bu bölüm, epoksi esaslı FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler alanındaki mevcut literatürün kısa bir incelemesini sunmaktadır. Literatürde bildirilen başlıca yöntemler ve sonuçlar vurgulanmıştır.

Duthinh ve Starnes (2001) tarafından yapılan çalışmada, dört noktalı yükleme altında beton çatladıktan sonra uygulanan, içten çelikle ve dıştan karbon FRP laminantla güçlendirilmiş yedi betonarme kiriş test edilmiştir. Sonuçlar, FRP'nin eğilme güçlendirmesi için çok etkili olduğunu göstermiştir. Çelik miktarı arttıkça karbonun sağladığı ek dayanım azalmaktadır. Yalnızca çelikle yoğun şekilde takviye edilmiş bir kirişle karşılaştırıldığında hem çelik hem de karbon ile takviye edilmiş kirişler, gevrek kırılma modlarına rağmen yeterli deformasyon kapasitesine sahiptir. FRP laminantın uçlarının yapıştırılması, laminantın sabitlenmesinde etkili olmuştur.

Saaspik (2006), tarafından yapılan deneysel çalışmanın amacı, yetersiz kesme kapasitesi ile tasarlanmış basit mesnetli betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde GFRP kompozitlerinin etkinliğini araştırmaktır. Manuel yöntemler kullanarak, kesme kapasitesini artırmak ve felakete yol açabilecek erken göçme modellerinden kaçınmak için dokuma cam fiber kumaşın ardışık katmanları kesme açıklığı boyunca birleştirilmiştir. Güçlendirilmiş kirişler, ağ takviyesi olarak kapalı etriyeli kontrol kirişlerinin sonuçlarını kullanarak önerilen güçlendirme tekniğinin etkinliğini araştırmak için ağ takviyesi olmadan imal edilmiştir. Farklı kesme güçlendirme şemalarının ve değişken boyuna donatı oranlarının yapısal davranış üzerindeki etkisini ele alan 18 adet kirişin test sonuçları rapor edilmiştir. Sonuçlar, GFRP kaplamaların uygun şekilde uygulanmasıyla, yetersiz kesme kapasitesine

sahip kirişlerin genel yapısal davranışındaki kesme mukavemetinde önemli bir artış ve iyileştirmelerin sağlanabileceğini göstermiştir. Katmanların kendi ağırlığı altında kolayca aşağı kayabildiği gözlemlenmiştir.

Deblois ve ark. (1992), eğilme güçlendirmesi için tek yönlü ve çift yönlü cam fiber takviyeli polimer (GFRP) levhaların uygulanmasını incelenmiştir. 1000 mm uzunluğunda bir dizi betonarme kiriş, güçlendirilme ekledikten sonra test edilmiştir. Çift yönlü levhaların kullanılması nihai yükü %34'e kadar artırırken, tek yönlü GFRP yalnızca %18'lik bir artışa neden olmuştur. Bu mevcut çalışmanın yazarları, bu sonucun beklenmedik olduğunu düşünmek ve kullanılan FRP'nin tipi GFRP olduğunu onaylamıştır. Çift yönlü GFRP'nin kirişin kenarlarına ek olarak bağlanması, tek yönlü levhalarla taşınan yükü %58'e çıkarmış. Çalışma programını ilerletmek için Deblois ve ark. (1992) 4100 mm uzunluğunda bir betonarme kirişin alt kısmına çift yönlü bir GFRP levhasını epoksi ile bağlamış ve plaka uçlarından ek ankraj olarak cıvatalar kullanmıştır. Maksimum yük, kaplanmamış kontrol kirişine göre %66 artmıştır. Tüm testler için GFRP uygulamasının kirişin sünekliğini azalttığı kaydedilmiştir.

Sarıbıyık (2018), yaptığı çalışmada aynı boyutlarda üretilen silindirik betonların fiber Takviyeli Polimer (FRP) Kompozitler ile güçlendirilmesinde sargı katman sayısı, fiber türü ve farklı tür fiberin hibrit olarak kullanımının etkisi araştırmıştır. Aynı şartlarda üretilmiş, ortalama 30,25 MPa basınç dayanımına sahip betonlar tek doğrultulu karbon ve cam fiber kumaşlarla enine birer, ikişer ve üçer kat halinde sarılarak ve ayrıca cam ve karbon kumaş hibrit olarak sarılarak güçlendirilmiştir. Beton numuneler eksenel yük altında sabit hızlı yükleme ile test edilmiştir. Fiber sargı katman sayısının, türünün ve hibrit kullanımının betonun davranışına etkileri karşılaştırılarak incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, sargı katmanını arttıkça betonun basınç dayanımı ve deformasyon kabiliyetinin arttığı görülmüştür. Ayrıca hibrit olarak güçlendirmenin tekil güçlendirmeye göre daha etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Ghazi ve ark (1994) tarafından yapılan çalışmada, bağlayıcı cam fiber levhaları (FGPB) ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme onarımı, çeşitli nedenlerden dolayı

yapısal ve yapısal olmayan çatlama davranışı için incelenmiştir. Bu çalışmada, yetersiz kesme dayanımına sahip ve büyük diyagonal çekme çatlakları gösteren betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerine yapılan bir incelemenin sonuçları sunulmuştur. Kesme dayanımı yetersiz olan kirişler, önceden belirlenmiş bir seviyede (ilk kesme çatlağının görünümü) hasar görmüş ve daha sonra cam fiber levha bağlama (FGPB) teknikleri ile onarılmıştır. Kirişlerin kesme kapasitesini yükseltmek için FGPB kullanan farklı kesme onarım şemaları, yani FGPB'nin kesme şeritleri, kesme kanatları ve kirişlerin kesme açıklığında U-ceketler ile onarımı kullanılmıştır. Çalışma sonuçları ayrıca FGPB tarafından kesme kapasitesindeki artışın hem şerit hem de kanat kesme onarımları için hemen hemen aynı olduğunu göstermektedir. Ancak bu artışına rağmen, bu iki şema ile onarılan kirişlerin eğilmede başarısız olmasına neden olmak için yeterli değilmiş.

Chaallal ve ark, (1998), harici olarak bağlanmış fiber takviyeli plastik (FRP) plakalarla güçlendirilmiş betonarme eğilme kirişleri ve tek yönlü döşemeler için kapsamlı bir tasarım yaklaşımını incelemiştir. Yaklaşım, Kanada Beton Standardı ile uyumludur. Bu, eğilme güçlendirmesi ve kesme güçlendirmesi olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, iki kırılma modu ailesi için analitik modeller sunulmuş: Betonun basınç altında ezilmesi ve laminantın çekme kırılması gibi klasik modeller, plakanın ayrılması ve beton örtülmenin yırtılması gibi erken modlar. Bu modeller, deformasyonların uyumluluğu ve kuvvetler dengesinin ortak ilkelerine dayanmıştır. İkinci bölümde, dikey şeritler, eğimli şeritler, kanatlar ve U-levha ceketler olmak üzere dört adet sargılama modeli için kesme yanal FRP plaka veya şeritlerinin gerekli kesit alanının hesaplanmasını sağlamak için tasarım denklemleri türetilmiştir.

Grace ve ark. (1999) tarafından yapılan deneysel çalışmada, çeşitli fiber takviyeli polimer (FRP) laminantlarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışı sunulmuştur. Deney programı 14 basit mesnetli dikdörtgen kesitli kirişin güçlendirilmesini ve test edilmesini içermektedir. Kiriş başlangıçta çatlama yükünün üzerinde yüklenmiştir. Çatlak kirişler FRP laminantlarla güçlendirilmiş ve daha sonra tamamen hasarlı olana kadar test edilmiştir. Çeşitli karbon/cam fiber takviyeli polimer (CFRP/GFRP) güçlendirme malzemelerinin mevcut beş güçlendirme sistemi kullanılmıştır. Bu malzemeler iki tip

CFRP levhası, iki yönlü ve tek yönlü GFRP levhaları ve CFRP levhaları içeriormuş. Güçlendirmenin sehim, kırılma yükü ve kırılma modu, gerilme ve kiriş sünekliği üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Ayrıca, farklı sayıda FRP katmanının, epoksi tipinin ve güçlendirme modelinin kirişlerin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hasarlı durumunda absorbe edilen enerjinin toplam enerjiye oranı veya enerji oranı, kiriş sünekliğinin bir ölçüsü olarak kullanılmıştır. Boyuna tabakalara ek olarak, kiriş kesiti etrafında U-şekli oluşturan dikey yönde yönlendirilen liflerin kiriş sehimlerini önemli ölçüde azalttığı ve kiriş yük taşıma kapasitesini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, tüm açıklık uzunluğu boyunca dikey FRP levhaların mevcudiyeti, uzunlamasına levhaların kopma potansiyelini ortadan kaldırmaktadır. Uygun bir epoksi ile birlikte dikey ve yatay levhaların kombinasyonu, kirişin nihai yük taşıma kapasitesinin iki katına çıkmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte tüm güçlendirilmiş kirişler, tasarımda daha yüksek bir güvenlik faktörünü zorunlu kılan gevrek bir kırılma göstermiştir.

Saadatmanesh ve Ehsani (1990, 1991) tarafından yürütülen projede, 4570 mm açıklığında beş adet dikdörtgen kiriş ve bir adet T-kiriş, dört nokta eğilmede kırılmaya karşı test edilmiştir. Tüm kirişler, epoksi yapıştırıcı ile betona yapıştırılmış 6.0 mm kalınlığında bir GFRP levha ile güçlendirilmiştir. Kirişlerde çekme donatısı olarak üç farklı donatı oranı kullanılmıştır. Kirişlerin çoğu, erken kesme kırılmasını önlemek için kesme için aşırı tasarlanmıştır. Testler, çeliğin aktığı dış yükte önemli artışların ve eğilme mukavemetinde bir artışın, GFRP levhalarının betonarme kirişlerin çekme yüzeyine yapıştırılmasıyla elde edilebileceğini göstermiştir. Nihai eğilme mukavemetindeki kazancın, daha sonra Hutchinson ve Rahimi (1996) tarafından belirtildiği gibi, düşük çelik takviye oranlarına sahip kirişlerde önemli olduğu bulunmuştur. Ayrıca kaplama, tüm yük seviyelerinde kirişlerdeki çatlak boyutunu azaltmıştır. Test edilen kirişlerin birçoğu için, betonun levha ile iç çelik donatı arasındaki ani boyuna kesme göçmesinin bir sonucu olarak göçme meydana gelmiştir. GFRP levhalarının eklenmesiyle kirişlerin sünekliği ve kırılmadaki eğrilik azalmasına rağmen eğilme sertliği artmıştır.

Sameer ve ark (2018) tarafından yapılan çalışmada, Cam fiber Takviyeli polimer kullanılarak Betonarme kirişlerin eğilme ve kesme davranışını incelemek için deneysel

araştırma yapılmıştır. Kirişler, epoksi reçineler kullanılarak 1.2 mm Epoksi Bağlanmış Cam fiber Takviyeli Polimer ((GFRP)) laminasyonu ile güçlendirilmiş ve simetrik iki noktalı bir yükleme sistemi kullanılarak hasarlı duruma getirilmiştir. Kirişin güçlendirilmesi (GFRP) laminatın farklı kombinasyonları ile yapılmıştır. Bu çalışmada, 150x150x1000 mm boyutlarında toplam 9 adet kiriş dökülmüştür. Başlangıçta 3 kiriş referans olarak seçilmiş ve kalan 6 kiriş, U-sargı, Alt Sargı ve Yan U-sargı gibi farklı (GFRP) laminant kombinasyonları ile güçlendirilmiştir. Her bir kiriş için karşılık gelen yük ve karşılık gelen sehim kaydedilmiş ve her kirişin yük sehim davranışı, ilgili kontrol kirişlerinininkiyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, polimerik fiberlerin kullanımının dayanıklılığı arttırmada büyük bir etkinliğe sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Pampanin ve ark. (2005), FRP kompozit kullanılarak güçlendirilen mevcut betonarme çerçeve sistemlerine yönelik performans dayalı sismik güçlendirme stratejisini ve FRP kompozit malzemeleriyle yapılan bir güçlendirme müdahalesinin kiriş-kolon mafsala harici olarak bağlanmış takviye şeklinde etkilerini incelemişlerdir. Kiriş-kolon birleşme yerlerinden alınan numuneler ve üç katlı çerçeve sistemleri üzerinde yapılan sadece yerçekimi yükü için tasarlanan ve sonradan cam fiber takviyeli polimer (CFRP) katmanlarla donatılan yarı statik testlerin deneysel sonuçları, mevcut binalar için benzer çözümlerin verimliliğinin çok tatmin edici olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, plastik menteşenin FRP ile sarılması, plastik mafsal bölgesindeki beton tabakanın erken kırılmasını ve dağılmasını önlemiştir. Bu uygulama mukavemet bozulması, uzunlamasına çubukların burkulması ve neticedeki çökmeleri engelleyerek uygun bir sargılama etkisi sağlamıştır.

Razaqpur ve Tolba (2007), yaptıkları çalışmada betonarme paneller cam fiber takviyeli polimer (GFRP) kompozit ile güçlendirilmiş, darbe yüküne maruz kalan levhaların davranışları incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada, 1000-1000-70 mm ebatlarında, 40 MPa dayanıma sahip betondan imal edilmiş üst ve alt çelik tellerle takviye edilmiş sekiz adet panel incelenmiştir. Neticede, harici GFRP katmanların, membran hareketini geliştirmek ve panellerin daha fazla yüke dayanmasını sağlamak için gerekli olan yüzeyde gerilme kuvvetini sağlayabildiğini tespit etmişlerdir. Deneysel test sonuçları, darbe yüküne

dayanma anlamında, GFRP takviyeli panellerin güçlendirilmemiş panellere kıyasla daha iyi performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, güçlendirilmiş panelin statik darbe yükü dayanımı, güçlendirilmemiş panellere kıyasla %75 daha yüksek elde edilmiştir.

Bedirhanoğlu ve ark. (2008) FRP levhaları ile kiriş-kolon ek yerlerinin sismik güçlendirilmesini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, dört adet tam ölçekli kiriş-kolon ek yeri alt düzeneğini, tersinir tekrarlanır yük altında test etmişlerdir. Test sonuçları, hasar gelişimi, göçme modelleri, dayanım ve sertliğin bozulması, enerji dağıtımı gibi histeretik davranış özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonunda, FRP takviyeli numuneler için hem ek yerinin kesme mukavemeti hem de yükleme döngüleri sırasında enerji yayılımı açısından önemli ölçüde daha yüksek performans elde edilmiştir.

Balamuralikrishnan ve Jeyasehar (2009), yaptıkları çalışmalarında karbon fiber takviyeli Polimer (CFRP) kumaşların betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. 10 adet kiriş eleman üretmişler ve kirişleri 3 m'ye kadar aralık boyunca monotonik ve döngüsel yükler altında test etmişlerdir. Kirişleri, sonlu elemanlar metoduyla (FEA) ANSYS programını kullanarak analiz etmişlerdir. Deneysel ve analitik sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, kontrol numunelerinin nihai yük seviyesinde, güçlendirilmiş kirişlerin sapmanın yüzde 80'e kadar azaldığını, tek katmanlı ve iki katmanlı güçlendirilmiş kirişlerin, kontrol numunelerine kıyasla eğilme mukavemetinde yüzde 20 ila yüzde 45 oranında bir artış gösterdiğini ortaya koyarken, deneysel ve sayısal veriler (ANSYS) arasında yakın bir ilişki olduğu bulunmuştur.

Kim ve Vecchio (2008), fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme çerçevenin kesme davranışını tespit etmek için kullanılan sonlu elemanlar analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Tek açıklıklı ve iki katlı yüksekliğe sahip büyük ölçekli bir betonarme çerçevesi imal etmişler ve yanal yük koşulları altında test etmişlerdir. Çerçeve, başlangıçta kesme kuvveti altında ağır hasar görmüş, FRP sargısı ile onarılmış ve daha sonra tersinir tekrarlanır yük rejimine tabi tutulmuştur. Çalışmalarının sonunda yanal tersinir tekrarlanır yük altında zorlanan FRP kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme çerçevelerinin göçme analizi için sonlu eleman bazlı yöntemlerin kullanılmasını

sağlayan malzeme ve yapısal modelleme kavramlarını ortaya koymuşlardır. Önerilen modelleme yöntemlerine göre, daha önce test edilmiş tek açıklıklı iki katlı kesme kritik betonarme çerçevesinin davranışını değerlendirmek için doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar analizi (FEA) yapmışlardır. Histeretik tepki, hasar modu, çatlak paterni ve çerçevenin deformasyonu için analitik ve deneysel sonuçlar arasında ayrıntılı bir karşılaştırma yapmışlardır. Neticede, FRP-onarılmış kesme-kritik yapıların davranışının makul derecede doğru simülasyonlarının sonlu elemanlar modellemesi ile elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Paul ve Sahu (2020), yaptığı çalışmada ABAQUS sonlu eleman yöntemi kullanılarak sekiz betonarme kirişin analizi gerçekleştirilmiştir. Tüm kirişler, simetrik dört noktali sabit yükleme sistemi altında test edilmiştir. Kirişler aynı dikdörtgen kesite sahip, ancak güçlendirmek için kullanılan CFRP'nin uzunluğu farklıdır. ABAQUS ticari sayısal analiz aracı kullanılmış ve kiriş davranışını tanımlama yetenekleri açısından farklı malzeme modelleri değerlendirilmiştir. CFRP için doğrusal elastik izotropik ve ortotropik modeller kullanılmış ve beton CFRP arayüzü için mükemmel bir bağ modeli kullanılmıştır. Beton için plastik hasar modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları, yük-yer değiştirme tepkisi, çatlak modeli ile ilgili deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiştir. CFRP için elastik izotropik ve ortotropik modeller arasında önemli bir fark yoktur. Sonuçlar, eğilme güçlendirme işleminde CFRP'nin uzunluğu arttığında, kirişin yük kapasitesinin de arttığını göstermiştir.

Anıl ve arkadaşları (2011) tarafından yapılan çalışmada CFRP şeritler ile güçlendirilmiş kesme hasarlı betonarme kirişlerin kesme dayanımlarındaki ve süneklik düzeylerindeki artışın incelendiği deneysel bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Çalışmada hedeflenen amaç kesme hasarlı betonarme kirişleri sünek eğilme davranışı sergileyecek düzeye çıkartmaktır. Deneysel çalışma kapsamında T kesitli, ½ ölçekli, 7 adet basit mesnetli kiriş deney elemanı üretilmiştir. Bir deney elemanı güçlendirilmeden referans elemanı olarak test edilmiş, kalan 6 adet deney elemanı U şeklinde ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Çalışmada üç farklı CFRP şerit aralığı seçilmiştir ( $s_f=125$  mm, 150 mm, 200 mm). CFRP şeritlerin uçlarındaki ankrajların betonarme kirişlerin kesme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ankrajsız CFRP

şeritler ile güçlendirilen deney elemanlarında kesme kapasitelerinin artış gösterdiği, ancak sünek eğilme davranışı sergileyecek düzeye çıkamadıkları görülmüştür. Deney elemanları CFRP şeritlerin beton kiriş yüzeyinden soyulması ile gevrek kesme kırılması sergileyerek göçmüşlerdir. Ankrajlı CFRP şeritler ile güçlendirilen deney elemanlarında kesme dayanımı önemli oranlarda artmış ve süneklik düzeyi de artarak deney elemanları sünek eğilme davranışı sergilemişlerdir. Ankrajsız ve ankrajlı CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyon değerleri karşılaştırıldığında ankrajlı CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında değerlerin %44 daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Deniaud ve Cheng (2001), betonarme kirişlerde kesme yüklerinin taşınmasında beton, çelik sargı demirleri ve harici fiberle takviyeli polimer (FRP) levhaların etkileşimine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 600 mm yüksekliğinde sekiz T-kirişi test etmişlerdir. Yapılan test sonucu, FRP takviyesinin, FRP içermeyen kirişlere kıyasla maksimum kesme mukavemetini %77'den %117'ye kadar çıkardığını göstermiştir.

Mofidi ve Chaallal (2014), harici olarak bağlanmış FRP levhalar ve şeritleri kullanarak kesmede güçlendirilmiş betonarme kirişlere FRP'nin kesme katkısı üzerindeki etkili parametreleri deneysel ve analitik olarak vurgulamışlardır. Çalışmalarının deneysel bölümünde 4520 mm uzunluğunda T-kirişleri üzerinde 12 adet test yapmışlardır. Numuneler, karbon FRP (CFRP) şeritler ve tabakalar kullanarak kesme yüküne karşı güçlendirmişlerdir. Test değişkenleri:

- (1) Etriye donatısının varlığı veya yokluğu,
- (2) FRP levhaların FRP etriyelere karşı kullanımı ve harici olarak bağlanmış FRP takviyesinin eksenel sertliğidir.

Çalışmalarının analitik bölümünde, FRP'nin kesme katkısı üzerindeki diğer etkili parametrelere ek olarak enine donatısının etkisini dikkate almak için yeni tasarım denklemleri önermişlerdir. Bu çalışmada önerilen denklemlerin doğruluğu, deneysel olarak test edilen betonarme kirişlerin FRP kesme katkısı tahmin edilerek doğrulanmıştır.

Meikandaan (2017), yaptığı çalışmada 6 kirişin eğilmeye karşı güçlendirilmesini incelemiştir. Tüm kirişler eğilmede zayıftır ve aynı donatı detayına sahiptir. Kontrol



kirişleri olarak üç kiriş kullanılmış ve üç kiriş, cam fiber polimer (GFRP) levhalar kullanılarak güçlendirilmiş. Deneysel sonuç, %70 önceden yüklenmiş kirişe tam tabanlı GFRP levha sarmanın, kontrol kirişlere kıyasla kirişin eğilme kapasitesini (nihai yükte) %14 artırabildiğini göstermiştir.

Karna (2012), çalışma simetrik dört noktalı statik yükleme sistemi altında cam fiber takviyeli polimerler (GFRP) ile sonradan güçlendirilmiş betonarme T-kirişlerin deneysel sonuçlarını içermektedir. Erken göçmeleri önlemek için yenilikçi bir ankraj tekniği yöntemi kullanılmıştır, bu da FRP'nin gücünün tam olarak kullanılmasını sağlamıştır. Mevcut çalışmada gösterilen test sonuçları, GFRP kompozitleri ile dış güçlendirmenin, betonarme T-kirişlerin kesme kapasitesini arttırmak için kullanılabileceğini, ancak verimin, fiber yönelimleri, sargılama şemaları, katmanlar ve ankraj şeması sayısı gibi test değişkenlerine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.

Abdul Aziz ve ark. (2012), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) şeritlerin betonarme T-kirişler için bir güçlendirme çözümü olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Özellikle, harici olarak uygulanan CFRP malzemelerinin betonarme kirişlerin kesme performansı üzerindeki etkisini inceleyen araştırmaları rapor etmişlerdir. Araştırmalarının sonucunda kesme çatlağının tek yönlü fibere göre ana yönlerinin dikkate alınmasının önemli olduğunu gözlemlemişlerdir.

Alferjani (2015), çalışmasında betonarme sürekli kirişlere yapıştırılmış iki yönlü elastik karbon fiber takviyeli polimer levhaların şeritlerle güçlendirme üzerine bir test programının sonuçlarını sunmuştur. Çalışma kapsamında 150x320x3650 mm ebadında, flanş genişliği=400mm ve flanş kalınlığı=120mm olan beton kirişlerden oluşan toplam üç kiriş test etmiş ve kirişlerin nihai kesme mukavemeti ve kesme kapasitesi üzerindeki etkilerini belirlemek için çeşitli levha konfigürasyonları ve düzenleri incelemiştir. Test sonuçlarından, tüm şemaların betonarme kirişlerin kesme mukavemetinin artırılmasında etkili olduğunu bulmuştur. Betonarme sürekli T-kiriş için en etkili mukavemeti sağlayan levha tabakalarının sayısı ile mukavemetin arttığını gözlemlemiştir. Bu şema kullanılarak

güçlendirilen kirişin, kontrol kirişine kıyasla kesme kapasitesinde % 23.21 artış olduğunu belirlemiştir.

Oller ve ark. (2019), farklı konfigürasyonlara sahip CFRP levhalar ile kesmede güçlendirilmiş kirişlerin performansını incelemek ve her malzemenin (beton, donatı ve CFRP levhalar) harici olarak bağlanmış FRP ile güçlendirmenin kesme mukavemetine katkısını ölçmek amacıyla bir deneysel program geliştirmişlerdir. Test edilen kirişler, gerçek bir döşemeyi simüle etmek için T şeklinde bir enine kesite sahiptir. Her iki parametrenin etkisini incelemek için iki farklı miktarda boyuna iç takviye ve farklı CFRP takviye oranları kullanmışlardır. Deney programı, T şeklinde bir kesite sahip 10 tam ölçekli betonarme kirişten oluşmaktadır.

Touhari ve Mitiche-Kettab (2016), çalışmalarında eksenel yüke maruz kalan FRP sargılı beton silindirlerin davranışını araştırmışlardır. Çalışma kapsamında 2 tip FRP kompozit sargılı, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) içeren toplam 54 FRP beton silindir, monotonik eksenel yük altında test edilmiştir. Beton mukavemeti, FRP kompozit tipi ve FRP tabaka sayısı gibi birçok parametrenin etkilerini araştırmışlardır. Basınç dayanımı ortalaması 26, 40 ve 60 MPa olan üç farklı beton karışımını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda CFRP takviyeli silindirlerin GFRP ile güçlendirilmiş olanlara kıyasla, basıncında önemli bir artış sağladığını tespit etmişlerdir.

Chajes ve ark. (1995), tarafından yapılan çalışmada, kompozit dış kumaşlar kullanılarak betonarme kirişlerin kesme takviyeleri üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, kiriş kesme kapasitesini artırma yöntemi olarak harici olarak uygulanan kompozit kumaşlar kullanılarak 12 takviyeli betonarme T-kiriş test edilmiştir. Aramid, E-cam ve karbon fiberlerden yapılmış kompozit kumaşlarının ağına, bir epoksi kullanılarak ile T-kirişleri bağlanmış. Çeşitli kumaş sertliklerinin ve mukavemetlerinin çalışılabilmesi için üç farklı kumaş seçilmiştir. Kirişler eğilmede test edilmiş ve harici kesme takviyeli sekiz kirişin performansı, harici takviyesiz dört kontrol kirişinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tüm

kirişler kesmeden kırılmış ve kompozit donatıya sahip olanlar mükemmel bağ özellikleri sergilemiştir. Dış takviyeli kirişlerde nihai dayanımda %60-150 artış sağlanmıştır.

Khalifa ve ark. (2000), T-kesitli betonarme kirişlerin kesme performansını incelenmiştir. Deneysel program altı tam ölçekli, basit mesnetli kirişten oluşmaktadır. Bu çalışmada incelenen parametreler, sarma şemalarını, CFRP miktarını,  $90^{\circ}/0^{\circ}$  kat kombinasyonunu ve CFRP uç ankrajını içermektedir. Deneysel sonuçlar, dışarıdan bağlanan CFRP'nin kirişin kesme kapasitesini önemli ölçüde artırabildiğini göstermektedir. Ek olarak, sonuçlar en etkili konfigürasyonun uç ankrajlı U-sargı olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, önerilen tasarım yaklaşımının tutucu ve kabul edilebilir olduğunu göstermiştir.

Khalifa ve ark. (2000), dış olarak bağlanmış karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) sargılarla güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme performansını ve kırılma modlarını incelenmiştir. Deneysel program, yirmi yedi, betonarme kirişin test edilmesinden oluşmaktadır. Araştırma programının bir parçası olarak, deneysel çalışma, negatif, pozitif moment bölgelerinde, dikdörtgen ve T-kesitli kirişler için betonarme kirişlerin kesme kapasitesini arttırmada CFRP takviyesinin etkinliğini incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, dıştan bağlanmış CFRP'nin kesme kapasitesine katkısının önemli olduğunu ve araştırılan değişkene bağlı olduğunu göstermiştir.

Panda ve ark. (2013), tarafından yapılan çalışmada, farklı konfigürasyonlarda ve yönlerde cam fiber takviyeli polimer (GFRP) şeritlerle güçlendirilmiş basit mesnetli betonarme T-kirişlerin kesme performansına odaklanılmıştır. 2,5 metre uzunluğunda on sekiz T-kirişi test edilmiştir. Çalışma sırasında kontrol ışını olarak dokuz ışın kullanılmıştır. Etriyeleler, 200 mm ile 300 mm arasında bir boşlukla, örneğin yolcusuz olmak üzere üç farklı mesafede sağlanmıştır. Diğer dokuz kiriş, güçlendirilmiş kirişler olarak kullanılmıştır. GFRP şeritler, her etriye aralığı için kirişin uzunlamasına eksenine  $45^{\circ}$  ve  $90^{\circ}$  'de iki çeşit şerit yönü ile U-şekilli ve profil kesme bölgesinde bağlanmıştır. Deneyler sonuunda, GFRP - takviyeli kirişin yönünde olduğunu göstermektedir. Kirişin boyuna eksenine  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  yönünden daha etkilidir.

Galal ve Sekar, (2008), yapmış oldukları çalışmada ters T -kesitli 8 adet prekast köprü kirişlerinin CFRP şeritler ve ankrajlar kullanılarak güçlendirmişlerdir. Kirişlerde 4 nokta yüklemesi uygulanmıştır. Elemanlarda sünek olmayan davranışın önüne geçilmeye çalışılmıştır. Test sonuçlarında amaçlanan sünek davranış elde edilmiştir. Test elemanlarının süneklik oranı ve kesme mukavemeti de artmıştır. Ankrajlı elemanların süneklik ve kesme kapasitesi açısından ankrajsız elemanlara göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Issa (2016), tarafından yapılan çalışmada, hibrit fiber takviyeli polimer (HFRP) laminantlarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını incelemek için yürütülen deneysel bir program sunmaktadır. Program, toplam boyutları 460 x 300 x 3250 mm'ye eşit olan on iki T-kirişten oluşmaktadır. Kirişler, eğilme davranışını incelemek için hasarlıya kadar döngüsel yükleme altında test edilmiştir. En iyi güçlendirme şemasını belirlemek için kirişlere karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve cam fiber takviyeli polimer (GFRP) laminantların farklı takviye oranları, fiber yönleri, yerleri ve kombinasyonları eklenmiştir. Farklı yüzdelerde çelik takviye de kullanılmıştır. Beton, çelik ve FRP'nin gerilme- şekil değiştirme özelliklerine dayalı analitik bir model benimsenmiştir. FRP ve HFRP laminantlarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin önerileri ve tasarım yönergeleri tanıtılmıştır. Sonuçlar, özellikle birlikte kullanıldığında karbon fiberler ve cam fiberlerin kullanımının etkinliğini kanıtlamıştır.

Hussien ve ark. (2018) tarafından hazırlanan çalışmada, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme yüküne karşı davranışı ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir. Düşük dayanımlı beton, yetersiz eğilme ve kesme donatıları kullanılarak üretilen dikdörtgen kesitli betonarme kirişler, tek yönlü karbon kumaşlar enine ve boyuna yönlerde yönlendirilerek U şeklinde güçlendirilmiştir. Dört nokta eğilme testi ile test edilen kirişlerin eğilme davranışı, Sonlu Elemanlar Metodu (ABAQUS Programı) ile belirlenmiş ve doğrulanmıştır. ABAQUS programında gerekli olan parametreler deneysel çalışmalardan, literatürden, modellemede yaygın olarak kullanılan bazı temel formüllerden ve ürün kataloglarından elde edilmiştir. ABAQUS paket programına gerekli parametreler girilerek betonarme kiriş modeli oluşturulmuştur. Betonarme kirişin davranışı doğrulanarak CFRP takviyeli kirişler

modellenmektir. ABAQUS'te CFRP kompozitler, kirişin alt ve yan yüzeylerinde kabuk elemanlar olarak tanımlanmıştır. Ağ (mesh) boyutu ve geometrik şekil, genleşme açısı gibi model parametrelerinin betonarme kirişin davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre betonarme kiriş için en uygun parametreler belirlenmiştir. Oluşturulan model, deneysel çalışmadan elde edilen yük-sehim grafikleri ile ABAQUS sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Laboratuvar sonuçlarının ABAQUS programı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarıyla büyük ölçüde yakınsadığı kaydedilmiştir.

Wegian ve Abdalla (2005), yaptıkları çalışmada 7 kirişin kesmeye karşı güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışmada 3 kiriş GFRP, 2 kiriş CFRP ve 2 kiriş FRP çubukları ile güçlendirilmiş ve test edilen numunelerde GFRP, CFRP ve FRP çubukları karşılaştırmaları yapılmıştır. Test sonuçlarında, FRP ile güçlendirilmiş numuneler, standart etriye kirişlerine göre daha fazla kesme kapasitesi sağlamıştır. FRP ile güçlendirilen numuneler en iyi sonuçları vermiş ve ACI 440'da belirtilen değerlerden daha yüksek kesme kapasitesi elde edilmiştir.

Aksoylu (2021) hasarsız kesme kirişlerinde yeni bir güçlendirme alternatifini uygulayarak literatüre bir ilk olarak katkı sağlamıştır. Çalışmada kesme yönünden yetersiz olan betonarme kirişler mekanik dikiş (Mechanical stitches/MS) adı verilen yeni bir uygulama ile güçlendirilmiştir. Bunun için MS'lerin etkisini görmek üzere münferit bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada yerleşimi yapılan MS'ler referans kirişte oluşan kesme hasarı dikkate alınarak ve bu hasarın engellenmesine yönelik sistematik yerleştirilmiştir. Çalışmada üretilen kirişlerden biri referans diğer üçü ise farklı tip güçlendirme yöntemleri ile güçlendirilerek karşılaştırılmıştır. Çalışmadaki amaç lifli polimer malzemeler içerisinde en ucuz maliyete sahip olan GFRP ile yeni bir teknik olan MS'lerin karşılaştırılması sonucu güçlendirme performansı/maliyet etkisini görmektir. Bunun için kiriş numuneleri üretiminde TBDY-2018'e uygun boyuna donatı kullanılmıştır. Çekme bölgesine B420c tipi nervürlü 3Ø12 ( $p=0.0117$ ) ve basınç bölgesine 2Ø8 ( $p'=0.00347$ ) montaj donatısı yerleştirilmiştir. C35 beton ve B420c donatı sınıfı için kirişler üretilmiştir. Kirişlerin tasarımında dikkate alınan donatı oranı minimum donatı oranından fazladır. Ayrıca boyuna donatılar denge altı sünek tasarıma uygun seçilmiştir. Enine

donatılar nervürlü Ø6/350 cm olarak uygulanmıştır. Etriye kancaları ise yaygın ve yönetmeliğe aykırı olarak 90° olarak bükülmüştür. Güçlendirmeler sırasıyla Mekanik dikişler (MS), Cam fiber kompozit kumaşlar (GFRP) ve bu ikisinin hibrid (GFRP ve MS) olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hasarsız kirişlerin MS ile güçlendirilmesi ve hibrid kullanım literatür açısından ilk çalışmadır. Deneysel çalışmada referans kiriş (E0), MS ile güçlendirilen kiriş (E1), GFRP ile güçlendirilen kiriş (E2) ve GFRP+MS ile güçlendirilen (E3) kirişlerin düşey yük altında testleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonrası her bir kirişin düşey yük taşıma kapasitesi, süneklik değeri, başlangıç rijitlik değeri ve enerji tüketme kapasitesi hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada E0 numunesi, beklenildiği üzere doğrudan kesme hasarı ile göçme moduna ulaşmıştır. Güçlendirilmiş olan E1 ve E2 kirişleri deney sonunda tipik eğilme kiriş davranışı göstermiştir. E1 ve E2 kirişlerinin E0'a göre düşey yük taşıma kapasitesinde sırasıyla 16.8%-18.1% oranında artış meydana gelmiştir. Hibrid E3 kirişinde ise yük taşıma kapasitesi 19.2% artmasına rağmen kirişin kesme hasarı ile göçme moduna ulaştığı görülmüştür. Deney sonunda E1 ve E2 tipi güçlendirmede sünek davranışın gözlenmesi GFRP ve MS'lerin hem dayanım artışı hem de yeterli süneklik için doğrudan kullanılabilirlik etkili güçlendirme alternatifleri olduğunu da göstermiştir. Bu çalışma ile kiriş kesme bölgesinde her iki yüze yedi adet yerleşimi yapılan MS'lerin (E1 tipi güçlendirmenin) gelecek çalışmalarda kesme yönünden zayıf kirişler için yaygın olarak kullanılacağı düşünüldüğü ifade edilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalar neticesinde kesme kirişleri için en uygun güçlendirme yönteminin performans/maliyet bakımından sırasıyla E1>E2>E3 şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

### **Kritik Gözlemler**

Aşağıdaki kritik gözlemler, epoksi bağlı FRP ile güçlendirilmiş betonarme kiriş alanındaki mevcut literatürün gözden geçirilmesinden yapılmıştır.

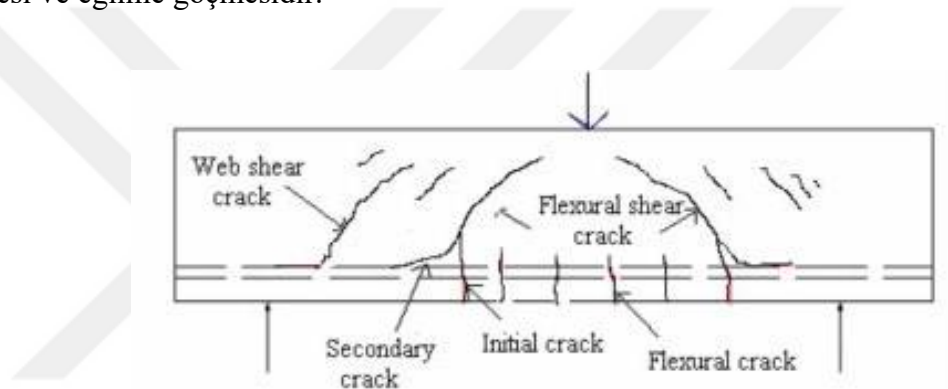
- Araştırma çabalarının çoğu, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme dikdörtgen kirişlerin eğilme ve kesme davranışını incelemek için yapılmıştır.
- Artan sayıda saha uygulamasına rağmen, harici olarak bağlanmış FRP kompozitleri kullanılarak güçlendirilmiş betonarme T-kirişlerinin kesme davranışı hakkında sınırlı sayıda rapor vardır.

- Betonarme kirişlerin kesme kapasitesinde FRP kompozitleri ile güçlendirildiğinde bir kazanç vardır. Uygun olmayan ankraj nedeniyle FRP levhalarının ana betondan soyulduğu bildirilmiştir.
- Betonarme kirişlerin kesme davranışı üzerindeki FRP ve betonla ayrılmasını önlemek için kullanılan ankraj sistemi üzerine çalışma sınırlıdır.
- Birçok araştırmacı, önceki tasarım hükümlerinin kesme davranışı hakkında kapsamlı bir anlayışa sahip olmadığı görüşündedir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Betonarme kirişler, eksenine dik kuvvetlerin etkisi altında bulunan, döşemeden gelen yükleri düşey taşıyıcılara aktaran, eğilmeye dayanıklı strüktür elemanlar olarak ifade edilmektedir. Kirişler düşey yüklere, kesme kuvvetlerine ve eğilme momentlerine dayanabilen yatay yapısal elemanlardır. Açıklıkları boyunca üzerlerine gelen yükleri duvar, kolon, temel vb. elemanlara aktarırlar. Betonarme kirişlerdeki yükler arttığında genellikle iki tip göçme şekli karşımıza çıkar (Şekil 3.1) (Rahman ve Ueda, 2018). Bunlar kesme göçmesi ve eğilme göçmesidir.



Şekil 3.1. Beton kirişlerin göçmesi (Rahman ve Ueda, 2018)

Betonarme kirişlerde kesme göçmesi, eğilme göçmesinden belirgin şekilde farklıdır. Betonarme kirişlerde eğilme göçmesi elastik bir nitelikte olmasına karşın kesme göçmesi kırılğan ve yıkıcıdır (Panigrahi ve ark, 2014). Betonarme kirişin kesmede yetersiz olması veya eğilmeye karşı güçlendirilmesinden sonra kesme kapasitesinin eğilme kapasitesinden az olması durumunda, kesme güçlendirmesi dikkate alınmalıdır. Bu çalışma, simetrik dört noktalı statik yükleme sistemi altında zorlanan, Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışının deneysel olarak incelenmesini kapsamaktadır. Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri, betonarme kirişlerin boyutları ve deney yöntemleri sunulmaktadır. Yapılan deneylerde aşağıdaki maddeler halinde verilen hususlara dikkat edilmiştir.

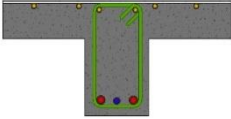
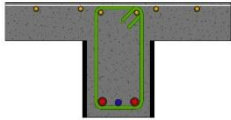
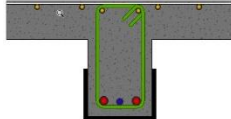
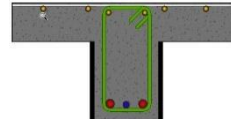
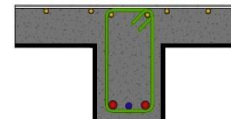
- Cam fiber levhaları betonarme kirişlere farklı sarılma şekillerinde uygulanmıştır.
- Cam fiber levhalar betonarme kirişlerin sadece kesme bölgelerine uygulanmıştır.
- Kesme bölgesinde göçme olabilmesi için etriye aralığı büyük alınmıştır.
- Etriye kancaları 90° olacak şekilde uygulanmıştır.

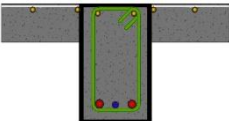
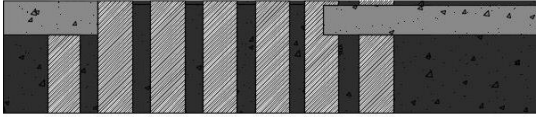
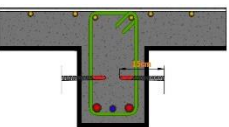
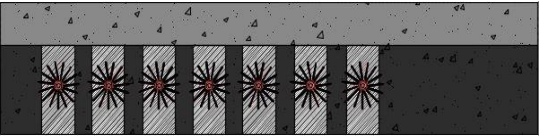
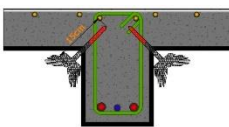
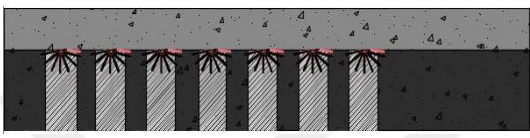
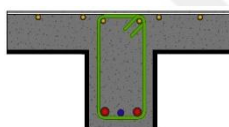
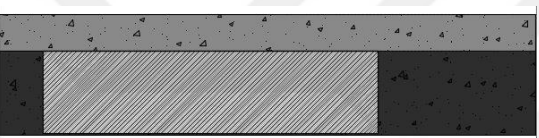


### 3.1. Deney numuneleri

Laboratuvar deneylerinden doğru sonuçlar elde etmek son derece önemlidir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda 1/1 ölçekli numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, kesme göçmesini belirlemek üzere uzunlamasına donatı çubuklarıyla donatılmış 9 adet betonarme kiriş numune imal edilmiştir. Bütün deney numunelerinde geometrik ve donatı özellikleri aynıdır. Kiriş numunelerinden bir tanesi referans olarak üretilmiş, 6 kiriş farklı sargılama şekillerinde tek kat GFRP ile sargılanmış, kalan iki kiriş ise hem tek kat GFRP ile sargılanmış hem de ankraj ile desteklenmiştir. Deney programında yer alan numunelere ait şekiller ve özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kirişlerin özellikleri ve güçlendirmeleri

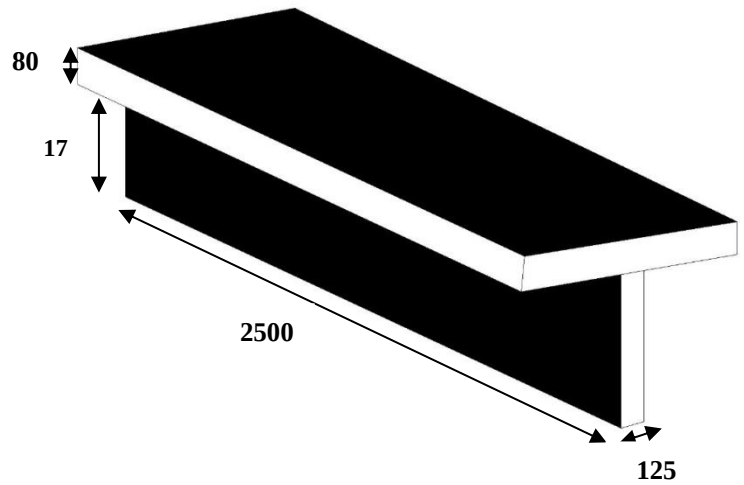
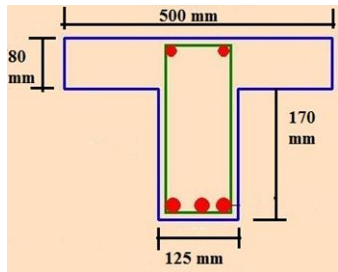
| Numune ve GFRP yapılandırması                                                               | $w_f/s_f$<br>(Oranı) | $\rho_f$ Oranı<br>( $10^{-3}$ ) | şerit<br>genişliği<br>( $w_f$ ) mm | Şerit<br>eksenel<br>aralığı<br>( $s_f$ ) mm |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|
| <br>TB-0  | N/A                  | N/A                             | N/A                                | N/A                                         |
| <br>TB-1 | 0.58                 | 1                               | 70                                 | 120                                         |
| <br>TB-2 | 0.58                 | 0.9                             | 70                                 | 120                                         |
| <br>TB-3 | 0.58                 | 1.4                             | 70                                 | 120                                         |
| <br>TB-4 | 0.58                 | 2.7                             | 70                                 | 120                                         |

|                                                                                   |                                                                                   |      |     |      |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-----|------|-----|
|  |  | 0.58 | 2.4 | 70   | 120 |
| <b>TB-5</b>                                                                       |                                                                                   |      |     |      |     |
|  |  | 0.58 | 2.7 | 70   | 120 |
| <b>TB-6</b>                                                                       |                                                                                   |      |     |      |     |
|  |  | 0.58 | 2.7 | 70   | 120 |
| <b>TB-7</b>                                                                       |                                                                                   |      |     |      |     |
|  |  | N/A  | 4.3 | .... | N/A |
| <b>TB-8</b>                                                                       |                                                                                   |      |     |      |     |

N/A: Uygulanamaz (Not Applicable),  $\rho_f$  : kirişe yerleştirilen GFRP'nin hacimsel oranı.

### 3.1.1. Deney numunelerinin boyutları

Deney numunelerinin boyutları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu boyutlar göçmenin eğilmede değil, kesmede olması dikkate alınarak belirlenmiştir. Betonarme kirişlerin eksenden eksene açıklığı 2500 mm'dir. T-kesit boyutlarını 250 mm yüksekliğinde (h), 500 mm flanş genişliğinde ve 125 gövde genişliğinde (bw) üretilmiştir.



Şekil 3.2. Kiriş kesit detayları (ölçüler mm'dir)

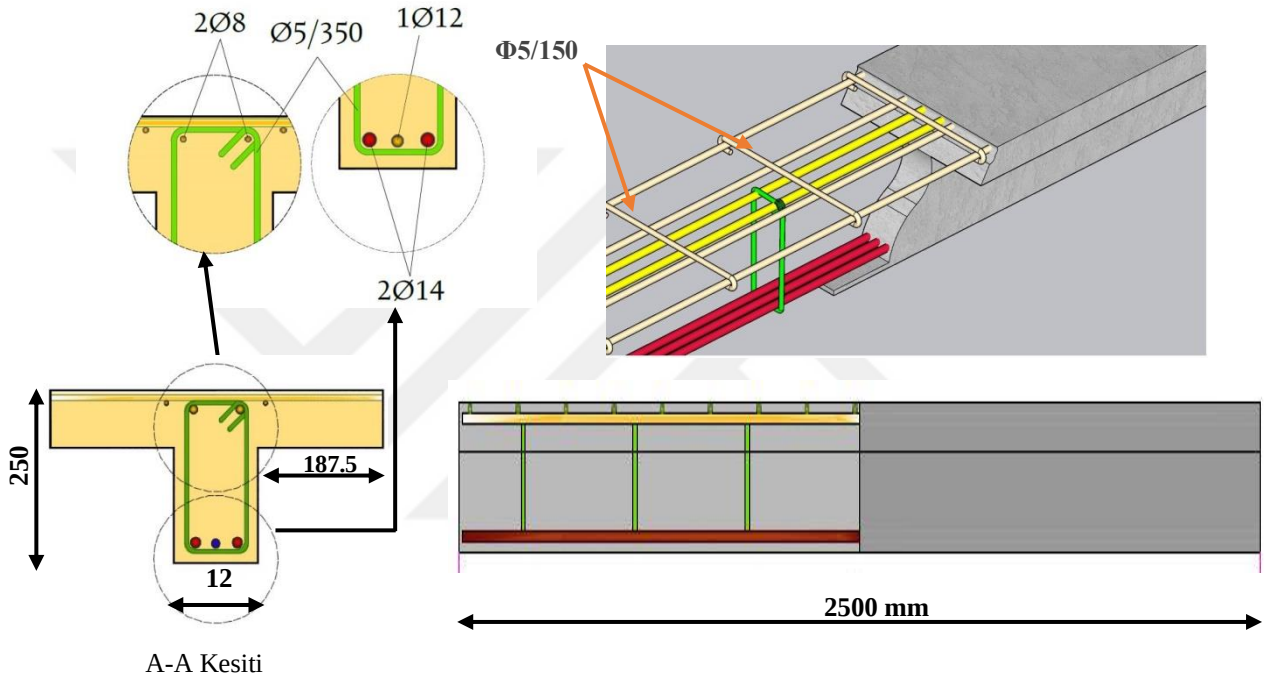
Deney numunelerinin üretilmesinde T-kesitli ahşap kalıplar kullanılmıştır. Her eleman için ayrı ahşap kalıp hazırlandığından, ahşap kalıplar sadece birer kez kullanılmıştır. Buna göre her numune için ayrı ayrı toplam 9 adet ahşap kalıp üretilmiştir. Ahşap kalıp kullanılmasının nedeni ucuz olması ve üretimin hızlı yapılabilmesidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Beton dökümüne hazır numune kalıpları

### 3.1.2. Deney numunelerinin detayları

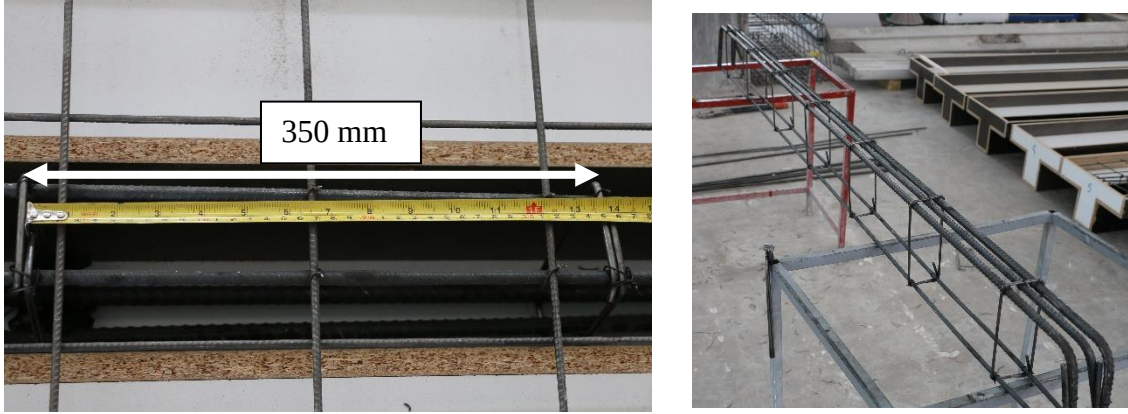
Bu çalışmada, Türk standartlarına uygun beton ve donatı detayları kullanılmıştır. Betonarme kirişlerde kullanılan donatı detayları boyuna ve enine kesitte gösterilmiştir. Kiriş çekme donatısı  $2\Phi 14 + 1\Phi 12$ , kiriş basınç donatısı ise  $2\Phi 8$  olmuştur (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Kiriş donatı detayları (ölçüler mm'dir)

Kirişi kesme alanında hasarlı yapmak için, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi kirişin boyuna kesiti boyunca 350 mm'lik eşit aralıklarla yerleştirilmiş 5 mm çapında etriyeler kullanılmıştır. Gerekli beton örtüsünü (25 mm) sağlamak için etriyeler ile ahşap kalıp arasına, donatı çeliği etriyelerinin altına ve her iki yanına birçok noktaya plastik pas payı monte edilmiştir (Şekil 3.6).





Şekil 3.5. Etriyeler arasında kullanılan mesafe



Şekil 3.6. Donatı ve plastik pas payı montajı

### 3.1.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri

#### 3.1.3.1. Beton

Bu çalışma sırasında, karıştırma işleminde iyi kalite elde etmek için hazır beton kullanılmıştır. Beton, Konya Çimento ve Hazır Beton A. Ş. Firmasından temin edilmiştir. Döküm işlemi kirişler yatay konumda iken gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Kalıplara beton dökme işlemi

Çizelge 3.2’de kirişlerde kullanılan 1 m<sup>3</sup> beton için malzeme karışım oranları verilmiştir. Numune boyutlarından kaynaklanabilecek ölçek etkisinden dolayı seçilen maksimum agrega çapı 11.2 mm olmuştur.

Çizelge 3.2. Betonarme Kirişlerin Betonlarına Ait Malzeme Karışım Oranları (1m<sup>3</sup> Beton İçin)

| Malzeme                | Ağırlık (kg) | 1 m <sup>3</sup> betondaki hacimsel miktarı (%) |
|------------------------|--------------|-------------------------------------------------|
| Çimento                | 300          | 13                                              |
| 0-11.2 mm arası agrega | 1808         | 78.7                                            |
| Su                     | 192          | 8.3                                             |
| Toplam                 | 2300         | 100                                             |

**Su/çimento oranı:0.64**

Betonun ortalama basınç ve çekme dayanımını belirlemek amacıyla toplam 6 adet standart silindir numunesi alınmıştır (Şekil 3.8). Silindir numunelerin çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm'dir. Silindir numuneler kirişlerle aynı şartlarda kür edilmiştir.



Şekil 3.8. Beton dökümü sırasında alınan silindir numuneler

Üçer adet silindir numunesi 28 günlük beton basınç dayanım değerleri, Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında 1500 kN kapasiteli dijital pres makinesi ile kırılarak elde edilmiştir. Ayrıca kalan üç silindir de aynı dijital pres makinesi ile kırılarak betonun çekme dayanım değerleri elde edilmiştir. Çizelge 3.3, numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Ayrıca test sırasında numunenin görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir.



Çizelge 3.3. Deney numunelerinde ortalama beton basınç ve yarmada çekme dayanımları

| Numune No | Basınç dayanımı<br>28gün (MPa) | Ortalama Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | Yarmada çekme<br>dayanımı<br>28gün (MPa) | Ortalama Yarmada<br>Çekme Dayanımı<br>(MPa) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| A         | 29                             | 30.6                                 | 10.8                                     | 12.3                                        |
| B         | 30                             |                                      | 12.1                                     |                                             |
| C         | 33                             |                                      | 14                                       |                                             |



Şekil 3.9. Betonun basınç ve yarma dayanımının belirlenmesi

### 3.1.3.2. Donatı

Bu çalışmada, üç farklı çapta donatı kullanılmıştır. Donatı özelliklerini bulmak için her bir çaptan üç adet numune üzerinde standart çekme testi yapılmıştır. Deney numunelerinde kullanılan donatı özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir. Ayrıca donatı çeliği çekme deneyi Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Çizelge 3.4. Çelik donatıların akma dayanımı

| Donatı Çapı<br>(mm) | Akma Dayanımı $f_{yk}$ (MPa) |          | Maksimum Çekme Dayanımı $f_{su}$ (MPa) |          | Sınıfı |
|---------------------|------------------------------|----------|----------------------------------------|----------|--------|
|                     | Ölçülen                      | Ortalama | Ölçülen                                | Ortalama |        |
| 8                   | 461.78                       | 485.11   | 589.17                                 | 591.13   | B420C  |
|                     | 500.40                       |          | 605.10                                 |          |        |
|                     | 493.16                       |          | 597.13                                 |          |        |
| 12                  | 489.21                       | 487.08   | 619.25                                 | 616.6    | B420C  |
|                     | 487.11                       |          | 616.60                                 |          |        |
|                     | 485.01                       |          | 613.94                                 |          |        |
| 14                  | 449.79                       | 451.33   | 569.35                                 | 571.3    | B420C  |
|                     | 451.33                       |          | 571.30                                 |          |        |
|                     | 452.87                       |          | 573.25                                 |          |        |

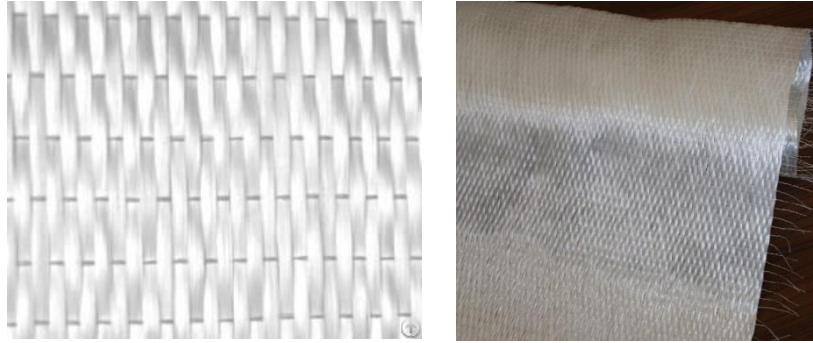


Şekil 3.10. Donatı çeliği çekme deneyi

### 3.1.3.3. Cam Fiber

Bu çalışma sırasında, ucuz ve kolayca temin edilebilir olması nedeniyle cam fiber takviyeli polimer kullanılması uygun görülmüştür. Cam fiberler karbon kadar hafif ve rijit olmasına rağmen oldukça ucuz takviye malzemesidir. Deney elemanlarında kullanılan cam fiber takviyeli polimer kumaş (GFRP- glass fiber reinforcement polymer) DOST KİMYA

Sanayi tarafından temin edilmiştir (Şekil 3.11). Deney elemanlarında kullanılan GFRP'nin özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Cam fiber takviyeli polimer kompozitler

Çizelge 3.5. Cam fiber takviyeli polimer kompozit özellikleri

| AÇIKLAMA                                     | Cam fiber Kumaş Tek Yönlü 900 gr/m <sup>2</sup> - en :50 cm |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Cam fiber Yoğunluğu                          | 2.54 g/cm <sup>3</sup>                                      |
| Cam fiber Tipi                               | E- cam fiber<br>900 g/m <sup>2</sup>                        |
| Kalınlık (mm)                                | 0.50                                                        |
| Mekanik mukavemet                            | Yüksek mukavemet                                            |
| Dokuma stili                                 | Planin                                                      |
| Çekme dayanımı (MPa)                         | 2300                                                        |
| Elastisite modülü (MPa)                      | 76000                                                       |
| Maksimum kopma birim şekil<br>değiştirme (%) | 3                                                           |
| Elektriksel öz direnç                        | 4 x 10 <sup>13</sup> Ωm                                     |
| Nem İçeriği %                                | Ağırlıkça Maks. %0,20                                       |

#### 3.1.3.4. Epoksi

Bu çalışmada, GFRP kumaşların kiriş yüzeylerine yapıştırılması için Mapei Yapı Kimyasalları A.Ş tarafından üretilen MapeWrap Primer 1 ve MapeWrap Primer 31T epoksi kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Güçlendirme işleminde kullanılan epoksi

MapeWrap Primer 1 MAPEI AR-GE laboratuvarlarında geliştirilmiş, karışım oranları önceden ayarlanmış iki bileşenden oluşan (A, B); epoksi reçine esaslı bir üründür. Karışım hazırlandıktan sonra, MapeWrap Primer 1 düşük viskoziteye sahip ve düşey yüzeylerde dahi uygulaması kolay bir sıvı oluşturur. Ayrıca alt yüzeylerin konsolide edilmesi ve astarlanması için son derece uygun bir üründür. MapeWrap Primer 1'in mekanik/fiziksel özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

MapeWrap 31 T, MAPEI'nin AR-GE laboratuvarlarında özel olarak geliştirilmiş, çözücü içermeyen ve epoksi reçine esaslı tiksotropik kıvamda bir yapıştırıcıdır. MapeWrap 31 T, kullanımdan önce birlikte karıştırılan, karıştırma oranı önceden ayarlanmış iki bileşenden oluşur (A bileşeni reçine ve B bileşeni katalizör). Karıştırıldıktan sonra MapeWrap 31 T, +23°C'de yaklaşık 50 dakika işlenebilir kalır. Sertleştiğinde MapeWrap 31 T, mükemmel dielektrik özelliğe ve yüksek mekanik dayanıma sahip olur. MapeWrap 31 T'in mekanik/fiziksel özellikleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. MapeWrap Primer 1, epoksi yapıştırıcının mekanik/fiziksel özellikleri

| AÇIKLAMA                                           | Part A                                                            | Part B          |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Kıvam                                              | Sıvı                                                              | Sıvı            |
| Renk                                               | Transparan sarı                                                   | Transparan sarı |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                      | 1.12                                                              | 1               |
| Karışım Oranı                                      | 3                                                                 | 1               |
| Çalışılabilirlik süresi<br>+10°C<br>+23°C<br>+30°C | 120'<br>90'<br>60'                                                |                 |
| Priz alma süresi:<br>+10°C:<br>+23°C:<br>+30°C:    | 5-6 saat<br>3-4 saat<br>2-3 saat                                  |                 |
| Uygulama sıcaklığı                                 | +10°C ile +30°C arası                                             |                 |
| Tamamen prizini alma süresi                        | 7 gün                                                             |                 |
| Betona yapışma mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )     | > 3 (+23°C ortam sıcaklığında, 7 günün sonunda betonun çatlaması) |                 |

Çizelge 3.7. MapeWrap Primer 31 T, epoksi yapıştırıcının mekanik/fiziksel özellikleri

| AÇIKLAMA                                           | A bileşeni                                                        | B bileşeni |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| Kıvam                                              | Macun                                                             | Macun      |
| Renk                                               | Koyu sarı                                                         | Açık sarı  |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                      | 1.34                                                              | 1.25       |
| Karışım Oranı                                      | 3                                                                 | 1          |
| Çalışılabilirlik süresi: +23°C                     | 40 dakika                                                         |            |
| Priz alma süresi: +23°C                            | 4 saat                                                            |            |
| Uygulama sıcaklığı                                 | +5°C ile +30°C arası                                              |            |
| Tamamen prizini alma süresi                        | 7 gün                                                             |            |
| Betona yapışma mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )     | > 3 (+23°C ortam sıcaklığında, 7 günün sonunda betonun çatlaması) |            |
| Çekme dayanımı* (ASTM D 638) (N/mm <sup>2</sup> ): | ≥ 20                                                              |            |

## 3.2. Güçlendirme Metodolojisi

### 3.2.1. Kirişlerin hazırlanması

Betonarme kirişlerde güçlendirme uygulamasına başlamadan önce, cam fiber kumaşlar ile beton yüzey arasında etkin bir arayüzü sağlamak için kirişler temizlenmiş ve gevşek parçacıklar kaba zımpara kâğıdı ile uzaklaştırılmıştır. Alt köşeler, taşlama makinesi kullanılarak yaklaşık 10 mm'lik bir yarıçapa pahlanıp yuvarlatılmıştır. Daha sonra Şekil 3.13'te gösterildiği gibi basınçlı hava tabancası kullanılarak tozdan temizlenmiş ve keskin köşeler çizilmiştir. Bu aşama aynı zamanda güçlendirmenin en önemli aşamalarından biri olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3.13. Kirişler hazırlanması



### 3.2.2. GFRP kumaşların hazırlanması

Hazırlanan deney numunelerini güçlendirmek için toplam 6.5 metrekare GFRP kumaş kullanılmıştır. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için DOST KİMYA tarafından üretilen cam kumaşlar kullanılmıştır. Başlangıçta cam fiber kumaşlar her bir kiriş için daha önceden belirlenen tasarımlara uygun olacak şekilde gerekli boyutlarda kesilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. GFRP kumaşların hazırlanması

Cam fiber kumaşlar kesildikten sonra sargılama modellerine uygun olarak yapışma yüzey alanlarına epoksi malzemeler uygulanmıştır. Epoksi malzeme beton yüzeye iki aşamada uygulanmıştır.

### Birinci aşama

Bu aşamada MapeWrap Primer 1 epoksi bileşenleri (A+B) üreticinin talimatlarına göre karıştırıldıktan sonra uygulanmıştır. Malzeme A içerisine ilave edilen Malzeme B üreticinin tavsiyelerine göre ağırlıkça (3-1) oranında katılmıştır. Daha sonra karıştırma işlemi, karışım homojen hale gelene kadar uygun bir plastik kap içinde elektrikli bir karıştırıcı ile yapılmıştır (Şekil 3.15).



MapeWrap Primer 1 (A)



MapeWrap Primer 1 (B)



Karıştırma işlemi

Şekil 3.15. MapeWrap Primer 1 epoksinin hazırlanması

## İkinci aşama

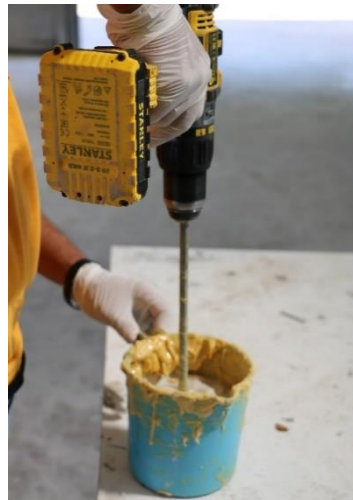
Bu aşamada da benzer şekilde MapeWrap Primer 31T epoksi bileşenleri (A+B) üreticinin talimatlarına göre karıştırıldıktan sonra uygulanmıştır. Malzeme A içerisine ilave edilen Malzeme B ağırlıkça (3-1) oranında katılmıştır. Daha sonra karıştırma işlemi, karışımın homojen hale gelmesine kadar uygun bir plastik kap içinde elektrikli bir karıştırıcı ile yapılmıştır. Bu malzeme beton kirişin yüzeyine ikinci bir tabaka olarak uygulanmıştır. Kullanılan MapeWrap Primer 31T miktarları ilk katman olan MapeWrap Primer 1'de kullanılan malzemelerden daha fazladır (Şekil 3.16).



MapeWrap Primer 31T (A)



MapeWrap Primer 31T (B)



Karıştırma işlemi

Şekil 3.16. MapeWrap Primer 31T epoksinin hazırlanması



Epoksi malzemeler hazırlanıp iyice karıştırıldıktan sonra kiriş yüzeyi kaplanmıştır. İlk olarak MapeWrap Primer 1, ardından ikinci tabaka olarak MapeWrap Primer 31T uygulanmıştır (Şekil 3.17).



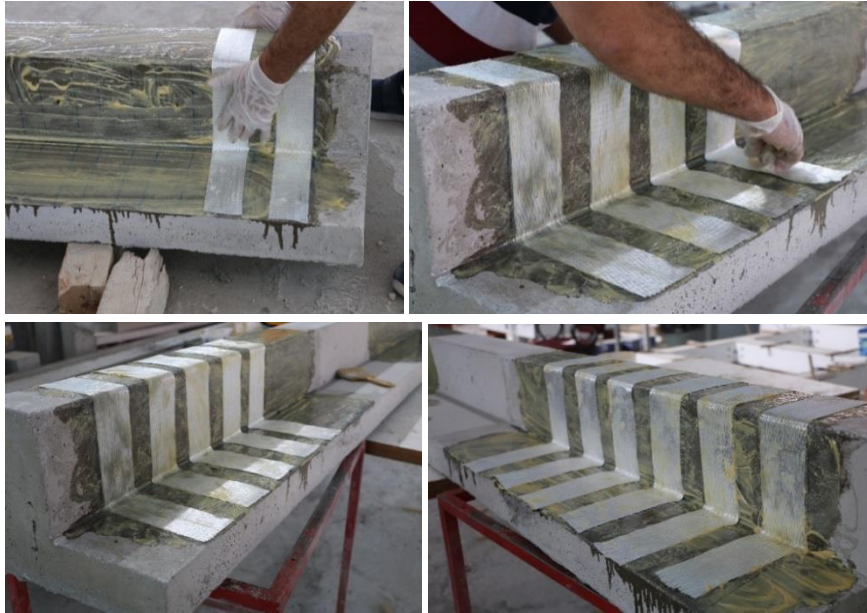
MapeWrap Primer 1



MapeWrap Primer 31T

Şekil 3.17. Kiriş yüzeyine epoksi uygulaması

Son olarak, kiriş yüzeylerine cam lifli polimer kumaşlar yerleştirilmiş ve cam fiber kumaş ile beton yüzeyi arasında oluşabilecek hava kabarcıklarını giderilmiştir. Cam fiber kumaş beton yüzeylere yapıştırılırken epoksinin sertleşmesini önlemek için bu işlem hızlı bir şekilde yapılmıştır. Yapıştırma işlemleri laboratuvar ortamında yaklaşık 22 °C oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18). Cam lifli polimer kumaşlar sarıldıktan sonra betonarme kirişler teste hazır hale gelmiştir. Deneyler, cam fiber kumaşların kiriş yüzeyine yapıştırılmasından bir hafta sonra gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.18. Beton yüzeylerde cam fiber kumaşların uygulaması



Şekil 3.19. Dıştan cam fiber takviyeli polimer kompozitler ile güçlendirilmiş kirişler

### 3.3. Tablalı Kirişlerin GFRP Kumaşları ile Güçlendirilmesi

#### 3.3.1. Kirişin iki taraflı güçlendirilmesi (TB-1)

TB-1 kirişine sadece yanlarından güçlendirme yapılmıştır. Cam kumaş 170 mm gövde yüksekliğinde ve 70 mm eninde uygulanmıştır. Fiberin faydalı yüksekliği ( $d_{fv}$ ) 140 mm'dir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Kirişin iki yandan sargılaması (TB-1)

### 3.3.2. Gövde Yüksekliğinin Yarısının U-Şekli Sargılaması (TB-2)

Bu güçlendirme konfigürasyonunda kiriş, U-şekilli cam fiber kumaşlar sadece kesme alanında, gövde derinliğinin yarısına eşit bir yükseklikte kiriş gövdesine uygulanarak güçlendirilmiştir. Kirişin her iki yanında 7 şerit kullanılmıştır. Fiberin faydalı yüksekliği ( $d_{fv}$ ) 58 mm'dir (Şekil 3.21).

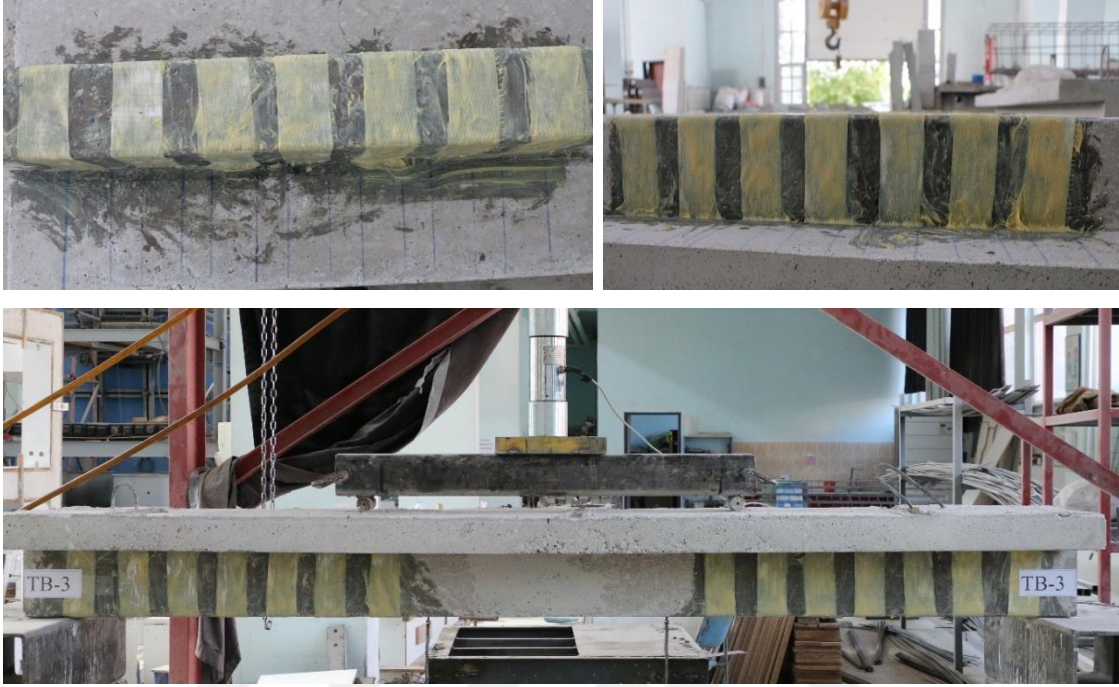


Şekil 3.21. Gövde Yüksekliğinin Yarısını U-Şekli Sargılama (TB-2)

### 3.3.3. Gövdenin Tüm Yüksekliğini U-Sargılama (TB-3)

Bu kirişte, kirişin her iki tarafında kiriş gövdesinin tüm derinliğine U- şeklinde bir cam kumaş uygulanarak kiriş üzerinde güçlendirme yapılmıştır. Betonarme kirişin her iki ucunda 7 adet cam fiber şerit kullanılmış olup, şerit genişliği 70 mm'dir. Kullanılan tüm şeritler aynı ölçülerdedir (Şekil 3.22).

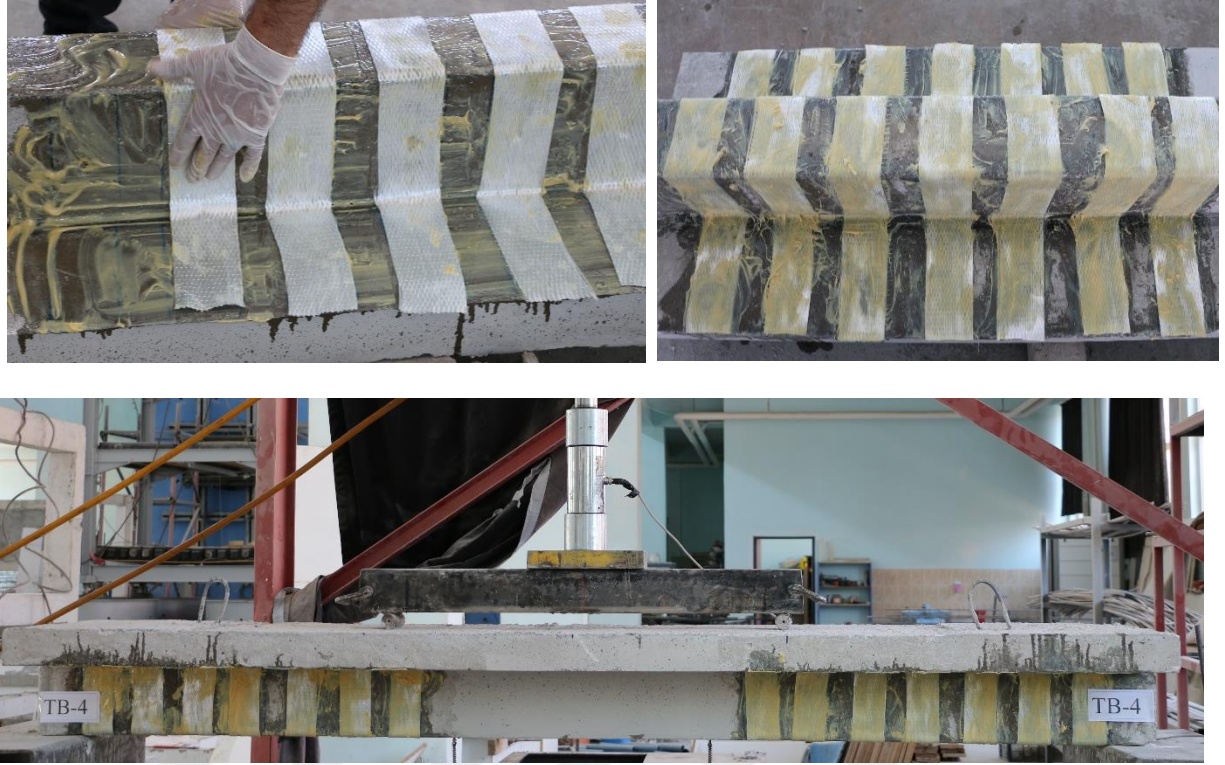




Şekil 3.22. Gövdenin Tüm Yüksekliğini U-Şekilli Güçlendirme (TB-3)

#### 3.3.4. Gövdenin Tüm Yüksekliği ve Flanş Altındaki Alanını U-Şekli güçlendirme (TB-4)

Bu numunede, kirişin her iki tarafı tüm gövde derinliğine U-şeklinde ve ilave olarak flanş altındaki alana GFRP kumaş uygulanarak güçlendirme yapılmıştır. Kiriş gövdesinin her iki yanında ve flanş altında kalan bölgede 70 mm genişliğinde 7 adet şerit kullanılmıştır (Şekil 3.23).

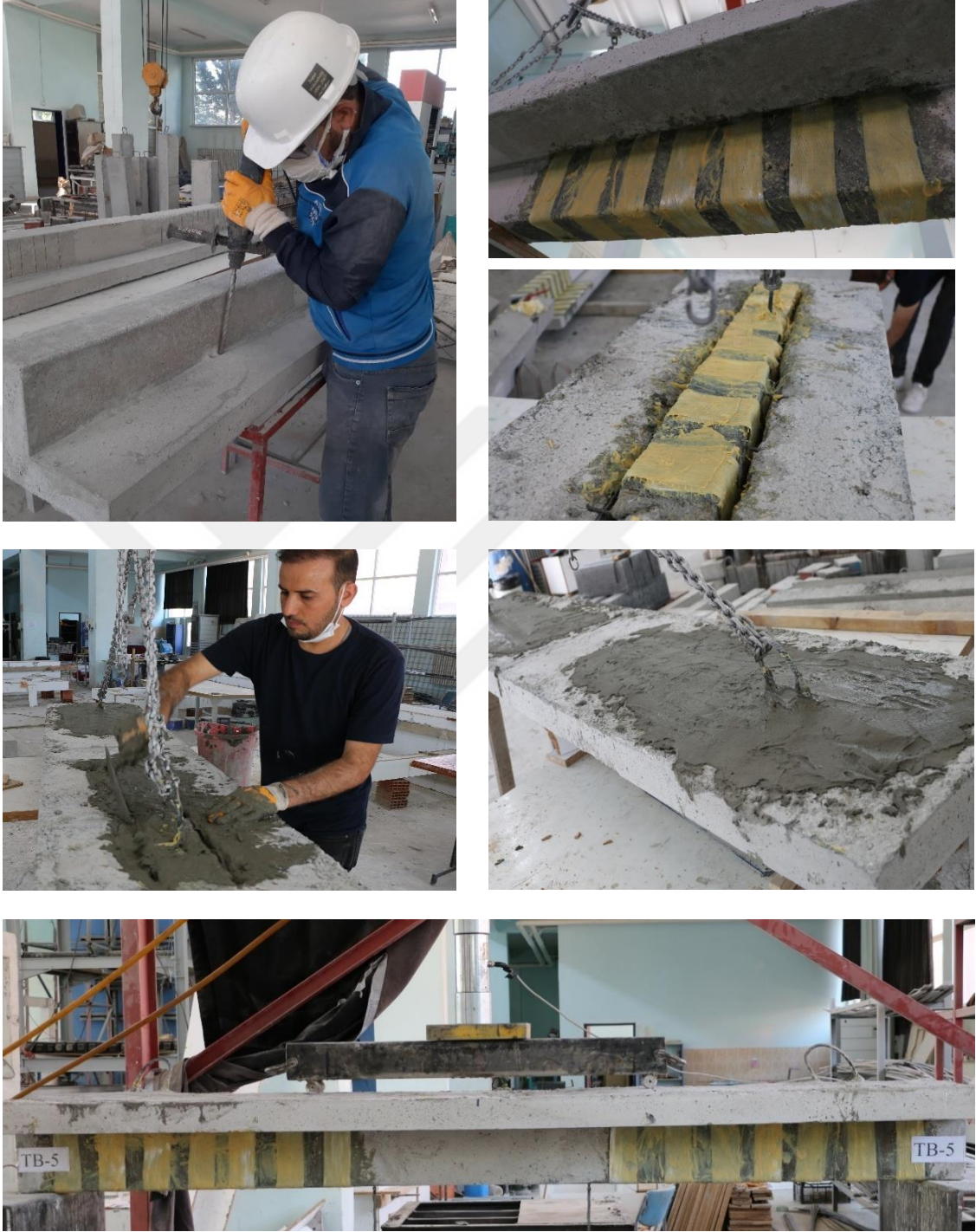


Şekil 3.23. Gövdenin tüm yüksekliği ve flanş altındaki bölgesinde U-Şekli güçlendirme (TB-4)

### 3.3.5. Kirişin tam sargılama ile güçlendirilmesi (TB-5)

Bu numune, GFRP kumaşın kiriş kesiti etrafına tamamen sarıldığı güçlendirme şeklidir. Kumaşı kiriş yüzüne uygulamak için kesme bölgesine delikler açılmıştır. Delikler yapılması için elektrikli matkap ile kiriş gövdesine paralel olarak flanşın yüksekliğinde 20 mm genişliğinde bir yarık açılmıştır. Daha sonra çatlak olan bölge temizlenip zımpara makinesi ile düzeltilmiştir. Daha sonra, kirişin tam kesiti etrafında her iki uçta 7 şerit olacak şekilde 70 mm genişliğinde cam kumaş şeritler serilmiştir. Bu kiriş için tüm güçlendirme adımları Şekil 3.24'te gösterilmiştir.





Şekil 3.24.Kirişin tam sargılama ile güçlendirilmesi (TB-5)

### 3.3.6. 90 ° Açılı GFRP Ankraj Kullanılarak Flanş Altındaki Alan ile beraber U- Şekli Güçlendirme (TB-6)

Başlangıçta, lifli polimer ile beton yüzey arasında etkin bir bağ sağlamak amacıyla kaba zımpara kâğıdı kullanılarak beton yüzeyleri düzeltilmiştir. Ayrıca alt köşeler, taşlama makinesi kullanılarak yaklaşık 10 mm'lik bir yarıçapa pahlanıp yuvarlatılmıştır. Daha sonra elektrikli matkap ile gövde yüksekliğinin ortasında 50 mm derinliğinde ve 10 mm çapında delikler açılmıştır. Ankrajlar, kirişin gövdesine 90° 'lik bir açıyla uygulanmıştır. Ankraj deliklerinin açılmasından sonra kiriş basınçlı hava ile tozlardan arındırılmıştır (Şekil 3.25.a).

Ankraj delikleri delindikten ve kirişi basınçlı hava ile tozdan temizledikten sonra, önceden hazırlanmış cam fiber şeritler kiriş yüzüne uygulanmıştır. Cam kumaş şeritleri uygulandıktan sonra, ankrajlar epoksi ile ıslatıldıktan sonra, şeritler üzerinde açılan deliklerden kirişte açılan deliklere sokularak sabitlenmiştir (Şekil 3.25.b). Bu çalışmada spike tipi ankrajlar kullanılmıştır. Spike tipi ankrajların hazırlanmasında 15 demet birleştirilerek iki katına çıkarılmış, 75 mm uzunluğunda ve 10 mm çapında 30 demetten oluşan ankraj çubukları oluşturulmuştur. Bu kirişte ankrajlar kiriş gövdesinin her iki yanına dik doğrultuda kiriş plakasının 85 mm altına uygulanmıştır (Şekil 3.25.c).



(Şekil 3.25.a). Beton yüzeyin düzeltilmesi ve ankraj deliklerinin delinmesi





Şekil 3.25.b. Beton yüzeyine cam fiber kumaşların ve ankraj uygulanması



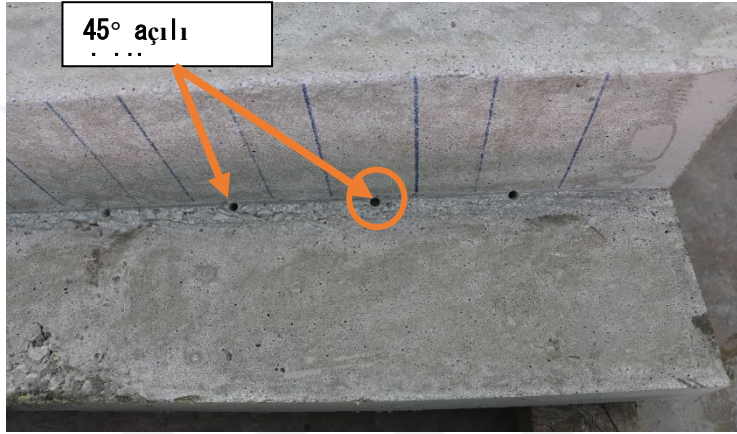
Şekil 3.25.c. TB-6 kirişlere Spike tip ankraj uygulaması

Şekil 3.25. Kiriş gövdesinin tüm yüksekliğini U-Şekli Güçlendirme ve cam fiber ankraj (TB-6) kullanma



### 3.3.7. 45 ° Açılı GFRP Ankraj Kullanılarak Flanş Altındaki Alan ile beraber U- Şekli Güçlendirme (TB-7)

Bu güçlendirme yapılandırması, ankrajların montajındaki farklılık ile TB-6 kirişte kullanılanla aynı şekilde yapılmıştır. Kiriş gövdesinin flanşla birleştiği noktada 45° bir açıyla ankrajlar uygulanmıştır. Ek olarak Şekil 3.26, cam fiber kumaşların kurulum sürecini ve ayrıca beton kirişin yüzeyine ankrajların kurulumunu göstermektedir.



Kiriş gövdesinin flanşla birleştiği noktada deliklerin şekli



Epoksi malzemelerinin eklenmesi



Şekil 3.26.Kiriş gövdesinin tüm yüksekliğini U-Sargılama ve cam fiber ankraj (TB-6) kullanma

### 3.3.8. Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğinde Sürekli GFRP Kumaşlar ile U-Şekli Güçlendirme (TB-8)

Cam fiber kumaşlar kiriş için daha önceden belirlenen tasarımlara uygun olarak gerekli boyutlarda kesilmiş ve beton yüzeye epoksi malzemeler uygulanmıştır. Daha sonra, numune kesme bölgesi boyunca sürekli U-şekilli bir cam kumaş uygulanarak kiriş gövdesinin tam yüksekliğine ve flanşın altındaki bölgeye yapılmıştır. Bu güçlendirme konfigürasyonu, ankraj kullanılmadan gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.27).



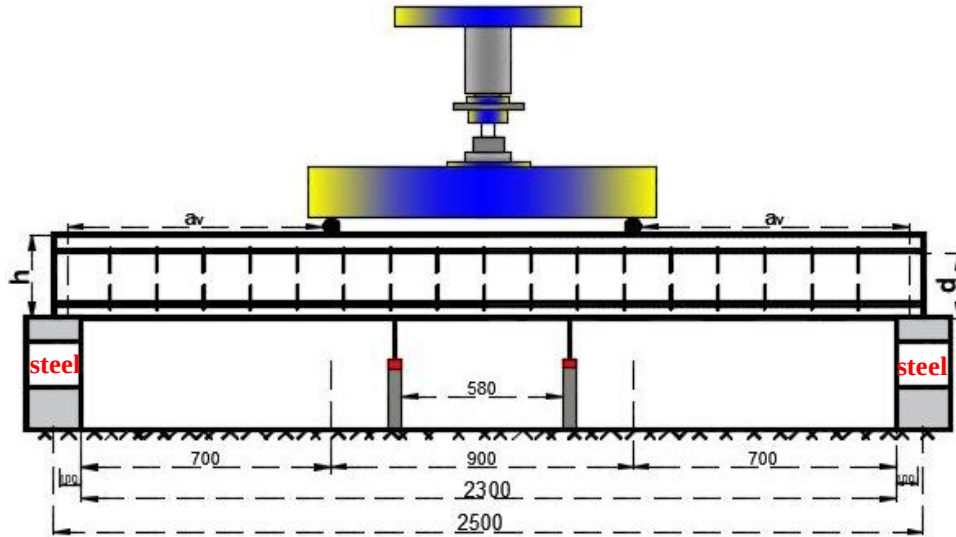
Şekil 3.27. Kiriş kesme alanı boyunca sürekli cam fiber kumaş ile U-Şekli güçlendirme (TB-8)



#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

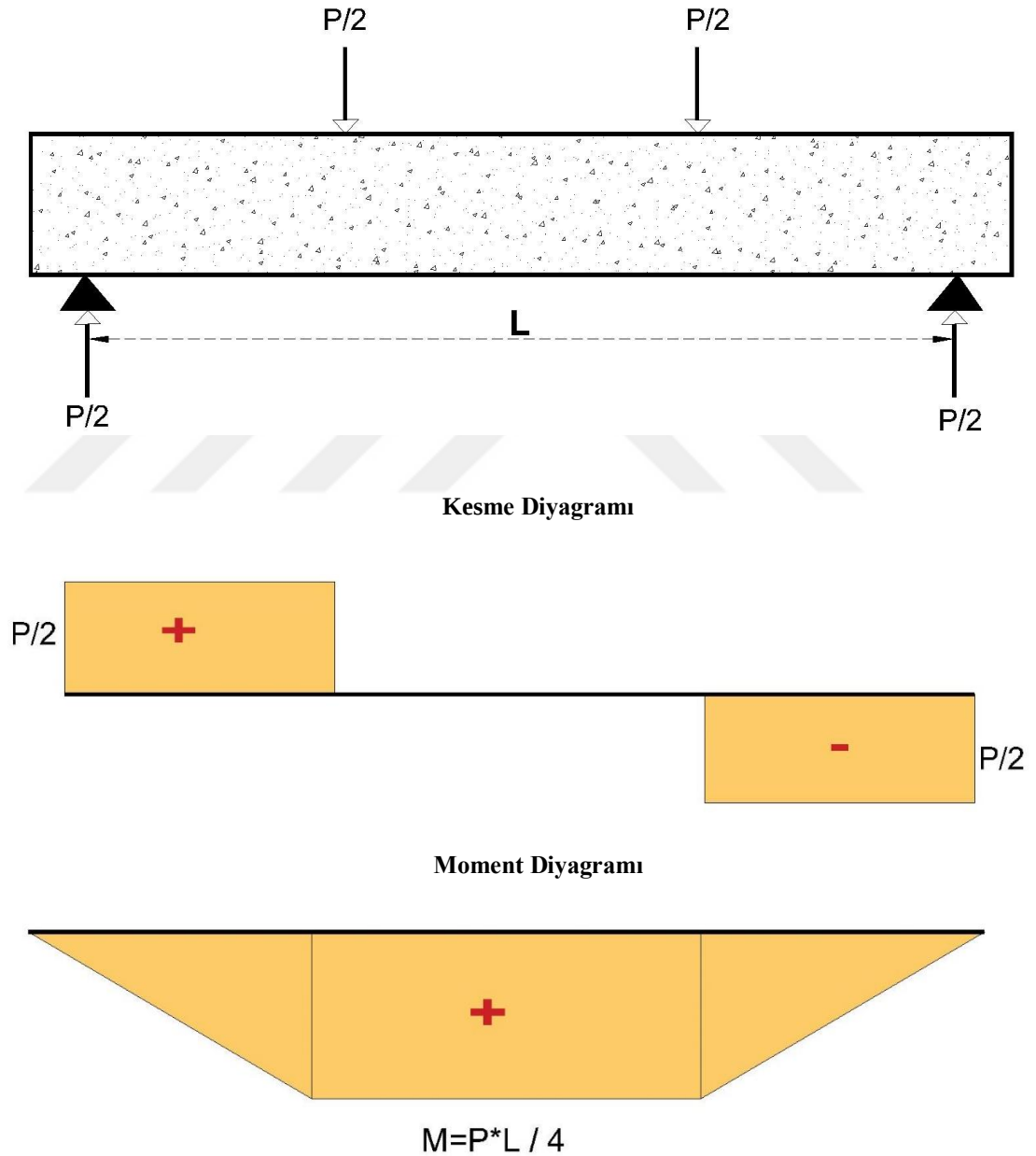
##### 4.1. Giriş

Deneyler Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. 28 günlük kür süresinin bitiminden sonra, tüm kirişler, laboratuvar testlerine hazır olması için GFRP kumaş ile güçlendirilmiştir. Ayrıca çatlakları net görebilmek için kirişlerin yüzeyi tozdan temizlenmiştir. Numune boyutlarının seçiminde laboratuvar ortamındaki fiziksel koşullar etkili olmuştur. Deney elemanlarının yükleme düzeneğinde yük, hidrolik krikoya bağlı mekanik pompa aracılığı ile verilmiş, yükün büyüklüğü yük hücresi (load cell) ile ölçülmüştür. Kirişlere simetrik, tek düze bir yükleme yapılmıştır. Kirişler üzerine yerleştirilen reaksiyon kirişi 1000 mm uzunluğunda dolu gövdeli çelikten oluşmaktadır. Numuneler reaksiyon kirişinin destek aralığı 900 mm olan basit mesnetler üzerine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca reaksiyon kirişinin ortasına yerleştirilen yük hücresi ile yükün büyüklüğü ölçülmüştür. Hidrolik krikodan reaksiyon kirişine iletilen tek P boyutundaki yük, P/2 boyutundaki iki eşit tekil yük şeklinde test elemanlarına iletilmiştir. Yükleme sıfırdan başlamış ve kirişlerde hasar meydana gelene kadar devam etmiştir. Ayrıca reaksiyon kirişinin mesnedi ile kiriş mesnedi arasındaki mesafe 700 mm'dir. Kirişler mesnete 100 mm'lik kısmı gelecek şekilde sabit mesnetlenmiştir. Test elemanlarında yükleme ve ölçüm düzeni Şekil 4.1'de verilmiştir.



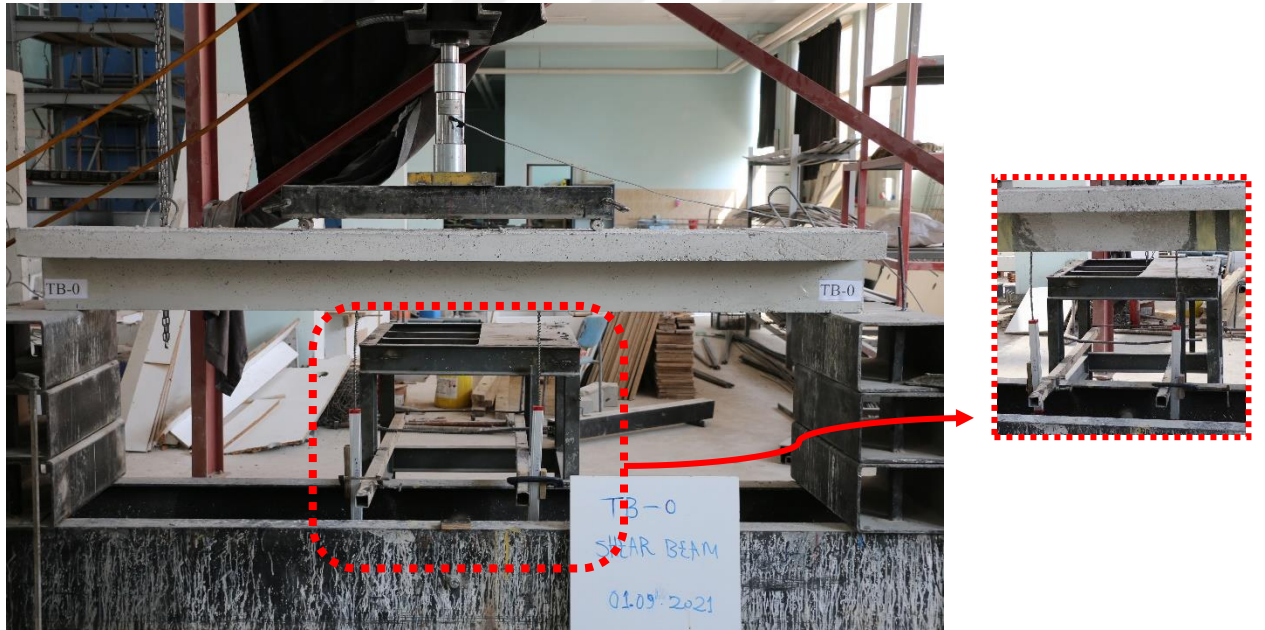
Şekil 4.1. Deney elemanında yükleme ve ölçüm düzeneği

Deney elemanlarının tekil kuvvetleri arasındaki moment sabit kalırken, kesme açıklığında moment değişmektedir. Kesme kuvveti, kesme açıklığı boyunca sabittir ve reaksiyon kirişi mesnetleri arasındaki moment sabit alanında sıfırdır. Kirişte oluşan iç kuvvetler kesme kuvveti ve moment diyagramları olarak Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Yüklemeden dolayı kirişte oluşan iç kuvvetler

Deney elemanlarının orta nokta deplasmanını ölçmek amacıyla kiriş orta noktasına elektronik ölçüm aletleri (LVDT) yerleştirilmiştir. LVDT çok hassas derecelere kadar deplasman ölçebilen elektronik aletlerdir. Her elemanda deneyler sırasında iki adet LVDT kullanılmıştır (Şekil 4.3). Deneyler sırasında hidrolik krikodan verilen yük hücresi ile, orta nokta deplasmanı ise LVDT ile ölçülerek yük ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler bilgisayara aktarılarak deney elemanlarına ait yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Yük-deplasman grafikleri deney sonuçlarının değerlendirilmesi açısından oldukça önemli verilerdir. Bu grafiklerle kirişlerin deney boyunca davranışları yorumlanabilmektedir.



Şekil 4.3. deplasmanları ölçmek için kullanılan elektronik ölçüm aletleri

#### 4.2. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Hasar Analizi

Bu bölümde, deney programı için dokuz adet betonarme T-kirişin test edilmesinden elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Test boyunca davranışları, ilk çatlak yükü ve nihai yük taşıma kapasitesi, deplasman, çatlak modeli ve göçme modlarına göre tanımlanmıştır. Ayrıca her bir numune deney sonuçları yük-deplasman grafikleri karşılaştırmalı yorumlanmış ve ayrıntılı olarak hasar analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada, ele alınan kirişlerin kesme kapasitelerinin yetersiz olması istendiği için etriye aralıkları yönetmeliğe göre oldukça fazla seçilerek bu durum sağlanmıştır. Çalışmada imal edilen kirişlerde etriye aralığı 35 cm etriye çapı ise 5 mm olarak seçilmiştir. Bu çalışmada 90° konfigürasyonunda tek eksenli tek katlı 900 gr/m<sup>2</sup> cam fiber kumaşlar kullanılarak kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler farklı sargılama uygulaması ile güçlendirilmiştir. Yapı elemanlarının güçlendirilmesi için farklı malzemeler veya farklı teknikler uygulanarak güçlendirme yapılmaktadır. Özellikle kesme ve eğilme etkisine maruz kalan yapı elemanlarının güçlendirilmesi için GFRP kullanımı oldukça yaygındır. Bunun nedeni ise GFRP'nin yüksek mukavemetli, maliyeti düşük ve hafif bir malzeme olmasıdır. Polimerik cam fiberler, kesme dayanımında ve kesme bölgesindeki hasar boyutunun azaltılmasında önemli bir role sahiptir. Bu da malzemeyi güçlendirme çalışmaları için oldukça faydalı kılmaktadır. Çalışma kapsamında üretilen deney numunelerinin deney öncesi ve deney sonrası genel hasar fotoğrafları Çizelge 4.1'de toplu olarak gösterilmiştir.



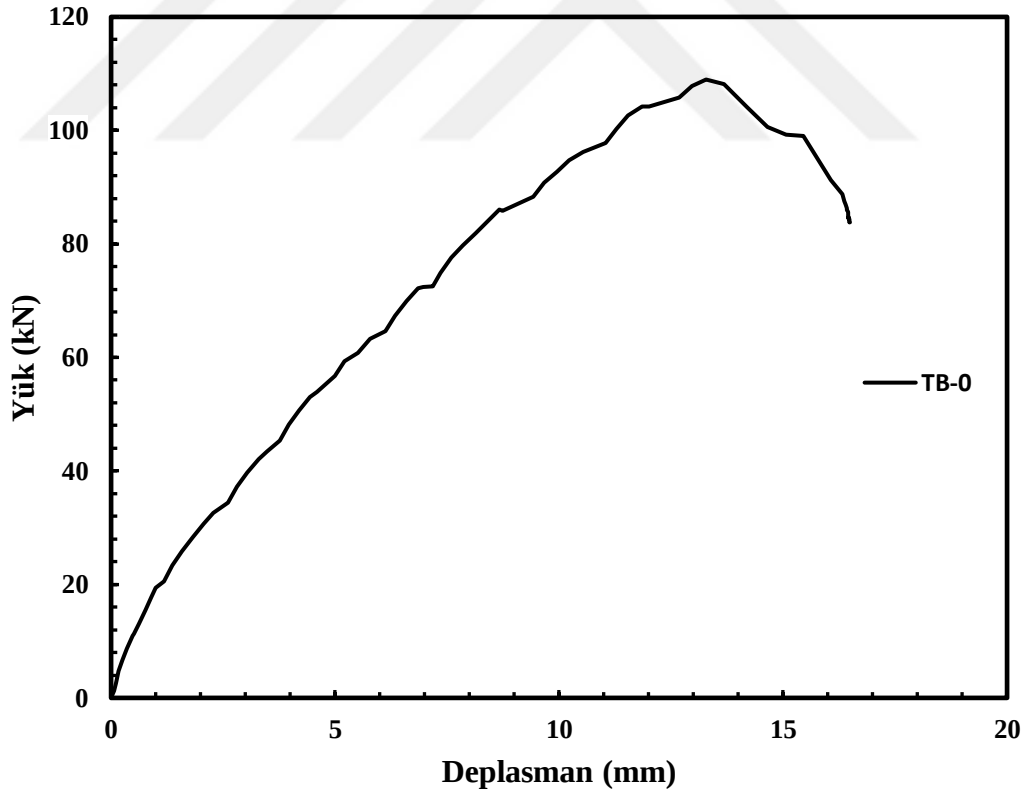
Çizelge 4.1. Deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası genel hasar görünüüşleri

| No   | Numuneler deney öncesi                                                              | Numuneler deney sonrası                                                              |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| TB-0 |    |    |
| TB-1 |    |    |
| TB-2 |    |    |
| TB-3 |    |    |
| TB-4 |   |   |
| TB-5 |  |  |
| TB-6 |  |  |
| TB-7 |  |  |
| TB-8 |  |  |

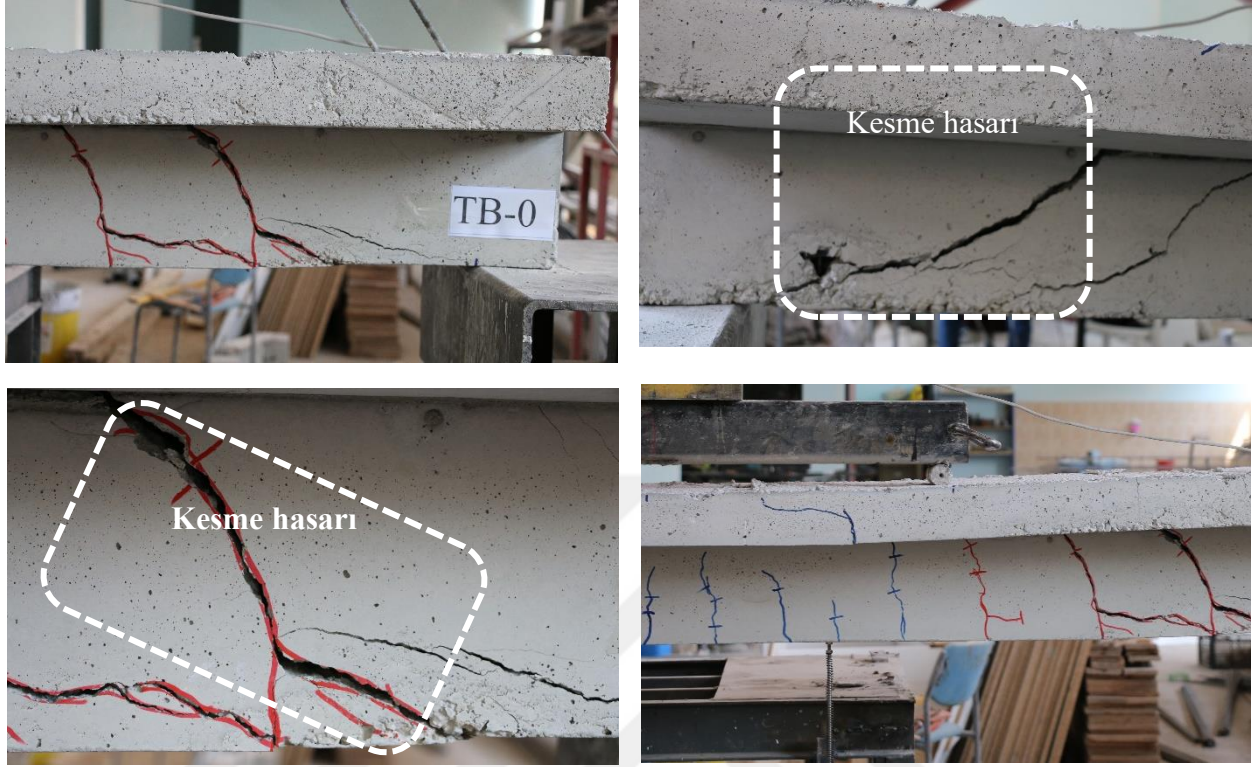


#### 4.2.1. Referans Numunesi (TB-0)

Referans numunesi TB-0 olarak kodlanılan ve test edilen ilk numunedir. Referans numunesinin 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. TB-0 numunesinde 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Yükün artması ile birlikte kesme çatlaklarının oluşumu hızlanmıştır. TB-0 numunesi 108.9 kN yük ve 13.3 mm deplasman değerine ulaştığı anda sağ kesme açıklığında ani ve gevrek kesme hasarı meydana gelerek göçmüştür. LVDT ve yük hücresi yardımı ile yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilerek kirişe ait yük-deplasman grafikleri çizilmiş ve ortalama yük-sehim değerleri bulunmuştur (Şekil 4.4). Ayrıca TB-0 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4. TB-0 deney numunesine ait yük-deplasman grafiği

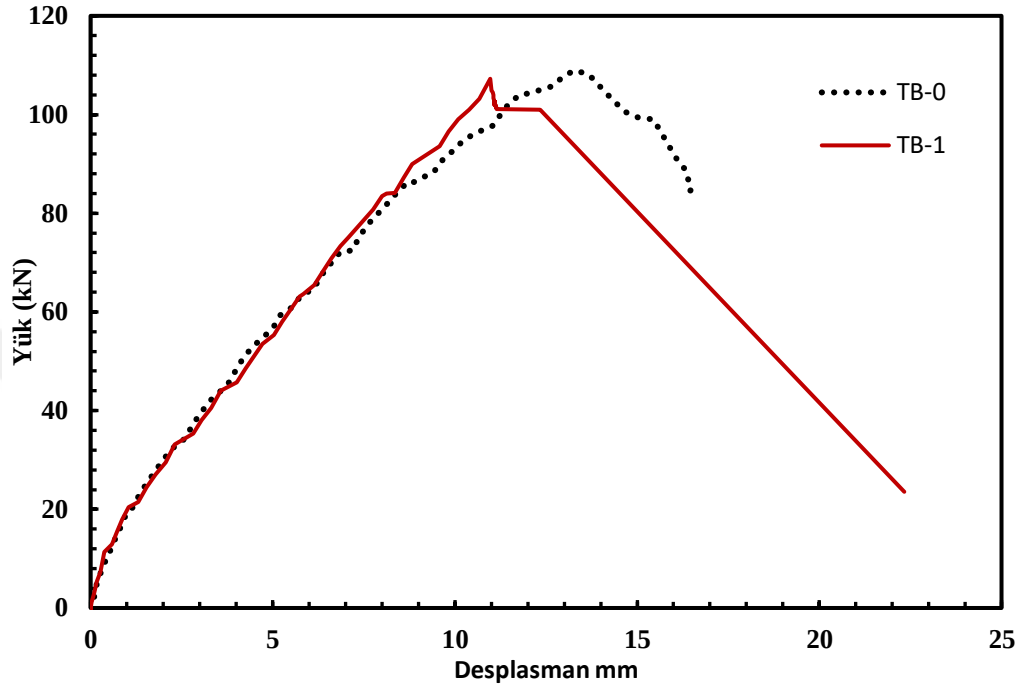


Şekil 4.5. TB-0 referans kiriş numunesinde deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

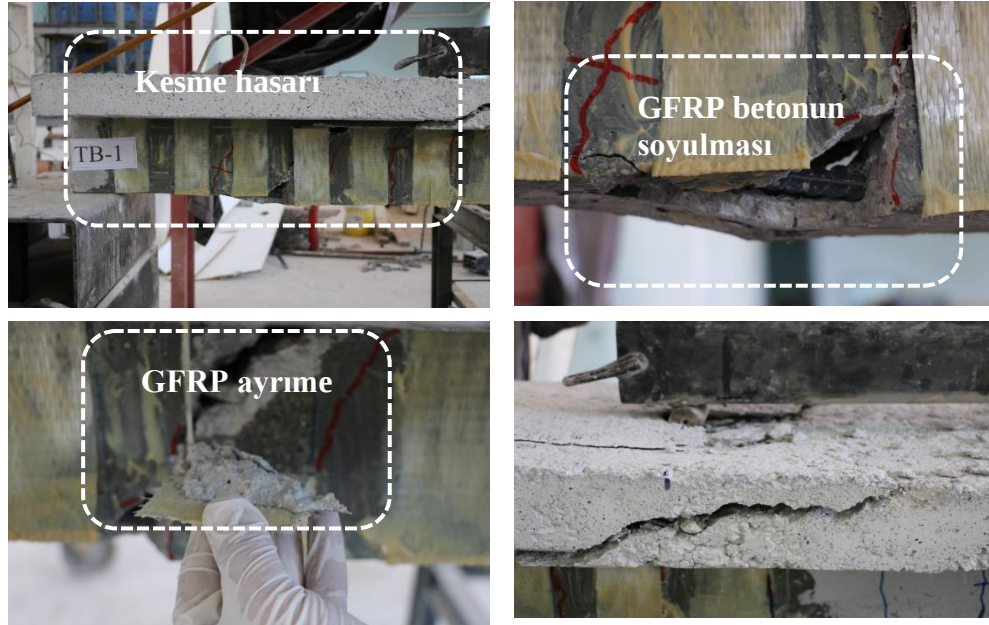
#### 4.2.2. Deney Numunesi TB-1

Boyutları 70 x 170 mm GFRP şeritler kirişin her iki yan yüzüne yapıştırılarak TB-1 numunesi oluşturulmuştur. TB-1 numunesi maksimum yük değeri 107.2 kN ve bu noktadaki deplasman değeri 10.9 mm iken kesme hasarı sonucu göçmüştür. Yalnızca yan yüzeylere uygulanan GFRP şeritlerin yük taşıma kapasitesine katkısı olmamıştır. Ancak referans kirişe göre maksimum yükte daha rijit davranış gözlenmiştir. Bu durum yalnızca yan yüzeylere uygulanan GFRP şeritlerin kiriş rijitliğini bir miktar artırsada güçlendirmede etkisinin olmadığını göstermektedir. Güçlendirmede bu derece yetersiz kalmasının sebebi ise kirişin çekme bölgesinde olmayan GFRP şeritlerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak artan düşey yük ile beraber kesme çatlakları, kiriş üst başlığına ulaşarak GFRP şeritlerin betondan ayrılmasına yol açmıştır. Diğer bir ifade ile kiriş kesme bölgesinde yeterli etriyenin olmaması ve uygulanan GFRP şeritlerin yeterli yapışma yüzey alanına sahip olmamaları kesme hasarının oluşumunu hızlandırmıştır. TB-1 deney numunesi için yük-deplasman grafiği Şekil.4.6 verilmiştir. Şekil 4.7’de ise TB-1 numunesinin deney sonrası

hasar analizi ve görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde kiriş-GFRP ara yüzeyinin kırılması ile kesme çatlaklarının hızla ilerlediği ve tablada hasar oluşturduğu görülmektedir.



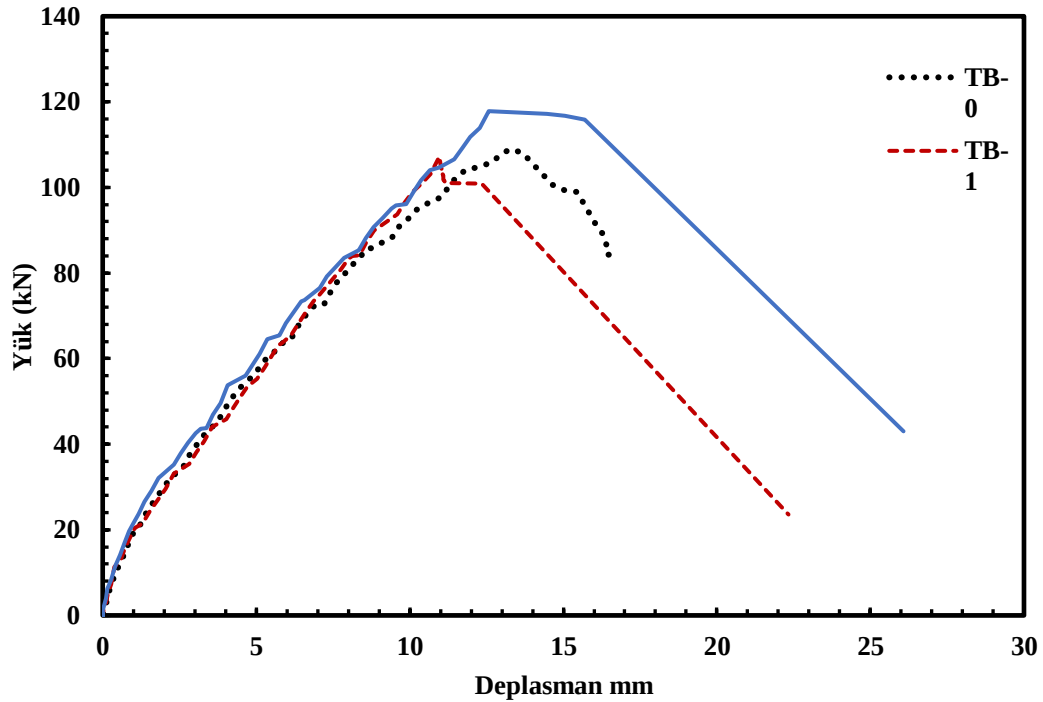
Şekil 4.6. TB-0 ve TB-1 deney numunelerinin yük-deplasman grafiği



Şekil 4.7. TB-1 numunesinin oluşan hasarların görüntüsü

#### 4.2.3. Deney Numunesi TB-2

TB-2 numunesine uygulanan GFRP şeritler kiriş çekme bölgesini de içine alacak şekilde (yarım U) şeklindedir. Uygulanan GFRP şeritler 70x295mm boyuta sahiptir. Yan şerit yüksekliği 85mm'dir. TB-2 numunesi 117.8 kN yük seviyesinde ve 12.6 mm deplasman değerine ulaştığında sol kesme açıklığında kesme hasarına uğramıştır. TB-2 numunesinde yük taşıma kapasitesi TB-0'a göre %8.17 oranında artış göstermiştir. Bu durum, yerleşimi yapılan GFRP şeritlerin kesme çatlağının oluşumunu ve ilerlemesini geciktirerek kiriş kesme kapasitesinin ve maksimum yükteki rijitlik değerini arttırmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca TB-1 ve TB-2'nin maksimum yük değerine karşılık gelen rijitliklerinin benzer olması da kiriş çekme bölgesine uygulanan GFRP'nin rijitliğe katkısını göstermektedir. Ancak bu güçlendirme için de yapışma yüzey alanının yeterli olmamasına bağlı olarak kesme hasarı ile göçme meydana gelmiştir. TB-0, TB-1 ve TB-2 deney numunelerine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.8' de verilmiştir.



Şekil 4.8. TB-0, TB-1 ve TB-2 deney numunelerinin yük-deplasman grafiği

Şekil 4.9'da TB-2 numunesine ait hasarlar gösterilmiştir. Kirişte ilk olarak eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Düşey yükün artmasıyla eğilme bölgesindeki çatlaklar



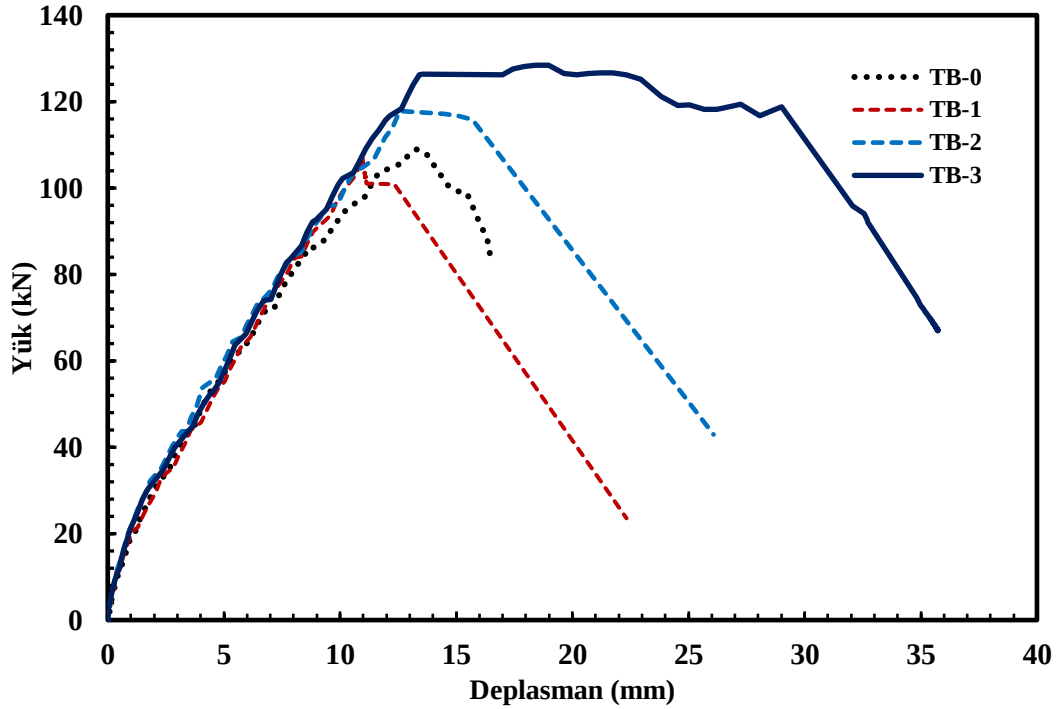
tablanın altına kadar uzamıştır. Yükün 50 kN'a ulaşması ile kirişte kesme çatlaklarının oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Bu çatlaklar 110 kN'a ulaşıldığında tablaya kadar uzamıştır. Burada yerleşimi yapılan yarım U şeklindeki GFRP şeritler çatlakların ilerlemesini belli bir aşamaya kadar geciktirmiştir. Ancak GFRP'nin yan yüzeyler boyunca olmaması çatlakların ilerlemesine ve kesme hasarının gerçekleşmesine neden olmuştur. Maksimum yüke kadar GFRP şeritler ve beton ara yüzeyi mükemmel yapışmaya sahiptir. Bu durum kesme bölgesinde yoğun gerilme birikimlerinin oluşmasını sağlamıştır. Nihayet çatlakların kiriş basınç bölgesine ulaşması ile ani ve gevrek kesme hasarı meydana gelmiştir. Bu sırada iki adet GFRP şeridin beton hasarına bağlı olarak ayrılma hasarına uğradığı görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9.TB-2 numunesinin oluşan hasarların görüntüsü

#### 4.2.4. Deney Numunesi TB-3

TB-3 kiriş numunesinin TB-2'den tek farkı kiriş yan yüzlerindeki GFRP uygulamasının tabla altına kadar uzatılmış olmasıdır. Yani TB-3'de kiriş 70x465 mm uzunluğundaki GFRP şeritler ile tabla altına kadar U şeklinde sargılanmıştır. Şekil.4.10 incelendiğinde TB-3 numunesinin, kiriş davranışının iyileştirilmesinde TB-1 ve TB-2'den daha etkili bir güçlendirme alternatifi olduğunu göstermektedir. Genellikle uygulamada imalat kolaylığı açısından U-tipi güçlendirmeler tercih edilmektedir. Diğer güçlendirme yöntemlerinde olduğu gibi ilk çatlaklar eğilme bölgesinde gözlenmiş daha sonra bu çatlaklar yük artışı ile artmaya, genişlemeye ve uzamaya devam etmiştir. Tabla altına kadar GFRP yerleşiminin yapılması beton ve GFRP'nin daha rijit davranmasını sağlamıştır. U-tipi güçlendirme ile kirişte kısmi sünek davranışında gözlenmesi önemli bir sonuçtur. Uygulanan düşey yük 126.3 kN ve o andaki deplasman 13.5 mm iken kirişte akma meydana gelmiştir. Bu andan sonra deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Yük taşıma kapasitesinde belirgin bir azalış olmadan 29 mm deplasmana ulaşıldığı anda kesme hasarı meydana gelerek deney sonlanmıştır. GFRP yerleşiminin iyileştirilmesi ile sistem rijitliğinin, maksimum yük taşıma kapasitesinin ve sünekliğin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.10. TB-0 - TB-3 deney numunelerinin yük-deplasman grafikleri



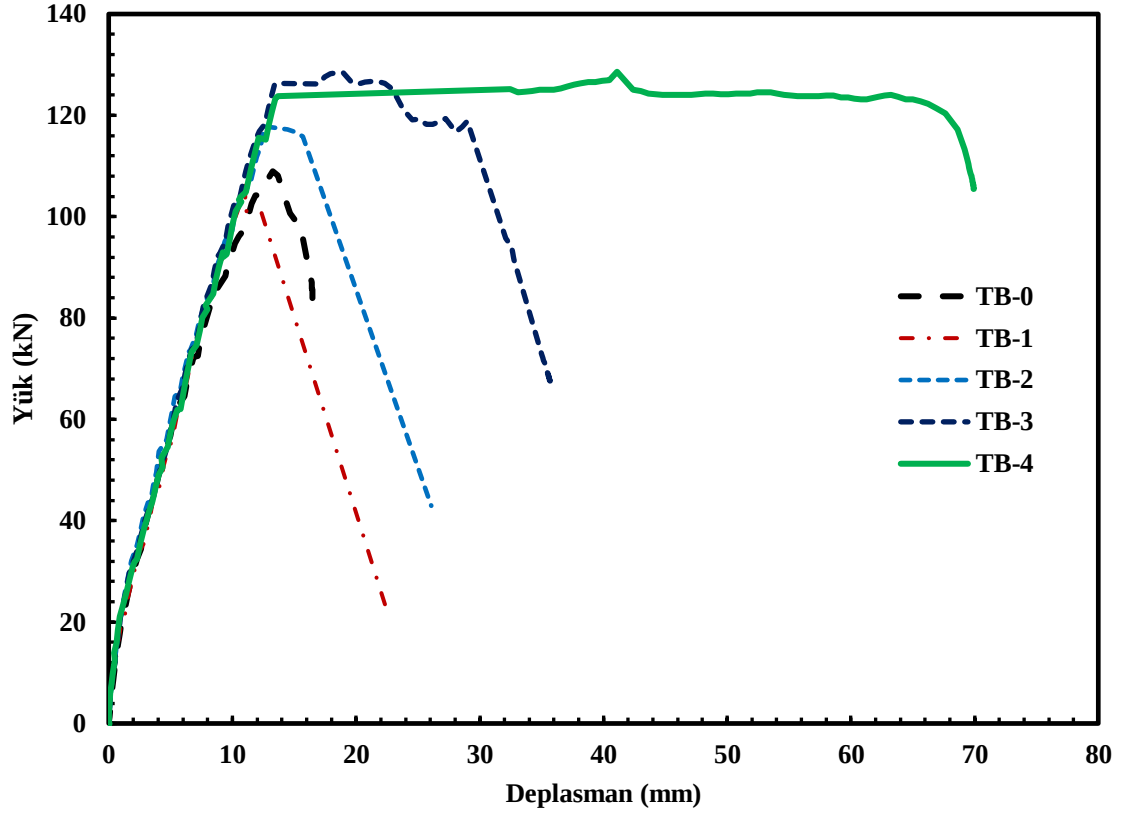
TB-3 numunesine ait Şekil 4.11'de gösterilen hasar analizi incelendiğinde oluşan kesme hasarı kirişin sol kesme açıklığında meydana gelmiştir. Bu durum TB-2 ve TB-1'de de benzerdir. Ancak oluşan hasarın yeri TB-2 ve TB-1'den farklıdır. Bu farklılık uygulanan GFRP şeritlerin kesme dayanımını artırmasından kaynaklanmaktadır. Dikkat edilirse güçlendirmenin iyileştirilmesi ile TB-1'de mesnete yakın noktada hasar gören GFRP şerit, TB-2 ve TB-3'de birer kademe ilerleyerek hasarın sağa doğru kaymasına yol açmıştır. Bu durum tasarımın bir sonraki adımında yeni tip GFRP konfigürasyonu ile davranışın daha da iyileşeceğine işaret olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.11'de kirişin ön yüzeyindeki bir GFRP şeridinde beton örtünün soyulmasıyla ayrılma gözlemlenmiştir. GFRP şeridinde yırtılma hasarı gözlenmemiştir. Bu durum seçilen  $900 \text{ gr/m}^2$ 'nin çekme dayanımına ulaşmadığını ve güçlendirme için uygun olduğunu göstermektedir. Buradaki nihai hasar betonda kesme hasarının oluşması sonucu meydana gelmiştir. Bu durum deney sonunda beton yüzeyden ayrılan GFRP şeritin kirişten sökülüp incelenmesiyle anlaşılmıştır. Kompozit uygulama yüzeyinin artışı ile birlikte kiriş ve GFRP uygulaması arasında iyi bir ara yüzey oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 4.11.TB-3 numunesinde oluşan hasarların görüntüsü

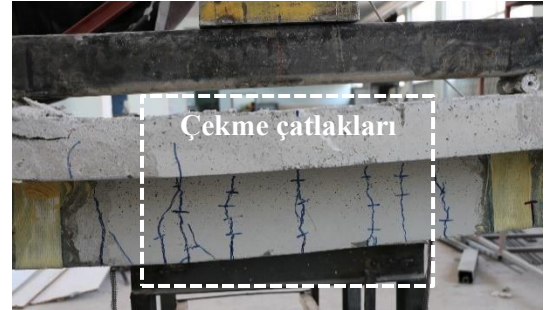
#### 4.2.5. Deney Numunesi TB-4

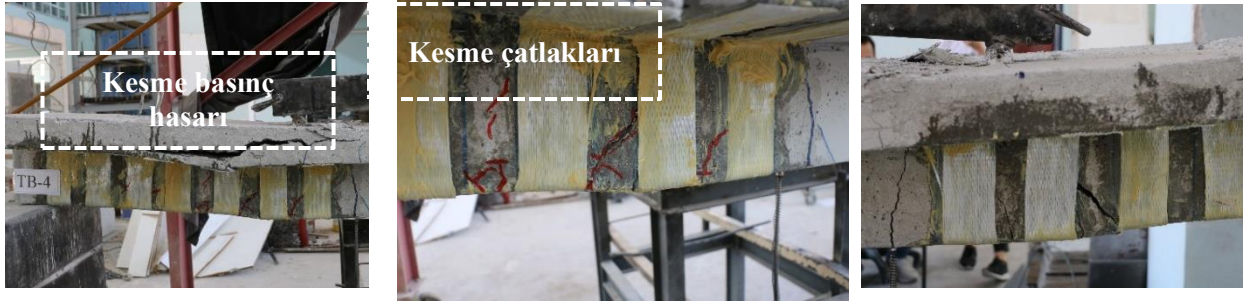
TB-3 numunesi sonuçları itibariyle yeterli rijitlik, dayanım ve süneklik değerlerinde GFRP yerleşiminin iyileştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Ancak güçlendirilen üç numunede kesme hasarıyla göçmüştür. Bu durum kirişlerin güçlendirilmesinde yeni GFRP yerleşim detayının oluşturulması noktasında fikir vermiştir. Bunun için TB-4 numunesi oluşturulmuştur. TB-4'ün TB-3'den tek farkı tabla kısmının da GFRP ile sargılanmış olmasıdır. Bu numunede, ilk çatlak 33 kN yük ve 2.4 mm deplasmanda eğilme çatlakları olarak sabit moment bölgesinde oluşmuştur. Yükün 50 kN'a ulaşmasıyla sabit moment bölgesinde eğilme çatlakları sayısında da artış olmuştur. Ayrıca 55 kN yük düzeyinde sol kesme açıklığında kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Kesme çatlaklarının sayısı artarken, sağ kesme açıklığında da kesme çatlakları kılcal düzeyde oluşmuştur. 90 kN yük düzeyinde eğilme çatlakları 2 mm genişliğe ulaşmıştır. 105 kN yükte donatı akmaya başlamıştır. Bu yük düzeyinde 11.6 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Bu noktadan sonra yük düzeyinde belirgin bir azalma olmadan orta nokta deplasmanı artmaya devam etmiş ve numune sünek bir davranış sergilemiştir. TB-4 numunesinde maksimum yük değeri 128.6 kN ve bu değerde orta nokta deplasmanı 41.1 mm olmuştur. Yükleme devam ederken numunede deplasman değeri artmaya devam etmiş ve 121.5 kN yük ve 61.5mm deplasman değerinde meydana gelen kesme hasarı sonucu göçmüştür. TB-4 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesi TB-3 ile benzerdir. Ancak TB-2 ve TB-1 numunesine göre sırasıyla %9.1 ve %19.9 daha fazla yük taşımıştır. Bu durum GFRP'nin kirişe uygulanmasında yerleşim şeklinin önemini ortaya koymaktadır. TB-4 numunesi ile yeterli dayanım, süneklik ve rijitlik şartı sağlanmıştır. Ancak nihai hasarın kesme ile gerçekleşmiş olması lifli polimer malzemeler ile yapılan güçlendirmelerde dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir. Çünkü beton basınç bölgesinde ezilme olmadan yani beton taşıma gücü kapasitesine ulaşmadan yeterli süneklik gözlense de kesme hasarının oluşabileceği anlaşılmaktadır. Şekil 4.12'de TB-4 ve ilk dört kirişin karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 4.12. TB-0 - TB-4 deney numunelerinin yük-deplasman grafikleri

TB-4 kirişine ait hasarlar Şekil 4.13'te incelendiğinde kesme hasarının oluşumu için uzayan çatlakların GFRP şeritler tarafından sınırlandırıldığı ve kesme hasarının geciktirildiği görülmektedir. Özellikle tablanın GFRP şerit ile sargılanması ayrılma hasarının oluşumunu engellemiştir. Ancak nihai hasar tabla bölgesindeki kırılma ile birlikte gerçekleşmiştir. Yani kiriş gövdesi yeterli derece de güçlendirilse de tabladaki hasar nedeniyle kesme hasarı meydana gelmiştir. Bu durum uygulama için TB-4 tipi güçlendirmenin diğer güçlendirme alternatiflerine göre daha başarılı olduğu ancak hala istenilen seviyede güçlendirme alternatifi olmadığını göstermektedir.



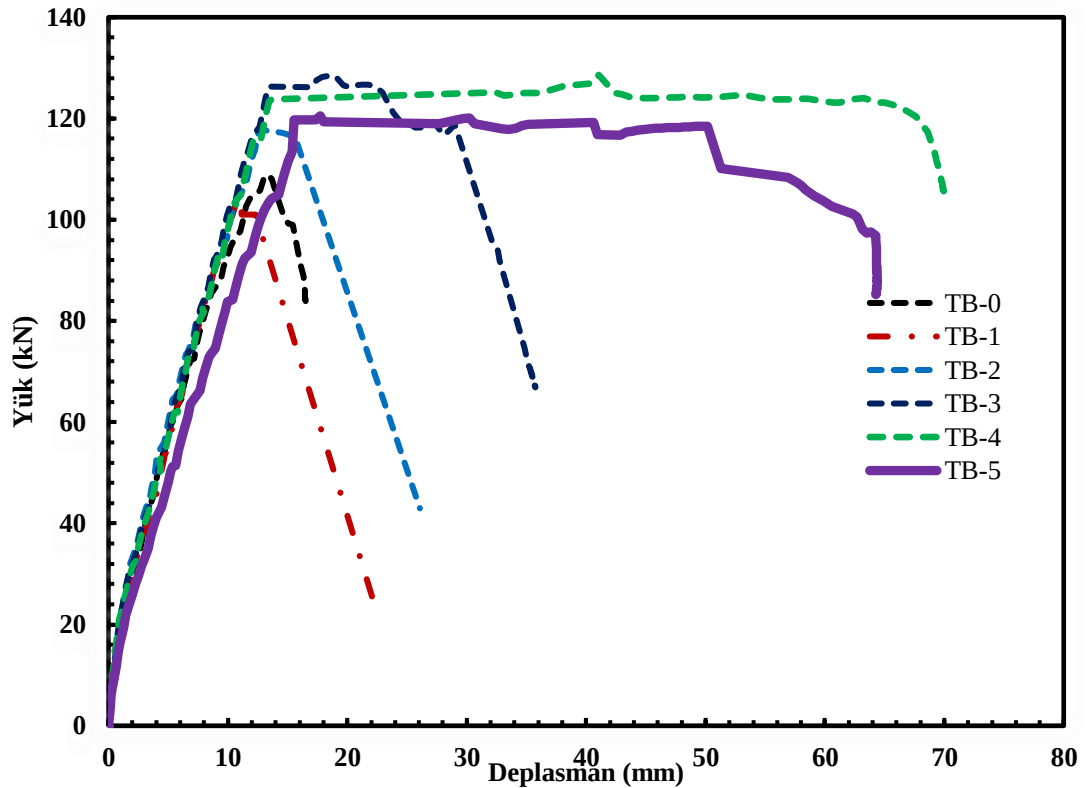


Şekil 4.13.TB-4 numunesinde oluşan hasarların görüntüsü

#### 4.2.6. Deney Numunesi TB-5

TB-4 numunesinden sonra birçok yönetmelikte var olan ve uygulamada yaygın olarak kullanımı olan tam sargılı güçlendirme alternatifi olan TB-5 numunesine ait test yapılmıştır. Bu numune hazırlanırken tablanın kenarları darbeli kırıcı matkap yardımıyla delinmiştir. Bu sayede dikdörtgen geometriye sahip kiriş kesiti ortaya çıkarılarak 70x750 mm'lik GFRP şeritlerin tam sargılama şeklinde uygulanmasıyla güçlendirilmiştir. Güçlendirme sonrasında yüksek dayanımlı çimento harcı ile kırılan kısımlar uygulamada olduğu gibi tamir edilmiştir. Diğer güçlendirme alternatiflerine göre TB-5'in hazırlığı oldukça zor olmuştur. Darbeli matkabın kullanımı sırasında oluşan titreşim ve uygulama hataları sonucu mevcut kirişe hasar verilebilmektedir. TB-5 numunesinde ilk çatlaklar, eğilme bölgesinde kirişin alt kısmında oluşmuş ve 50 kN yükte kirişin orta açıklığında tarafsız eksenin altına kadar uzamıştır. Yükün 100 kN'a ulaşması ile lifli polimer malzemede matris çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Bu durum fiberlerin kesme gerilmelerine maruz kaldığını göstermektedir. Yükün 120.5 kN'a, deplasmanın 17.8 mm'ye ulaşmasıyla TB-5 numunesinde akma meydana gelmiş deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Bu yük değeri aynı zamanda kirişin taşıdığı maksimum yük seviyesidir. Yükün 118 kN'a deplasman değerinin ise 50 mm'ye ulaşması ile kiriş sağ üst kesme açıklığında GFRP şeritler dayanımını kaybetmeden beton da artan kesme hasarları gözlenmiştir. Nihayet deplasman 58 mm'ye ulaştığı anda kesme hasarı meydana gelmiştir. TB-5 numunesi yük taşıma kapasitesinde TB-0, TB-1, TB-2'ye göre sırasıyla %10.6, %12.3 ve %2.2 artış sağlamıştır. Ancak TB-3 ve TB-4 numunelerine göre % 6.1 ve %6.7 daha az yük taşımıştır.

Bu aşamaya kadar test edilen beş numunenin yük-deplasman grafikleri Şekil 4.14’ de verilmiştir. Yük taşıma kapasitesinin ve maksimum yük değerine karşılık gelen rijitlik değerinin daha az çıkmasının nedeninin tam sargılama uygulamasının zor olması ve güçlendirme uygulamasında kirişe istenmeyen ön hasarların verilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Deney sonunda GFRP şeritlerin birinde fiber yırtılma hasarı gözlenmiştir (Şekil 4.15). Genel olarak çatlakların genişlemesini sınırlandıran GFRP şeritler kirişin sünek davranmasına katkı sağlamıştır. Literatüre göre denge altı sünek tasarıma sahip bir kiriş için yeterli süneklik oranı 4~5 civarındadır. TB-5 için elde edilen süneklik katsayısı 4.77 olarak elde edilmiştir. Ancak TB-4’de olduğu gibi burada da nihai hasarın kesme ile gerçekleşmiş olması uygulanan güçlendirme tekniğinin yeterli seviyede olmadığını göstermektedir. Çünkü beton basınç bölgesinde ezilme olmadan yeterli süneklik gözlene de kesme hasarı meydana gelerek deney sonlanmıştır.



Şekil 4.14. TB-0 - TB-5 deney numunelerinin yük-deplasman grafikleri



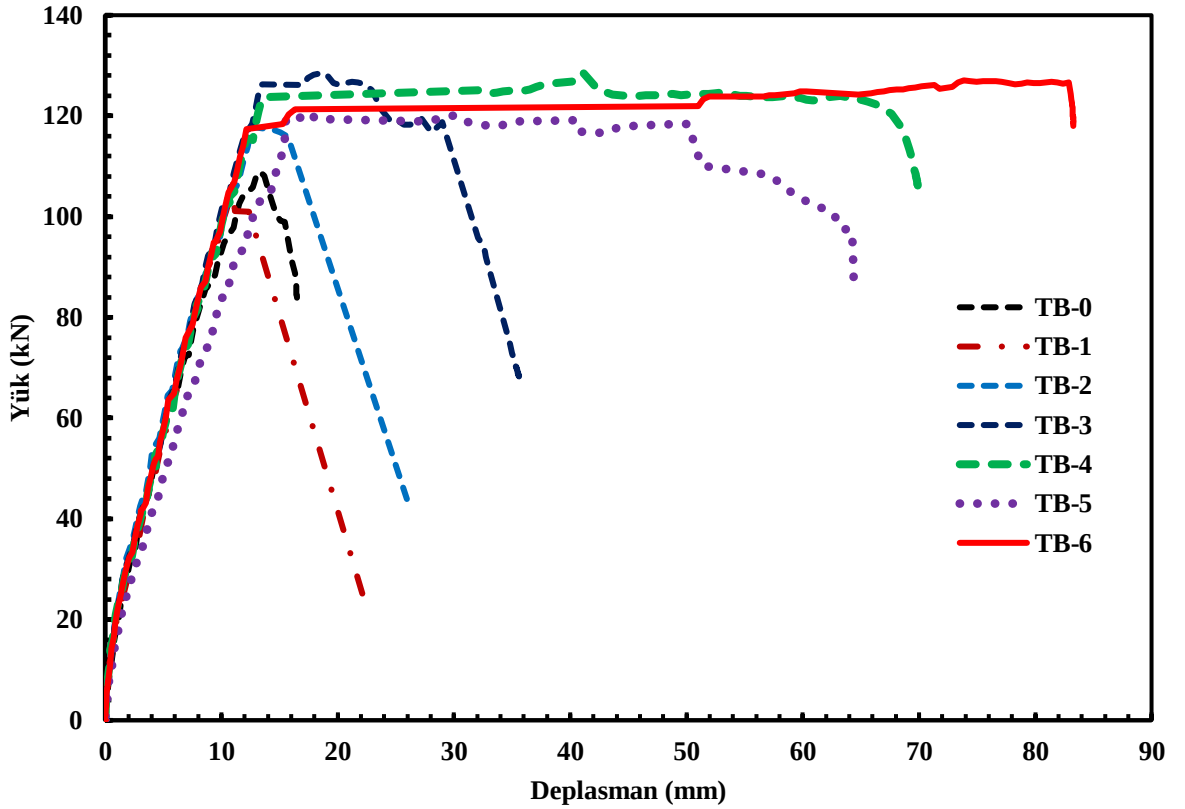


Şekil 4.15. TB-5 numunesinde oluşan hasarların görüntüsü



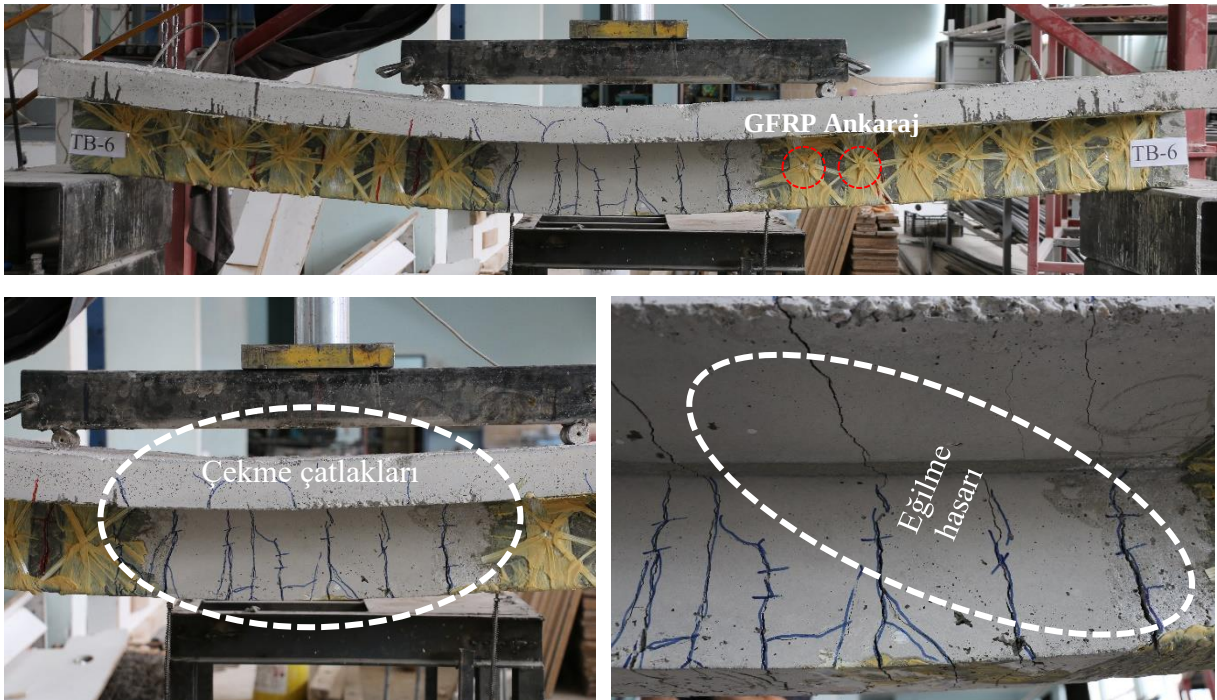
#### 4.2.7. Deney Numunesi TB-6

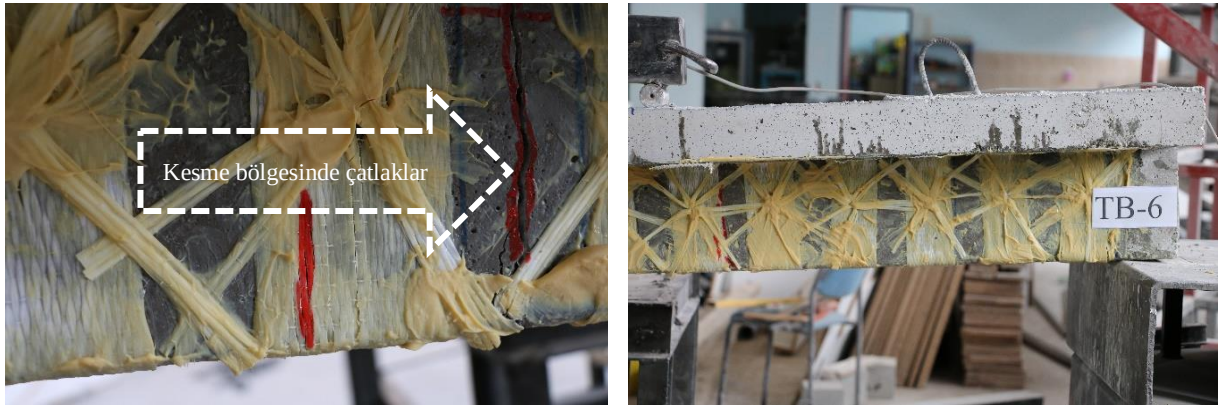
TB-6 numunesi ankraj uygulaması olan ilk güçlendirme alternatifidir. TB-6 numunesi TB-4'deki benzer güçlendirme konfigürasyonuna sahiptir. Ancak kiriş gövde yüksekliğinin (170mm) tam ortasında (85mm) 90°'lik spike tipi ankraj uygulanmıştır. Diğer güçlendirilen kirişlerde olduğu gibi ilk kılcal çatlaklar 30 kN yük seviyesinde kiriş orta açıklığında eğilme çatlakları olarak gözlenmiştir. Yükün kademeli olarak artması ile eğilme bölgesinde yeni çatlaklar oluşurken mevcut çatlaklar uzamaya devam etmiştir. Düşey yükün 121 kN'a ve deplasmanın 16.3 mm'ye ulaşmasıyla akma meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra davranışa eğilme hâkim olmuştur. TB-6 numunesi, ankrajsız TB-5 ve TB-4'de olduğu gibi sünek davranış sergilemiştir. TB-6 numunesinde uygulanan ankrajlar sayesinde yük taşıma kapasitesi 127.05 kN'a ulaşmıştır. Şekil 4.16'da TB-6 ve önceki tüm numuneler için yük-deplasman ilişkisini gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan ankrajlar sayesinde TB-6 numunesi TB-4'e göre %27 daha sünek davranış sergilemiştir.



Şekil 4.16. TB-0 - TB-6 deney numunelerinin yük-deplasman grafikleri

TB-6 numunesinin yük taşıma kapasitesi TB-3 ve TB-4 ile yaklaşık benzerdir. Ancak TB-6 numunesi dayanım, süneklik ve rijitlik bakımından iyi durumda olmakla birlikte tipik eğilme kiriş davranışı sergilemesi ile dikkat çekmektedir. Ayrıca TB-6 numunesinin yük taşıma kapasitesi TB-0, TB-1, TB-2 ve TB-5'e göre sırasıyla %16.6, %18.5, %7.8, %5.4 artış göstermiştir. Ayrıca maksimum yüke ulaşana kadar yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açının artmış olması ankraj uygulamasının rijitlik üzerinde de ciddi etki sağladığını göstermiştir. Aynı zamanda TB-6 numunesindeki ankraj uygulaması GFRP şeritlerin betondan ayrılmasını da engellemiştir (Şekil 4.17). Deney sonunda ankrajlarda herhangi bir sıyrılma gözlenmezken bir adet şerit fiberde yırtılma hasarı gözlenmiştir. GFRP ankrajların uygulandığı bölgelerde mikro kesme çatlaklarının ve ankrajlarda herhangi bir deformasyon oluşmaması uygulamanın başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Ayrıca uygulanan ankrajlar GFRP şeritlerin betondan ayrılmasını engellemiş bu sayede kesme bölgesindeki çatlakların uzamasını sınırlandırmıştır. Süneklik katsayısı 7.35 olarak elde edilen TB-6 numunesi güçlendirme uygulaması başarılı numuneyi temsil etmektedir. Bu durum GFRP uygulamasında tercih edilen 900 gr/m<sup>2</sup>'nin yeterli dayanıma sahip olduğunu ve ankraj desteği ile beraber sünek davranışa katkı sağladığını göstermektedir. Bu aşamada seçilen cam lifli polimer kumaş ile yapılacak GFRP ankrajlı uygulamaların kirişte oluşan kesme hasarının engellenebileceği kanaatine varılmıştır.



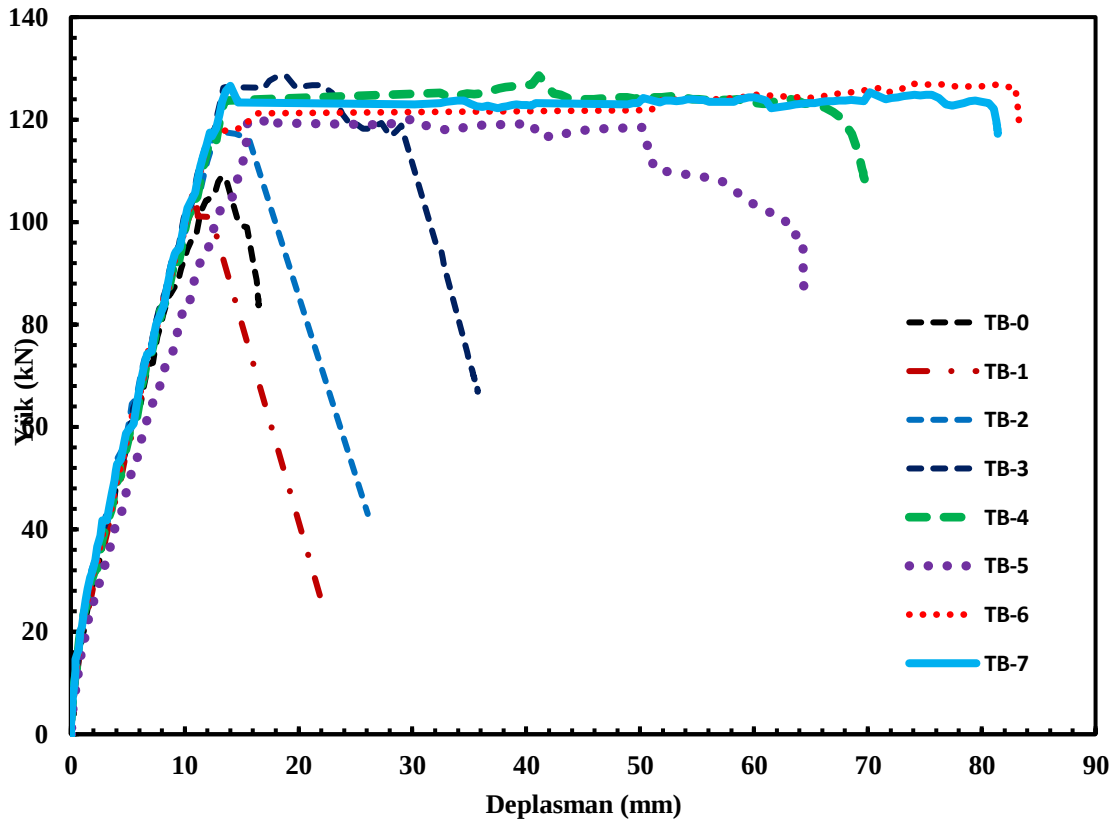


Şekil 4.17.TB-6 numunesinde oluşan hasarların görüntüsü

#### 4.2.8. Deney Numunesi TB-7

TB-7 numunesi de GFRP yerleşimi ile TB-4 numunesine benzemektedir. Yalnızca uygulanan GFRP'ye ilave olarak kiriş tablası ile gövde birleşim noktasına yatay doğrultu ile  $45^\circ$  ankrajlar uygulanarak yapılan güçlendirme alternatifidir. TB-7 numunesi 126.5 kN yük ve 12.3 mm deplasman değerine ulaştığı anda akma gözlenmiştir. TB-7 numunesi TB-3, TB-4 ve TB-6 ile yaklaşık benzer yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Ancak TB-7'nin yük taşıma kapasitesi TB-0, TB-1, TB-2 ve TB-5 ile karşılaştırıldığında %16.1, %18, %7.4 ve %5 daha fazla elde edilmiştir. Ayrıca TB-7 numunesi, ankrajlı TB-6'ya göre nispeten daha rijit davranış sergilemiştir. Ankrajlı TB-6 ve TB-7 numunelerinde yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açı belirgin şekilde artmıştır. Bu durum Şekil 4.18'de gösterilen diğer güçlendirme alternatiflerine göre oldukça fazladır. Ayrıca TB-7'de akma anındaki yük seviyesine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık TB-0'ın kesme hasarına uğradığı yük ile aynıdır. Bu durum TB-7 ve TB-0 karşılaştırıldığında dayanım, rijitlik ve süneklik bakımından oldukça başarılı bir güçlendirme yapıldığını göstermektedir. Şekil 4.19'daki hasar analizi incelendiğinde, uygulanan ankraj bölgesinin etkisi ile GFRP hasar bölgeleri kirişin yan ve alt yüzeyinde oluşarak TB-6 numunesi ile benzerlik göstermiştir. Kesme bölgesinde oluşan kesme hasarları güçlü GFRP şeritler sayesinde sınırlandırılmıştır. Bu durum uygulanan ankrajların etkisiyle yük taşıma kapasitesinin de artmasına yol açmıştır. Kesme güç tükenmesine ulaşamayan kirişin eğilme bölgesinde oluşan çatlakların

artmasıyla kiriş eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Sonuç olarak betonarme T-kirişlerde ankraj uygulamasının hem 90° hem de 45° için etkili olacağı gözlenmiştir. Özellikle diğer güçlendirme yöntemlerine göre yük taşıma kapasitesine katkıları oldukça fazladır. Ayrıca kiriş tablası ile gövde birleşim noktasına yatay doğrultu ile 45° yapılan ankrajların rijitlik artışına daha fazla katkı sağladığını göstermektedir. Bu etki ankraj malzemesinin cam fiberlerden seçilmesi, dayanımının yeterli olması, seçilen  $\text{gr/m}^2$ 'nin uygun olması ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca ankraj deliklerinin hava ile temizlenmesi ve seçilen epoksinin beton ve lifli kompozit arasında mükemmel yük transferini gerçekleştirmesi etkili olmuştur.



Şekil 4.18. TB-0 - TB-7 deney numunelerinin yük-deplasman grafikleri





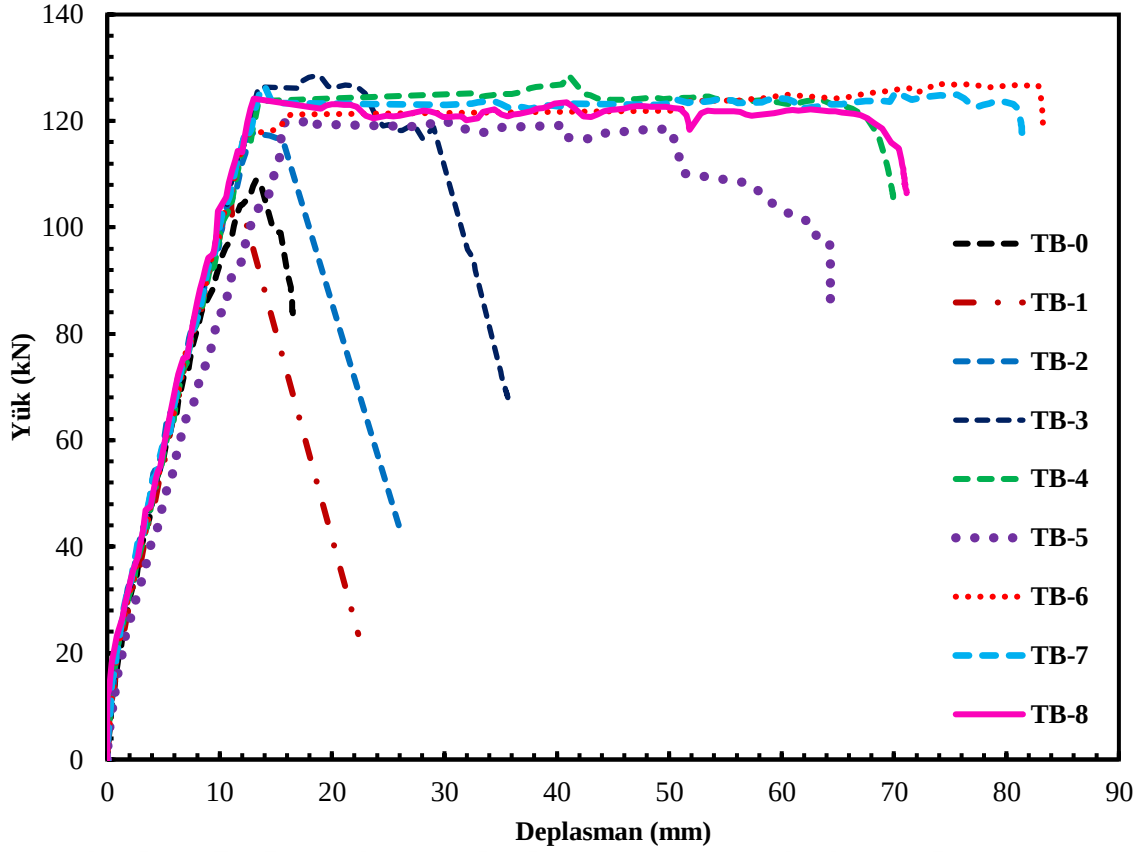
Şekil 4.19. TB-7 numunesinde oluşan hasarların görüntüsü

#### 4.2.9. Deney Numunesi TB-8

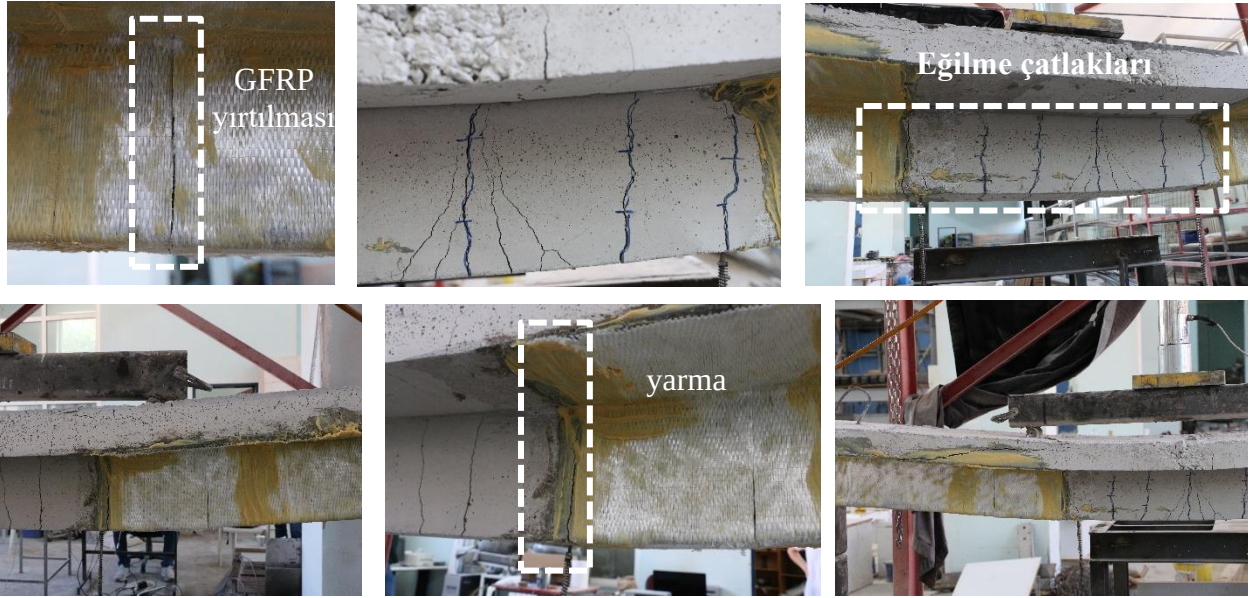
Yapılan GFRP şerit ve ankrajlı güçlendirmelerden sonra son olarak ankrajsız TB-8 numunesi oluşturulmuştur. TB-8 kirişi, 790x830 mm uzunluklu GFRP kumaşın beton tabla kısımları da dahil olmak üzere U şeklinde kesme açıklığı boyunca yapılan güçlendirme tipidir. Uygulama için ankraj çözüm önerisi açısından daha pratik olması düşünülen alternatiftir. Şekil 4.20 incelendiğinde TB-8 numunesinin yük taşıma kapasitesi ve süneklik bakımından ankrajlı TB-6 ve TB-7 güçlendirme alternatifleri ile benzer davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca akma anındaki rijitlik değeri TB-7 ile daha yakın ilişki göstermektedir. TB-7 tipi güçlendirmede ankraj işçiliği ve daha az malzeme kullanımı söz konusu iken TB-8 numunesinde ankrajsız çözüm ile beraber daha fazla GFRP'nin kullanılması söz konusudur. Ancak her iki tip güçlendirmenin de etkili güçlendirme alternatifi olarak kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Diğer güçlendirme alternatiflerine benzer şekilde 30 kN yük seviyesinde kiriş eğilme bölgesinde hasarlar başlamış, 90 kN yük seviyesine ulaşıldığında matris çatlaklarındaki ayrılmalardan dolayı GFRP'nin yük taşıdığı anlaşılmıştır. Yükün 124.2 kN'a, deplasmanın 13.1 mm'ye ulaşmasıyla TB-8 numunesinde akma meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. TB-8 numunesi TB-0, TB-1, TB-2 ve TB-5 ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesindeki artış sırasıyla %13.9, %15.8, %5.4 ve %3 mertebesinde. TB-8 numunesi TB-3, TB-4, TB-6 ve TB-7 numuneleri karşılaştırıldığında ise sırasıyla %3.2, %3.4, %2.2 ve %1.9 daha az yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum TB-8 in diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha pratik bir uygulama olarak tercih edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca TB-8 numunesi, diğer güçlendirme alternatiflerine göre daha sünek ( $\delta=7.80$ ) bir davranış sergilemiştir.

TB-8 numunesine ait deney sonrası hasar analizleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Deney sonuna kadar GFRP ile beton arasında ayrılma hasarı gözlenmemiştir. Ancak yarma hasarının gözlemlendiği bölgeler olmuştur. Kirişin sol kesme açıklığında tabla kısmında gözlenen kesme hasarı GFRP tarafından engellenmiştir. Bu numunede oluşan hasar mekanizması incelendiğinde, TB-7 de yapılan ankraj uygulamasının TB-8 kirişine uygulanması durumunda tablada meydana gelen hasarların minimize edilerek kirişin yük taşıma kapasitesinin artırılması ile birlikte hasar bölgesinin değişeceği öngörülmüştür.





Şekil 4.20. TB-0 - TB-8 deney numunelerinin yük-deplasman grafiği



Şekil 4.21. TB-8 numunesinde oluşan hasarların görüntüsü

Son olarak, deney numunelerinde oluşan ilk çatlak, hasar şekli ve GFRP şeritlerin durumu açısından karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2’de deney sonuçların değerlendirilmesi gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney sonuçların değerlendirilmesi

| Numune No   | İlk çatlak |                |        |       |                | Hasar     |                |             | Nihai Gözlem                                          |
|-------------|------------|----------------|--------|-------|----------------|-----------|----------------|-------------|-------------------------------------------------------|
|             | Yükü (kN)  | Deplasman (mm) | Tipi   | Açısı | Yeri           | Yükü (kN) | Deplasman (mm) | Hasar Şekli |                                                       |
| <b>TB-0</b> | 30         | 1.61           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 108.90    | 13.30          | Kesme       | Sağ mesnete yakın kesme kırılması ile deney sonlanmış |
| <b>TB-1</b> | 30         | 1.85           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 107.20    | 10.90          | Kesme       | Sol mesnete yakın kesme kırılması ile deney sonlanmış |
| <b>TB-2</b> | 50         | 3.80           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 117.80    | 12.60          | Kesme       | Sol mesnete yakın kesme kırılması ile deney sonlanmış |
| <b>TB-3</b> | 30         | 1.73           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 120.80    | 29.70          | Kesme       | Sol mesnete yakın kesme kırılması ile deney sonlanmış |
| <b>TB-4</b> | 33         | 2.35           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 121.50    | 61.50          | Eğilme      | Eğilme platosuna ulaştıktan sonra kesme kırılması     |
| <b>TB-5</b> | 50         | 5.10           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 118.00    | 50.00          | Eğilme      | Açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlanmış        |
| <b>TB-6</b> | 30         | 1.82           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 127.00    | 73.80          | Eğilme      | Açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlanmış        |
| <b>TB-7</b> | 30         | 1.72           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 117.20    | 81.40          | Eğilme      | Açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlanmış        |
| <b>TB-8</b> | 30         | 1.85           | Eğilme | 90    | Eğilme Bölgesi | 118.30    | 83.26          | Eğilme      | Açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlanmış        |

### 4.3. Güçlendirilmiş Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Tüm numunelerin deneyleri tamamlandıktan sonra, laboratuvar testlerinden toplanan verilerin sonuçları üzerinden yük ile deplasman arasındaki ilişkiyi gösteren bir eğri çizilmiştir. Bu temel grafikten sonra numunelerin süneklikleri, enerji tüketme kapasiteleri ve numunelerin rijitlikleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

#### 4.3.1. Sünekliğin değerlendirilmesi

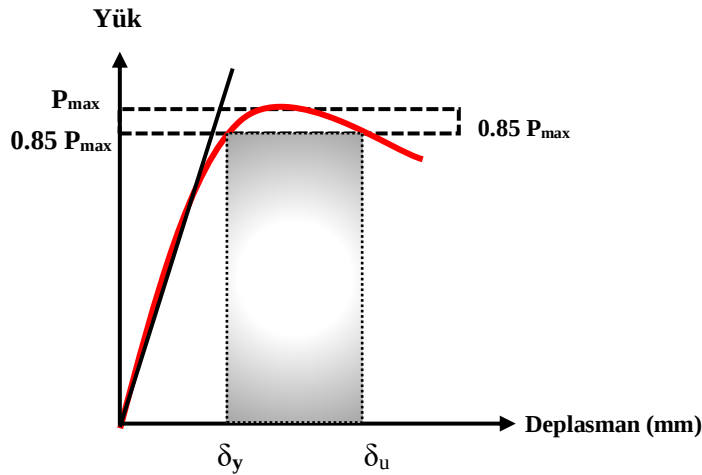
Süneklik, yük taşıma kapasitesinde herhangi bir artış olmadan yapı elemanlarının deplasman miktarındaki artış olarak tanımlanmaktadır. Süneklik katsayısı  $\mu$ , yükün %85'ine karşılık gelen deplasman değerinin, akma anındaki deplasman değerine oranıdır. Süneklik limitleri dahilindeki dayanım düşüşü %15 ( $P_u = 0,85 \times P_{max}$ ) olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle numunelerin süneklik oranı hesaplanırken Şekil 4.22'de gösterildiği gibi maksimum yükün %85'ine karşılık gelen  $\delta_u$  ve  $\delta_y$  bulunmuştur. Daha sonra süneklik oranı Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden  $\delta_y$ , akma (mm) deplasmanının değeridir ve  $\delta_u$ , yükün %85'ine karşılık gelen yer değiştirmenin (mm) değeridir.

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (4.1)$$

Burada;  $\mu$ : Süneklik

$\delta_u$  : Kopma anındaki şekil değiştirme

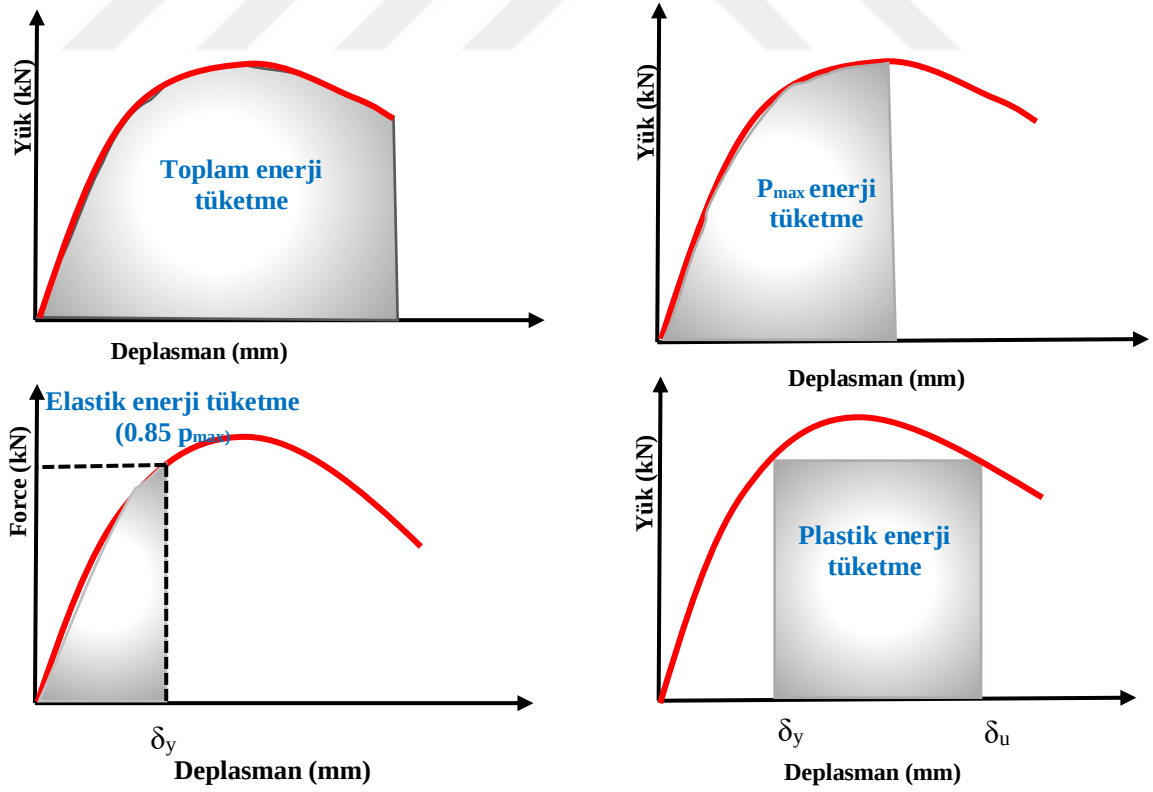
$\delta_y$ : Akma anındaki şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.



Şekil 4.22. Sistem sünekliğinin değerlendirilmesi grafiği

#### 4.3.2. Enerji tüketme kapasitesinin değerlendirilmesi

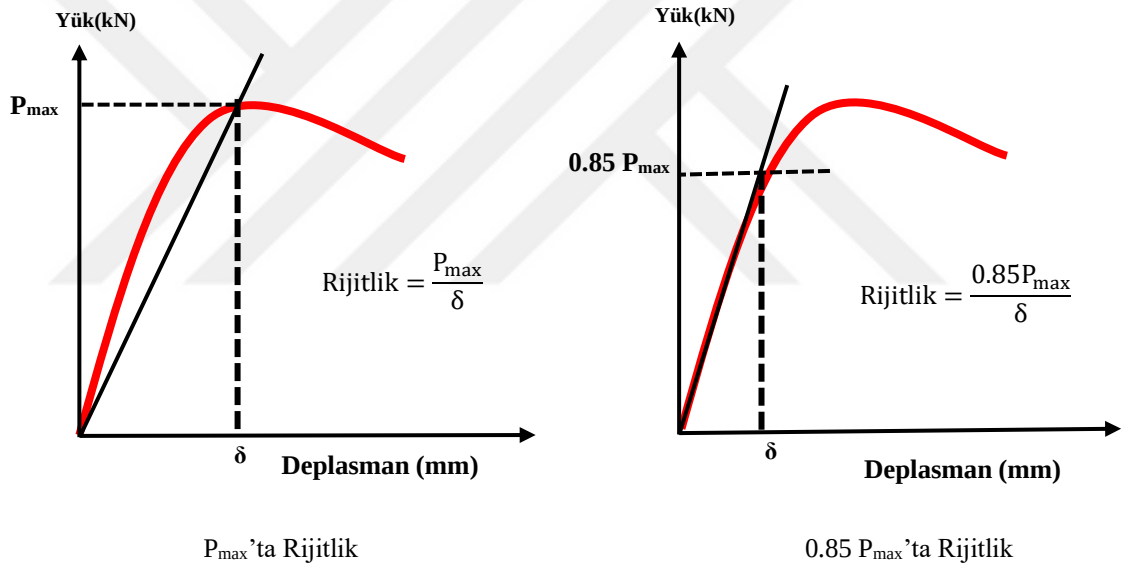
Deney elemanlarının toplam enerji tüketme kapasiteleri her bir numuneye ait yük deplasman eğrilerinin altında kalan alanların kümülatif toplamından hesaplanabilmektedir. Burada sırasıyla deney sonunda grafiğin altında kalan toplam, maksimum yükteki, akma anındaki ve plastik seviyede tüketilen enerji değerleri hesaplanmıştır. Her bir yük-deplasman eğrisinin altındaki alanların toplamı ile toplam enerji tüketme kapasitesi hesaplanmıştır. Maksimum yük değerine kadar eğri altında kalan alan hesap edilerek  $P_{max}$  durumundaki enerji tüketme kapasitesi hesaplanmıştır. Daha sonra her bir numunenin  $0.85P_{max}$  değeri altında kalan ve  $\delta_y$  ile sınırlanan alan hesap edilerek teorik akma anındaki enerji tüketme kapasitesi hesap edilmiştir. Son olarak eğri altında  $\delta_y$  ve  $\delta_u$  tarafından sınırlandırılan alan hesaplanarak plastik enerji tüketme kapasitesi hesap edilmiştir. Bu hesap kısaca  $\delta_u$  değerine kadar olan eğri alanından  $\delta_y$  değerine kadar olan eğri alanın çıkarılması ile elde edilmiştir. Enerji tüketme kapasitesi hesabına ilişkin şematik gösterim Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Enerji tüketme kapasite hesabının şematik olarak gösterimi

### 4.3.3. Rijitlik

Rijitlik, yapısal elemanın yük altında deplasmana karşı mukavemeti olarak tanımlanır. Test elemanlarındaki rijitlik, başlangıç rijitliği, akma rijitliği ve hasarlı rijitliği olarak değerlendirilmiştir. Başlangıç rijitliği, yük-deplasman grafiğinde ilk çatlağın görüldüğü eğim olarak belirlenmiştir (Kankal,2011). Bunun için ilk çatlağa denk gelen yükün bu yükteki deplasmana oranı hesaplanmıştır. Benzer şekilde amada rijitlik akma anındaki yükün akma anındaki deplasmana oranı ve hasarlı rijitlik hasarlı anındaki yükün hasarlı anındaki deplasmana oranı olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.24).



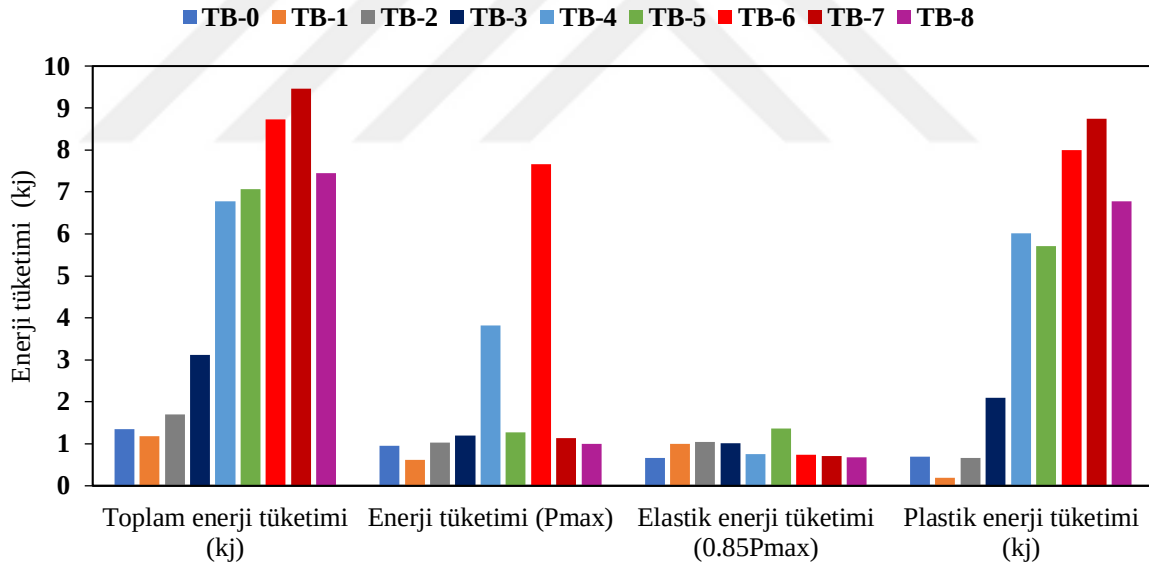
Şekil 4.24. Rijitlik hesabının şematik olarak gösterimi

Kirişlerin dayanım, rijitlik değişimleri, Enerji tüketme kapasiteleri ve süneklikleri üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Süneklik karşılaştırması yapılırken, kirişin kapasitesinde ciddi bir kayıp olmadan yapabileceği maksimum deplasmanlar dikkate alınır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrıca enerji tüketim karşılaştırması Şekil 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneysel çalışma sonuçları

| Test numuneleri | $P_{max}$ (kN)  | $P_u$ ( $0.85P_{max}$ ) (kN) | $\delta_y$ (mm) | $\delta_u$ (mm) | Süneklik oranı ( $\delta_u/\delta_y$ ) | Akmada rijitlik ( $0.85P_{max}$ ) | Artış Oranı | Maks. Yükte Rijitlik ( $P_{max}$ ) | Artış Oranı |
|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| TB-0            | 108.965         | 92.620                       | 9.95            | 16.75           | 1.683                                  | 9.13                              | .....       | 8.09                               | .....       |
| TB-1            | 107.249         | 91.162                       | 9.1             | 14              | 1.54                                   | 11.56                             | 1.27        | 10.74                              | 1.33        |
| TB-2            | 117.825         | 100.151                      | 10.15           | 17.2            | 1.69                                   | 10.63                             | 1.16        | 9.97                               | 1.23        |
| TB-3            | 128.419         | 109.156                      | 11.1            | 30.5            | 2.75                                   | 11.05                             | 1.21        | 9.47                               | 1.17        |
| TB-4            | <b>128.597*</b> | <b>109.307*</b>              | 11.5            | 64              | 5.57                                   | 10.13                             | 1.11        | 3.61                               | ....        |
| TB-5            | 120.523         | 102.445                      | 13.2            | 63              | 4.77                                   | 7.62                              | .....       | 7.01                               | .....       |
| TB-6            | 127.057         | 107.998                      | 11.3            | 79.8            | 7.06                                   | 10.02                             | 1.1         | 1.89                               | .....       |
| TB-7            | 126.588         | 107.600                      | 10.35           | <b>81*</b>      | <b>7.83*</b>                           | 10.28                             | 1.13        | 9.50                               | 1.17        |
| TB-8            | 124.192         | 105.563                      | 10.55           | 68              | 6.44                                   | 10.32                             | 1.13        | 9.76                               | 1.21        |

\*: Maksimum değerler



Şekil 4.25. Tüm numunelerin enerji tüketim kapasitelerinin karşılaştırması

Yapılan deneysel güçlendirme çalışmaları sonucunda her bir numune için farklı enerji tüketme kapasiteleri elde edilmiştir. İstenilen dayanım artışları ile istenilen sünek davranış da elde edilmiştir. Özellikle TB-4 ve sonrasındaki güçlendirme alternatiflerinde yeterli sünekliğin sağlandığı görülmektedir. Ayrıca süneklik ile paralel ilişki içerisinde olan enerji tüketme kapasiteleri üzerinde de karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar dört farklı enerji tüketme kapasiteleri üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.25'ten de görüleceği

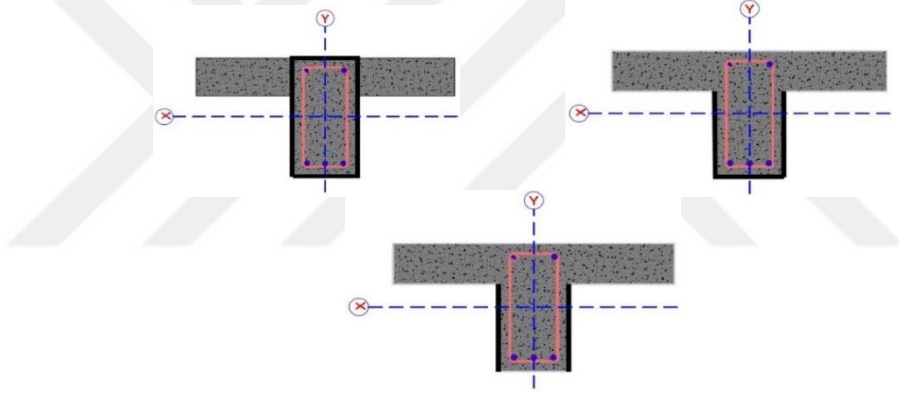


gibi ankrajlı numunelerin (TB-6 ve TB-7) enerji tüketim kapasiteleri en fazladır. Ayrıca TB-5'in TB-4 ve TB-8'e yakın olması aslında döşemeye verilerek yapılan ve oldukça zaman alıcı ve maliyetli olan tam sargı yerine diğer alternatiflerin de kullanılabileceğini göstermektedir.

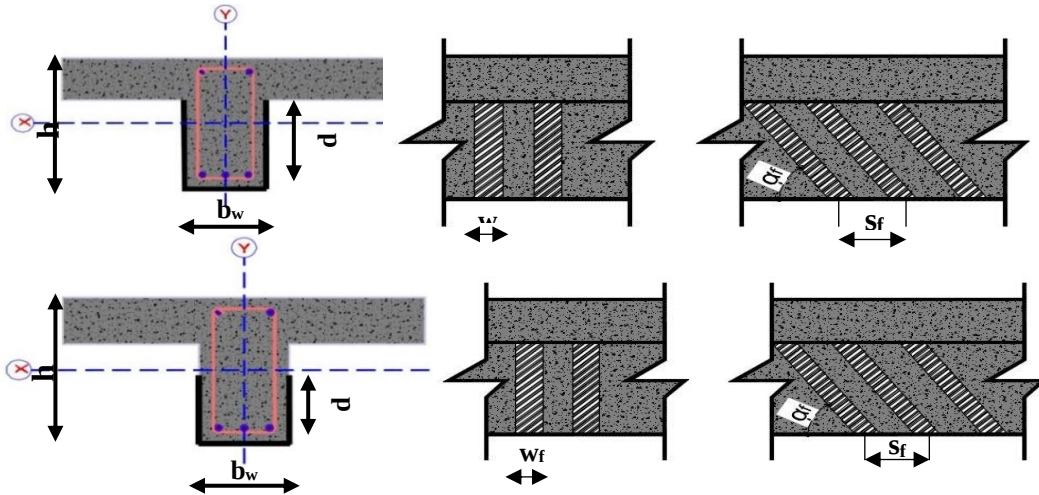
Bununla beraber elde edilen enerji tüketim değerlerinin elastik ve plastik enerji tüketimi açısından ayrı ayrı incelenmesinden farklı sonuçlarda çıkmaktadır. Elastik enerji tüketimi açısından karşılaştırma yapıldığında tam sargılı TB-5 numunesi diğer numunelere göre daha yüksek sonuç vermiştir. Yani tüm numuneler içerisinde doğrusal elastik davranış içerisinde geçici olarak depolanan enerji tüketimi en fazla TB-5 numunesinde gözlenmiştir. Bu durum ani düşey yük etkileri altında TB-5'in elastik enerji tüketme kapasitesinin daha etkili olduğunu göstermektedir. Plastik enerji ise, yapı sistemindeki akma noktasından (elastik sınırdan) sonra tüketilen enerjidir. Özellikle deprem gibi etkiler altında yapı elemanlarının hasar alması sonrasında tüketilen enerjidir. Bu açıdan karşılaştırıldığında TB-7 numunesi daha fazla plastik enerji tüketme kapasitesine sahiptir. Ayrıca TB-4 ve sonrasındaki güçlendirme alternatifleri yeterli plastik enerji tüketme kapasitesine sahip olduğu ifade edilebilir. Özellikle TB-6 ve TB-7 numunelerinin plastik enerji tüketme kapasitelerinin yüksek çıkması uygulanan ankrajların etkinliğini göstermektedir. Bu durum güçlendirme uygulamalarında ankrajın yapısal eleman bütünlüğünü sağlamada etkili olduğunu göstermiştir.

## 5. ANALİTİK ÇALIŞMASI

Betonarme kirişlerin FRP şeritlerle farklı konfigürasyonlarda güçlendirilmesi için birçok alternatif yönetmeliklerde verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar üç farklı yönetmelik dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Bunlar sırasıyla ACI 440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001'dir. Bu sayede yönetmelik yaklaşımları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır. TBEC-2019 hariç diğer iki yönetmelikte T- şekil kirişler için yan yapıştırma, U-mantolama, tam sargılama ve açılı yerleşim detayları vardır (Şekil 5.1). TBEC-2019'da ise yalnızca tam sargılama alternatifi verilmiştir. Ayrıca sargılama tipine göre kesme dayanımlarının hesabı da değişmektedir (Şekil 5.2) (Sarıbyık ve ark, 2021).



Şekil 5.1. FRP şeritleri kullanarak betonarme kirişlerin kesme güçlendirmesi için tipik sarma şemaları



Şekil 5.2. FRP şeritler için kesme güçlendirme hesaplamalarında kullanılan boyutsal değişkenler Standart betonarme bir kirişin kesme kapasitesi enine donatı ( $V_s$ ) ve betonun ( $V_c$ ) katkıları dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Lifli polimer ile sargılanması durumunda ise elyafın

( $V_f$ ) katkısında göz önüne alınmaktadır. Tüm bu katkıların toplanması ile Denklem 5.1’de verilen kesme kapasitesi hesap edilmektedir.

$$V_r = V_c + V_s + V_f \quad (5.1)$$

### 5.1. ACI-440.2R-17

ACI 440.2R düzenlemeleri durumunda, FRP sisteminin katkısına ek bir  $w_f$  azaltma faktörü uygulanmaktadır. Burada  $V_c$  ve  $V_s$ , ACI 318 standardı kullanılarak hesaplanan kesme kapasitesine beton ve iç donatının katkılarıdır. ACI 440.2R-17’de FRP’nin kesme kuvvetine katkısı ( $V_f$ ), Denklem 5.2, 5.3, 5.4’teki gibi hesaplanmaktadır. Burada  $A_{fv}$ ; aralıklı FRP kesme takviyesi alanı, ( $\text{mm}^2$ ),  $f_{fe}$ ; FRP’de etkili gerilme (Kesit hasarında elde edilen gerilme seviyesi), (MPa),  $\varepsilon_{fe}$ ; FRP takviyesinde etkili şekil değiştirme seviyesi, (mm/mm).

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) * d_{fv}}{S_f} \quad (5.2)$$

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (5.3)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (5.4)$$

GFRP’nin kirişe uygulanma yerleşim tipine göre  $\varepsilon_{fe}$ ’nin sınır değeri değişmektedir. GFRP uygulaması kir işe tam sargılama (tamamen sarılmış) şeklinde uygulanıyorsa Denklem 5.5, Yapıştırılmış U-sargılar veya yapıştırılmış yüz katları şeklinde uygulanıyorsa Denklem 5.6 kullanılmaktadır (Sarıbiyık ve ark, 2021). Burada  $\varepsilon_{fu}$ ; FRP güçlendirmesinin tasarım kopma gerilimi,  $K_v$ ; kesme için bağı bağımlı katsayı.

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 f_u \quad (5.6)$$

Bağ azaltma katsayısı, beton dayanımının, kullanılan sargı şemasının tipinin ve laminatın sertliğinin bir fonksiyonudur. Bağ azaltma katsayısı Denklem 5.7’den hesaplanabilir.

$$k_v = \frac{k_1 k_2 l_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (5.7)$$

Aktif bağ uzunluğu  $L_e$ , bağ stresinin çoğunun muhafaza edildiği uzunluktur. Bu uzunluk Denklem 5.8 ile elde edilmiştir.

$$L_e = \frac{23,300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (5.8)$$

Bağ azaltma katsayısı ayrıca, sırasıyla betonun dayanımı ve kullanılan sargı şeması tipi için hesaplanan  $k_1$  ve  $k_2$  olmak üzere iki modifikasyon faktörüne de bağlıdır. Bu modifikasyon faktörlerine ilişkin ifadeler Denklem (5.9) ve Denklem 5.10'da verilmiştir.

$$k_1 = \left( \frac{f_c^-}{27} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.9)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{For (U)} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & \text{For (Two sides – bonded)} \end{cases} \quad (5.10)$$

Daha sonra uygun şekilde ankrajlanmış U-sargılar, FRP kopması nedeniyle hasar görecektir şekilde tasarlanabilir. Bununla birlikte, hiçbir durumda, ankrajlı FRP U-sargısındaki etkin şekil değiştirme 0,004 veya 0,75  $\varepsilon_{fu}$ 'dan az olmamalıdır ve  $\psi_f = 0,85$ , ankrajlı U- sargılar için ve  $\psi_f = 0,95$  tam sarılmış kirişler için uygun kalmaktadır. Ayrıca, sürekli FRP sarma durumunda, FRP aralığının  $s_f$  değerinin, FRP genişliğinin  $w_f$  değerine eşit olması gerektiğine de dikkat edilmelidir. Herhangi bir betonarme kirişin GFRP ile sarılması durumunda kirişin kesme kapasitesi Denklem 5.11'de hesaplanmaktadır.

$$\phi V_r = \phi (V_c + V_s + \psi V_f) \quad (5.11)$$

Burada  $\phi$ ; mukavemet azaltma faktörünün değeridir.

## 5.2. FIB-(2001)

FIB-(2001)'in betonarme kirişlerin kesme donatısına ilişkin yönetmeliklerindeki, donatı elemanının kesme kapasitesi Denklem 5.12'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir. Cam fiber kumaşları ile Tam sargı numuneler için etkili Cam fiber  $\varepsilon_{fd,e}$ 'nin değeri, Denklem 5.13'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca yanal veya U-sargılama numuneler için etkili Cam fiber  $\varepsilon_{fd,e}$ 'nin değeri Denk.5.14'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,c} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot\Phi + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (5.12)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = \min \begin{cases} 0.65 \left( \frac{f_c^{-\frac{2}{3}}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3} \\ 0.17 \left( \frac{f_c^{-\frac{2}{3}}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \times \varepsilon_{fu} \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = 0.17 \left( \frac{f_c^{-\frac{2}{3}}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad (5.14)$$

Burada

$\theta$ : Eleman eksenine göre çapraz çatlak açısı

$\alpha$ : Ana fiber oryantasyonu ve elemanın boylamasına eksenleri arasındaki açı

$d$ : Betonarme kirişler için faydalı yükseklik

$b_w$ : Betonarme kirişler için genişlik

$E_{fu}$ : FRP'nin elastisite modülü

$\rho_f$ : FRP'nin donatı oranı.

$t_f$  kalınlığındaki sürekli bağlanmış kesme donatıları için, FRP donatı oranı  $\rho_f$  Denklem 5.15'te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\rho_f = 2t_f \frac{\sin \alpha}{b_w} \quad (5.15)$$

Ayrıca  $s_f$  aralıklarında  $w_f$  genişliğinde şeritler veya kumaşlar şeklindeki FRP güçlendirmesi için, önceki değer Denklem 5.16 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\rho_f = \frac{2t_f}{b_w} * \frac{w_f}{S_f} \quad (5.16)$$

Ana fiber oryantasyonunda olan FRP'nin elastik modülünün ( $E_{fu}$ ) GPa biriminde olduğu da dikkat edilmelidir.

### 5.3. TBEC-2019

TBDY-2019 yönetmeliği oldukça sınırlı bir anlatımla kirişlerin FRP ile güçlendirilmesinden bahsetmektedir. Burada cam fiber kumaşların kesme kuvvetine katkısı ( $V_f$ ), Denklem.5.17'deki gibi hesaplanmaktadır. ACI 440 yönetmeliği ile aynı şekilde, sürekli sargı durumunda FRP aralığı  $s_f$  değeri, FRP genişliği  $w_f$  değerine eşit olmalıdır. Etkili birim uzama  $\varepsilon_{fe}$  değeri Denklem 5.18 ile belirlenen değerlerin en küçüğü olarak alınmalıdır (Sarııyık ve ark, 2021).

$$V_f = \frac{2 n_f t_f w_f E_f \varepsilon_f d}{S_f} \quad (5.17)$$

$$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} \leq 0.004 \\ \leq 0.5\varepsilon_{fu} \end{cases} \quad (5.18)$$

Burada

$w_f$ : FRP şerit genişliği.

$E_f$ : FRP Elastisite modülü.

$\varepsilon_f$  : Etkili birim uzama limiti.

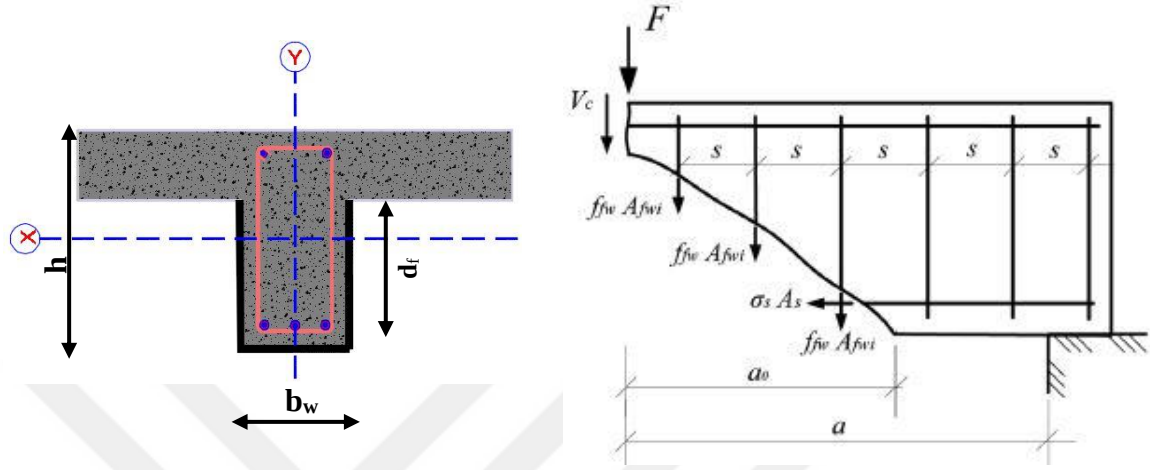
$d$  : Faydalı eleman yüksekliği.

$s_f$  : Eksenden eksene şeritlerin FRP aralıklarıdır

Nominal kesme dayanımı, betonun kesme dayanımının, donatının kesme dayanımının ve ayrıca FRP şeritler kullanılarak güçlendirilmesinden kaynaklanan ek kesme dayanımının toplamıdır. GFRP takviyesi, kirişe sarılarak kesme kapasitesini arttırır. Şekil



5.3 kesme kuvvetini hesaplamak için teorik hesaplamalarda kullanılan sembolleri göstermektedir.



Şekil 5.3.Genel kesme güçlendirme şeması için gösterim

GFRP'nin kesme kuvvetine katkısında dikkate alınan kopma birim uzaması her bir yönetmelik için farklılık ifade etmektedir. Her bir yönetmelik için dikkate alınan birim deformasyon hesabı Çizelge 5.1'de, deneysel ve analitik kesme kuvveti karşılaştırması Çizelge 5.2'de verilmiştir.

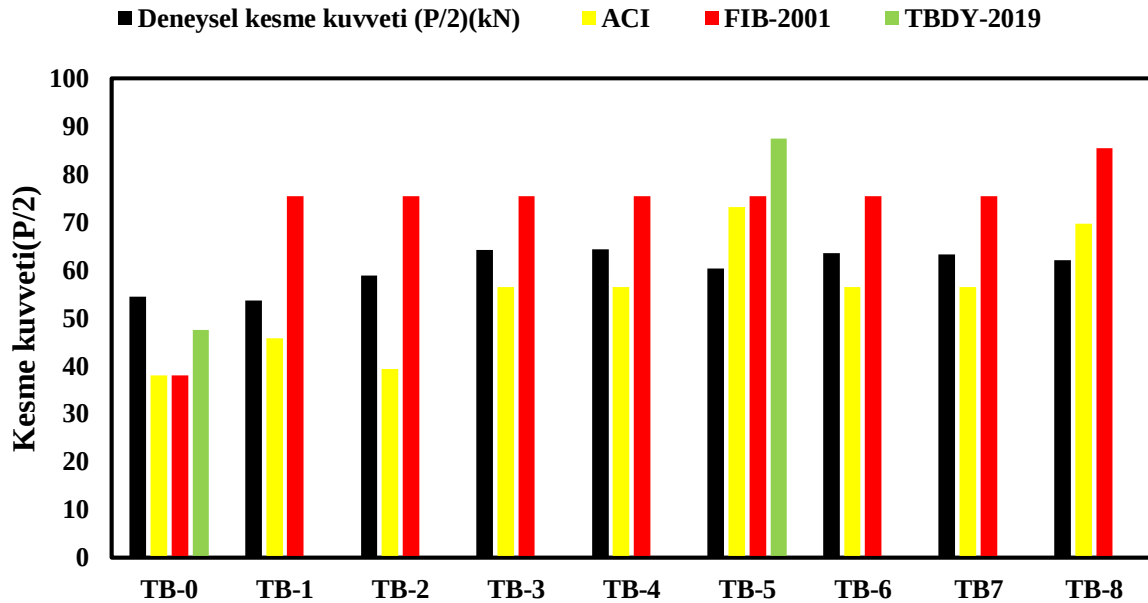
Çizelge 5.1. Hesaplamalarda dikkate alınan birim deformasyon değerleri (fiberde etkili şekil değiştirme dikkate alınır)

| Deney Numunesi | $d_{fv}$ | $\epsilon_{fu}$ | ACI 440-2R-17 Yönetmeliği ( $\epsilon_{fe}$ ) | FIB-2001 Yönetmeliği ( $\epsilon_{fd,e}$ ) | TBEC-2019 Yönetmeliği ( $\epsilon_{fe}$ ) |
|----------------|----------|-----------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| TB-0           | .....    | 0.03            | ....                                          | ....                                       | .....                                     |
| TB-1           | 140.0    | 0.03            | 0.00012                                       | 0.0042                                     | .....                                     |
| TB-2           | 57.5     | 0.03            | 0.005                                         | 0.0042                                     | .....                                     |
| TB-3           | 140.0    | 0.03            | 0.0030                                        | 0.0042                                     | .....                                     |
| TB-4           | 140.0    | 0.03            | 0.0030                                        | 0.0042                                     | .....                                     |
| TB-5           | 220.0    | 0.03            | 0.0036                                        | 0.0042                                     | 0.0040                                    |
| TB-6           | 140.0    | 0.03            | 0.0030                                        | 0.0042                                     | .....                                     |
| TB7            | 140.0    | 0.03            | 0.0030                                        | 0.0042                                     | .....                                     |
| TB-8           | 140.0    | 0.03            | 0.0030                                        | 0.0031                                     | .....                                     |

Çizelge 5.2. Deneysel ve analitik maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

| Deney Numunesi | Deneysel kesme kuvveti (P/2) | ACI 440-2R-17 |       |       | FIB-2001 |       |       | TBDY-2019 |       |       |
|----------------|------------------------------|---------------|-------|-------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|                |                              | Vf            | Vc+Vs | Vr=Vn | Vf       | Vc+Vs | Vr=Vn | Vf        | Vc+Vs | Vr=Vn |
| TB-0           | 54.48                        | .....         | 38.04 | 38.04 | .....    | 38.04 | 38.04 | N/A       | 47.51 | 47.51 |
| TB-1           | 53.62                        | 6.58          | 38.04 | 44.62 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | N/A       | 47.51 | N/A   |
| TB-2           | 58.91                        | 1.08          | 38.04 | 39.12 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | N/A       | 47.51 | N/A   |
| TB-3           | 64.21                        | 15.68         | 38.04 | 53.72 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | N/A       | 47.51 | N/A   |
| TB-4           | 64.3                         | 15.68         | 38.04 | 53.72 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | N/A       | 47.51 | N/A   |
| TB-5           | 60.26                        | 29.84         | 38.04 | 67.88 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | 39.90     | 47.51 | 75.61 |
| TB-6           | 63.53                        | 15.68         | 38.04 | 53.72 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | N/A       | 47.51 | N/A   |
| TB7            | 63.29                        | 15.68         | 38.04 | 53.72 | 37.42    | 38.04 | 75.46 | N/A       | 47.51 | N/A   |
| TB-8           | 62.1                         | 26.88         | 38.04 | 64.92 | 47.44    | 38.04 | 85.48 | N/A       | 47.51 | N/A   |

Son olarak, Şekil 5.4'te farklı yönetmeliklere göre karşılaştırma grafiği gösterilmiştir. Ayrıca grafik üzerinden maksimum kesme dayanımı ve maksimum süneklik sağlayan, GFRP sargılama konfigürasyonlarının optimum oranını belirlemek mümkündür.



Şekil 5.4. Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışma ile kesme güvenliği yetersiz dokuz adet RC T-kirişin farklı konfigürasyonlarda GFRP sargılama ve GFRP spike ankraj uygulaması ile güçlendirilmesi yöntemlerinin etkinliği sunulmuştur. Uygulanan güçlendirme metodunda değişken parametreler; yapışma yüzey alanı, ankrajlı ya da ankrajsız olması ve ankraj açısı olarak düşünülmüştür. Ayrıca bütün güçlendirme alternatiflerinin karşılaştırılması amacıyla güçlendirme uygulanmamış bir adet referans kiriş üretilmiştir. Bütün kirişler dört nokta eğilme yüklemesi altında test edilmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlar ayrıca yönetmelik yaklaşımları ile de karşılaştırılarak irdelenmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Sadece kiriş yan yüzlerine yapıştırılan GFRP şeritlerin (TB-1) kesme kapasitesine katkısı olmamıştır. Bununla birlikte maksimum yük seviyesinde elde edilen rijitlik değerinin referans numuneye göre daha yüksek olduğu görülmüş, ancak artan yük seviyesinde GFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması ile nihai göçme modu kesme hasarı şeklinde gerçekleşmiştir.
- TB-2’de yük taşıma kapasitesi TB-0’a göre %8 artış göstermesine rağmen göçme modu TB-1 numunesinde olduğu gibi kesme hasarı neticesinde oluşmuştur. TB-1’den farklı olarak kiriş çekme bölgesine yapıştırılan GFRP şeritler kesme çatlaklarının ilerlemesini nispeten yavaşlatmıştır. Ancak kesme hasarından dolayı deneyin sonlanması uygulanan sargılama modelinde lifli polimer yapışma yüzey alanının yetersiz kaldığını göstermektedir. TB-2 numunesinde de TB-1 de olduğu gibi ilerleyen yük seviyelerinde polimerin beton yüzeyinden ayrılması gözlenmiştir.
- TB-3 yük taşıma kapasitesinde TB-0, TB-1 ve TB-2 numunelerine göre sırayla % 17.85, %19.73, %8,98 oranlarında artış göstermiştir. Tabla altına kadar uzatılan polimer kompozit yerleşimi beton ve kompozitin daha rijit davranmasını sağlamış ayrıca U-tipi güçlendirme ile kirişte kısmi sünek davranışında gözlenmesi mümkün olmuştur. Bununla birlikte nihai göçme yine kesme hasarı sonucunda oluşmuştur.

TB-3 kirişi deney sonucu, kompozit yapışma yüzey alanının iyileştirilmesinin kesme kapasitesi ve sünekliğin artırılması noktasında etkili olduğunu göstermiştir.

- TB-4 kesme kapasitesi TB-0'a göre %18 artış göstermiştir. Elde edilen kesme kapasitesi TB-3 kirişine yakın olmakla birlikte göçme anında elde edilen maksimum deplasman iki katına çıkmıştır. TB-4 kirişi dayanım, rijitlik ve süneklik açısından yeterli şartları sağlamış olmasına rağmen sonuçta göçme, kesme hasarı ile neticelenmiştir. TB-4 kirişinden elde edilen sonuçlar GFRP sargılama yönteminde asgari yapışma yüzey alanı için tabla altına uzatılan U-wrap sargı modelinin tercih edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca bu deneyde lifli kompozitin beton yüzeyinden ayrılması gözlenmemiştir.
- TB-5 kirişi için sargılama modeli aynı zamanda ACI-440-2R-17 ve FIB-2010 yönetmeliklerinde önerilen tam sargılama modelidir. TB-5 yük taşıma kapasitesi TB-0, TB-1 ve TB-2 numunelerine göre sırasıyla %10.6, %12.37, %2.28 seviyesinde artmış, TB-3 ve TB-4 numunelerine göre %6.15, %6.27 seviyesinde azalmıştır. Elde edilen bu sonuç, polimer kompozitin kiriş kesiti boyunca tam sargılanması için kiriş-tabla ara kesitinde hasar oluşturulması neticesinde olabileceği düşünülmüştür. Genel olarak çatlakların genişlemesini sınırlandıran GFRP şeritler kirişin sünek davranmasına katkı sağlamış, ancak TB-4'de olduğu gibi burada da nihai hasarın kesme ile gerçekleşmiş olması uygulanan güçlendirme tekniğinin yeterli seviyede olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte tam sargı modeli pratikte uygulanması zor bir yöntemdir. TBEC-2019'da yer alan FRP sargılama modeli sadece tam sargılama için geçerlidir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar ise, bu yöntemin tam olarak yeterli olmadığı göstermiştir. Analitik hesaplamalarda bahsi geçen diğer yönetmeliklerinde literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçlarını dikkate alarak alternatif sargılama yöntemlerini geliştirmesi ve dahil etmesi gerektiği düşünülmektedir.
- TB-6 ve TB-7 kiriş numuneleri tipik eğilme kiriş davranışı sergilemişlerdir. Uygulanan ankrajlar GFRP şeritlerin betondan ayrılmasını engellemiş bu sayede kesme bölgesindeki çatlakların uzamasını sınırlandırmıştır. Ankraj açısının kiriş-tabla kesiti arasında yatayla 45° açı ile uygulandığı TB-7 kirişi, kiriş yan yüzlerine

90° olarak uygulanan ankrajlı TB-6 kirişine göre bir miktar daha fazla süneklik kapasitesi göstermiştir.

- TB-8 numunesinin yük taşıma kapasitesi ve süneklik bakımından TB-6 ve TB-7 ile benzer davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca TB-6 ve TB-7 tipi güçlendirmede ankraj işçiliği ve daha az malzeme kullanımı söz konusu iken TB-8 numunesinde ankrajsız çözüm ile beraber daha fazla GFRP'nin kullanılması söz konusudur. Bu durumun uygulamada eleman güçlendirme maliyetleri hesaplanırken düşünülmesi gerekmektedir.
- Yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar kesme güvenliği yetersiz RC kirişlerin güçlendirilmesi için GFRP kompozit kumaş ile sargılamanın etkili bir güçlendirme yöntemi olduğunu göstermiştir. Uygulanan sekiz farklı konfigürasyon arasında dayanım, rijitlik ve süneklik açısından özellikle göçme modunun, gevrek kesme kırılması yerine sünek eğilme kırılması ile sonuçlanması açısından TB-6, TB-7 ve TB-8 güçlendirme yöntemlerinin en etkili güçlendirme alternatifleri olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.
- Tahmini kesme kapasitesinin elde edilmesinde farklı yönetmeliklerinde önerilen ampirik bağıntılarda polimer uzaması olarak oldukça sınırlı değerlerin alınmasından dolayı deneysel sonuçlar ile birebir uygunluk söz konusu değildir. Yönetmeliklerde tasarım için polimerin elastik deformasyon limitinde kaldığı kabul edilirken deneylerde elastik ötesi davranışa geçildiği için polimerlerdeki birim deformasyon uzama çok daha fazla olmaktadır. Ayrıca yönetmeliklerde ankrajlı durum için alternatif formüllerin olmaması da yine bir eksikliktir. Çalışmadan elde edilen bulgular yönetmelik yaklaşımlarında farklı sargılama alternatiflerinin de düşünülmesi gerektiğini göstermiştir.

## 6.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

1. Kesme donatısı yetersiz kirişlerin GFRP şeritlerle güçlendirilmesi uygulamada kullanılabilir bir yöntemdir.
2. Kiriş yüzeyine yapıştırılan sürekli sargılama, U-şekli ve tam sargılama GFRP ile güçlendirme uygulamalarında sünek eğilme davranışı elde edilebilmesi için oldukça önemlidir. Ayrıca kiriş yüzeyine yapıştırılan GFRP şeritlerin ankrajlarla sabitlenmesi sünek eğilme davranışına önemli katkı sağlamaktadır.
3. GFRP kumuş kullanılarak kirişlerin kesme mukavemetinin eski haline getirilmesi veya yükseltilmesi, görünür kesme çatlağı olmaksızın artan kesme mukavemeti ve süneklik ile sonuçlanabilmektedir.
4. Gelecek çalışmalarda kesme açısından yeteriz kirişlerin GFRP ile güçlendirilmesinde av/d, kiriş boyuna donatı oranları, beton basınç dayanımı, yükleme şekli (statik ve çevrimsel), mesnetlenme şekli vs. gibi diğer parametrelerin değişimi de irdelenebilir.



## KAYNAKLAR

- Abdul Aziz Abdul Samad., 2012, Shear Strengthening of RC T Beam using CFRP Laminate: A Review.
- ACI 440R-96 .1996), State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures. *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.*
- Aksoylu, C. (2021). Experimental analysis of shear deficient reinforced concrete beams strengthened by glass fiber strip composites and mechanical stitches. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 40(2), 267-285.
- Alferjani, M. B. S., Samad, A. A., Elrawaff, B. S., Elzaroug, O., & Mohamad, N., 2015, Experimental Investigation on shear Strengthening of RC Continuous T-Beams with different layer of CFRP Schemes. In In CIEC., 2014, (pp. 589-603). Springer, Singapore.
- Alferjani, M. B. S., Samad, A. A., Mohamad, N., Hilton, M., & Ali, N., 2012, Shear Strengthening of RC T Beam using CFRP Laminate: A Review. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 6(12), 1050-1054.
- Anıl, Ö., Altın, S., Kara, M. E., Koprman, Y., & Mertoğlu, Ç., 2011, Kesmede Yetersiz Betonarme Kirişlerin CFRP İle Dayanım Ve Sünekliğinin Artırılması.
- Awadhesh, K., & Nitin, M.,(2017), Retrofitting of RCC Beams using FRP and Ferrocement Laminates. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*,87-93.
- Badora, Mohamed.,2009, The use of fiber-reinforced polymers to strengthen concrete structures,International Conference: *The engineering construction industry between reality and ambition,Aleppo University, Syria.*
- Balamuralikrishnan,R.; Jeyasehar,C.A., (2009), Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabrics, *The Open Civil Engineering Journal*. 3,102-109.
- Bedirhanoglu,I., Alper Ilki, A., (2008), Kumbasar,N. Seismic Retrofit Of Beam-Column Joints With FRP Sheets , *Fifth International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. (22),22 -24.
- Chaallal O., Nollet M. J., and Perraton D. (1998), “Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fibre-reinforced-plastic plates: design guidelines for shear and flexure”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 692-704.
- Chaallal O., Nollet M. J., and Perraton D. (1998), “Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fibre-reinforced-plastic plates: design guidelines for shear and flexure”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 692-704.
- Chajes M. J., Januszka T. F., Mertz D. R., Thomson T. A., and Finch W. W. (1995), “Shear strengthening of Reinforced Concrete beams using externally applied composite fabrics”, *ACI Structural Journal*, Vol. 92, Issue No. 3, pp. 295-303.
- Çetinkaya, N., Kaplan, H., & Şenel, Ş. M. (2004). Repair And Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymer (Frp) Materials. *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 10(3), 291-298.
- Deblois, M., Picard, A., & Beaulieu, D. (1992). ‘Renforcement de poutres en béton armé al’aide de matériaux composites: études théorique at expérimentale.’’. In Proc., 1st

- Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (pp. 265-275).
- Deniaud, C., Cheng, J. R., (2001), Structural Journal, Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Sheets. 98 (3), 386-394.
- Duthinh D. and Starnes M. (2001), "Strengthening of RC beams with CFRP: Experimental results versus prediction of codes of practice", *Journal of Composites for Construction*, 16, 185-195.
- Ersoy, U., 2000. Betonarme temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı, *ODTÜ, Evrim Yayınları, Ankara*.
- Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2004, Betonarme temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap, İkinci Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Ghazi J. Al-Sulaimani, Alfarabi Sharif, Istem A. Basunbul, Mohhamed H. Baluch, and Bader N. Ghaleb (1994), "Shear Repair for Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, Issue No. 4, pp. 458-464.
- Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., & Saleh, K. R. (1999). Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates. *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, 96(5), 865-874.
- Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., & Saleh, K. R. (1999). Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates. *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, 96(5), 865-874.
- Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., & Kumbasar, N., (2008), FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 169-188.
- Kannan R ve Ms. Anu A., (2015), Strengthening of Shear Deficient RC T-Beams with Externally Bonded FRP Sheets.
- Karna, A. K., (2012), Strengthening of Shear Deficient RC T-Beams with Externally Bonded FRP Sheets.
- Khalifa A., and Nanni A. (2000), "Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites", *Cement & Concrete Composites*, 22, 165-174.
- Khalifa A., Lorenzis L. D., and Nanni A. (2000), "FRP composites for shear strengthening of RC beams", *Proceedings, 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 15-18 Aug., pp. 137-144.
- Kim, S. W., Vecchio, F. J. (2008). Modeling of shear-critical reinforced concrete structures repaired with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Structural Engineering*, 134(8), 1288-1299.
- Lamanna, A. J., Bank, L. C., & Scott, D. W. (2004). Flexural strengthening of reinforced concrete beams by mechanically attaching fiber-reinforced polymer strips. *Journal of composites for construction*, 8(3), 203-210.
- Mofidi, A., Chaallal, O., (2014), Tests and design provisions for reinforced-concrete beams strengthened in shear using FRP sheets and strips. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 117-128.
- Oller, E., Pujol, M., Marí, A., (2019), Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. *Composites Part B: Engineering*, 164, 235-248.
- Özcan, Z., Yöntem, K. (2005), Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemeler ile Güçlendirilmesi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

- Özgür Anıl<sup>1</sup>, Sinan Altın<sup>2</sup> M. Emin Kara<sup>3</sup>, Yağmur Kopraman<sup>4</sup>, Çelebi Mertoğlu<sup>5</sup> 2011 Kesmede Yetersiz Betonarme Kirişlerin CFRP İle
- Pampanin, S., Bologini, D., (2005) Pavese, A. Performance-Based Seismic Retrofit Strategy for Existing Reinforced Concrete Frame Systems Using Fiber-Reinforced Polymer Composites, *Composites For Construction* © ASCE.11(2), 1-15.
- Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2013). Shear strengthening effect by bonded GFRP strips and transverse steel on RC T-beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 47(1), 75-98.
- Panigrahi, A. K., Biswal, K. C., & Barik, M. R. (2014). Strengthening of shear deficient RC T-beams with externally bonded GFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 57, 81-91.
- Parvin, A., Jamwal, A. S., (2006), Performance of externally FRP reinforced columns for changes in angle and thickness of the wrap and concrete strength. *Composite structures*, 73(4), 451-457.
- Parvin, A., Brighton, D. FBP., (2014), Composites Strengthening of Concrete Columns under Various Loading Conditions, *Polymers*. 6(4), 1040-1056.
- Paul, S. K., & Sahu, P. (2008). Finite Element Analysis of Strengthening of Control Rc Beam with CFRP Using Abaqus.
- Rafeeq, R. (2016). Torsional Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP Composites.
- Razaqpur, G. A., Tolba, A., (2007), Contestabile, E. Blast Loading Response Of Reinforced Concrete Panels Reinforced With Externally Bonded GFRP Laminates, *Composites*. B (38), 535-546.
- Saadatmanesh H., and Ehsani M. R. (1992), "RC beams strengthened with GFRP plates: experimental study", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 11, ISSN 0733-9445/91/0011, Paper No. 26385.
- Saadatmanesh, H., & Ehsani, M. R. (1991). RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study. *Journal of structural engineering*, 117(11), 3417-3433.
- Saaspik M. A. A. (2006), "Shear strengthening of Reinforced Concrete beams using GFRP wraps", *Czech Technical University in Prague Acta Polytechnica*, Vol. 46 No. 1, pp. 24-32.
- Sameer Shrivastava., Tiwari, A. (2018) Strengthening of Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Laminate
- Sarıbıyık, A. (2018), Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 1-1.
- Sarıbıyık, A., Abodan, B., & Balci, M. T. (2020). Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.
- Sen, T., & Reddy, H. J. (2013). Strengthening of RC beams in flexure using natural jute fibre textile reinforced composite system and its comparative study with CFRP and GFRP strengthening systems. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(1), 41-55.
- Sevinç T., 2008, Betonarme Kirişlerin CFRP Çelik ve Betonarme Levhalarla Taşıma Gücünün Artırılmasının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, C.B.Ü.
- Shahawy, M., Mirmiran, A., & Beitelman, T., (2000), Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 471-480.

- Silva, M. A., Rodrigues, C. C., (2006), Size and relative stiffness effects on compressive failure of concrete columns wrapped with glass FRP. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 334-342.
- Touhari, M., Mitiche-Kettab, R., (2016), Behaviour of FRP Confined Concrete Cylinders: Experimental Investigation and Strength Model. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(4), 647-660.
- Youssef, M. N., Feng, M. Q., & Mosallam, A. S., (2007), Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6), 614-628.
- Das, S. C., & Nizam, M. (2014). Applications of fiber reinforced polymer composites (FRP) in civil engineering. *International journal of advanced structures and geotechnical engineering*, 3(3), 299-309.
- Sonnenschein, R., Gajdosova, K., & Holly, I. (2016). FRP composites and their using in the construction of bridges. *Procedia engineering*, 161, 477-482.
- Dash, N. (2009). Strengthening of reinforced concrete beams using glass fiber reinforced polymer composites (Doctoral dissertation).
- Sarker, P., Begum, M., & Nasrin, S. (2011). Fiber reinforced polymers for structural retrofitting: a review. *J Civil Eng*, 39(1), 49-57.
- Sarıbıyık, A., (2013), Beton Dayanımı Düşük Betonarme Yapı Elemanlarının Lifli Kompozitler Güçlendirilmesi ve Karşılaştırılması. *Sakarya Üniversitesi, İnşaat mühendisliği, Doktora tezi.*
- Kırsasöz, A., 2018, Alüminyum Matrisli Titanyumdiborür İn Situ Takviyeli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi).
- Galal, K., ve Sekar, M., 2008, Rehabilitation of RC inverted-T girders using anchored. CFRP sheets, *Composites: Part B*, 39, 4, 604-617
- Sarıbıyık, A. (2018), Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 1-1.
- ISSA, A., (2016), Ductility Enhancement Of Rc Beams Strengthened By Fiber Reinforced Polymers, *Al-Baath University Journal – Syria*.
- Hussien, W. M., Sarbıyık, A., & Aydın, E. (2018). CFRP ile Güçlendirilmiş Eğilme Yüklü Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 1062-1071.
- Wegian, F. M., & Abdalla, H. A. (2005). Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers. *Composite Structures*, 71(1), 130-138.
- Meikandaan, T. P. (2017). Flexural behaviour of RC beam wrapped with GFRP sheets. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(2).
- Sarıbıyık, A., Abodan, B., & Balci, M. T. (2021). Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 192-204.
- Kankal. Z. Ç. (2011), Betonarme Kirişlerin Cam Fiber Plakalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Ankraj Sayısının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Alsudı, (2021), Kesme Dayanımı Yetersiz Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde Optimum Lifli Polimer Miktarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Gökçen.C,(2019),Frp İle Güçlendirilmiş Betonarme Elemanlarda Frp-Beton Sıyrılma Davranışının İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Paul, S. K., & Sahu, P. (2020). Finite element analysis of retrofitting of RC beam with CFRP using Abaqus. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume, 7, 1268-1273.

