

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BAZALT FRP ŞERİT İLE BETON ARASINDAKİ ARAYÜZEY  
BAĞLANTISINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN DENEYSEL  
OLARAK ARAŞTIRILMASI VE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hasan Hüseyin AKBALIK**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK**

**OCAK 2020**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

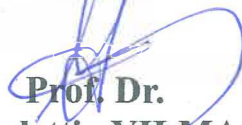
BAZALT FRP ŞERİT İLE BETON ARASINDAKİ ARAYÜZEY  
BAĞLANTISINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN DENEYSEL  
OLARAK ARAŞTIRILMASI VE İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

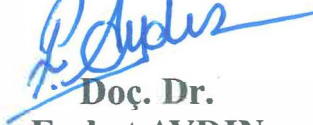
Hasan Hüseyin AKBALIK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 15/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından  
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.

Kemalettin YILMAZ  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.

Ferhat AYDIN  
Üye

  
Dr. Öğr. Üyesi

Ali SARIBIYIK  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hasan Hüseyin AKBALIK

15/01/2020

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Yine Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi yapı malzemesi çalışma grubu çatısı altında en az danışman hocam kadar bana yardımcı olan ve fikir alışverişinde bulunarak kompozit malzemeler alanında bana büyük katkıları olan Doç. Dr. Ferhat AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar imkanları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Metin İPEK'e, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım İnşaat Teknikeri Sami GÜRSES'e, çalışmamın ilk aşamasından son anına dek hep yanımda olan İnş. Yük. Müh. Abdullah FİLİZ'e, laboratuvar çalışmalarımın büyük bölümünde bana yardımcı olan İnş. Yük. Müh. Basel ABODAN'a ve tez içeriğindeki çizimlerin hazırlanmasında katkıda bulunan kardeşim İç Mimar Ali Osman AKBALIK'a ayrı ayrı tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim boyunca hayatımın her döneminde yanımda olan, iyi şahsiyetli bir birey olarak yetişmem için çaba sarf eden, maddi ve manevi desteklerini her türlü koşulda benden esirgemeyen adeta benimle birlikte okuyormuşçasına ilgi alaka gösterip çalışmalarımı takip eden aileme, gösterdikleri anlayış ve ilgi için sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMALAR.....	vi
SİMGELER.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	4
1.2. Tezin İçeriği.....	6

### BÖLÜM 2.

#### YAPILARDA FRP SIYRILMA ÖRNEKLERİ VE LİTERATÜR

ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Yapı Elemanlarında FRP Kullanımı ve Yaygın Görülen Deformasyon Şekilleri.....	7
2.2. FRP Uygulanan Kirişlerde Oluşan Göçme Şekilleri.....	9
2.2.1. Betonarme kirişte beton basınç kırılması.....	9
2.2.2. Betonarme kirişte kesme kırılması.....	9
2.2.3. Betonarme kirişte FRP ‘nin tabaka olarak ayrılması.....	10
2.2.4. Betonarme kirişte beton paspayı ayrılması.....	11
2.2.5. Betonarme kirişte FRP kompozitin kopması.....	11

2.3. Literatür Araştırması .....	12
----------------------------------	----

### **BÖLÜM 3.**

<b>MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>21</b>
3.1. Deney Malzemeleri.....	21
3.1.1. Kiriş betonu .....	21
3.1.2. Epoksi.....	22
3.1.3. Bazalt kumaş .....	23
3.1.4. Birim deformasyon ölçer (Strain gauge).....	24
3.2. Deneysel Çalışma Yöntemi.....	25
3.2.1. Kiriş numunelerin kesit özellikleri .....	25
3.2.2. Kiriş numunelerinin BFRP ile güçlendirme yöntemi.....	26
3.3. Kiriş Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	32
3.3.1. Kiriş numunelerin üretimi .....	32
3.3.2. Kiriş yüzeylerine BFRP kompozit uygulanması .....	34
3.4. Deney Düzeneği.....	41
3.4.1. Eğilme çerçevesi düzeneği .....	41
3.4.2. Yükleme ve ölçüm düzeneği .....	41

### **BÖLÜM 4.**

<b>DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ .....</b>	<b>44</b>
4.1. Kirişlere Ait Eğilme Deneylerinin Sonuçları .....	44
4.1.1. Kontrol kirişlerinin eğilme deneyi .....	44
4.1.2. MY10 kirişlerinin eğilme deneyi .....	45
4.1.3. YD10 kirişlerinin eğilme deneyi .....	46
4.1.4. YD15 kirişlerinin eğilme deneyi .....	48
4.1.5. YD20 kirişlerinin eğilme deneyi .....	50
4.1.6. YDU10 kirişlerinin eğilme deneyi .....	52
4.1.7. YDF10 kirişlerinin eğilme deneyi .....	54
4.1.8. YDA10 kirişlerinin eğilme deneyi .....	55
4.2. Kirişlerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	57

4.3. Yükleme Sonrasında Deney Elemanlarında Oluşan Deformasyon Şekilleri.....	59
----------------------------------------------------------------------------------	----

## **BÖLÜM 5.**

<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>62</b>
-----------------------------------	-----------

<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>64</b>
----------------------	-----------

<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>68</b>
----------------------	-----------



## KISALTMALAR

ACI	: Amerikan beton enstitüsü
BFRP	: Bazalt kumaş takviyeli polimer
cm	: Santimetre
$E_f$	: FRP'nin elastisite modülü, MPa
$F_c$	: Betonun belirtilen basınç dayanımı, MPa
FRP	: Fiber kumaş takviyeli polimer
kN	: Kilo Newton
LVDT	: Linear variable differential transformer (Deformasyon ölçer)
mm	: Milimetre
m	: Metre
MY10	: Müdahalesiz yüzey üzerine 100 mm elyaf yapıştırılan numune
sn	: Saniye
YD10	: Müdahaleli yüzey üzerine 100 mm elyaf yapıştırılan numune
YD15	: Müdahaleli yüzey üzerine 150 mm elyaf yapıştırılan numune
YD20	: Müdahaleli yüzey üzerine 200 mm elyaf yapıştırılan numune
YDU10	: Etkili yapışma boyu 100 mm olan elyaf ucuna U sarım yapılan numune
YDF10	: Etkili yapışma boyu 100 mm olan elyaf ucuna fan ankraj yapılan numune
YDA10	: Etkili yapışma boyu 100 mm olan elyaf ucuna ankraj yapılan numune



## SİMGELER

$\mu\epsilon$  : Birim deformasyon

$\Omega$  : Direnç



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Küp numunelerin 28 gün sonunda �l�ilen eşdeğer basınç dayanımları.....	22
Tablo 3.2. Epoksiye ait mekanik �zellikler.....	23
Tablo 3.3. Deneyde kullanılan BFRP kompozite ait �zellikler. ....	24
Tablo 3.4. Strain gauge'e ait �zellikler.....	25
Tablo 3.5. Deney elemanlarına ve beton yüzeyine yapıştırılan BFRP kompozite ait �zellikler. ....	26
Tablo 3.6. Kirişlerde kullanılan BFRP kompozitin, beton yüzeyine uygulanma Şekilleri. ....	27
Tablo 4.1 Kontrol kirişlerine ait kırılma yükü ve ona karşılık gelen deformasyon değerleri.....	44
Tablo 4.2. MY10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	45
Tablo 4.3. YD10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	46
Tablo 4.4. YD15 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	48
Tablo 4.5. YD20 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	50
Tablo 4.6. YDU10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	52
Tablo 4.7. YDF10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	54
Tablo 4.8. YDA10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.....	55

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. FRP'nin yapısı. ....	1
Şekil 1.2. FRP yapışma testi deney modellerinin sınıflandırılması . ....	3
Şekil 2.1. FRP'nin yapı elemanlarında kullanım alanları. ....	8
Şekil 2.2. Yapı elemanlarında çeşitli FRP sıyrılma örnekleri. ....	8
Şekil 2.3. FRP kompozit uygulanan kirişte basınç kırılması ..... 9	9
Şekil 2.4. FRP kompozit uygulanan kirişte kesme kırılması ..... 10	10
Şekil 2.5. FRP kompozit uygulanan kirişte plaka ucu ayrılması. .... 10	10
Şekil 2.6. FRP kompozitin paspayı ile yüzeyden ayrılması..... 11	11
Şekil 2.7. FRP kompozitin kopması..... 11	11
Şekil 3.1. Küp beton numuneleri..... 21	21
Şekil 3.2. Epoksi reçine ve A/B bileşenleri..... 22	22
Şekil 3.3. Tek doğrultulu bazalt kumaş..... 23	23
Şekil 3.4. Strain gauge. .... 24	24
Şekil 3.5. Betonarme kirişin yükleme durumu ve geometrik özellikleri. .... 25	25
Şekil 3.6. MY10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri..... 28	28
Şekil 3.7. YD10, YD15 ve YD20 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri. .... 29	29
Şekil 3.8. YDU10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri..... 30	30
Şekil 3.9. YDF10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri. .... 31	31
Şekil 3.10. YDA10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri..... 32	32
Şekil 3.11. Deney kalıbı ve kalıbın orta noktasına yerleştirilen ahşap parçalar. .... 33	33
Şekil 3.12. Beton döküm işlemi. .... 33	33
Şekil 3.13. Yüzey hazırlığı işlem adımları ve kullanılan ekipmanlar. .... 35	35
Şekil 3.14. Kumaş kesim işlemleri ve kumaşların yapıştırılacağı yüzeylerin işaretlenmesi..... 36	36
Şekil 3.15. Epoksi reçinesinin hazırlanması ve kumaşların reçineye doyurulması. .... 37	37

Şekil 3.16. BFRP kompozit yapıştırma işlemi tamamlanan numuneler. ....	38
Şekil 3.17. U sarım uygulaması yapılan deney numunelerinin hazırlanması. ....	38
Şekil 3.18. Fan Ankraj uygulaması yapılan deney numunelerinin hazırlanması. ....	39
Şekil 3.19. Ankraj uygulaması yapılan deney numunelerinin hazırlanması. ....	40
Şekil 3.20. Deney düzeneği. ....	41
Şekil 3.21. Yükleme düzeneği. ....	42
Şekil 3.22. Deney kullanılan ölçüm ekipmanları ve yapıştırıcı. ....	43
Şekil 4.1. Kontrol kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	45
Şekil 4.2. MY10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	46
Şekil 4.3. YD10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	47
Şekil 4.4. YD10 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği. ....	48
Şekil 4.5. YD15 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	49
Şekil 4.6. YD15 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği. ....	50
Şekil 4.7. YD20 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	51
Şekil 4.8. YD20 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği. ....	52
Şekil 4.9. YDU10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	53
Şekil 4.10. YDU10 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği. ....	54
Şekil 4.11. YDF10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	55
Şekil 4.12. YDA10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği. ....	56
Şekil 4.13. YDA10 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği. ....	57
Şekil 4.14. Deney numunelerinin ortalama eğilme yük değerleri. ....	58
Şekil 4.15. Deney numunelerinin yük altındaki ortalama deplasman değerleri. ....	59
Şekil 4.16. Test öncesi deney düzeneği ve deney sonrasında numune guruplarında oluşan deformasyon şekilleri. ....	61

# BAZALT FRP ŞERİT İLE BETON ARASINDAKİ ARAYÜZEY BAĞLANTISINI EKİLEYEN PARAMETRELERİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI VE İYİLEŞTİRİLMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada; Bazalt Kumaş Takviyeli Polimer Kompozitlerin (BFRP) beton yüzeyine yapışmasını etkileyen parametreleri araştırmak ve mevcut durumu iyileştirmek için çeşitli yöntemler üzerinde deneysel çalışma yapılmış aynı zamanda da eğilme yükü altında kumaşta oluşan birim şekil değiştirme değerleri ölçülerek beton-BFRP arasındaki gerilme dağılımı incelenmiştir.

Çalışmada; 100x150 mm kesitinde 1000 mm boyunda simetri ekseninde 50x50 mm ebatlarında çentik bulunan 27 adet dikdörtgen kesitli, donatısız kiriş numuneleri kullanılmıştır. Kirişler C40 dayanım sınıfında beton ile üretilmiştir. Deney elemanlarının hareketli mesnet tarafı güçlü, sabit mesnet tarafı ise deneyin gerçekleştirilmek istendiği etkili yapışma boyuna sahip asıl kısım olacak şekilde tasarlanmıştır. Kirişlerin alt yüzeylerine tek doğrultulu bazalt kumaş yapıştırılarak BFRP kompozitin taşıma gücüne; beton yüzey özelliğinin, kumaş etkili yapışma boyunun, etkili yapışma bölgesindeki kumaş uçlarına uygulanan  $U$  sarım ve fan ankraj yönteminin aynı zamanda da yeni geliştirdiğimiz mekanik ankraj modelinin etkisi araştırılmıştır. Numuneler dört nokta eğilme deneyi ile test edilmiştir. Kirişlerin beton kırılma yükleri, nihai göçme yükleri, orta nokta deplasman değerleri, deformasyon şekilleri ve ilgili numunelerde kumaşta oluşan birim deformasyon değerleri incelenmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen bulgulara göre; BFRP kompozit ile güçlendirilme yapılması halinde beton yüzeyinin temizlenerek mutlaka yapışmaya uygun hale getirilmesi gerektiği, BFRP kompozitin beton yüzeyinden ayrılması engellenmediği takdirde yapışma boyunun uzatılmasının güçlendirmeye etkisinin sınırlı olacağı, BFRP kompozit yapıştırılan kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde kontrol kirişlere nazaran %16,21 ile %52,93 arasında iyileşme olduğu, çalışma kapsamında kullanılan çeşitli yöntemler içerisinde ise en etkili yöntemin yeni geliştirilen mekanik ankraj uygulaması olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt elyaf, yapışma, BFRP, sıyırılma, kiriş numune, güçlendirme, birim deformasyon (strain)

# **EXPERIMENTAL RESEARCH AND IMPROVEMENT OF PARAMETERS AFFECTING THE INTERFACE CONNECTION BETWEEN BASALT FRP STRIP AND CONCRETE**

## **SUMMARY**

In this study; an experimental study was carried out in order to investigate the parameters affecting the adhesion of Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Composites to the concrete surface and improve the current situation. In addition, the strain between the concrete and BFRP was examined by measuring the unit strain formed in the fabric under bending load.

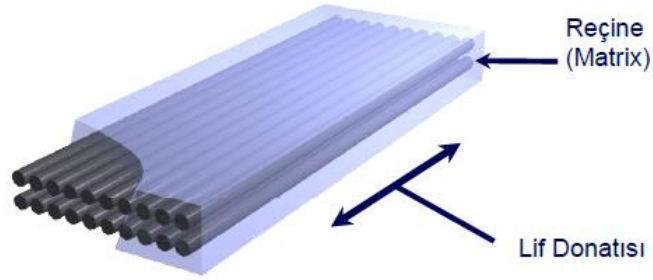
27 rectangular cross-sectioned, unreinforced beam samples with 50x50 mm gaps in the symmetry axis of 1000 mm length in 100x150 mm section were used in the study. Beams are produced with concrete in C40 strength class. The movable support side of the test elements is designed to be strong, and the fixed support side is the main part with the effective bonding length to which the experiment is intended. By attaching a unidirectional basalt fabric to the lower surfaces of the beams, BFRP composite's bearing power; the effect of concrete surface feature, fabric effective adhesion length, U wrapping method applied to the fabric ends in the effective adhesion area and the mechanical anchorage model we have developed have been investigated. Specimens were tested with a four-point bending test. Concrete breaking loads, failure loads, mid-point displacement values, deformation shapes and strains formed in the fabric in the related samples were examined.

According to the findings obtained from the experimental study; in case of reinforcement with BFRP composite, the concrete surface must be cleaned and made suitable for adhesion, the effect of increase in adhesion length will be limited if the BFRP composite is not prevented from debonding from the concrete surface, the load bearing capacity of BFRP composite bonded beams improved between 16.21% and 52.93% compared to control beams, It was determined that the most effective method among the various methods used in the study was the newly developed mechanical anchorage application.

Key words: Basalt fiber, adhesion, BFRP, Stripping, Beam sample, Strengthening, Unit deformation (strain)

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (FRP); yüksek fiziksel özelliklere sahip karbon, cam, aramid ve bazalt kumaşların epoksi reçinesi ile doyurulması sonucu plaka (strip) veya kumaş (sheet) şeklinde farklı formlarda üretilebilmektedirler. Fiber takviyeli kompozitte yükü lifler taşıırken yapısında bulunan matris elemanları ise liflere yük aktarımını üstlenirler. FRP kompozitler inşaat sektöründe beton, çelik ve ahşap gibi yapı elemanlarıyla; uygulama tekniklerinin kolay olması, yüksek mukavemete sahip olmaları, korozyona karşı dayanıklı olmaları, güçlendirme sırasında yapının kullanımına imkân sağlamaları ve ağır ekipman ihtiyacını ortadan kaldırmaları gibi birçok avantaja sahip olmaları sebebiyle son zamanlarda yaygın olarak birlikte kullanılmaya başlanılmışlardır [1-7].



Şekil 1.1. FRP'nin yapısı.

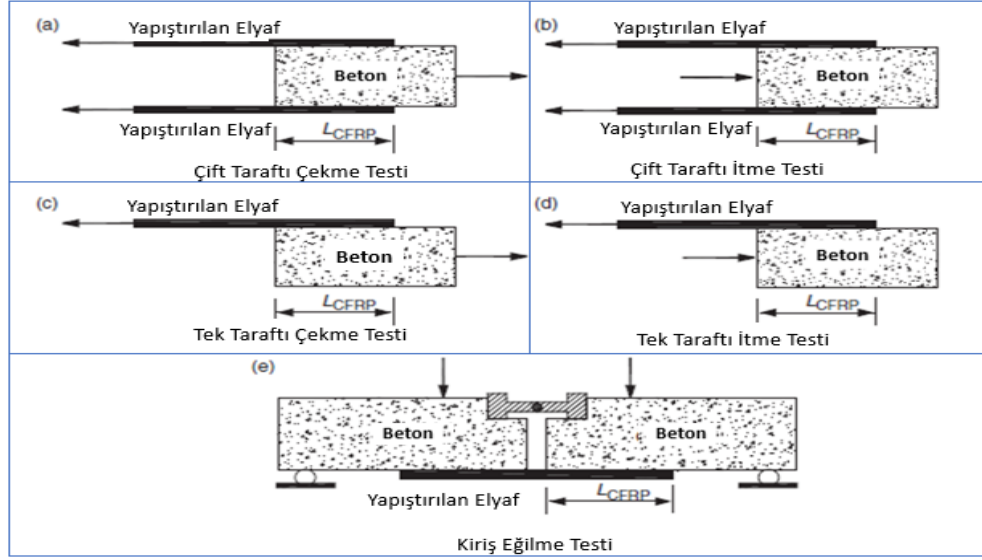
FRP kompozitler eğilme veya basınç gerilmelerini karşılamak için yapısal onarım ve güçlendirme gerektiği durumlarda kullanılabilirler. Oldukça geniş bir uygulama alanına sahip olmaları sebebiyle FRP ile güçlendirme teknikleri dünya genelinde yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yöntemlerden bir tanesi olan FRP şerit elemanlarının kiriş yüzeylerine epoksi yardımıyla uygulanması işlemi kirişlerin dayanım kapasitesini artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Güçlendirilen betonarme elemanın davranışına; beton dayanımının epoksi türünün, kumaş türünün ve güçlendirme yönteminin önemli

ölçüde etkisi olduğu bilinmektedir [8–11]. Bununla birlikte betonarme elemanlara dıştan uygulanan FRP elemanların başarısı esas olarak FRP ile beton arasındaki bağın bütünlüğüne bağlıdır. FRP kompozitin yapıştırıldığı yüzeyden aderans yetersizliğine bağlı olarak soyulması durumunda, kumaş performansının çok daha altında göçme meydana gelmekte ve kumaş performansından tam anlamıyla yararlanılamamaktadır. Bu yöntemin başarılı olabilmesinde en etkin rol hiç şüphesiz FRP ile beton arasındaki bağ gücünün iyi olmasına bağlıdır.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde FRP kompozitlerle onarılmış veya güçlendirilmiş yapı elemanlarında en temel üç tip göçme şekle ile karşılaşılmaktadır. Bunlar; FRP kompozitin beton yüzeyinden sıyırılması, yüzeye yapıştırılan epoksinin kayma direncinin aşılarak yüzeyden ayrılması ve FRP kompozitin taşıma gücünü aşarak kumaşın kopması şeklindedir [12-13]. Kumaş kopması, FRP kompozitin performansından tam olarak yararlanılabildiği için istenilen bir durum olarak görülmektedir. FRP kompozitin yapıştırıldığı yüzeyden aderans yetersizliğine bağlı olarak soyulması durumunda kumaş performansının çok daha altında göçme meydana gelmektedir.

Bahsi geçen bağ davranışını tespit etmek için Chen ve arkadaşları tarafından beş farklı deney modeli önerilmiştir [14]. Bunlar; çift taraflı çekme testi (Şekil 2.a), çift taraflı itme testi (Şekil 2.b), tek taraflı çekme testi (Şekil 2.c), tek taraflı itme testi (Şekil 2.d) ve eğilme yüküne maruz bırakılan kiriş testidir (Şekil 2.e). Bağ gücü ve gerilme dağılımını incelemek için önerilen ilk dört model oldukça maliyetli ve birçok ekipman gerektiren karmaşık düzeneklerdir. İlk dört deney düzeneğinde FRP kompozit sadece aksel çekme kuvvetine maruz kalırken beşinci modelde ki FRP kompozit olması gerektiği gibi hem aksel çekme gerilmesine hem de eğilme momentine maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada da beşinci modele alternatif olarak geliştirilen ve benzer şekilde FRP kompozitin hem eğilme momentine hem de çekme gerilmesine maruz kalacağı deney numuneleri üretilmiştir.





Şekil 1.2. FRP yapışma testi deney modellerinin sınıflandırılması [14].

Bağ gücünün en üst seviyede olmasını sağlayabilmek ve FRP kompozitin performansından daha iyi yararlanabilmek maksadıyla birçok araştırmacı, kiriş alt yüzeylerine yapıştırılan FRP kompozitlerin beton yüzeyinden erken sıyrılmasını önlemek için, başarılı bir işçilik kalitesinin yanında U sarım, fan ve dübel ankraj gibi çeşitli uygulama yöntemleri önermişler ve bazı özel durumları incelemişlerdir [15-28]. Örneğin; Aram ve ark. (2008), FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerdeki oluşan farklı göçme modlarını incelemişler ve bunların engellenmesi için bazı önerilerde bulunmuşlardır. Deney sonuçlarını ise ACI, FİB, ISIS, JSCE, SIA, TR55, gibi yönetmelikler ile karşılaştırmışlardır. Biscaia ve ark. (2013) ile Xiang ve ark. (2018) yaptıkları çalışmalarda FRP ve beton arasındaki bağ gücünü iyileştirmek ve beton kırıldıktan sonra kiriş numunelerinde oluşacak olan bozulmaları en aza indirmek için çeşitli ankraj tekniklerinin etkinliğini incelemişlerdir. Bununla beraber Tzu-Yang ve ark. (2011) beton yüzey özelliğinin bağ gücüne etkisini araştırmak maksadıyla yaptıkları deneylerde yüzeyin nemli veya ıslak olmasının ya da suyun varlığının FRP-beton arasındaki bağ gücü üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu bulmuşlardır. Xie J. ve ark. (2018) BFRP ile beton arasındaki bağ ara yüzlerinin eğilme yükü altındaki yorulma davranışları incelemek için deney elemanlarına U sarım uygulaması yapmışlar ve deney sonucunda BFRP şeritin yüzeyden sıyrılması veya kopması şeklinde iki hasar tipi ile karşılaşmışlardır. Yuan C. ve ark. (2018) beton içerisine katılan farklı oranlardaki çelik liflerin BFRP kompozitin beton yüzeyine yapışma kabiliyetine etkisini araştırmışlardır. Abodan B. (2019) BFRP

kompozit ile betonarme kirişlerin farklı sarım yöntemleri kullanarak kesmeye karşı güçlendirilmesini araştırmış ve güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitelerinde tam sarım yapılması durumunda kontrol kirişlerine kıyasla %113'e varan iyileşme olduğu sonucuna ulaşmıştır [39].

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde yapısal güçlendirme uygulamalarının genellikle, çekme dayanımlarının ve durabilitelerinin yüksek olması sebebiyle karbon ve cam kumaş takviyeli polimerler üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [29-33]. Bazalt kumaşlar, cam kumaşlar ile karşılaştırıldığında, yüksek sıcaklıklara, yüksek korozyona ve kimyasal ortamlara karşı daha iyi direnç göstermekle beraber aynı zamanda daha da ekonomiktirler. Ayrıca, son on yılda BFRP kompozitlerin hem mekanik performans hem de ekolojik ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından diğer FRP kompozit türlerine kıyasla etkili ve uygulanabilir bir alternatif olduğu kanıtlanmıştır [34-38].

İnşaat sektöründe diğer polimer kumaş türlerine nazaran daha yeni yer edinmeye çalışan BFRP kompozitin beton yüzeyine yapışma performansı üzerine yapılmış bu tip çalışmaların ise yetersiz olduğu literatürden anlaşılmaktadır. Bu nedenle BFRP kompozit ile yapılan onarım ve güçlendirme uygulamalarında ara yüzey davranışını doğru tespit etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında BFRP şeritlerin tam dayanımına ulaşmadan beton yüzeyinden ayrılmasını önlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmış ve sıyrılma durumunu ortadan kaldırmak için yeni bir ankraj uygulaması geliştirilmiştir.

### **1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu çalışmada kirişlere uygulanan BFRP şeritlerin beton yüzeyine yapışma performansını etkileyen parametreleri iyileştirmek amacıyla; beton yüzey hazırlığının, kumaş etkili yapışma boyunun, kumaş uçlarına uygulanan  $U$  sarım metodunun, fan ankraj ve yeni geliştirmiş olduğumuz mekanik ankraj uygulamasının bağ gücüne etkisi araştırılmış ve deney esnasında kumaşlar da oluşan birim deformasyonlar ölçülmüştür. Bu maksatla; dört adet kontrol kirişi ile birlikte farklı yüzey özelliklerine, farklı kumaş boylarına ve farklı uygulama yöntemlerine sahip yirmi üç adet olmak üzere toplamda yirmi yedi adet; dikdörtgen kesitli, simetri ekseninde 50x50 mm çentikler bulunan donatısız kiriş elemanları tasarlanmış ve üretilmiştir. Beton yüzeyine yapışma kabiliyeti araştırılan şerit halindeki kumaşların genişliği tüm deney elemanlarında sabit tutulmuş ve her numune

için gerekli olan kumaş boyu ile genişliği rulo halindeki BFRP kumaştan ayrı ayrı kesilerek ayarlanmıştır. Çalışma kapsamındaki numunelerin beton yüzeyine ve BFRP kompozite ait özellikler aşağıda verilmiştir.

- a) Müdahalesiz yüzey üzerine, BFRP kompozit uygulama yöntemi: Kalıptan çıkarılan kiriş numunelerinin yapışma bölgesine herhangi bir yüzey hazırlığı işlemi yapılmadan 100 mm etkili yapışma boyuna sahip BFRP kompozit uygulaması yapılan numunelerdir.
- b) Müdahaleli yüzey üzerine, etkili yapışma boyu artırılarak BFRP kompozit uygulama yöntemi: Beton yüzeyi taşlanan ve etkili yapışma boyu 100 mm, 150 mm ve 200 mm olacak şekilde değiştirilerek BFRP kompozit uygulaması yapılan numunelerdir.
- c) Müdahaleli yüzey üzerine, kumaş uçlarına U sarım yapılarak BFRP kompozit uygulama yöntemi: Beton yüzeyi taşlanan ve etkili yapışma boyu 100 mm olan kumaş ucuna U sarım yapılarak BFRP kompozit uygulaması yapılan numunelerdir.
- d) Müdahaleli yüzey üzerine, kumaş uçlarına fan ankraj yapılarak BFRP kompozit uygulama yöntemi: Beton yüzeyi taşlanan ve etkili yapışma boyu 100 mm olan kumaş ucuna fan ankraj yapılarak BFRP kompozit uygulaması yapılan numunelerdir.
- e) Müdahaleli yüzey üzerine, kumaş uçlarına mekanik ankraj yapılarak BFRP kompozit uygulama yöntemi: Beton yüzeyi taşlanan ve etkili yapışma boyu 100 mm olan kumaş ucuna mekanik ankraj uygulaması yapılarak BFRP kompozit uygulaması yapılan numunelerdir.

Deney kapsamında hedeflendiği şekilde hazırlanan tüm deney elemanları laboratuvar ortamında dört noktalı eğilme deneyi ile test edilerek; kirişlerin eğilme kuvvetine karşı dayanımı, yükleme sonucunda oluşan deplasman değerleri ve kumaşta oluşan birim deformasyonlar ölçülmüştür. Deney elemanları ortalama eğilme yükleri ve bu yüke karşılık gelen ortalama deplasman değerleri dikkate alınarak hem kontrol numuneleri ile hem de kendi içinde ayrı ayrı kıyaslanmış, yük-deformasyon ile kumaşta oluşan yük-birim deformasyon grafikleri çizilerek davranışlar incelenmiştir.

## 1.2. Tezin İçeriği

Bu alışma beş bölümden oluşmakta olup: Birinci bölüm; konuya girişi, çalışmanın amacını ve kapsamını bir de tezin içeriğinin nelerden oluştuğunu içermektedir.

İkinci bölüm; konuya benzer şekilde malzeme ve metot kullanılarak yapılan geçmiş yıllara ait bazı çalışma türlerinin analizini içermektedir.

nc bölüm; tez kapsamındaki deney numunelerinin üretiminde kullanılan malzemeleri, kiriş numunelerinin kesit özelliklerini, BFRP kompozit ile güçlendirme yöntemlerini, kiriş numunelerinin üretimini, BFRP kompozitin kiriş numunelerine nasıl uygulandığını ve deney düzeneğine ait bilgileri içermektedir.

Dördüncü bölüm; bütün deney elemanlarına ait eğilme testi sonucunda elde edilen deney sonuçlarını, yük-deplasman tablo ve grafiklerini, bu verilerin birbirleri ile yapılan kıyaslamaları aynı zamanda da her bir deney gurubunda oluşan deformasyon şekillerini içermektedir.

Beşinci bölüm ise; çalışma neticesinde ulaşılan bulguları ve bunlardan hareketle yapılan bazı tavsiyeleri içermektedir.

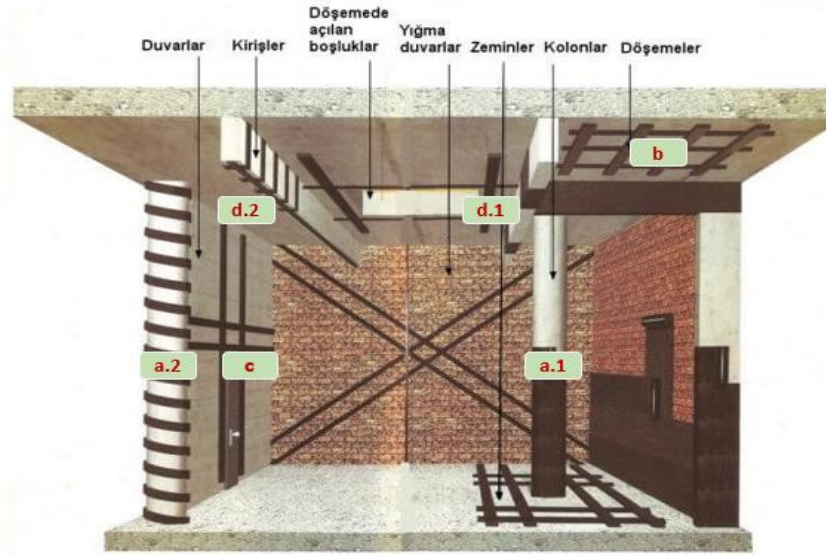
## **BÖLÜM 2. YAPILARDA FRP SIYRILMA ÖRNEKLERİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Yapı Elemanlarında FRP Kullanımı ve Yaygın Görülen Deformasyon Şekilleri**

Son yıllarda FRP kompozitler yapıların; kesme, eğilme ve eksenel yük taşıma kapasitelerinde sağlamış oldukları dayanım artışından dolayı betonarme yapılarda; kolonlarda, döşemelerde, duvarlarda, kolon kiriş birleşim bölgelerinde, kirişlerde onarım ve/veya güçlendirme yapılması gerektiği durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

FRP kompozit ile;

Kolonlar; donatı bindirme boyunun yetersiz olduğu, kesme ve basınç dayanımları ile eksenel yük taşıma kapasitesinin artırılmak istendiği durumlarda kumaşların enine donatılara paralel olacak şekilde beton yüzeyine sarılmasıyla güçlendirilmektedirler (Şekil 2.1.a). Döşemeler; eğilme ve yük taşıma kapasitelerinin artırılmak istendiği durumlarda plaka (strip) veya kumaş (sheet) formundaki kompozitlerin eğilme bölgesinde alttan x ve y doğrultusunda, mesnet bölgesinde ise üstten uygulanması ile güçlendirilmektedirler (Şekil 2.1.b). Duvarlar; deprem yükü altında çatlak oluşumunun istenmediği durumlarda eğilme bölgesinde boyuna, kesme bölgesinde ise enine doğrultuda güçlendirilmektedirler. Uygulama neticesinde olası yanal yüklere karşı sistemin bir bütün olarak hareket etmesi sağlanmakta binanın rijitliği ve yapı elemanının yük taşıma kapasitesi artırılmaktadır (Şekil 2.1.c). Kolon-kiriş birleşim bölgeleri; etriye adım mesafesi fazla olan eski yapılarda etriye eksikliğini ortadan kaldırmak için FRP sargılama tekniği uygulanarak güçlendirilmektedirler. Kirişler; düşey yüzeylerine veya çekme bölgelerine yapılan çeşitli yöntemlerle (Plaka (strip) uygulama, U sarım (wrap), Kumaş (sheet) uygulama, Ankraj) eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilmektedirler (Şekil 2.1.d) [40].



Şekil 2.1. FRP'nin yapı elemanlarında kullanım alanları.

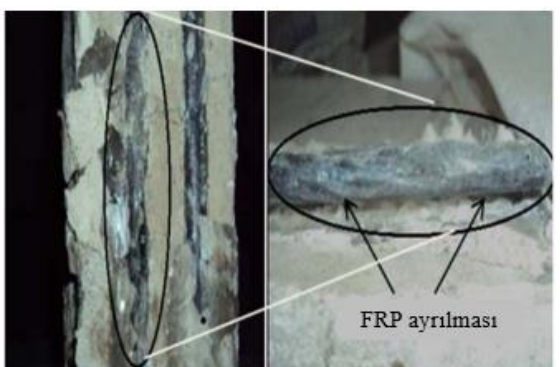
Literatürdeki geçmiş çalışmalardan anlaşıldığı üzere FRP kompozitin uygulandığı yapı elemanı fark etmeksizin çoğu uygulamada beton yüzeyinden erken sıyırılma meydana gelmekte ve FRP kompozitin etkin kullanımından yeterince yararlanılamamaktadır. Çeşitli uygulama örneklerinde de bu durum görülebilmektedir (Şekil 2.2).



a) Kirişlerde görülen FRP ayrılması



b) Duvarlarda görülen FRP ayrılması



c) Kolonlarda görülen FRP ayrılması

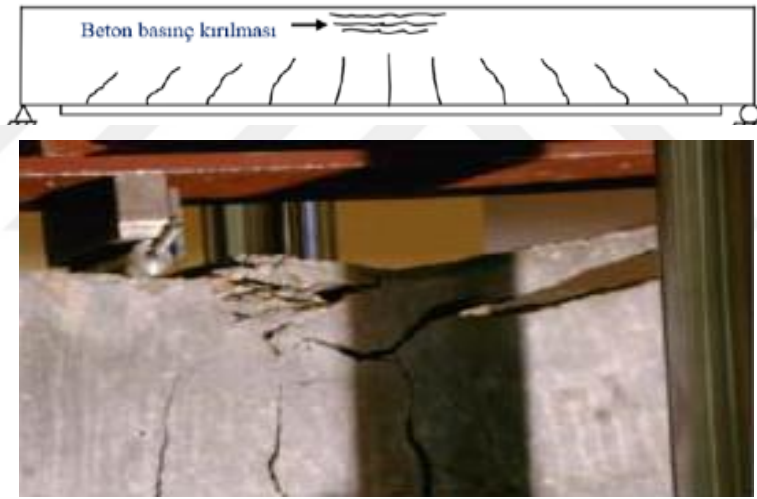
Şekil 2.2. Yapı elemanlarında çeşitli FRP sıyırılma örnekleri.

## 2.2. FRP Uygulanan Kirişlerde Oluşan Göçme Şekilleri

FRP kompozitin beton yüzeyinden erken sıyrılma durumu genellikle eğilme ve kesme yüküne maruz kalan kirişlerde, tam sarım haricinde yapılan diğer uygulama metotlarında görülmektedir. Bu göçme modlarından en temel olanları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir [40].

### 2.2.1. Betonarme kirişte beton basınç kırılması

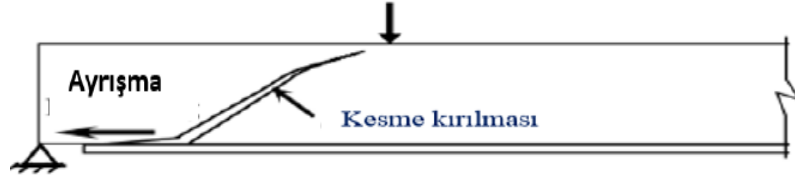
Genellikle yükün uygulandığı noktada meydana gelen ezilme sonucunda donatının akma dayanımına ulaşmadan, elemanda oluşan çatlaklar nedeniyle FRP kompozitin beton yüzeyinden ayrılması durumudur. Genel olarak beton basınç dayanımı düşük olan kirişlerde görülen hasar şeklidir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. FRP kompozit uygulanan kirişte basınç kırılması.

### 2.2.2. Betonarme kirişte kesme kırılması

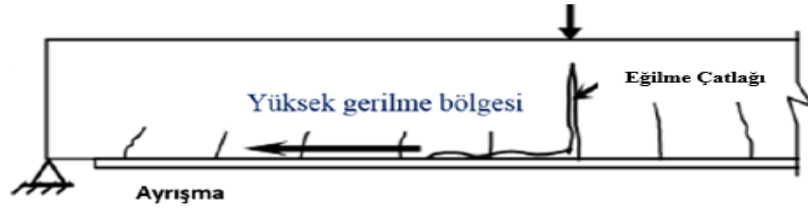
Kirişe uygulanan FRP kompozitin uç noktasından başlayıp yükleme noktasına doğru eğik bir açı oluşturacak şekilde meydana gelen çatlaklar sonucunda görülen göçme biçimidir. Kiriş kesme dayanımının yetersiz olduğu durumlarda eğilme dayanımının aşırı derecede güçlendirilmesi durumunda ortaya çıkabilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. FRP kompozit uygulanan kirişte kesme kırılması.

### 2.2.3. Betonarme kirişte FRP 'nin tabaka olarak ayrılması

Yüksek eğilme ve kesme gerilmelerine maruz kalan FRP kompozitin, uç kısmının epoksi ile beraber beton yüzeyinden ince bir tabaka kaldırarak göçmesi durumudur (Şekil 2.5).

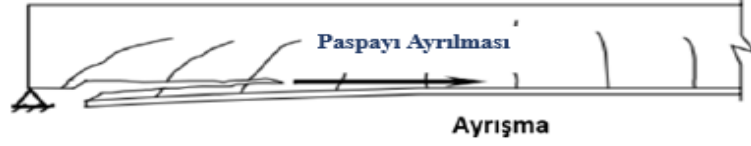


Şekil 2.5. FRP kompozit uygulanan kirişte plaka ucu ayrılması.



#### 2.2.4. Betonarme kirişte beton paspayı ayrılması

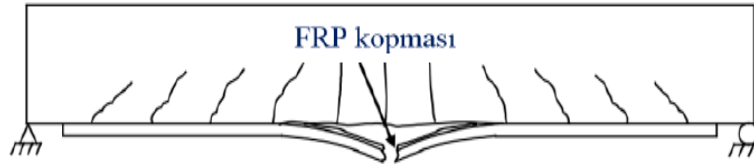
FRP kompozitin uç noktasından başlayan çatlak oluşumuyla birlikte beton kabuğunun çekme donatısı boyunca nispeten kalın bir beton tabakası ile birlikte göçmesi durumudur. Birçok deneysel çalışmada göçme bu şekilde oluşmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. FRP kompozitin paspayı ile yüzeyden ayrılması.

#### 2.2.5. Betonarme kirişte FRP kompozitin kopması

Donatının akma dayanımına ulaşmasının ardından beton basınç bölgesinde çatlak oluşur. Artan gerilmeyle birlikte FRP kompozitin çekme gerilmesinin aşılması sonucunda kopma oluşması durumudur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. FRP kompozitin kopması.

### 2.3. Literatür Araştırması

Yılmaz K. (2002) bir çalışmada fiber takviyeli polimer uygulamalarında yapışma yüzeyi kalitesinin kompozit performansına etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, FRP kompozitin performansını etkin kılabilmek için uygulamaya yönelik yüzey hazırlama ve kaplama biçimlerine ait prensipler açıklanmıştır. Çalışma neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- a) Malzemeyi uygularken dikkat edilecek en önemli husus yüzey hazırlama işlemidir. Aderans ve yük aktarımının sağlanabilmesi için yüzeyin temizliği ve köşelerin kavislendirilmesi en iyi şekilde yapılmalıdır.
- b) Kesme kuvveti, süneklik ve basınç dayanımının yetersiz olduğu yerlerde FRP kumaş ve laminantlar enine sarıldığında daha etkili olmaktadır.
- c) Eğilme dayanımının artırılması istenen kiriş ve döşeme gibi elemanlarda boyuna uygulanması etkinlik sağlamaktadır.
- d) Yapılan işin durumuna ve önemine bağlı olarak FRP kumaşlar farklı kalınlık ve tabaka sayılarında uygulanabileceği gibi yüzeyin tamamı sarılarak veya şerit biçiminde kaplanarak da uygulanabilirler [41].

Ökten M. S. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada fiberle güçlendirilmiş karbon kumaş malzeme kullanılarak (CFRP), iki farklı sarım tekniği ile güçlendirilen betonarme kiriş modelinin, yük altındaki davranışını incelemiştir. Deneyle ayrı ayrı ve farklı beton kalitesinde üretilen betonarme elemanların, ikişer ikişer ve farklı sarım teknikleri kullanılarak birleştirilmesi ile elde edilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneylede kullanılan C16 (12 adet) ve C30 (6 adet) beton kalitesindeki 100x150x1500 mm boyutlarında kiriş modelleri, 100x150x750 mm boyutlarındaki iki adet elemanın, yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız olmak üzere uç uca eklenmesiyle oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen deneylerle karbon kumaş ile takviyeli kirişler üzerinde sarım tekniğinin, beton yapıştırıcısının, beton kalitesinin ve yapışma yüzeyinin kirişin yük altında ki davranışına ait etkilerini araştırmıştır. C16 basınç dayanımına sahip kirişlerle C30 basınç dayanımına sahip kirişler kendi içerisinde değerlendirildiğinden ve uygulanan teknikler de göz önüne alınarak, karbon kumaşla güçlendirilmiş C30 basınç dayanımına sahip olan kirişlerin taşıma gücünün daha fazla değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir [42].

Reis J.M.L., Ferreira A.J.M. (2004) yapmış oldukları çalışmalarında polimer beton ile kumaş takviyeli (CFRP/GFRP) polimer betonda çentik derinliğinin FRP'li beton numunelerin kırılma enerjisine etkisini üç noktali eğilme deneyi altında araştırmışlar ve elde ettikleri sonuçları birbiriyle kıyaslamışlardır. Değişken parametreler; beton dayanımı, kiriş boyu ve S/Ç oranıdır. Çalışma kapsamın da çelik kalıplarda sıkıştırma işlemi uygulanmış 18 adet, 30x60x280 mm boyutlarında ki numuneleri, önce kür işlemi için oda sıcaklığında bekletmişler daha sonra 60 ° C'de 7 saatlik bir sertleştirme işlemine tabi tutmuşlardır. Bu numunelerin tam orta noktasına 2 mm elmas testere kullanarak 10 ve 20 mm derinliğinde çentikler açmışlar ve 3 noktali eğilme deneyi uygulamışlardır. Araştırma sonucunda 10 mm çentiğe sahip CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kırılma enerjisinin, GFRP ile güçlendirilen kirişlerin kırılma enerjisine göre %270, yine aynı şekilde 20 mm çentiğe sahip CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kırılma enerjisinin de GFRP ile güçlendirilen kirişlerin kırılma enerjisine göre %250 daha fazla olduğunu bulmuşlardır [43].

Jongsung S. ve arkadaşları (2005) betonarme yapılar için güçlendirme malzemesi olan bazalt kumaşın özelliklerini araştırmışlardır. Bu kapsam da bazalt kumaşın dayanıklılığını, mekanik özelliklerini ve betonarme kirişlere güçlendirme maksadıyla uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Mekanik özellikleri araştırmak için 2,593 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta ve 10,6 mm çapında olan bazalt kumaşı 20 mm uzunluğunda içi boş bir malzeme içerisine sabitlenmişler ve 5 N kapasiteli bir aktüatör kullanarak 1 mm/dak hızda yük uygulamışlardır. Deney sonucunda elde ettikleri bazalt kumaşın çekme dayanımını, elastisite modülünü, kopma anındaki uzamasını cam ve karbon kumaş numuneleri ile karşılaştırmışlar ve bazalt kumaşın 1000 MPa çekme dayanımıyla, karbon fiberden %30, cam kumaştan %60 daha fazla dayanım sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bir başka deneylerinde bu üç ayrı kumaş türünü (bazalt, karbon, cam) alkali çözeltisine batırdıklarında bazalt ve cam kumaşın reaksiyon sonucu yüzeylerinde tepkime ürünü oluşturarak hacim ve dayanım kaybı yaşadığını gözlemlerken, karbon kumaşta kayda değer bir değişikliğin olmadığını görmüşlerdir. Bazalt, karbon ve cam kumaşları 2 saat boyunca 600 °C'nin üstünde bir sıcaklığa maruz bıraktıklarında, sadece bazalt kumaşın hacimsel bütünlüğünü ve dayanımının %90'ını muhafaza ettiğini görmüşlerdir. Son aşamada da 15x25x240 mm boyutlarına ve 40 MPa dayanıma sahip olacak şekilde ürettikleri 10 adet kiriş numunesinin 8 tanesini farklı katman sayılarında bazaltta

güçlendirmişler, iki tanesini de güçlendirmeden eğilme testine tabi tutmuşlardır. Tek katmanla güçlendirmenin kayda değer bir etkisinin olmadığını fakat üç katmanla güçlendirilen kirişlerde göçmenin ara yüzeyden sıyrılma sonucu oluşan yüksek bir dayanım kaybıyla gerçekleştiğini görmüşlerdir [44].

Gedikli A. ve Keskin E. (2005) birlikte yaptıkları çalışmada betonarme yapıların onarımını, güçlendirilmesini ve lifle güçlendirilmiş polimerlerleri araştırmışlardır. Özellikle FRP'ler üzerinde durarak içyapısı, mekanik ve fiziksel özellikleri, çeşitleri, uygulanış şekilleri ve diğer sistemlerden ayrılan özellikleri hakkında bilgiler vermişlerdir. Ayrıca kirişe uygulanan FRP elemanında meydana gelebilecek olan esneme, kesme ve ayrılma kırılmalarını önlemek için farklı metotları (U şeklinde de bohçalama, ankrajlı ve şeritler halinde bohçalama) 6 adet numune üzerinde uygulamışlardır. Sonuç olarak U şeklinde bohçalı sarmada taşıma gücünün şeritler halinde bohçalı sarmaya göre, bohçalı ankrajlı sarmanın da U şeklinde ki bohçalı sarmaya göre daha fazla taşıma gücüne sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Kirişi CFRP'lerle U şeklinde sarmanın, kesme kapasitesinde %72 oranında artma sağladığını görmüşlerdir. [45]

Y.F. Kurtipek (2007) yaptığı çalışmada beton ile CFRP şeritler arasındaki kayma gerilmesi dağılımını deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel programında 16 adet dikdörtgen kesitli çentikli beton kiriş deney elemanı üretilmiş ve monotonik yükleme altında test edilmiştir. Deneysel elemanları donatısız üretilmiştir. Deneysel elemanlarında çatlağın, betonarme ve CFRP arasındaki gerilme dağılımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla açıklık ortasında 20 mm genişliğinde bir çentik bırakılmıştır. 150x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli üretilen deney elemanı 1300 mm boyundadır. Deneysel elemanın simetri ekseninde bırakılan çentik 20x50 mm boyutlarındadır. Yükleme dört nokta yüklemesi şeklinde monotonik olarak uygulanmıştır. Deneysel çalışmada beton basınç dayanımı (C15/25), CFRP şerit genişliği (50/100 mm) ve CFRP etkili yapıştırma uzunluğu (120/180/240/300 mm) incelenen temel değişkenlerdir. Deneysel sonucunda CFRP şerit genişliğinin, diğer değişkenler olan beton basınç dayanımı ve CFRP yapıştırma boyuna kıyasla göçme yükünün artmasında çok daha etkili olduğu görülmüştür. Gerilme değerleri göçme yükünün %50'sine kadar yavaşça artmış, bu noktadan sonra gerilme değerleri hızla yükselmiş ve çentik kenarlarında yoğunlaşmaya başlamıştır. Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanlarında etkili CFRP yapıştırma boyu, beton basınç dayanımı 15 MPa olan

deney elemanlarından %23 daha fazla çıkmıştır. Buna göre beton basınç dayanımını yüksek tutmak, yapıştırılan CFRP şeridinin etkili uzunluğunu arttırmıştır. CFRP şerit genişliğinin artması, CFRP şeridinin etkili uzunluğunun da artmasını sağlamıştır. Buna göre 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin, 50 mm genişliğindeki şeritlerden %17 daha etkili CFRP şerit boyuna sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [46].

Sayed-Ahmed, E.Y., Bakay, R., ve Shrive, N.G. (2009) birlikte yapmış oldukları çalışmalarında FRP laminatlarının beton yüzeyine yapışma dayanımını ve FRP uygulanan kirişlerde oluşan göçme modlarını incelemiştir. FRP ile beton yüzeyi arasındaki yapışma dayanımını tahmin etmek için oldukça geniş bir ağı sahip olan literatür taraması yapmışlardır. FRP ile güçlendirilmiş ve eğilme deneyine tabi tutulmuş olan betonarme kirişlerde göçmenin FRP'nin kopması, FRP'nin mesnet bölgesinde betonla birlikte kopması, FRP ile beton yüzeyi arasındaki aderansın zayıf olmasından dolayı meydana gelen FRP ayrılması/sıyrılması şeklinde olduğunu görmüşlerdir. FRP laminat ile betonun ortak çalışabilmesinin aradaki aderans ile doğrudan alakalı olduğunu belirtmişlerdir. FRP ile beton arasındaki yapışmayı tahmin edebilmek için literatürde yer alan ampirik formüller ile deneysel verilerin kalibre edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Herhangi bir sebepten ötürü hasar almış olan çatlaklı bir beton elemanın FRP malzemelerle güçlendirilmesi sonucunda istenilen performansın sağlanıp sağlanamayacağı ile ilgili daha fazla çalışma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır [47].

Sayın B. ve Manisalı E. (2010) birlikte yapmış oldukları bir çalışmada lif takviyeli plastik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde ara yüz gerilmelerini etkileyen parametreleri deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Çalışmada 15 adet betonarme kiriş üretilmiş olup, her biri 75 cm uzunluğunda ve 15x15 cm kare kesite sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışma, iki ayrı yapıştırıcı (Sikadur 52 / Sikadur30), iki ayrı beton yüzeyi (kuru / nemli) ve üç farklı yapıştırıcı kalınlığı (1 / 2 / 4 mm) dikkate alınarak yapılmıştır. FRP'nin kirişe uygulanmasında kullanılan yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü ve beton yüzeyinin durumu, üretilen deney numuneleri eğilme etkisine maruz bırakılarak mukayeseli olarak incelenmiştir. Sonrasında, ANSYS WB sonlu elemanlar programı kullanılarak FRP'li betonarme kirişler modellenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan betonarme kirişlerin ANSYS WB'de modellenmesi ve analizi sonucu yapıştırıcı-beton ve yapıştırıcı-FRP ara yüzünde kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler elde edilmiştir. Grafikler, yapıştırıcı türü, yapıştırıcı kalınlığı ve beton

yüzeyinin nemli/kuru olduğu durumlarına göre karşılaştırmaya imkân verecek şekilde oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarda FRP ile güçlendirilen kirişlerde en kritik yerlerin plaka uçları olduğu, yapıştırıcı kalınlıkları artırıldığında normal kayma gerilmelerin de azalmaları olduğu, nemli beton yüzeylerinde 2 mm'ye kadar yapıştırıcı kalınlığının kabul edilebilir olduğu, kalınlığın 2 ila 4 mm arasında değişmesi durumunda ise epoksinin su emme miktarının arttığı ve bu durumda güçlendirilen kirişin dayanımına menfi etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir [48].

Bilotta A. ve arkadaşları (2011) birlikte yapmış oldukları bir çalışmada CFRP'lerin beton yüzeyinden sıyrılmasını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında C20 ve C25 dayanımında 150 mm'lik yüzey genişliğine sahip beton numunelere dıştan CFRP yapıştırmışlar ve çekme testinde CFRP'lerin yüzeyden sıyrılmasını araştırmışlardır. Bu maksatla 18 adet CFR şerit ve 16 adet CFRP plaka kullanarak 34 adet deney yapmışlardır. Deneyde elde edilen değişken parametreler, beton basınç dayanımı, CFRP tabaka kalınlığı, CFRP genişliği ve CFRP yapışma boyudur. CFRP genişliğini 50, 80 ve 100 mm olarak, yapışma boyunu da 50, 100, 125, 250 ve 400 mm olarak belirlemişlerdir. Bu deneyden elde ettikleri sonuçlar ile analitik çalışmadan elde ettikleri sonuçları birbiri ile mukayese etmişlerdir. Ayrıca analitik hesaplamaları iki farklı metot kullanarak yapmışlar ve deneysel veriler ile analitik veriler arasında bir kg katsayısı hesaplamışlardır. Sonuç olarak; CFRP plakalar ile güçlendirilmiş beton elemanların, CFRP şeritlerle güçlendirilmiş beton elemanlara göre %40 daha fazla dayanıma ulaştığını görmüşlerdir [49].

Cameron R. (2012) yüksek lisans tezinde FRP laminatlarla dıştan ankrajlı olarak güçlendirilen betonarme kirişleri incelemiştir. Çalışmayı iki aşamada gerçekleştirmiştir. İlk aşamada ankraj ile beton arasındaki yapışmayı sağlayacak epoksi çeşidini belirlemek için 3 farklı epoksi ile (Sikadur 30, Sikadur 300 ve Wabo MBrace Primer) 9 ayrı deney yapmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılmak üzere 6 adet 4500 mm açıklıkta, 400 mm yükseklikte ve 500 mm genişlikte T kirişler üretilmiştir. Üretilen T kirişlerin 2 tanesine herhangi bir güçlendirme işlemi uygulamadan referans elemanı olarak belirlemiş, 1 tanesine ankrajsız FRP uygulamış, geriye kalan 3 adet elemana da ankraj uygulaması yapmıştır. Sonuç olarak; ankrajsız FRP uygulanan deney elemanı referans elemanlarına göre %46 daha fazla yük taşıırken, ankrajlı deney elemanları da referans elemanlarına nispetle %86 daha fazla yük taşımıştır [50].

Aykaç B., Acar D. (2014) beraber yapmış oldukları bir çalışmalarında betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılmış karbon kumaş ve çelik levhalardan oluşan kompozit malzemeye güçlendirilmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada sünekliğin yanı sıra yüksek dayanım talebinin de gerekli olduğu durumlarda her iki malzemenin birbirinin eksiklerini tamamlayacak şekilde kullanılmasının betonarme kiriş davranışı üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Bu amaçla, biri yalın, ikisi sadece karbon kumaşlarla (Sika Wrap 230 C/45), diğerleri ise hem karbon kumaş hem de çelik levhalarla güçlendirilmiş toplam 11 adet 150x300 mm kesitinde ve 3,2 m uzunluğunda betonarme kirişleri düşey yükler altında test etmişlerdir. Kirişlerin çekme ve basınç donatıları sırasıyla 2Ø10 ve 2Ø8 olarak seçilmiş ve kirişlerde mesnet bölgelerinde 6 cm, orta bölgelerde 10 cm aralıklı Ø5 etriyeler kullanmışlardır. Çalışmalarında, karbon kumaş ve çelik levha katman sayısı, yapıştırma sırası ve çelik levha kalınlığını parametre olarak ele almışlardır. Çalışma neticesinde çelik levhalar ve karbon kumaşların beraber kullanılmasının, kirişin taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve tokluk modülü değerlerine -yalın elemana göre- sırasıyla %106-195; %65-150; %20-70 arasında değişen oranlarda katkı yaptığını görmüşlerdir. Sadece bir kat kumaş bulduran kompozit malzemeye güçlendirilmiş kirişlerin, taşıma gücü ve tokluk modülü değerlerinin -sadece bir kat kumaşla güçlendirilmiş referans elemanına göre- sırasıyla %35- 60 ve %20-70 arasında değişen oranlarda yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Aynı şekilde iki kat kumaş bulduran kompozit malzemeye güçlendirilmiş kirişlerin, taşıma gücü ve tokluk modülü değerlerinin -sadece iki kat kumaşla güçlendirilmiş referans elemana göre- sırasıyla %30-80 ve %5-35 arasında değişen oranlarda fazla olduğu müşahade etmişlerdir [51].

Mertoğlu Ç. (2015) doktora tezinde CFRP ile beton yüzeyler arasındaki gerilme aktarım mekanizmalarını deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Planlanan 30 deney için 300 x 250 x 600 mm boyutlarında, beton basınç dayanımı 25 MPa olan 15 adet deney elemanı üretmiş ve her elemanı iki defa deneye tabi tutmuştur. Araştırmada tek doğrultulu karbon lif donatılı polimer olan Sika Wrap 230C (CFRP) malzemesini kiriş yüzeyine yapıştırmak için Sikadur 330 epoksi esaslı doyurma reçinesini kullanmıştır. Çalışmada incelenen temel değişkenler beton yüzeyindeki çatlak tipi ve sayısı, CFRP şerit genişliği, CFRP şerit yapıştırma boyu ve ankraj sayısıdır. Çalışma kapsamında; çatlaksız, eğilme çatlakları ile kesme çatlaklarına sahip beton yüzeylerine yapıştırılan ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritler ile yüzey arasındaki birim şekil değiştirme dağılımı ve kayma bağı modeli incelenmiştir.

Deneysel çalışmada 50 ve 100 mm genişliğinde, 200 ve 280 mm yapıştırma boyuna sahip CFRP şeritleri, sırasıyla 1, 2, 3 ankrajlı olacak şekilde 1, 2 kesme ve eğilme çatlaklarına sahip ve ankrajsız referans elemanları olmak üzere toplam 30 deney elemanı test etmiştir. Deney elemanlarını 10 mm kalınlığında, 600 mm genişliğinde ve 3 m uzunluğundaki çelik levha üzerine, yükleme sırasında hareket etmemesi için sabitlemiştir. Plakanın sabitlendiği kısmı hidrolik pompa vasıtasıyla çekerek CFRP şeritlere çekme kuvveti uygulamıştır. Uygulanan yükü de hidrolik pompanın ucuna yerleştirilen yük hücresi (Load-Cell) vasıtasıyla ölçmüştür. Ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritlerin davranışları ile eğilme ve kesme çatlaklarına sahip beton yüzeylerine yapıştırılmış CFRP şeritlerin davranışlarını karşılaştırarak ankrajlı CFRP şeritler için yeni bir bond-slip modeli önermiştir. Ayrıca CFRP şeritlerdeki birim deformasyon dağılımını da incelemiştir [52].

Kaya T., Çalışkan Ö., Aras M. (2017) birlikte yapmış oldukları bir çalışmalarında güçlendirilen beton kirişlerin eğilme dayanımlarına yapıştırıcının etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla biri kontrol elemanı olmak üzere, 30 MPa dayanımda ve 100x100x500 mm boyutlarında toplamda 13 adet numune üretmişlerdir. Numuneleri 28 gün boyunca kür havuzunda bekletmişlerdir. Kür işlemi sonunda numuneleri üç farklı yapıştırıcı (Sikadur 330, Soudaflex 40 fc ve Multibond 35) ile 0.3 mm ve 0.5 mm kalınlığında metal sac malzemeler ile tek yüzey ve üç yüzey olacak şekilde güçlendirmişlerdir. Güçlendirilen numuneleri 7 gün laboratuvar ortamında yapıştırıcıların kür işlemleri için bekletmişlerdir. Kür işlemi sonunda kontrol elemanını ve güçlendirilen numuneleri TS EN 12390-5'e göre dört noktalı eğilme deneyine tabi tutmuşlardır. Numunelerin eğilme dayanım değerleri incelendiğinde en düşük dayanımı 4.1 MPa 'la kontrol numunesinden, en yüksek dayanımı ise 36.18 MPa 'la Sikadur 330 epoksi kullanılarak 0.5 mm sac ile alt ve iki yan yüzeyi güçlendirilen numunedan elde etmişlerdir. Sonuç olarak; yapıştırıcı türünün güçlendirme uygulamalarında etkin bir malzeme olduğunu görmüşlerdir. Güçlendirme uygulamalarında epoksi türü yapıştırıcıların polimer ve poliüretan türlerine oranla yüksek derecede artışlar sağladığını deneysel çalışma sonucunda belirlemişlerdir [53].

Xie J. ve arkadaşları (2018) BFRP ile beton bağ ara yüzlerinin eğilme yükü altındaki yorulma davranışları üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada kullandıkları elemanları, birbirinden 10 mm boşlukla ayırmışlar ve üst yüzeye yakın yerde beton içerisine gömülü 620 mm uzunluğunda iki adet 10 mm çapında çelik çubukla bağlanmış, iki tane 150 x 150 x300 mm düz beton prizmanın birleştirilmesi ile oluşturmuşlardır. Bu



maksatla; 30 MPa basınç dayanımına sahip olacak şekilde üretilen 11 adet numunenin 3 tanesini kontrol elemanı olarak belirlemişler geriye kalan 8 tanesini ölçüleri 460x120x0,167 mm olan BFRP şeritleri kullanarak güçlendirmişlerdir. BFRP'nin yapıştırıldığı bir tarafı test kısmı olarak belirlemişlerdir. Bu sebeple test dışı tarafta meydana gelebilecek olası yapışmama durumunu önlemek için bir BFRP U şeridi ile o kısmı güçlendirmişlerdir. Deney sonucunda BFRP şeritlerin yüzeyden sıyrılması veya BFRP şeritin kopması şeklinde iki ana hasar şeklinin olduğunu görmüşlerdir. Yorulmayı öngörmek için mevcut veri tabanına dayanan yeni basit bir yorulma ömrü modeli önermişler ve eğilme yükü altında BFRP ile beton arasındaki bağın, yorulma dayanımının 0.274 MPa olduğunu bulmuşlardır [54].

Yuan C. ve arkadaşları (2018) yapmış oldukları bir çalışmada bazalt kumaş takviyeli polimer levhalar ile çelik lif takviyeli beton arasındaki bağ davranışını araştırmışlardır. Deney kapsamında, bazalt kumaş takviyeli polimer levha (BFRP) ile 150x150x350 mm boyutlarında ve 40 MPa basınç dayanımına sahip olacak şekilde üretilmiş olan 12 adet çelik lif takviyeli beton prizma (SFRC) arasındaki ara yüzey bağ davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmayı dört grup numune üzerine de yapmışlardır; 1. 2. 3 ve 4. grup numunelerinin içerisine sırasıyla %0, %25, %50 ve %100 oranlarında 25 mm uzunluğa, 0.3 mm kalınlığa sahip olan çelik lif takviyesi yaparak numunelerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri numunelere 250 mm boyunda BFRP yapıştırarak çekme deneyi yapmışlardır. Çekme deneyi neticesinde 1. 2. 3.ve 4. grup numunelerinin çekme gerilmelerini sırasıyla 8.50 kN, 9.23 kN, 10.03 kN ve 11.04 kN olarak bulmuşlardır. Sonuç olarak beton içerisine katılan çelik lif oranı arttıkça BFRP şeritin yüzeyden sıyrılması için gereken yükün de arttığını belirtmişlerdir [55].

Yuan C. ve arkadaşları (2019) agrega büyüklüğünün bazalt kumaş takviyeli polimer levhalarla beton arasındaki bağlanma davranışına etkisi araştırmışlardır. Çalışmada kullanılmak üzere 150x150x350 mm boyutlarında, 40-60 MPa basınç dayanımında, içerisinde 5–10 mm, 10–15 mm ve 15-20 mm dane çapına sahip agregalar bulunan 12 adet numune üretmişlerdir. Çalışmayı her bireri üçer adet olmak kaydıyla toplamda dört grup numune üzerinde yapmışlardır; basınç dayanımları 40 MPa olan ilk üç gurubun dane çapları sırasıyla; 5–10 mm, 10–15 mm, 15–20 mm'dir. Dördüncü gurubu ise 5–10 mm dane çapına sahip 60 MPa basınç dayanımında numunelerden oluşacak şekilde tasarlamışlardır. Beton yüzeylerine 40x250mm boyutlarındaki BFRP şeritleri

yapıştırarak çekme deneyi yapmışlardır. BFRP şeritlere uyguladıkları çekme deneyleri neticesinde 1. 2. 3. ve 4. grup numunelerinin çekme gerilmelerini sırasıyla 11.75 kN, 10.98 kN, 10.57 kN ve 12.87 kN bulmuşlardır. Sonuç olarak beton içerisindeki agrega dane çapı büyüdükçe BFRP şeritlerin daha düşük yüklerde yüzeyden sıyrılabileceğini belirtmişlerdir [56].



## BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmada; BFRP kompozitin beton yüzeyine yapışma performansını araştırmak ve iyileştirmek amacıyla; beton yüzey hazırlığının, kumaş etkili yapışma boyunun, kumaş uçlarına uygulanan *U* sarım yönteminin, fan ankraj ve tasarlanan yeni bir ankraj modelinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan kalıp, beton, güçlendirme malzemeleri, güçlendirme yöntemleri, deney düzeneği ve deney elemanları ayrıntılı bir şekilde başlıklar halinde aşağıda açıklanmıştır.

### 3.1. Deney Malzemeleri

#### 3.1.1. Kiriş betonu

Kiriş numunelerinin üretiminde kullanılan C40 kalitesindeki beton, ilimizde bulunan hazır beton santralinden temin edilmiştir. Kiriş betonunun basınç dayanımını tayin etmek için beton yerleştirme işlemi sırasında standart küp numune örnekleri alınmıştır (Şekil 3.1.). Numuneler kür havuzunda bekletilmiş, deney elemanları ise günlük sulanmıştır. Küp numunelerin 28 günlük dayanım sürecinin ardından laboratuvar ortamında basınç testi ile elde edilen eşdeğer küp basınç dayanımları Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Küp beton numuneleri.

Tablo 3.1. Küp numunelerin 28 gün sonunda ölçülen eşdeğer basınç dayanımları.

Numune No	Beton Basınç Dayanımı
	$F_c$ (MPa)
1	48,84
2	49,97
3	50,65
4	52,63
5	58,83
<b>Ortalama</b>	<b>52,2</b>

### 3.1.2. Epoksi

BFRP kompozitlerin beton yüzeyine yapıştırılmasında çift bileşenli Sikadur 330 epoksi esaslı doyumurma reçinesi kullanılmıştır. Epoksi; elektronik bir mikser aracılığıyla karıştırılıp rulo yardımıyla kumaşa ve betona uygulanabilen, birçok yüzeyle iyi aderans sağlayabilen, yüksek mekanik özelliklere sahip, uygulama esnasında altına ayrı bir astar uygulaması gerektirmeyen, biri reçine diğeri sertleştirici olan iki farklı bileşenden (A, B) oluşan doyumurma reçinesi ve yapıştırıcısıdır. A bileşeni olan reçine beyaz renkli, B bileşeni olan sertleştirici ise gri renkli, iki bileşenin ağırlıkça, A: B=4:1 oranında karıştırılması ile elde edilen karışım ise açık gri renklidir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Epoksi reçine ve A/B bileşenleri.

Bu açık gri renkli formun elde edilebilmesi için A+B bileşenlerini içeren karışım, en az üç dakika boyunca düşük hızlı şarjlı matkap ucuna takılmış karıştırıcı vasıtasıyla -hava sürüklenmesi durumunu da göz önünde bulundurarak düzgün kıvamlı ve homojen olana

kadar karıştırılmalıdır. Üretici firma tarafından verilen epoksiye ait mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 3.2'deki gibidir.

Tablo 3.2. Epoksiye ait mekanik özellikler.

Sikadur®-330 Malzeme Özellikleri	Değerler
Yoğunluk (kg/L)	1,30 ± 0,1 (A+B bileşeni) (+23 °C'de)
Karışım oranı	A bileşeni: B bileşeni = 4: 1 ağırlıkça
Uygulama sıcaklığı (°C)	+10 min. / +35 max.
Çekme dayanımı (MPa)	30 (7 gün sonra, +23°C'de)
Eğilmede elastisite modülü (MPa)	3 800 (7 gün sonra, +23 °C'de)
Çekmede elastisite modülü (MPa)	4500 (7 gün sonra, +23 °C'de)
Kopma uzaması	%0,9 (7 gün sonra, +23 °C'de)
Yapışma dayanımı	Kumlanmış yüzeyde beton kırılması:> 1 gün
Kimyasal dayanım	Ürün kimyasal dayanım amaçlı değildir

### 3.1.3. Bazalt kumaş

Çalışmada beton yüzeyine yapışma kabiliyeti araştırılan tek doğrultulu bazalt kumaş kullanılmıştır. Rulo halindeki bazalt kumaş; genişliği 50 cm, uzunluğu ise 50 m olacak şekilde piyasaya sunulmaktadır (Şekil 3.3.). Kumaşa ait mekanik ve teknik özelliklerin bir kısmı üretici firmanın ürün kataloğundan alınmış, çekme dayanımı ve dokuma kalınlığı ise laboratuvar ortamında bazalt kumaş üzerine yapılan testlerden elde edilerek ve Tablo 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Tek doğrultulu bazalt kumaş.

Tablo 3.3. Deneyde kullanılan BFRP kompozite ait özellikler.

Özellik	Değerler
Filament çapı (Mikron)	13-20
Dokuma kalınlığı (mm)	0,14
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,80
Nem (%)	0,2- 12
Çekme dayanımı (MPa)	3115
Elastisite modülü (MPa)	89
Kopma uzaması (%)	3,5
Renk	Altın kahverengi

### 3.1.4. Birim deformasyon ölçer (Strain gauge)

Deney kapsamında; beton yüzeyi ile BFRP kompozit arasındaki bağ gücünü etkileyen en önemli parametrelerden biri olan gerilme dağılımını incelemek amacıyla deney numunelerinin simetri eksenine açılan etkili yapışma bölgesindeki çentik kenarına Tokyo Sokki Kenkyujo firması tarafından üretilen birim deformasyon ölçerler (strain gauge) yapıştırılmıştır (Şekil 3.4.). Deformasyon ölçerlere ait bazı özellikler Tablo 3.4'deki gibidir.



Şekil 3.4. Strain gauge.

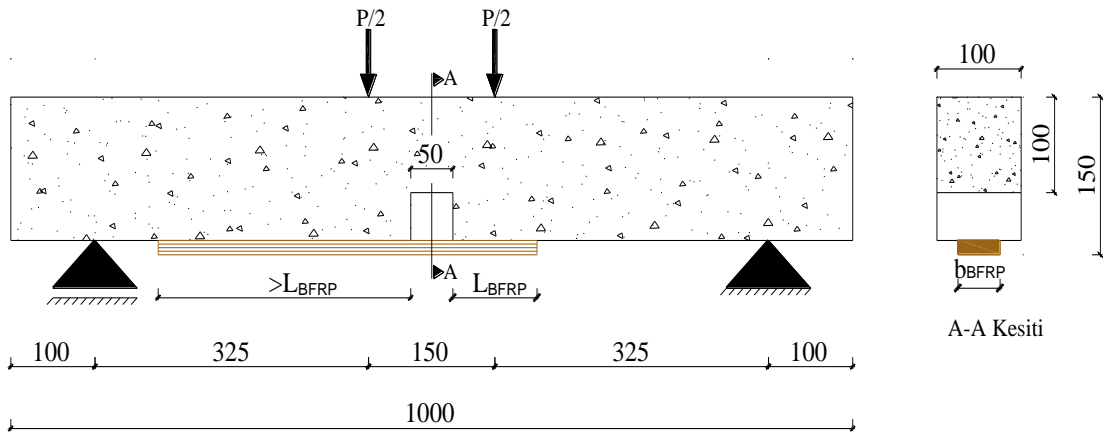
Tablo 3.4. Strain gauge'e ait özellikler.

Özellik	Değerler
Ölçer tipi	PL-60-11-3L
Uzunluk (mm)	60
Direnç ( $\Omega$ )	119,9
Kurşun tellerin uzunluğu (m)	3
Gösterge faktörü	2,13
Test koşulu ( $^{\circ}\text{C}$ )	+23
Enine duyarlılık (%)	3

### 3.2. Deneysel Çalışma Yöntemi

#### 3.2.1. Kiriş numunelerin kesit özellikleri

Numunelerin geometrik özellikleri ve sayısı mevcut laboratuvar şartları göz önünde bulundurularak planlanıp tasarlanmıştır. Deney kapsamında 100x150x1000 mm boyutlarına sahip 27 adet dikdörtgen kesitli kiriş üretilmiştir. Üretilen numunelerde donatı kullanılmamıştır. Deney esnasında numunelerde eğilme kırılması meydana gelebilmesi ve çatlak nedeniyle BFRP kompozitin etkili yapışma bölgesinde oluşan gerilme dağılımının ölçülebilmesi için üretim aşamasında numunelerin simetri merkezinde 50x50 mm boyutlarına sahip çentikler oluşturulmuştur. Mesnet açıklığı 800 mm olan kirişin geometrik özellikleri ve yükleme durumu Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Betonarme kirişin yükleme durumu ve geometrik özellikleri.

### 3.2.2. Kiriş numunelerinin BFRP ile güçlendirme yöntemi

BFRP kompozitin beton yüzeyine yapışma performansını etkileyen parametreleri araştırmak ve iyileştirilmek maksadıyla yüksek basınç dayanımına sahip toplamda 27 adet deney numunesi üretilmiştir. Çalışmada dört adet kontrol kirişi kullanılmıştır.

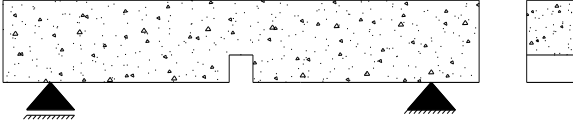
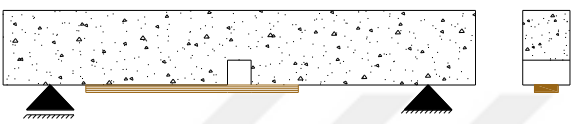
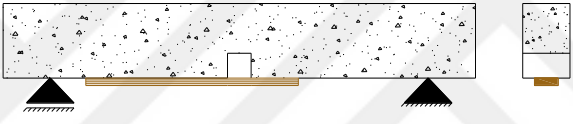
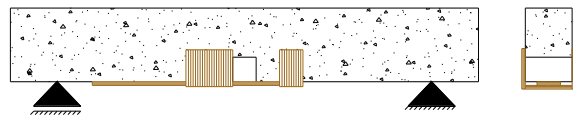
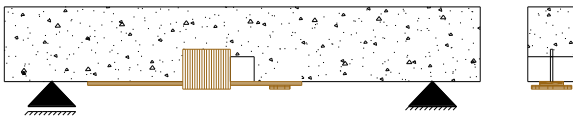
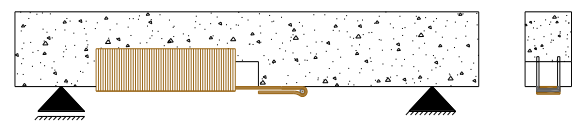
Üretilen deney elemanları ile yüzey hazırlığının, kumaş etkili yapışma boyunun, kumaş uçlarına uygulanan U sarım yönteminin, fan ankraj ve yeni geliştirmiş olduğumuz mekanik ankraj uygulamasının kumaş performansına etkileri araştırılmıştır. Bununla beraber her gruptan en az birer adet olmak kaydıyla (Kontrol ve MY10 numuneleri hariç) 5 adet numune üzerinde de çatlak kenarındaki BFRP kompozitte oluşan gerinme değerlerinin deformasyon ölçerler (strain gage) kullanılarak ölçülmesi hedeflenmiştir. Çalışmaya ait numune adetleri, kumaş yapıştırılan betonun yüzey özelliği, numunelerde kullanılan kumaş genişlikleri, uzunlukları ile kiriş özellikleri gibi durumlar Tablo 3.5 ve 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.5. Deney elemanlarına ve beton yüzeyine yapıştırılan BFRP kompozite ait özellikler.

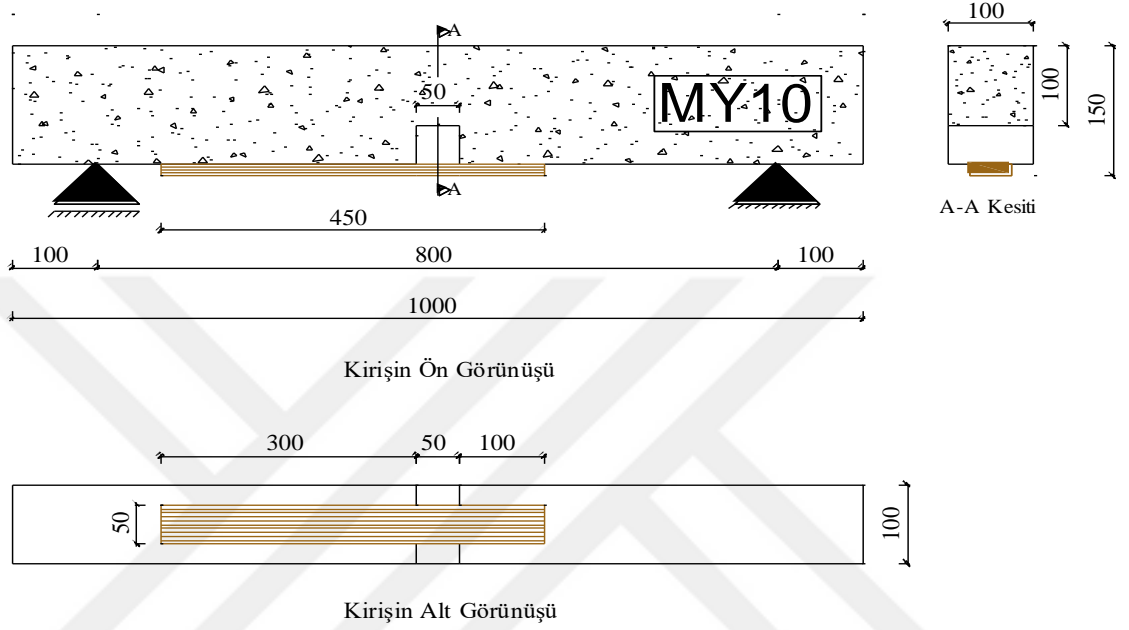
Numune Adı	Numune Adedi	Yüzey Türü	Kumaş Genişliği (cm)	Birim Deformasyon Ölçer	Yapıştırılan Kumaşın Toplam Boyu (cm)	Etkili Yapışma Boyu (cm)
KONTROL	4	Müdahalesiz		—	—	—
MY10	2	Müdahalesiz		—	45	10
YD10	4	Taşlanmış		Var	45	10
YD15	4	Taşlanmış		Var	50	15
YD20	3	Taşlanmış	5	Var	55	20
YDU10	3	Taşlanmış		Var	45	10
YDF10	2	Taşlanmış		Yok	45	10
YDA10	5	Taşlanmış		Var	35+10+10	10
<b>Toplam Numune Adedi: 27</b>						



Tablo 3.6. Kirişlerde kullanılan BFRP kompozitin, beton yüzeyine uygulanma şekilleri.

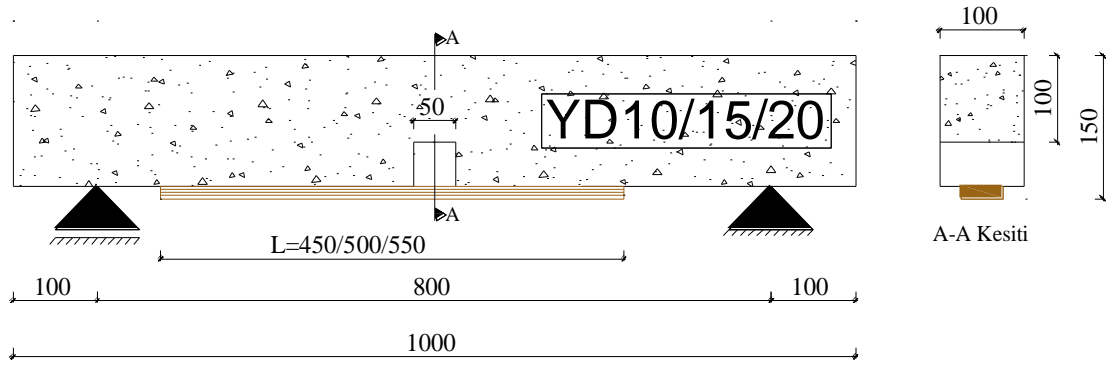
Kiriş İsimleri	Kiriş Şekilleri	Kiriş Özellikleri
Kontrol		Kontrol kirişi
MY10		Beton yüzeyi taşlanmamış, 100 mm yapışma boyuna sahip numune
YD10/15/20		Beton yüzeyi taşlanmış, 100, 150 ve 200 mm yapışma boyuna sahip numune
YDU10		Beton yüzeyi taşlanmış, kumaş uçlarına 50x250 mm boyutlarında U sarım uygulanan numune
YDF10		Beton yüzeyi taşlanmış, 100 mm yapışma boyuna sahip kumaş uçlarına fan ankrāj uygulaması yapılan numune
YDA10		Beton yüzeyi taşlanmış, 100 mm yapışma boyuna sahip kumaş uçlarına mekanik ankrāj uygulaması yapılan numune

BFRP kompozitin yapıştırılacağı beton yüzeyine herhangi bir müdahalede bulunulmayan numunelere; 50 mm genişliğe, 100 mm etkili yapışma boyuna ve 450 mm toplam uzunluğa sahip şerit halindeki kumaşlar yapıştırılmıştır. Bu yöntemle toplamda 2 adet numune hazırlanmış ve numuneler MY10 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.6.). MY10 numunelerinde birim deformasyon ölçer kullanılmamıştır.

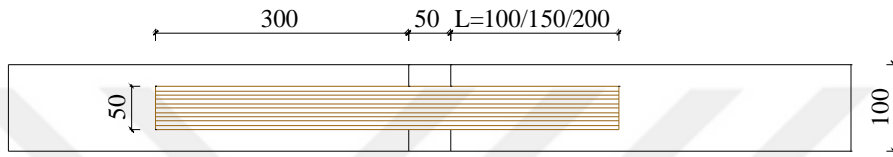


Şekil 3.6. MY10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri.

BFRP kompozitin yapışması için beton yüzeyi; taşlama çanak, tel fırça, basınçlı hava ve kuru bir bez kullanılarak yapışmaya uygun hale getirilen numunelere; 100 mm, 150 mm ve 200 mm etkili yapışma boyu ile sırasıyla 450 mm, 500 mm ve 550 mm toplam boy uzunluğuna sahip şerit halindeki kumaşlar yapıştırılarak deney numuneleri hazırlanmış ve numuneler; YD10, YD15 ve YD20 olarak isimlendirilmişlerdir. (Şekil 3.7.). Bu özelliklere sahip olacak şekilde deney kapsamında YD10 ve YD15 numunelerinden dörder adet, YD20 numunelerinden ise üç adet deney numunesi hazırlanmıştır. YD10, YD15 ve YD20 numunelerinin birer tanesinin etkili yapışma bölgesine 60 mm uzunluğa sahip birim deformasyon ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır.



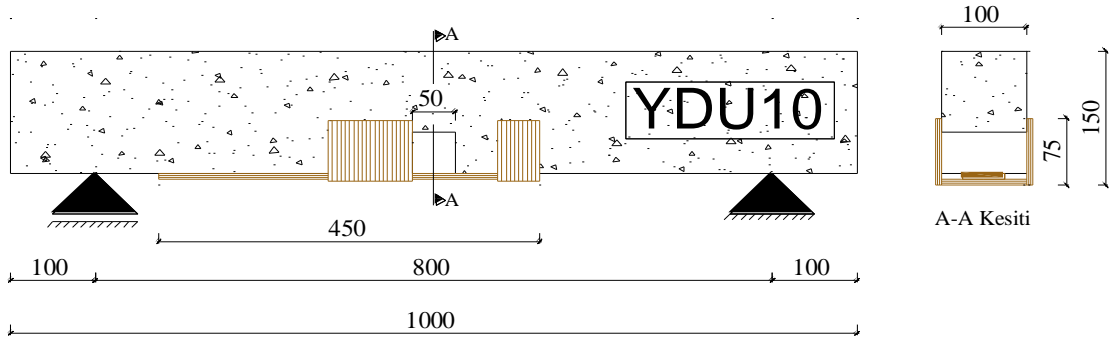
Kirişin Ön Görünüşü



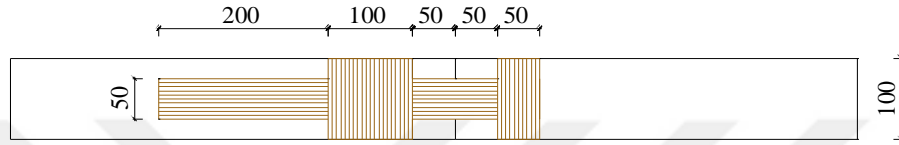
Kirişin Alt Görünüşü

Şekil 3.7. YD10, YD15 ve YD20 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri.

Etkili yapışma bölgesindeki kumaş uçlarına *U* sarım yöntemi uygulanan numunelerin beton yüzeyi; taşlama çanak, tel fırça, basınçlı hava ve kuru bir bez kullanılarak yapışmaya uygun hale getirilmiştir. Deney elemanlarının alt kısmına 50 mm genişliğe, 100 mm etkili yapışma boyuna ve 450 mm toplam uzunluğa sahip şerit halinde kumaşlar yapıştırılmıştır. Kiriş kenarlarında oluşacak gerilme yığılmalarını önlemek için *U* sarım yapılacak köşeler ovalleştirilmiştir. Etkili yapışma bölgesindeki kumaşın uç kısmına 50 mm genişliğinde, 250 mm uzunluğunda (yani; kiriş yarı yüksekliğine gelecek kadar uzunluğa sahip) kumaşlar yapıştırılmıştır. Aynı şekilde rijit olması istenen çentiğin diğer taraftaki kısmına ise; 100 mm genişliğe, 250 mm uzunluğa sahip bir başka *U* sarım uygulaması yapılmıştır. Bu yöntem ile üç adet deney numunesi hazırlanmış ve numuneler YDU10 olarak isimlendirilmişlerdir (Şekil 3.8.). YDU10 numunelerinin bir tanesinin etkili yapışma bölgesine 60 mm uzunluğa sahip birim deformasyon ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır.



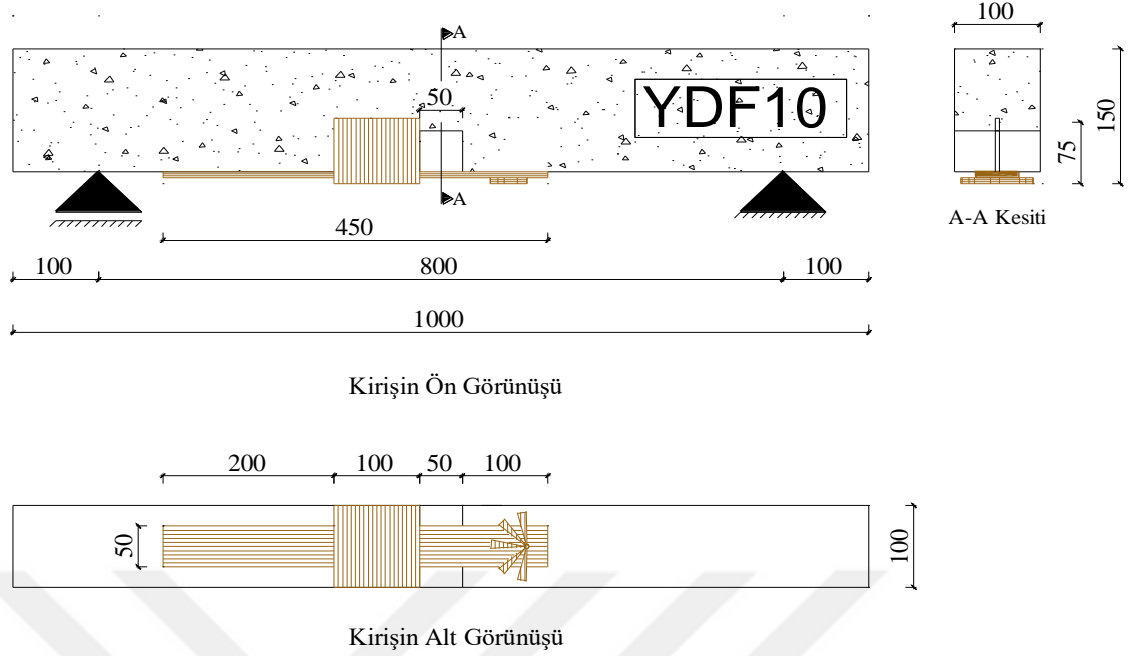
Kirişin Ön Görünüşü



Kirişin Alt Görünüşü

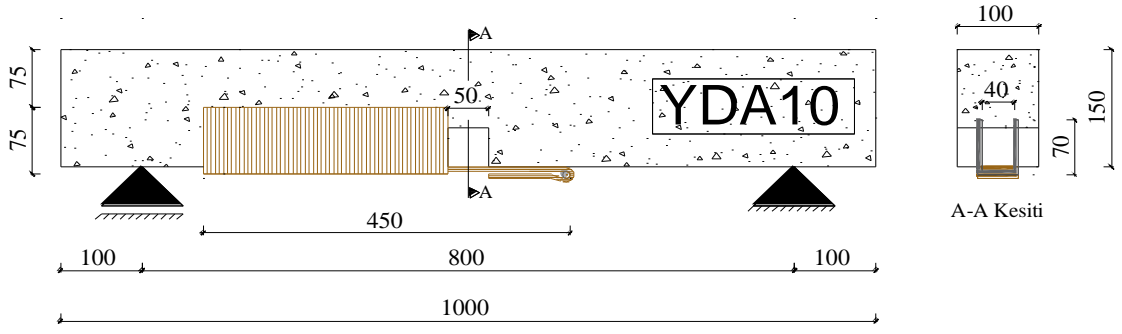
Şekil 3.8. YDU10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri.

Etkili yapışma bölgesindeki kumaşa fan ankraj yöntemi uygulanan numunelerin beton yüzeyi; taşlama çanak, tel fırça, basınçlı hava ve kuru bir bez kullanılarak yapışmaya uygun hale getirilmiştir. Deney elemanlarının alt kısmına 50 mm genişliğe, 100 mm etkili yapışma boyuna ve 450 mm toplam uzunluğa sahip şerit halindeki kumaşlar yapıştırılmıştır. Beton yüzeyine açılan deliğe yerleştirilmek üzere 75x300 mm boyutlarında hazırlanan bazalt kumaşın her iki ucuna 75 mm uzunluğunda püskül yapılmıştır. Epoksiye doyurulan ve çelik bir çubuk etrafına sarılarak beton içerisine yerleştirilen ankraj elemanlarının püskül kısmı hem beton yüzeyine hem de kumaşa yapıştırılarak uçları çentik kenarlarına doğru gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Rijit olması istenen çentiğin diğer taraftaki kısmına ise; 100 mm genişliğe ve 250 mm uzunluğa sahip *U* sarım uygulaması yapılmıştır. Bu yöntem ile iki adet deney numunesi hazırlanmış ve numuneler YDF10 olarak isimlendirilmişlerdir (Şekil 3.9.). YDF10 numunelerinde birim deformasyon ölçer kullanılmamıştır.

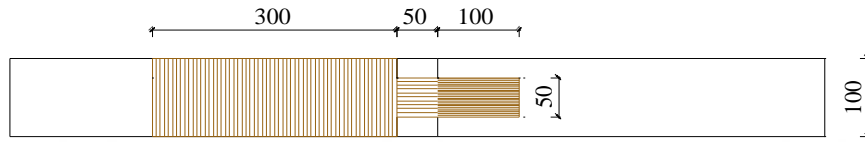


Şekil 3.9. YDF10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri.

Etkili yapışma bölgesindeki kumaş ucuna ankraj uygulaması yapılan numunelerin, beton yüzeyi; taşlama çanak, tel fırça, basınçlı hava ve kuru bir bez kullanılarak yapışmaya uygun hale getirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemde beton yüzeyine açılan deliklerden içeriye hızlı dayanım kazanan ankraj epoksisi yardımıyla uygulanan, çelik elemanların iki ayak arası açıklığı 40 mm, ankastre çalışması istenen boyu 70 mm, kalınlığı ise, 6 mm'dir. Deney elemanlarının alt kısmına 50 mm genişliğe, 100 mm etkili yapışma boyuna ve 550 mm toplam boy uzunluğuna sahip şerit halindeki kumaşlar yapıştırılmıştır. Etkili yapışma bölgesindeki 100 mm'lik kumaş, beton yüzeyine yapıştırıldıktan sonra geriye kalan 100 mm'lik kısım ankrajın altından geçirilip tekrar döndürülerek diğer kumaşın üzerine yapıştırılmıştır. Deney elemanında rijit olması istenen çentiğin diğer taraftaki kısmına ise; kiriş köşeleri ovalleştirilip beton yüzeyi yapışmaya uygun hale getirildikten sonra kumaş uzunluğu 300 mm, genişliği de 250 mm olan *U* sarım uygulaması yapılmıştır. Kumaş uçlarına yapılan ankraj yöntemi ile; beş adet deney numunesi hazırlanmış ve numuneler YDA10 olarak isimlendirilmişlerdir (Şekil 3.10.). YDA10 numunelerinin bir tanesinin etkili yapışma bölgesine 60 mm uzunluğa sahip birim deformasyon ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır.



Kirişin Ön Görünüşü



Kirişin Alt Görünüşü

Şekil 3.10. YDA10 numunelerinin geometrik özellikleri ve görünüş şekilleri.

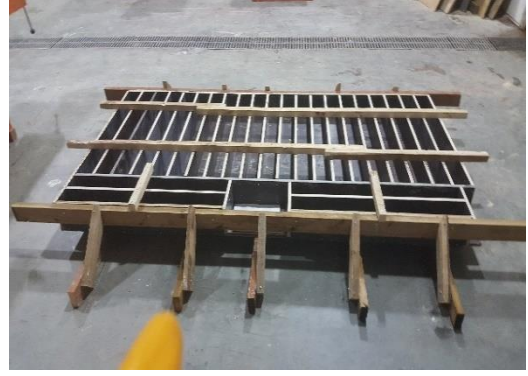
### 3.3. Kiriş Deney Numunelerinin Hazırlanması

#### 3.3.1. Kiriş numunelerin üretimi

Deney numunelerinin üretilmesinde Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Laboratuvarı'nda hazırlanan plywood panellerden imal edilmiş kalıp kullanılmıştır. 150x250 cm standart ölçülere sahip plywood panel üzerine, dikdörtgen ebatlarda kesilmiş uygun plywood parçalarının vida yardımıyla birleştirilmesi ve köşelerinin de çapraz ahşap payandalarla desteklenmesi sonucu ortaya çıkan kalıp ile deney numunelerinin üretim sonunda pürüzsüz ve temiz bir yüzeye sahip olması sağlanmıştır. Kalıbın üretilmesi esnasında deney numunelerinin simetri ekseninde oluşturulmak istenilen çentikleri sağlamak için her kiriş kalıbının orta noktasına 50x50 mm kesit özelliklerine sahip köşelerine 100 mm çapta pah açılmış 27 adet ahşap parçalar kullanılmıştır. Deneyde kullanılan kalıp ve simetri eksenine yerleştirilen ahşap parçalar (Şekil 3.11. a ve b)'de verilmiştir.



a) Kiriş simetri eksenine yerleştirilen ahşap



b) Deneyde kullanılan ahşap kalıp

Şekil 3.11. Deney kalıbı ve kalıbın orta noktasına yerleştirilen ahşap parçalar.

Deneyde kullanılacak numunelerin donatısız olması planlandığı için hazırlanan kalıbın içerisine eğilme veya kesme donatısı yerleştirilmemiştir. Üretilen kalıbın içerisi; üretim esnasında yüzeyde biriken ahşap parçalarını ve tozları uzaklaştırmak için önce ıslak daha sonra da kuru bir bezle silinmiş ve beton dökümüne hazır hale getirildikten sonra Sakarya’da bulunan hazır beton firmasına nakliye edilmiştir. Beton dökümünden önce kalıp içerisi az miktarda yağ kullanılarak fırça yardımıyla yağlanmıştır. Yüksek basınç dayanımına sahip olacak şekilde üretilmesi planlanan deney numunelerinin dökümü esnasında kalıp içerisindeki hava boşluklarını ortadan kaldırmak ve beton dağılımında homojenlik elde edebilmek için her numunede tek tek dalıcı el vibratörü kullanılmıştır. Beton döküm işlemi tamamlandıktan sonra mala yardımıyla yüzey tesviyesi yapılan numuneler, 28 günlük kür işleminin ardından kalıplardan çıkarılarak tekrar Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Laboratuvarı’na nakliye edilmiştir. Beton dökümüne, kalıpların yağlanmasında kullanılan yağ, yüzey tesviyesine ve kür işlemi tamamlanan deney elemanlarına ait görseller (Şekil 3.12. a ve b)’de verilmiştir.



a) Beton tesviye ve yerleştirme işlemi



b) Tamamlanan beton dökümü

Şekil 3.12. Beton döküm işlemi.

### 3.3.2. Kiriş yüzeylerine BFRP kompozit uygulanması

Kuruma işlemini tamamladıktan sonra laboratuvara getirilen numuneler Tablo 3.5'te verilen guruplara ayrılarak her bir deney numunesine, ilgili gurubu referans alınarak isimler verilmiş ardından BFRP kompozitin yapıştırılması işlemine geçilmiştir.

Deney kapsamında beton yüzeyine herhangi bir yüzey hazırlığı işlemi yapılmamış olan numunelerin dört tanesi kontrol kirişi tayin edilmiştir.

Deney numunelerinin iki tanesine herhangi bir yüzey hazırlığı işlemi yapılmadan (MY10), 100 mm etkili yapışma boyuna sahip kumaş beton yüzeyine epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmıştır. Geriye kalan bütün numunelerin beton alt yüzeyleri BFRP kompozitin yapışması için taşlama çanak (Şekil 3.13.a) yardımı ile uygun hale getirilmiştir. Taşlama işleminden sonra yüzeyler tel fırça yardımıyla fırçalanmış (Şekil 3.13.b), beton yüzeyindeki kuşgözü boşluklar ortaya çıkartılmış, beton yüzeyine basınçlı hava püskürtülmüş ve bir bez yardımıyla yüzey silindikten sonra yapışma işlemi için engel teşkil edecek durumlar ortadan kaldırılarak beton yüzeyi yapışmaya uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.13.c ve d). FRP kompozitlerin beton yüzeyine yapıştırılması işleminde yüzey hazırlığı büyük önem arz ettiği için bu hususa azami derecede dikkat edilmiştir.





a) Taşlama işleminde kullanılan çanak



b) Tel fırça ve taşlama makinesi



c) Taşlama işlemi tamamlanan numuneler



d) Basınçlı hava ile yüzey temizliği

Şekil 3.13. Yüzey hazırlığı işlem adımları ve kullanılan ekipmanlar.

Deney elemanlarında kullanılacak tek doğrultulu bazalt kumaş maket bıçağı yardımıyla uygun bir zemin üzerinde deneyde kullanılacak boy ve genişliğe uygun olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.14. a, b ve c).

BFRP kompozitin beton yüzeyine yapıştırılması işlemine geçmeden önce kumaşların beton yüzeyine yapıştırılacağı yerler işaretlenmiştir (Şekil 3.14. d ve e).



a) Kumaş kesme işlemi



b) Kesilen kumaş örnekleri



c) Deneyde kullanılan BFRP kumaş örnekleri



d) İşaretleme işlemi

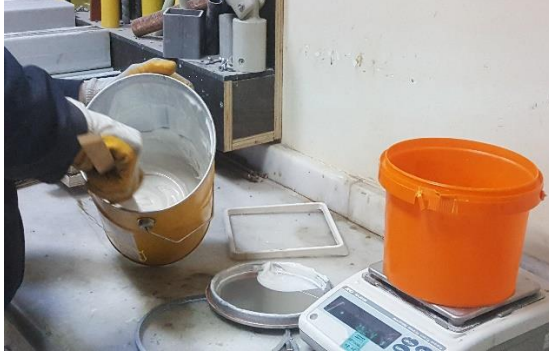


e) Numunelerin yüzeylerinin işaretlenmesi

Şekil 3.14. Kumaş kesim işlemleri ve kumaşların yapıştırılacağı yüzeylerin işaretlenmesi.

Beton yüzeyleri yapışmaya uygun hale getirilen numunelere, BFRP kompozitin uygulanabilmesi için A bileşeni beyaz renkli reçine, B bileşeni ise gri renkli sertleştirici reçine olan Sikadur 330 çift bileşenli doyurma reçinesi, iki bileşenin ağırlıkça, A: B=4:1 oranında karıştırılması ile deneyde kullanıma uygun hale getirilmiştir. Önceden işaretlenen BFRP kumaşların yapıştırılacağı yerler ile yapıştırma işleminde kullanılacak

olan kumaşlara, epoksi reçine rulo yardımıyla sürülmüş ve kumaş ile beton yüzeyleri reçineye doymun hale getirilmiştir (Şekil 3.15.).



a) Epoksi A bileşeni



b) Epoksi B bileşeni



c) Epoksi karıştırma işlemi



d) Rulo yardımıyla kumaşların epoksiye doyurulması

Şekil 3.15. Epoksi reçinesinin hazırlanması ve kumaşların reçineye doyurulması.

Yüzey hazırlığı yapılmayan deney numunelerine BFRP kompozitin yapıştırılmasının ardından ilk önce yüzey hazırlığı işlemi yapılan dört adet numuneye 100 mm etkili yapışma boyuna sahip BFRP kompozit epoksi reçine yardımıyla yapıştırılmıştır. Daha sonra sırasıyla; yüzey hazırlığı işlemi tamamlanan deney elemanlarına etkili yapışma boyu 150 ve 200 mm olan kumaşlar epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmıştır (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. BFRP kompozit yapıştırma işlemi tamamlanan numuneler.

Etkili yapışma bölgesindeki kumaş ucuna *U* sarım yönteminin uygulandığı deney elemanlarının köşeleri, gerilme yığılmalarını önlemek maksadıyla 10 mm yarıçapa sahip olacak şekilde ovalleştirilmiştir. Deneyin gerçekleştirilmek istendiği; 100 mm etkili yapışma boyuna sahip kısımdaki kumaş ucuna 50 mm genişliğe 250 mm uzunluğa sahip *U* sarım, rijit olması istenen çentiğin diğer tarafındaki kısmına ise; 100 mm genişliğe ve 250 mm uzunluğa sahip bir başka *U* sarım uygulaması yapılmıştır (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. U sarım uygulaması yapılan deney numunelerinin hazırlanması.

Fan ankraj uygulaması yapılacak deney elemanlarına, yüzey hazırlığının tamamlanmasının ardından beton yüzeylerine kırıcı-delici matkap yardımıyla birer adet ankraj deliği açılmıştır. Uçları püskül yapılan 300 mm uzunluğundaki BFRP kumaş, önce ikiye katlanmış ardından açılan ankraj deliğine girecek şekilde çelik bir çubuk etrafına sarılarak yarısı kiriş içinde diğer yarısı da kiriş dışında kalacak biçimde deney elemanlarına uygulanmıştır. Deney elemanlarının dışında kalan 75 mm'lik kısım ise

uçları çentik tarafına doğru hem elyafa hemde betona gelecek şekilde yapılandırılmıştır (Şekil 3.18.).



a) Ankraj uygulamasında kullanılacak elyafın boyutları

b) Elyaf üzerine açılan delik ve uygulamada kullanılan fan ankraj



c) Fan ankraj uygulaması tamamlanan deney numunesi

Şekil 3.18. Fan Ankraj uygulaması yapılan deney numunelerinin hazırlanması.

Mekanik ankraj uygulaması yapılacak deney elemanlarının beton yüzey hazırlığının tamamlanmasının ardından beton yüzeylerine çelik ankrajların yerleştirilebilmesi için kırıcı-delici matkap yardımıyla iki adet delik açılmıştır. Beton yüzeyine yerleştirilen ankrajların; epoksi, beton ve ankraj arasındaki aderansının iyi olabilmesi için özel olarak üretilen ankrajların beton içinde kalacak olan kısımlarına imalat aşamasında dış açılmıştır. Ankrajların sabitlenmesinde hızlı dayanım kazanan ve donatı ankrajlarında yaygın olarak kullanılan Astor marka epoksi kullanılmıştır. Ankrajların dayanım kazanmasının ardından 100 mm etkili yapışma boyuna sahip olan kumaş beton yüzeyine epoksi reçine yardımıyla yapıştırılmış, kumaşın artan 100 mm'lik kısmı ise ankrajın altından geçirilerek tekrar kumaş üzerine epoksi reçine kullanılarak yapıştırılmıştır. Rijit

olması istenen çentiğin diğer tarafındaki kısmına ise; 300 mm genişliğe, 250 mm uzunluğa sahip *U* sarım uygulaması yapılmıştır (Şekil 3.19.).



a) Ankraj deliklerinin açılması



b) Çelik Ankrajlar



c) Deliklerin ve beton yüzeyinin



d) Çift bileşenli ankraj epoksisi



e) Ankraj uygulaması yapılmış deney numuneleri

Şekil 3.19. Ankraj uygulaması yapılan deney numunelerinin hazırlanması.

Yapıştırma işlemi esnasında, bağ gücünü etkileyeceği için BFRP kompozit ile beton yüzeyi arasında hava boşluğu oluşmamasına ve kumaşların beton yüzeyine gergin bir şekilde uygulanmasına bütün deney elemanlarında son derece özen gösterilmiştir.

Yapıştırma işlemi tamamlanan numuneler epoksi reçinenin kür işleminin tamamlanabilmesi için laboratuvar ortamında yedi gün bekletilmiştir.

### 3.4. Deney Düzenegi

#### 3.4.1. Eğilme çerçevesi düzenegi

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan HI-TECH MAGNUS marka eğilme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme çerçevesine ait görsel (Şekil 3.20)'de verilmiştir.

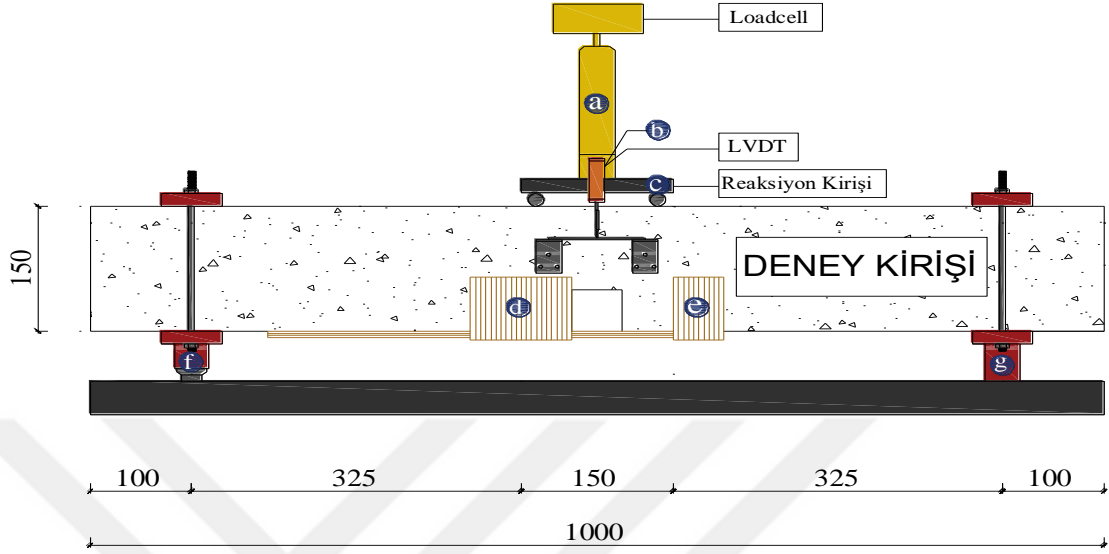


Şekil 3.20. Deney düzenegi.

#### 3.4.2. Yükleme ve ölçüm düzenegi

Deney numunelerinin testinde dört nokta eğilme deney çerçevesi kullanılmıştır (Şekil 3.21). Deney yükleme hızı 0,1 kN/sn olarak ayarlanmıştır. Kirişlerin üzerine hidrolik pompadan (Şekil 3.21.a) aktarılan P tekil yükünü, P/2 haline getirecek 150 mm basit mesnet açıklığına sahip reaksiyon kirişi (Şekil 3.21.c) yerleştirilmiştir. Numunelerde oluşacak olan sehim, beton yan yüzeyine bir sistem dahilinde kurulan LVDT aracılığıyla ölçülmüştür (Şekil 3.21.b). Deney elemanlarının hareketli mesnet tarafı rijit (Şekil 3.21.d), sabit mesnet tarafı ise asıl deneyin gerçekleştirilmek istendiği etkili yapışma boyuna sahip kısım (Şekil 3.21.e) olarak tasarlanmıştır.

Cihazdaki biri kayıcı (Şekil 3.21.f) diğeri sabit (Şekil 3.21.g) olan mesnetler arası mesafe 800 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.21. Yükleme düzeneği.

Çalışmada kullanılan birim deformasyon ölçerler (strain gaugeler); YD10, YD15, YD20, YDU10 ve YDA10 numunelerine sırasıyla birer adet olmak kaydıyla toplam da beş adet numunenin etkili yapışma bölgesine beton orta noktasındaki çentik kenarından başlayacak şekilde, güçlü bir yapıştırıcı yardımıyla kumaş üzerine haricen yapıştırılmıştır. Deneş esnasında, 60 mm uzunluğuşa sahip birim deformasyon ölçerlerde oluşan gerinim değşerleri veri toplayıcılar (data logger) ve veri aktarıcı kablolar vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Veri aktarım kablosuna ve birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcıya ait görseller (Şekil 3.22.a ve b)'de verilmiştir. Ayrıca kirişlerde göçme oluşuncaya kadar yükleme işlemine devam edilmiştir. Deneş esnasında elektronik yük hücresinden (Şekil 3.22.c) alınan yük değşerleri ve yer değıştirme ölçşerden (Şekil 3.22.d) alınan deplasman değşerleri aynı anda veri kaydediciler (Şekil 3.22.e) vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Şekil 3.22.f).





a) Strain gauge ve veri aktarım ekipmanları



b) Birim deformasyon ölçerleri yapıştırma da kullanılan yapıştırıcı



c) Yük hücresi (Load Cell)



d) Yer değıştirme ölçer (LVDT)



e) Veri kaydedici (Data Logger)



f) Bilgisayar ve kontrol paneli

Şekil 3.22. Deney kullanılan ölçüm ekipmanları ve yapıştırıcı.

## BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRMESİ

### 4.1. Kirişlere Ait Eğilme Deneylerinin Sonuçları

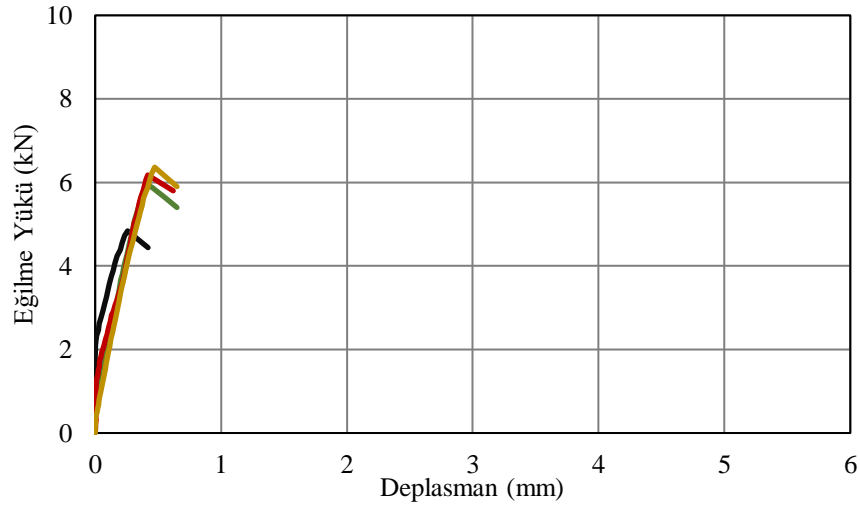
#### 4.1.1. Kontrol kirişlerinin eğilme deneyi

Dört adet kontrol kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Kontrol kirişlerine ait kırılma yükü ve ona karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)
1	4,8	0,26
2	5,8	0,46
3	6,2	0,42
4	6,4	0,47
<b>Ortalama</b>	<b>5,8</b>	<b>0,40</b>

Kontrol kirişlerinin kırılma yükleri 4,8 kN ile 6,4 kN arasında değişmektedir. Ortalama beton çatlama yükü 5,8 kN ve bu değere karşılık gelen ortalama orta nokta deformasyonu ise 0,40 mm olarak bulunmuştur. Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak kontrol numunelerinin yük-sehim grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.1.’de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra ise kiriş ani olarak göçmüştür.



Şekil 4.1. Kontrol kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

#### 4.1.2. MY10 kirişlerinin eğilme deneyi

İki adet müdahalesiz yüzeyli MY10 kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.2’de sunulmuştur.

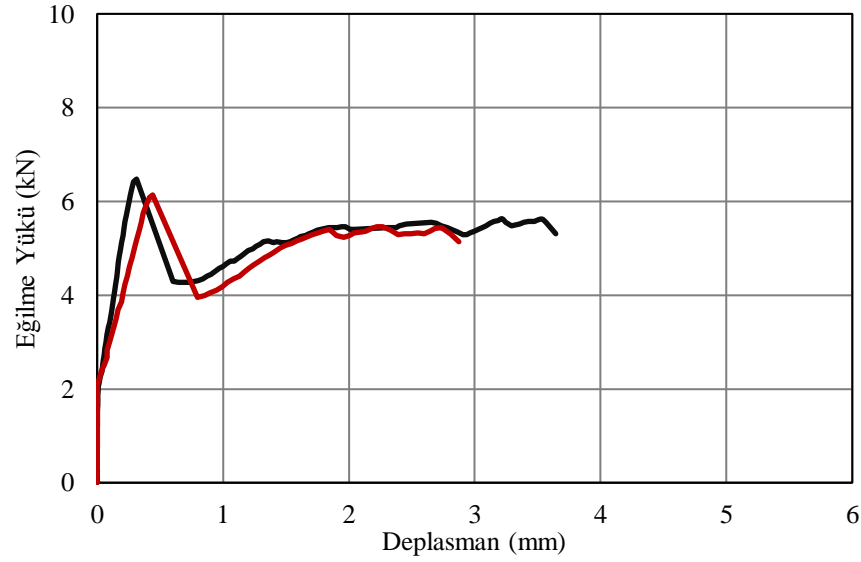
Tablo 4.2. MY10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)
1	6,2	0,44	5,44	2,74
2	6,4	0,32	5,61	3,54
<b>Ortalama</b>	<b>6,3</b>	<b>0,38</b>	<b>5,53</b>	<b>3,14</b>

Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 6,3 kN, eğilme yükü ise 5,53 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton kırılma deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0,38 mm ve 3,14 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %12,2 azalma meydana gelmiştir. Bu azalmanın sebebi beton yüzey hazırlığının yapılmamasına bağlı olarak BFRP-beton aderansının istenilen düzeyde olmamasından kaynaklanmaktadır.

Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.2.’de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı

bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 2 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün altında bir değerde, ortalama 3,14 mm deformasyon yaparak kumaşın beton yüzeyinden ayrılması ile göçmüştür.



Şekil 4.2. MY10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

#### 4.1.3. YD10 kirişlerinin eğilme deneyi

Dört adet YD10 kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.3’de sunulmuştur.

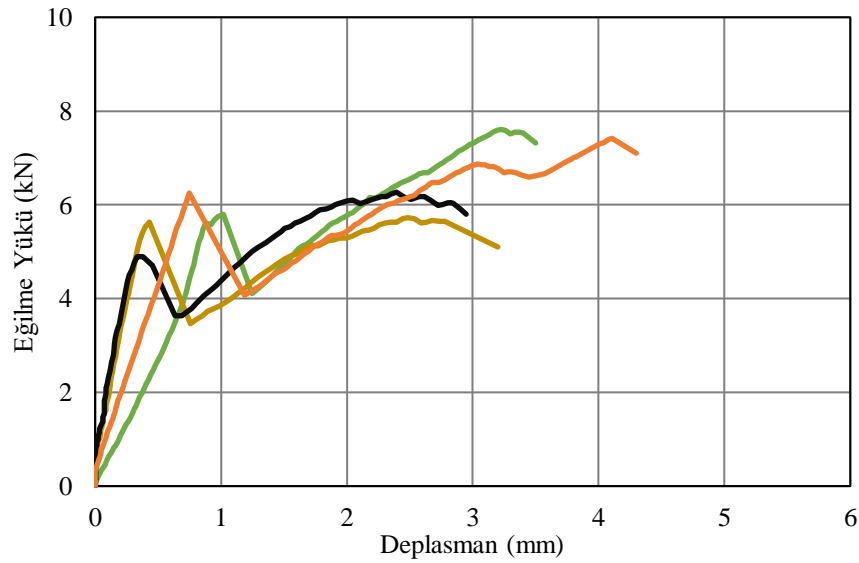
Tablo 4.3. YD10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)	BFRP’de Oluşan Maksimum Birim Deformasyon ( $\mu\epsilon$ )
1	5	0,40	6,27	2,40	-
2	5,63	0,43	5,73	2,49	-
3	5,79	1,02	7,61	3,23	-
4	6,25	0,75	7,42	4,43	7294,6
<b>Ortalama</b>	<b>5,67</b>	<b>0,66</b>	<b>6,76</b>	<b>3,2</b>	

Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 5,67 kN, eğilme yükü ise 6,76 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton kırılma deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0,66 mm ve 3,2 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton

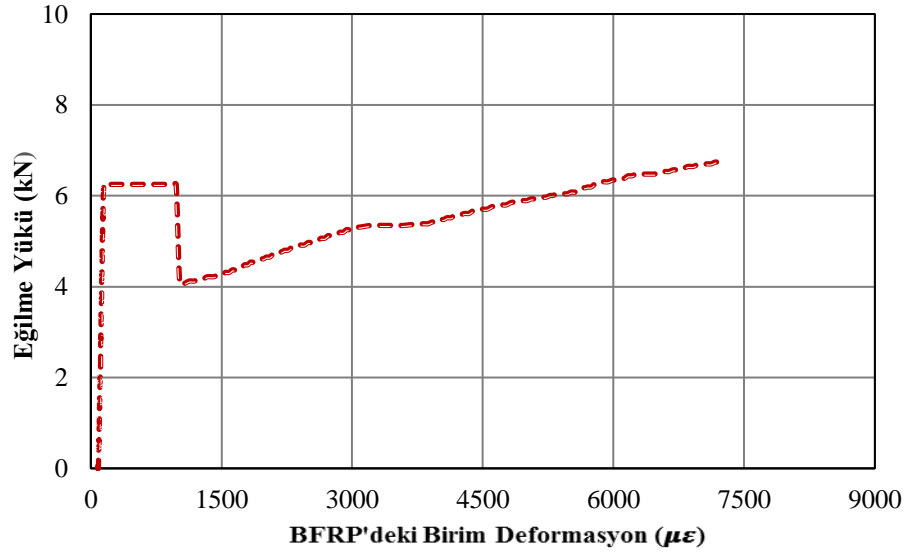
çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %19,2 artış meydana gelmiştir. Bu artışın sebebi, yapışma yüzeyinde beton ve kumaş arasındaki yapışmaya engel teşkil edecek durumların ortadan kaldırılması sonucu daha iyi bir bağ gücünün sağlanmasıdır.

Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.3.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 1,9 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün üzerinde bir değerde, ortalama 3,2 mm deformasyon yaparak kumaşın beton yüzeyinden ayrılması sonucu tamamen göçmüştür.



Şekil 4.3. YD10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

Aynı zaman aralığında ölçülen, yüke bağlı kumaşta oluşan birim deformasyon (strain) değerleri Şekil 4.4.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar kumaşta çok küçük değerlerde gerinim oluşmuş, bir müddet yük sabit kaldıktan sonra beton kırılmış ve beton kırıldıktan sonra kumaş yük taşımaya başladığı için birim deformasyon artmaya başlamıştır. Belirli bir noktadan sonra yük artmasına rağmen kumaşta oluşan birim deformasyon ölçülememiş ve deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.4. YD10 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği.

#### 4.1.4. YD15 kirişlerinin eğilme deneyi

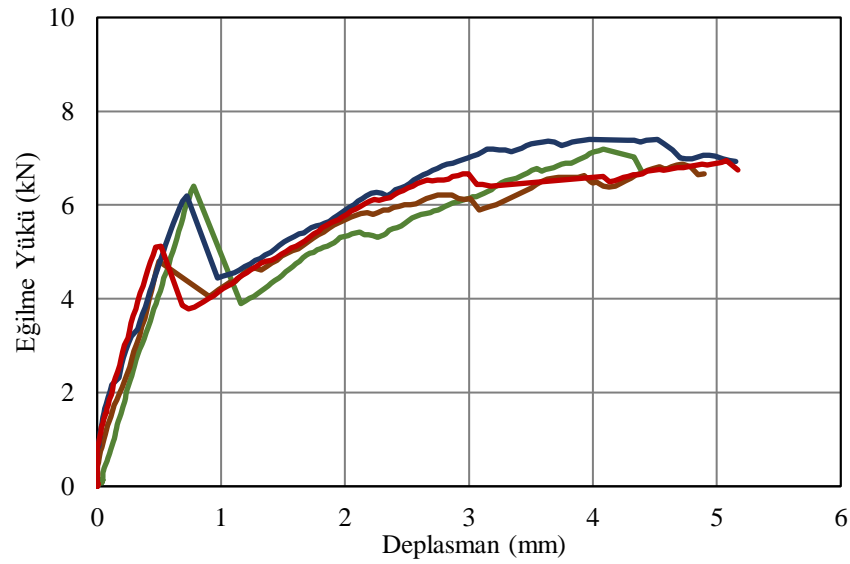
Dört adet YD15 kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. YD15 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)	BFRP'de Oluşan Maksimum Birim Deformasyon ( $\mu\epsilon$ )
1	4,8	0,50	6,87	4,72	-
2	5,1	0,52	6,95	5,01	6987,2
3	6,2	0,72	7,4	3,97	-
4	6,4	0,78	7,2	4,08	-
<b>Ortalama</b>	<b>5,63</b>	<b>0,63</b>	<b>7,1</b>	<b>4,4</b>	

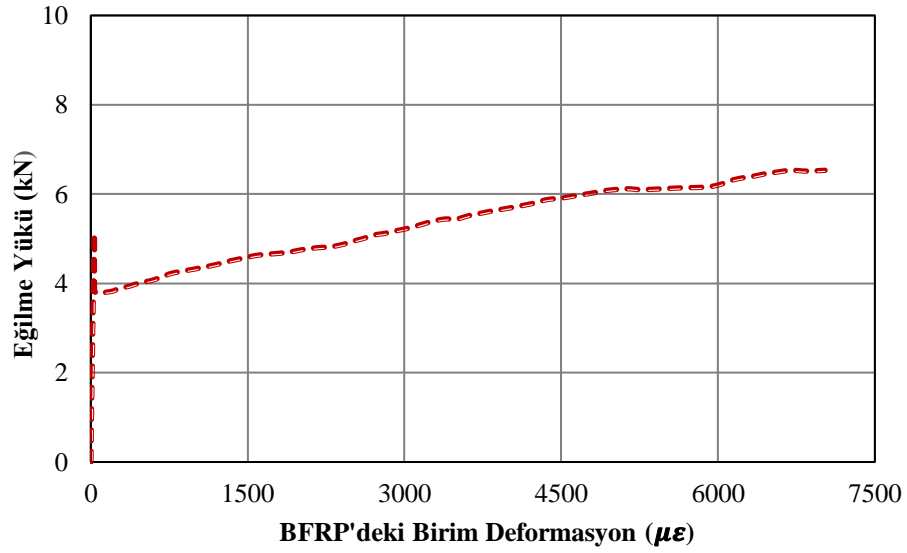
Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 5,63 kN, eğilme yükü ise 7,1 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton kırılma deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0,63 mm ve 4,4 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %26,11 artış meydana gelmiştir. Bu artışın sebebi, yüzey hazırlığı yapılmış olmasının ve kumaşın etkili yapışma boyunun arttırılmış olmasıdır.

Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.5.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 1,56 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün üzerinde bir değerde, ortalama 6,19 mm deformasyon yaparak kumaşın beton yüzeyinden ayrılması sonucu tamamen göçmüştür.



Şekil 4.5.YD15 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

Aynı zaman aralığında ölçülen, yüke bağlı kumaşta oluşan birim deformasyon (strain) değerleri Şekil 4.6.'da verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar kumaşta gerinim oluşmamış, beton kırıldıktan sonra yük düşmüş, kumaşın yük taşımaya başlaması ile birlikte kumaşta oluşan birim deformasyon artmaya başlamıştır. Belirli bir noktadan sonra yük artmasına rağmen kumaşta oluşan birim deformasyon ölçülememiş ve deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.6. YD15 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği.

#### 4.1.5. YD20 kirişlerinin eğilme deneyi

Üç adet YD20 kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.5'te sunulmuştur.

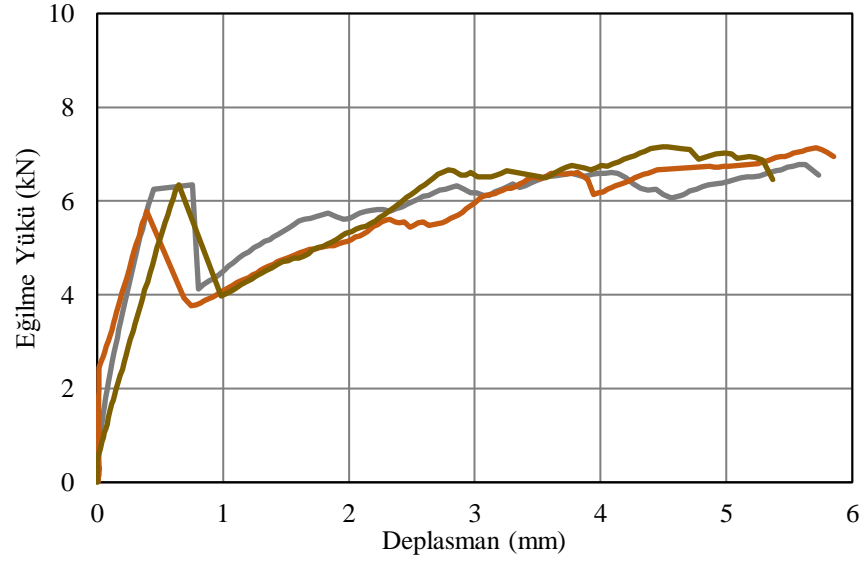
Tablo 4.5. YD20 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)	BFRP'de Oluşan Maksimum Birim Deformasyon ( $\mu\epsilon$ )
1	5,78	0,39	7,14	5,71	-
2	6,35	0,65	7,12	4,64	8480,2
3	6,34	0,76	6,79	5,63	-
<b>Ortalama</b>	<b>6,16</b>	<b>0,6</b>	<b>7,02</b>	<b>5,33</b>	

Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 6,16 kN, eğilme yükü ise 7,02 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton kırılma deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0,6 mm ve 5,33 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %13,9 artış meydana gelmiştir. Bu artışın sebebi, yüzey hazırlığı yapılmış olmasının ve kumaşın etkili yapışma boyunun arttırılmış olmasıdır.

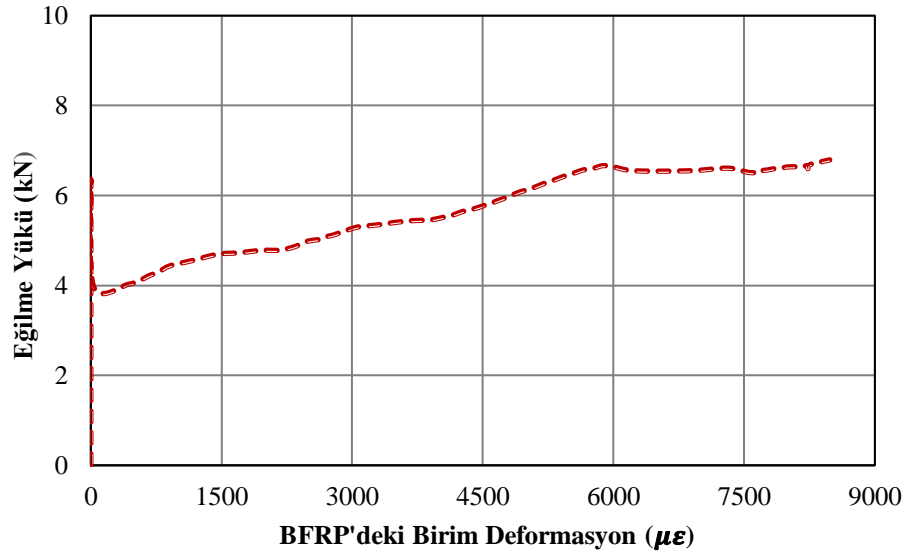


Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.7.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 2 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün üzerinde bir değerde, ortalama 3,2 mm deformasyon yaparak kumaşın beton yüzeyinden ayrılması sonucu tamamen göçmüştür.



Şekil 4.7. YD20 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

Aynı zaman aralığında ölçülen, yüke bağlı kumaşta oluşan birim deformasyon (strain) değerleri Şekil 4.8.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar kumaşta gerinim oluşmamış, beton kırıldıktan sonra yük düşmüş, kumaşın yük taşımaya başlaması ile birlikte kumaşta oluşan birim deformasyon artmaya başlamıştır. Belirli bir noktadan sonra yük artmasına rağmen kumaşta oluşan birim deformasyon ölçülememiş ve deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.8. YD20 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği.

#### 4.1.6. YDU10 kirişlerinin eğilme deneyi

Üç adet YDU10 kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.6'da sunulmuştur.

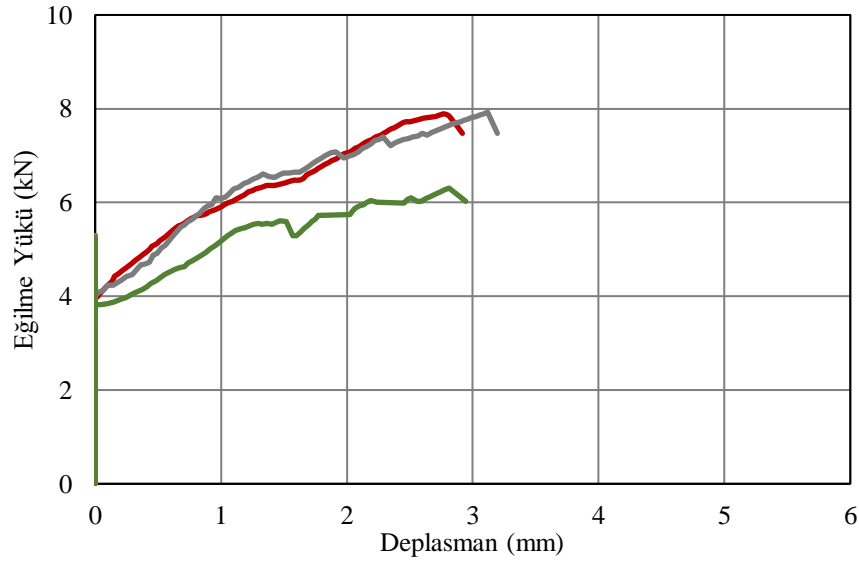
Tablo 4.6. YDU10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)	BFRP'de Oluşan Maksimum Birim Deformasyon ( $\mu\epsilon$ )
1	4,22	0	7,89	2,77	8480,2
2	5,23	0	6,30	2,81	-
3	5,30	0	7,93	3,12	-
<b>Ortalama</b>	<b>4,92</b>	<b>0</b>	<b>7,37</b>	<b>2,9</b>	

Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 4,92 kN, eğilme yükü ise 7,37 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton kırılma deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0 mm ve 2,9 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %49,79 artış meydana gelmiştir. Bu artışın sebebi, kumaş uçlarına uygulanan *U* sarım yöntemi ile birlikte yapışma yüzeyinde beton ve kumaş arasındaki aderansın temin edilmesine engel teşkil edecek durumların ortadan kaldırılması sonucu daha iyi bir bağ

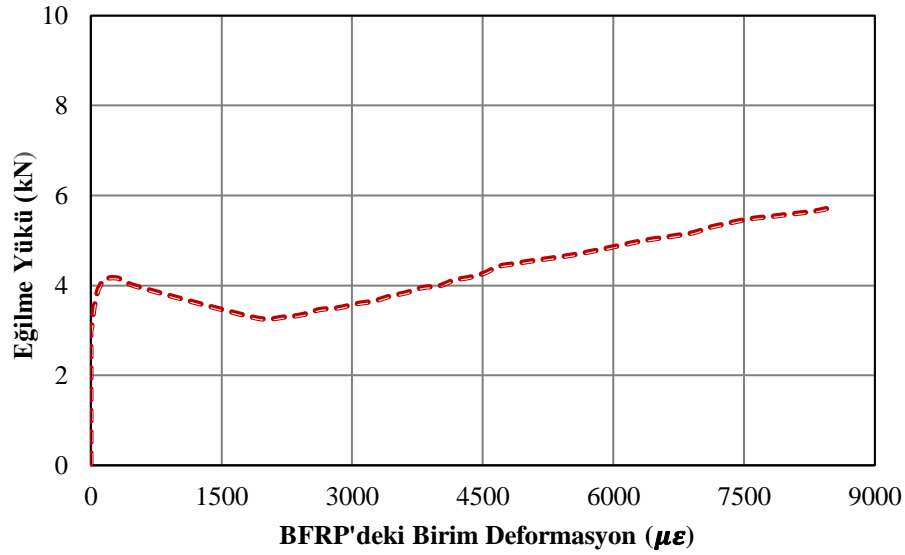
gücünün sağlanması ve kumaş performansından tam anlamıyla yararlanılarak deney sonunda kumaşın kopması durumudur.

Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.9.'da verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 0,8 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş ile kumaş uçlarına uygulanan  $U$  sarım tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün üzerinde bir değerde, ortalama 2,9 mm deformasyon yaparak önce kumaşın beton yüzeyinden ayrılması sonrasında ise kumaşın kopması sonucu tamamen göçmüştür.



Şekil 4.9. YDU10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

Aynı zaman aralığında ölçülen, yüke bağlı kumaşta oluşan birim deformasyon (strain) değerleri Şekil 4.10.'da verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar kumaşta gerinim oluşmamış, beton kırıldıktan sonra yük düşmüş, kumaşın yük taşımaya başlaması ile birlikte kumaşta oluşan birim deformasyon artmaya başlamıştır. Belirli bir noktadan sonra yük artmasına rağmen kumaşta oluşan birim deformasyon ölçülemediği ve deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.10. YDU10 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiğı.

#### 4.1.7. YDF10 kirişlerinin eğilme deneyi

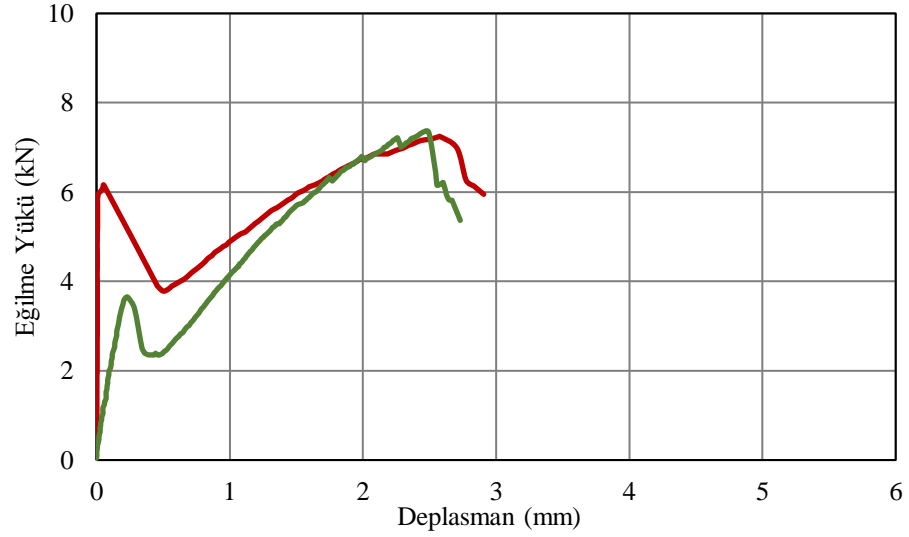
İki adet YDF10 kirişı üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. YDF10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)
1	3,7	0,24	7,5	2,4
2	6,1	0,1	7,4	2,6
<b>Ortalama</b>	<b>4,9</b>	<b>0,13</b>	<b>7,45</b>	<b>2,5</b>

Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 4,9 kN, eğilme yükü ise 7,37 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton çatlama deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0,13 mm ve 2,5 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %52 artış meydana gelmiştir. Bu artışın sebebi, kumaş uçlarına uygulanan fan ankraj yöntemi ile birlikte yapışma yüzeyinde beton ve kumaş arasındaki aderansın temin edilmesine engel teşkil edecek durumların ortadan kaldırılması sonucu daha iyi bir bağ gücünün sağlanması ve kumaş performansından tam anlamıyla yararlanılarak deney sonunda kumaşın kopması durumudur.

Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.11.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 1,8 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş ile kumaş uçlarına uygulanan fan ankraj tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün üzerinde bir değerde, ortalama 2,5 mm deformasyon yaparak kumaşın kopması sonucu tamamen göçmüştür.



Şekil 4.11. YDF10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

#### 4.1.8. YDA10 kirişlerinin eğilme deneyi

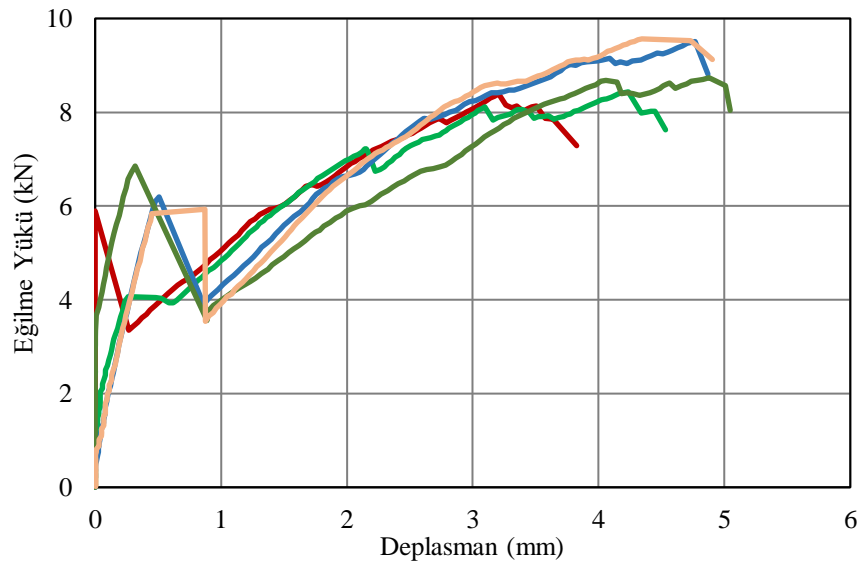
Beş adet YDA10 kirişi üzerinde yapılan dört nokta eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.8'de sunulmuştur.

Tablo 4.8. YDA10 numunelerine ait yük ve ilgili yüke karşılık gelen deformasyon değerleri.

Numune Adı	Beton çatlama yükü (kN)	Beton çatlama deformasyonu (mm)	Eğilme yükü (kN)	Eğilme deformasyonu (mm)	BFRP'de Oluşan Maksimum Birim Deformasyon ( $\mu\epsilon$ )
1	4,07	0,26	8,44	4,24	8480,2
2	5,89	0	8,14	3,51	-
3	5,93	0,87	9,57	4,34	-
4	6,19	0,51	9,51	4,77	-
5	6,85	0,32	8,70	4,83	-
<b>Ortalama</b>	<b>5,79</b>	<b>0,39</b>	<b>8,87</b>	<b>4,34</b>	

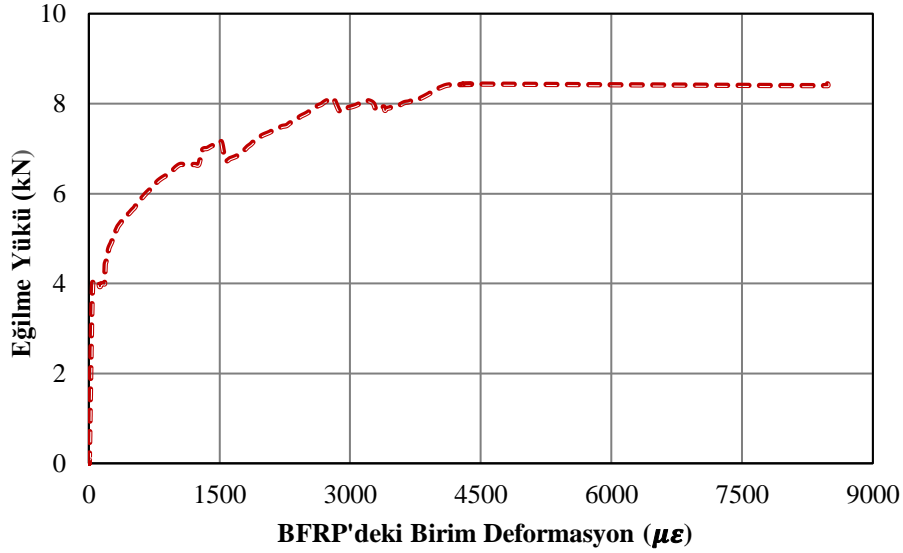
Eğilme deneyi sonucunda ortalama beton çatlama yükü 5,79 kN, eğilme yükü ise 8,87 kN bulunmuştur. Bu yüklere karşılık gelen beton kırılma deformasyonu ile eğilme deformasyonu değerleri ise sırasıyla 0,39 mm ve 4,34 mm ölçülmüştür. Eğilme yükü, beton çatlama yükü ile ilişkilendirildiğinde nihai göçme yükünde beton kırılma yüküne göre %49,79 artış meydana gelmiştir. Bu artışın sebebi, kumaş uçlarına uygulanan mekanik ankraj ile birlikte yapışma yüzeyinde beton ve kumaş arasındaki aderansın temin edilmesine engel teşkil edecek durumların ortadan kaldırılması sonucu daha iyi bir bağ gücünün sağlanması ve kumaş performansından tam anlamıyla yararlanılarak deney sonunda kumaşın kopması durumudur.

Deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük-sehim grafikleri Şekil 4.12.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar eğilme yükü-deplasman değerleri orantılı bir şekilde artmış, beton kırıldıktan sonra eğilme yükü ortalama 2,04 kN kadar ani olarak düşmüş ve çekme yükü kumaş ile kumaş uçlarına uygulanan mekanik ankraj tarafından karşılanmaya başlamıştır. Kirişler, deney elemanının nihai göçme yükü beton kırılma yükünün üzerinde bir değerde, ortalama 4,34 mm deformasyon yaparak önce kumaşın beton yüzeyinden ayrılması sonrasında ise kumaşın kopması sonucu tamamen göçmüştür.



Şekil 4.12. YDA10 kirişlerine ait yük-deplasman grafiği.

Aynı zaman aralığında ölçülen, yüke bağlı kumaşta oluşan birim deformasyon (strain) değerleri Şekil 4.13.'de verilmiştir. Beton kırılma yüküne kadar kumaşta gerinim oluşmamış, beton kırıldıktan sonra kumaşın yük taşımaya başlaması ile birlikte kumaşta oluşan birim deformasyon artmaya başlamıştır. Belirli bir noktadan sonra yük artmasına rağmen kumaşta oluşan birim deformasyon ölçülemediği ve deney sonlandırılmıştır.



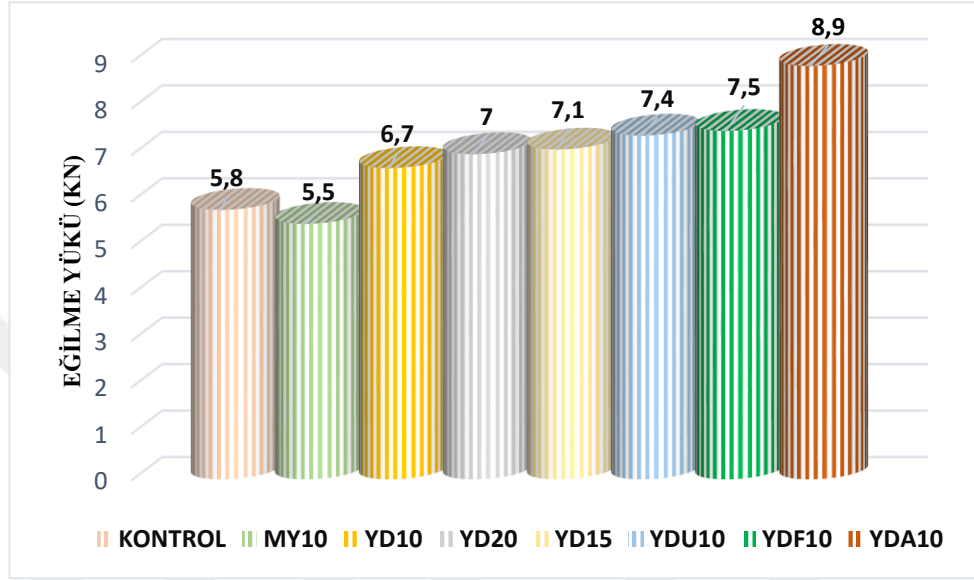
Şekil 4.13. YDA10 numunesine ait yük-birim deformasyon grafiği.

## 4.2. Kirişlerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu başlık altında beton yüzeyine yapışma kabiliyeti araştırılan BFRP kompozit ile güçlendirilen kiriş numunelerinin, deney sonuçlarından elde edilen verilerin daha iyi anlaşılabilmesi ve karşılaştırılabilmesi için bütün deney elemanlarına ait ortalama eğilme yük değerleri ve yük altındaki ortalama deplasman değerleri sütun grafik ile (Şekil 4.14.–4.15.) gösterilmiştir.

Kontrol numuneleri ile diğer tüm deney elemanları ortalama eğilme yükleri dikkate alınarak kıyaslandığında; MY10 numunelerinde %4,66 azalma, YD10, YD15, YD20, YDU10, YDF10 ve YDA10 numunelerinde ise sırasıyla; %16,21, %25,86, %21,03, %27,07, %28,45, %52,93 artma meydana gelmiştir. Beton yüzeyi yapışmaya uygun hale getirilen etkili yapışma boyu ise 100 mm, 150 mm ve 200 mm olacak şekilde değişim gösteren deney elemanları kendi içinde ortalama eğilme yükleri dikkate alınarak YD10 numunelerine göre kıyaslandığında; YD20 ve YD15 numunelerinde sırasıyla %4,15 ile %8,30 artış meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Fakat YD10 numunelerinde kumaş betonla birlikte daha iyi çalıştığı için *U* sarım uygulaması, fan ankraj ve daha sonrasında

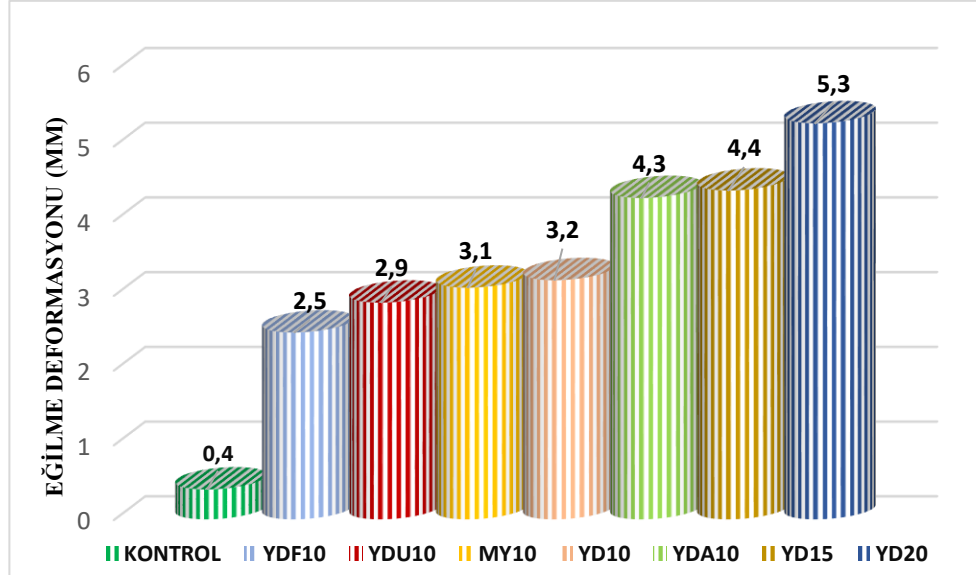
yapılan mekanik ankraj uygulaması YD10 modeli üzerinde yapılmıştır. YD10 numuneleri kumaş uçlarına U sarım uygulaması, fan ankraj ve mekanik ankraj uygulaması yapılan deney elemanları ile ortalama eğilme yüküne göre kıyaslandığında ise nihai göçme yükünün; YDU10 numunelerinde, %9,35, YDF10 numunelerinde, %10,21, YDA10 numunelerinde ise; %31,60 artış sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.14. Deney numunelerinin ortalama eğilme yük değerleri.

Bütün numuneler deney sonundaki ortalama deformasyon değerleri dikkate alınarak birbiri içerisinde kıyaslandığında; en az deformasyon yapan numunelerin kontrol numuneleri, en fazla deformasyon yapan numunelerin ise kumaş yapışma boyu fazla olduğu için YD20 numuneleri olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber MY10, YD10, YDU10, YDF10 numuneleri ile YDA10, YD15 numunelerinin kendi içinde birbirine yakın deformasyon değerlerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.





Şekil 4.15. Deney numunelerinin yük altındaki ortalama deplasman değerleri.

### 4.3. Yükleme Sonrasında Deney Elemanlarında Oluşan Deformasyon Şekilleri

Kontrol kirişlerinde meydana gelen ilk çatlaklar kiriş simetri ekseninde oluşmuş ve artan eğilme yükünün de etkisiyle kontrol kirişlerinde ani kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.16.a). MY10, YD10, YD15 ve YD20 kirişlerinde oluşan göçme tiplerinin birbiri ile benzerlik gösterdiği gözlemlenmiş bütün numunelerde de kumaş, beton yüzeyinden küçük beton parçaları kopararak beton yüzeyinden sıyrılarak ayrılmıştır. (Şekil 4.16.b, c). YDU10 numunelerinde kumaş çentiğinin her iki tarafından da sarıldığı için beton kırıldıktan sonra bir an için numunelerde deplasman meydana gelmemiştir. Sonrasında kumaş önce beton yüzeyinden beton parçaları koparak ayrılmış ve *U* sarım yük taşımaya başlamıştır. Artan yükün etkisiyle kumaş, çekme gerilmesinin aşılmasının neticesinde çentik orta noktasından kopmuştur (Şekil 4.16.d). YDF10 numunelerinde şerit halindeki kumaşın beton yüzeyinden ayrılmasının ardından fan ankraj yük taşımaya başlamış ve artan çekme yükünün de etkisiyle kumaş çekme gerilmesinin aşılmasının neticesinde çentik ortasından kopmuştur. (Şekil 4.16.e). YDA10 numunelerinde de ilk çatlaklar diğer deney elemanlarında olduğu gibi çentikte oluşmuştur. Kumaş, betonun kırılmasının ardından, yük taşımaya başlamış bir müddet sonra ise artan eğilme yükünün etkisiyle beton yüzeyinden küçük parçalar kopararak ayrılmıştır. Kumaşın beton yüzeyinden ayrılmasından sonra mekanik ankraj yük taşımaya başlamış ve artan çekme yükünün de etkisiyle kumaş çekme gerilmesinin aşılmasının neticesinde çentik ortasından kopmuştur. (Şekil 4.16.f).

FRP'nin beton yüzeyinden sıyırılması ve epoksinin kayma direncinin aşılması ile ilgili hesap yöntemi önerilmektedir [57]. Ancak FRP'nin taşıma gücü noktasında tam performansından yararlanılamamaktadır. Bu çalışmada kullanılan şerit uçlarına uygulanan *U* sarım, fan ve mekanik ankraj yöntemlerinde BFRP kompozitin kopması, malzemenin tüm performansının kullanıldığını ve geliştirilen uygulama yönteminin istenilen başarıya ulaştığını göstermiştir. Yapılan deneylerden yola çıkarak beton yüzeyine FRP yapıştırılmasının gerekli olduğu durumlarda yüzeyin mutlaka gerekli işlemler yapılarak yapışmaya uygun hale getirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca kumaş uçlarına fan ve mekanik ankraj uygulaması veya dıştan harici olarak uygun *U* sarım yapılması, kumaşın tüm performansının kullanılmasını sağlamaktadır.





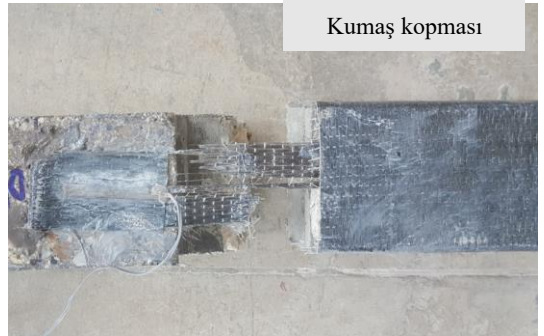
a) Kontrol kirişinde oluşan deformasyon

b) MY10 numunesinde oluşan kumaş ayrılması



c) YD10 ,YD15 ve YD20 numunelerinde oluşan benzer kumaş ayrılması

d) YDU10 numunesinde oluşan kumaş kopması



e) YDF10 numunesinde oluşan kumaş kopması

f) YDA10 numunesinde oluşan kumaş kopması

Şekil 4.16. Test öncesi deney düzeneği ve deney sonrasında numune gruplarında oluşan deformasyon şekilleri.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, BFRP kompozitin beton yüzeyine yapışma kabiliyetini araştırmak amacıyla beton yüzeyine epoksi reçine kullanılarak yapıştırılan tek doğrultulu BFRP kompozitin taşıma gücüne; beton yüzey özelliğinin, kumaş etkili yapışma boyunun, etkili yapışma bölgesindeki kumaş uçlarına uygulanan  $U$  sarım yönteminin, fan ankraj ve yeni geliştirdiğimiz mekanik ankraj modelinin etkisini incelemek için deneysel çalışma yapılmıştır. Aynı zamanda eğilme yükü altında kumaşta oluşan birim deformasyon değerleri de ölçülmüştür. Bu maksatla simetri eksenine 50x50 mm çentikler açılmış olan 27 adet donatısız kiriş numunesi üretilmiş ve dört nokta eğilme deneyi ile hazırlanan numuneler test edilmiştir. Deney sonuçlarından yola çıkılarak ulaşılan bilgiler maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1. Farklı yöntemler kullanılarak beton yüzeyine BFRP kompozit uygulaması yapılan deney elemanlarının nihai taşıma yüklerinde MY10 numuneleri hariç artış meydana gelmiştir. Kontrol numuneleri ile diğer tüm deney elemanları ortalama eğilme yükleri dikkate alınarak kıyaslandığında; MY10 numunelerinde %4,66 azalma, YD10, YD15, YD20, YDU10, YDF10 ve YDA10 numunelerinde ise sırasıyla; %16,21, %25,86, %21,03, %27,07, %28,45, %52,93 artma meydana gelmiştir.
2. Beton yüzeyi yapışmaya uygun hale getirilmeyen MY10 numunelerinde beton çatladıktan sonra eğilme yükü %12,2 azalarak kumaş yük taşımaya başlamış, ancak nihai göçme yükü betonun kırılma yüküne dahi ulaşmadan BFRP kompozit beton yüzeyinden sıyrılarak ayrılmıştır. MY10 numuneleri ile YD10 numuneleri kıyaslandığında nihai taşıma gücünde %22,2 oranında artış meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Dolayısıyla beton yüzeyinin yapışmaya uygun hale getirilmesinin, BFRP kompozit ile beton arasındaki bağ gücüne etkisi oldukça fazladır.

3. YD10, YD15 ve YD20 numunelerinin eğilme yükleri göz önüne alındığında (sırasıyla; 6,8-7,1 ve 7 kN) kumaş etkili yapışma boyunun artırılmasının, kumaşların beton yüzeyinden erken sıyrılmasının engellenmediği takdirde nihai göçme yüküne çok fazla etkisinin olmadığı tespit edilmiş, üç modelde de kumaşın beton yüzeyinden benzer şekilde ayrıldığı gözlemlenmiştir.
4. Kumaş uçlarına, uygun *U* sarım yöntemi fan ankraj veya mekanik ankraj uygulaması yapılması durumunda BFRP kompozitin tüm performansından yararlanılarak kumaşın kopması sağlanmıştır. Nihai eğilme yükü açısından değerlendirildiğinde en etkili yöntemin mekanik ankraj uygulaması olduğu tespit edilmiştir.
5. BFRP kompozit uygulaması yapılan deney elemanlarının nihai eğilme yüküne karşılık gelen deplasman değerleri, kontrol kirişlerinden yüksek çıkmıştır. Etkili kumaş yapışma boyunun artırılması ile kirişlerde oluşan deplasman değerleri de artmıştır.
6. Kumaşta oluşan birim deformasyon (strain) değerleri, çoğunlukla beton kırılıncaya kadar artmamış, beton kırıldıktan sonra ise kumaş yük taşımaya başladığı için artmıştır. Strain değerleri maksimum seviyeye kumaş uçlarında ulaşmıştır.
7. Son olarak, çalışma öncesinde gerçekleştirilen ön testlerde beton yüzeyine BFRP kompozit uygulamasının gerektiği durumlarda yüzeyinin mutlaka kuru olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Ayrıca;

Literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan fan ankraj uygulamasının, BFRP kumaş kullanılarak şaşırtmalı bir şekilde beton yüzeyine uygulanmasının eğilmeye çalışan kirişlerde beton ve kumaş arasındaki aderansa etkisi araştırılabilir. BFRP kompozitin nihai dayanımına ulaşmadan beton yüzeyinden ayrılmasını engelleyecek farklı metotların geliştirilmesi ve iyileştirilmesi üzerine araştırmalar yapılabilir. Ekonomik açıdan düşünüldüğünde diğer FRP türleri ile BFRP kompozitin herhangi bir çalışmada ortak kullanılabilirliği araştırılabilir. Örneğin; çekme dayanımı oldukça fazla olan CFRP ile kirişlerin şerit halinde güçlendirilmesi durumunda *U* sarım uygulamasının BFRP ile yapılmasının nihai taşıma gücüne etkisi incelenebilir.

## KAYNAKÇA

- [1] K. U. Schober, A. M. Harte, R. Kliger, R. Jockwer, Q. Xu, and J. F. Chen, “FRP reinforcement of timber structures,” *Constr. Build. Mater.*, 2015.
- [2] M. Corradi, L. Righetti, and A. Borri, “Bond strength of composite CFRP reinforcing bars in timber,” *Materials (Basel)*, 2015.
- [3] G. Ganesh Naidu, M. Sri Durga Vara Prasad, and K. Anil Kumar, “Strengthening of reinforced concrete continuous beams using GFRP,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 1855–1857, 2019.
- [4] I. F. Kara, A. F. Ashour, and M. A. Köroğlu, “Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams,” *Compos. Struct.*, 2015.
- [5] S. A. A. Mustafa and H. A. Hassan, “Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites,” *HBRC J.*, vol. 14, no. 3, pp. 300–308, 2018.
- [6] K. Ramadevi and D. L. V. Babu, “Flexural behavior of hybrid (steel-polypropylene) fibre reinforced concrete beams,” *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 70, no. 1, pp. 81–87, 2012.
- [7] I. R. Kliger, R. Haghani, M. Brunner, A. M. Harte, and K. U. Schober, “Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems,” *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 2016.
- [8] H. Zhang, L. He, and G. Li, “Bond failure performances between near-surface mounted FRP bars and concrete for flexural strengthening concrete structures,” *Eng. Fail. Anal.*, 2015.
- [9] A. Parvin, U. S. Shrestha, and M. J. M. Oghani, “Evaluation of FRP-concrete bond interface,” in *Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2014*, 2014.
- [10] J. C. L. González, J. A. F. Gomez, and E. G. Valle, “Effect of adhesive thickness and concrete strength on FRP-Concrete Bonds,” 2012.
- [11] A. Saribiyik and N. Caglar, “Flexural strengthening of RC beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP,” *Struct. Eng. Mech.*, 2016.
- [12] D. J. Oehlers, S. M. Park, and M. S. Mohamed Ali, “A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2003.
- [13] K. K. Ghosh and V. M. Karbhari, “Evaluation of environmental effect on FRP/concrete bond,” in *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 2005, vol. 50, pp. 265–279.

- [14] J. Yao, J. G. Teng, and J. F. Chen, "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints," *Compos. Part B Eng.*, 2005.
- [15] M. R. Aram, C. Czaderski, and M. Motavalli, "Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams," *Compos. Part B Eng.*, 2008.
- [16] H. C. Biscaia, C. Chastre, C. Silva, and N. Franco, "Mechanical response of anchored FRP bonded joints: A nonlinear analytical approach," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 2018.
- [17] X. Li, X. Gu, X. Song, Y. Ouyang, and Z. Feng, "Contribution of U-shaped strips to the flexural capacity of low-strength reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite sheets," *Compos. Part B Eng.*, 2013.
- [18] J. Xie, J. Li, Z. Lu, and H. Zhang, "Experimental Study on Fatigue Behaviour of BFRP-Concrete Bond Interfaces under Bending Load," *Shock Vib.*, 2018.
- [19] O. Büyüköztürk and T. Y. Yu, "Far-field radar NDT technique for detecting GFRP debonding from concrete," *Constr. Build. Mater.*, 2009.
- [20] G. El-Saikaly, A. Godat, and O. Chaallal, "New anchorage technique for FRP shear-strengthened RC T-beams using CFRP rope," *J. Compos. Constr.*, 2015.
- [21] J. Yang, R. Haghani, and M. Al-Emrani, "Innovative prestressing method for externally bonded CFRP laminates without mechanical anchorage," *Eng. Struct.*, vol. 197, 2019.
- [22] S. V. Grelle and L. H. Sneed, "Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates," *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2013.
- [23] B. Fu, J. G. Teng, J. F. Chen, G. M. Chen, and Y. C. Guo, "Concrete Cover Separation in FRP-Plated RC Beams: Mitigation Using FRP U-Jackets," *J. Compos. Constr.*, 2017.
- [24] A. Godat and O. Chaallal, "Strut-and-tie method for externally bonded FRP shear-strengthened large-scale RC beams," *Compos. Struct.*, 2013.
- [25] M. Naderi and S. Vojdani Tabatabaei, "Effect of concrete and bond strength on the behavior of RC beams retrofitted with FRP sheets," *Adv. Environ. Biol.*, 2013.
- [26] W. Jin, Q. Han, X. Fu, and J. Wan, "Anchorage system for FRP material-based sheets," *Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal Huazhong Univ. Sci. Technol. (Natural Sci. Ed.)*, 2011.
- [27] D. A. Bournas, A. Pavese, and W. Tizani, "Tensile capacity of FRP anchors in connecting FRP and TRM sheets to concrete," *Eng. Struct.*, 2015.
- [28] T. Y. Yu and O. Büyüköztürk, "A far-field airborne radar NDT technique for detecting debonding in GFRP-retrofitted concrete structures," *NDT E Int.*, 2008.
- [29] F. Ascione, G. Mancusi, S. Spadea, M. Lamberti, F. Lebon, and A. Maurel-Pantel, "On the flexural behaviour of GFRP beams obtained by bonding simple panels: An experimental investigation," *Compos. Struct.*, 2015.

- [30] J. H. Xie and R. L. Hu, "Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer," *Constr. Build. Mater.*, 2013.
- [31] T. Skuturna and J. Valivonis, "Experimental study on the effect of anchorage systems on RC beams strengthened using FRP," *Compos. Part B Eng.*, 2016.
- [32] E. Ahmed and H. R. Sobuz, "Experimental study on long-term behaviour of CFRP strengthened RC beams under sustained load," *Struct. Eng. Mech.*, 2011.
- [33] M. Bocciarelli and M. A. Pisani, "Survey on the interface behaviour in reinforced concrete beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement," *Compos. Part B Eng.*, 2017.
- [34] A. El Refai, "Durability and fatigue of basalt fiber-reinforced polymer bars gripped with steel wedge anchors," *J. Compos. Constr.*, 2013.
- [35] F. Nerilli and G. Vairo, "Strengthening of reinforced concrete beams with basalt-based FRP sheets: An analytical assessment," in *AIP Conference Proceedings*, 2016.
- [36] J. Cai, J. Pan, and X. Zhou, "Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beams," *Constr. Build. Mater.*, 2017.
- [37] F. Nerilli, M. Marino, and G. Vairo, "A Numerical Failure Analysis of Multi-bolted Joints in FRP Laminates Based on Basalt Fibers," in *Procedia Engineering*, 2015.
- [38] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, and A. Valenza, "A review on basalt fibre and its composites," *Compos. Part B Eng.*, 2015.
- [39] B. Abodan, "Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Farklı Sarım Yöntemi Kullanarak BFRP ile Güçlendirilmesi" *Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi*, 2019
- [40] N. Mert, "Karbon Fiber Takviyeli Polimer Plakalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi." *Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Doktora Tezi*, 2007
- [41] K. Yılmaz, "Fiber Takviyeli Polimer Uygulamalarında Yapışma Yüzeyi Kalitesinin Kompozit Performansına Etkisi" *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 6.Cilt, 2.Sayı*, 2002.
- [42] M. S. Ökten, "Betonarme Kirişlerin Karbon Kumaşla Güçlendirilmesi Üzerine Deneysel Bir İnceleme" *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 2003
- [43] Reis J.M.L., Ferreira A.J.M. "A Contribution To The Study Of The Fracture Energy Of Polymer Concrete And Fibre Reinforced Polymer Concrete" *Elsevier, Polymer Testing* 23, 437–440, 2004.
- [44] Jongsung S., Cheolwoo P., Do Young M. (2005) "Characteristics Of Basalt Fiber As A Strengthening Material For Concrete Structures" *Composites: Part B* 36 504–512, *Hanyang University, South Korea* (2005)
- [45] Gedikli A. ve Keskin E. (2005) "Betonarme Yapıların Onarımı, Güçlendirilmesi ve Lifle Güçlendirilmiş Polimerler" *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.



- [46] Kurtipek Y. F. (2007) “Beton ile CFRP Şeritler Arasındaki Kayma Gerilmesi Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi” *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [47] Sayed-Ahmed, E.Y., Bakay, R., ve Shrive, N.G. (2009) “Bond Strength of FRP Laminates to Concrete: State-of-the-Art Review” *Electronic Journal of Structural Engineering*, 9 (2009)
- [48] Sayın B. ve Manısalı E. (2010) “Lif Takviyeli Plastik Levhalar ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Arayüz Gerilmelerini Etkileyen Parametreler” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt 16, Sayı 1, 2010, Sayfa 63-75*
- [49] Bilotta, A., Ludovico M.D., Nigro E. (2011) “FRP-to-concrete interface debonding: Experimental calibration of a capacity model.” *Composites: Part B* 42 1539–1553, 2011.
- [50] Cameron R. (2012) “Strengthening Of Rc Beams With Externally Bonded And Anchored Frp Laminate” *Yüksek Lisans Tezi, McMaster University June (2012)*
- [51] Aykaç B., Acar D. (2014) “Betonarme Kirişlerin Dıştan Yapıştırılmış Karbon Kumaş ve Çelik Levhalardan Oluşan Kompozit Malzemeyle Güçlendirilmesi” *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 29, No 1, 175-183, 2014*
- [52] Mertoğlu Ç. (2015) “CFRP ile Beton Yüzeyler Arasındaki Gerilme Aktarım Mekanizmalarının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi” *Doktora Tezi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [53] Kaya T., Çalışkan Ö., Aras M. (2017) “Güçlendirilen Beton Kirişlerin Eğilme Dayanımlarına Yapıştırıcının Etkisi” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt: 4, Sayı:2, 2017*
- [54] Xie J., Li J., Lu Z. and Zhang H. (2018) “Experimental Study On Fatigue Behaviour Of BFRP Concrete Bond Interfaces Under Bending Load” *Volume 2018, Article ID 7497061, 11 pages, Research Article (2018)*
- [55] Yuana C., Chena W., Phama T. M and Hao H. (2018) “Bond Behavior Between Basalt Fibres Reinforced Polymer Sheets And Steel Fibres Reinforced Concrete” *Engineering Structures* 176 812–824 (2018)
- [56] Yuana C., Chena W., Phama T. M and Hao H. (2019) “Effect Of Aggregate Size On Bond Behaviour Between Basalt Fibre Reinforced Polymer Sheets And Concrete” *Composites Part B* 158 459–474 (2019)
- [57] ACI 440R. State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures. *American Concrete Institute Committee 440*; 1996.

## ÖZGEÇMİŞ

Hasan Hüseyin AKBALIK, 28.05.1994'de Bayat'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Akseki Köyü İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2011 yılında Çorum Atatürk Lisesi'ni 3. sınıfta bırakıp 4. Sınıfta açık liseye kayıt oldu ve 2012 yılında açık liseden mezun oldu. Bir yıl ara verdikten sonra 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2017 yılında mühendislik fakültesini bitirdi ve aynı yıl Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.