

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

**KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN  
ANKRAJLI SARIM YÖNTEMİ KULLANILARAK BAZALT  
ELYAF KUMAŞLAR İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammed Talha BALCI**

**Enstitü Anabilim : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

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

**Eylül 2019**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN  
ANKRAJLI SARIM YÖNTEMİ KULLANILARAK BAZALT  
ELYAF KUMAŞLAR İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Talha BALCI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 11/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.  
Naci ÇAĞLAR  
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi  
Ali SARIBIYIK  
Üye




Dr. Öğr. Üyesi  
Yusuf SÜMER  
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.



Muhammed Talha BALCI

11/09/2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca bana her türlü desteği veren danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK 'a, benimle beraber yüksek lisans ve lisans okuyan kardeşlerime teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi BABK tarafından desteklenen "Betona Kirişlerin Kesmeye Karşı Bazalt Elyaf Kumaşlar ile Onarım ve Güçlendirilmesi" başlıklı ve 2010-01-04-012 nolu proje kapsamında gerçekleşmiştir. BABK'a vermiş olduğu destek için şükranlarımı sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER...	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Güçlendirmede Kullanılan FRP Kompozit Malzemeler.....	3
1.1.1. Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP).....	4
1.1.2. Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP).....	4
1.1.3. Aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP).....	5
1.1.4. Bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP).....	5
1.1.5. FRP malzemelerin mekanik özellikleri.....	6
1.2. Yapılarda Kiriş Hasarları .....	6
1.3. Kirişlerin Kesmeye Karşı Güçlendirme Yöntemleri .....	8
1.3.1. Çelik levha ile kirişlerin onarım-güçlendirilmesi.....	8
1.3.2. Kirişlerin beton ile mantolanması .....	9
1.3.3. Kirişlerin FRP malzeme ile sargılama.....	10
1.4. Literatür Araştırması.....	11
1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	19
1.6. Tez İçeriği.....	20

## BÖLÜM 2.

HESAP YÖNTEMİ .....	22
2.1. FRP ile Güçlendirilmiş Kirişlerin Kesme Dayanım Hesabı .....	22
2.1.1. Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY 2018).....	23
2.1.2. Fib-TG 9.3.....	25
2.1.3. İngiliz betonarme derneği (British Guidline).....	26

## BÖLÜM 3.

MALZEME VE YÖNTEM .....	29
-------------------------	----

3.1. Betonarme Kiriş Malzemeleri .....	29
3.1.1. Kiriş betonu .....	29
3.1.2. Kiriş donatıları .....	30
3.1.3. Epoksi.....	31
3.1.4. Bazalt elyaf.....	31
3.2. Deneysel Çalışma .....	32
3.2.1. Kiriş numunelerin kesit özellikleri.....	33
3.2.2. Kiriş numunelerin BFRP kompozit ile güçlendirme yöntemleri .....	33
3.3. Kiriş Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	38
3.3.1. Betonarme kirişlerin üretimi .....	38
3.3.2. Kiriş numunelerinin BFRP kompozit ile güçlendirilmesi.....	38
3.3.2.1. BFRP kumaşlarla kirişlerin güçlendirilmesinde ankraj uygulaması.....	43
3.4. Kiriş Deney Düzeneği .....	44
3.4.1. Yükleme ve ölçüm düzeneği.....	44
3.4.2. Çatlak açıklığı hesaplama .....	46
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>BFRP İLE BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME TESTİ .....</b>	<b>48</b>
4.1. Kontrol Kiriş Eğilme Deneyi.....	48
4.2. USA90 Kiriş Eğilme Deneyi .....	50
4.3. USBA90 Kiriş Eğilme Deneyi .....	53
4.4. TSS90 Kiriş Eğilme Deneyi .....	56
4.5. TS90 Kiriş Eğilme Deneyi .....	59
4.6. Sonuçların Karşılaştırılması .....	62
4.7. Deneysel Sonuçların Analitik Tahminlerle Karşılaştırılması .....	66
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>69</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>71</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>74</b>
Ek 1. Kiriş Numunelerin Dayanım Hesaplamaları .....	74
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>76</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>BFRP</b>	: Bazalt elyaf takviyeli polimer
<b>FRP</b>	: Fiber elyaf takviyeli polimer
<b>TBDY</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)
<b><math>A_{fv}, A_f</math></b>	: FRP kesme takviye alanı, mm <sup>2</sup>
<b><math>b_w</math></b>	: Kiriş genişliği veya dairesel bölümün çapı, mm
<b><math>d</math></b>	: Kirişin etkin derinliği, mm
<b><math>d_f</math></b>	: FRP fleksural (eğilme) takviyesinin etkili derinliği, mm
<b><math>d_{fv}</math></b>	: FRP kesme takviyesinin etkili derinliği, mm
<b><math>E_c</math></b>	: Betonun elastisite modülü, MPa
<b><math>E_f</math></b>	: FRP'nin elastisite modülü, MPa
<b><math>f'_c, f_{ctm}</math></b>	: Betonun belirtilen basınç dayanımı, MPa
<b><math>f_{fe}</math></b>	: FRP'nin tabakasından oluşan çekme gerinmesi, MPa
<b><math>h</math></b>	: Toplam kalınlık veya elemanın yüksekliği, mm
<b><math>k_1</math></b>	: Beton mukavemetini modifikasyon faktörü
<b><math>k_2</math></b>	: Sarım şemasını modifikasyon faktörü
<b><math>l_{t,max}</math></b>	: Tam ankraj kapasitesini geliştirmek için gereken ankraj uzunluğu
<b><math>L_e</math></b>	: FRP Aktif aderans boyu, mm
<b><math>n</math></b>	: FRP'nin katman sayısı
<b><math>n_f</math></b>	: FRP ve beton arasındaki elastikiyet modülünün oranı = $E_f / E_c$
<b><math>S_f</math></b>	: FRP şeritlerin eksenlerinin arasındaki mesafe, mm
<b><math>t_f</math></b>	: FRP kompozitin bir katmanının nominal kalınlığı, mm
<b><math>V_c</math></b>	: Beton tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti, $N$
<b><math>V_f</math></b>	: FRP şeritleri tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti, $N$
<b><math>V_n</math></b>	: Nominal kesme mukavemeti, $N$

- $V_s$  : Çelik etriyeleri tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti,  $N$
- $W_f$  : FRP şeritlerin genişliği, mm
- $\epsilon_{fe}$  : FRP'nin etkin birim uzama sınırı, mm/mm
- $\epsilon_{fu}$  : FRP takviyesinin dizayn kopma birim uzaması, mm/mm
- $\epsilon_{fd}$  : FRP kompozitin tasarım maksimum gerinme kapasitesi
- $\Phi$  : Mukavemet azaltma faktörü
- $\alpha$  : Elemanın boyuna eksenine göre uygulanan FRP elyafın açısı
- $\kappa_v$  : Kesmede etkin-bağı katsayısı
- $\Psi_f$  : FRP mukavemet azaltma faktörü





## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kirişte oluşabilecek eğilme çatlakları.....	6
Şekil 1.2. Kirişte oluşabilecek kesme çatlakları.....	7
Şekil 1.3. Kiriş uçlarında mafsallaşma.....	7
Şekil 1.4. Bağ kirişi × kesme çatlağı.....	8
Şekil 1.5. Dıştan etriye eklenmesi.....	9
Şekil 1.6. Kiriş mantolama uygulaması.....	9
Şekil 2.1. Lif şerit aralıkları ve şerit genişliği.....	25
Şekil 3.1. Silindir beton numuneleri.....	30
Şekil 3.2. Kiriş donatıları.....	30
Şekil 3.3. Epoksi reçine.....	31
Şekil 3.4. Bazalt elyaf.....	33
Şekil 3.5. Deney kirişlerin geometrisi ve donatı yerleşim planı.....	34
Şekil 3.6. USA90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.....	35
Şekil 3.7. USBA90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.....	36
Şekil 3.8. TSS90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.....	37
Şekil 3.9. TS90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.....	37
Şekil 3.10. Numune üretiminde kullanılan Plywood kiriş kalıbı.....	38
Şekil 3.11. Çelik donatısı yerleştirilen kiriş kalıbı.....	39
Şekil 3.12. Betonun dökümü ve yerleştirilmesi.....	40
Şekil 3.13. Perdah işlemi tamamlanan kirişler.....	40
Şekil 3.14. Numunelerin kurutulması ve yüzey hazırlığı.....	41
Şekil 3.15. Kiriş yüzeylerinin epoksi reçinenin sürülme işlemi.....	43
Şekil 3.16. Bazalt kumaşların kiriş yüzeyine yapıştırma işlemi.....	43
Şekil 3.17. Güçlendirilen kirişlerde ankraj uygulaması.....	44
Şekil 3.18. Yükleme düzeneği.....	45
Şekil 3.19. Ölçüm aletlerin yerleşim ve düzeneği.....	46
Şekil 3.20. Çatlak açıklıklarının tespit edilmesi için yapılan kiriş modellemesi ve hesaplama yöntemi.....	47
Şekil 4.1. Kontrol kirişin eğilme deneyi.....	48
Şekil 4.2. Kontrol kirişin yükleme sonrası deformasyon şekli.....	49
Şekil 4.3. Kontrol kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.....	49
Şekil 4.4. Kontrol kirişlerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	50
Şekil 4.5. USA90 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.....	51
Şekil 4.6. USA90 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.....	52
Şekil 4.7. USA90 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.....	52
Şekil 4.8. USA90 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	53
Şekil 4.9. USBA90 kiriş numunesinin eğilme deneyi.....	54
Şekil 4.10. USBA90 kiriş numunesinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.....	55

Şekil 4.11. USBA90 kiriş numunesine ait yük – deplasman grafiği.....	55
Şekil 4.12. USBA90 kiriş numunesine ait yük – çatlak açıklığı grafiği .....	56
Şekil 4.13. TSŞ90 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.....	57
Şekil 4.14. TSŞ90 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri .....	57
Şekil 4.15. TSŞ90 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.....	58
Şekil 4.16. TSŞ90 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği .....	59
Şekil 4.17. TS90 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.....	60
Şekil 4.18. TS90 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri .....	60
Şekil 4.19. TS90 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.....	61
Şekil 4.20. TS90 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.....	62
Şekil 4.21. Kiriş numunelerine ait ortalama kesme yükü değişimleri .....	63
Şekil 4.22. Kiriş numunelerine ait ortalama deplasman ve çatlak açıklığı değişimleri	65
Şekil 4.23. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-deplasman grafikleri.....	65
Şekil 4.24. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-çatlak açıklığı grafikleri.....	66

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. FRP malzemelerin mekanik özellikleri.....	6
Tablo 1.2. FRP güçlendirme şekilleri .....	10
Tablo 1.3. FRP ile güçlendirme açıklamaları.....	11
Tablo 1.4. FRP dağılımları.....	11
Tablo 1.5. Elyafların kiriş yüzeyiyle olan açıları .....	11
Tablo 3.1. Silindir numunelerin 28 günlük basınç deney sonuçları.....	29
Tablo 3.2. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin sonuçları.....	31
Tablo 3.3. Sikadur 330 epoksi özellikleri .....	32
Tablo 3.4. Bazalt elyaflara ait teknik özellikler .....	33
Tablo 3.5. Tasarlanan BFRP şeritler ve kumaşın durumu .....	35
Tablo 3.6. Kirişlerde kullanılan BFRP ile güçlendirme şemaları .....	42
Tablo 4.1. Kontrol kirişlere ait kesme kuvvetine göre yük, sehim ve çatlak açıklığı değerleri.....	47
Tablo 4.2. USA90 kirişlerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.....	50
Tablo 4.3. USBA90 kirişine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.....	53
Tablo 4.4. TSS90 kirişlerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.....	56
Tablo 4.5. TS90 kirişlerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.....	59
Tablo 4.6. Kiriş numunelerin ortalama deneylerin sonuçları ve göçme şekilleri .....	62
Tablo 4.7. Deney sonuçları ve analitik sonuçlar .....	67

# KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN ANKRAJLI SARIM YÖNTEMİ KULLANILARAK BAZALT ELYAF KUMAŞLAR İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada, kesme dayanım kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer (BFRP) kompozit kullanılarak ankrajlı yöntemler ile güçlendirmesi üzerine deneysel çalışma ve sonuçların mevcut hesap yöntemleri ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

150×250×2000 mm boyutunda dikdörtgen kesitli betonarme kirişler laboratuvar ortamında üretilmiştir. Türkiye’de yapılan incelemelerde yapı elemanlarının üretiminde kullanılan beton kalitesinin oldukça düşük olmasından dolayı deney elemanlarında C16/20 kalitesinde beton ve S420 sınıfında nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Betonarme kirişler; eğilme taşıma yükü bakımından yeterli kapasitede ve kirişin bir tarafı kesme taşıma gücü yetersiz diğer tarafı kesme taşıma gücü yeterli olarak tasarlanmıştır. Geçmiş yıllarda yapılan güçlendirme çalışmalarında BFRP kompozitin sınırlı sayıda kullanılması, yerli olarak üretilmesi ve diğer elyaf çeşitlerine alternatif bir malzeme olmasından dolayı Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde BFRP kompozit kullanılmıştır.

BFRP kompozit şeritler kirişlerin kesme taşıma gücü yetersiz olan tarafına 90° açıyla U sarım ankrajlı, 90° açıyla U sarım başlıklı ankrajlı, 90° açıyla tam sarım şerit ve 90° açıyla sürekli tam sarım güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Kontrol kiriş numuneleri ve güçlendirilen kiriş numuneleri dört noktalı eğilme deney düzeneğinde sabit hızlı yükleme ile test edilmiştir. Kiriş numunelerin ortalama kesme dayanımları, deplasman kapasiteleri ve kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri incelenmiştir. Ayrıca deney sonuçları TBDY 2018, British Guidline ve Fib-TG 9.3 yönetmeliklerindeki mevcut FRP ile kesme dayanımın hesap yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. . Elde edilen sonuçlara göre, kirişin kesme dayanımının güçsüz olduğu kısma dıştan yapıştırılan BFRP kompozitlerin, kesme güçlendirmesinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, güçlendirme şekilleri arasında, tam sarım yöntemler en verimli ve yüksek sonuçları sağlamıştır. Tam sarım metodu kullanılarak güçlendirilen kiriş numuneleri, kontrol kirişlerine kıyasla kesme kapasitesinde %67 ila %80 oranlarında artış göstermiştir. BFRP kompozitin, betonarme kirişlerin kesme kapasitesine katkısı Fib-TG 9.3 yöntemi ile daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kiriş güçlendirme, Kesme davranışı, BFRP, Bazalt elyaf, Kesme güçlendirmesi, Betonarme kiriş

# **REINFORCING CONCRETE BEAMS THAT HAVE INSUFFICIENT SHEAR STRENGTH WITH BASALT FIBER FABRICS USING ANCHORED WRAPPING METHOD**

## **SUMMARY**

In this thesis, the experimental study was performed on the concrete beams that have insufficient shear strength capacity. We used the anchored methods with Basalt Fiber Reinforced Polymer composites(BFRP) and compared experimental results with existing calculation methods.

The reinforced concrete beams that have 150×250×2000 mm rectangular sections are manufactured in laboratory environment. Due to using low quality concrete in production of building elements in Turkey, we used C16/20 grade concrete and s420 grade ribbed steel reinforcement in the experimental elements. The reinforced concrete beams are designed to have sufficient capacity in terms of bending load; however, one side of the beams has insufficient shear bearing power and the other side has sufficient shear bearing power. We used BFRP composite because it has been used for strengthening process for few times. In addition, it has potential to produce locally and it is an alternative for the other fiber types. Because of these reasons we chose BFRP composite.

BFRP composite strips were implemented to the side that has insufficient shear strength by U winding anchored style with 90° angle, U wrapping head anchored style with 90° angle, full wrapping Strip style with 90° angle and continuous full wrapping strengthening style with 90° angle respectively. The control beam samples and the reinforced beam samples were tested on four-point bending experimental setup with constant speed loading. The average shear strength, displacement capacities and shear fracture clearance values of the beam samples were examined. Also, the results of the experiment were compared with the current FRP and shear strength calculation methods that are in the TBDY 2018, British Guideline and Fib-TG 9.3 regulations. According to the results, it is concluded BFRP composites, which are bonded externally to the part where the shear strength of the beam is weak, are effective for shear strengthening. Furthermore, among the forms of strengthening, full wrapping methods provided the most efficient and high results. The beam samples strengthened by using the full wrapping method showed 67% to 80% increase in shear capacity when they are compared with the control beams. The contribution of BFRP composite to the shear capacity of reinforced concrete beams gave more similar results with Fib-TG 9.3 method.

Key words: Beam reinforcement, Shear behavior, BFRP, Basalt Fiber, Shear strengthening, Reinforced concrete beam

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Dünyanın var oluşundan bu yana, deprem yönünden aktif olan bölgelerde depremlerin ardışıklı olarak oluştuğu görülmektedir. Bunun neticesinde barınakların yok olduğu ve milyonlarca insanın öldüğü bilinmektedir. Türkiye dünyada etkin olan deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Geçmiş yıllarda Türkiye’de yıkıcı depremler olmuş ve gelecek yıllarda ise oluşacak depremlerde büyük can ve mal kaybına uğrayacak olması kaçınılmaz bir gerçektir. Deprem Bölgeleri Haritası'na göre, Türkiye'nin %92'sinin deprem bölgesinde bulunduğu, Türkiye nüfusunun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşadığı ve büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu bilinmektedir. Son yıllardaki depremlerden, çok sayıda vatandaşımız hayatını kaybetmiş ve yaralanmıştır. Ayrıca çok sayıda bina yıkılmış ve ağır hasar görmüştür.

Deprem anında sismik dalgaların yapıya ilettiği enerji sonucunda yapının ana taşıyıcılarında hasar veya yer değiştirmeye neden olacaktır. Betonarme binalarda, yapıyı ayakta tutan temel elemanlar kolonlardır. Deprem anında oluşan enerjinin kolonlar üzerinden dışarı atılması daha tehlikeli bir durum arz eder. Kolonlarda yaşanacak bir çökme veya hasar yapının dayanımında büyük eksiklikler ortaya çıkaracağından dolayı yapıda çökmeleri beraberinde getirecektir. Bu nedenle enerjinin kirişlerde tüketilmesi sağlanmalıdır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 çerçevesinde “Kuvvetli kolon-zayıf kiriş” ilkesiyle dile getirilen bu uygulama betonarme binalarda kolon hasarı riskini düşürmeyi hedeflemektedir. Enerji harcaması kirişlerde sağlandığı takdirde bile de büyük hasarlar ve can kayıpları meydana gelebilmektedir. Bunu önlemek veya en aza indirmek için kirişlerde bu enerjinin dışarı atımı istenmektedir. Eğilme kırılması sünek bir kırılma şekli ve enerji tüketimi oldukça fazla olması dolayısıyla bu enerjinin eğilme kırılması ile dışarı atılması istenmektedir. Kesme kırılması ise ani, gevrek ve enerji tüketimi düşük bir göçme biçimidir. Eğilme kırılması sağlanması kirişin güçlendirilmesiyle elde edilebilmektedir.

Meydana gelen son depremlerden sonra yapılan araştırmalar ve edinilen bilgiler doğrultusunda inşa edilen betonarme yapıların önemli bir kısmının birçok açıdan güçlendirilmesi gerekmektedir. Deprem dayanımı düşük bina sayısının fazlalığı, bu binaların halen kullanılıyor olmaları, yapım yöntem ve tekniklerinin farklılığı gibi nedenlerle, her yapı türü için uygun onarım ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir. Bu durumlar dikkate alındığında yapıların yenilenmesi ya da güçlendirilerek depreme dayanıklı hale getirilmesi öngörülmektedir. Türkiye'deki meydana gelen depremler sonrasında mevcut yapı stoku incelendiğinde betonarme binaların geneline yapısal düzensizliklerin bulunması, kullanılan beton kalitesinin oldukça düşük olması, donatı miktar ve düzensizliğin uygun olmaması gibi nedenler ile depremde oluşan hasarların ciddi boyutlara ulaştığını araştırmacılar ortaya koymuştur [1-8].

Yıpranmış, eskimiş veya deprem tehlikesi göz ardı edilerek inşa edilmiş betonarme yapılarda, depreme dayanıklılığı artırmak için sonradan çeşitli uygulamalara başvurulmaktadır. Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP), Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) uygulamaları, mantolama, çelik levhaların yapıştırılması kesme dayanım kapasitesi yetersiz kirişlerin güçlendirilmesi amacıyla kullanılan başlıca tekniklerdir. FRP malzemelerle güçlendirme yöntemlerinin avantajları arasında güçlendirilen elemanın boyutlarındaki değişimin az oluşu, dayanımın önemli ölçüde artması, sünekliğin artması, rijitlik kapasitesinin artması, ekonomiklik ve uygulama kolaylığıdır. FRP malzeme dışındaki güçlendirme yöntemleri dayanıma katkı sağlasa da güçlendirilen elemanların boyutlarındaki artışlar, bina ağırlılığının artması, güçlendirme sırasında bina kullanımına olanak sağlamaması ve temel sisteminde ilave düzenlemeye ihtiyaç duyulması gibi başlıca önemli olumsuz etkenler olduğundan dolayı güçlendirme sistemi olarak FRP malzeme uygulamaları tercih edilmesi avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada güçlendirme yöntemleri göz önünde bulundurularak güçlendirme yöntemlerinde kullanılan Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) malzemelere yerli olarak üretilen Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer (BFRP) alternatif malzeme olarak kullanılmıştır. Bazalt Elyaf ile düşük dayanımlı betonla üretilen ve kesmeye karşı taşıma kapasitesi yetersiz betonarme

kirişlerde çeşitli güçlendirme işlemleri yapılmıştır. Yerli olarak üretilen Bazalt Elyafın kullanılma amacı, Karbon Elyafa ve Cam Elyafa göre ekonomiklik açısından alternatif bir malzeme olmasıdır.

### **1.1. Güçlendirmede Kullanılan FRP Kompozit Malzemeler**

Yapıların rehabilitasyonu ve güçlendirilmesinde Fiber Takviyeli Polimerlere (FRP) olan ilgi ve kullanım son yıllarda oldukça artmıştır. Çünkü çeşitli güçlendirme malzemelerine fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler bakımından uzun vadeli kullanım ömrü sağlamasından dolayı alternatif bir malzemedir. FRP kompozit malzemeler çevre şartları bakımından yapıların dayanımına olumsuz etki eden ortamlara dayanıklıdır. FRP kompozit malzemelerin avantajlarından bir tanesi de güçlendirme yapılırken yapının kullanımına olanak sağlayıp uygulamasının hızlı ve minimum işçiliktir. FRP malzemeler yalıtım özelliğine sahip olduğundan dolayı hassas ekipmanların bulunduğu yapılar için kullanılmasında büyük avantaj sağlamaktadır (Hastahane vs.). FRP malzemeler lineer gerilme şekil değiştirme özelliğinden dolayı kopma anlarına kadar doğrusal bir elastik ilişkisi sergileyip ani kopmaya maruz kalırlar.

FRP kompozitler çeşitli kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemedan oluşurlar. FRP kompozitler, yüksek mukavemetli elyafların polimerik bir matriste gömülmesinden yapılırlar. Lifler, FRP mukavemetini ve sertliğini sağlarken, matris lifleri ayırır ve aralarında yük transferine izin verir. Cam (GFRP), Karbon (CFRP) ve Aramid (AFRP) olmak üzere en yüksek gerilme mukavemetine ve elastik modülüne sahip karbon elyafları olmak üzere yaygın olarak kullanılan üç ana lif türü vardır. Matris için en yaygın kullanılan polimer türleri epoksi, vinil esterler ve poliesterlerdir.

Tüm FRP malzemelerinin üç belirleyici özelliği bulunmaktadır. Bunlar geometrisi, lif yönelimi ve hacimsel oranıdır. FRP, anizotropik bir malzemedir ve esas olarak liflerin yönü boyunca güçlüdür. Bu nedenle, FRP malzemeleri lif yönelimlerine göre ağır bir şekilde yüklenmemelidir. Güçlendirme durumunda her iki yönde de yükleme yapılıyorsa, çift yönlü FRP malzemeleri kullanılabilir. Betonarme kesme güçlendirme



uygulamaları için FRP elyafları, FRP'yi betonun yüzeyine bağlamak için bir yapıştırıcı ile kullanılır.

FRP kumaşların veya laminatların kullanımı, betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için yaygındır. Burada tabakaların mukavemeti lif yönelimine ve konsantrasyonuna (liflerin oranı / miktarı) bağlıdır. FRP kompozitler, liflerin kumaşın uzunluğu yönünde yönlendirildiği, çift yönlü, aynı lif oranının iki yönde yönlendirildiği ve çok eksenli veya çok yönlü olduğu, liflerin ikiden fazla yönde yönlendirildiği tek yönlü olabilir. Geometri ile ilgili olarak, FRP kumaşları çok ince ( $<0.2$  mm), bükülmelerine ve yuvarlanmalarına izin verir veya nispeten kalın ve sert plakalar şeklinde bulunabilir ( $>1.6$  mm).

### **1.1.1. Karbon elyaf takviyeli polimer**

CFRP kompozitler; sağlamlıkları nedeniyle CFRP liflerden dokunan kumaşlar endüstrinin çeşitli kademelerinde kullanılmaktadır. Yumuşak yapıdaki lif yapısı, kolaylıkla istenilen şekle getirilmektedir. Ayrıca epoksi reçinesi ile beraber kullanıldığında sertleşmektedir. Bu malzemenin belirgin özellikler kullanımındaki kolaylık, binaya ekstra yük katmaması ve yüksek mekanik özellikleridir. Malzemenin bu avantajlı özelliklerinden dolayı CFRP, yaygın bir şekilde inşaat mühendisliği alanında kullanılmaya başlanmıştır. CFRP liflerin kullanımının yaygınlaşmasıyla maliyetlerin azalmasından dolayı inşaat sektöründe kullanılabilirliği artmıştır. Özellikle korozyon hasarlı ve depremlerde hasar görmüş binaların ekonomik ve hızlı güçlendirilmesinde iyi sonuçlar göstermiştir.

### **1.1.2. Cam elyaf takviyeli polimer**

GFRP kompozitler; bu elyaf türünün belirgin özellikleri, üretiminin karbon elyafa göre daha yaygın ve daha kolay olması, karbon elyafın kullanıldığı alanlarda kolaylıkla kullanılabilmesi, karbon elyafa göre maliyetinin daha düşük olması, daha kolay temin edilebilir olması ve deformasyon yapma kabiliyetinin yüksek olması gibi birçok avantajı vardır.

### **1.1.3. Aramid elyaf takviyeli polimer**

AFRP kompozitler; olağanüstü güç/ağırlık özelliklere sahip ve yüksek mukavemetli bir polimerdir. Ateşe dayanıklıdır, erime noktası yoktur, 500 derece üzeri ısılarda yapıları bozulmaya başlamaktadır. Aşınma ve kesme direnci çok iyidir. Yüksek sıcaklıklarda iyi kumaş bütünlüğü vardır. Aramid lifleri büyük sertlik ve penetrasyona olan dirençleri ile tanınırlar. Yüksek mukavemet ve dayanıklılıkları nedeni ile delinmeme özelliği istenen malzemelerin üretiminde kullanılırlar. Ultraviyole ışınlar, tuz ve asitlere karşı duyarlıdır. Yapısı itibarı ile nem almaya müsaittirler. Lif ve kumaş halinde iken, katlama, kesme ve işleme zorlukları vardır.

### **1.1.4. Bazalt elyaf takviyeli polimer**

BFRP kompozitler; bazalt hammaddesi kolayca bulunan ve pahalı olmayan bir malzemedir. Bazalt elyafı, bazalt taşlarının 1300-1700°C'de eritilmesi ile elde edilmektedir. Eritilmesi için gereken enerji S camına eşdeğer olup E camından yüksektir. Bu yüzden bu durum maliyeti doğrudan etkilemektedir. Ayrıca lifleri elde edebilmek için pahalı çekme ağızları olan platin alaşımını kullanılması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı bazalt elyafın fiyatları dünya genelinde E ve S camının arasındadır. Bazalt elyafının kimyasal bileşimlerine bağlı olarak da mekanik özellikleri az sayıda değişiklik gösterebilir. E cam elyafı üretimi ile kıyaslandığında borik asit gibi katkıları kullanılmayıp sadece ufalanmış bazalt kayaları ile üretim yapıldığından dolayı daha temiz ve çevreci bir imalat yapılıdır. Teknik olarak ise bazalt liflerin elde edilmesi cam liflere göre daha zor, fakat elde edilen özellikler daha iyidir.

### 1.1.5.FRP kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

Elyaf çeşitlerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1.1.'de belirtilmiştir.

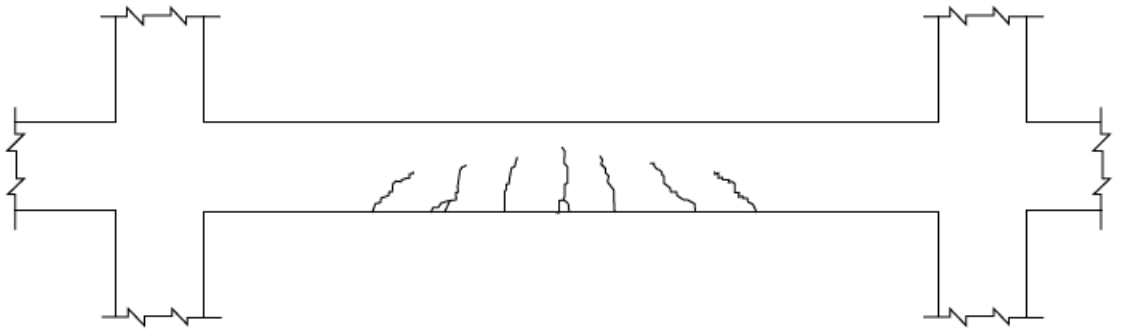
Tablo 1.1. FRP malzemelerin mekanik özellikleri.

Özellik	Bazalt	E Camı	S camı	Aramid	Karbon
Çekme Mukavemeti (MPa)	3.000-4.840	3.100-3.800	4.020-4.650	2.900-3.450	3.500-4.400
Elastisite Modülü (GPa)	93-110	72,5-75,5	83-86	70-179	230-800
Kopmadan Uzama (%)	3,1-6,0	4,7	5,3	2,40-3,60	0,50-1,50
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,65-2,80	2,50-2,62	2,46	1,44	1,75-1,95

Tablo incelendiğinde çekme mukavemeti bakımından Bazalt Elyafın; Aramid Elyafdan daha yüksek, E Cam Elyafına yakın, S Cam Elyafdan ve Karbon Elyafdan daha düşük olduğu görülmektedir. Elastisite modülleri bakımından ortalama olarak E ve S Cam elyaflarından daha yüksek Aramid ve Karbon Elyafların daha düşük olduğu görülmektedir.

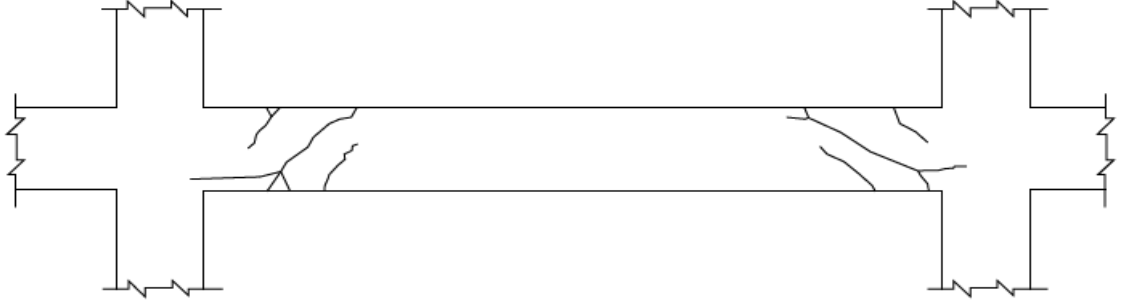
### 1.2. Betonarme Yapılarda Kiriş Hasarları

Betonarme kirişlerde düşey yükler etkisi altında kiriş açıklıklarında eğilme çatlakları oluşmaktadır. Açıklıktaki donatılar yetersiz ise, bu bölgede donatıların akma limitini aşması halinde betonda çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 1.1.)



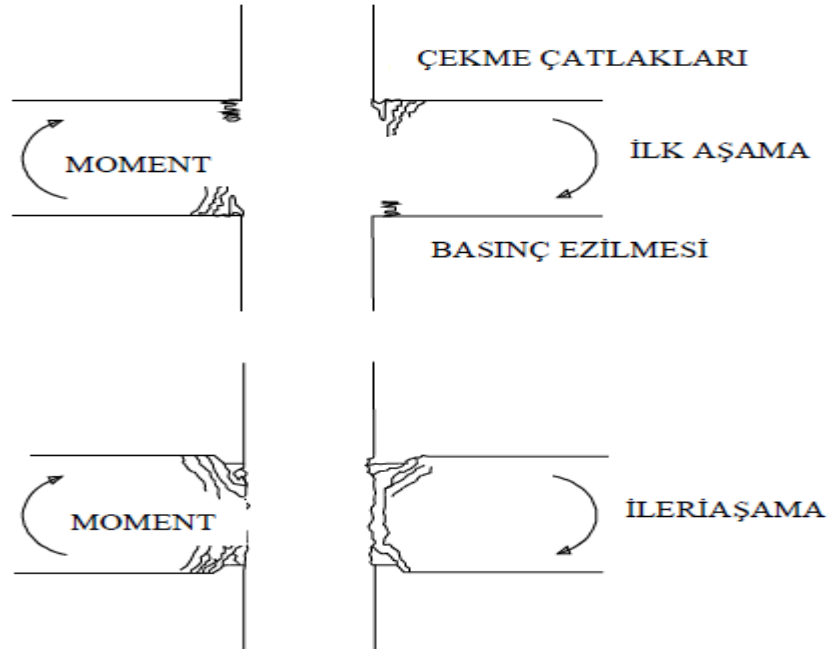
Şekil 1.1. Kirişte oluşabilecek eğilme çatlakları [9].

Deprem kuvveti etkisi altında kirişlerde mesnet bölgeleri en fazla zorlanan kısımlardır. Bu bölgelerde kiriş eksenine 45°'lik açıyla kesme çatlakları ve dik eğilme çatlakları da oluşabilmektedir. Bu gibi çatlaklar etriye donatısının yetersiz olduğu durumlarda görülmektedir (Şekil 1.2.).



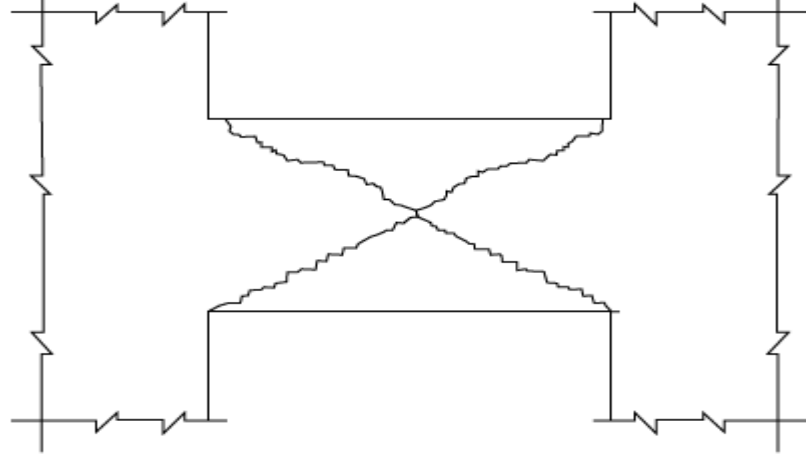
Şekil 1.2. Kirişte oluşabilecek kesme çatlakları [9].

Depremde taşıyıcı elemanlara etki eden kuvvetler tersinir yüklerdir. Bu sebepten kiriş mesnetlerinde ağır hasarlı mafsallar oluşturarak pozitif ve negatif moment oluşmasına sebep olabilir (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Kiriş uçlarında mafsallaşma [9].

Kısa açıklıklı kirişlerde sıkça görülen hasar kirişle perde birleşim yerlerinde meydana gelen  $\times$  şeklinde kesme çatlaklarıdır (Şekil 1.4.).



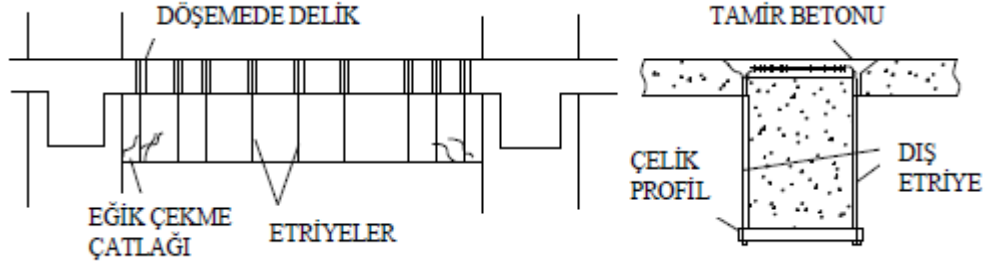
Şekil 1.4. Bağ kirişi  $\times$  kesme çatlakları [9].

### 1.3. Kirişlerin Kesmeye Karşı Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri

#### 1.3.1. Çelik levha ile betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi

Kesme dayanım kapasitesi yetersiz kirişlerde mesnet bölgelerinde gerekli sayıda etriye (enine donatı) kirişin iki yüzüne dıştan kesme dayanımı artırmak için sarılarak eklenmektedir. Kiriş altına yerleştirilen çelik profile bulonla bağlanan çubuklar, döşemede açılan deliklerden geçirilerek döşemenin üst yüzeyinde açılan yuvanın içine bükülerek yerleştirilmektedir. İşlem bitirildikten sonra açılan boşluklar beton ile doldurularak güçlendirme işlemi yapılmaktadır (Şekil 1.5.).

Bu yöntem kirişlerde açıklık eğilme mukavemetini ve kesme mukavemetini arttırmak için kullanılır.



Şekil 1.5. Dıştan etriye eklenmesi.

### 1.3.2. Kirişlerin beton ile mantolanması

Betonarme kirişlerin eğilme kapasiteleri ve kesme dayanımlarının artırılması amacıyla kirişe yeni bir betonarme katman eklenmesi ile gerçekleştirilen güçlendirme şeklidir. Mantolamada önemli hususlar; yeni kiriş ile eski kiriş arasında aderansın oluşması ve kiriş donatılarının eğilmeyi karşılayabilecek şekilde komşu açıklıklara devam ettirilmesi veya sıyrılmayacak şekilde aderansın sağlanması için epoksi ile kolon içine ankre edilmesi gibi çözümler uygulanmaktadır (Şekil 1.6.).

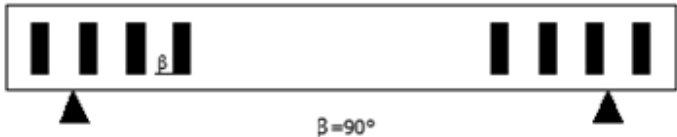
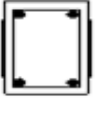
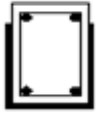

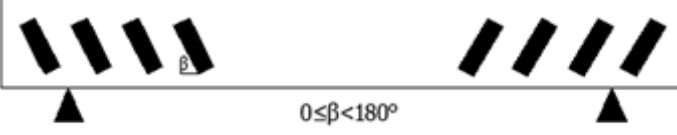







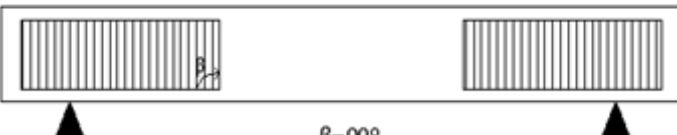



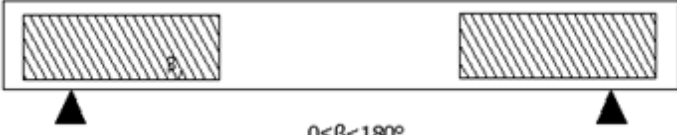



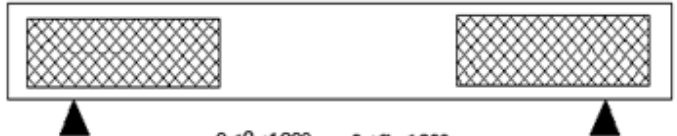





Şekil 1.6. Kiriş mantolama uygulaması.

### 1.3.3. Kirişlerin FRP malzeme ile sargılama

Kiriş güçlendirmelerinde elyafın yapıştırma şekilleri, yüzeye yaptığı açılar ve güçlendirmede kullanılan isimlerin açıklamaları tablolarda belirtilmiştir (Tablo 1.2. – Tablo 1.3. – Tablo 1.4. ve Tablo 1.5.).

Tablo 1.2. FRP güçlendirme şekilleri.

FRP Güçlendirme Dağılımları	Yapıştırma Şeması		
 <p><math>\beta = 90^\circ</math></p>	 <p>SS90</p>	 <p>US90°</p>	 <p>WS90</p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SS<math>\beta</math></p>	 <p>US<math>\beta</math></p>	 <p>WS<math>\beta</math></p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math>   <math>0 \leq \delta &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SS<math>\beta/\emptyset</math></p>	 <p>US<math>\beta/\emptyset</math></p>	 <p>WS<math>\beta/\emptyset</math></p>
 <p><math>\beta = 90^\circ</math></p>	 <p>SP90</p>	 <p>UP90</p>	 <p>WP90</p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SP<math>\beta</math></p>	 <p>UP<math>\beta</math></p>	 <p>WP<math>\beta</math></p>
 <p><math>0 \leq \beta &lt; 180^\circ</math>   <math>0 \leq \delta &lt; 180^\circ</math></p>	 <p>SP<math>\beta/\emptyset</math></p>	 <p>UP<math>\beta/\emptyset</math></p>	 <p>WP<math>\beta/\emptyset</math></p>

Tablo 1.3. FRP ile güçlendirme açıklamaları.

Şema	Yan Güçlendirme (Side bonding)	U Sarım (U Jacketing)	Tam Sarım (Completely wrapping)
Sembol	S	U	W
Notlar	Kirişin sadece yan yüzeylerinin güçlendirilmesidir. Yapılan güçlendirme şekillerinde kullanılan malzemenin uçlarının kiriş yüzeyine sabitlenmelidir.	Kirişin yan yüzeylerinin ve alt kısmını saracak şekilde güçlendirme yapılmasıdır. Yapılan güçlendirmelerde kirişin alt yüzey uçlarının malzemeyi kesmemesi için yuvarlanması gerekmektedir.	Kirişin yüzeylerinin tamamını saracak şekilde güçlendirme yapılmasıdır.

Tablo 1.4. FRP dağılımları.

	Şerit	Plaka
Sembol	S	P

Tablo 1.5. Elyafın kiriş yüzeyiyle olan açıları.

	İlk elyafın kiriş yüzeyiyle açısı	İkinci elyafın kiriş yüzeyiyle açısı
Sembol	$0^\circ \leq \beta < 180^\circ$	$0^\circ \leq \theta < 180^\circ$

#### 1.4. Literatür Araştırması

FRP kompozit malzemeler; 1980'ler den beri, çok sayıda deneysel ve saha projelerinde yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmıştır. Yapılan literatür özeti eskiden yeniye doğru sıralanmıştır.

Khalifa ve ark. (1999), harici olarak bağlanmış CFRP sürekli levhalar ve şerit şeklinde güçlendirilmiş kesmeye karşı yetersiz iki sürekli açıklığa sahip olan 150×305 mm dikdörtgen kesitli 9 adet betonarme kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Deneysel çalışmada değişken parametreler, enine kesme donatısı miktarı ve CFRP kompozit miktarıdır. Bu doğrultuda kirişler 4 noktalı eğilme düzeneğinde teste tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, harici olarak bağlanmış CFRP'nin, kirişlerin pozitif ve negatif moment



bölgelerinde kesme kapasitesini arttırmak için kullanılabilceği, ayrıca kesme mukavemetinde %22 ila %135 arasında bir artış sağlayabileceği sonucuna varmışlardır [10].

Li ve ark. (2001), CFRP şeritlerle dikdörtgen kesitli kesme kapasitesi yetersiz kirişler üzerinde güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Ortalama 38 MPa basınç kalitesine sahip betonu kiriş üretiminde kullanmışlardır. Deneyler sonucunda CFRP kompozit şeritlerin kirişlerin kesme dayanımına yaptığı katkının kirişlerde kullanılan boyuna donatı ve etriye miktarından etkilendiği görülmüştür. CFRP'nin kesme dayanımına katkısı CFRP şeritlerin yapıştırılma yüzeyi arttıkça artmıştır. CFRP şeritlerin kesme dayanım kapasitesine katkısının kirişte kullanılan etriye miktarı azaltıldığında arttığını tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışma teorik olarak doğrulamaya çalışmışlardır. Ancak kirişlerin kırılma dayanımlarının ve davranışlarının belirlenmesinde beton, çelik ve CFRP arasında kesme açısından karmaşık bir etkileşim olduğu belirtilmiştir [11].

Rahimi ve Hutchinson (2001), Betonarme kirişlerde ortalama 69 MPa dayanıma sahip beton kullanmışlardır. 6 adet 150×200×2300 boyutlarında kirişler kullanmışlardır. Güçlendirme işlemini kirişlerin alt yüzeyine CFRP ve GFRP plakaları tabakalı olarak yapıştırarak yapmışlardır. CFRP plakaların dayanım ve rijitliği artırdığını ve maksimum yük kapasiteslerinde %230 oranında artış olduğunu tespit etmişlerdir. Teorik olarak hesapladıkları iki boyutlu sonlu elemanlar modeli sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Hesaplanan teorik sonuçların deney sonuçlarına yakın sonuçlar elde edildiğini tespit etmişlerdir [12].

Khalifa ve Nanni (2002), kesme kapasitesi yetersiz 305×150×3050 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli kirişleri CFRP şeritlerle dıştan yapıştırıp güçlendirerek deneysel çalışma yapmışlardır. Etriyeli ve etriyesiz olmak üzere betonarme kirişleri iki ana gruba ayırmışlardır. Ortalama 19,3 MPa basınç dayanımına sahip betonu etriyeli kirişlerin üretiminde, ortalama 27,5 MPa basınç dayanımına sahip betonu etriyesiz kirişlerin üretiminde kullanmışlardır. CFRP şeritlerle betonarme kirişleri farklı şekillerde güçlendirmişlerdir. Güçlendirilen kirişlerin dayanımlarını 4 noktalı deney düzeneği ile

tespit etmişlerdir. CFRP kompozit şeritlerin kirişlerin kesme kapasitesini %40 ile %138 oranlarında arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır [13].

Diagana ve ark. (2003), CFRP kompozitler ile kesme kapasitesi yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişleri güçlendirmişlerdir. Kirişlerin üretiminde ortalama 40 MPa basınç kalitesine sahip beton kullanmışlardır. Toplam 9 adet betonarme kiriş kullanmışlardır. Kirişlerin 1 adetini kontrol olarak, 8 adetini ise güçlendirmişlerdir. CFRP kompozitin sarma şeklinin kiriş dayanımına katkısını amaçlamışlardır. Güçlendirilen betonarme kirişlerde kesme kapasitesinin önemli ölçüde arttığını deneyler ile tespit etmişlerdir. 90° tam sarım yönteminin kesme dayanımına katkısı 90° U sarım yöntemine göre iki kat daha fazla katkı sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca 45° şerit yöntemi ile güçlendirilen kirişlerdeki kesme dayanımındaki artış tam sarım yöntemi ve U sarım yöntemine göre kirişlerin kesme dayanımına katkısı aynı düzeyde kalmıştır. Analitik sonuçlarla deney sonuçları karşılaştırıldığında %-14 ile %93 oranlarında değişim olduğu görülmüştür [14].

Taijsten (2003), CFRP kompozitler ile kesme kapasitesi yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişler güçlendirilerek deneye tabi tutulmuştur. Betonarme kirişlerin üretiminde 50 MPa'ın üzerinde basınç dayanımına sahip beton kullanılmıştır. CFRP kompozit şeritlerin kesme dayanımına katkısını hesaplamak için bir formül oluşturmuştur. Sonrasında ise kirişin nominal kesme dayanımı hesaplamıştır. Test sonuçları ile analitik yöntem sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre elyaf şeritlerin kirişlerin kesme dayanımını arttırması için kesme çatlaklarına dik şekillerde yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir [15].

Almusallam (2006), 36 adet GFRP kompozit malzeme ile güçlendirilmiş (100×100×2000 mm) boyutlarında betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini incelemek için deneysel çalışma yapmıştır. 36,4 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanmıştır. Kirişler farklı çevre koşullarına sahip ortamda 6-24 ay bekletilip teste tabi tutulmuştur. Belirtilen çevre koşullarında bekletilen kirişlerin hiç birisinde çevre koşullarının kesme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Ancak GFRP kompozit malzeme uzun süre güneş ışınlarına maruz kaldığı takdirde kompozitin

dayanımlarında azaltıcı etkisi olduğu gözlenmiştir. Deneyle 4 noktalı deney düzeneğinde yapmıştır. Yapılan deney sonuçları betonarme kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılmasında GFRP kompozit malzemenin etkinliğini kanıtlamıştır. GFRP kompozit malzeme ile güçlendirilen kirişlerde GFRP kompozit malzemenin genellikle kesme kapasitelerini ve sünekliğini önemli derecede artırdığını göstermiştir [16].

Sundarraja ve Rajamohan (2009), 20 MPa basınç kalitesine sahip beton kullanarak 13 adet 100×150×1000 mm boyutlu betonarme kirişler üretmişlerdir. Üretilen kirişlerden 1 adeti kesme ve eğilme dayanımına karşı güçlü, geri kalan 12 adeti ise kesme dayanımı ve eğilme dayanımı açısından yetersizdir. Kirişler U-sarım şeklinde ve kirişin yan yüzeylerinde kesme açısına dik olacak şekilde GFRP kompozit şeritler ile güçlendirilerek dört noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur. Bu çalışmadaki parametreler, kirişin kesme bölgesinde eğimli GFRP kompozit şeritler ile harici olarak güçlendirilmiş kirişlerin kesme güçlendirmesine etkisi, göçme şekilleri ve yük-deplasman davranışdır. Deney sonuçlarına göre, GFRP kompozit malzeme ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuş ve GFRP kompozitlerin kirişlerin kesme dayanımına katkısının çok etkin olduğu sonucuna varılmıştır [17].

Akbarzadeh ve Maghsoudi (2010), yapmış oldukları deneysel çalışmada 6 adet 150×250×6000 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli iki açıklıklı betonarme kirişleri CFRP, GFRP ve hibrit olarak güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Deneyde kullandıkları betonarme kirişlerde ortalama 74 MPa ve daha yüksek basınç dayanımına sahip beton kullanmışlardır. Betonarme kirişlerin alt ve üst bölgelerine 2Ø16 boyuna donatı yerleştirmişlerdir. FRP kompozit malzemeleri betonarme kirişlerin pozitif ve negatif moment bölgelerine yerleştirmişlerdir. Betonarme kirişleri orta noktalarından yükleyerek test etmişlerdir. FRP kompozit malzemelerin güçlendirilen kirişlerde yük-sehim, kırılma modu, moment ve yük kapasitesi, moment yeniden dağılım ve süneklik açısından etkilerini araştırmışlardır. CFRP veya GFRP ile güçlendirilen kirişler hibrit ile güçlendirildiklerinde yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar elde etmişlerdir. GFRP ve CFRP kompozitler ile yapılan güçlendirmelere göre karbon ve cam elyafın bir

kombinasyonundan oluşan Hibrit FRP laminatlar, kirişlerin doğrusal olmayan davranış sergilemelerine katkıda bulunmuştur. Sürekli kirişlerde minimum moment dağılımlarını yeniden düzenlemede hibrit kullanımının gerekli olduğu belirtilmiştir. Sürekli betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP ve GFRP ile yapılan güçlendirme yerine hibrit kullanımı; taşıma gücü, süneklik ve moment tekrar dağılım oranında önemli bir şekilde artırdığını belirtmişlerdir [18].

Attari ve ark. (2012), 7 adet betonarme kirişi eğilmeye karşı güçlendirip dört nokta eğilme deney düzeneğinde test etmişlerdir. Kirişleri 160×100×1500 mm boyutlarında tasarlayıp kirişlerin alt bölgelerine 2Ø10, üst bölgesine ise 2Ø8 donatılar yerleştirmişlerdir. Betonarme kirişlerin üretiminde 39 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanmışlardır. Ürettikleri kirişlerden 1 adeti kontrol, 3 adeti cam veya karbon elyafla enine ve boyuna sarılarak güçlendirilmiş, diğer 3 adedi ise karbon ve cam kumaşlarla enine ve/veya boyuna sarılarak hibrit olarak güçlendirilmiştir. Yapmış oldukları bu güçlendirilme yöntemleri dayanım, sertlik, süneklik ve kırılma modları açısından ele alınarak incelenmiştir. Cam ve karbon elyafların kiriş güçlendirilmesinde beraber kullanılmasının etkili sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Kontrol kirişine göre %114 oranında dayanım artışı elde etmişlerdir. Bununla birlikte bu artışın aşırı süneklik kaybına sebep olmadığını gözlemlemişlerdir. Aksine, Hibrit güçlendirme şeklinin kontrol kirişine göre 0,9 oranında daha süneklik olduğu gözlemlenmiştir. U sarım ankrajlı güçlendirme yöntemi kirişlerin eğilme mukavemetini, daha fazla deformasyonlar yapma kapasitesini artırarak ve iç kuvvetlerin yeniden dağıtılmasına katkıda bulunarak en iyi sonucu elde etmişlerdir. Yapılan diğer güçlendirme yöntemleri karşılaştırıldığında sadece cam elyaf malzemenin güçlendirilmede kullanımı ve tek katlı hibrit kompozitin kullanımı kirişlerin sünekliğini artırdığı tespit edilmiştir. Güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme dayanımını tespit etmek için analitik bir model geliştirmişlerdir. Model sonuçları güçlendirilen kirişlerin davranışını tam olarak tahmin edildiğini göstermiştir. Yapılan deneysel çalışmada deney sayısının az olduğu, kirişlerin üretiminde kullanılan beton basınç dayanımının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmada tek bir kiriş parametresi üzerinde çalışma yapılmıştır [19].

Baggio ve ark. (2014), yapmış oldukları deneysel çalışmada kesme dayanımına karşı yetersiz 9 adet 150×250×2440 mm boyutlu betonarme kirişler üretmişlerdir. Üretilen 9 adet betonarme kirişin 1 adeti kontrol kirişi, 8 adeti ise CFRP ( karbon takviyeli elyaf kompozit), GFRP (cam takviyeli elyaf kompozit) ve FRCM (çimento esaslı elyaf takviyeli kompozit) malzemeler ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilen kirişlerin 2 adeti ankrajlı ve ankrajsız olacak şekilde CFRP kompozit ile, 2 adeti ankrajlı ve ankrajsız olacak şekilde FRCM kompozit ile ve geriye kalan 4 adet kiriş ise ankrajlı ve ankrajsız olacak şekilde GFRP kompozit ile tamamen ve kısmen sarılacak şekilde güçlendirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan parametreler, 3 farklı kompozit malzeme, güçlendirmede uygulanan ankraj türü ve kompozit malzeme ile güçlendirme şeklidir (tam derinlik U sarım, kısmi derinlik U sarım). Betonarme kirişler 4 noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, FRP kompozitlerin kumaş veya şerit şeklinde uygulanmasının, toplam kesme kapasitesini arttırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, tam U şeklinde sarılı FRP tabakalar, kısmi U şeklinde sarılı FRP tabakalara kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte FRP ankrajlarının kullanılması, kesme kapasitesini ve göçme sünekliğini daha da geliştirmiştir. Ayrıca FRP kompozitler ile güçlendirmenin, göçme şeklini kesmeden eğilme göçmesine değiştirebildiğini görmüşlerdir [20].

Tokgöz ve Dündar (2014), 9 adet 150×250×2200 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin yan yüzeylerinde ve alt yüzeylerinde CFRP kompozit malzeme ile güçlendirme yapmışlardır. Kiriş üretiminde ortalama 20 MPa basınç kalitesine sahip beton kullanmışlardır. Güçlendirilen dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı, sünekliği ve enerji tüketim kapasitelerini araştırmışlardır. Kesme kapasitesi yetersiz olacak şekilde üretilen 3'er adet betonarme kiriş kesme bölgelerine 45° ve 90°'lik açılarla CFRP kompozit malzemeyi yapıştırmışlardır. Güçlendirilen kiriş deneyleri sonrasında kirişlerde %60 kesme kapasitesinin arttığı gözlenilmiştir. 45°'lik ve 90°'lik CFRP kompozit malzeme ile güçlendirme yöntemleri arasında kayda değer bir fark olmadığını elde etmişlerdir [21].

Saribiyik ve Çağlar (2016) düşük dayanımlı beton kullanarak 150×250×2000 mm boyutlu eğilme kapasitesi ve kesme taşıma gücü yetersiz 21 adet betonarme kirişleri CFRP ve GFRP kompozitler ile onarım ve güçlendirme çalışması yapmışlardır. Çalışmada CFRP kompozit malzemenin yerine GFRP kompozit malzemenin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan onarım ve güçlendirmede kiriş dayanımlarının 1.5-2 kat arasında arttığı tespit edilmiştir. Eğilme ve kesme dayanımı açısından bir kat CFRP kompozit malzeme yerine iki kat GFRP kullanılması durumunda benzer dayanımlar, kiriş sünekliği ve enerji yutma kapasiteleri açısından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. CFRP kompozit ile yapılan güçlendirmede kirişte gevreklik sorunu ortaya çıkarken GFRP de bu sorun daha sınırlıdır. Yapılan çalışmada FRP'nin kiriş yüzeyinden betonu kopararak ayrıldığı tespit edilmiştir. Bunu önlemek için ankrajlı birleşim önerilmiştir [22].

Orhun, Köksal, Altınsoy, Aktan, Karahan ve Çankaya (2017) 150×250×1500 mm boyutlarında 2 farklı basınç değerine sahip beton kullanılarak 7 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. Üretilen kirişlerden 4 adedi 25,7 MPa dayanımına diğer 3 tanesi ise 6,8 MPa basınç dayanımına sahip betonlardan üretmişlerdir. İlk 4 adet kirişlerde çekme ve basınç donatıları 2Ø12 ve 10 cm arayla Ø8 etriye diğer 3 adet kirişte ise çekme ve basınç donatıları 2Ø10 ve 10 cm arayla Ø8 etriye kullanmışlardır. Kiriş güçlendirmelerinde; kirişin alt yüzeyi, kirişin yan yüzeyleri ve U sarım yöntemi olmak üzere 3 ayrı şekilde yapmışlardır. Deney sonuçlarında güçlendirilen kirişlerin göçme mekanizmaları ve eğilme davranışları, çeşitli güçlendirme yöntemlerinin etkileri göz önüne alınarak değerlendirmişlerdir. Deneyle 3 noktalı eğilme düzeneğinde yapmışlardır. 25.7 MPa'lık beton basınç dayanımı değerine sahip birinci kiriş serisinde, güçlendirilmiş kirişlerin nihai yük kapasitesi, kontrol kirişinin yük kapasitesinin %165'ine ulaştığını tespit etmişlerdir. 6,8 MPa'lık beton basınç dayanımı değerine sahip 2. seri kirişlerde dayanımın dikkate alınmayacak ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. Kiriş güçlendirmelerde dayanıma etkisini artırmak için en az 10 MPa'dan daha büyük beton basınç değerine sahip kirişler kullanılmalıdır sonucuna ulaşmışlardır [23].

Li and Leung (2017), 180×350×2000 mm boyutlu 12 adet dikdörtgen kesitli betonarme kirişler 1,0 ila 3,5 arasında değişen (a/d) oranına sahip CFRP kompozit malzeme ile kesmeye karşı güçlendirilmiştir. 12 adet betonarme kirişin 6 adedi kontrol kirişi ve diğer 6 adedi U sarım yöntemi ile kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Deney kirişleri 4 noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre CFRP kompozitin kesme dayanımına katkısı başlangıçta (a/d) oranının 2'ye kadar yükselmesiyle arttığını, ardından a/d oranının 2'nin üzerinde olduğunda hafifçe azaldığını ortaya koymuştur [24].

Demir, Ergüt ve Yüksel (2017) 15,73 MPa basınç kalitesinde beton kullanılarak 150×300×2000 mm boyutlarında 4 adet eksik etriyeli betonarme kiriş üretmişlerdir. Üretilen kirişlerin çekme ve basınç bölgelerinde 3Ø14 ve 2Ø6 çaplı ve Ø6/425 etriye donatısı kullanmışlardır. Bu kirişlerin 1 adetini şahit diğer 3 adet kirişi ise çatlak oluşuncaya kadar yüke tabi tutmuşlar sonrasında güçlendirmişlerdir. Farklı yöntemler ile betonarme kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılması ve uygulanan yöntemlerin etkinliklerinin karşılaştırmışlardır. Bu amaç kapsamında, CFRP elemanlar ve dış çelik kelepçeler kullanılarak kirişler kesme yetersizliğine karşı güçlendirmişlerdir. 1 adet kirişi çelik kelepçeler ile güçlendirilmişlerdir. Çelik kelepçelerin alt ve üstünde kullanılan plakaların kalınlığı 3 mm, kelepçelerin aralığı ise 100 mm'dir. CFRP elemanları hem şeritler şeklinde hem de kesme bölgelerinin tümüne yapıştırarak iki farklı şekilde uygulamışlardır. 1 adet kirişi CFRP elemanların epoksi reçine yardımı ile kesme bölgesine U şeklinde sarılması ile üretmişlerdir. Sarılan her bir CFRP'nin boyutları 750×600 mm'dir. Güçlendirilen son kirişi ise CFRP şeritlerin 100 mm aralıklar ile kesme bölgesine yapıştırılması sonucu üretmişlerdir. Her bir şeritin uzunluğu 750 mm, genişliği ise 60 mm'dir. Testler sonucunda, dış kelepçeler ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma ve deplasman kapasiteleri referans kirişe göre oldukça artmıştır. CFRP kompozitlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri iyileştirilmiş olmasına rağmen, deplasman kapasiteleri artmamıştır. Testler esnasında CFRP elemanlar betonarme kirişlerden sıyrılmış ve dış kelepçeler kadar iyi bir performans sergileyememiştir [25].

Qureshi ve Saleem. (2018), Yüksek beton dayanımlı, 1200×200×100 mm boyutlu 8 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş yüzeylerine harici olarak monte edilmiş, kirişlerin eğilme ve kesme dayanımlarına karşı güçlendirilecek şekilde CFRP kompozit malzeme kullanmışlardır. Güçlendirilen kirişlerin eğilme ve kesme gerilmeleri altında betonun ve CFRP kompozitin gerilmesini değerlendirmek için beton ve CFRP kompozit şeritlerinin yüzeyine strengçeç uygulamışlardır. Betona ve CFRP kompozitlere aktarılan gerilme değerlerinin, betonun yüzeyindeki gerilme özelliklerine ve epoksi reçine yapıştırıcısının mukavemetine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Test sonuçları, eğilme elemanlarındaki mukavemet artışının CFRP kompozit malzemenin gerilme değerlerine son derece bağlı olduğunu açıkça göstermiştir [26].

Yapılan literatür çalışmasında CFRP ve GFRP kompozit malzemelerinin onarım ve güçlendirmede yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak yeni bir malzeme olması dolayısıyla ile onarım ve güçlendirmede BFRP malzemelerin kullanımı oldukça sınırlı bir seviyede olduğu görülmektedir. Güçlendirilen kirişlerin güçlendirme şekilleri arasında ankrajlı ve ankraj şerit modellerine az sayıda rastlanılmıştır. Güçlendirmede kullanılan kirişlerin enine donatı kullanımlarının simetrik ve genel olarak yeterli olduğu görülmektedir.

Literatür kısmında bulunan çalışmalarda güçlendirilen yapı elemanlarının üretiminde kullanılan beton kalitesi yüksek tutulmuştur. Ancak Türkiye’de yapılan incelemelerde yapı elemanlarının üretiminde kullanılan beton kalitesinin oldukça düşük olmasından dolayı deneysel çalışmada kullanılan beton kalitesi C16/20 MPa seviyesinde tutulmuştur. Deneysel çalışmada üretilen tüm kirişler kesme kapasitesi zayıf, eğilme kapasitesi yeterli ve kirişin yarısında enine donatısı yeterli diğer yarısında enine donatısı yetersiz olacak şekilde asimetric olarak tasarlanmıştır.

Güçlendirmede yerli olarak üretilen ve diğer FRP çeşitlerine alternatif olacak BFRP kompozit kullanılarak çalışmanın özgün yönü ortaya konulmuştur.



## 1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, dıştan BFRP kompozit ile güçlendirilen kesme dayanımı düşük betonarme kirişlerin dayanım ve davranışlarının incelenmesidir. Ayrıca, laboratuvarda üretilen kirişlerde sarım yöntemlerinin ve ankraj uygulamasının karşılaştırmalı olarak etkisi de incelenmiştir.

Kesme kuvveti dayanımı yetersiz iki adet kontrol, dört farklı sarım yöntemi kullanılarak güçlendirilmiş sekiz adet olmak üzere toplam on adet dikdörtgen kesitli basit mesnetli kiriş numuneleri modellenerek tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen tüm kirişlerin geometrisi, boyuna donatıların çapı ve adedi, etriyelerin çapı, adet ve aralıkları aynıdır. Kullanılan BFRP kompozit malzemenin genişliği her sarım yöntemine göre ayrı ayrı ayarlanmıştır.

## 1.6. Tez İçeriği

Bu tez çalışması doğrultusunda kesme kuvvetine karşı yetersiz dayanıma sahip, kirişin yarı kısmında yeterli enine donatı diğer yarı kısmında ise yetersiz enine donatı kullanılarak dikdörtgen kesitli basit mesnetli betonarme kirişler üretilmiştir. Güçlendirmede kullanılan kirişlerde Bazalt Elyaf kompozit malzemeyi kiriş yüzeylerine ankraj yaparak 4 noktalı eğilme deney düzeneğinde teste tabi tutulmuştur. Üretilen bütün kirişlerin geometrileri, boyuna donatı çapları ve adetleri, etriye çapları ve aralıkları aynıdır. Ayrıca güçlendirme uygulamasında kullanılan bazalt elyaf kompozit malzeme grup olarak farklı farklı şekillerde kullanılmıştır.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır:

Birinci bölümde, güçlendirmede kullanılan FRP kompozit malzemeler, yapılarda kiriş hasarları, kirişlerin kesmeye karşı güçlendirme yöntemleri, literatür araştırması, çalışmanın amacı ve kapsamı sunulmuştur.

İkinci bölümde; BFRP ile kiriş güçlendirme hesap yöntemleri formülleri açıklamalı bir şekilde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde; malzeme ve yöntem başlığı adı altında bilgiler açıklanmıştır. Malzeme konusunda; kiriş beton özellikleri, kiriş donatı özellikleri ve çekme deney sonuçları, güçlendirmede kullanılan Bazalt elyaf malzeme özellikleri ve kirişlere Bazalt elyaf malzemeyi yapıştırmada kullanılan epoksi reçine özellikleri açıklanmıştır. Yöntem başlığı altında deneysel çalışmalar, kiriş deney numunlerinin hazırlanması ve kiriş deney düzeneği açıklamalı bir şekilde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; deneysel programda şahit ve güçlendirilen betonarme kirişlerin yapılan basınç deneyi sonrasındaki yük, deplasman ve çatlak açıklıkları tablolar ve grafiklerle açıklamalı şekilde sunulmuştur. Deneysel programda göz önünde bulundurulmuş parametreler; gruplar halinde kullanılan bazalt elyafın döşemeye ankrajlı ve ankrajsız olarak yapıştırılması, bazalt elyafı ile güçlendirilen deney numunelerinde çeşitli güçlendirme şekillerinin dayanıma etkisi, deplasman yapma kapasiteleri ve kiriş yüzeyinde oluşacak çatlak açıklıkları üzerindeki etkisi karşılaştırmalı şekilde irdelenip bu bölümde sunulmuştur.

Beşinci bölümde; sonuçlar ve öneriler özetlenerek sunulmuştur.

## BÖLÜM 2. HESAP YÖNTEMİ

### 2.1. FRP ile Güçlendirilmiş Kirişlerin Kesme Dayanım Hesabı

FRP'nin katkılarının ve betonun enine kesme donatısının basit toplamını kullanarak nominal kesme dayanımı belirlemektedir (Denklem 2.1):

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (2.1)$$

Burada  $V_n$ : nominal kesme mukavemeti,  $V_c$ : betonun nominal kesme mukavemeti,  $V_s$ : çelik etriyelerin nominal kesme mukavemeti ve  $V_f$ : FRP şeritlerin nominal kesme mukavemetidir.

( $V_f$ ) FRP kompozitlerinin katkısı, ( $V_c$ ) beton katkısı ve ( $V_s$ ) çelik katkısı.  $V_c$  ve  $V_s$ 'nin kesme katkısını hesaplamak için denklem 2.2-2.4'te verilmiştir:

$$V_c = k \sqrt{f_c} b_w d \quad (2.2)$$

$$k = 1.6 \sqrt{1 + \frac{d}{1600}} \leq 1.75 \quad (2.3)$$

$$V_s = A_v f_y d \cot^2 \theta \quad (2.4)$$

Deneysel sonuçlar ile analitik sonuçlar arasındaki karşılaştırma denklem 2.5-2.7 ile ifade edilmektedir:

$$\frac{R_{R,t}^{ref}}{R_{R,t}} \leq 1.05 \quad (2.5)$$

$$\frac{R_{R,t}}{R_{R,t}^{ref}} \leq 1.05 \quad (2.6)$$

$$\frac{R_{f,t}}{R_{R,t}^{ref}} \leq 1.05 \quad (2.7)$$

Denklem 2.2'de bulunan  $f_{R,t}^{ref}$  ; güçlendirilmemiş referans kontrol kirişinin deneysel kesme dayanımı,  $f_{t,test}$ ; FRP ile güçlendirilmiş kirişin deneysel kesme dayanımı ve  $f_{f,t}$  ; FRP'nin toplam kesme dayanımına katkısıdır.

Aşağıda başlıklar altında, FRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesinde kullanılan analitik modeller sunulmuştur. Bu çalışmada TBDY 2018, Fib-TG 9.3 ve İngiliz Betonarme Derneği modeli yönetmelikleri tarafından kesme dayanımının hesaplanmasında önerilen modeller kullanılmıştır.

### 2.1.1. Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY 2018)

TBDY 2007 yönetmeliğinde bulunan hesap yöntemi TBDY 2018 yönetmeliğinde bulunan hesap yöntemi ile aynı olduğundan dolayı deney sonuçları TBDY 2018 yönetmeliği ile karşılaştırılmıştır.

FRP Kompozit ile güçlendirilmiş beton elemanın tasarım kesme dayanımı, gerekli kesme dayanımını geçmelidir (Denklem. 2.8). FRP betonarme elemanın gerekli kesme dayanımı yük faktörleriyle hesaplanmalıdır. Tasarım kesme dayanımı nominal kesme dayanımını, dayanım azaltma faktörü  $\Phi$  ile çarparak hesaplanmalıdır (Denklem 2.8).

(2.8)

FRP ile güçlendirilmiş bir beton elemanın nominal kesme dayanımı, takviye çeliği (etriye, bağ veya spiraller) ve betondan gelen katkılara, FRP kompozitin katkısı ilave edilerek belirlenebilmektedir (Denklem 2.9). Aynı zamanda FRP sisteminin katkısına azaltma faktörü  $\Psi_f$  ilave edilmelidir.

$$c \quad f_f V_f \quad (2.9)$$

FRP takviyesi tarafından sağlanan kesme mukavemeti, varsayılan çatlak boyunca FRP'deki çekme gerilmesinden kaynaklanan kuvvetin hesaplanmasıyla

belirlenebilmektedir. FRP kesme takviyesinin kesme katkısı denklem 2.10'da verilmiştir.

$$f = \frac{f_{fe}}{d_{fv}} \quad (2.10)$$

Burada  $V_f$ : FRP'nin kesme kapasitesine katkısı,  $f_{fe}$ : FRP'nin tabakasında oluşan çekme gerinmesi,  $d_{fv}$ : FRP kesme takviyesinin etkili derinliği ve  $s_f$ : FRP şerit eksenlerin arasındaki mesafesidir.

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (2.11)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (2.12)$$

FRP kompozit etkili gerinme  $\varepsilon_{fe}$ , FRP sisteminde nominal dayanımda elde edilebilecek en yüksek gerinimdir, aynı zamanda FRP sisteminin ve güçlendirilmiş betonarme elemanın göçme tipi tarafından yönetilmektedir.

FRP ile tamamen sarılmış betonarme kiriş elemanlar  $f_{fe}$  denklem 2.13-a ile hesaplanmaktadır:

$$f_{fe} = f_u \quad (2.13-a)$$

U sarım veya yan sarım durumlarda etkili gerinme, kesme hesaplanmasında aderans azaltma katsayısı  $K_v$  kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{fe} = f_u \quad (2.13-b)$$

Beton yüzeyine FRP'nin aderans katsayısı, denklemler 2.14-2.17 ile hesaplanabilmektedir.

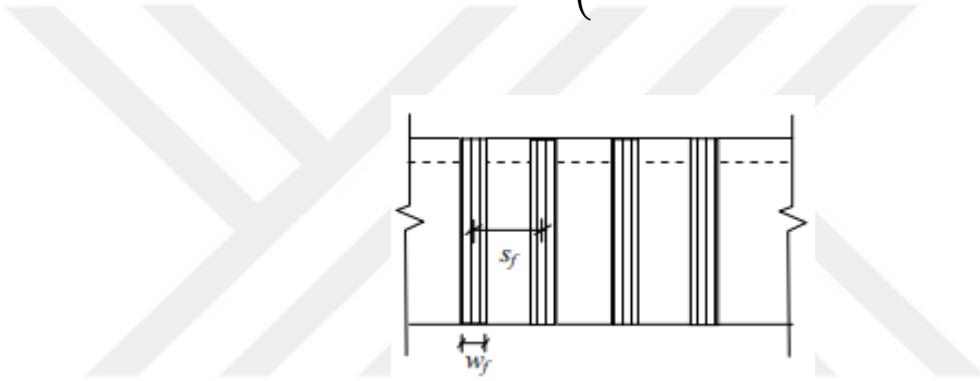
$$\frac{f_{fe}}{11,900} = 0,75 \quad (2.14)$$

$$\frac{23,300}{0,58} \quad (2.15)$$

Ayrıca aderans azaltma katsayısı, sırasıyla beton mukavemetini ve kullanılan sargı şema tipini açıklayan  $k_1$  ve  $k_2$  olmak üzere iki modifikasyon faktörüne dayanmaktadır. düzeltme faktörleri için ifadeler, denklem 2.16-2.17’de verilmiştir [27].

$$\left(\frac{f}{27}\right)^{2/3} \quad (2.16)$$

$$2 \left\{ \begin{array}{l} \text{---} \\ -2L \end{array} \right. \quad (2.17)$$



Şekil 2.1. Lif şerit aralıkları ve şerit genişliği.

### 2.1.2. Fib-TG 9.3

Avrupa fib Bülteni 14 (fib-TG 9.3 [28]), FRP'nin kesme kapasitesine katkısının hesaplanması için Triantafillou ve Antonopoulos (2000), tarafından önerilen analitik bir modeli kullanan bir yönetmeliktir [29]. Bu yönetmelik, FRP özelliklerini, FRP uygulama yöntemlerini ve farklı malzeme güvenliği faktörlerini dikkate almaktadır.

Fib-TG 9.3 tarafından önerilen FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin hesaplama modeli denklem 2.18’de verilmiştir [28].

$$f_d = 0,9 \varepsilon_{fd,e} \cdot E_f \cdot f \quad (2.18)$$

Burada  $V_{fd}$ , FRP'nin kesme kapasitesine katkısı,  $\varepsilon_{fd,e}$  FRP kompozitin etkin birim uzama tasarım değeri,  $\theta$  diyagonal çatlak açısı ( $45^\circ$ ),  $\alpha$  güçlendirilen eleman eksenine göre FRP kompozit uygulama açısıdır. FRP'nin etkin birim uzaması,  $\varepsilon_{fd,e}$ , denklem 2.19 - 2.20 ile hesaplanmaktadır:

Tam sarım elemanlar durumlarda:

$$f_{d,e} = 0,17 \left( \frac{f}{f_u} \right)^{0,30} f_u \quad (2.19)$$

Yan veya U sarım durumlarda:

$$f_{d,e} = \min \left[ 0,65 \left( \frac{f}{f_u} \right)^{0,56} f_u, 0,17 \left( \frac{f}{f_u} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (2.20)$$

Burada  $\varepsilon_{fu}$  azami birim uzama değeri,  $E_{fu}$  FRP'nin elastisite modülü,  $\rho_f$  FRP kompozitin güçlendirme oranıdır. FRP kompozitin güçlendirme oranı ( $\rho_f$ ) denklem 2.21 – 2.22 ile hesaplanmaktadır:

FRP kumaş ile sürekli sarılmış elemanlar durumlarda:

$$\rho_f = \frac{A_{FRP}}{A_c} \quad (2.21)$$

Şeritler şeklinde sarım durumunda:

$$\rho_f = \left( 2 - \frac{b}{b_c} \right) \cdot \left( \frac{f}{f_u} \right) \quad (2.22)$$

### 2.1.3. İngiliz betonarme derneği (British Guidline)

İngiliz Beton Derneği tarafından TR55 Raporu, beton yapıların FRP malzemeleriyle güçlendirilmesi konusunda bir tasarım yönetmeliği sunulmaktadır [30].

Bu yönetmelik İngiliz tasarım kodları ve standartları kapsamında ayarlanmaktadır. Ayrıca, tasarım prosedürleri tüm FRP malzemeleri ve tüm güçlendirme teknikleri için geçerlidir. Prosedürler genel kabul görmüş ilkelere dayanmaktadır. Bu prosedürler, betonarme elemanlarını eğilme ve kesme konusunda güçlendirmek için bir yönetmelik sağlamaktadır. Ayrıca, bu rapor, mevcut bölümlerin nihai kapasitesinin geleneksel beton tasarım yöntemleri ile değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu bölümdeki hesaplamalar için EN 1992-1-1: 2004 kullanılacaktır.

FRP ile güçlendirilen betonarme kirişler için nihai kesme kapasitesi, betondan gelen kesme katkısı FRP'nin kesme katkısına ve çelik etriyelerin katkısına eklenerek belirlenebilmekte, bu yaklaşım denklem 2.23 ile ifade edilebilmektedir:

$$V_c + V_f \quad (2.23)$$

Burada  $V_c$  ve  $V_s$ , TS500 gibi tasarım standartlarından belirlenebilmektedir.

FRP takviyesinin katkısı aşağıdaki şekilde ifade edilen denklem 2.24 ile belirlenebilmektedir:

$$V_f = E_f \varepsilon_{fe} A_f \frac{(d - t_{max})}{s_f} \quad (2.24)$$

Burada;  $E_f$  FRP takviyesinin elastisite modülü,  $\varepsilon_{fe}$  FRP kompozitin etkili gerinmesi,  $A_f$  FRP kompozitin alanı,  $d_{fv}$  kirişin basınç bölgesinden çekme takviyesine kadar ölçülen FRP takviyesinin etkili derinliği, n tam sarım durumlarda 0, U-sarımında 1 ve yan sarım durumlarda ise 2'dir.  $s_f$  FRP eksenlerin arasındaki aralıktır, sürekli FRP kumaş durumlarda ise 1 olarak alınmaktadır.  $\beta$  FRP'nin ana lifleri ile elemanın kesme çatlak açısıdır.

$t_{max}$ , Tam ankraj kapasitesini geliştirmek için gereken ankraj uzunluğu ve aşağıdaki denklem 2.25 ile hesaplanmaktadır:



$$\varepsilon_{fe,max} = 0,7 \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E}} \quad (2.25)$$

FRP kompozit etkin gerinmesi  $\varepsilon_{fe}$ , Aşağıdakilerden en küçük değeri olarak alınmalıdır.

$$\varepsilon_{fe} = \min \left( \begin{array}{l} \sqrt{\frac{f_{ctm}}{E}} \\ 0,004 \end{array} \right) \quad (2.26)$$

Burada,  $f_{ctm}$ ; betonun gerilme mukavemeti,  $\varepsilon_{fd}$ ; FRP kompozitin tasarım maksimum gerilme kapasitesidir.



## BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tezde dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin kesmeye karşı BFRP kompozitler ile ankrajlı sarım yöntemleri ile güçlendirilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan beton, güçlendirme malzemeleri, güçlendirme yöntemleri, deney cihazı ve aparatları alt başlıklar halinde sunulmuştur.

### 3.1. Betonarme Kiriş Malzemeleri

#### 3.1.1. Kiriş betonu

Üretilen betonarme kirişlerin betonu Sakarya şehrinde bulunan herhangi bir hazır beton firmasından C16/20 basınç dayanımına sahip olacak şekilde temin edilmiştir. Beton kalıplara mikser yardımıyla dökülmüş ve dalıcı el vibratörü ile sıkıştırılmıştır. Kiriş betonundan üç adet standart silindir numune alınmış ve 28 günlük basınç dayanımlarının ardından silindir numunelerin basınç dayanımlarını tespit etmek için deneye tabi tutulmuştur. Laboratuvar ortamında yapılan basınç deneyi sonucunda silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı 16,9 MPa olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Silindir Numunelerin 28 Günlük Basınç Deney Sonuçları.

Numune No	28 Günlük Beton Basınç Dayanımı $F_c$ (MPa)
1	14,3
2	17,5
3	18,9
Ortalama	16,9



Şekil 3.1. Silindir beton numuneleri.

### 3.1.2. Kiriş donatıları

Betonarme kiriş üretiminde kullanılmak üzere temin edilen donatılardan dörder adet S420 sınıfı  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 16$  ve  $\varnothing 18$  çaplarında nervürlü çelik donatılar kullanılmıştır (Şekil 3.2.). Temin edilen çelik donatılar çekme testine tabi tutulmuş ve donatı anma çapı kullanılarak ortalama dayanımlar tespit edilmiştir. Donatılara ait çekme deneyi sonuçları (Tablo 3.2.)’ de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kiriş donatıları.

Tablo 3.2. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin sonuçları.

Donatı türü	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
Ø8	345,4	490,2
	366,3	508,1
	370,0	494,5
	371,5	499,78
Ortalama	363,3	498,2
	507,1	650,7
Ø16	521,1	660,4
	506,5	651,5
	504,4	648,8
Ortalama	509,8	652,8
	591,7	729,7
Ø18	589,5	728,7
	590,6	722,3
	595,0	722,6
Ortalama	591,7	725,8

### 3.1.3. Epoksi

BFRP kompozit malzemenin betonarme kirişlerin yüzeylerine yapıştırılmasında epoksi reçinesi kullanılmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Epoksi reçine.

4 birim reçine 1 birim sertleştirici olacak şekilde hazırlanan epoksi karışımı kiriş yüzeylerine elyaf yapıştırmak için kullanılmıştır. Epoksi reçinesinin yapıştırmada etkili olabilmesi için beton yüzeyleri temizlenip yabancı maddelerden arındırılmış olması gerekmektedir. Güçlendirmede kullanılan epoksi reçinesinin karakteristik diğer özellikleri (Tablo 3.3.)’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Sikadur 330 epoksi özellikleri.

Sikadur®-330 Malzeme Özellikleri	Değerler
Yoğunluk	1,30 ± 0,1 kg/L (A+B bileşeni) (+23 °C'de)
Karışım oranı	A bileşeni : B bileşeni = 4 : 1 ağırlıkça
Uygulama sıcaklığı	+10 °C min. / +35 °C max.
Çekme dayanımı	30 MPa (7 gün sonra, +23 °C'de)
Eğilmede elastisite modülü	3 800 MPa (7 gün sonra, +23 °C'de)
Çekmede elastisite modülü	4500 MPa (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

#### 3.1.4. Bazalt elyaf

Tüm kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde, tek doğrultulu Bazalt elyaf 300 kumaş kullanılmıştır. Bazalt elyaf kumaş genişliği 500 mm, (Şekil 3.4.). Mekanik ve teknik özelliklerinin bir kısmı üretici firma tarafından alınmış, çekme dayanımı ve dokuma kalınlığı Bazalt elyaf üzerinde yapılan testler ile bulunarak (Tablo 3.4.)’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Bazalt elyaflara ait Teknik özellikler.

Özellik	Değer
Filament çapı (Mikron)	13-20
Dokuma kalınlığı (mm)	0.14
Özgöl 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



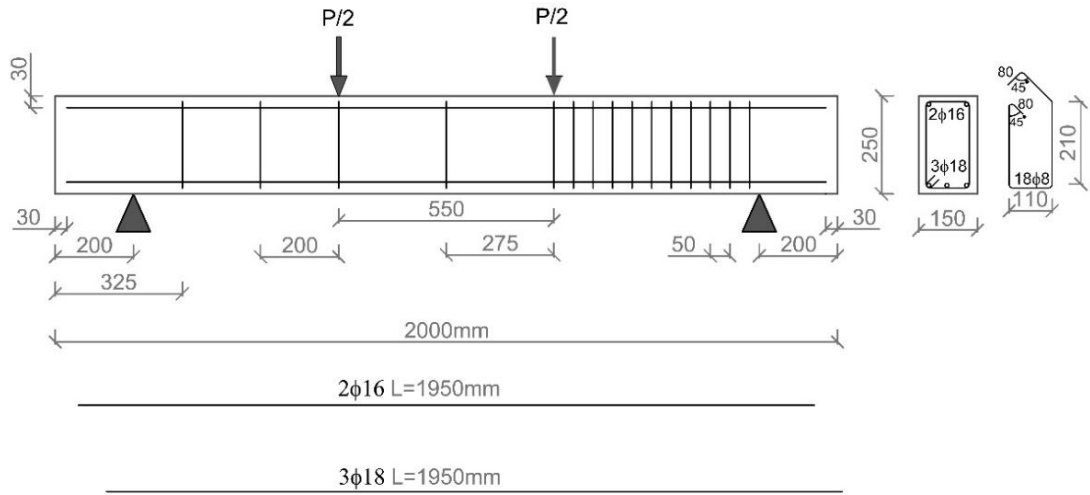
Şekil 3.4. Bazalt elyaf.

## 3.2. Deneysel Çalışma

### 3.2.1. Kiriş numunelerin kesit özellikleri

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi laboratuvarında, mevcut yükleme sistemi ve ölçüm aletlerinin kapasiteleri dikkate alınarak deneye tabi tutulacak kiriş elemanlarının geometrik ebatları planlanıp tasarlanmıştır.

Deneysel çalışmada 150 mm genişliğinde, 250 mm derinliğinde ve 2000 mm uzunluğuna sahip betonarme kiriş tasarlanmıştır. Betonarme kirişlerin kesme bölgelerinin yarısında  $\text{Ø}8/20$ , diğer yarısında  $\text{Ø}8/5$  enine donatı, çekme bölgesinde  $3\text{Ø}18$  ve basınç bölgesinde  $2\text{Ø}16$  boyuna donatı kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan çekme donatısının oranı  $\rho = 0,023$ , basınç donatısı ise  $\rho = 0,0122$ 'dir. Tasarlanan kirişlerin geometrik ebadı ve donatı yerleşim planı Şekil 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Deneysel kirişlerin geometrisi ve donatı yerleşim planı.

Deneysel çalışmada kirişin paspayı 25 mm faydalı yüksekliği 215 mm olduğundan  $a_v/d$  oranı 2,4 olarak belirlenmiştir. Yükleme noktası ile mesnet arasında kalan mesafe 525 mm olup eğik kesme-basınç kırılmasının olabilmesi için  $a_v/d$  oranı 1'den büyük 2,5'dan küçük olması sağlanmıştır.

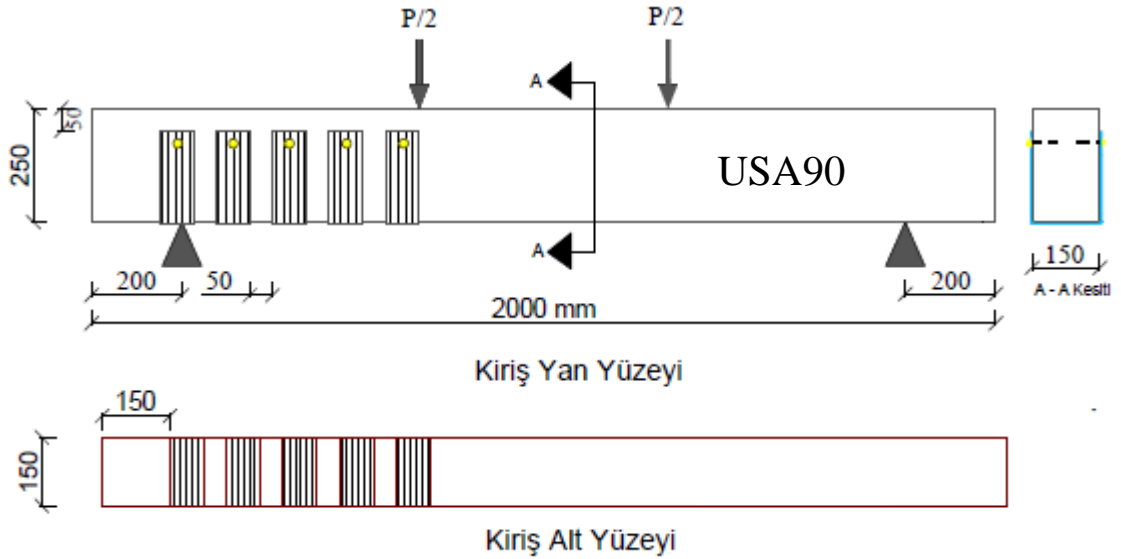
### 3.2.2. Kiriş numunelerin BFRP kompozitler ile güçlendirme yöntemleri

Güçlendirme çalışmalarında 2 adet kontrol ve 8 adet kiriş BFRP kompozit ile kesmeye karşı güçlendirmek için toplamda 10 adet kiriş üretilmiştir. Kirişlerin BFRP kompozit ile güçlendirilmesinde,  $90^\circ$  tam sarım,  $90^\circ$  tam sarım şeritler,  $90^\circ$  U sarım başlıklı ankrajlı ve  $90^\circ$  U sarım ankrajlı şeklinde güçlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Deneysel kirişlerin güçlendirme durumu Tablo 3.5.'te özetlenmiştir.

Tablo 3.5. Tasarlanan BFRP şeritler ve kumaşın durumu.

Kiriş Adı	BFRP Kompozit		Şerit Aralığı (mm)	Elyaf Doğrultu açısı	Güçlendirme Yöntemi
	Boy (mm)	Genişlik (mm)			
Kontrol	-	-	-	-	-
TS90	850	500	-	90°	90° Tam Sarım
TSS90	850	75	50	90°	90° Tam Sarım Şerit
USBA90	550	75	50	90°	90° U Sarım Başlıklı Ankrajlı
USA90	550	75	50	90°	90° U Sarım Ankrajlı

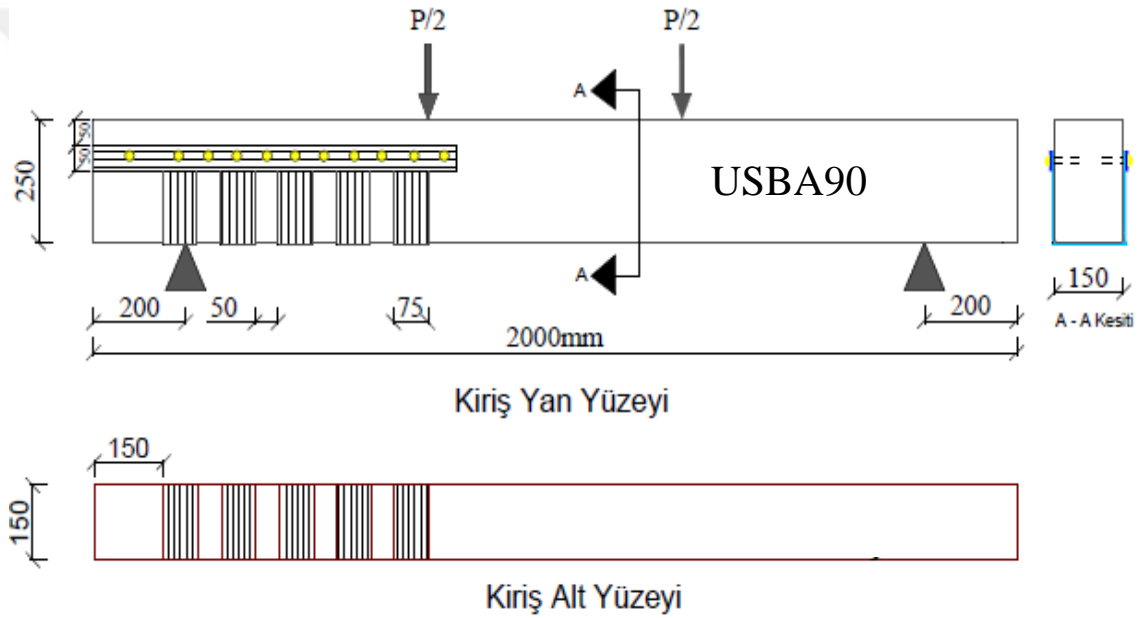
90° açılı U sarım ankrajlı yönteminde, kirişlerin yetersiz kesme dayanımı bölgelerinin alt ve yan yüzeyleri 90° U sarım ankrajlı ve BFRP kompozitin uç kısmında ankraj uygulaması olacak şekilde güçlendirilmiştir. BFRP kompozit doğrultusu kirişin yüzeyine  $\alpha = 90^\circ$ , şeritlerin genişliği  $w_f=75$  mm, uzunluğu 550 mm ve U şeritler eksenlerinin arası mesafe  $S_f=125$  mm olarak tasarlanmıştır. U sarım ankrajlı yöntemi ile 2 adet kiriş güçlendirilmiş ve güçlendirilen kirişler USA90-1 ve USA90-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. USA90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.

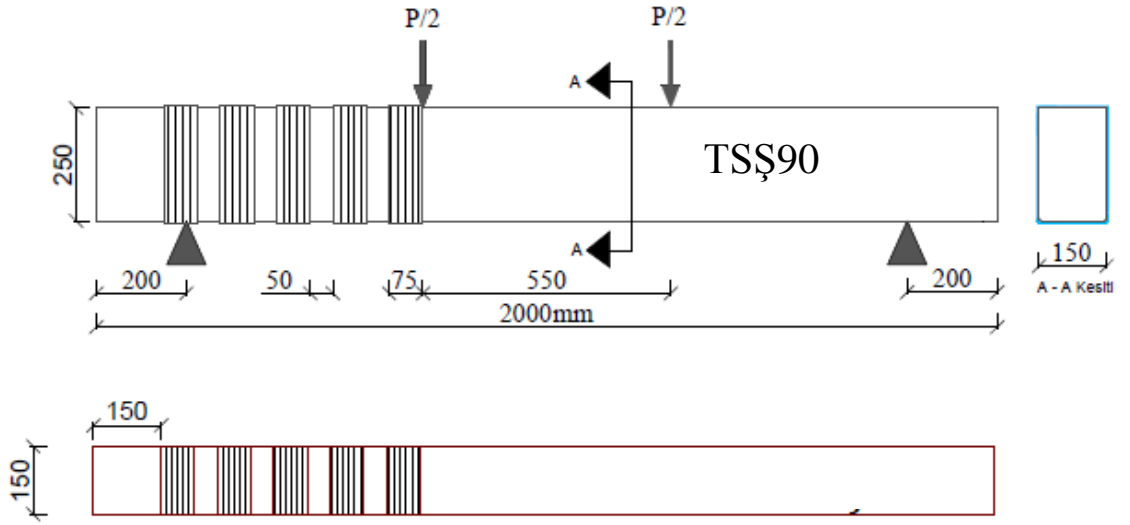


90° açılı U sarım başlıklı ankraj yönteminde, kirişlerin yetersiz kesme dayanımı bölgelerinin alt ve yan yüzeyleri 90° U sarım başlıklı ankrajlı güçlendirme yöntemi, BFRP kompozitin uç kısmında ankraj ve ankraj uygulaması yapılan noktalar yakpare davranım göstermesi için 80 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde uç kısımlarına şerit uygulaması olacak şekilde güçlendirilmiştir. BFRP kompozit doğrultusu kirişin yüzeyine  $\alpha = 90^\circ$ , şeritlerin genişliği  $w_f=75$  mm, uzunluğu 550 mm ve U şeritler eksenlerinin arası mesafe  $S_f=125$  mm olarak tasarlanmıştır. U sarım başlıklı ankrajlı yöntemi ile 2 adet kiriş güçlendirilmiş ve güçlendirilen kirişler USBA90-1 ve USBA90-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.7.).



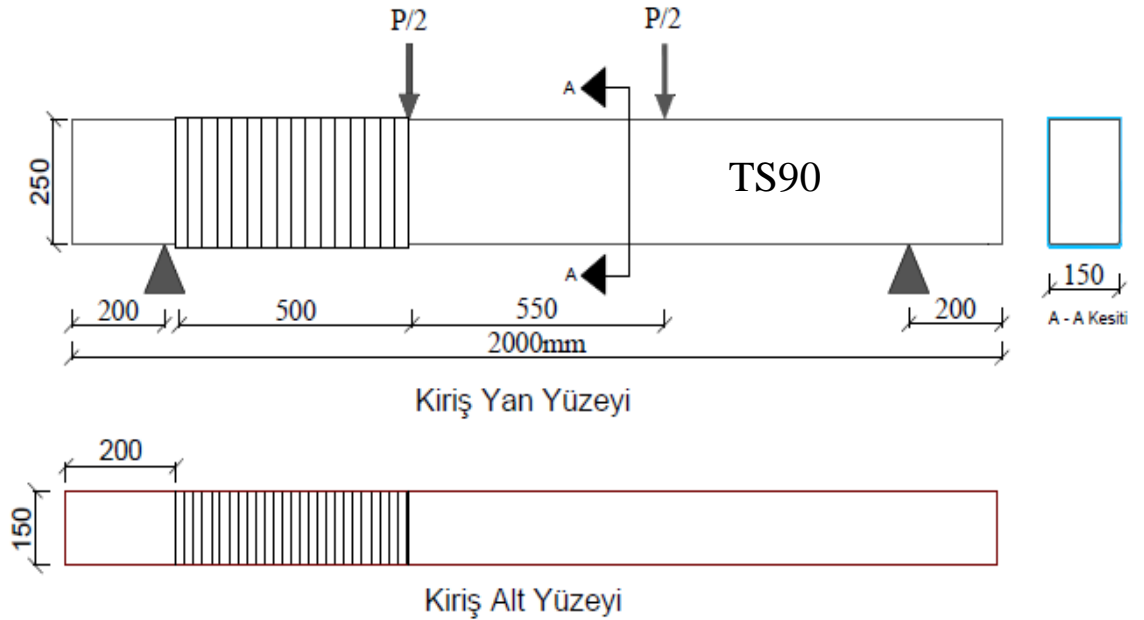
Şekil 3.7. USBA90 kiriş numunelerinin kesit ve görüntüşleri.

90° açılı tam sarım şerit yönteminde, kirişlerin yetersiz kesme dayanımı bölgelerinin alt ve yan yüzeyleri 90° tam sarım şerit olacak şekilde güçlendirilmiştir. BFRP kompozitin doğrultusu kirişin yüzeyine  $\alpha = 90^\circ$ , şeritlerin genişliği  $w_f=75$  mm, uzunluğu 850 mm ve tam şerit sarım eksenlerinin arası mesafe  $S_f=125$  mm olarak tasarlanmıştır. Tam sarım şerit yöntemi ile 2 adet kiriş güçlendirilmiş ve güçlendirilen kirişler TSS90-1 ve TSS90-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. TSS90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.

90° açılı tam sarım yönteminde, kirişlerin yetersiz kesme dayanımı bölgelerinin alt ve yan yüzeyleri 90° tam sarım olacak şekilde güçlendirilmiştir. BFRP kompozitin doğrultusu kirişin yüzeyine  $\alpha = 90^\circ$ , genişliği  $w_f=500$  mm ve uzunluğu 850 mm olarak tasarlanmıştır. Tam sarım yöntemi ile 2 adet kiriş güçlendirilmiş ve güçlendirilen kirişler TS90-1 ve TS90-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.9.).

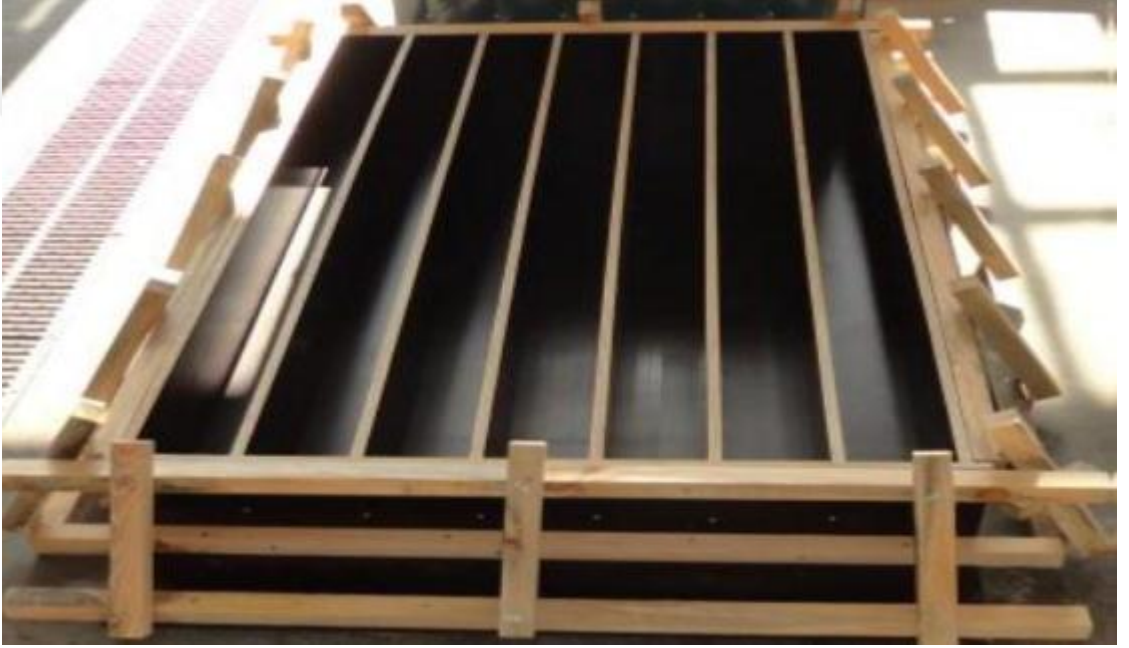


Şekil 3.9. TS90 kiriş numunelerinin kesit ve görünüşleri.

### 3.3. Kiriş Deney Numunelerinin Hazırlanması

#### 3.3.1. Betonarme kirişlerin üretimi

Betonarme kiriş kalıbı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında hazırlanmıştır. Beton yüzeylerinin düzgün çıkması için film kaplı plywood kullanılmıştır. Kalıp yanları ve altı beton dökümü sırasında açılmaması için keresteler ile desteklenmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Numune üretiminde kullanılan Plywood kiriş kalıbı.

Etriyeler ve boyuna donatılar dışarda hazırlatılıp bağlanılmıştır. Hazırlanan kiriş donatıları 2,5 cm paspayı olacak şekilde kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Çelik donatısı yerleştirilen kiriş kalıbı.

Hazırlanan kiriş kalıplarının içerisine kiriş donatıları yerleştirilip paspayları takılmıştır. Sakarya şehrinde bulunan bir beton firmasından C16/20 MPa kalitesinde beton temin edilip kalıplara dökülmüştür. Betonun kalıplara dökülme işleminden sonra beton dalcı el vibratörü ile sıkıştırılmış ve kiriş yüzeylerine perdah işlemi yapılmıştır (Şekil 3.12. - Şekil 3.13.). Kirişlerde kullanılan betonun ortalama basınç dayanımını tespit etmek için standartlara uygun silindir numuneler alınmıştır.



Şekil 3.12. Betonun dökümü ve yerleştirilmesi.



Şekil 3.13. Perdah işlemi tamamlanan kirişler.

Kiriş numuneler 28 gün boyunca kalıpta bekletilip 28 gün sonunda kalıptan çıkarılarak BFRP kompozit malzemenin yapıştırılacağı yüzeyler temizlenmiştir. Deney sırasında elyafta yırtılmaları önlemek için yapışma yüzeylerine denk gelen kiriş köşeleri 2 cm çapında pahlama yapılarak ovalleştirilmiştir (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Numunelerin kurutulması ve yüzey hazırlığı.

### 3.3.2. Kiriş numunelerinin BFRP kompozit ile güçlendirilmesi

Aynı şartlar altında üretilen kirişler, alt ve yan yüzeylerine kiriş boyunca tek yönlü bazalt kumaşlar ile sarılıp epoksi reçine ile yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Kiriş numunelerin yüzeyi temizlenip yapıştırmaya hazır hale getirilmiştir. Ardından bazalt kumaşların uygun boyutlarda kesilme işlemine geçilmiştir. 50 cm ve 7,5 cm genişliğinde olan FRP kumaşlar 100 cm boyunda kesilerek tam sarım yöntemi için, 7,5 cm genişliğinde 55cm uzunluğunda kesilerek U sarım ve ankrajlı sarım için hazırlanmıştır. Ankrajlı sarım yapılan numunelerin 1 tanesinde 80 cm uzunluğunda numunelerin ankraj yapılan kısmına şerit FRP kumaşlar kesilerek kesme kırılmasına yatay, diğer BFRP kumaşlar dik gelecek şekilde yapıştırılmaya hazırlanmıştır. Epoksi reçine rulo ve fırça ile kirişlerin yan yüzeylerine boşluk kalmayacak şekilde bir kat sürülmüştür (Şekil 3.15.). Hazırlanan tek yönlü BFRP kumaşlar kiriş yüzeylerine yapıştırılmıştır (Şekil 3.16.). Yapıştırma işlemi tamamlanan kiriş numuneleri uygun şartlarda bekletilmiştir. Hazırlanan kiriş numunelerine ait sayı, kodlamalar ve güçlendirme şekilleri (Tablo 3.6.)’de verilmiştir.

Tablo 3.6. Kirişlerde kullanılan BFRP ile güçlendirme şemaları.

Kiriş Simgesi	Kiriş Güçlendirme Şekli	Kiriş Özellikleri
ŞK	<p>250</p> <p>325</p> <p>200</p> <p>550</p> <p>275mm</p> <p>50</p> <p>200</p> <p>2000mm</p> <p>P/2</p> <p>P/2</p> <p>2016</p> <p>3018</p> <p>150</p> <p>110</p> <p>2016 L=1950mm</p> <p>3018 L=1950mm</p>	Güçlendirilen kirişlerin dayanımlarını kıyaslamak için kullanılan şahit numune
USA90	<p>P/2</p> <p>P/2</p>	1 Kat 90°'enine U Sarım Ankrajlı Güçlendirilmiş Kiriş
USBA90	<p>P/2</p> <p>P/2</p>	1 Kat 90°'enine U Sarım Başlıklı Ankrajlı Güçlendirilmiş Kiriş
TSŞ90	<p>P/2</p> <p>P/2</p>	1 Kat 90°'enine Tam Sarım Şerit ile Güçlendirilmiş Kiriş
TS90	<p>P/2</p> <p>P/2</p>	1 Kat 90°'enine Tam Sarım ile Güçlendirilmiş Kiriş



Şekil 3.15. Kiriş yüzeylerinin epoksi reçinenin sürülme işlemi.



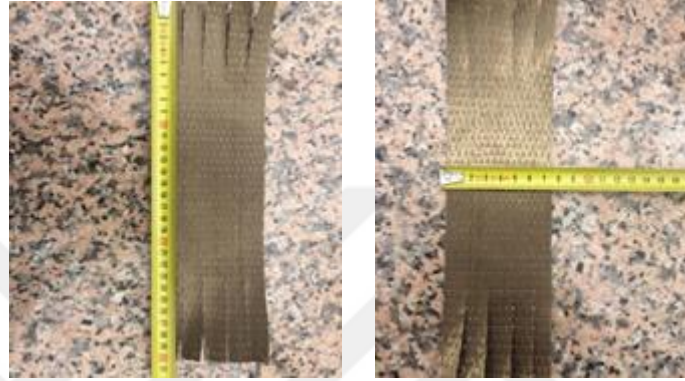
Şekil 3.16. Bazalt kumaşların kiriş yüzeyine yapıştırma işlemi.

### 3.3.2.1. BFRP kumaşlarla kirişlerin güçlendirilmesinde ankraj uygulaması

Toplam üretilen 10 adet kirişlerin 2 tanesinde U sarım ankrajlı güçlendirme ve 2 tanesinde U sarım başlıklı ankrajlı güçlendirme modeli uygulanmıştır. Ankrajlı güçlendirme yapılırken kiriş güçlendirmesinde kullanılacak Bazalt elyaf 7,5 cm genişliğe ve 30 cm uzunluğa sahip olacak şekilde boyutlandırılmıştır.30 cm boyutun her



iki uç kısmına 7,5 cm uzunluğunda püskül yapılmıştır.30 cm uzunluğundaki elyaf ikiye katlanarak kiriş yüzeyinde açılan ankraj deliğine girecek şekilde sarılıp yarısı kiriş içinde diğer yarısı da kiriş dışında kalacak şekilde ankraj uygulaması yapılmıştır. Kiriş yüzeyinin dışında kalan 7,5 cm uzunluğundaki bazalt elyafın her iki ucuna yapılan püskül kısım elyafın üzerinde kalacak şekilde epoksi reçine ile kiriş yüzeyinin aşağıya doğrultusunda yapıştırılarak güçlendirme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.17.a b).



a) Kiriş güçlendirmede ankraj uygulaması için elyaf boyutları.



b) Ankraj uygulaması ve epoksi ile yapıştırılması.

Şekil 3.17. Güçlendirilen kirişlerde ankraj uygulaması.

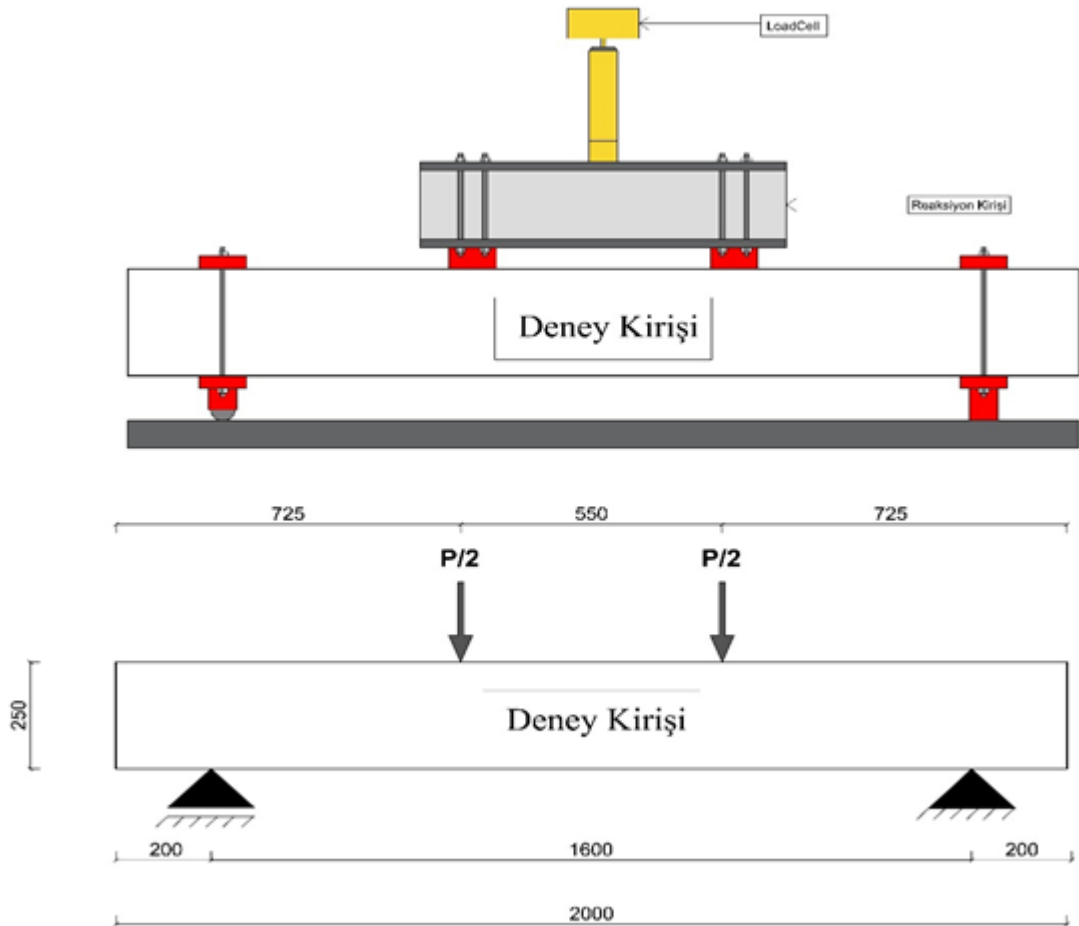
### 3.4. Kiriş Deney Düzenegi

#### 3.4.1. Yükleme ve ölçüm düzenegi

Güçlendirilen betonarme kirişlerin deneyleri Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği T3 malzeme laboratuvarında bulunan HI-TECH MAGNUS marka 300 kN kapasiteli yükleme çerçevesi ile yapılmıştır. Deney .sirasındaki verileri okumak için veri toplama sistemi (data logger) .kullanılmıştır. Düşey yer

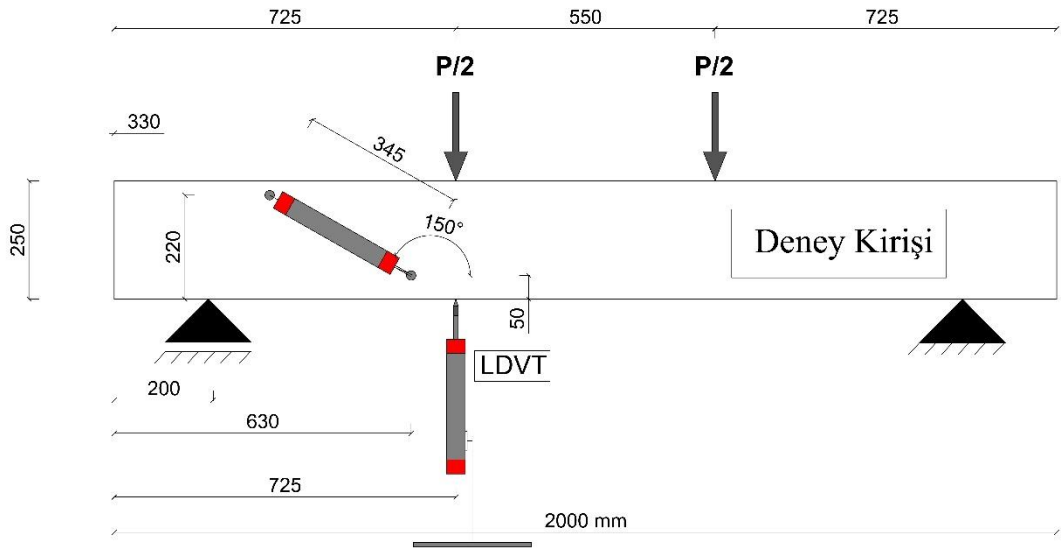
değişimleri ölçmek için potansiyometrik cetvellerden faydalanılmıştır. Yatay yer değişimleri ölçmek için dijital cetveller kullanılmıştır. Yük değişimlerini ölçmek için ise yük verici piston ucuna takılan yük ölçer kullanılmıştır.

BFRP kompozit ile farklı şekillerde güçlendirilen 2000 mm uzunluğunda üretilen betonarme kirişler dört nokta eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur. Betonarme kirişlerin mesnet açıklığı 1600 mm, yükler arası mesafe ise 550 mm'dir. Deney sırasındaki yükü eşit dağıtmak için dolu gövdeli yük dağıtma kirişi kontrol ve güçlendirilen betonarme kirişler üzerine yerleştirilmiştir. Kirişlere zarar vermesini önlemek için iki noktadan çizgisel olarak yükleri kompozit kirişe aktaran 3 cm çapında çelik silindir çubuk altlarına kauçuk yerleştirilmiştir. Yükleme düzeneği Şekil 3.18.'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Yükleme düzeneği.

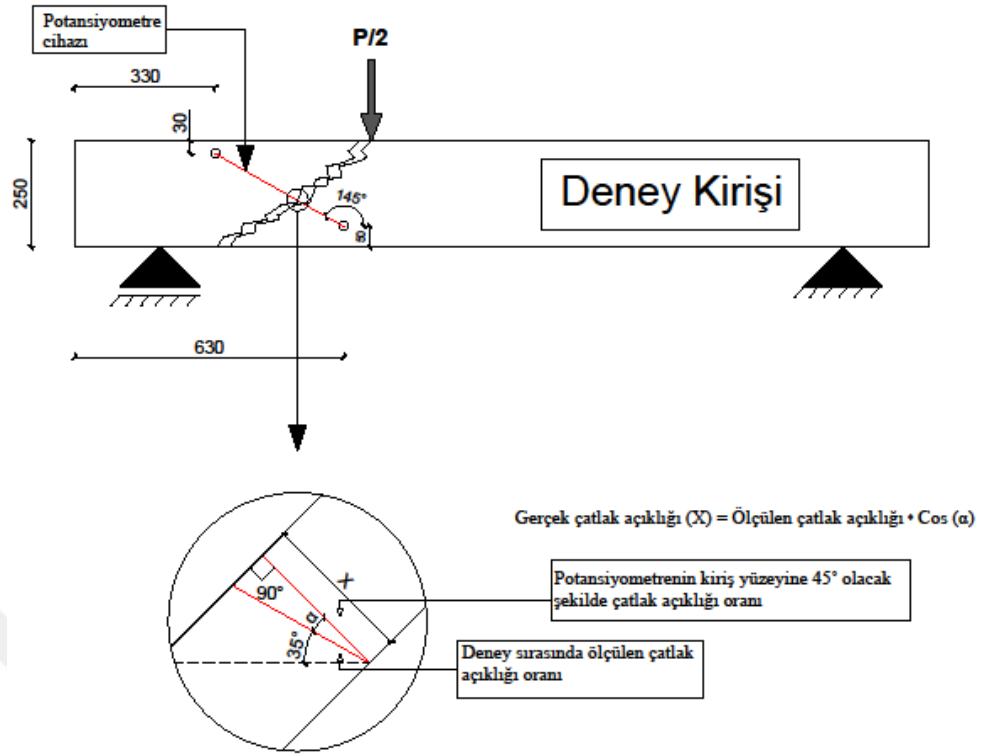
Eğilme çerçevesinin alt başlığı üzerine sabitlenen ve yerleştirilen kutu profiller üzerine sabit ve kayıcı mesnetler monte edilmiştir. Düşey yer değiştirmeleri ölçmek için kirişin alt orta noktasına deplasman ölçer potansiyometrik cetveller yerleştirilmiştir. Kirişlerin yüzeylerinde oluşacak çatlak açıklıkları ölçmek için kirişlerin yüzeyine potansiyometrik cetveller yerleştirilmiştir. Yük verici piston sabit hızla otomatik yükleme yapılarak deney sırasında deplasman ölçerlerden ve yük vericiden gelen değerler, veri toplama sistemi (data logger) yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Ölçüm aletlerin yerleşim ve düzeneği Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. Ölçüm aletlerin yerleşim ve düzeneği.

### 3.4.2. Çatlak açıklığı hesaplama

Yapılan kiriş deneylerinde çatlak açıklıklarının ölçümünü yapabilmek için potansiyometre cihazı kiriş yüzeyine yerleştirilirken şahit kiriş deneyinde meydana gelen çatlak yerleri tespit edilerek kiriş yüzeyine yerleştirme işlemi bu şekilde yapılmıştır. Kiriş yüzeyinde meydana gelen çatlak açıklığı ölçümünü doğru bir şekilde yapabilmek için potansiyometre kiriş yüzeyine 45°, oluşacak çatlaklara 90° olacak şekilde yerleştirilmelidir. Kiriş derinlikleri 25cm olduğundan potansiyometre kiriş yüzeyine 35° açı yapacak şekilde yerleştirilebilmiştir. Çatlak açıklıklarının doğru bir şekilde elde edilebilmesi için (Şekil 3.20.) çizimi ve hesabı yapılmıştır.



Şekil 3.20. Çatlak açıklıklarının tespit edilmesi için yapılan kiriş modellemesi ve hesaplama yöntemi.

Burada X: gerçek çatlak açıklığı,  $\alpha$ : çatlak ölçerin kiriş yüzeyine yerleştirildiği açı ile 45 dereceye kalan açı miktarı. Yüke karşılık gelen gerçek çatlak açıklıkları Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır.

$$X = \text{ölçülmüş olan çatlak açıklık değeri} \times \cos(\alpha) \quad (3.1)$$

Kiriş yüzeylerinde potansiyometre cihazı ile ölçülmüş olan çatlak açıklıkları Şekil...’teki hesaplanan X değeri (düzeltme oranı) ile çarparak gerçek çatlak açıklıklarının doğru şekilde hesaplanmıştır.

## BÖLÜM 4. BFRP İLE BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME TESTİ

### 4.1. Kontrol Kiriş Eğilme Deneyi

İki adet kontrol kiriş numunesi dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuş (Şekil 4.1.) ve yükleme sıfırdan başlatılmıştır. Kirişlerde göçme oluşuncaya kadar yüklemeye devam edilmiş olup göçme oluşuktan sonra yük boşaltılmıştır. Yük-deplasman ve yük-çatlak açıklığı verileri bilgisayar ortamında yükleme sistemine bağlı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Tablo 4.1.'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kontrol kirişin eğilme deneyi.

Tablo 4.1. Kontrol kirişlere ait kesme kuvvetine göre yük, sehim ve çatlak açıklığı değerleri.

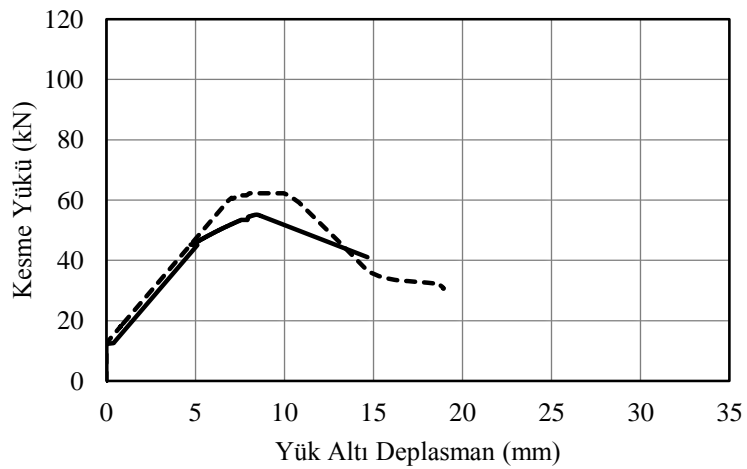
Kiriş numuneleri	Kesme yükü (V) (kN)	Yüklemeye altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
Kontrol 1	55,11	8,52	-
Kontrol 2	62,27	9,47	3,95
Ortalama	58,69	8,99	3,95

Kontrol kirişlerinde ortalama kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 58,69 kN, 8,99 mm ve 3,95 mm olarak tespit edilmiştir. Deney sırasında, ilk çatlaklar kirişlerin kesme bölgesinde oluşmuş olup kiriş üzerine uygulanan yükleme işlemi devam ettikçe yük, deplasman ve çatlak açıklığı artmaya devam etmiştir. Kontrol kirişlerinde kirişin zayıf bölgesinde 45° açılı kesme çatlakları oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.2.). Ayrıca, numunelerin bir tanesinde alt bölgede beton örtüsü dökülmüş ve çekme donatısında da aderans kaybı ile birlikte düşey ana çatlak oluştuğu görülmüştür.



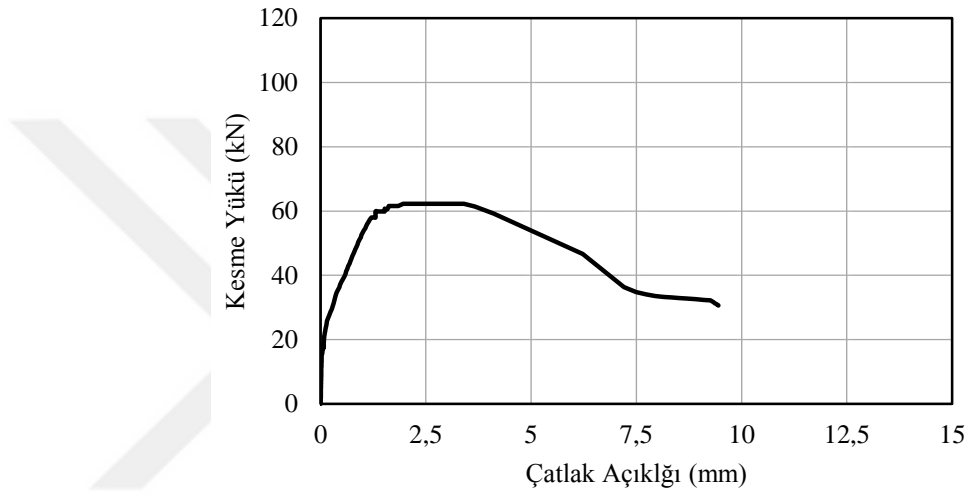
Şekil 4.2. Kontrol kirişin yükleme sonrası deformasyon şekli.

Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde 15 kN kesme yüküne kadar çok küçük deplasman olduğu ve bu yükten sonra kirişlerin lineer bir davranış göstermiş olduğu, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranışın bozulmaya başladığı ve nihai dayanımdan sonra kontrol kirişleri yenilmeye başlamıştır. (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Kontrol kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.

Eğilme deneyi sırasında kontrol kirişlerinin bir tanesinde çatlak açıklığı için kullanılan ölçerde deney hatası olduğu tespit edilmiş ve veri hatası olmayan kirişin verileri kullanılmıştır. Yük-çatlak açıklığı veri grafikleri Şekil 4.4.'te sunulmuştur. Grafikten yaklaşık 15 kN kesme yükünde ilk beton çatlağı olduğu ve kesme yükü- çatlak açıklığı oranısı değiştiği anlaşılmaktadır. Kiriş kesme dayanımına yaklaştığında oluşan ikinci orantının da bozulmaya başladığı ve tepe noktada yük artmazken deformasyonun arttığı ve sonrasında kirişin yenilmeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Kontrol kirişlerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.

#### 4.2. USA90 Kirişi Eğilme Deneyi

U sarım olacak şekilde sarılan iki adet kiriş numunesi U şeritin iki karşıt bitim ucundan BFRP ankraj (spike anchorage) ile kiriş yüzeyine epoksi reçine kullanılarak yapıştırılıp (USA90) güçlendirilmiştir. Kirişler sabit hızlı yükleme uygulanarak dört noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur (Şekil 4.5.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.2. **nalıpay ev şumlunus ed' güçlendirilmenin daha iyi anlaşılması açısından kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.**

Tablo 4.2. USA90 kirişlerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.

Numune	Kesme Yüğü (kN)	Deplasman (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
USA90-1	79,69	14,86	2,95
USA90-2	88,16	11,91	3,02
Ortalama	83,93	13,38	2,99



Şekil 4.5. USA90 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.

USA90 kiriş numunelerinde ortalama maksimum kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 83,93 kN, 13,38 mm ve 2,99 mm olarak bulunmuştur. USA90 kiriş numuneleri kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında maksimum kesme yükü taşıma kapasitesi artma olduğu görülmüştür. USA90 kirişinin Kontrol kirişlere göre maksimum kesme yükünde %43,1 artmış, maksimum yüke karşılık gelen ortalama deplasman %48,8 artmış ve ortalama çatlak açıklığı ise %24,3 azalmıştır.

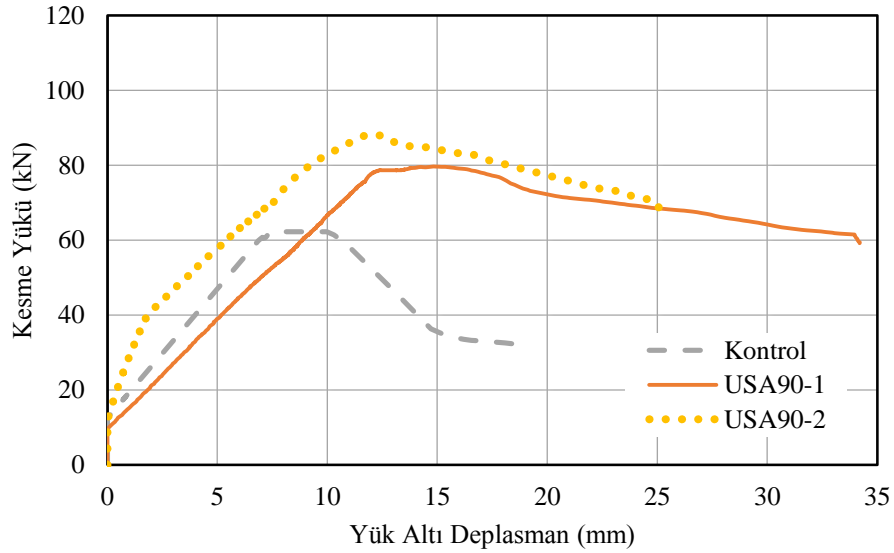
Deney sırasında, kirişler nihai dayanımına ulaşınca bir kiriş numunesinde yan yüzeylerdeki bazalt elyaflar şerit alt bölgesinden kopmuş olup herhangi bir sıyrıma oluşmamıştır. Diğer kiriş numunesinde ise, yükleme arttıkça kesme çatlakları oluştuğundan şeritlerin beton yüzeyinden betonu kopararak ayrılması görülmüştür (Şekil 4.6.).





Şekil 4.6. USA90 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.

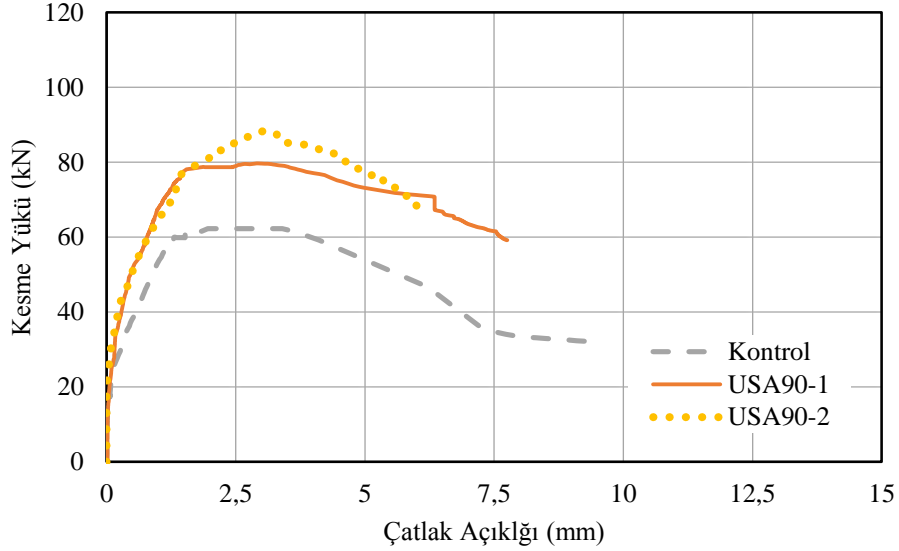
Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş olup grafikler Şekil 4.7. - 4.8.'de sunulmuştur. Grafikten yaklaşık 11 kN kesme yüküne kadar çok küçük deplasman oluşmuş ve bu yükten sonra kirişler orantılı bir davranış göstermişlerdir. Kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranışın bozulmaya başladığı ve nihai dayanımdan sonra kiriş göçmeye başlamıştır. Kontrol kirişine göre USA90 kiriş numunelerinin eğilme rijitliklerinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. USA90 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.

USA90 kiriş numunelerinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, kiriş dayanım ve davranışları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Yaklaşık 23 kN kesme yükünde ilk beton çatlak oluştuğu, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığının orantılı bir şekilde devam ettiği, maksimum kesme dayanıma yaklaştığında

ise bu orantılı davranışın bozulmaya başladığı, sonrasında kirişin dayanımını kaybettiği ve göçtüğü görülmüştür (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. USA90 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.

### 4.3. USBA90 Kirişi Eğilme Deneyi

U sarım ile yatay başlık ankrajlı şerit olacak şekilde sarılarak iki adet kiriş numunesi (USBA90) güçlendirilmiştir. U şeritlerin iki karşıt bitim ucundan geçerek yatay başlık uygulaması yapılmıştır. BFRP ankraj ile kiriş yüzeyine epoksi reçine kullanılarak yapıştırılan kirişler sabit hızlı yükleme uygulanarak dört noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur (Şekil 4.9.). Eğilme deneyi sırasında USBA90 kirişlerinin bir tanesinde yükleme hatası olduğu tespit edilmiş ve veri hatası olmayan kirişin verileri kullanılmıştır. Kiriş numunesinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.3. et' sunulmuş ve kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.3. USBA90 kirişine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.

Numune	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
USBA90	89,34	13,36	4,46



Şekil 4.9. USBA90 kiriş numunesinin eğilme deneyi.

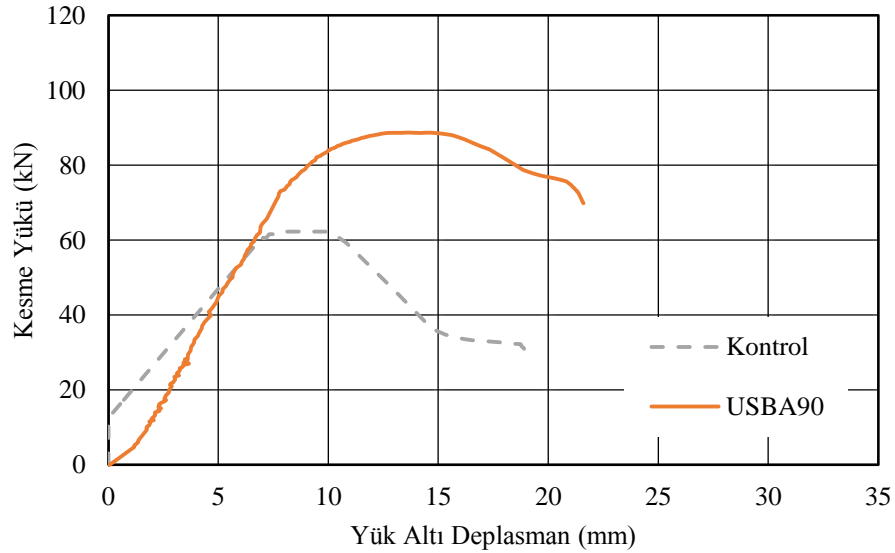
USBA90 kiriş numunesinde ortalama maksimum kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 89,34 kN, 13,36 mm ve 4,46 mm olarak bulunmuştur. USBA90 kiriş numunesi kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında maksimum kesme yükü taşıma kapasitesi artma olduğu görülmüştür. USBA90 kirişinin Kontrol kirişlere göre maksimum kesme yükünde %52,2, maksimum yüke karşılık gelen ortalama deplasman %48,1 ve ortalama çatlak açıklığı ise %12,9 artmıştır.

İlk çatlaklar oluşumları kirişin kesme bölgesinde meydana gelmiştir. Yükleme işlemine devam ettikçe yük, deplasman ve çatlak açıklığı artmıştır. Deney sırasında, kirişler nihai dayanımına ulaşıncaya kadar kiriş numunesinde yan yüzeylerdeki bazalt elyafı kirişin alt köşesine yakın olan alt bölgesinden kopmuş olup herhangi bir sıyrılmaya oluşmamıştır. (Şekil 4.10.).



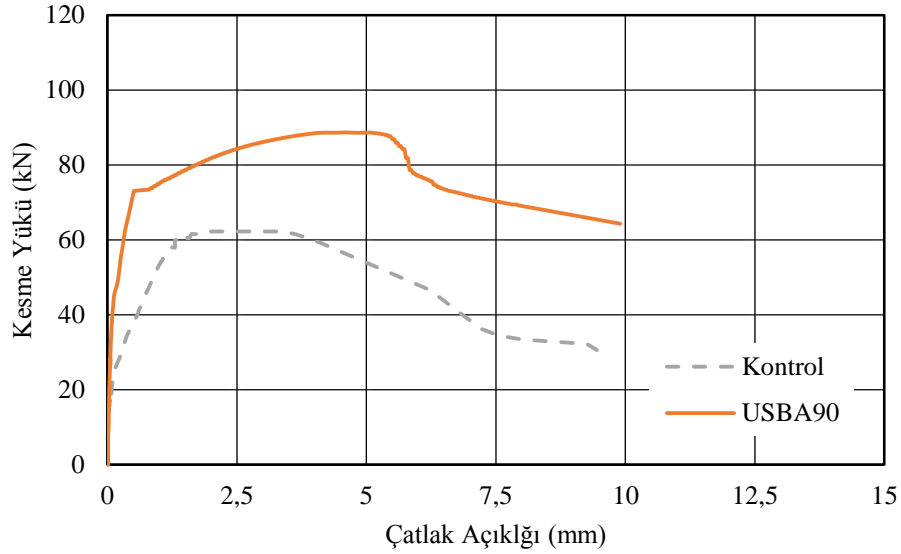
Şekil 4.10. USBA90 kiriş numunesinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.

Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş olup grafikler şekilde sunulmuştur (Şekil 4.11. ve 4.12.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, ilk yükleme başladığında lineer davranış şeklinde deplasman olduğu görülmüş, kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranış bozulmaya başlamış ve nihai dayanımdan sonra kiriş kesme kırılması ile göçmüştür. Kontrol kirişine göre USBA90 kiriş numunesinin eğilme rijitliğinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.11.).



Şekil 4.11. USBA90 kiriş numunesine ait yük – deplasman grafiği.

USBA90 kiriş numunesinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, yaklaşık 38 kN kesme yükünde ilk beton çatlak oluştuğu, oluşan bu çatlaktan sonra kesme yükü- çatlak açıklığı orantılı bir şekilde devam etmiştir. Maksimum kesme dayanıma ulaştıktan sonra ise kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.12.).



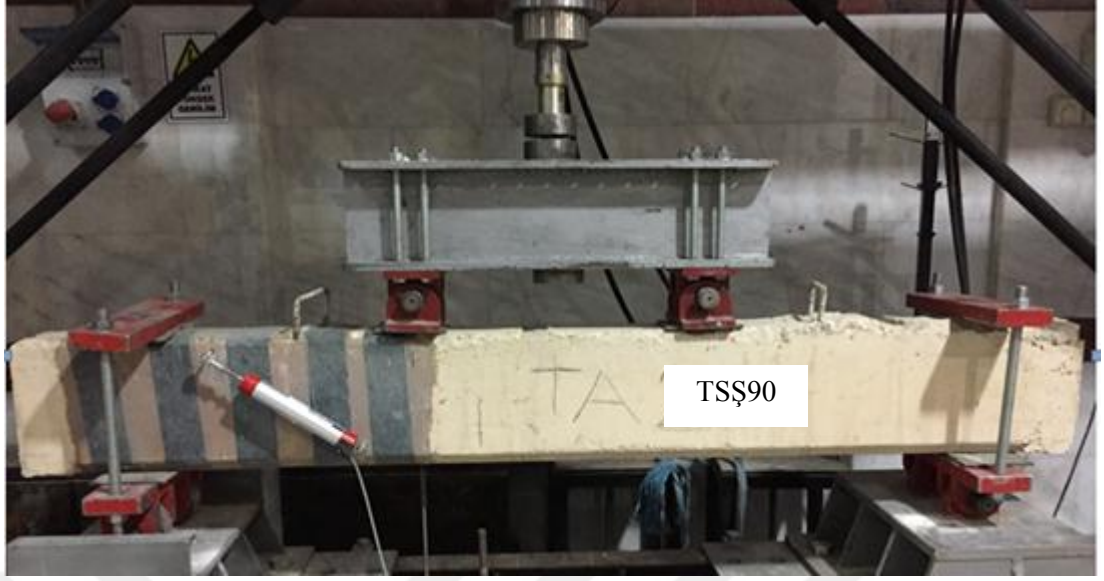
Şekil 4.12. USBA90 kiriş numunesine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.

#### 4.4. TSS90 Kirişi Eğilme Deneyi

Kiriş eksenine 90 derecelik aralıklı tam sarım şerit şeklinde (TSS90) güçlendirilen kirişlerden iki adeti dört noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur (Şekil 4.13.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.4. ev şumlunus et' kontrol kirişleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4. TSS90 kirişlerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.

Numune	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
TSS90-1	96,21	13,11	6,77
TSS90-2	99,87	13,50	6,31
Ortalama	98,04	13,31	6,54



Şekil 4.13. TSS90 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.

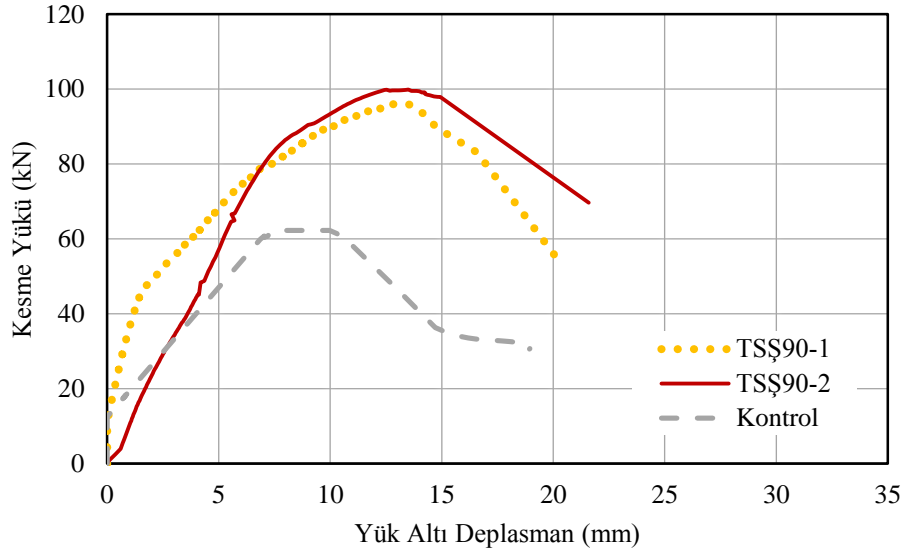
TSS90 kiriş numunelerinde ortalama kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 98,04 kN, 13,31 mm ve 6,54 mm olarak bulunmuştur. TSS90 kiriş numuneleri kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. TSS90 kirişlerin kontrol kirişlerine göre kesme dayanımları ortalama %67,1, kesme yüküne karşılık oluşan ortalama deplasman ve çatlak açıklığı sırasıyla %48,1 ve %65,6 oranında artma tespit edilmiştir.

Deney sırasında, kirişler nihai dayanımına ulaştınca TSS90-1 kirişinin yan yüzeyindeki bazalt elyaf şerit orta bölgesinden kopmuştur. TSS90-2 kirişinde ise elyaf üst bölgeden kopmuştur. Kirişlerde çekme bölgesinde beton örtüsü dökülmüş ve çekme donatısının aderans kaybı ile birlikte kesme çatlakları olduğu görülmüştür (Şekil 4.14.).



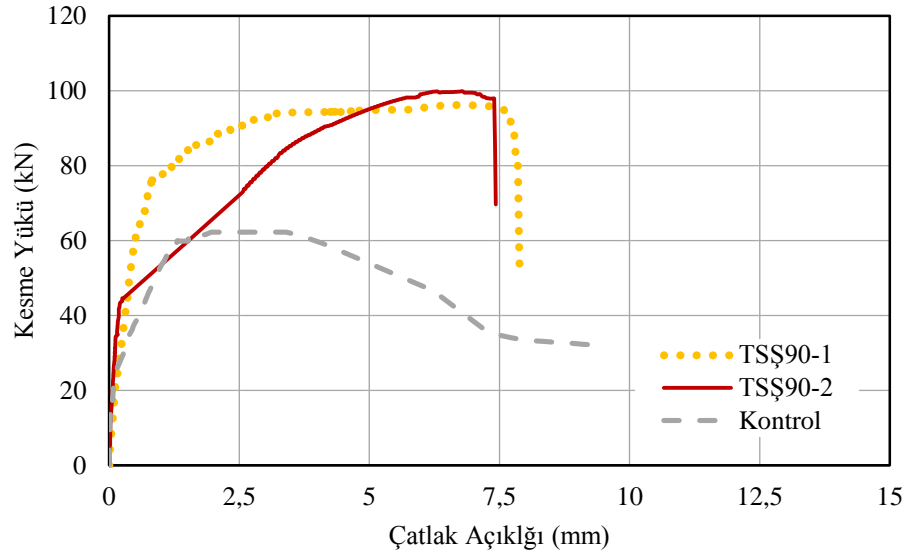
Şekil 4.14. TSS90 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deформasyon şekilleri.

Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikler şekilde sunulmuştur (Şekil 4.15. ve 4.16.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, deneye tabi tutulan 2 kirişlerden bir tanesinde yükleme başlangıcından sonra lineer davranış, diğer kirişte ise 14 kN kesme yükü öncesinde çok küçük deplasmanın olduğu ve bu yükten sonra kirişlerde orantılı bir davranış görülmektedir. TSS90 kiriş numunelerinde 78 kN kesme dayanımından sonra kiriş davranışları benzerlik göstermiş ve kiriş kesme dayanımına yaklaştığında ise bu davranış bozulmaya başlamış ve nihai dayanımdan sonra kirişler yenilmeye başlamıştır. Kontrol kirişlerine göre TSS90 kiriş numunelerinin eğilme rijitliklerinin de arttığı görülmüştür (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. TSS90 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.

TSS90 kiriş numunelerinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, kirişlerin davranışları yükleme başlangıcında birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Yaklaşık 44 kN kesme yükünde ilk beton çatlak oluşmuş olup bu yükten 92 kN kesme yüküne kadar kiriş davranışları farklılık gösterip orantılı bir şekilde devam etmiştir. TSS90-1 kirişinde tepe noktada yük artmazken deformasyonun arttığı ve sonrasında kirişin yenilmeye başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca TSS90-2 kirişinde ise maksimum kesme dayanıma ulaştığında ise kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. TSŞ90 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.

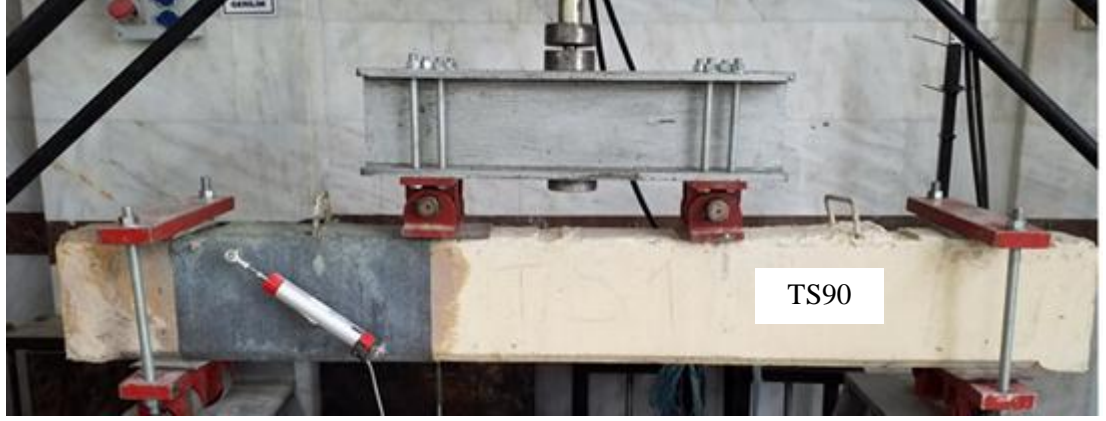
#### 4.5. TS90 Kirişi Eğilme Deneyi

Sürekli tam sarım yöntemi ile (TS90) güçlendirilen kirişlerden iki adeti dört noktalı eğilme deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur (Şekil 4.17.). Kiriş numunelerinin sayısal deney sonuçları Tablo 4.5.ve kontrol kirişleri ile şumlunus et' karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.5. TS90 kirişlerine ait kesme kuvvetine göre yük, deplasman ve çatlak açıklığı değerleri.

Numune	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)
1	110,03	11,93	2,02
2	101,58	11,99	2,44
Ortalama	105,81	11,96	2,23

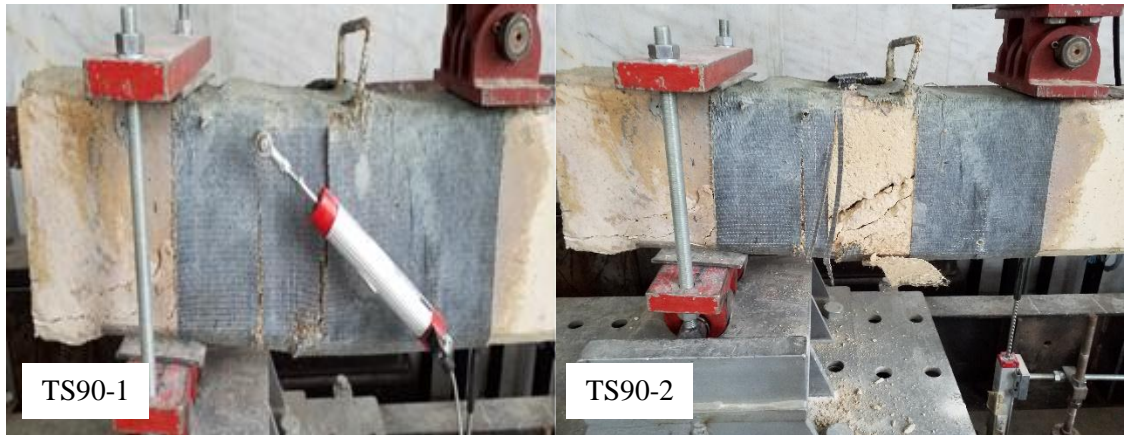




Şekil 4.17. TS90 kiriş numunelerinin eğilme deneyi.

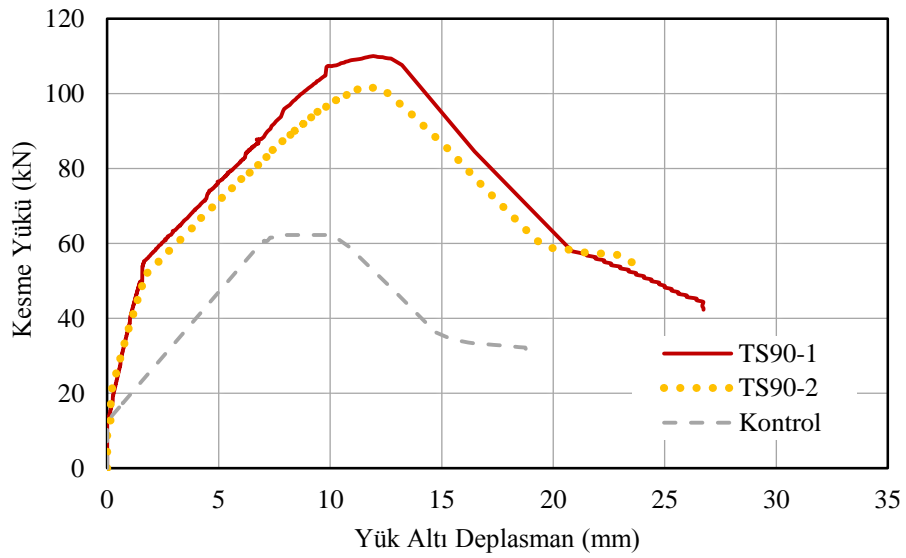
TS90 kiriş numunelerinde ortalama kesme yükü, yükleme altı deplasmanı ve çatlak açıklığı sırasıyla 105,81 kN, 11,96 mm ve 2,23 mm olarak bulunmuştur. TS90 kiriş numunesi kontrol kirişler ile karşılaştırıldığında kesme yükü taşıma kapasitesi artmıştır. TS90 kiriş numunesinin kontrol kirişlerine göre %80,3 daha yüksek kesme yüküne sahip olduğu tespit edilmiştir, kesme yüküne karşılık oluşan deplasmanda %33,1 artış ve çatlak açıklığında %43,5 oranında azalma olmuştur.

Deney sırasında, sabit hızlı yükleme arttıkça kesme çatlaklarının oluşması ve elyafın sıyrılması gözlenmemiştir. Kirişler nihai dayanımına ulaştığında yan yüzeylerdeki elyaf yırtılmıştır. Kirişlerde kesme kırılması ile ani bir şekilde göçme meydana geldiğinden deney sona erdirilmiştir (Şekil 4.18.).



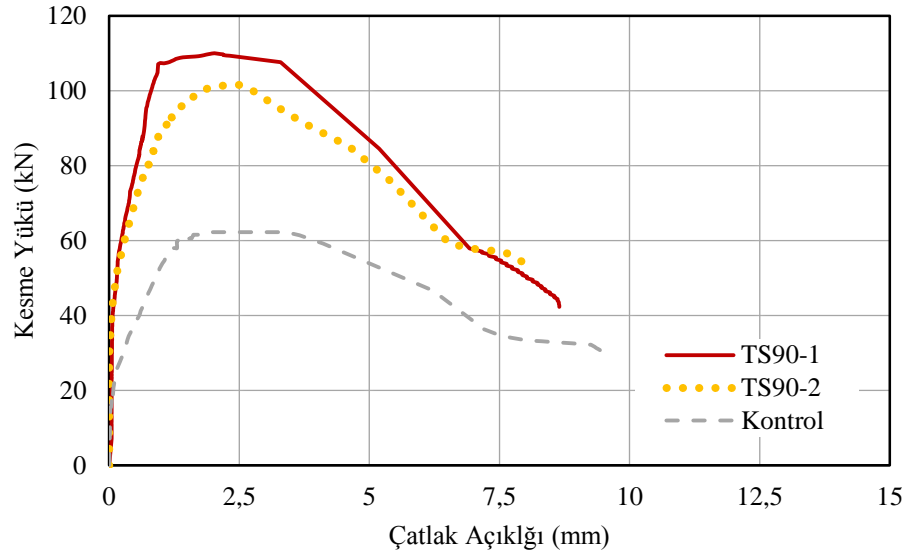
Şekil 4.18. TS90 kiriş numunelerinin yükleme sonrası deformasyon şekilleri.

Yapılan sabit hızlı yükleme sonucunda yük-çatlak açıklığı verileri elde edilmiş ve grafikleri sunulmuştur (Şekil 4.19. ve 4.20.). Kesme yükü ve yük altı deplasman grafiği incelendiğinde, 14 kN kesme yükünden itibaren deplasman olduğu izlenmiştir. TS90 kirişlerinin kesme yükü yaklaşık 50 kN olana kadar lineer bir davranış göstermiştir. Bu yükten maksimum kesme dayanımına ulaşmaya kadar kirişlerde orantılı bir davranış gözlenmiştir. Maksimum kesme dayanımına ulaştığında ise kiriş yenilmeye başlamıştır. Kontrol kirişine göre TS90 kiriş numunesinin eğilme rijitliğinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. TS90 kiriş numunelerine ait yük – deplasman grafiği.

TS90 kiriş numunelerinin kesme yükü – çatlak açıklığı grafiği incelendiğinde, kirişlerin davranışları yükleme başlangıcında birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Yaklaşık 42 kN kesme yükünde ilk beton çatlak oluşmuş olup bu yükten sonra kiriş davranışları orantılı bir şekilde devam etmiştir. TS90-1 kirişinde tepe noktada yük artmazken deformasyonun arttığı ve sonrasında kirişin yenilmeye başladığı gözlenmiştir. Ayrıca TS90-2 kirişinde ise maksimum kesme dayanımına ulaştığında ise kiriş dayanımını kaybetmeye başlamış ve göçmüştür (Şekil 4.20.).



Şekil 4.20. TS90 kiriş numunelerine ait yük – çatlak açıklığı grafiği.

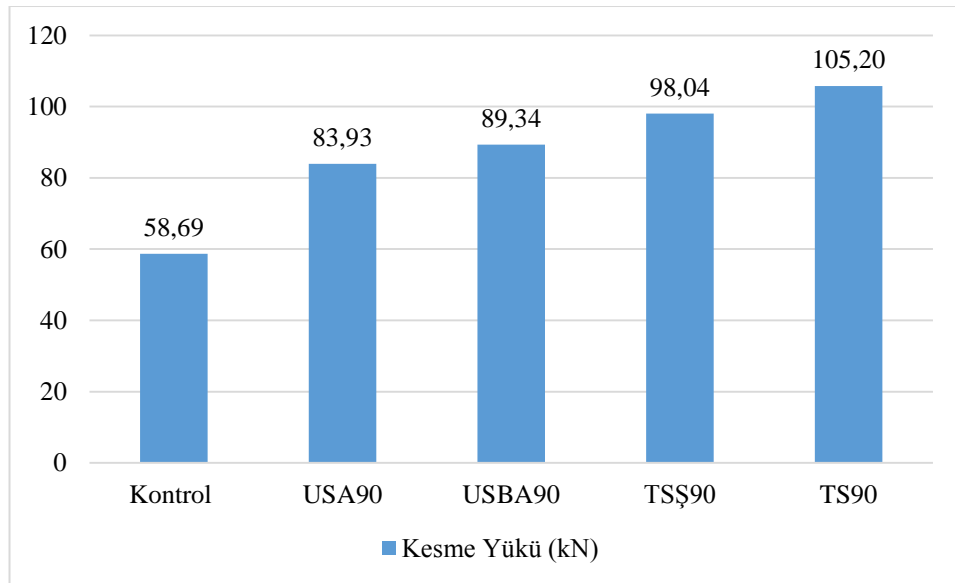
#### 4.6. Sonuçların Karşılaştırılması

Kontrol kirişlerin ve BFRP Kompozit ile kesmeye karşı güçlendirilen kirişlerin deney sonuçlarından elde edilen ortalama kesme yükü, çatlak açıklığı, yükleme altı deplasmanı ve göçme biçimleri Tablo 4.6.'da sunulmuştur. Kontrol kiriş numuneleri ve BFRP ile güçlendirilen kiriş numunelerine ait ortalama kesme yükü değişimleri Şekil 4.21.'de verilmiştir. Kiriş numunelerine ait ortalama deplasman ve çatlak açıklığı değişimleri Şekil 4.22.'de sunulmuştur.

Tablo 4.6. Kiriş numunelerin ortalama deneylerin sonuçları ve göçme şekilleri.

Kiriş Numunesi	Kesme Yüğü (V) (kN)	Yükleme Altı Deplasmanı (mm)	Çatlak Açıklığı (mm)	Göçme Şekli
Kontrol	58,69	8,99	3,95	Kesme göçmesi
USA90	83,93	13,38	2,99	Elyaf kopması + Kesme göçmesi
USBA90	89,34	13,36	4,46	Elyaf kopması + Kesme göçmesi
TSS90	98,04	13,31	6,54	Elyaf kopması + Kesme göçmesi
TS90	105,81	11,96	2,23	Elyaf kopması + Kesme göçmesi

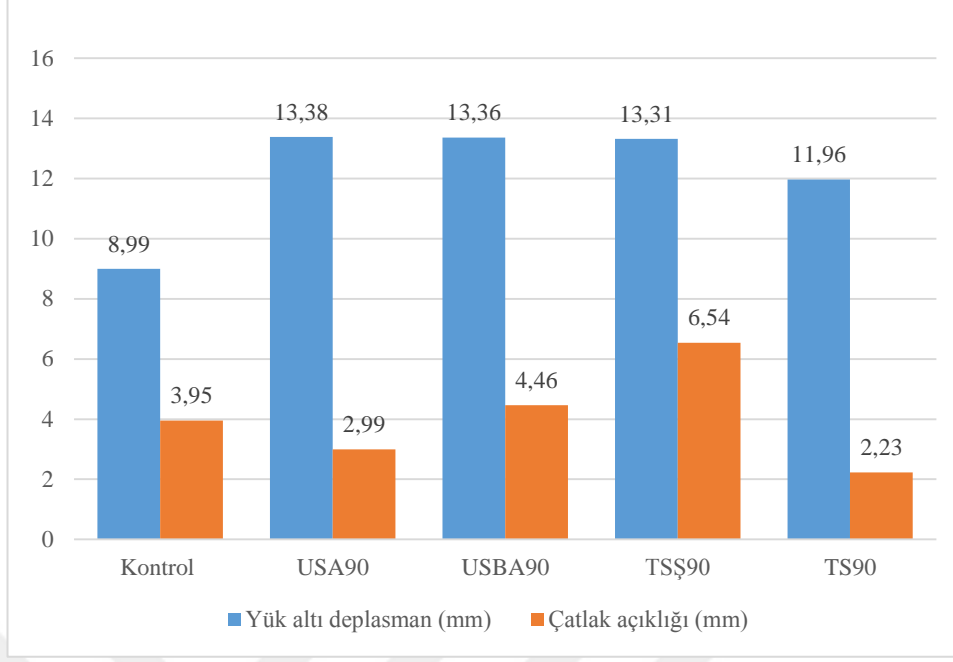
BFRP Kompozitler ile güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında kontrol kiriş numunelerine kıyasla kesme yükü kapasitelerinde önemli derecede artışlar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.21.). Kiriş yatay eksenine 90° açılı tam sarım sürekli kumaş (TS90) ve 90° açılı tam sarım şerit (TSS90) yöntemleri ile güçlendirilen kiriş numunelerinin kesme yükü taşıma kapasitelerinde diğer güçlendirilmiş kiriş numunelere göre daha büyük artışlar elde edilmiştir. TS90 ve TSS90 kirişlerinde kesme yükü taşıma kapasitesi kontrol kirişlerine göre sırasıyla ortalama %80,3 ve %67,1 artışlar görülmüştür. Ayrıca, bu iki kiriş kendi aralarında kıyaslandığında, TS90 kiriş numunelerinin kesme yükü taşıma kapasitesi %7,1 daha yüksek olduğu görülmüştür. En az kesme dayanım artışı olan kiriş, kiriş yatay eksenine 90° açılı U sarım şerit (USA90) yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunelerinde elde edilmiştir. USA90 kiriş numunelerinin kesme yükü taşıma kapasitesinde kontrol kirişlerine kıyasla ortalama %43,1 oranında artış görülmüştür. 90° açılı U sarım başlıklı ankrajlı (USBA90) yöntemi ile USA90 kiriş numunelerine göre %6,4 iyileşme sağlanmıştır. 90° açılı şerit yöntemleri ile güçlendirilen kiriş numuneler arasında en yüksek dayanım 90° açılı tam sarım şerit (TSS90) yönteminde elde edilmiştir. Genel olarak tam sarım ve ankrajlı güçlendirme yöntemlerinde kirişlerin kesme dayanımına elyafın katkısı maksimum olduğundan dolayı elyafta kopmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.21. Kiriş numunelerine ait ortalama kesme yükü değişimleri.

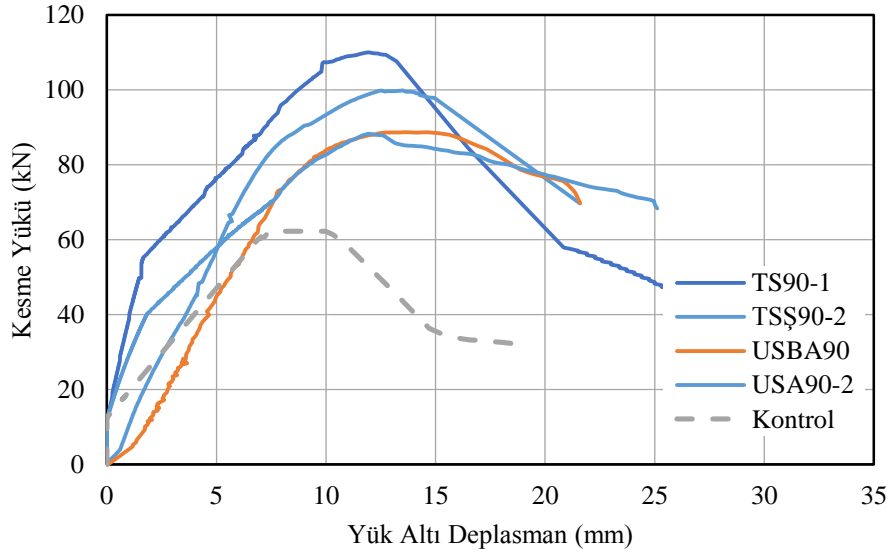
BFPR kompozitler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında kontrol kirişlere göre yükleme altı deplasman değerlerinde artmalar elde edilmiştir (Şekil 4.26.). Deneysel çalışmada kontrol kirişler ve güçlendirilmiş kirişlerin arasında 90° açılı U sarım ankrajlı yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunesi (USA90) en büyük yükleme altı deplasman yapan kiriştir. En küçük yükleme altı deplasman yapan kiriş ise, 90° açılı tam sarım (TS90) yöntemi ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur. USA90 kirişin, Kontrol, USBA90, TSS90 ve TS90 kirişlerine göre yükleme altı deplasmanı sırasıyla %48,8, %1,5, %5,3, ve %11,9 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. USBA90 ve TSS90 kirişlerinin kontrol kirişine kıyasla yükleme altı deplasman değerleri sırasıyla %48,6 ve %48,1 oranlarında artmıştır. Sonuç olarak kirişler maksimum kesme dayanımlarına daha fazla deplasman yaparak eriştikleri anlaşılmaktadır.

BFPR kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerden (TS90) ve (USA90) Kontrol kirişlerine göre maksimum kesme yüklerine karşılık gelen çatlak açıklığı değerlerinde azalmalar, (USBA90) ve (TSS90) kiriş numunelerinde ise artışlar elde edilmiştir (Şekil 4.26.). Deneysel çalışmada güçlendirilmiş kirişlerin arasında TSS90 en büyük çatlak açıklığına sahip olan kiriştir. En küçük çatlak açıklığına sahip kiriş ise (TS90) yöntemi ile güçlendirilen kiriştir. Maksimum kesme yüküne karşılık gelen çatlak açıklığı açısından, TS90 kiriş numunesinin, Kontrol, USA90, USBA90 ve TSS90 kiriş numunelere göre sırasıyla %43,5, %25,4, %100 ve %65,9 azalma tespit edilmiştir. TSS90 kirişlerinin ise, Kontrol, USA90, USBA90 ve TS90 kirişlerine göre sırasıyla ortalama %65,6, %118,7, %46,6 ve %193,3 oranlarında artış tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada BFRP ankrajlı şeritler ile uygulanan 2 farklı güçlendirme yöntemleri arasında, (USA90) yöntemi ile güçlendirilen kiriş numunelerinde (USBA90) yöntemine göre %32,9 oranında daha az çatlak açıklığı elde edilmiştir.

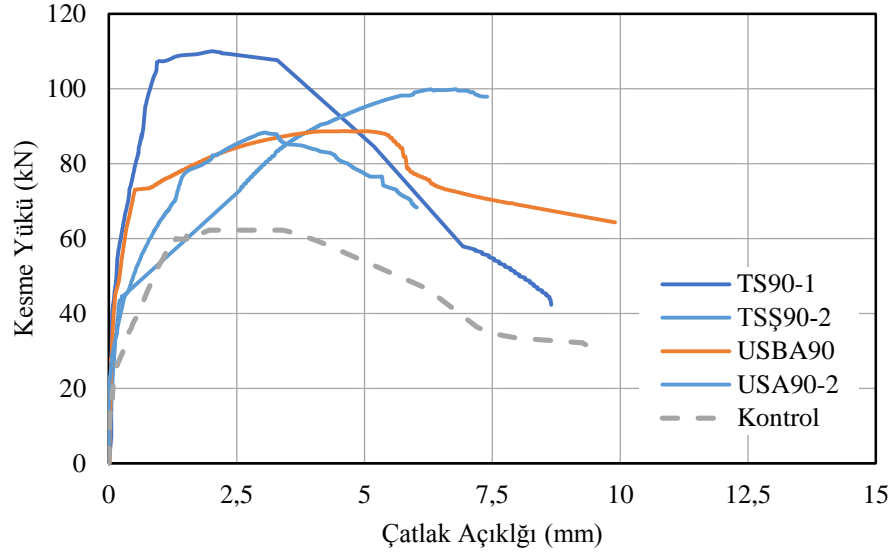


Şekil 4.22. Kiriş numunelerine ait ortalama deplasman ve çatlak açıklığı değişimleri.

Kontrol kirişlerine göre BFRP kompozitler ile güçlendirilen kiriş numunelerinin eğilme süneklikleri artmıştır (Şekil 4.23.). Genel olarak BFRP kompozit ile güçlendirilen tüm kiriş numuneler ortalama 40 kN kesme yükünde ilk çatlakların oluştuğu ve bu yükten sonra göçme olana kadar orantılı davranışlar görülmüştür (Şekil 4.24.).



Şekil 4.23. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-deplasman grafikleri.



Şekil 4.24. Kontrol kiriş ve BFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-çatlak açıklığı grafikleri.

#### 4.7. Deneysel Sonuçların Analitik Tahminlerle Karşılaştırılması

FRP kompozitler ile kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme kapasitelerindeki artışları hesaplamak üzere önerilen birçok yaklaşım ve yönetmelik bulunmaktadır. Bu bölümde deney sonuçlarının TBDY 2018, Fib-TG 9.3 ve İngiliz Betonarme Derneği (British Guidline) yönetmelikleri ile karşılaştırmalı olarak analizleri yapılmıştır. BFRP kompozitlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme dayanımlarından kontrol kirişlerinin kesme dayanımı çıkarılarak BFRP kompozitlerin kesmeye katkısı bulunmuştur ( $V_{f,test}$ ). Betonarme kirişlerin kesme dayanımı için deneysel ve analitik sonuçlar Tablo 4.7’de sunulmuştur.

Tablo 4.7. Deney sonuçları ve analitik sonuçlar.

Numune Adı	Deneysel Sonuçları			Analitik Sonuçlar					
	Göçme anındaki kesme Kuvveti (kN)	$V_c +$ (kN)	$f_{,t}$ (kN)	TBDY 2018		FIB-TG 9.3		İngiliz betonarme derneği (British Guidline)	
				$f_{,a}$ (kN)	$\frac{f_{,t}}{f_{,a}}$	$f_{,a}$ (kN)	$\frac{f_{,t}}{f_{,a}}$	$f_{,a}$ (kN)	$\frac{f_{,t}}{f_{,a}}$
Kontrol	58,69	58,69	-	-	-	-	-	-	-
USA90	83,93	58,69	25,24	10,17	2,48	20,11	1,26	9,8	2,58
USBA90	89,34	58,69	30,65	10,17	3,01	20,11	1,52	9,8	3,13
TSS90	98,04	58,69	39,35	13,15	2,99	61,93	0,64	13,16	2,99
TS90	125,20	58,69	66,51	21,9	3,04	88,55	0,75	21,93	3,03



Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tamamının kesme dayanımlarına en yakın tahmin eden Fib-TG 9.3 yönetmeliği olmuştur. Deneysel sonuçlara göre TBDY 2018 ve British Guidline yönetmeliklerinde BFRP kompozitin kesmeye katkısı 2 ila 3 kat daha düşük sonuçlar vererek güvenli tarafta kalındığı anlaşılmaktadır. FIB-TG 9.3 yönetmeliği ile hesaplanan BFRP kompozitin kesme dayanımına katkısı genel olarak yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ancak FIB-TG 9.3 yönetmeliğinde hesaplanan sonuçlar deney sonuçlarına göre tam sarım şerit ve sürekli tam sarım durumunda kesme dayanımı katkısı daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. TBDY 2018 ve British Guidline modeli ile tüm güçlendirme şekillerine göre BFRP kompozitlerin kesmeye katkısı genel olarak daha (emniyetli) düşük sonuçlar elde edilmiştir.



## BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kapsamında, Türkiye’de bulunan yapılarda sıklıkla karşılaşılan kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler dikkate alınarak dikdörtgen kesitli kirişler laboratuvar ortamında üretilmiştir. Kirişlerin BFRP kompozitler ile güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kirişlerin güçlendirilmesinde BFRP kompozitin ve ankrajlı sarım yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır. Ayrıca deney sonuçlarının mevcut hesap yöntemleri ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Kiriş numuneleri sabit hızlı yükleme altında dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Kiriş numunelerinin ortalama kesme dayanımları, deplasman kapasiteleri, kiriş yüzeyinde oluşan kesme çatlak açıklığı değerleri ve kesme deformasyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- 1- Kiriş numunelerinin tamamı tasarlandığı gibi kesme kırılması ile göçmüştür. BFRP kompozitler ile güçlendirilen tüm kiriş numunelerinin kesme dayanımları kontrol kiriş numunelerine göre önemli ölçüde artmıştır. Bu artış USA90 kiriş numunelerinde %43,11, USBA90 kirişlerinde %52,22, TSS90 kirişlerinde %67,05, TS90 kirişinde %80,29 oranında olmuştur.
- 2- USA90 kirişlerinde bazalt lifler tek şeritte ankraj kısmından ayrılmış ve lifler kiriş yüzeyinden betonu kopararak ayrılmıştır. Diğer güçlendirme yöntemlerinde ise bazalt lifler sıyrılmaya/ayrılma yapmayarak tam kapasitesi ile çalışmıştır.
- 3- USBA90 kiriş numunesi USA90 kiriş numunelerinden %6,37 oranında daha fazla maksimum kesme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiş ve (ankrajlı başlık) elyafın beton yüzeyinden sıyrılmaması/ayrılmamasını bir miktar önlemiştir.
- 4- Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tamamının kesme dayanımlarına en yakın tahmin eden Fib-TG 9.3 yönetmeliği olmuştur. Deneysel sonuçlara göre TBDY

2018 ve British Guidline yönetmeliklerinde BFRP kompozitin kesmeye katkısı 2 .ila .3 .kat .daha düşük sonuçlar vererek güvenli tarafta kalındığı anlaşılmaktadır.

- 5- BFRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişlerde kontrol kirişlerine göre beton ilk kesme çatlakları daha yüksek dayanımlarda oluştuğu görülmektedir. Güçlendirilen kirişlerin bir kısmında kontrol kirişlerine göre en yüksek kesme kuvvetine karşılık gelen çatlak açıklığı azalmış, bir kısmında ise çatlak açıklığı değerleri artmıştır. TS90 ve USA90 kirişlerinde kontrol kirişine göre sırasıyla çatlak açıklığı değerlerinde %43,54 ve %24,30 oranlarında azalma olmuştur. USBA90 ve TSS90 kirişlerinde ise kontrol kirişine göre sırasıyla çatlak açıklığı değerlerinde %12,91 ve %65,57 oranlarında artma olmuştur.
- 6- Kontrol kirişlerine göre BFPR kompozitler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında en yüksek kesme kuvvetine karşılık gelen deplasman değerleri artmıştır.
- 7- Literatür kısmında bulunan Khalifa ve Nanni (2002) ve Baggio ve ark. (2014) çalışmalarına göre bu çalışmada U sarım ankrajlı yöntemlerde elyafın beton yüzeyinden sıyrılmadığı/ayrılmadığı görülmektedir. Kiriş güçlendirmelerinde U sarım yöntemlerinde kullanılan ankraj uygulaması sıyrılmama/ayrılma durumunu engellediğinden dolayı elyaf tam kapasiteli çalışmıştır. Bundan dolayı U sarım ankrajlı güçlendirme yöntemlerinin kirişin kesme kuvveti taşıma gücü kapasitesine daha olumlu katkı sağladığı görülmektedir.
- 8- Son olarak, literatür çalışmasından anlaşıldığı üzere GFRP kompozit malzeme özelliklerine yakın özelliklere sahip ve CFRP kompozit malzemeye göre daha ekonomik olan BFRP kompozitlerin betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde ileriye dönük ümit verici alternatif bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] H. Sezen, A. S. Whittaker, K. J. Elwood, and K. M. Mosalam, “*Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey,*” Eng. Struct., vol. 25, no. 1, pp. 103–114, 2003.
- [2] H. Kaplan, S. Yilmaz, H. Binici, E. Yazar, and N. Çetinkaya, “*May 1, 2003 Turkey—Bingöl earthquake: damage in reinforced concrete structures,*” Eng. Fail. Anal., vol. 11, no. 3, pp. 279–291, 2004.
- [3] A. Dogangun, “*Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey,*” Eng. Struct., vol. 26, pp. 841–856, 2004.
- [4] A. Bayraktar et al., “*Structural Performance Evaluation of 90 RC Buildings Collapsed during the 2011 Van, Turkey, Earthquakes,*” J. Perform. Constr. Facil., vol. 29, no. 6, p. 4014177, 2013.
- [5] M. Tapan, M. Comert, C. Demir, Y. Sayan, K. Orakcal, and A. Ilki, “*Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey,*” Eng. Fail. Anal., vol. 34, pp. 606–628, 2013.
- [6] A. Bayraktar, A. C. Altunişik, and M. Pehlivan, “*Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes,*” Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 53, pp. 49–72, 2013.
- [7] E. Çelebi et al., “*October 23, 2011 Turkey/Van-Ercis earthquake: Structural damages in the residential buildings,*” Nat. Hazards, vol. 65, no. 3, pp. 2287–2310, 2013.
- [8] E. Damci, R. Temur, G. Bekdaş, and B. Sayin, “*Damages and causes on the structures during the October 23, 2011 Van earthquake in Turkey,*” Case Stud. Constr. Mater., vol. 3, pp. 112–131, 2015.
- [9] [http://w3.bilecik.edu.tr/insaat/wp-content/uploads/sites/28/2017/10/5\\_Yapilarda-Hasar-Betonarme-Yapi-Hasarlari.Pdf](http://w3.bilecik.edu.tr/insaat/wp-content/uploads/sites/28/2017/10/5_Yapilarda-Hasar-Betonarme-Yapi-Hasarlari.Pdf)

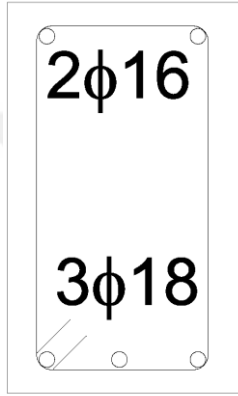
- [10] Khalifa A, Tumialan G, Nanni A, Belarbi A (1999) Shear strengthening of continuous RC beams using externally bonded CFRP sheets. Fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures. In: Dolan CW, Rizkalla SH, Nanni A (eds) *Proceedings of 4th international symposium, SP-188, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.*, pp 995-1008.
- [11] Li A, Assih J, Delmas Y (2001) Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets. *J Struct Eng* 127(4):374–380.
- [12] Rahimi, H., & Hutchinson, A. (2001). Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates. *Journal of composites for construction*, 5(1), 44-56.
- [13] Khalifa A, Nanni A (2002) *Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. Constr Build Mater* 16:135–146.
- [14] Antle, J. M., & Diagana, B. (2003). Creating incentives for the adoption of sustainable agricultural practices in developing countries: the role of soil carbon sequestration. *American Journal of Agricultural Economics*, 85(5), 1178-1184.
- [15] Taljsten B (2003) Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. *Constr Build Mater* 17(1):15–26.
- [16] Almusallam, T. H., & Al-Salloum, Y. A. (2006). Durability of GFRP rebars in concrete beams under sustained loads at severe environments. *Journal of composite materials*, 40(7), 623-637.
- [17] Sundarraja MC, Rajamohan S (2009) Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips an experimental study. *Constr Build Mater* 23(2):856–864.
- [18] Akbarzadeh, H., & Maghsoudi, A. A. (2010). Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials & Design*, 31(3), 1130-1147.
- [19] Attari, N., Amziane, S., & Chemrouk, M. (2012). Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 37, 746-757.
- [20] Baggio D, Soudki K, Noel M (2014) Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. *Constr Build Mater* 66:634–644.
- [21] Tokgöz, H., & Dündar, B. (2014). Kesme Yönünden Yetersiz Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Cfrp İle Güçlendirilerek Kesme Kapasitelerinin Arttırılması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3(2), 87-97.
- [22] A. Saribiyik ve N. Caglar, «Flexural strengthening of RC Beams with low-strength

concrete using GFRP and CFRP,» *Structural Engineering and Mechanics*, cilt 58, no. 5, pp. 825-845, 2016.

- [23] Köksal, H. O., ALTINSOY, F., Aktan, S., Karahan, Ş., & Çankaya, R. (2017). Üç Noktalı Eğilme Altındaki Betonarme Kirişlerde Karbon Lifli Polimerin Etkin ve Ekonomik Kullanımı. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 1-16.
- [24] Berozashvili M. Continuous reinforcing fibers are being offered for construction, civil engineering and other composites applications. *Adv Mater Com News, Compos Worldwide 2001*;21(6):5–6.
- [25] Demir, A., Ergüt, A., & Yüksel, B. *Betonarme Kirişlerin Kesme Güçlendirilmesi İçin Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması*.
- [26] Qureshi, H. J., & Saleem, M. U. (2018). Flexural and Shear Strain Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Adhered to a Concrete Surface. *Materials*, 11(12), 2596.
- [27] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2108)  
<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>
- [28] Fédération internationale du béton, 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Task Group 9.3, *Bulletin No. 14, Lausanne, Switzerland*.
- [29] Triantafillou TC, Antonopoulos CP. Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP. *J Compos Construct* 2000;4(4):198 205.
- [30] *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures. Brusselc: CEN, 2004.*

## EKLER

### Ek 1. Kiriş Numunelerin Dayanım Hesaplamaları



$$= 30 \text{ mm} \quad \text{C16,S420,S360}$$

$$d = 220 \text{ mm} \quad f_{ck} = 16, f_{yk} = 420, f_{ctk} = 1.4$$

$$f_{ywk} = 360 \quad L = 1,6 \text{ m}$$

$$2 \quad 16 \quad (A'_s \quad 402 \text{ mm}^2)$$

$$3 \quad 18 \quad = 763 \text{ mm}^2$$

Kiriş numunesinin basınç donatısı oranı:

$$\rho' = \frac{A'_s}{s} = 0,0122$$

Kiriş numunesinin çekme donatısı oranı:

$$\rho = 0,023$$

Minimum donatı oranı:

$$\rho_{min} = 0,8 \frac{ctd}{f_{yk}} = 0,0027$$

$$\rho \text{ in koşulu : } \rho = 0,023 \quad \rho_{min} = 0,0027 \text{ (sağlanmıştır)}$$

Dengeli donatı oranı:

$$\rho_{dengeli} = 0,85 k_1 \frac{ctd}{f_{yk}} \left( \frac{f_{yk}}{f_{ctk}} \right) = 0,016$$

Çekme ve basınç donatıları oranları farkı:  $\rho - \rho' = 0,0108$

in koşulu:  $\rightarrow \{0,85 \rightarrow , < ? \{0,0136$  (sağlanmıştır)

Basınç donatısının akıp akmadığının kontrolü:

$$\rightarrow \left(0,85 \frac{f_{cd}}{f_y}\right) \left(\frac{c-d}{-f_y}\right) \rightarrow 0,0108 < 0,0125 \text{ (donatı akmamıştır)}$$

Denge denklemi:

$$F_c = F'_s = F_s \rightarrow 0,85 f_{cd} c = A'_s \sigma'_s$$

$$\sigma'_s = \left(\frac{c-d}{c}\right)$$

$$\left(0,85 f_{cd}\right) c^2 = \left(600 \frac{c-d}{c}\right) c = \left(A'_s\right) \left(\frac{c-d}{c}\right)$$

İkinci dereceden denklemin çözümünden:

$$c_{1,2} = \frac{A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4A_1A_3}}{2A_1}$$

İkinci derece denklemin katsayıları:

$$1734, A_2 = -79260, A_3 = 236$$

Denklemin kökleri:

$$c_{1,2} = 53,5$$

Basınç bloğu derinliği  $\rightarrow a = k_1 c = 0,85 * 53,5 = 45,48$

Basınç donatısındaki gerilme:  $\sigma'_s = \left(\frac{c-d}{c}\right) = 263,55 \text{ N/m}^2$

$$M = \left(A_s A'_s \sigma'_s\right) \left(d - \frac{a}{2}\right) = 62,44 \text{ kN.m}$$

$$M = \left(P \cdot l\right) \rightarrow P = 234,15 \text{ kN.m}$$

Kiriş numunesi kesme dayanım hesaplaması;

$$V_c = \frac{c}{\sqrt{c}} \text{ kN}$$

$$= 39,8 \text{ kN}$$

$$\left(\frac{P}{2} = 61,8 \text{ kN} \rightarrow P = 123,6 \text{ kN}\right)$$



## ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Talha BALCI, 07.11.1992'de Sivas'ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sivas'ta tamamladı. 2010 yılında Sivas Lisesi'nden mezun oldu. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını başladı.