



**KESME YETERSİZ VE DÜŞÜK DAYANIMLI BETONARME KİRİŞLERİN
FRP KOMPOZİTLERİ KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMESİ**

Emine BULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Emine BULUT

23/10/2024

KESME YETERSİZ VE DÜŞÜK DAYANIMLI BETONARME KİRİŞLERİN FRP KOMPOZİTLERİ KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Emine BULUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Bu çalışmada, CFRP, BFRP ve PET-FRP lifli polimer malzemeler ile güçlendirilen kesme yetersiz betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Kirişler 150x300 mm enkesitli ve 4000 mm uzunluğunda olmak üzere; özdeş geometriye ve donatıya sahip olarak düşük dayanımlı beton ve düz donatı kullanılarak üretilmiştir. Kullanılan boyuna donatı çapı Ø12 ve etriye donatısı çapı ise Ø6'dır. Beton dayanımı 8,5 MPa'dır. Toplamda altı adet kiriş üretilmiştir. Kirişlere monotonik artan yük etkisi altında dört nokta yüklemesi yapılmıştır. Bir adet kiriş güçlendirilmemiştir, bu kiriş kontrol elemanı (referans eleman) olarak belirlenmiştir. Beş adet kesme yetersiz kirişe güçlendirme yapılmıştır. Bu kirişler tam sargı CFRP, şerit sargı CFRP, tam sargı BFRP, şerit sargı BFRP ve tam sargı PET-FRP yapılarak güçlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre kirişlerin yük-deplasman eğrileri, süneklik ve enerji tüketim kapasiteleri incelenmiştir. CFRP, BFRP ve PET-FRP'nin düşük dayanımlı betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerindeki etkinlikleri karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91130
Anahtar Kelimeler : CFRP, BFRP, PET-FRP, güçlendirme, betonarme kiriş.
Sayfa Adedi : 85
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nalan KAYA

STRENGTHENING OF SHEAR-DEFICIENT AND LOW-STRENGTH REINFORCED
CONCRETE BEAMS USING FRP COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Emine BULUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

In this study, the behavior of shear-deficient reinforced concrete beams strengthened with CFRP, BFRP and PET-FRP materials was examined. The beams have a cross section of 150x300 mm and a length of 4000 mm; they were produced using low-strength concrete and plain reinforcement with identical geometry and reinforcement. The diameter of the longitudinal reinforcement used is Ø12 and the diameter of the stirrup reinforcement is Ø6. Concrete compressive strength was 8.5 MPa. A total of six beams were produced. The beams were tested monotonically under four-point bending up to failure. One beam was not strengthened and this beam was designated as the control element (reference element). Five shear deficient beams were strengthened. These beams were strengthened by making full wrap CFRP, strip wrap CFRP, full wrap BFRP, strip wrap BFRP and full wrap PET-FRP. According to the results obtained from the experiments, the load-displacement curves, ductility and energy consumption capacities of the beams were examined. The effectiveness of CFRP, BFRP and PET-FRP on strengthening low-strength reinforced concrete beams was compared.

Science Code : 91130
Key Words : CFRP, BFRP, PET-FRP, concrete beam, strengthening.
Page Number : 85
Supervisor : Dr. Lecturer Nalan KAYA

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında yapmış olduğum çalışmaların planlamasında ve yürütülmesinde, görüő, tavsiye ve desteklerini esirgemeyen tecrübesini, bilgi ve birikimlerini sunan değerli danışman hocam sayın Dr. Nalan KAYA' ya ve değerli hocam sayın Dr. Yağmur KOPRAMAN' a çok teşekkür ederim.

Proje numarası 8725 olan çalıőmamı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teőekkürlerimi sunarım.

Malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen Kordsa' ya ve z-Yapıt Mühendislik' e teőekkürü bir borç bilirim.

Bu günlere gelmeme vesile olan ve her koőulda destekçim olan sevgili annem Fadime BULUT' a ve babam Baki BULUT' a, desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen ve hep yanımda olan sevgili kardeőlerim Esin BULUT' a ve Emre BULUT' a, çalıőmam kapsamında bilgi ve birikimini benimle fedakarca paylaőan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen daima yanımda olan sevgili arkadaőım Emre BİÇER' e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	7
3. ONARIM VE GÜÇLENDİRME	17
3.1. Onarım ve Güçlendirme Nedir?	17
3.2. Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri.....	17
3.2.1. Betonarme mantolama ve betonarme perde ilavesi	17
3.2.2. Çelik konstrüksiyon	18
3.2.3. FRP sistem ile güçlendirme	18
3.2.4. Kompozit sistemler	18
3.3. Lifli Polimer Malzemeler.....	18
3.3.1. Lifli polimer malzemelerin avantajları	19
3.3.2. Lifli polimer malzemelerin dezavantajları	19
3.3.3. BFRP, CFRP, PET-FRP üretim basamakları ve özellikleri	19
4. KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞI.....	23
4.1. Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışı	23

	Sayfa
4.2. Betonarme Kirişlerin a/d Oranına Göre Kırılma Türleri	24
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	27
5.1. Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	27
5.1.1. Beton.....	27
5.1.2. Donatı.....	28
5.1.3. Lifli polimer malzemeler.....	28
5.1.4. Epoksi.....	30
5.2. DeneY Elemanlarının Üretilmesi	31
5.2.1. Kiriş numunelerin üretilmesi	31
5.2.2. FRP kompozitleri ile kirişleri sargılama işleMi	35
6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMEİ.....	41
6.1. N-1 Numaralı Kiriş Elemanı DeneY Sonuçları ve Değerlendirmesi	41
6.2. N-2 Numaralı Kiriş Elemanı DeneY Sonuçları ve Değerlendirmesi	46
6.3. N-3 Numaralı Kiriş Elemanı DeneY Sonuçları ve Değerlendirmesi	49
6.4. N-4 Numaralı Kiriş Elemanı DeneY Sonuçları ve Değerlendirmesi	53
6.5. N-5 Numaralı Kiriş Elemanı DeneY Sonuçları ve Değerlendirmesi	58
6.6. N-6 Numaralı Kiriş Elemanı DeneY Sonuçları ve Değerlendirmesi	62
6.7. Kirişlerin DeneY Sonuçlarının Karşılaştırılması	67
7. ANALİTİK HESAPLAR.....	71
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Beton karışım oranı.....	27
Çizelge 5.2. FRP kompozitleri ile sargılanan kiriş elemanların sargılama düzenleri	36
Çizelge 6.1. Referans eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar	47
Çizelge 6.2. N-2 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar	49
Çizelge 6.3. N-3 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar	53
Çizelge 6.4. N-4 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar	57
Çizelge 6.5. N-5 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar	62
Çizelge 6.6. N-6 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar	66
Çizelge 6.7. Tüm kiriş elemanları için deneylerden elde edilen sonuçlar	67
Çizelge 7.1. TBDY 2018'e göre kapasite hesapları	72
Çizelge 7.2. ACI440.2R.17'ye göre kapasite hesapları	73
Çizelge 7.3. Deney sonuçları ve analitik hesaplardan elde edilen kesme kapasite değerleri	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Kesme yetersiz kirişte oluşan moment ve kesme diyagramı	23
Şekil 4.2. Kiriş davranışına $7,0 < a_v/d$ oranının etkisi	24
Şekil 4.3. Kiriş davranışına $3.0 < a_v/d < 7.0$ oranının etkisi	24
Şekil 4.4. Kiriş davranışına $1.5 < a_v/d < 3.0$ oranının etkisi	25
Şekil 4.5. Kiriş davranışına $a_v/d < 1.5$ oranının etkisi	25
Şekil 5.1. Deney düzeneği ve deney elemanı donatı planı	32
Şekil 5.2. Tam sargı FRP uygulama şeması	36
Şekil 5.3. Şerit FRP uygulama şeması	37
Şekil 6.1. N-1 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi.....	44
Şekil 6.2. N-1 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği.....	45
Şekil 6.3. N-2 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi.....	48
Şekil 6.4. N-2 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği.....	48
Şekil 6.5. N-3 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi.....	52
Şekil 6.6. N-3 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği.....	52
Şekil 6.7. N-4 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi.....	56
Şekil 6.8. N-4 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği.....	56
Şekil 6.9. N-4 kirişi yük-birim deformasyon grafiği	57
Şekil 6.10. N-5 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi.....	60
Şekil 6.11. N-5 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği.....	61
Şekil 6.12. N-5 kirişi yük-birim deformasyon grafiği	61
Şekil 6.13. N-6 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi.....	65
Şekil 6.14. N-6 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği.....	65
Şekil 6.15. N-6 kirişi yük-birim deformasyon grafiği	66

Şekil	Sayfa
Şekil 6.16. Referans eleman ve lifli polimerlerle güçlendirilen kirişlerin yük-açıklık ortası deplasman eğrileri karşılaştırılması	68
Şekil 6.17. Referans eleman ve lifli polimerlerle güçlendirilen kirişlerin tüketilen enerji ve açıklık ortası deplasman eğrileri karşılaştırılması.....	69



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Kahramanmaraş depremleri sonucu kirişlerde oluşan kesme hasarları-1	2
Resim 1.2. Kahramanmaraş depremleri sonucu kirişlerde oluşan kesme hasarları-2	3
Resim 1.3. Kahramanmaraş depremleri sonucu kirişlerde oluşan kesme hasarları-3 ...	3
Resim 1.4. Kahramanmaraş depremleri sonucu kısa kirişte oluşan kesme hasarı	4
Resim 1.5. Kısa kirişte oluşan kesme hasarı-1	4
Resim 1.6. Kısa kirişte oluşan kesme hasarı-2	4
Resim 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan BFRP malzeme	20
Resim 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan CFRP malzeme	21
Resim 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan PET-FRP malzeme	22
Resim 5.1. Kupon elemanların her iki yüzeyine epoksi uygulanması	29
Resim 5.2. Kupon elemanların her iki ucunun birbiri üzerine katlanması	30
Resim 5.3. Sika sikadur 330 iki bileşenli epoksi	31
Resim 5.4. Kalıpların hazırlanması	33
Resim 5.5. Kalıplara donatıların yerleştirilmesi	33
Resim 5.6. Hazır beton dökümünün yapılması.....	34
Resim 5.7. Hazır beton dökümünün tamamlanması	34
Resim 5.8. Kirişlerin kalıptan çıkarılması	35
Resim 5.9. N-2 numaralı kirişin hazırlanması	38
Resim 5.10. N-2 numaralı kirişin CFRP sargılaması sonucu nihai hali.....	38
Resim 5.11. N-3 numaralı kirişin BFRP sargılaması sonucu nihai hali.....	39
Resim 5.12. N-4 numaralı kirişin CFRP sargılaması sonucu nihai hali.....	39
Resim 5.13. N-5 numaralı kirişin BFRP sargılaması sonucu nihai hali.....	40
Resim 5.14. N-6 numaralı kirişin PET-FRP sargılaması sonucu nihai hali.....	40

Resim	Sayfa
Resim 6.2. Kiriş açıklık ortasına yerleştirilen LVDT	42
Resim 6.3. Deney düzeneği.....	43
Resim 6.4. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonlar	43
Resim 6.5. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali	44
Resim 6.6. Deney düzeneği.....	46
Resim 6.7. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali	46
Resim 6.8. Kirişte oluşan eğilme çatlakları, boyuna donatının burkulması ve betonun ezilmesi	47
Resim 6.9. Kirişte bulunan boyuna donatının burkulması ve betonun ezilmesi	47
Resim 6.10. Deney düzeneği	50
Resim 6.11. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonlar	50
Resim 6.12. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali	51
Resim 6.13. Kirişte oluşan çatlak	51
Resim 6.14. Deney düzeneği	54
Resim 6.15. Kiriş sağ ve sol kesme açıklığına yerleştirilen gerinim pulları.....	54
Resim 6.16. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonlar	55
Resim 6.17. Kirişte bulunan boyuna donatının burkulması ve betonun ezilmesi	55
Resim 6.18. Deney düzeneği	58
Resim 6.19. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali	59
Resim 6.20. Kirişte oluşan çatlak ve şeritlere konulan strain gauges	59
Resim 6.21. Sol mesnette oluşan beton ezilmesi.....	60
Resim 6.22. Deney düzeneği	63
Resim 6.23. Kiriş sağ ve sol kesme açıklığına yerleştirilen gerinim pulları.....	63
Resim 6.24. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali	64
Resim 6.25. Sağ mesnette oluşan beton ezilmesi	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A_f	FRP şerit enkesit alanı
A_{sw}	Enine donatı toplam kesit alanı
a_v	Kesme açıklığı
b_w	Kiriş kesit genişliği
cm	Santimetre
d	Kiriş faydalı yüksekliği
E_f	FRP elastisite modülü
f_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{ctk}	Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı
f_{ctd}	Beton tasarım eksenel çekme dayanımı
f_{ywd}	Enine donatı tasarım akma dayanımı
f_f	FRP şerit kopma gerilmesi
m^2	Metrekare
mm	milimetre
M	Moment
n_f	Tek yüzdeki FRP sayısı
s	Etriye aralığı
s_f	FRP şerit aralığı
t_f	FRP etkili kalınlığı
V	Kesme
V_c	Betonun kesme kuvvetine katkısı
V_r	Toplam kesme kuvveti
V_s	Enine donatının kesme kuvvetine katkısı
V_f	FRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısı
w_f	FRP şerit genişliği
ϵ_f	FRP birim uzaması

Simgeler**Açıklamalar** θ

Kiriş eksenine ile FRP şerit yapıştırılma açısı

 Ψ

FRP katkısı azaltma faktörü

 ϕ

Dayanım azaltma faktörü

Kısaltmalar**Açıklamalar****BFRP**

Bazalt Lif Takviyeli Polimer

CFRP

Karbon Lif Takviyeli Polimer

GFRP

Cam Lif Takviyeli Polimer

PET-FRP

Polietilen Elyaf Takviyeli Polimer

TMMOB

Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği

1. GİRİŞ

Yapıların taşıyıcı sistemleri, yapının kendi ağırlığını ve üzerine gelen yükleri güvenli bir biçimde zemine aktarabilmelidir. Yapı taşıyıcı sistemlerinin üzerine etki eden yüklere direnmelerine dayanım denilmektedir. Yapılarda yeterli dayanımın sağlanması için; kesit boyutlarının üzerine gelen yükleri taşıyabilecek kapasitede olması, bu kesitlere konulacak donatıların ilgili yönetmeliklere göre yeterli olacak şekilde tasarlanması, elemanların kesme dayanımının yeterli olması (sargılama donatısı uygun olmalı) gerekmektedir [1].

TÜİK verilerine bakıldığında Türkiye’de yaklaşık olarak 20 milyon yapı bulunmaktadır. TMMOB’un yayımladığı “6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri Raporu” na göre bu yapıların %60’ının 25 yaşında ve bu yaşın üzerinde olduğu, mühendislik hizmeti olmaksızın ya da kısmen mühendislik hizmeti olarak üretildikleri ve bu sebeple de çoğununun ruhsatsız olduğu görülmüştür. Bu yapıların çoğuna güçlendirme yapılmasının gerektiği ve önemli sayıda yapının yıkılıp tekrar yapılmasının zorunlu olduğu tespit edilmiştir. Buna ilaveten 2000 yılı öncesi yapılan yapılar mühendislik hizmeti olarak üretilmiş olmalarına rağmen, 1975’ te yayımlanan “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar” yönetmeliğinde bulunan kurallara uygun olarak yapıldıkları için, o zamanın koşullarında yapıların taşıyıcı sistemlerinde kullanılan beton ve çelik malzeme kalitesinin yetersiz olması ve günümüzde istenilen bina performans düzeyini karşılayamayacak durumda olmaları sebebiyle bu yapıların büyük bir bölümü sorunlu veya yetersiz olarak değerlendirilebilir. Yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin yetersiz olduğu 30 Ekim 2020’de vuku bulan İzmir depreminde de gözlemlenmiştir. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası’ nın yayımladığı “İzmir Deprem Raporu” na göre, toptan göçen binaların beton kalitesinin düşük olduğu, kullanılan donatıların nervürlü olmayıp düz yüzeyli olduğu ve etriyelerin uygun bir biçimde kullanılmadığı görülmüştür.

Türkiye deprem tehlike haritasına bakıldığında, Türkiye topraklarının büyük bir kısmının deprem tehlikesi olan bölgeler olduğu görülmüştür. Ülkemizde yaşanan depremler sonrası hasar almış yapılarda oluşan kiriş kesme çatlakları Resim 1.1., Resim 1.2., Resim 1.3., Resim 1.4., Resim 1.5. ve Resim 1.6.’ da verilmiştir. Kesme kırılması, gevrek bir kırılma türüdür. Aniden oluşur ve bunun oluşumu istenmez.



Resim 1.1. Kahramanmaraş depremleri sonucu kirişlerde oluşan kesme hasarları-1 [2]



Resim 1.2. Kahramanmaraş depremleri sonucu kirişlerde oluşan kesme hasarları-2 [2]



Resim 1.3. Kahramanmaraş depremleri sonucu kirişlerde oluşan kesme hasarları-3 [2]

Resim 1.1. Resim 1.2. ve Resim 1.3.'te bulunan kirişlerin kesme hasarına uğramalarının nedeni; düşük kaliteli betonun kullanılması ve etriyelelerin yeterli bir biçimde uygulanmamasıdır.



Resim 1.4. Kahramanmaraş depremleri sonucu kısa kirişte oluşan kesme hasarı [3]

Resim 1.4.'te Antakya'da bulunan bu binanın kirişinin boyutunun yetersiz olması sebebiyle kiriş kesme hasarına uğramıştır.



Resim 1.5. Kısa kirişte oluşan kesme hasarı-1 [4]



Resim 1.6. Kısa kirişte oluşan kesme hasarı-2 [4]

Resim 1.5. ve Resim 1.6.’ da kolonların birbirine çok yakın olması kısa kiriş oluşumuna sebep olmuştur. Bu kirişlerde moment kolu yeterli değildir ve bu sebeple kiriş kesme hasarına uğramıştır.

TMMOB’un yayımladığı “6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri Raporu” na ve “İzmir Deprem Raporu”na ve oluşan depremlere bakılarak ülkemizin mevcut yapı stoğu incelendiğinde, yapılarda düşük dayanımlı beton ve düz donatı kullanıldığı görülmüştür. Bu yapıların depreme dayanıklı hale getirilebilmesi için en hızlı çözüm olan güçlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Güçlendirme yöntemleri arasında hem uygulanabilme kolaylığı hem yapıya ek yük getirmemesi gibi nedenlerle lifli polimer malzemeler tercih edilebilir. Elbette güçlendirmede kullanılan malzemeler ve metotlar, yapı ve yapı elemanlarının gereksinimlerine göre seçilmelidir. Lifli polimerlerin çekme dayanımı/ağırlık oranının büyük olması, elastisite modülünün yüksek olması, korozyona karşı direncinin fazlalığı, montaj kolaylığı gibi özellikleri ile yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde kullanımı giderek artmıştır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmada, farklı tip lifli polimerlerle güçlendirilen kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Ülkemiz yapı stokundaki eski yapıları temsilen düşük dayanımlı ve düz donatı kullanılarak üretilen betonarme kirişler, farklı FRP çeşitleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ve BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) ile yeni nesil lifli polimerlerden PET-FRP (Polyethylene Terephthalate Fiber Reinforced Polymer) kullanılmıştır. Farklı mekanik özelliklere ve üretim sürecine sahip bu malzemelerin düşük dayanımlı kirişlerin davranışı üzerinde yapmış olduğu etkiler incelenmiştir.

Yukarıda amacı belirtilen bu tez çalışması aşağıda belirtilen sekiz bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm: Konunun öneminin anlatıldığı giriş bölümü ve çalışmanın amaç ve kapsamını,

İkinci bölüm: Konuyla ilgili literatürde yer alan çalışmaların incelendiği literatür taramasını,

Üçüncü bölüm: Onarım ve güçlendirmenin tanımını, onarım ve güçlendirme yöntemlerini, onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanılan lifli polimer malzemelerin avantaj ve dezavantajlarını, bu çalışma kapsamında kullanılan FRP kompozitlerinin üretim basamaklarını,

Dördüncü bölüm: Betonarme kirişlerin kesme davranışını,

Beşinci bölüm: Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmayı,

Altıncı bölüm: Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarını

Yedinci bölüm: Teknik şartnamelere göre yapılan kiriş kapasite hesaplarını ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasını,

Sekizinci bölüm: Tez çalışmasından elde edilen sonuçları içermektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Özellikle betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde ve onarımında lifli polimerler gibi kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Araştırma ve tasarım sonuçları, FRP' nin betonarme elemanlarının kapasitesini verimli bir şekilde artırabileceği sonucuna ulaşmıştır. FRP' nin korozyona karşı dayanıklı olması, yüksek mukavemetli oluşu ve hafif olması birçok avantajları arasında yer almaktadır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında CFRP (Karbon Lif Takviyeli Polimer) ve GFRP (Cam Lif Takviyeli Polimer) sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun yanında aşağıda özetlenen çalışmalar incelendiğinde betonarme elemanların BFRP, PET-FRP kullanılarak güçlendirildiği çalışmalar son yıllarda giderek artmıştır [14, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 34, 35, 36]. Yine aşağıda özetlenen çalışmalar incelendiğinde PET-FRP kompozitinin kolonların sargılanmasında kullanıldığı çok sayıda çalışma olmasına rağmen, betonarme kirişlerin güçlendirilmesine yönelik olarak kullanıldığı çalışmalar oldukça sınırlıdır [14, 19, 25, 30, 34, 35, 36]. FRP kompozitleri ile güçlendirilen kiriş davranışının incelendiği literatürde yer alan birçok çalışma mevcuttur.

Norris ve ark. (1997), CFRP ile güçlendirdikleri betonarme kirişlerin davranışlarını, rijitlik ve taşıma kapasitesi değişimini yaptıkları deneysel çalışmada incelemişlerdir. CFRP kirişlere uygulanırken üç farklı yapılandırma şekli kullanılmıştır. Kiriş boyunca tek parça halinde ve çapraz katlı olarak CFRP uygulanmıştır. Analitik çalışmada, referans eleman ile güçlendirilen kirişler arasındaki yük-deplasman ilişkisini incelenmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, CFRP levhalar ile güçlendirilen kirişlerin, rijitlik ve taşıma kapasitesinde artış sağladığı ve levhaların yönünün de taşıma kapasitesi ve rijitlik artışında etkili olduğu gözlemlenmiştir [5].

Chaallal ve ark. (1998), CRFP uygulamasının betonarme kirişlerdeki kesme kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Bunun için betonarme kirişlerin yan yüzeylerine CFRP uygulaması yapmışlardır. Kesme kapasitesi yeterli olacak şekilde iki adetini kontrol elemanı olarak, iki adet elemanı kesme kapasitesi yetersiz olarak üretmişlerdir. Diğer dört elemanı da kesme kapasitesi yetersiz olarak üretilen CFRP ile güçlendirmişlerdir. Deney sonucunda CFRP liflerinin kesme kapasitesini ve rijitliği arttırdığı gözlemlenmiştir [6].

Kachlakev ve McCurry (2000), aynı geometriye sahip tam ölçekli betonarme kirişleri eğilme davranışı, kesme davranışı ve kesme-eğilme davranışını yansıtacak bir biçimde

donatılandırmış, CFRP ve GFRP ile güçlendirerek kirişlerin davranışını incelemiştir. Eğilme kapasitesini artırmak için CFRP, kesme kapasitesini artırmak için ise GFRP kullanılmıştır. Kirişlere dört nokta yükleme testi uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, GFRP ile güçlendirmenin kesme kapasitesini arttırdığı ve CFRP ile güçlendirmenin de kiriş rijitliğini artırarak deformasyon ve çatlakları azalttığı gözlenmiştir [7].

Khalifa ve Nanni (2000), yaptıkları çalışmada CFRP'nin T kesitli betonarme kirişlerin kesme kapasitesine etkisini incelemiştir. T kesitli betonarme kirişler kesme kapasitesi yetersiz olarak üretilmiştir. Çalışmada incelenen ana değişkenler olarak; yapıştırma düzeni (alt+yan kısımlara, yan kısımlara), CFRP miktarı, CFRP ankrajı ve uygulama şekli dikkate alınmıştır. Kirişlere dört noktadan eğilme testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında alt ve yan kısımlara CFRP sargılamanın yan yüzeylere sargılamaya göre kesme davranışına katkısının daha fazla olduğu görülmüştür [8].

Adhikary ve Mutsuyoshi (2004), CFRP levhalar kullanarak kesme kapasitesi yönünden yetersiz durumda olan betonarme kirişleri güçlendirip incelemiştir. Bu kirişlere dört nokta yükleme testi yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde CFRP uygulaması ile kirişlerin davranışlarında iyileşme olduğu gözlemlenmiştir; kirişlerin eğilme rijitliğinin ve kesme kapasitesinin arttığı görülmüştür [9].

Zhang ve Hsu (2005), yaptıkları deneysel çalışmada CFRP levhalar kullanarak kesme kapasitesi yönünden yeterli durumda olmayan betonarme kirişleri güçlendirerek, bu kirişlerin kesme kapasitesine ve süneklik davranışına olan etkisini incelemiştir. Deney sonucunda, CFRP ile güçlendirmenin kirişlerin kesme kapasitesi ve sünekliğini arttırdığı gözlemlenmiştir [10].

Anil (2006), yaptığı deneysel çalışmada kesme kapasitesi yönünden yeterli durumda olmayan ve aynı geometriye sahip T kesitli betonarme kirişleri CFRP levhalar ile güçlendirip bu kirişlerin güçlendirme sonucu davranışını incelemiştir. Ankraj tekniği ve CFRP levha yerleşimi incelenen ana değişkenlerdir. Deney sonuçlarına bakıldığında ankraj tekniğinin olumlu etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu ankrajlar CFRP levhaların sıyrılmamasını önlemiştir. İlâveten CFRP levha kullanılarak yapılan güçlendirme sonucunda kirişlerin taşıma kapasitesinde artış olduğu gözlemlenmiştir [11].

Mertoğlu (2009), çalışmasında, CFRP şeritler kullanılarak kesme kapasitesi bakımından yeterli durumda olmayan betonarme kirişleri güçlendirmiştir ve bu güçlendirme sonucunda betonarme kirişlerin davranışına olan etkisini incelemiştir. Bir adet kiriş kontrol elemanı olarak belirlenmiş ve buna güçlendirme yapılmamıştır. Altı adet kirişe güçlendirme yapılmıştır. Çalışmada incelenen ana değişkenler; fan tipi ankraj uygulaması ve CFRP şeritler arası mesafedir. Kirişlere basit mesnetli dört nokta yükleme testi uygulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, CFRP ile güçlendirmenin kiriş kesme kapasitesi ve rijitliğini arttırdığı, kirişlerde fan ankraj yapılması ile kirişlerin eğilme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir [12].

Toptaş (2009), çalışmasında, CFRP şeritler kullanılarak, hasar görmüş ve sargılama donatısı bakımından yeterli olmayan betonarme kirişlerin güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışmada incelenen ana değişkenler; CFRP şeritleri arası mesafe ve ankraj uygulamasıdır. Kirişlere basit mesnetli dört noktalı yükleme testi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında, bu güçlendirme ile kiriş rijitliğinde ve kesme kapasitesinde artış olduğu, ankraj uygulaması sonucunda kirişlerin eğilme davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir [13].

Jirawattanasomkul ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada değişken enine donatı oranına sahip ve kesme açıklığının etkili derinliğe oranı farklı olan betonarme kirişler üretmişler ve bu kirişleri PET-FRP ile güçlendirip incelemiştir. Kirişler monotonik dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. PET-FRP kullanılarak güçlendirilen kirişlerin kırılma modunun kesme kırılmasından sünek eğilme kırılmasına doğru değiştiği gözlemlenmiştir [14].

Baggio ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada kesme yetersiz kirişleri CFRP, GFRP ve FRCM kullanarak güçlendirmişlerdir. Ankrajsız ve FRP ankrajı kullanılarak yapılan düzenlemelerde kirişlere kısmi yükseklikte U sargılama ve tüm yükseklik boyunca U sargılama yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, tüm yükseklik boyunca uygulanan U sargılamanın kiriş kesme kapasitesini ve göçmenin sünekliğini artırmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir [15].

Karzac ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, ön hasarlı betonarme kirişleri CFRP ile onarıp güçlendirerek bu kirişlerin davranışını incelemiştir. Bu kirişler üç noktalı yükleme altında test edilmiştir. Deney sonucuna bakıldığında, CFRP şeritleri ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımının önemli ölçüde arttığı görülmüştür [16].

Banjara ve Ramanjaneyulu (2017), yaptıkları çalışmada kesme yetersiz kirişleri GFRP şeritlerini kullanarak güçlendirmişlerdir. Şerit tabaka sayısı (tek, iki ve üç tabakalı) ve lif doğrultusu çalışmada incelenen ana değişkenlerdir. GFRP şeritlerin lif doğrultusunu değiştirerek kiriş yüzeylerine uygulamışlardır. Deney sonucunda kirişlerin kırılma modunu kesmeden eğilmeye doğru değiştirmişlerdir. Güçlendirilen kirişlerde daha sünek bir davranış elde etmişlerdir [17].

Obaidat ve ark. (2019), yaptıkları deneysel çalışmada CFRP şeritleri kullanarak kısmen hasarlı durumda olan betonarme kiriş-kolon bağlantı bölgelerini güçlendirmişlerdir. Bunun için sekiz adet eleman hazırlanmış ve test edilmiştir. İlk olarak, yedi kirişe hasar verilmiştir. Hasar verilen bu kirişler CFRP şeritleri ile güçlendirilmiştir. Hasar verilip güçlendirme yapılan bu kirişler tekrar test edilmiştir. Deney sonucunda, güçlendirilen kiriş-kolon bağlantı bölgelerinin kesme davranışında iyileşme olduğu ve taşıma kapasitesinde artış sağladığı görülmüştür [18].

Liu ve Li (2019), çalışmalarında betonarme kolon ve kirişlerin donatısını belirli düzeyde korozyona uğrattıktan sonra PET-FRP ve CFRP kompozitlerini kullanarak güçlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, donatıdaki korozyonun sebep olduğu kolon ve kirişlerin taşıma gücünde ve sünek davranışında oluşan azalmanın, PET-FRP ile büyük ölçüde giderildiği gözlemlenmiştir. PET-FRP' nin sünekliği arttırmada CFRP' ye göre daha iyi olduğu belirtilmiştir [19].

Abdelsalam ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada CFRP şeritleri ile kesme yetersiz kirişleri güçlendirmişlerdir. Kirişlerin güçlendirilmesinde kiriş yan yüzeylerine CFRP şeritleri yapıştırılmıştır. Buna ilaveten mekanik yapıştırma tekniği de kullanılmıştır. Sonuç olarak, kesme dayanımında artış olduğu gözlemlenmiştir [20].

Abadel ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada normal beton ve lif katkılı beton ile üretilen kirişleri kesmeye karşı güçlendirmişlerdir. Bu kirişlerin güçlendirilmesi, dıştan yapıştırma ve yüzeye yakın yapıştırma yöntemleri kullanılarak, CFRP şeritleri ile yapılmıştır. Lif katkılı betondan üretilen kirişlerde CFRP ile güçlendirmenin kesme kapasitesini arttırdığı ancak deformasyon kapasitesinde önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir [21].

Aksoylu ve ark. (2019), çalışmalarında 125x250 mm dikdörtgen enkesitli ve uzunluğu 2500 mm olan ön hasarlı betonarme kirişleri CFRP ile güçlendirmişlerdir. Biri referans eleman olmak üzere toplam dört adet kiriş üretmişlerdir. Kirişlere $\Phi 5/10$ cm etriye konulmuştur. Üretilen kirişlere farklı düzeylerde hasar verilmiştir. Daha sonra kirişlere CFRP ile güçlendirme işlemi yapılmış ve bu kirişlere tekrar test uygulanmıştır. Kirişlerde kesme açıklığının (a) faydalı yüksekliğe (d) oranı 3,11 alınmıştır. Sonuç olarak, ön hasarlı kirişlere onarım ve güçlendirme yapılarak kapasitede artış olduğu gözlemlenmiştir [22].

Liu ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada önerilmeli BFRP plakaları ve CFRP ile kirişleri güçlendirmişlerdir. Güçlendirilen bu kirişlerin çatlama davranışlarını, yük-deplasman eğrilerini, kırılma modlarını incelemişlerdir [23].

Chen ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada BFRP şeritler kullanarak kirişleri güçlendirmişlerdir. Güçlendirilen kirişleri üç nokta yüklemesi altında test etmişlerdir. Güçlendirme işleminde dört farklı ankraj uygulaması yapmışlardır [24].

Abdalla ve ark. (2022), çalışmalarında betonarme kirişleri PET-FRP ve CFRP şeritlerle güçlendirerek kirişlerin davranışını incelemişlerdir. Biri güçlendirme yapılmayan referans elemanı olmak üzere toplamda dört adet kiriş üretilmiştir. Kirişlerden biri CFRP şerit ile diğer ikisi ise tek ve iki katlı PET-FRP şeridi ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme işleminde FRP şeritleri kirişlerin sadece alt yüzeyine uygulanmıştır. Çalışma sonucunda güçlendirilen kirişlerin benzer kırılma davranışına sahip oldukları gözlemlenmiş, PET-FRP ile güçlendirilen kirişlerin deformasyon yapma kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür [25].

Narule ve Sonawane (2022), yaptıkları çalışmada betonarme kirişleri BFRP şeritleri ile güçlendirmişlerdir. Güçlendirilen kirişleri üç nokta yüklemesi ile test etmişlerdir. BFRP şeritler farklı düzenlemeler ile kirişlere yapıştırılmıştır [26].

Manibalan ve ark. (2022), kirişleri BFRP plakaları ile güçlendirmişlerdir. BFRP plakaları iki, üç, dört tabaka halinde kiriş alt yüzeylerine yapıştırılmıştır. Bu kirişleri dört nokta yüklemesi altında test etmişlerdir. Deney sonucunda, BFRP plakasının dört tabaka halinde yapıştırıldığı kirişin en yüksek rijitlik ve taşıma gücüne sahip olduğu gözlemlenmiştir [27].

Do-Dai ve ark. (2022), CFRP ve BFRP şeritler kullanarak farklı düzeyde korozyona sahip donatılı kirişleri eğilmeye karşı güçlendirmişlerdir. Çalışmada etkisi incelenen ana parametreler, FRP tipi ve tabaka sayısı olmuştur [28].

Sharma (2023), yaptığı çalışmada CFRP levhalar kullanarak betonarme kirişleri güçlendirmiştir. CFRP levhalar, taşıma kapasitesini arttırmak amacıyla kirişlere farklı düzenlemeler ile yapıştırılmıştır. Bir kiriş hariç olmak üzere (kontrol kirişi), farklı düzenlemelere sahip CFRP levha ile onarılmıştır. Kirişlerde hasar oluşturmak için kirişler, belirli bir yükleme seviyesine maruz bırakılmıştır. Çalışmanın amacı, CFRP levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin performansını ve kırılma modlarını araştırmaktır [29].

Hu ve ark. (2023), çalışmalarında biri referans kiriş ve diğer beşi PET FRP ile güçlendirilen, toplam altı adet betonarme kirişin davranışlarını incelemişlerdir. PET katman sayısı ve konfigürasyonu çalışmada incelenen ana değişkenlerdir. Numunelerin eğilme performansı üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, numunelerin çatlak genişliği, kırılma özellikleri, taşıma kapasitesi ve sehimi analiz edilmiştir [30].

Hongwei ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada GFRP şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme davranışını incelemişlerdir. Betonarme kirişler, dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Çalışmadaki değişkenler; kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı ve şerit aralığıdır. Deney sonuçlarına göre kesme açıklığının derinliğe oranı arttıkça, kirişin nihai kesme kapasitesinin azaldığı görülmüştür. İlaveten şerit aralığı arttıkça, nihai kesme kapasitesinin azaldığı gözlenmiştir [31].

Attari ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada FRP kumaş (GFRP ve CFRP) kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesinin kiriş davranışına etkisini incelemişlerdir. Toplam yedi adet eğilmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişi, dört nokta yüklemesine tabii tutularak tekrarlanan yükleme dizileri altında test etmişlerdir. Dayanım, rijitlik, süneklik ve kırılma modlarına ilişkin sonuçlar, dikkate alınan çeşitli güçlendirme çözümleri için tartışılmıştır. Güçlendirilmiş beton elemanların eğilme hasarını tahmin etmek için analitik bir model de geliştirilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen analitik modelin, uygulanan yükler altında güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını doğru bir şekilde tahmin ettiğini

göstermiştir. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için çift katmanlı Cam-Karbon elyaf kompozit malzemenin kullanılmasının çok iyi sonuç verdiği görülmüştür. [32].

Şengün ve Aslan (2024), kirişlerin kesme davranışını ve performansını değerlendirmek amacıyla kesme dayanımı yetersiz olan dokuz betonarme kiriş üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kirişlerden biri güçlendirilmeyerek referans kiriş olarak belirlenmiştir. Bunlardan altısı, CFRP ve GFRP olmak üzere iki tür kompozit malzeme kullanılarak hem eğilme hem de kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Bunlardan ikisi U sarılı ve yandan bağlı CFRP ile sadece kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Deneysel parametreler olarak FRP tipi, FRP katmanlarının sayısı, iki bitişik FRP kesme şeridi arasındaki net mesafe ve güçlendirme konfigürasyonudur (tamamen sarılmış, U sarılmış ve yandan yapıştırılmış). Deneysel sonuçlar, güçlendirme için FRP levhaların uygulanmasının, test edilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerini arttırdığını; GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesinin, CFRP ile güçlendirilenlerin kapasitelerinden daha az olduğunu ve kesme güçlendirmesi için ek CFRP katmanları kullanılmasının orantılı bir artış sağlamadığını ortaya koymuştur [33].

Mei ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada PET-FRP kullanarak betonarme kirişlere U sargı yapılıp bu kirişlerin kesme performansları araştırılmıştır. Bunun için on iki adet kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş üretilmiştir. PET-FRP takviye oranlarının ve kesme açıklığı/etkili derinlik oranlarının kiriş kesme davranışına etkisi araştırılmıştır. Kesme açıklığı/etkili derinlik oranları 1,53; 2,23 ve 3,01 olarak dikkate alınmıştır. Şerit genişlikleri ise 50, 100 ve 150 mm olarak alınmıştır. Kesit boyutları 150x 300 mm' dir. Kiriş uzunlukları 3,6 m; 5,3 m ve 7,10 m dir. Sonuç olarak kesme açıklığı/etkili derinlik oranı 2,23 ve 3,01 olan kirişlerde PET-FRP' nin daha etkili olduğu gözlenmiştir. Orta ve uzun kesme açıklıklarına sahip güçlendirilmiş numunelerin hasarı, FRP'nin ayrılmasından kaynaklanırken, kısa kirişlerde oluşan kemer mekanizmasının, FRP ayrılmasından sonra kısa kirişlerin hasar görmesini engellediği gözlemlenmiştir. PET-FRP takviye oranı arttıkça gerilme artışı daha yavaş hale gelmiştir. Betonun kesme dayanımına katkısı kesme açıklığı-etkin derinlik oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir [34].

Mei ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada betonarme kirişlere büyük kopma gerinimli (LRS) FRP kullanarak tam sargılama yapmışlar ve kesme dayanımlarına etkisini araştırmışlardır. Bunun için on dört adet betonarme kiriş basit mesnetli üç noktalı yükleme testine tabii

tutulmuştur. İncelenen değişkenler farklı kesme açıklığı-etkili derinlik oranları (1,53; 2,25 ve 3,01) ve farklı FRP (% 0,37; % 0,75 ve % 1,12) oranlarıdır. Kiriş boyutları 150x300 mm ve uzunlukları 360 mm, 530 mm ve 710 mm olarak üretilmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında kesme açıklığı/etkili derinlik oranı arttıkça sünekliğin arttığı görülmüştür. Güçlendirilmiş kısa betonarme kirişlerde gevrek kırılma modu görülmüştür. FRP oranı arttıkça betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin ve sünekliğin iyileştiği gözlenmiştir. PET-FRP oranının artırılmasıyla kesme kırılmasının, eğilme kırılmasına dönüşeceği gözlemlenmiştir [35].

Bai ve ark. (2024), yaptıkları çalışmada PET-FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme davranışını incelemiştir. Çalışmada biri kontrol numunesi olmak üzere sekiz adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kiriş kesiti 150 mm x 300 mm'dir ve kiriş uzunluğu 1460 mm'dir. Kesme açıklığı/etkili derinlik oranı tüm kirişlerde 2,25'tir. Deneydeki değişkenler, güçlendirme şemaları -U sarma ve tam sarma- ve farklı FRP takviye oranlarıdır. Çalışmada betonarme kirişlerin hasar modları, kesme kuvveti-sehim eğrileri, kesme çatlaklarının gelişim süreci, FRP geriniminin gelişimi ve FRP ile beton arasındaki etkileşim detaylı olarak incelenmiştir. U sarılı PET-FRP kullanan betonarme kirişlerin çatlak gelişiminin sınırlandığı, kesme kapasitesinin arttığı fakat sünekliğinin artmadığı gözlemlenmiştir. Tam sarılmış betonarme kirişlerin de kesme kapasitelerinin arttığı ve açıklık ortası sehimlerde iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir [36].

Yukarıda özetlenen çalışmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunda CFRP ve GFRP lifli polimerleri ile güçlendirilen kiriş davranışının araştırıldığı görülmektedir [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 29, 31, 33]. Çevre dostu lifli polimerler olarak bilinen BFRP ve yüksek kopma gerinimine sahip PET-FRP ile kirişlerin güçlendirilmesine yönelik çalışmalar daha az sayıdadır [14, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 34, 35, 36]. Ayrıca literatürde yer alan çalışmalarda FRP ile güçlendirilen kirişlerin çoğu normal dayanımlı betondan üretilmiştir.

Bu tez kapsamında yukarıdaki belirtilen hususlar da dikkate alınarak kesme yetersiz betonarme kirişlerin CFRP, BFRP ve PET-FRP kullanılarak güçlendirilmesi incelenmiştir. Ayrıca ülkemiz yapı stoğundaki eski yapıları temsil etmesi nedeniyle bu çalışma kapsamında düşük dayanımlı ve düz donatı ile üretilmiş betonarme kirişler, yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde sıklıkla kullanılan CFRP'nin yanında, BFRP

ve PET-FRP kompozitleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Tam sargı (CFRP, BFRP, PET-FRP) ve şerit (CFRP ve BFRP) sargı şeklinde yapılan güçlendirme işlemi sonucunda kirişler monotonik artan yük etkisi altında test edilmiş ve davranışlarında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.





3. ONARIM VE GÜÇLENDİRME

Bu başlık altında, onarım ve güçlendirme yöntemleri, lifli polimer kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları ve bu çalışma kapsamında kullanılan CFRP, BFRP ve PET-FRP kompozitlerinin üretim basamakları incelenmiştir.

3.1. Onarım ve Güçlendirme Nedir?

Onarım, hasara uğramış yapıların ve yapı elemanlarının eski durumuna getirilmesi işlemidir. Güçlendirme ise, hasara uğramış veya uğramamış yapı ve yapı elemanlarının rijitlik, stabilite, yük taşıma kapasitesi gibi özelliklerinin veya bunlardan bazı özelliklerinin eski durumundan daha iyi bir hale getirilmesi işlemidir. En doğru onarım ve güçlendirme çözümünü bulabilmek için yapıdaki hasarların, eksikliklerin sebeplerini sıralamak ve ortaya koymak, bu doğrultuda en uygun olacak onarım ve güçlendirme metodunu ve en doğru ürünleri seçmek, seçilen metodu en doğru şekilde uygulayıp, denetlemek gereklidir [37]. Yani sonuç olarak onarım ve güçlendirme metotları projeden projeye değişiklik göstermektedir. Onarım ve güçlendirmede kullanılan malzemeler ve metotlar, yapı ve yapı elemanlarının gereksinimlerine göre seçilmektedir.

3.2. Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri

Onarım ve güçlendirme yöntemleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

3.2.1. Betonarme mantolama ve betonarme perde ilavesi

Kolonlara mantolama yapımı

Mevcut kolonların dış kısmına boyuna donatıların ve sargı donatılarının yerleştirilerek kolon kesitlerinin artırılması işlemidir [38].

Betonarme perde ekleme

Kolonların kapasitelerinin maksimumuna ulaşması durumunda ve yapıların deprem gibi yatay etkilere karşı yeterli olmadığı durumda yapılara perde eklemesi uygulanabilir [39].

3.2.2. Çelik konstrüksiyon

Kolonlara çelik mantolanma yapılması

Kolonların köşelerine köşebent konularak bunların birbirlerine yatay plakalarla kaynaklanması ile çelik sargı oluşturulur [38].

Çelik diyagonal elemanlar ile güçlendirme

Yapılara perde eklemesi yapmak yerine yapı ağırlığını arttırmadan, yapının çerçeve boşluklarına çelik diyagonal elemanlar konularak yapılan güçlendirme yöntemidir [38].

3.2.3. FRP sistem ile güçlendirme

FRP ile güçlendirme; FRP kompozitlerinin maliyetlerinin azalması, uygulamaların hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, yapıya ek yük getirmemeleri gibi avantajları nedeniyle son yıllarda sıklıkla tercih edilmektedir.

3.2.4. Kompozit sistemler

Yukarıda açıklanan sistemlerin güçlendirme projesine bağlı olarak kompoze edilerek uygulanması mümkündür.

3.3. Lifli Polimer Malzemeler

Lifli polimer malzemeler, lifleri birbirine bağlayan bileşen olan matris ile bu matrisi birbirine bağlayan polimer liflerden oluşmaktadır. Lif ve lifleri bir arada tutan matrisin birleşiminden oluşan bu kompozit malzeme, bu malzemeyi oluşturan bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahiptir. Yüklerin çoğu lifler tarafından karşılanmaktadır ve bu nedenle matrislerin dayanıma önemli olarak bir katkısı yoktur. Matrislerin lifler arasında gerilmeyi transfer etmek ve lifleri bir arada tutmak gibi fonksiyonları bulunmaktadır. Bu malzemeler, geleneksel yapı malzemeleri olan çelik ve alüminyumdan farklı özellikler gösterirler. Betonarme elemanların eğilme ve basınç dayanımlarının iyileştirilmesinde efektif bir şekilde kullanılabilir [40].

3.3.1. Lifli polimer malzemelerin avantajları

Lifli polimer ve lifli polimer ile güçlendirmenin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Geleneksel güçlendirme yöntemleri ile kıyaslandığında -çelik veya betonarme mantolama gibi- çok daha hızlı ve kolay uygulanırlar. Çok hafiftirler ve bu sayede yapıda ilave yük artışına sebep olmazlar. Elastisite modülleri ve çekme dayanımları çok yüksektir. Güçlendirme uygulamaları esnasında yapının boşaltılmasına gerek duyulmaz ve kısmi düzenlemeler yapılarak yapı servis durumundayken, güçlendirme faaliyetine devam edilebilir. Alkali ortamlarda ya da asidik ortamlarda korozyona karşı çok dayanıklıdırlar [41].

3.3.2. Lifli polimer malzemelerin dezavantajları

Lifli polimer ve lifli polimer ile güçlendirmenin dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Lifli polimer malzemeler, çevresel faktörlerden etkilenirler. Nem, UV ışınları ve sıcaklık sebebi ile bozulma gösterirler. Bu malzemelerin mekanik özelliklerine etki eden reçine malzemesinin yüksek sıcaklıklarda bozulması sebebiyle, bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya uygun olmamaktadır. Çarpma ve yangın gibi etkilerden zarar görmeye çok yatkındırlar ve bu gibi durumlardan muhafaza edilmeleri gerekmektedir. Lifli polimer malzemelerin maliyeti yüksektir [42].

Malzemenin süneklik değeri düşüktür. Bölgesel eğriliğe yatkındırlar. Kesme dayanımları düşüktür ve değişken plastik davranış gösterirler. Olumsuz özelliklerinden biri ise gevrek olarak göçmeleridir [42].

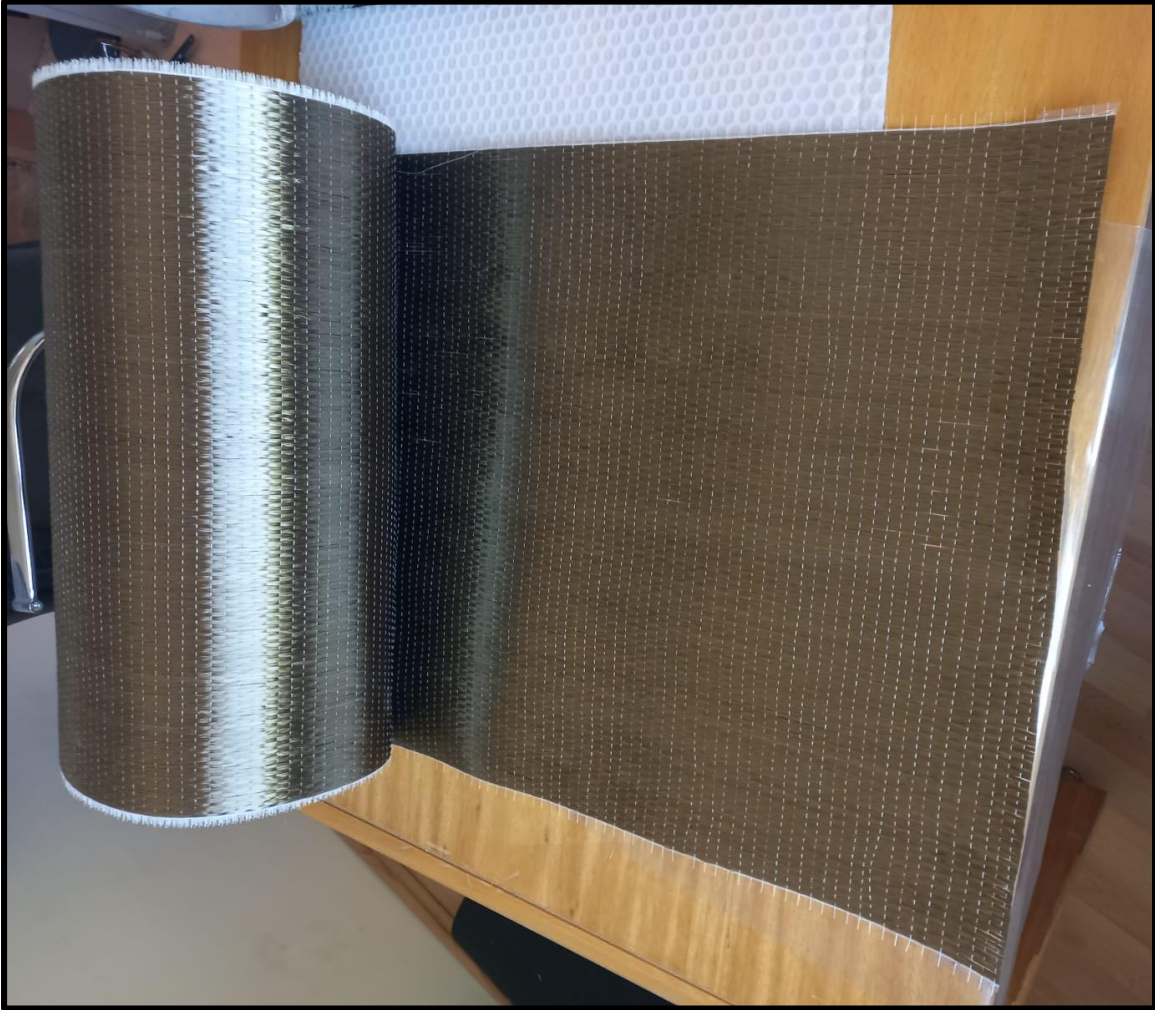
3.3.3. BFRP, CFRP, PET-FRP üretim basamakları ve özellikleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan CFRP, BFRP ve PET-FRP kompozitlerinin özellikleri ve bunların üretim basamakları bu kısımda anlatılmıştır.

BFRP üretimi ve özellikleri

Kompozit bir malzeme olan ve ince liflerden yapılan bazalt liflerinin çapı yaklaşık olarak 10 ile 20 μm arasındadır. İnşaat sektörü için tasarlanmış yeni bir kompozit malzeme seçeneğidir [43]. BFRP kompozit malzeme korozyona, ısıya, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklıdır [44].

Bazalt kayası ocaklardan çıkarılıp doğranmış liflere dönüştürülerek (BFRP) yapılarda betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bazalt kayası ocaktan çıkarılır, ezilir, yıkanır ve daha sonra taşınarak eritme banyolarına götürülür. Bazalt 1500 $^{\circ}\text{C}$ (2732 F) sıcaklıkta eritilerek filament haline getirmek için haşıl maddeleri eklenir. Daha sonra, eğer bazalt elyaf, elyaf takviyeli polimer (FRP) olarak yapılması durumunda, birkaç adımın takip daha edilmesi gerekir [45].

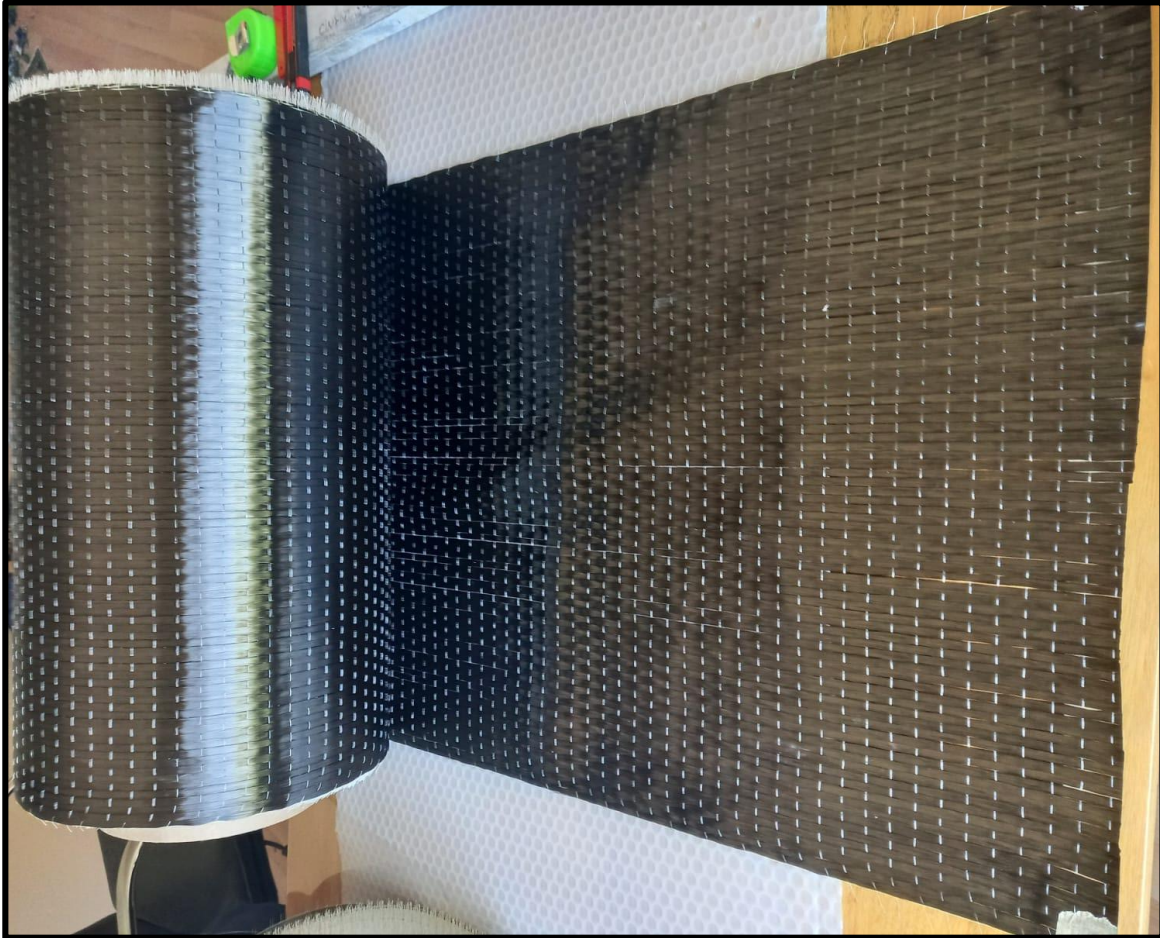


Resim 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan BFRP malzeme

CFRP üretimi ve özellikleri

Karbon fiber, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık hedeflenen uygulamalarda kullanılan, hafif ve çok fazla dayanıklı olan bir malzemedir. Karbon atomlarından oluşmaktadır, ince ve uzun lif şeklindeki malzemeden elde edilir.

Üretiminde ilk aşama, genellikle poliakrilonitril (PAN) veya rayon gibi karbon içeren polimerlerin hazırlanmasını içerir. Bu polimer malzemesi daha sonra belirli sıcaklık ve basınç altında karbona dönüştürülür. Polimer, havasız bir ortamda belirli bir sıcaklıkta karbonsuzlaştırma işlemine tabi tutulur. Bu aşama, polimerin içindeki karbon atomlarını yoğunlaştırarak karbon fiberin temelini oluşturur. Karbon fiber daha sonra belirli bir sıcaklık ve atmosferde termal işlemlerden geçirilir. Bu, malzemenin özelliklerini optimize ederek mukavemetini artırır. Son olarak, uzun karbon fiber filamentler kesilir ve uygun uzunluklarda paketlenir. Bu süreç, karbon fiberin temel üretim aşamalarını kapsar [46].



Resim 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan CFRP malzeme

PET-FRP üretimi ve özellikleri

Dünyada plastik üretiminde sürekli bir artış yaşanmaktadır. Plastikler doğada yüzlerce yıl bozulmaz. Plastiklerin artan kullanımı, çevrede parçalanamayan atıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu atıkların neden olduğu çevre kirliliğini azaltmanın etkili yollarından biri ise bunların geri dönüştürülmesidir. PET-FRP malzemesi, artan plastik oluşumunu azaltarak hem çevre dostu olmakta hem de yapı ve yapı elemanlarının özelliklerini iyileştirmektedir.

PET-FRP malzemenin üretim aşamalarında ise ilk olarak atık PET şişeler toplanır, şişe kapakları ve etiketleri çıkarılır ve yabancı maddeler ve her türlü kontaminasyonun giderilmesi için temizlenir. Temizlenen şişeler parçalama makinesi ile parçalanır. Parçalanan PET atıklar, elektrikli fan kullanılarak sürekli olarak kömür üflenerek paslanmaz çelik eritme potasında eritilir. PET tamamen eridikten sonra elyaflar erimiş PET matrisinde eşit şekilde dağılıncaya kadar hızlı ve yumuşak bir karıştırma ile eklenir [47]. Birkaç adım daha takip edilerek üretim tamamlanmış olur.



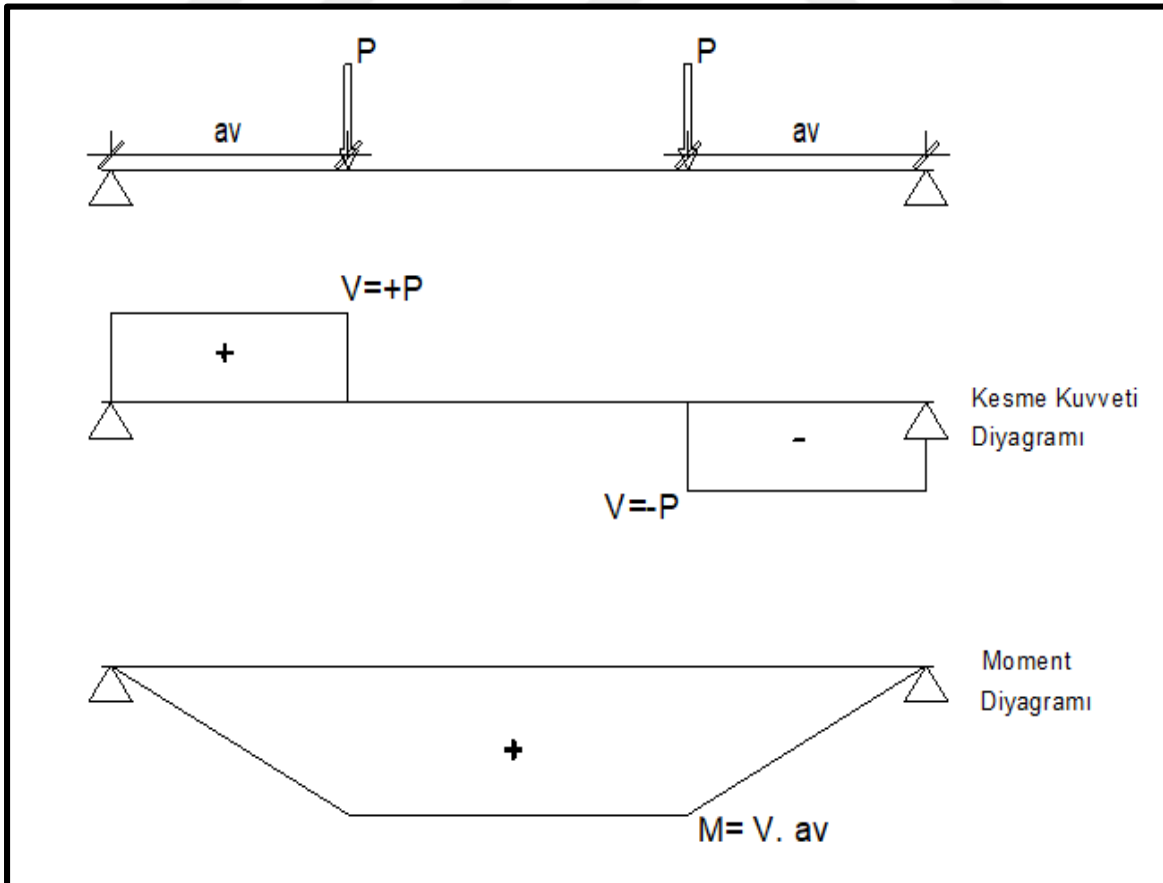
Resim 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan PET-FRP malzeme

4. KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞI

Betonarme kirişlerin kesme davranışı ve betonarme kirişlerin a_v/d oranına göre kırılma türleri bu bölümde anlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilen ve deneye tabii tutulan kirişlerin kesme açıklığının faydalı yüksekliğine oranı $a_v/d = 5$ 'tir.

4.1. Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışı

Kesme donatısı bulunmayan bir kirişin tasarlanmasını yönetmelikler kabul etmemektedir. Kirişlerin kesme kuvvetinin etkisi ile gevrek kırılmalarını engellemek için sargı donatılarının kullanılması gerekmektedir. Bu sargılama donatıları oluşacak çatlakların kılcal seviyede oluşmasını ve kirişlerde gevrek kırılmanın önlenmesini sağlarlar. Şekil 4.1' de kesme donatısı bulunmayan ve sadece eğilme donatısı bulunan bir kirişe, simetrik olarak eşit büyüklükte iki tekil yük etki ettirilmesi sonucu kirişte oluşan moment ve kesme diyagramı gösterilmiştir [48].



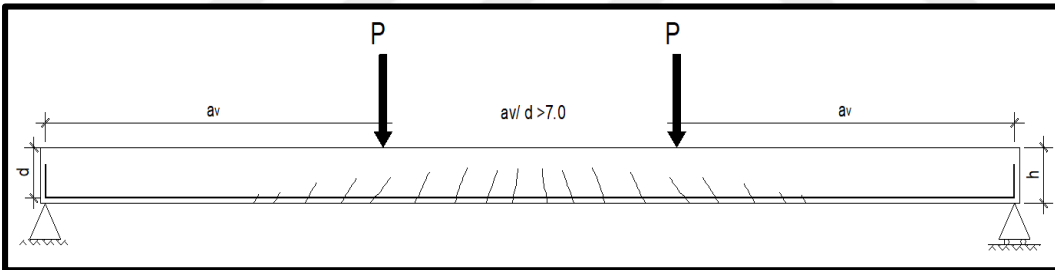
Şekil 4.1. Kesme yetersiz kirişte oluşan moment ve kesme diyagramı

Şekil 4.1. de görüldüğü üzere kiriş mesneti ile tekil yükler arası bölgede eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşmaktadır. Tekil yüklerin arasında ise yalnızca eğilme momenti oluştuğu görülmektedir. Tekil yük ile mesnet arasındaki mesafe (a_v), kesme açıklığı olarak isimlendirilmektedir. Kesme açıklığı genel olarak tanımlanırsa momentin kesme kuvvetine oranıdır (M/V) [48].

4.2. Betonarme Kirişlerin a_v/d Oranına Göre Kırılma Türleri

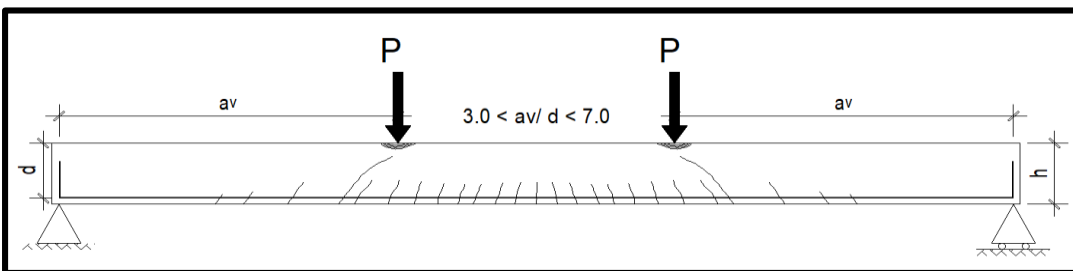
Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a_v/d), kesme davranışına etki eden en önemli parametrelerden biridir. Bu oranın kiriş kesme davranışını nasıl değiştirdiği Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.' te anlatılmıştır.

$a_v/d > 7,0$ ise kirişlerde eğik çatlaklar görülmez. Kiriş taşıma gücüne eğilme ile ulaşır. Eğilme çatlakları oluşur. Bu çatlaklar 45 dereceden daha büyük açıya sahiptir ve kirişin orta bölgelerinde oluşur [49].



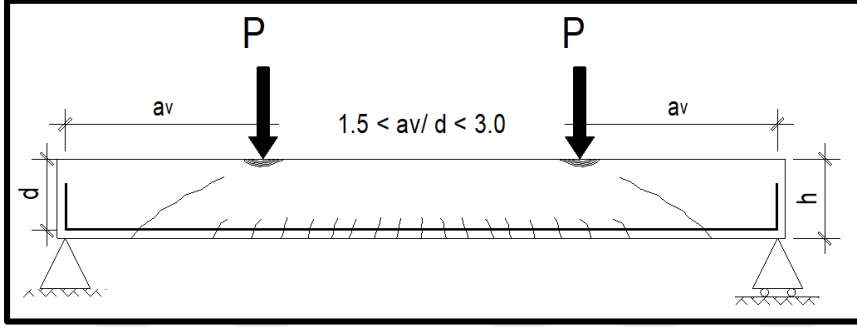
Şekil 4.2. Kiriş davranışına $7,0 < a_v/d$ oranının etkisi [49]

$3,0 < a_v/d < 7,0$ ise, ilk olarak eğilme çatlakları oluşur. Daha sonra kesme açıklığındaki bu çatlaklar tarafsız eksene doğru ilerler. Eğik çekme çatlakları oluşur. Bu çatlak kesme ve eğilmenin ortak etkisi sonucu oluşmuştur [49].



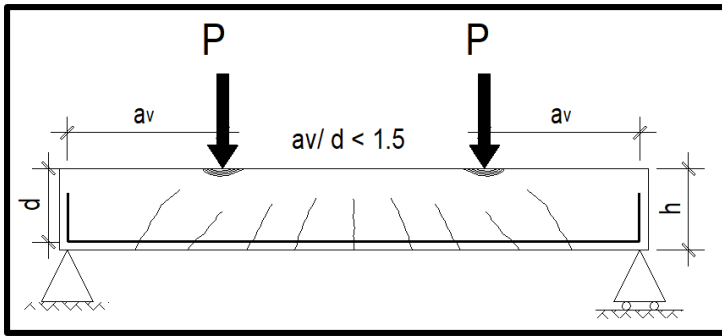
Şekil 4.3. Kiriş davranışına $3,0 < a_v/d < 7,0$ oranının etkisi [49]

$1,5 < a_v/d < 3,0$ ise, eğik çekme çatlağı yük uygulanan nokta ile mesnet bölgesi arasında ilerler. Kiriş yük almaya devam eder ve ani bir kırılma oluşmaz. Aynı zamanda yük artışı ile kemerlenme davranışı oluşur ve yük uygulanan noktada beton ezilir ve dağılır. Bu kesme-ezilme kırılmasıdır ve ani bir kırılmadır [49].



Şekil 4.4. Kiriş davranışına $1.5 < a_v/d < 3.0$ oranının etkisi [49]

$a_v/d < 1,5$ ise, burada kesme açıklığı çok küçüktür. Eğik çatlak oluşumu görülür. Kirişte gergili kemer davranışı görülür. Yani beton gövdesi kemer davranışı gösterir ve boyuna donatılar gergi gibi davranır. Mesnet bölgelerinde yüksek gerilmeler oluşur. Bu kırılmalar kısa açıklıklı kirişlerde görülmektedir [49].



Şekil 4.5. Kiriş davranışına $a_v/d < 1.5$ oranının etkisi [49]



5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, deney elemanlarının üretim aşamaları, FRP kompozitlerinin kirişlere uygulanması ve yapılan deneysel çalışma anlatılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında kesme yetersiz tasarlanan kirişlerin güçlendirme yapıldıktan sonraki davranışları da bu bölümde incelenmiştir.

5.1. Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

5.1.1. Beton

Elemanların üretiminde hazır beton kullanılmıştır. Tek karışımdan dökülen elemanlarda kullanılan betonun özellikleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Beton karışım oranı

Malzeme	Miktar (kg/m ³)
Portland çimentosu	183 kg
1 numara kırmataş agrega	923 kg
Kum	1104 kg
Süperakışkanlaştırıcı	2,75 kg
Su	232 kg

Beton dökümünden önce kalıplar yağlanmıştır. Beton dökümü sırasında vibratör kullanılarak betonun kalıplara düzgün şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Beton dökümü gerçekleştirildikten sonra beton elemanların 7 gün boyunca uygun kür şartları sağlanarak, elemanların dayanımlarını kazanması beklenmiştir.

Beton basınç dayanımı dökümden sonra standart silindir elemanlarda yapılan aksel basınç deneyi ile 8,5 MPa olarak belirlenmiştir.

5.1.2. Donatı

Kullanılan boyuna donatı çapı Ø12' dir. Nervüzsüz donatı kullanılmıştır. Donatı sınıfı S220' dir. Etriye donatı çapı olarak Ø6 kullanılmıştır. Etriye tüm kiriş boyunca kullanılmıştır (Ø6/500).

Düz donatının akma dayanımı laboratuvarında yapılan çekme deneyleri sonucunda 237,5 MPa olarak belirlenmiştir.

5.1.3. Lifli polimer malzemeler

Çalışma kapsamında kirişlerin güçlendirilmesi için, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) ve PET-FRP (Polyethylene Terephthalate Fiber Reinforced Polymer) lifli polimerleri kullanılmıştır.

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) onarım ve güçlendirme çalışmalarında sıklıkla kullanılan lifli polimerlerdendir. Elastisite modülü diğer FRP kompozitlerine göre yüksek, düşük kopma birim şekil değiştirmesine sahip, maliyeti yüksek ve diğer FRP kompozitlerine göre onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanımı daha fazla olan bir kompozittir.

Bazalt kayacından- yer kabuğunun %90'ını oluşturur- elde edilen BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer), CFRP gibi sıklıkla tercih edilen FRP kompozitine kıyasla üretimi kolay ve daha ekonomiktir. CFRP ile karşılaştırıldığında maliyeti oldukça düşük bir malzemedir. Ayrıca BFRP kompozitleri çevre dostu ve geri dönüştürülebilir malzemelerdir [50,51].

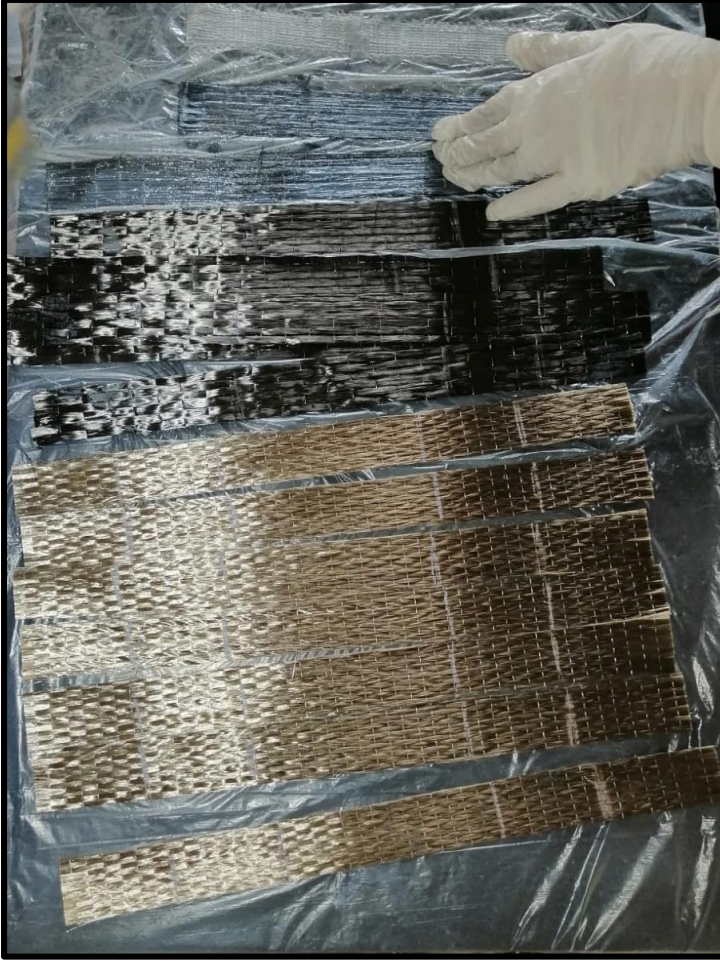
PET-FRP (Polyethylene Terephthalate Fiber Reinforced Polymer) ise son yıllarda özellikle çelik ve hibrit donatılı betonarme kolonların sargılanmasında kullanılmaya başlanan bir diğer FRP kompozitidir. PET-FRP geri dönüştürülmüş PET liflerinden oluşan bir kompozit çeşididir. PET-FRP kolonların onarım ve güçlendirilmesinde etkilerinin araştırıldığı çok sayıda çalışma olmasına rağmen, kiriş güçlendirmesindeki etkilerinin araştırıldığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır [14, 19, 25, 30, 34, 35, 36]. Elastisite modülü düşüktür, birim şekil değiştirmeler kullanılan diğer FRP malzemelerine göre daha yüksektir.

Lifli polimer malzemelerden kupon elemanlar hazırlanarak bu elemanlara çekme testleri uygulanmıştır. 2,5 cm genişliğinde ve 13 cm uzunluğunda epoksiye doyurulmuş kupon elemanlar üzerinde, ASTM D 3039/D 3039M'a [52] uygun olarak yapılan çekme deneyleri ile lifli polimerlerin kopma birim şekil değıştirme değerleri belirlenmiştir.

Yapılan bu işlemler Resim 5.1. ile Resim 5.2. de verilmiştir.



Resim 5.1. Kupon elemanların her iki yüzeyine epoksi uygulanması



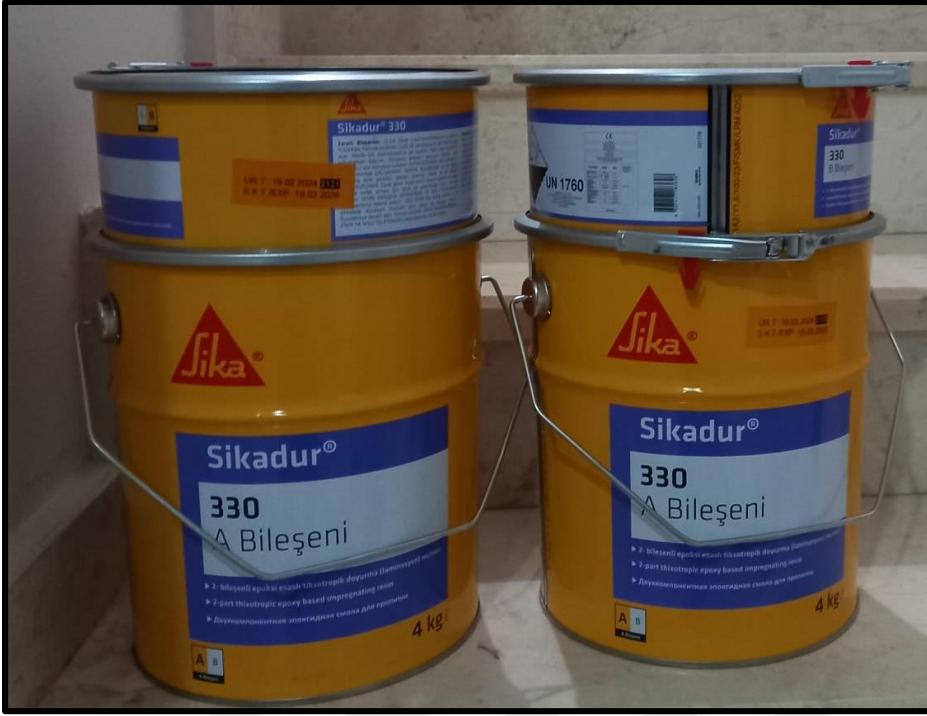
Resim 5.2. Kupon elemanların her iki ucunun birbiri üzerine katlanması

Kupon elemanlara yapılan çekme deneyleri sonucunda CFRP için kopma birim şekil değıştirme değeri %2,28 ve BFRP için kopma birim şekil değıştirme değeri %1,8 bulunmuştur.

Lifli polimer malzemelerin üreticiden alınan elastisite modülleri CFRP için elastisite modülü (E_f) 235000 N/ mm², BFRP için elastisite modülü (E_f) 80000 N/ mm² ve PET-FRP için elastisite modülü (E_f) 10000 N/ mm²'dir.

5.1.4. Epoksi

FRP kompozitlerinin kiriş yüzeylerine yapıştırılmasında kullanılmıştır. Kullanılan epoksi Sika Sikadur 330 iki bileşenli epoksi esaslı doyurma laminasyon reçinesidir. Bu bileşenler ağırlıkça 1:4 oranında (B bileşeni: A bileşeni) kullanılmıştır.



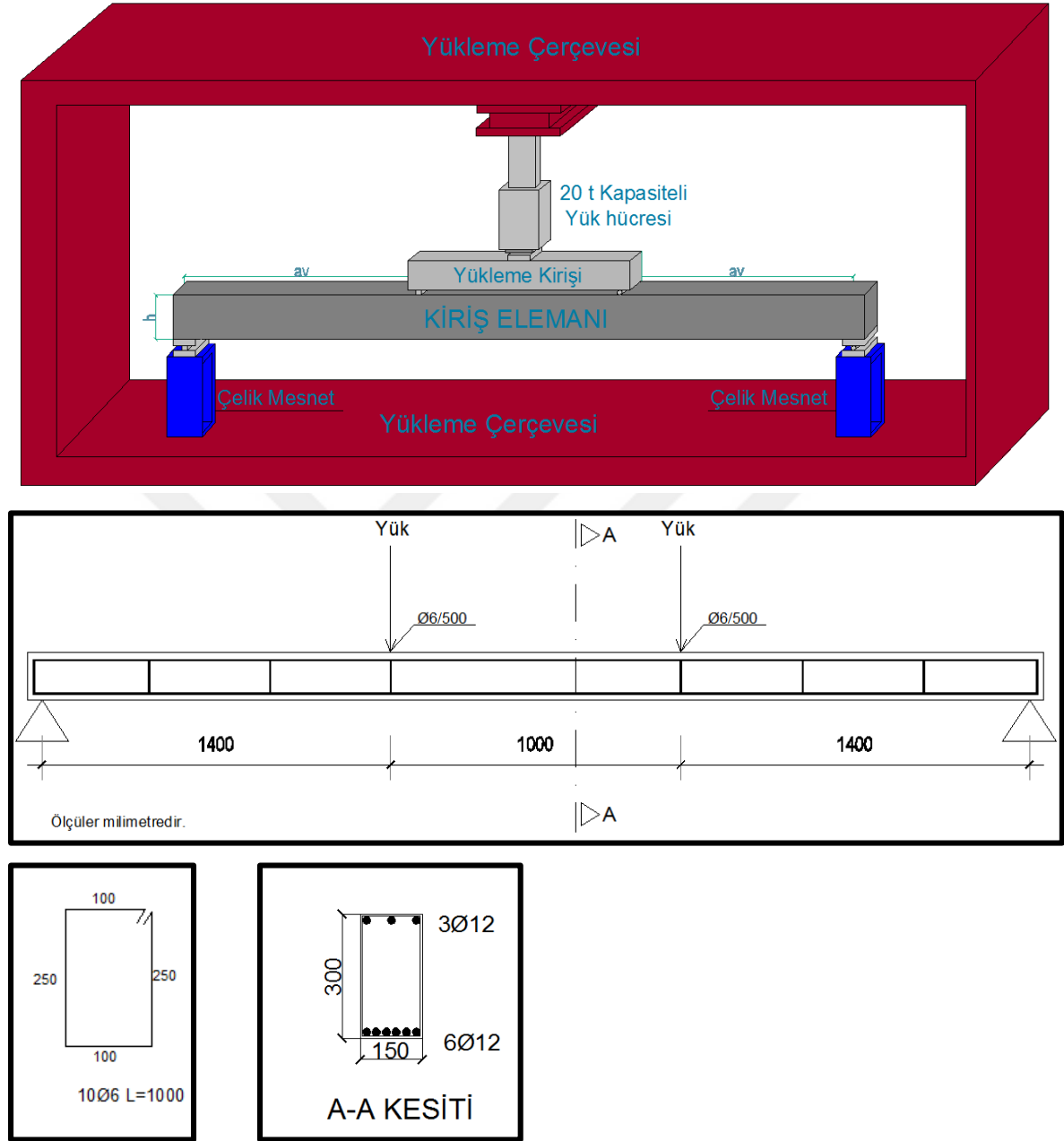
Resim 5.3. Sika sikadur 330 iki bileşenli epoksi

5.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi

5.2.1. Kiriş elemanların üretilmesi

Bir adet referans eleman olmak üzere toplamda 6 adet 15x30x400 cm boyutlarında kiriş numunesi hazırlanmıştır. Kirişlerin hepsi kesme dayanımı yetersiz olarak üretilmiştir. Üretilen kiriş numuneleri 28 gün boyunca betonun standart mukavemetine ulaşması için deneye tabi tutulmamış ve kür yapılarak beklenmiştir.

Deney elemanlarına ait deney düzeneği ve donatı planı Şekil 5.1.' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deney düzeneği ve deney elemanı donatı planı

Kirişlerin üretiminde ilk aşamada kalıplar oluşturulmuştur ve kalıplar yağlanmıştır. Daha sonra Şekil 5.1.'de belirtildiği gibi donatılar kalıplara yerleştirilmiştir. Son olarak ise hazır beton dökümü yapılmıştır. Kirişlerin üretim aşamaları Resim 5.4., Resim 5.5., Resim 5.6. ve Resim 5.7.' de verilmiştir. Kirişler üretimi yapıldıktan ve uygun kür şartları sağlandıktan sonra elemanlar kalıptan çıkarılmıştır. Resim 5.8.' de kalıptan çıkarılan kiriş elemanları görülmektedir.



Resim 5.4. Kalıpların hazırlanması



Resim 5.5. Kalıplara donatıların yerleştirilmesi



Resim 5.6. Hazır beton dökümünün yapılması



Resim 5.7. Hazır beton dökümünün tamamlanması



Resim 5.8. Kirişlerin kalıptan çıkarılması

5.2.2. FRP kompozitleri ile kirişleri sargılama işlemi

Üretilen kiriş elemanlarından biri dışında diğer kirişlere FRP kompozitleri ile sargılama işlemi yapılmıştır. Güçlendirme yapılmayan bu kiriş referans olarak belirlenmiştir.

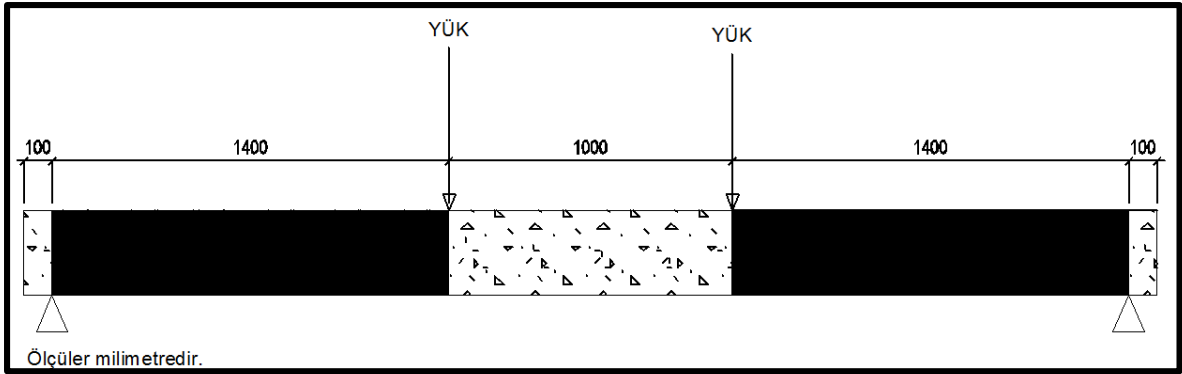
İlk olarak referans betonarme kiriş monotonik yük etkisi altında test edilmiştir. Referans kiriş elemanı N-1 olarak isimlendirilmiştir.

Daha sonra diğer kirişler FRP kompozitleri kullanılarak farklı düzenleme şekilleri ile güçlendirilip ve yine monotonik artan yük etkisi altında test edilmiştir. FRP kompozitleri ile sargılanan numunelerin sargılama düzenleri şu şekilde sıralanabilir:

Çizelge 5.2. FRP kompozitleri ile sargılanan kiriş elemanların sargılama düzenleri

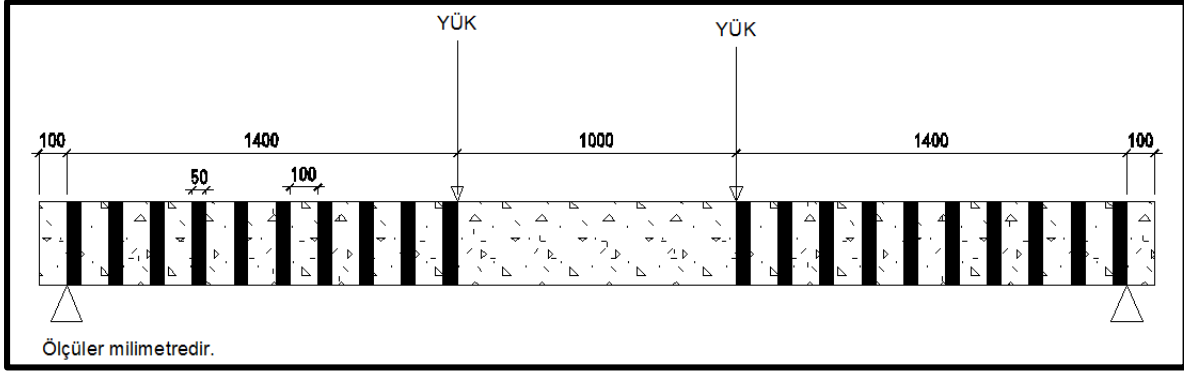
Kiriş Eleman Numarası	CFRP	BFRP	PET-FRP
N-1 (Referans Eleman)	-	-	-
N-2	Tam sargı (Tek kat)	-	-
N-3	-	Tam sargı (Tek kat)	-
N-4	Şerit sargı (Tek kat)	-	-
N-5	-	Şerit sargı (Tek kat)	-
N-6	-	-	Tam sargı (Tek kat)

Tam sargılama, FRP kumaşların kirişlerin her iki ucundan 10 cm bırakılarak kesme açıklığı boyunca ve kumaşlar arasında 6 cm genişliğinde bindirmeler uygulanarak yapılmıştır. FRP elemanların uzunluğu Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [57] belirtilen uzunlukta yani kiriş en kesiti çevre uzunluğu+20 cm bindirme boyu olacak şekilde yapılmıştır. Tam sargı uygulaması Şekil 5.2.' de verilmiştir.



Şekil 5.2. Tam sargı FRP uygulama şeması

Şerit sargılamada, şerit genişlikleri tüm elemanlarda aynı ve 5 cm olarak belirlenmiştir. Şerit sargılamada da FRP elemanların uzunluğu yine tam sargılamada da belirtilen uzunlukta yani kiriş en kesiti çevre uzunluğu+20 cm bindirme boyu olacak şekilde yapılmıştır. Kiriş kesme bölgesine yani yük ile mesnet bölgesi arasına FRP sargılama yapılmıştır. Şerit sargılamanın uygulama şeması Şekil 5.2.'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Şerit FRP uygulama şeması

Her iki sargılama düzeninde de FRP kompozitleri kiriş yüzeylerine uygulanmadan önce, yüzey toz parçacıklarından temizlenmiştir. Bu işlemden sonra çift bileşenli epoksi yardımı ile FRP kompozitler yüzeylere yapıştırılmıştır. Şeritlerin kuruması için kirişler ortalama yedi gün kadar bekletildikten sonra aynı deney düzeneğinde test edilmiştir.

N-2 numaralı kiriş elemanının hazırlanması

N-2 numaralı kiriş elemanı kesme açıklığında tam sargı CFRP ile güçlendirilmiştir. Kirişe yapılan sargılama Resim 5.9. ve 5.10.' da verilmiştir.



Resim 5.9. N-2 numaralı kirişin hazırlanması



Resim 5.10. N-2 numaralı kirişin CFRP sargılaması sonucu nihai hali

N-3 numaralı kiriş elemanının hazırlanması

N-3 numaralı kiriş elemanı kesme açıklığında tam sargı BFRP ile güçlendirilmiştir. Kirişe yapılan sargılama sonucu nihai hali Resim 5.11' de verilmiştir.



Resim 5.11. N-3 numaralı kirişin BFRP sargılaması sonucu nihai hali

N-4 numaralı kiriş elemanının hazırlanması

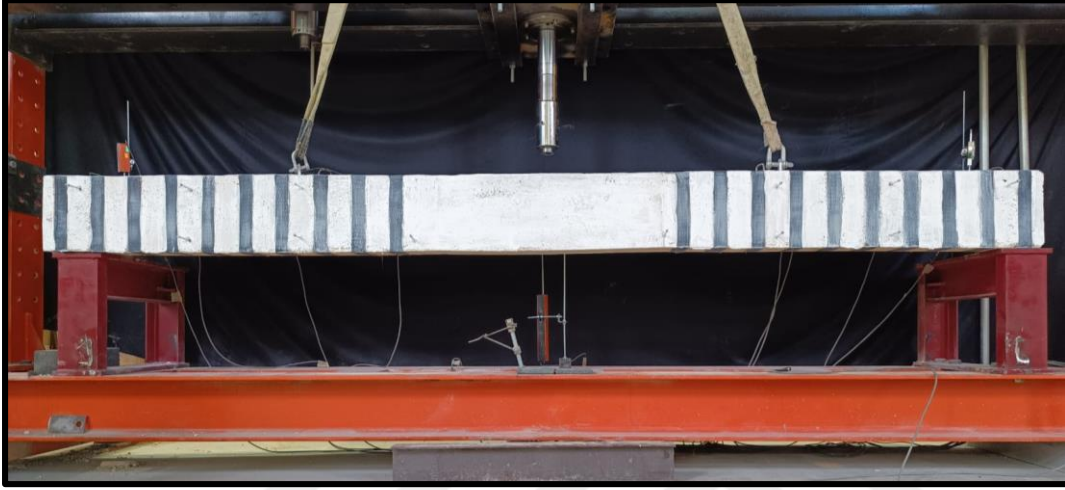
N-4 numaralı kiriş elemanı CFRP tek kat olmak üzere, Şekil 5.2.' de belirtildiği gibi şerit sargılama uygulanmıştır. Şerit genişlikleri 5 cm'dir. Şerit sargılamada FRP elemanların uzunluğu kiriş en kesiti çevre uzunluğu+20 cm bindirme boyu olacak şekilde yapılmıştır. Kirişe yapılan sargılama Resim 5.12.' de verilmiştir.



Resim 5.12. N-4 numaralı kirişin CFRP sargılaması sonucu nihai hali

N-5 numaralı kiriş elemanının hazırlanması

N-5 numaralı kiriş elemanında BFRP tek kat olmak üzere, Şekil 5.2.' de belirtildiği gibi şerit sargılama yapılmıştır. Şerit genişlikleri 5 cm'dir. Kirişe yapılan sargılama Resim 5.13.' de verilmiştir.



Resim 5.13. N-5 numaralı kirişin BFRP sargılaması sonucu nihai hali

N-6 numaralı kiriş elemanının hazırlanması

N-6 numaralı kiriş elemanı PET-FRP kullanılarak, kesme açıklığında tam sargı uygulaması ile güçlendirilmiştir. Kirişe yapılan sargılama sonucu nihai hali Resim 5.14' te verilmiştir.



Resim 5.14. N-6 numaralı kirişin PET-FRP sargılaması sonucu nihai hali

6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

Farklı lifli polimerler ile güçlendirilen düşük dayanımlı beton ve düz donatıdan üretilmiş kesme yetersiz betonarme kirişlere yapılan deneyler ve deney sonuçları bu bölümde incelenmiştir. Bu kirişler Çizelge 5.2.'te belirtildiği gibi farklı düzenleme şekillerinde (şerit ve tam sargı) ve farklı tip lifli polimerler (CFRP, BFRP, PET-FRP) kullanılarak güçlendirilmiştir. Kirişler, hareketli ve sabit mesnetlerin üzerine yerleştirilerek dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Deneylerde veriler 30 kanallı veri toplama sistemi (Data logger) ile alınmıştır. Datalogger, verilerin kaydedilmesini sağlayan ve bu verileri depolayan cihazdır [53]. Sisteme verilen yük, 20 ton kapasiteli yük hücresi (Load cell) yardımıyla ölçülürken; yer değiştirmeler, kirişin her iki mesnedine ve açıklık ortasına birer adet; sol ve sağ açıklığında (kesme çatlağını ölçmek için eğik olarak yerleştirilen) üçer adet yer değiştirme ölçerler LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ile ölçülmüştür. LVDT doğrusal konum sensörüdür ve doğrusal yer değiştirmenin ölçülmesini sağlarlar [54]. Monotonik olarak artan yük etkisi altında test edilen kirişlerin davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmada, güçlendirme yapılan kirişlerden elde edilen sonuçlar ile referans numuneden elde edilen deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.1. N-1 Numaralı Kiriş Elemanı Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

N-1 numaralı güçlendirilmemiş referans elemana yerleştirilen LVDT'ler Resim 6.1. ve Resim 6.2.' de ve deney düzeneği ise Resim 6.3.'te verilmiştir. Güçlendirilmemiş referans eleman monotonik olarak artan yük etkisi altında test edilmiştir. Deney sonucunda kirişte oluşan kırılma Resim 6.4. ve 6.5.' te verilmiştir.



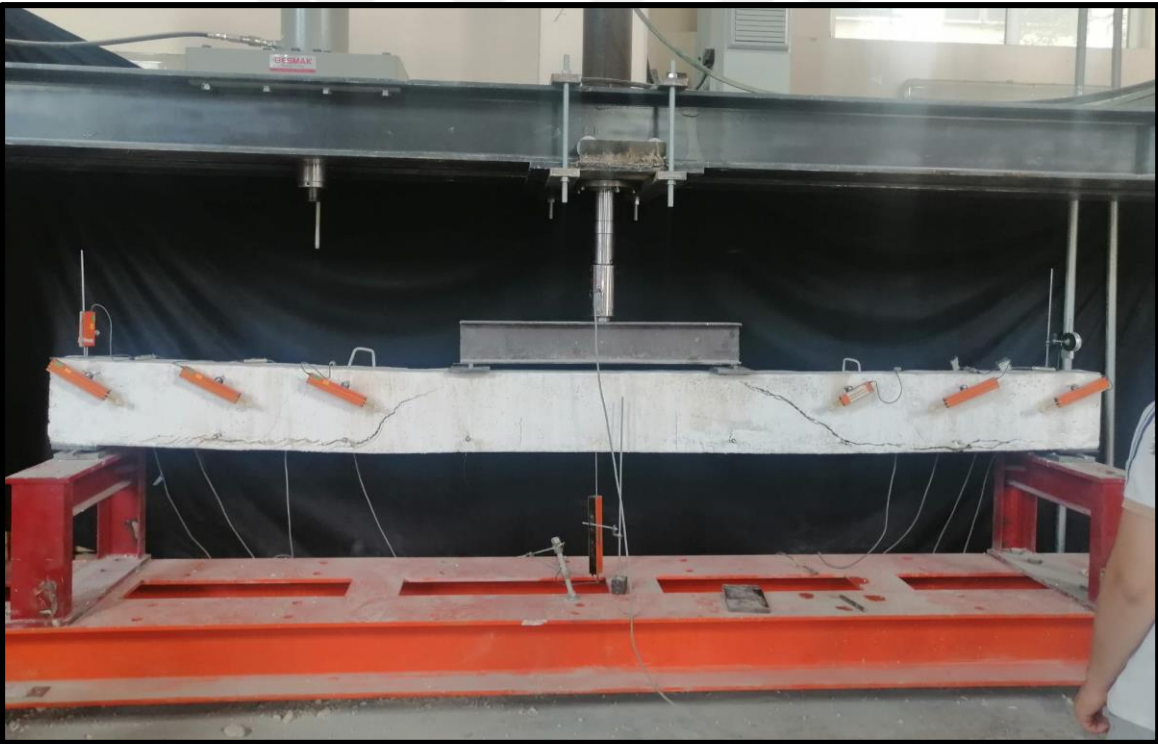
Resim 6.1. Mesnet ve kiriş yüzeyine yerleştirilen LVDT' ler



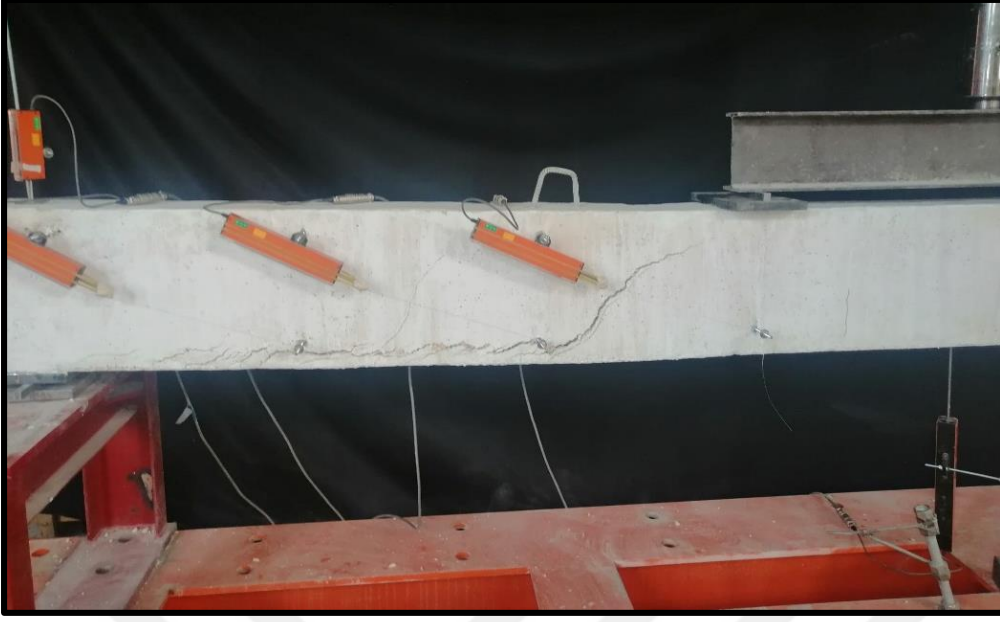
Resim 6.2. Kiriş açıklık ortasına yerleştirilen LVDT



Resim 6.3. Deney düzenegi

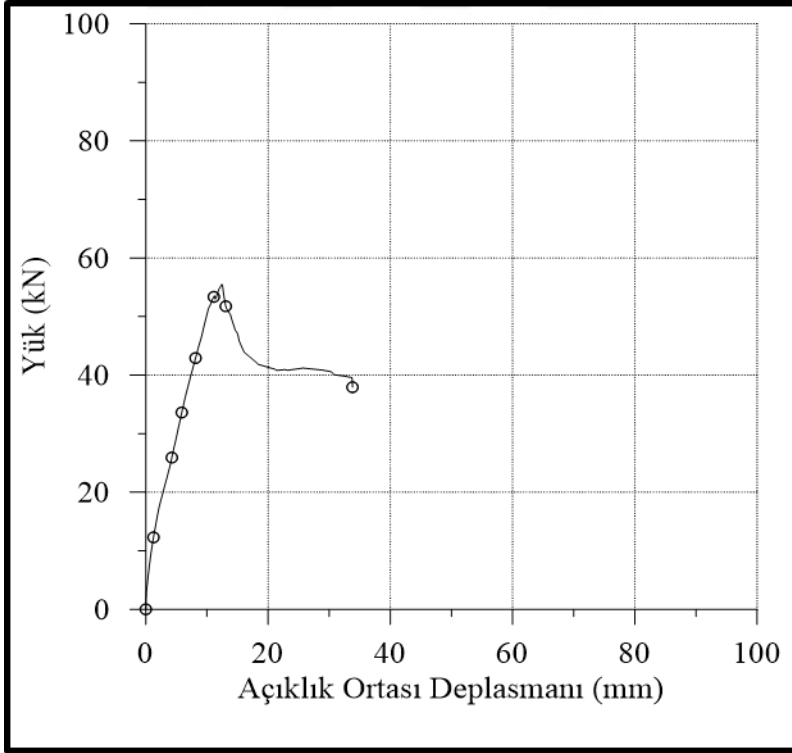


Resim 6.4. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonlar

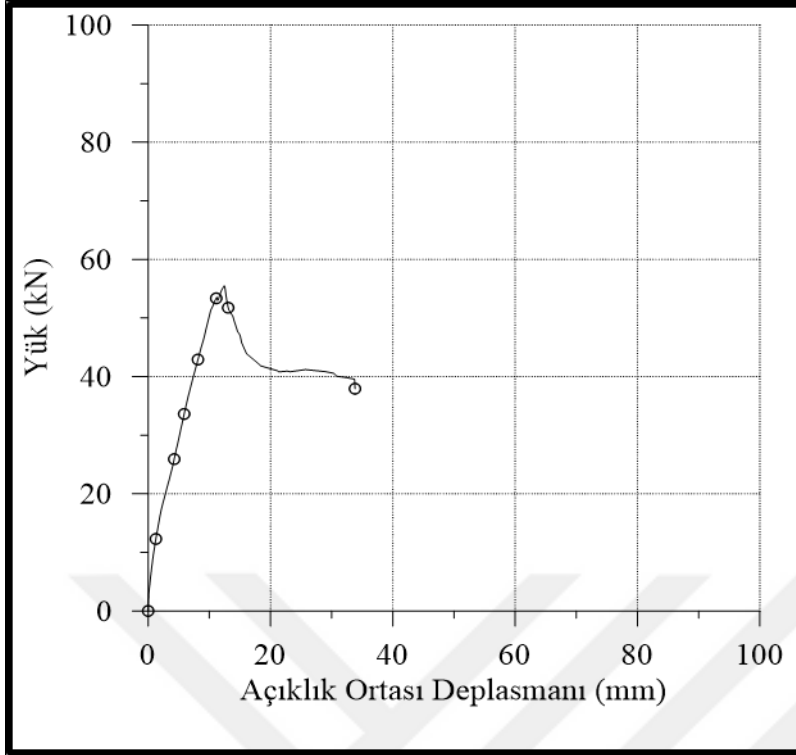


Resim 6.5. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonların nihai hali

Deney sonucunda kiriş kesme kuvveti-deplasman eğrileri ve açıklık ortası deplasman-tüketilen enerji eğrisi Şekil 6.1., ve Şekil 6.2.' de verilmiştir.



Şekil 6.1. N-1 kirişi yük- açıklık ortası deplasman eğrisi



Şekil 6.2. N-1 kirişi tüketilen enerji- açıklık ortası deplasman grafiği

Yük-deplasman grafiğinin altındaki alan, enerji tüketim kapasitesini vermektedir. Taşıma gücü kapasitesinin %15 kaybına kadar tüketilen enerji hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. Referans eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar

Numune No	Yük Kapasitesi		Yer değiştirme			Süneklik Oranı	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm)	Göçme Modu
	Maksimum (kN)	Göçme (kN)	Akmada (mm)	Maksimum (mm)	Göçme (mm)		göçme	
N-1	55,48	47,16	-	12,48	14,93	-	549,38	Kesme Kırılması

Kirişlerde ilk çatlaklar kılcal düzeyde kirişin eğilme bölgesinde kiriş alt kısmında oluşmuş ve daha sonra kesme bölgesinde kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır ve kirişe yükleme yapılmaya devam edildikçe kesme bölgesinde çatlak gelişimi devam etmiştir. Referans kirişin maksimum yük kapasitesi 55,48 kN'dur. Kirişin maksimum yükünde açıklık ortasında oluşan yer değiştirmesi 12,48 mm' dir. Kirişin maksimum yük kapasitesinin %85'i alınarak göçme yükü 47,16 kN olarak bulunmuştur. Göçme yükünde açıklık

ortasında oluşan yer değiştirme 14,93 mm'dir. Göçme yükünde tkutilen enerji 549,38 kN.mm' dir. Kesme yetersiz tasarlanan kirişten beklenildiği üzere referans kirişte oluşan göçme modu kesme kırılmasıdır.

6.2. N-2 Numaralı Kiriş Elemanı Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

Tam sargı CFRP ile güçlendirilen N-2 numaralı elemanın deney düzeneği Resim 6.6.'da verilmiştir. Kirişte oluşan kırılmalar Resim 6.7. ve Resim 6.8.' de; Resim 6.9.'da ise deney sonrası betondaki ezilme ve boyuna donatının burkulması görülmektedir.



Resim 6.6. Deney düzeneği



Resim 6.7. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali

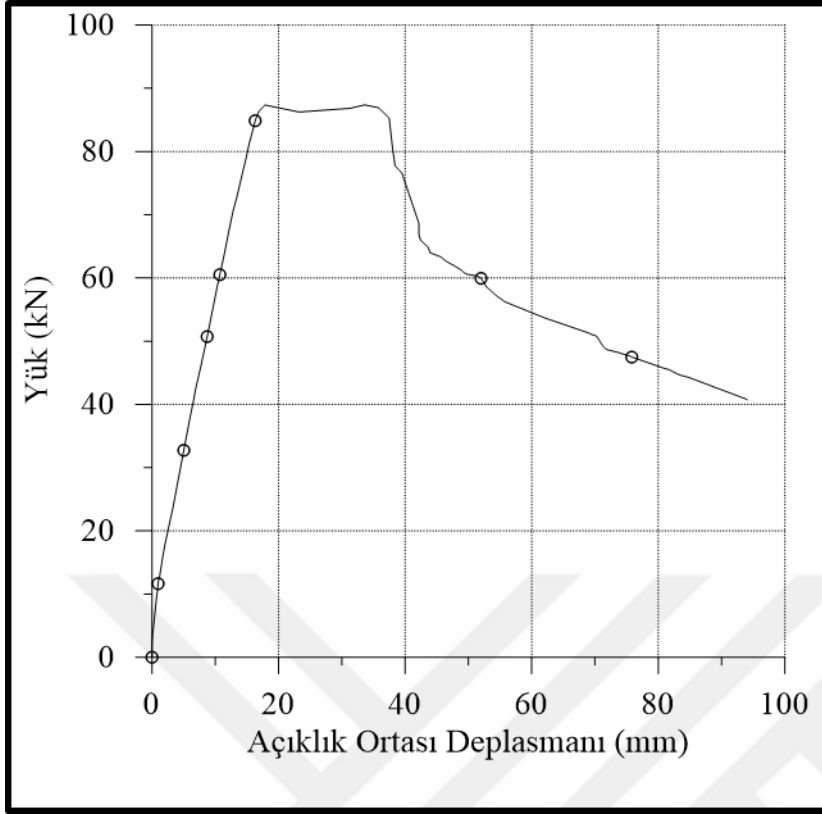


Resim 6.8. Kirişte oluşan eğilme çatlakları, boyuna donatının burkulması ve betonun ezilmesi

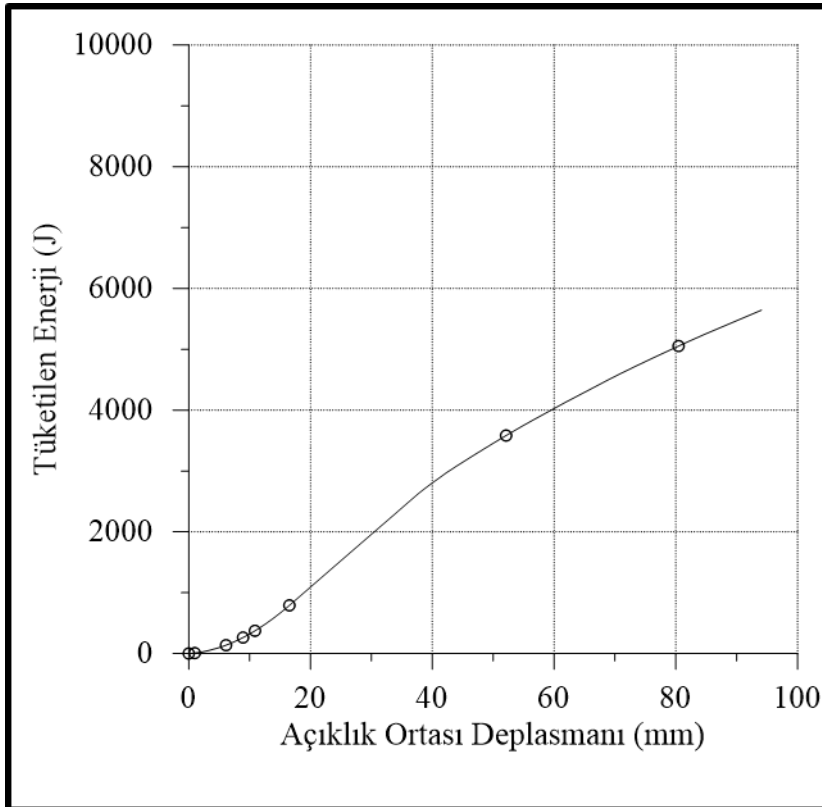


Resim 6.9. Kirişte bulunan boyuna donatının burkulması ve betonun ezilmesi

Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrileri ve açıklık ortası deplasman-tüketilen enerji eğrisi Şekil 6.3., ve Şekil 6.4.' te verilmiştir.



Şekil 6.3. N-2 kirişi yük- açıklık ortası deplasman eğrisi



Şekil 6.4. N-2 kirişi tüketilen enerji- açıklık ortası deplasman grafiği

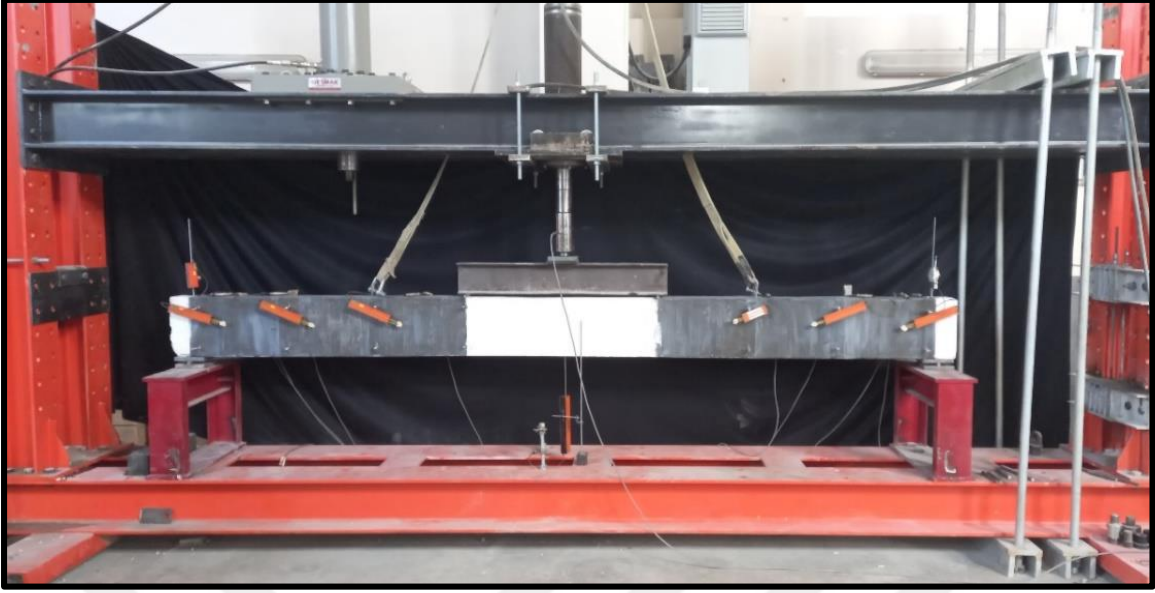
Çizelge 6.2. N-2 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar

Numune No	Yük Kapasitesi		Açıklık Ortası Yer değiştirme			Süneklik Oranı	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm)	Göçme Modu
	Maksimum (kN)	Göçme (kN)	Akmada (mm)	Maksimum (mm)	Göçme (mm)		Göçme	
N-2	87,36	74,26	17,69	32,58	40,04	2,263	2813,59	Eğilme Kırılması

Kirişlerde ilk çatlaklar kirişin eğilme bölgesinde oluşmuş, kirişe yükleme yapılmaya devam edildikçe yine kiriş eğilme bölgesinde çatlak gelişimi devam etmiştir. Artan yük etkisi altında CFRP liflerinde ufak çırtırlar şeklinde sesler olsa da deney sonucunda liflerde kopma olmamıştır. Kirişe uygulanan yük artırılmaya devam edildiğinde kirişin taşıdığı yükteki artış azalmış ve okunan açıklık ortası deplasman değerinde önemli artış olmuştur. Nihai dayanıma ulaşan kirişte, betonda ezilme ve boyuna donatılarda burkulma oluşmuştur. Resim 6.9.' da bu durum görülmektedir. Kirişin maksimum yükü 87,36 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri 32,58 mm'dir. Kirişin maksimum yükünün %85'i alınarak göçme yükü 74,26 kN olarak elde edilmiştir. Göçme anındaki tüketilen enerji 2813,59 kN.mm' dir. Kesme kapasitesi referans elemana göre %57 oranında artmıştır. Göçme anındaki tüketilen enerji ise referans elemana göre 4,121 kat kadar artmıştır. Süneklik oranı; göçme anındaki yer değiştirmenin akma anındaki yer değiştirmeye oranı alınarak hesaplanmış ve 2,263 bulunmuştur. Kesme yetersiz tasarlanan kirişte, CFRP tam sargı uygulaması ile kirişin gevrek kesme kırılmasının sünek eğilme kırılmasına dönüştüğü ve güçlendirme tekniğinin başarılı olduğu görülmüştür.

6.3. N-3 Numaralı Kiriş Elemanı Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

Tam sargı BFRP ile güçlendirilen N-3 numaralı elemanın deney düzeneği Resim 6.10.'da verilmiştir. Resim 6.11.'de kirişte oluşan kırılmaların nihai hali, Resim 6.12.' de BFRP'nin yırtılması, Resim 6.13.' te kirişte oluşan çatlak görülmektedir.



Resim 6.10. Deney düzeneği



Resim 6.11. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonlar

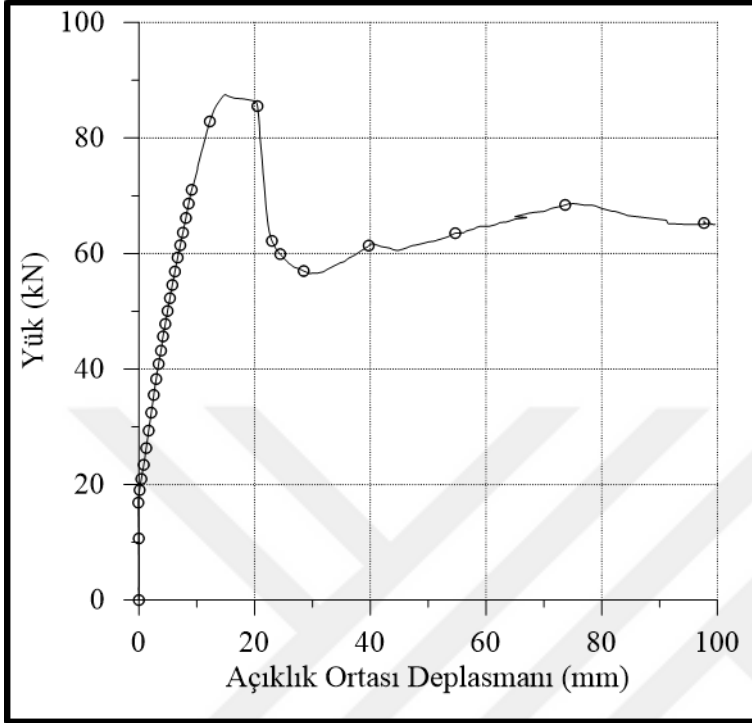


Resim 6.12. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali

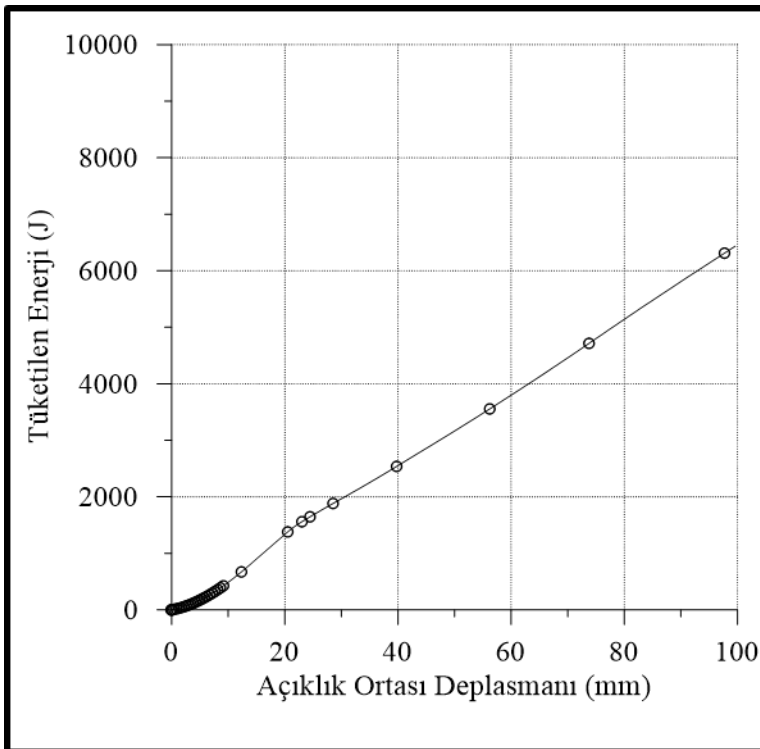


Resim 6.13. Kirişte oluşan çatlak

Deney sonucunda elde edilen yük-açıklık ortası deplasman eğrileri ve açıklık ortası deplasman-tüketilen enerji eğrisi Şekil 6.5., ve Şekil 6.6.' da verilmiştir.



Şekil 6.5. N-3 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi



Şekil 6.6. N-3 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği

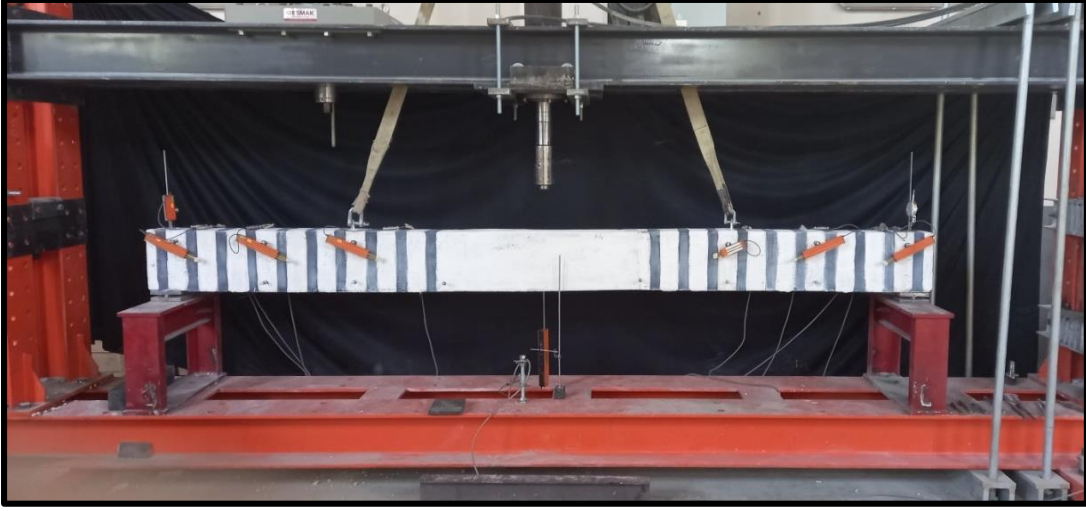
Çizelge 6.3. N-3 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar

Numune No	Yük Kapasitesi		Açıklık Ortası Yer değiştirme			Süneklik Oranı	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm)	Göçme Modu
	Maksimum (kN)	Göçme (kN)	Akmada (mm)	Maksimum (mm)	Göçme (mm)		Göçme	
N-3	87,23	74,15	14,7	19,78	21,63	1,471	1533,82	Kesme+ Eğilme Kırılması

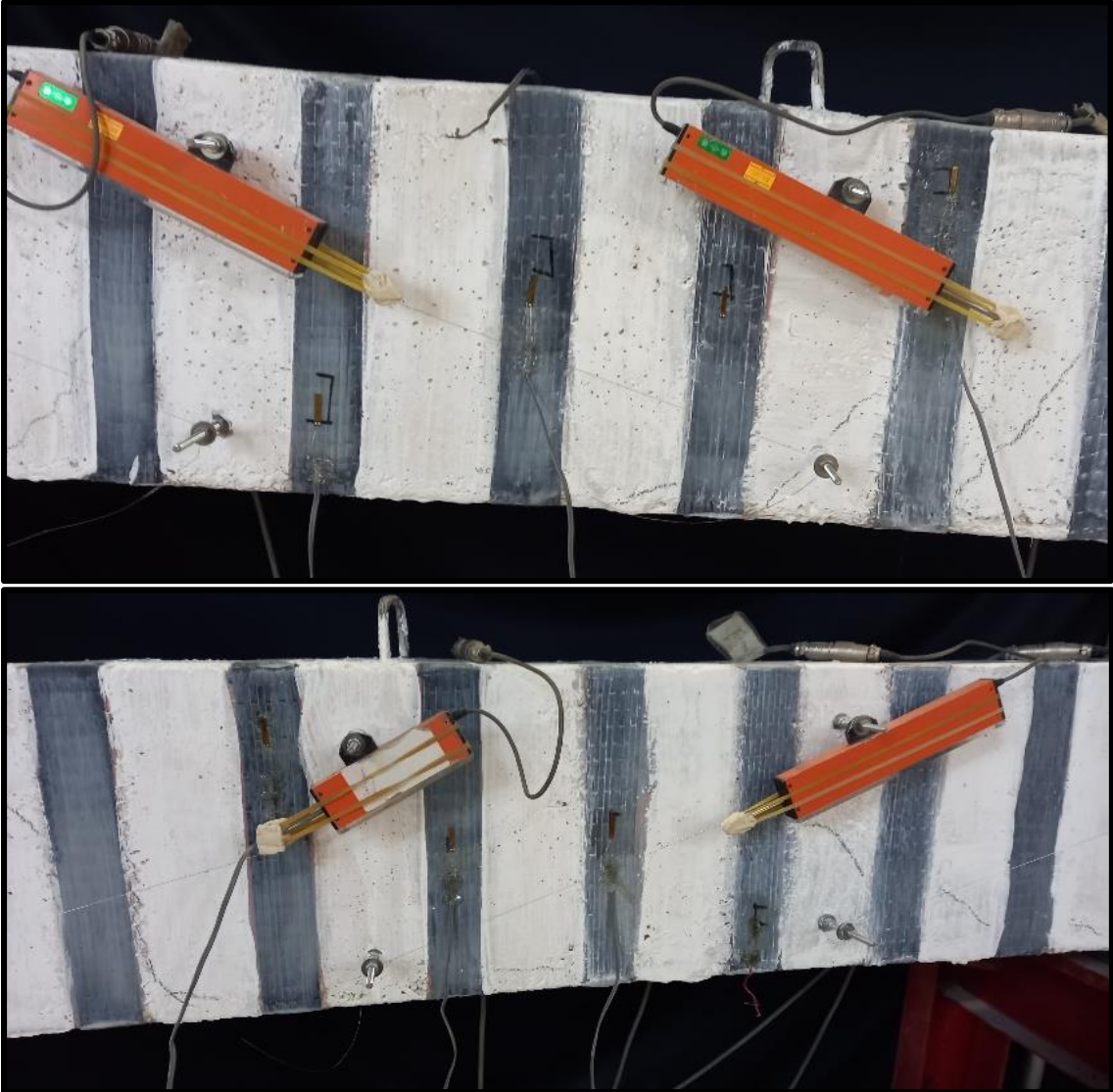
Kirişlerde ilk çatlaklar kirişin eğilme bölgesinde oluşmuş, kirişe yükleme yapılmaya devam edildikçe kiriş kesme bölgesinde çatlaklar oluşmuştur. Artan yük etkisi ile BFRP liflerinde kopmaya bağlı sesler duyulmuş ve kopmalar kiriş alt yüzeyinden yukarıya doğru gelişmiştir. Kesme açıklığında BFRP liflerinin altında gelişen çatlağın büyümesi ile kirişte kırılma meydana gelmiştir. Kirişte eğik çekme çatlağı oluşmuştur. Kirişin maksimum yük kapasitesi 87,23 kN olmuştur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri 19,78 mm'dir. Kirişin göçme yükü 74,15 kN'dur. Göçme yükü, maksimum yük kapasitesinin %15 kaybı alınarak bulunmuştur. Bu yüke karşılık açıklık ortası yerdeğiştirme değeri 21,63 mm'dir. Kiriş süneklik oranı N-2 kirişi ile karşılaştırıldığında, N-2 kirişine göre %35 oranında daha az olmuştur. Göçme anındaki tüketilen enerji 1533,82 J' dür. Kesme kapasitesi referans elemana göre %57 oranında artmıştır; N-2 elemanı ile taşıma gücü kapasiteleri yaklaşık olarak aynıdır. Bu da BFRP ile tam sargı ile güçlendirme işleminin başarılı olduğunu göstermektedir. Göçme anındaki tüketilen enerji ise referans elemana göre 1,79 katı kadar artmış, N-2 numaralı elemana göre 0,455 katı kadar azalmıştır. Kesme yetersiz tasarlanan kirişe tam sargı BFRP yapılarak kirişin göçme modu kesme ve eğilmenin birlikte etkisiyle olmuştur.

6.4. N-4 Numaralı Kiriş Elemanı Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

Şerit CFRP sargılama ile güçlendirilen N-4 numaralı elemanın deney düzeneği Resim 6.14.'te verilmiştir. Şerit yüzeylerinde oluşacak gerinimleri ölçmek için sağ ve sol kesme açıklığına 4' er adet strain gauge (gerinim pulları) yerleştirilmiştir. Resim 6.15.' te kirişe yerleştirilen gerinim pulları görülmektedir. Resim 6.16.' da kirişte oluşan kırılmalar, Resim 6.17.' de ise kiriş beton basınç bölgesinin ezilmesi ve kirişte bulunan boyuna donatının burkulması görülmektedir.



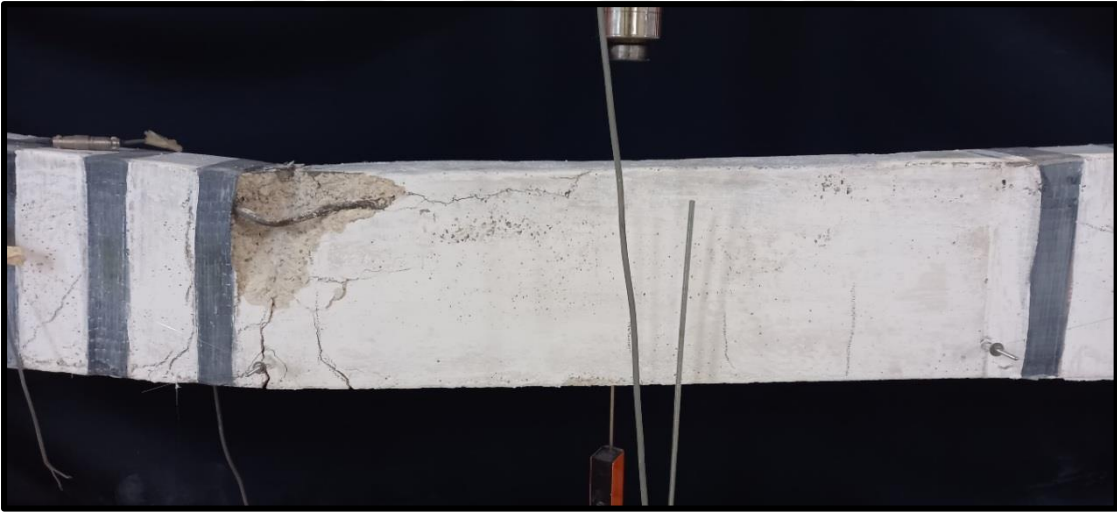
Resim 6.14. Deneý düzeneđi



Resim 6.15. Kiriş sağ ve sol kesme açıklığına yerleştirilen gerinim pulları

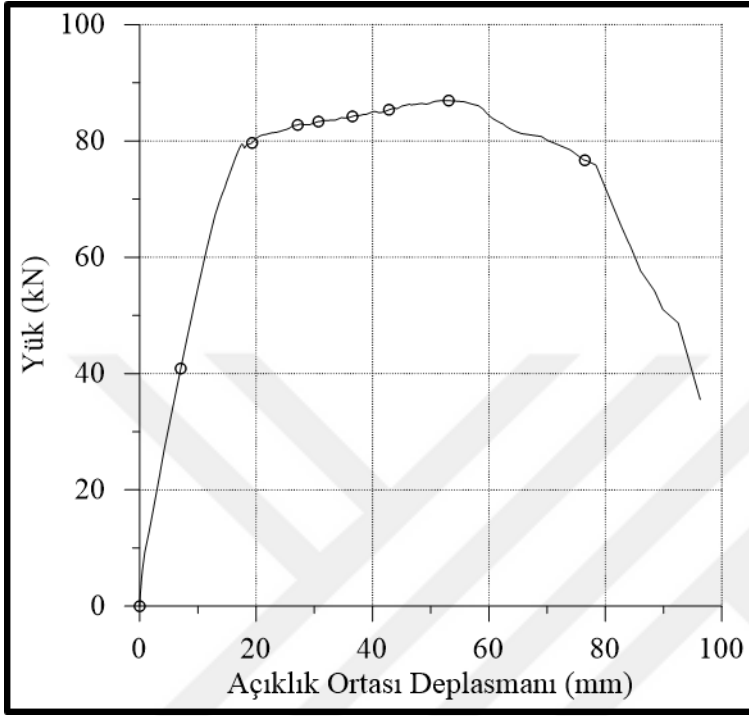


Resim 6.16. Deney sonrası kirişte oluşan deformasyonlar

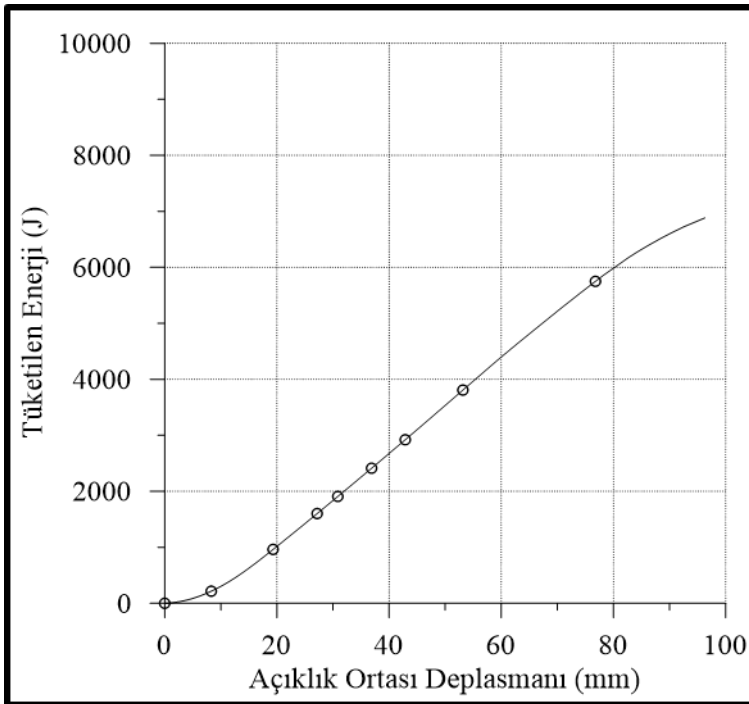


Resim 6.17. Kirişte bulunan boyuna donatının burkulması ve betonun ezilmesi

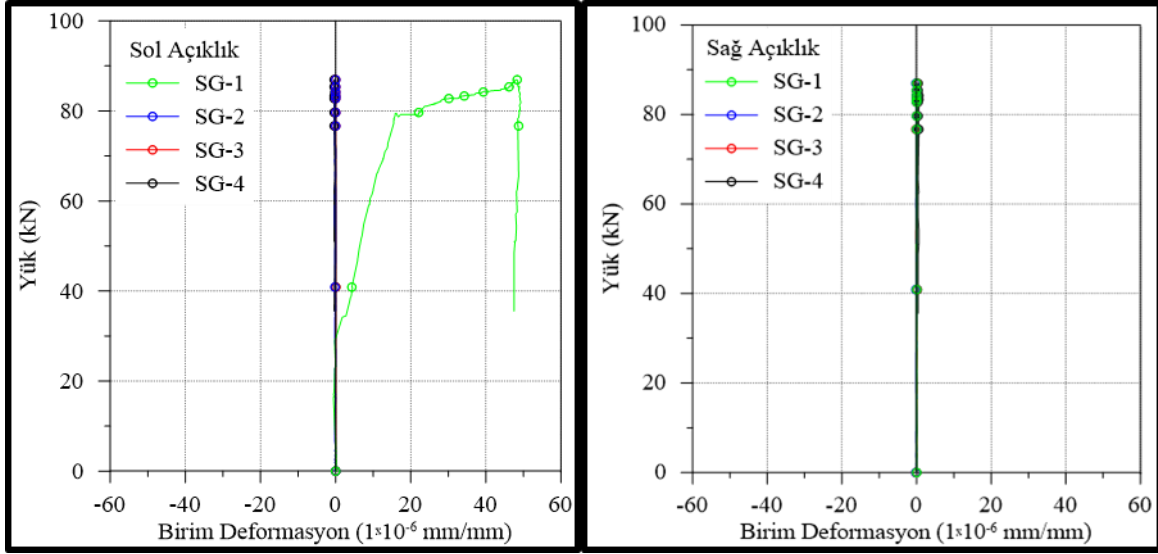
Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrisi, tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman eğrisi ve yük-birim deformasyon eğrisi Şekil 6.7., Şekil 6.8. ve Şekil 6.9.' da verilmiştir.



Şekil 6.7. N-4 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi



Şekil 6.8. N-4 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği



Şekil 6.9. N-4 kirişi yük-birim deformasyon eğrisi grafiği

Çizelge 6.4. N-4 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar

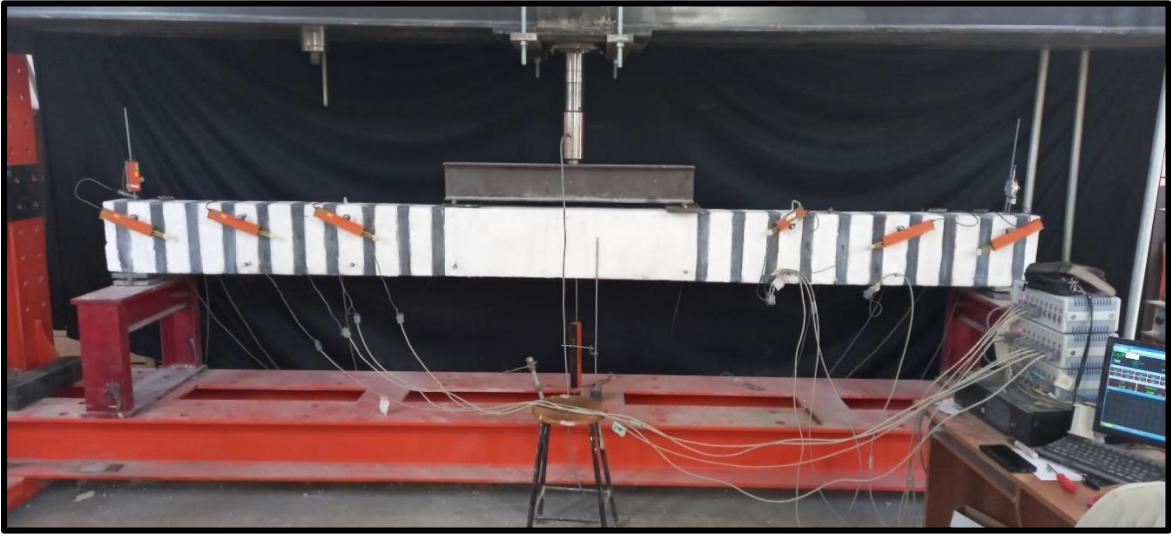
Numune No	Yük Kapasitesi		Açıklık Ortası Yer değiştirme			Süneklik Oranı	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm)	Göçme Modu
	Maksimum (kN)	Göçme (kN)	Akmada (mm)	Maksimum (mm)	Göçme (mm)		göçme	
N-4	86,92	73,88	17,28	54,78	79,04	4,574	5916,16	Eğilme Kırılması

Kirişlerde ilk çatlaklar kirişin eğilme bölgesinde gözlemlenmiş, kirişe yükleme yapılmaya devam edildikçe kiriş eğilme bölgesinde çatlak gelişimi devam etmiştir. Artan yük etkisi ile kirişin taşıdığı kesme kuvvetindeki artış azalmış ve okunan orta nokta deplasman değerlerindeki artış artmıştır. Betonda ezilme gerçekleşmiştir ve burada bulunan boyuna donatılarda burkulmuştur. Resim 6.17.' de bu durum görülmektedir. Kirişin maksimum yük kapasitesi 86,92 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri 17,28 mm'dir. Göçme yükü ise 79,04 kN' dur. Bu yüke karşılık açıklık ortası yer değiştirme değeri ise 79,04 mm'dir. Göçme anında tüketilen enerji tüketim kapasitesi 5916,16 J' dür. Taşıma gücü kapasitesi referans numuneye göre %56,7 oranında artmıştır; N-2 ve N-3 elemanlarına göre taşıma gücü kapasiteleri birbirlerine çok yakındır. Göçme anında tüketilen enerji kapasitesi ise referans elemana göre 9,769 kat, N-2 numaralı elemana göre 1,103 kat ve N-3 numaralı elemana göre 2,857 kat artmıştır. Süneklik ise N-

2 numaralı elemana göre %102 oranında ve N-3 numaralı elemana göre %211 oranında artmıştır. CFRP kumaşın şerit şeklinde kiriş yüzeyine uygulanması ile kirişin göçme anına kadar tükettiği enerji miktarı, tam sargı uygulaması ile karşılaştırıldığında daha fazla olmuştur. Kiriş, göçme anına kadar daha sünek bir davranış göstermiştir. CFRP'nin şeritler halinde uygulanması ile güçlendirilen kirişte göçme modu kesmeden eğilmeye dönüşmüştür.

6.5. N-5 Numaralı Kiriş Elemanı Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

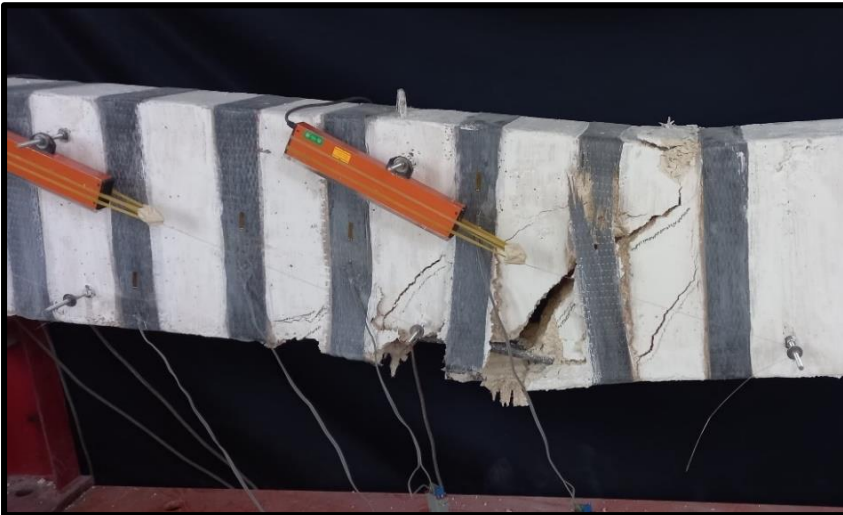
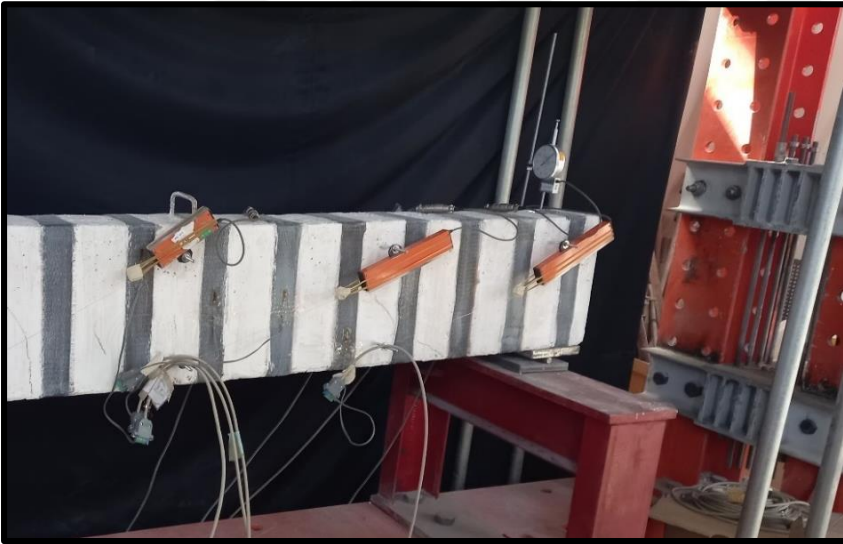
Şerit BFRP sargılama ile güçlendirilen N-5 numaralı elemanın deney düzeneği Resim 6.18.'de verilmiştir. N-4 numaralı kiriş elemanında yapıldığı gibi, şerit yüzeylerinde oluşacak gerinimleri ölçmek için sağ ve sol kesme açıklığına 4'er adet strain gauge (gerinim pulları) yerleştirilmiştir. Resim 6.20.' de kirişe yerleştirilen gerinim pulları, Resim 6.19.' da kirişte oluşan kırılmaların nihai hali, Resim 6.21.' de sol mesnette oluşan beton ezilmesi görülmektedir.



6.18. Deney düzeneği



Resim 6.19. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali

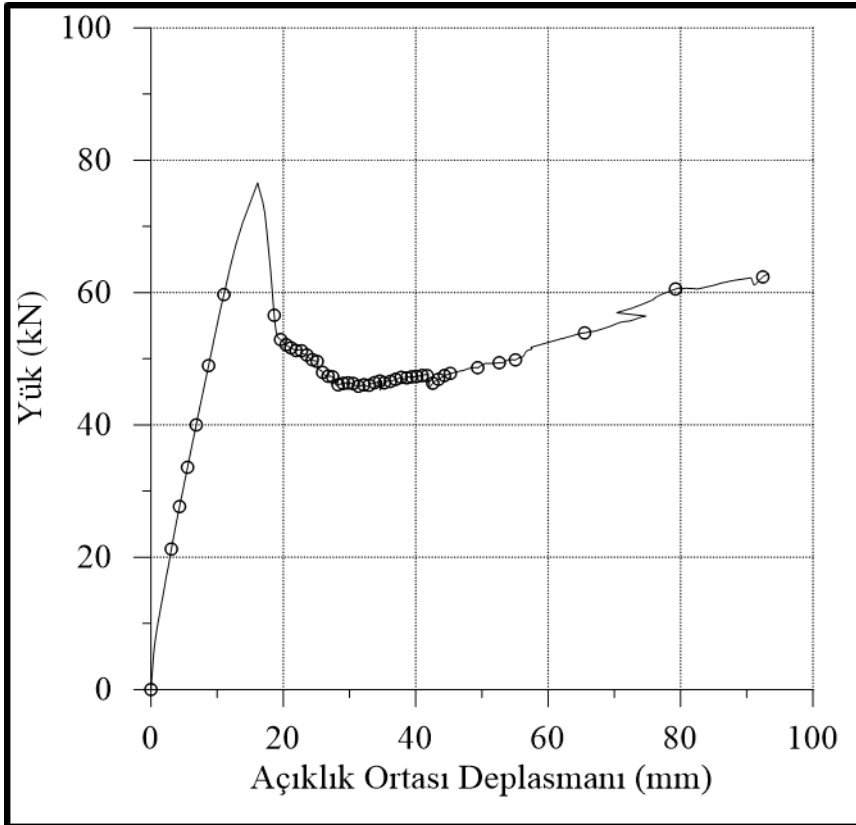


Resim 6.20. Kirişte oluşan çatlak ve şeritlere konulan strain gauges

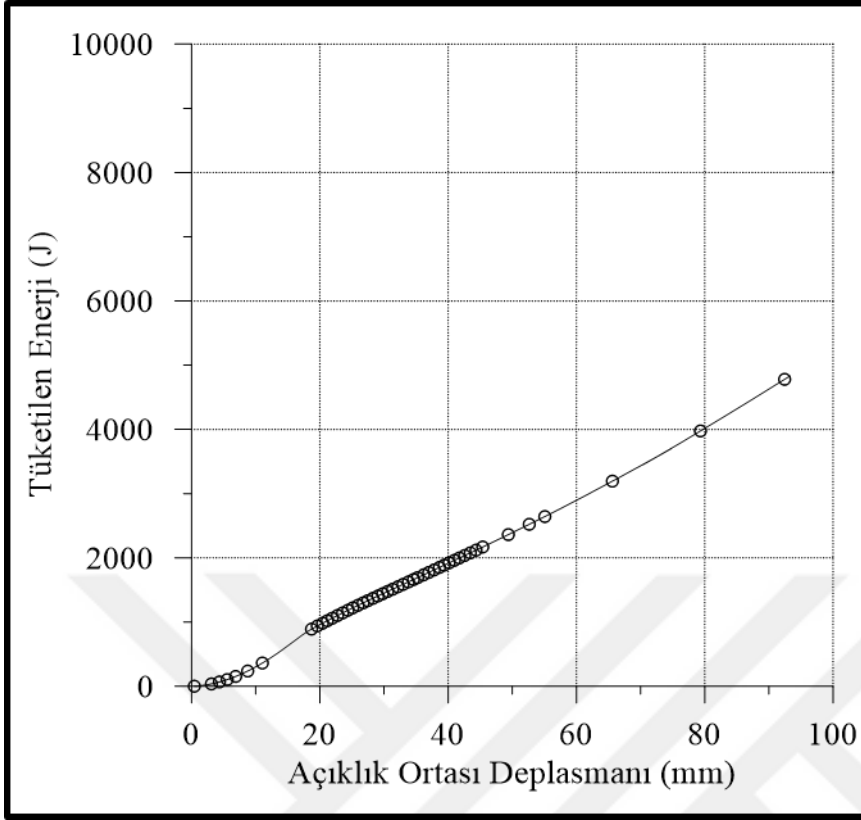


6.21. Sol mesnette oluşan beton ezilmesi

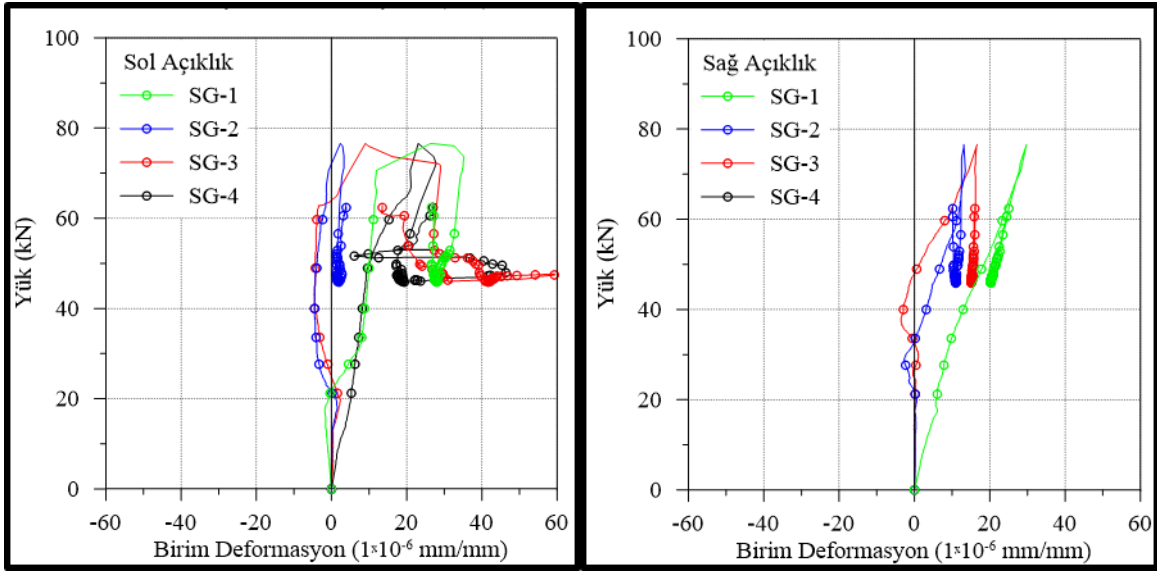
Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrisi, tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman eğrisi ve yük-birim deformasyon eğrisi Şekil 6.10., Şekil 6.11. ve Şekil 6.12.' de verilmiştir.



Şekil 6.10. N-5 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi



Şekil 6.11. N-5 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği



Şekil 6.12. N-5 kirişi yük-birim deplasman grafiği

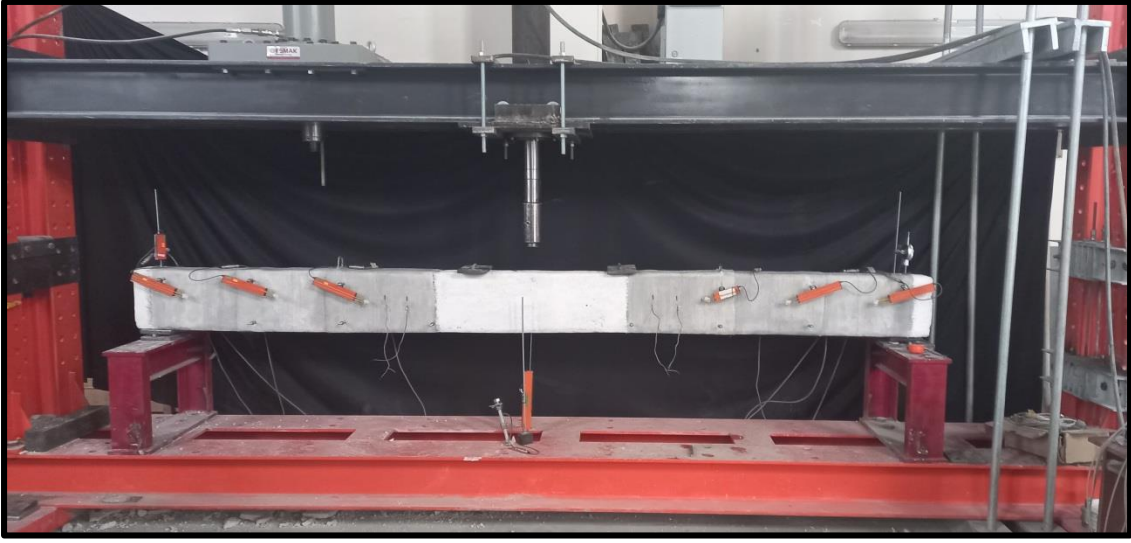
Çizelge 6.5. N-5 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar

Numune No	Yük Kapasitesi		Açıklık Ortası Yer değiştirme			Süneklik Oranı	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm)	Göçme Modu
	Maksimum (kN)	Göçme (kN)	Akmada (mm)	Maksimum (mm)	Göçme (mm)		göçme	
N-5	76,56	65,08	-	16,16	17,78	-	835,19	Kesme Kırılması

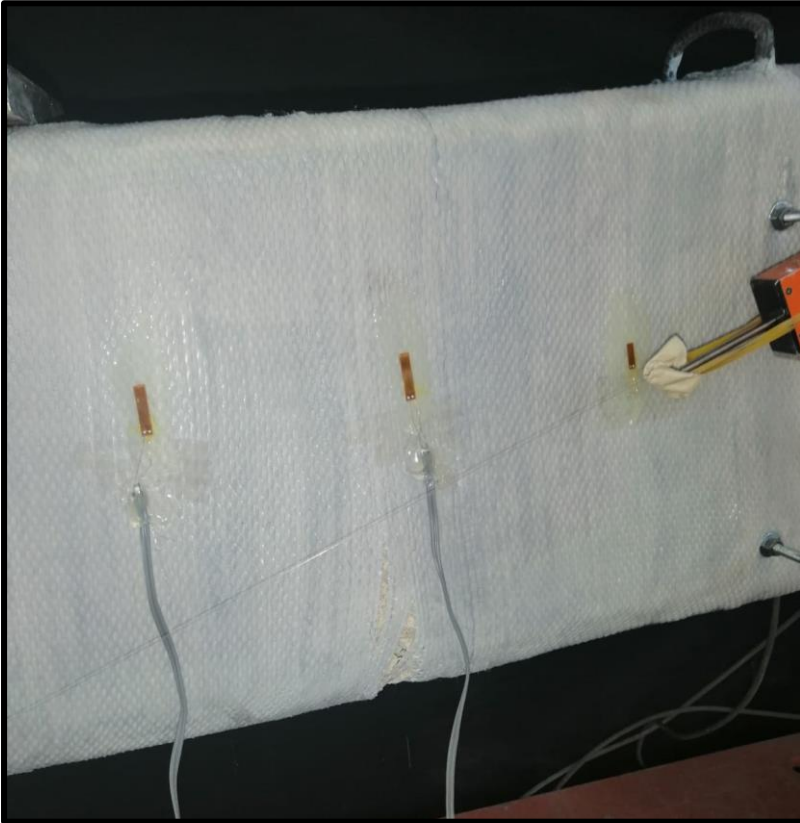
Kirişte uygulanan yükün artması ile birlikte, kesme bölgesinde çatlaklar oluşmuştur. Artan yük etkisi ile çatlaklar genişlemiş ve kiriş gevrek kesme kırılması ile göçmüştür. Eğik çatlağın geliştiği bölgede BFRP şeritleri yüzeyden sıyrılmıştır. Maksimum yük kapasitesi 75,56 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri 16,16 mm'dir. Göçme anındaki kapasitesi 65,08 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri ise 17,78 mm'dir. Göçme anında enerji tüketim kapasitesi 835,19 J' dür. Taşıma gücü kapasitesi referans numuneye göre %38 oranında artmıştır; N-2, N-3 ve N-4 numaralı elemanlara göre taşıma gücü kapasitesi %12 oranında azalmıştır. Enerji tüketim kapasitesi referans elemana göre 0,52 kat artmıştır; N-2 numaralı elemana göre 0,703 kat, N-3 numaralı elemana göre 0,455 kat ve N-4 numaralı elemana göre 0,859 kat azalmıştır. Şerit sargı BFRP ile güçlendirilen kirişte göçme modu kesme kırılmasıdır.

6.6. N-6 Numaralı Kiriş Elemanı Deney Sonuçları ve Değerlendirmesi

Tam sargı PET-FRP ile güçlendirilen N-6 numaralı elemanın deney düzeneği Resim 6.22.'de verilmiştir. Şerit yüzeylerinde oluşacak gerinimleri ölçmek için sağ ve sol kesme açıklığına 3' er adet strain gauge (gerinim pulları) yerleştirilmiştir. Resim 6.23'te yerleştirilen gerinim pulları gösterilmiştir. Resim 6.24.' te kirişte oluşan kırılmalar ve Resim 6.25.' te sağ mesnette oluşan beton ezilmesi gösterilmiştir.



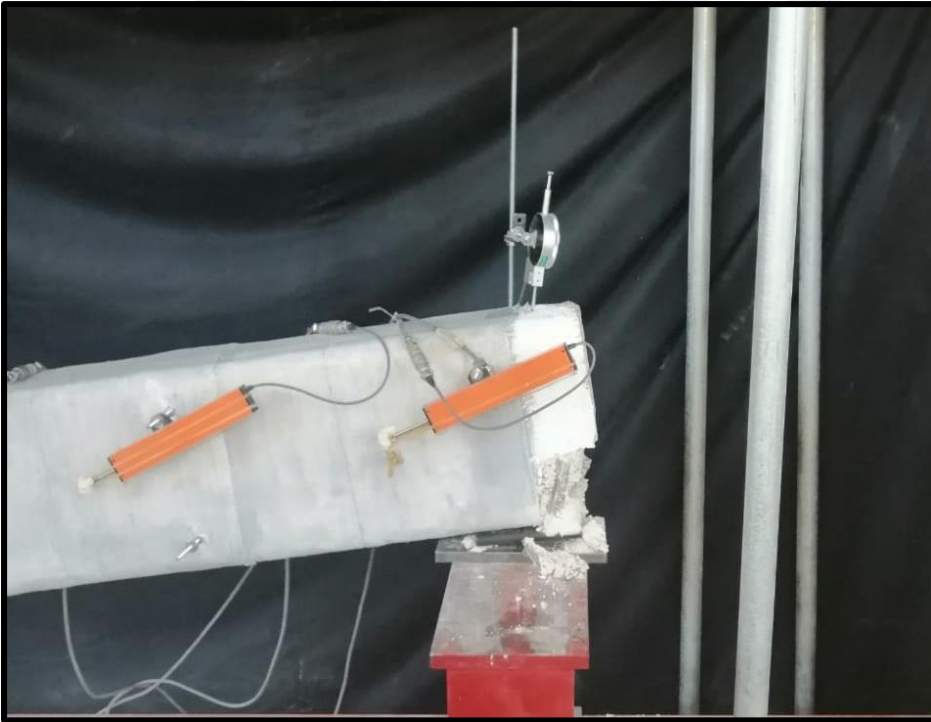
Resim 6.22. Deney düzeneği



Resim 6.23. Kiriş sağ ve sol kesme açıklığına yerleştirilen gerinim pulları

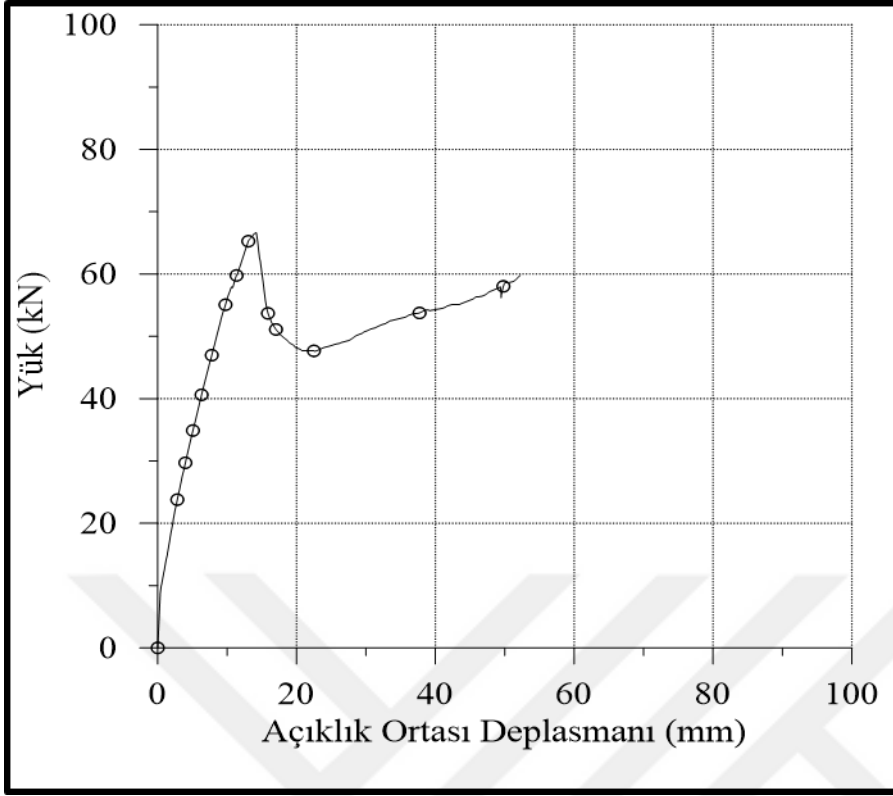


Resim 6.24. Kirişte oluşan deformasyonların nihai hali

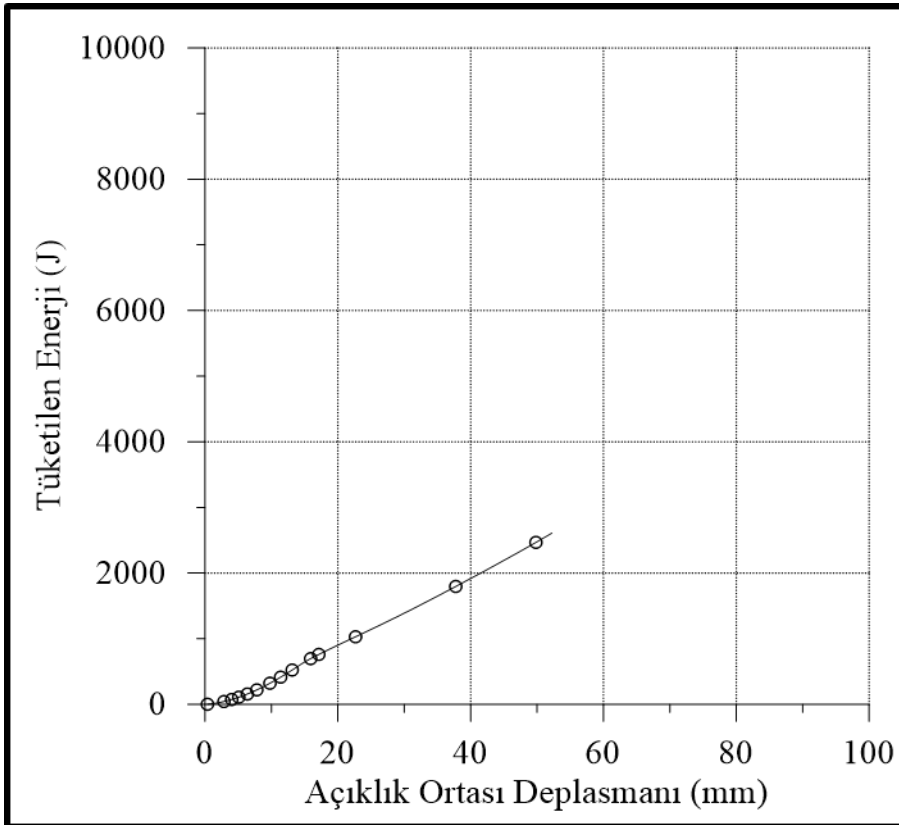


Resim 6.25. Sağ mesnette oluşan beton ezilmesi

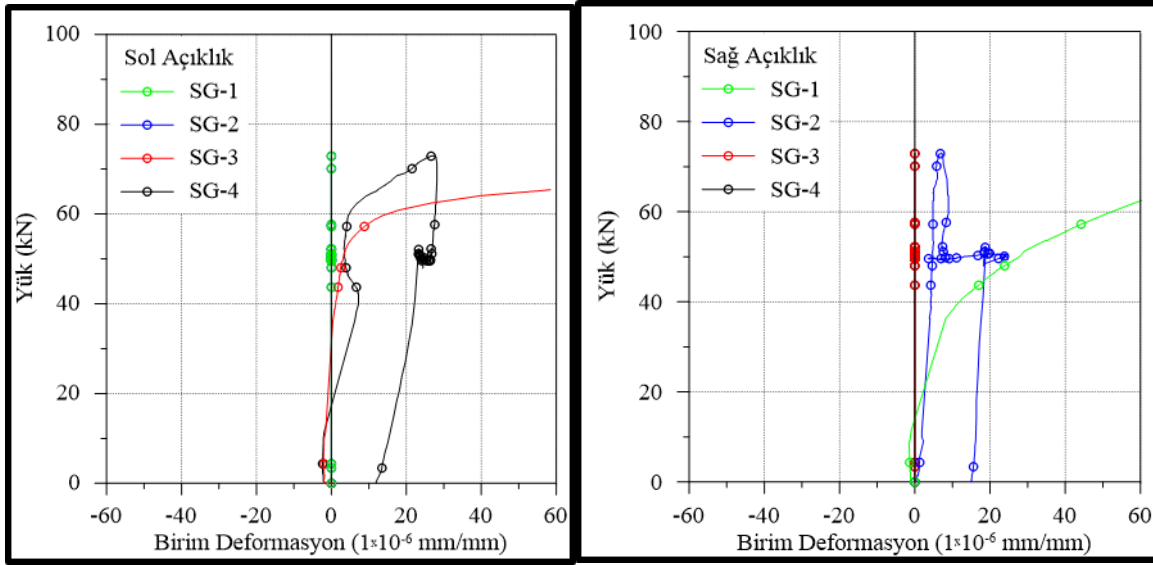
Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrisi, tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman eğrisi ve yük-birim deformasyon eğrisi Şekil 6.13., Şekil 6.14. ve Şekil 6.15.' te verilmiştir.



Şekil 6.13. N-6 kirişi yük-açıklık ortası deplasman eğrisi



Şekil 6.14. N-6 kirişi tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman grafiği



Şekil 6.15. N-6 kirişi yük-birim deformasyon grafiği

Çizelge 6.6. N-6 numaralı eleman için deneylerden elde edilen sonuçlar

Numune No	Yük Kapasitesi		Açıklık Ortası Yer değiştirme			Süneklik Oranı	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm) göçme	Göçme Modu
	Maksimum (kN)	Göçme (kN)	Akmada (mm)	Maksimum (mm)	Göçme (mm)			
N-6	66,59	56,6	-	14,1	15,46	-	673,23	Kesme Kırılması

N-6 Kirişinde artan yük etkisinde kesme açıklığında kesme çatlakları gelişmiştir. Kirişe uygulanan yük arttıkça kesme açıklığında gelişen çatlaklar genişlemiştir. PET kumaş kiriş alt yüzeyinden başlayarak artan yük etkisiyle yırtılmaya başlamış ve bu süreç kiriş üst yüzeyine kadar oldukça yavaş bir şekilde devam etmiştir. PET kumaşta liflerin tam ayrılması diğer FRP çeşitlerinden farklı olarak oldukça zaman alan bir süreçte gerçekleşmiştir. Kirişin maksimum yük kapasitesi 66,59 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri 14,10 mm'dir. Göçme anındaki yük kapasitesi 56,6 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen açıklık ortası yer değiştirme değeri ise 15,46 mm'dir. Göçme anında enerji tüketim kapasitesi 673,23 J' dür. Taşıma gücü kapasitesi referans numuneye göre %20 oranında artmıştır; N-2, N-3, N-4 numaralı elemanlara göre taşıma gücü kapasitesi %23,4 oranında ve N-5 numaralı elemana göre %13 oranında azalmıştır. Enerji tüketim kapasitesi referans elemana göre 0,226 kat artmıştır; N-2 numaralı elemana

göre 0,76 kat, N-3 numaralı elemana göre 0,561 kat, N-4 numaralı elemana göre 0,886 kat ve N-5 numaralı elemana göre ise 0,194 kat azalmıştır. Tam sargı PET-FRP ile güçlendirilen kirişte göçme modu kesme kırılmasıdır.

6.7. Kirişlerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tüm kirişlerin deneysel çalışmadan elde edilen kesme kuvveti, açıklık ortası yer değiştirme değeri, akmada rijitlik değeri, süneklik oranı, enerji tüketim kapasitesi, enerji süneklik oranı Çizelge 6.7.' de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Tüm kiriş elemanları için deneylerden elde edilen sonuçlar

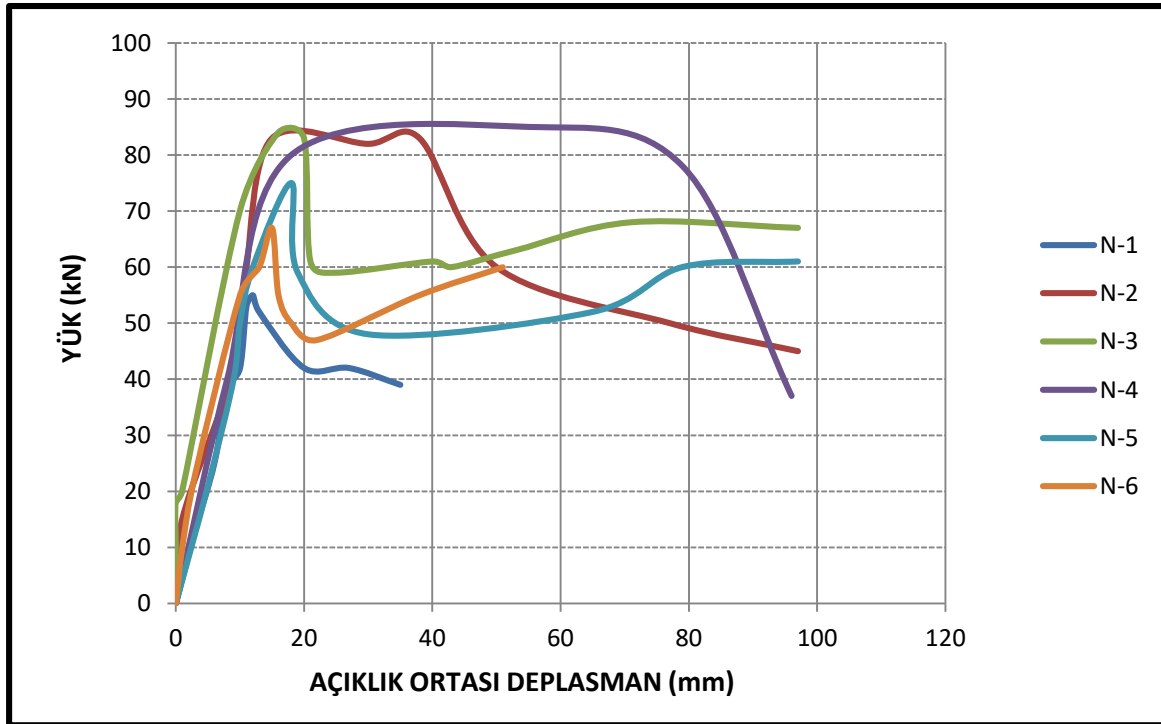
Eleman Numarası		N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
Yük Kapasitesi	Akmada (kN)	-	87,36	86,34	79,33	-	-
	Maksimum (kN)	55,48	87,36	87,23	86,92	76,56	66,59
	Göçme (kN)	47,16	74,26	74,15	73,88	65,08	56,6
Yer değiştirme	Akmada (mm)	-	17,69	14,7	17,28	-	-
	Maksimum (mm)	12,48	32,58	19,78	54,78	16,16	14,1
	Göçme (mm)	14,93	40,04	21,63	79,04	17,78	15,46
Süneklik Oranı			2,263	1,471	4,574		
Enerji Tüketim Kapasitesi (kN.mm)	Akma	-	917,75	895,52	819,31	-	-
	Göçme	549,38	2813,59	1533,82	5916,16	835,19	673,23
Enerji Süneklik Oranı		-	3,07	1,71	7,22	-	-
Göçme Modu		Kesme Kırılması	Eğilme Kırılması	Kesme+Eğilme Kırılması	Eğilme Kırılması	Kesme Kırılması	Kesme Kırılması

Çizelge 6.7. incelendiğinde referans elemana göre, lifli polimer malzemelerle güçlendirilen tüm kirişlerin yük kapasitelerinin ve tüketilen enerji kapasitelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Göçme anındaki kapasite, maksimum yük kapasitesinin %85'i alınarak bulunmuştur. Enerji tüketim kapasitesi, yük-deplasman grafiğinin altındaki alan hesaplanarak bulunmuştur. Enerji süneklik oranı; göçme anındaki enerji tüketim kapasitesinin, akma anındaki enerji tüketim kapasitesine oranı ile bulunmuştur

Süneklik oranı; göçme anındaki yer değiştirmenin, akma anındaki yer değiştirmeye oranlaması ile bulunmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde tam sargı CFRP, tam sargı BFRP ve şerit CFRP sargı ile güçlendirilen kirişlerde göçme modu gevrek kesme kırılmasından sünek eğilme kırılmasına doğru değişmiştir. BFRP şerit ve PET-FRP tam sargı ile güçlendirilen kirişlerde ise tüketilen enerji miktarı ve kirişlerin taşıdığı maksimum kesme kuvvetleri referans elemandan daha fazla olmasına rağmen, kırılma modları değişmemiştir.

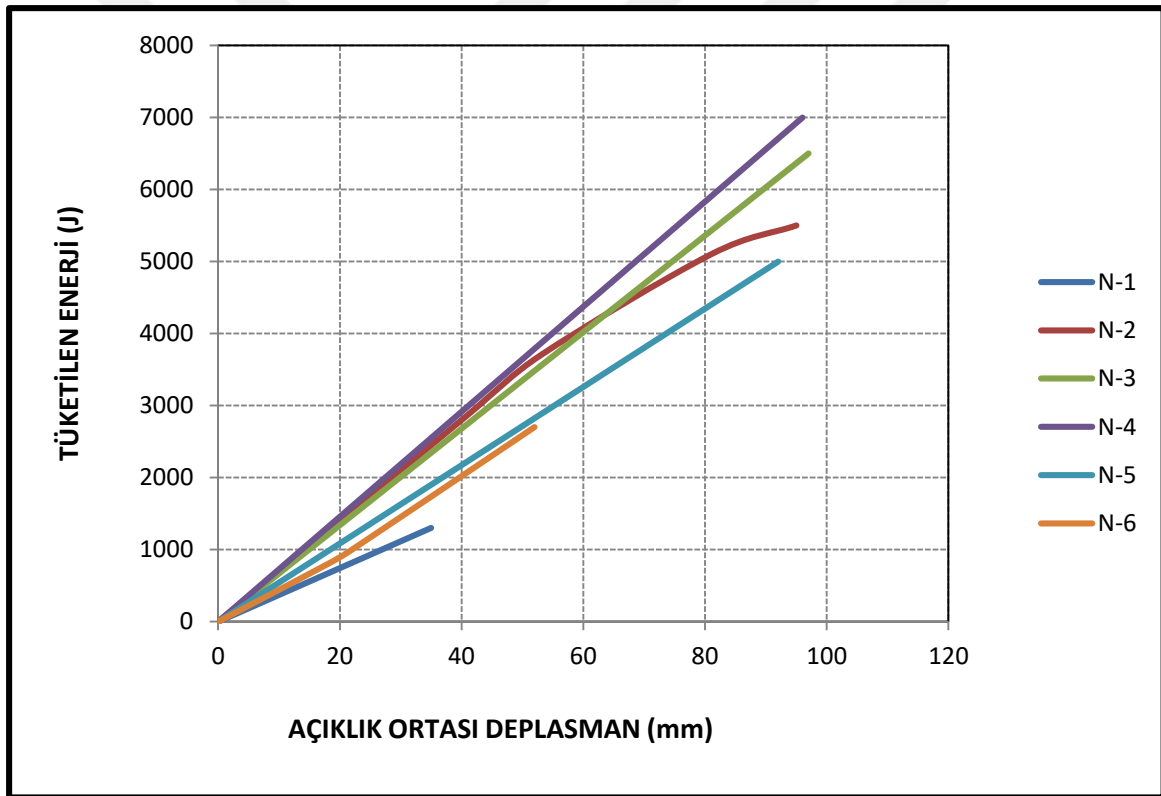
Tüm kiriş elemanlar için deneysel sonuçlardan elde edilen yük-açıklık ortası deplasman eğrileri Şekil 6.16'da bir arada verilmiştir.



Şekil 6.16. Referans eleman ve lifli polimerlerle güçlendirilen kirişlerin yük-açıklık ortası deplasman eğrileri karşılaştırılması

Şekil 6.16.' ya bakıldığında lifli polimer malzemelerle güçlendirilen tüm kirişlerin referans elemana göre kesme kuvveti kapasitesinin artmış olduğu görülmektedir. Referans elemana göre kesme kuvveti kapasitesinde maksimum artışın tam sargı CFRP yapılan kiriş elemanı N-2, tam tam sargı BFRP yapılan kiriş elemanı N-3 ve şerit sargı CFRP yapılan kiriş elemanı N-4'te olduğu görülmektedir. Referans elemana göre kesme kuvveti kapasitesinde en az artışın ise tam sargı PET-FRP yapılan N-6 numaralı kiriş elemanı olduğu görülmektedir.

Tüm kiriş elemanlar için deneysel sonuçlardan elde edilen tüketilen enerji-açıklık ortası deplasman eğrileri Şekil 6.17' de bir arada verilmiştir.



Şekil 6.17. Referans eleman ve lifli polimerlerle güçlendirilen kirişlerin tüketilen enerji ve açıklık ortası deplasman eğrileri karşılaştırılması

Şekil 6.17.' ye bakıldığında güçlendirilen tüm kirişlerin referans elemana göre enerji tüketim kapasitesinin arttığı, en fazla artış olan elemanın şerit CFRP sargılama yapılan N-4 numaralı kiriş olduğu görülmektedir. Referans elemana göre enerji tüketim kapasitesinde en az artış olan eleman tam sargı PET-FRP yapılan N-6 numaralı kiriş elemanı olduğu görülmektedir.



7. ANALİTİK HESAPLAR

Deney elemanlarının kesme kuvveti kapasiteleri hesaplanırken TS 500, TBDY 2018, ACI 318 ve ACI 440 yönetmeliklerinin önerdiği eşitliklerden yararlanılmıştır (ACI 318-14, 2014 [55] ; ACI 440.2R-17, 2017 [56]; TBDY-18, 2018 [57] ve TS 500, 2000 [58]).

TBDY 2018 yönetmeliğinden ve TS500 standardından alınan ve analitik hesaplarda kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir:

$$V_f = \frac{2.n_f.t_f.w_f.E_f.\varepsilon_f.d}{s_f} \quad (7.1.)$$

$$\varepsilon_f \begin{cases} \leq 0,004 \\ \leq 0,5 \cdot \varepsilon_{fu} \end{cases} \quad (7.2.)$$

$$V_{cr} = 0,65 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (7.3.)$$

$$V_c = 0,8 \cdot V_{cr} \quad (7.4.)$$

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot d \quad (7.5.)$$

$$V_r = V_c + V_s + V_f \quad (7.6.)$$

ACI 440.2R-17 yönetmeliğinden alınan ve analitik hesaplarda kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir:

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_f \cdot (\sin\alpha + \cos\alpha) \cdot d_f}{s_f} \quad (7.7.)$$

$$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (7.8.)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f \quad (7.9.)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (7.10.)$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \cdot b_v \cdot d \quad (7.11.)$$

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_y \cdot d \quad (7.12.)$$

$$V_r = \phi (V_c + V_s + \Psi_f \cdot V_f) \quad (7.13.)$$

Burada lifli polimer malzemeler ile güçlendirilmiş betonarme kirişin kesme dayanımı (V_r); lifli polimer malzemenin katkısı (V_f), betonun katkısı (V_c) ve kesme donatısının katkısı (V_s) alınarak bulunmaktadır. Tam sargılamada $s_f = w_f$ alınmıştır.

Çizelge 7.1.'de TBDY-2018 ve Çizelge 7.2.'de ACI 440.2R-17 yönetmelikleri için analitik hesaplar sonucu elde edilen değerler gösterilmiştir. Bu çizelgelerde analitik hesaplarda kullanılan parametreler de verilmiştir. Birim deformasyon değeri Denklem 7.2. ve Denklem 7.10.'a uygun olarak 0,004 olarak alınmıştır.

Çizelge 7.1. TBDY 2018'e göre kapasite hesapları

Kiriş Elemanı	d_f (mm)	t_f (mm)	s_f (mm)	w_f (mm)	E_f (Mpa)	V_s (kN)	V_c (kN)	V_f (kN)	V_r (kN)
Referans	-	-	-	-	-	6,4	14,6	0	21,0
Tam Sargı CRFP	275	0,167	1400	1400	235000	6,4	14,6	86,3	107,4
Şerit Sargı CRFP	275	0,167	150	50	235000	6,4	14,6	28,8	49,8
Tam Sargı BFRP	275	0,2	1400	1400	80000	6,4	14,6	35,2	56,2
Şerit Sargı BRFP	275	0,2	150	50	80000	6,4	14,6	11,7	32,7
Tam Sargı PET-FRP	275	0,8	1400	1400	10000	6,4	14,6	17,6	38,6

Çizelge 7.2. ACI440.2R.17'ye göre kapasite hesapları

Kiriş Elemanı	d_f (mm)	t_f (mm)	s_f (mm)	w_f (mm)	E_f (Mpa)	V_s (kN)	V_c (kN)	V_f (kN)	Φ	Ψ	V_r (kN)
Referans	-	-	-	-	-	6,4	20,04	0	0,95	-	25,1
Tam Sargı CRFP	275	0,17	1400	1400	235000	6,4	20,04	86,3	0,95	0,95	103,1
Şerit Sargı CRFP	275	0,17	150	50	235000	6,4	20,04	28,8	0,95	0,95	51,1
Tam Sargı BFRP	275	0,2	1400	1400	80000	6,4	20,04	35,2	0,95	0,95	56,9
Şerit Sargı BRFP	275	0,2	150	50	80000	6,4	20,04	11,7	0,95	0,95	35,7
Tam Sargı PET-FRP	275	0,8	1400	1400	10000	6,4	20,04	17,6	0,95	0,95	41,0

Çizelge 7.3. Deney sonuçları ve analitik hesaplardan elde edilen kesme kapasite değerleri

Numune No	Deneyler Sonucu Maksimum Kesme Kuvveti (V_r deney) (kN) (P/2)	TBDY 2018'e göre kapasite hesapları (kN)				ACI440.2R.17'ye göre kapasite hesapları (kN)				V_r TBDY 2018/ V_r deney	V_r ACI440.2R.17 / V_r deney
		V_c	V_s	V_f	V_r	V_c	V_s	V_f	V_r		
N-1	27,74	14,6	6,4	0	21,0	20,04	6,4	0	25,1		
N-2	43,68	14,6	6,4	86,3	107,4	20,04	6,4	86,3	103,1	2,458	2,360
N-3	43,62	14,6	6,4	28,8	49,8	20,04	6,4	28,8	51,1	1,142	1,172
N-4	43,46	14,6	6,4	35,2	56,2	20,04	6,4	35,2	56,9	1,293	1,310
N-5	38,28	14,6	6,4	11,7	32,7	20,04	6,4	11,7	35,7	0,855	0,933
N-6	33,3	14,6	6,4	17,6	38,6	20,04	6,4	17,6	41,0	1,160	1,232

Analitik hesaplar ve deney sonuçlarından elde edilen kesme kapasitelerine bakıldığında en yakın değerlerin her iki yönetmelik için de N-4 ve N-5 numaralı elemanlar için elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. En farklı sonuçların ise N-2 numaralı kiriş elemanında olduğu gözlemlenmiştir.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı tip lifli polimer malzemeler ile -CFRP, BFRP ve PET-FRP- ile güçlendirilen kesme yetersiz betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Kirişler 150x300 mm enkesitli ve 4000 mm uzunluğunda üretilmiştir. Kirişler, özdeş geometri ve donatıya sahip olarak düşük dayanımlı beton ve düz donatı kullanılarak üretilmiştir. Toplamda altı adet kiriş, monotonik artan yük etkisi altında test edilmiştir. N-1 numaralı referans elemana herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. N-2 Kirişi CFRP kullanılarak kesme açıklığına tam sargı yapılarak, N-3 Kirişi BFRP kullanılarak kesme açıklığına tam sargı yapılarak, N-4 Kirişi kesme açıklığına CFRP şerit sargı ile, N-5 Kirişi kesme açıklığına BFRP şerit sargı ile ve N-6 Kirişi PET-FRP kullanılarak kesme açıklığına tam sargı yapılarak güçlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Referans elemanda mesnet ve yük arasında yani kesme açıklığında kesme çatlaklarının oluştuğu, kiriş açıklık ortasında eğilme çatlaklarının kılcal düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Kirişte oluşan kırılma türü kesme kırılmasıdır. Bu, kesme yetersiz tasarlanan kirişlerde beklenen bir davranıştır.
- N-2 numaralı CFRP tam sargılı, N-3 numaralı BFRP tam sargı ve N-4 numaralı CFRP şerit sargılı kiriş elemanlarında eğilme göçme modu gözlenmiştir. Bu elemanların kesme kapasitelerinin referans elemana göre %57 oranında arttığı; göçme anındaki enerji tüketim kapasitelerinin ise sırasıyla 4,12 kat, 1,79 kat ve 9,769 kat arttığı sonucuna ulaşılmıştır. N-4 numaralı elemanın enerji tüketim kapasitesinin maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum süneklik oranı ise N-4 numaralı kiriş elemanında 4,574 olarak elde edilmiştir.
- N-5 numaralı şerit sargılı BFRP kiriş elemanının ve N-6 numaralı tam sargı PET-FRP ile güçlendirilen kiriş elemanının kesme kapasitesi ve enerji tüketim kapasitesi referans elemana göre artmıştır. Fakat bu elemanlarda kesme göçme modu görülmüştür. Bu elemanların enerji tüketim kapasiteleri ve kesme kapasiteleri N-2, N-3 ve N-4 numaralı elemanlara göre oldukça düşüktür.

- Kesme kapasitesinde referans elemana göre en düşük artış sağlayan eleman PET-FRP tam sargı ile güçlendirilen N-6 numaralı kiriş elemanıdır. Referans numuneye göre %20 kadar artış sağlamıştır. Referans elemana göre kesme kapasitesinde %57 oranında maksimum artış sağlayan elemanlar ise CFRP tam sargılı kiriş elemanı N-2, BFRP tam sargılı kiriş elemanı N-3 ve CFRP şerit sargılı N-4 numaralı kiriş elemanlardır.

Yukarıdaki özetlenen sonuçlar dikkate alındığında;

- Güçlendirme işleminde en etkili lifli polimer CFRP'dir.
- BFRP kompoziti CFRP'ye alternatif olarak kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılabilir. Literatürde BFRP'nin kirişlerin güçlendirilmesinde kullanıldığı çalışmalar mevcut olsa da [23, 24, 26, 27, 28] düz donatılı ve düşük basınç dayanımına sahip betondan üretilmiş kirişlerin güçlendirilmesinde kullanıldığı hiçbir çalışma yoktur.
- Geri dönüştürülmüş PET malzemesinden üretilen ve elastisite modülü diğer lifli polimerlere göre oldukça düşük olan PET-FRP malzemesi kiriş kapasitesinde yaptığı iyileştirme oldukça sınırlı olmuştur. Katman sayısı artırıldığında, yük taşıma kapasitesi üzerine etkisinin daha fazla olacağı düşünülmektedir.

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların neticesinde ileride yapılacak çalışmalar için;

- Lifli polimer katman sayısı artırılarak sargılanacak kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, enerji tüketim kapasiteleri, süneklik oranı ve göçme modlarında oluşacak değişimler incelenmelidir.
- Lifli polimerlerin şeritler halinde yapıştırılarak güçlendirildiği kirişlerde, lifli polimer şerit genişliği ve komşu şeritler arasındaki mesafe değiştirilerek güçlendirilen kiriş davranışı incelenmelidir.
- Maliyeti CFRP'ye göre daha düşük olan, ayrıca çevre dostu ve sürdürülebilir bir malzeme özelliğine sahip BFRP'nin katman sayısı artırılarak güçlendirilen kirişlerde

yük taşıma kapasitesi, enerji tüketim kapasitesi ve süneklik oranlarında artış görüleceği düşünülmektedir. BFRP kompoziti kolon ve kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde yıllardır kullanılmasına rağmen, düşük dayanımlı beton elemanların güçlendirilmesinde kullanıldığı çalışmalar yok denecek kadar azdır. CFRP'ye alternatif olarak düşük dayanımlı betona sahip kolon ve kirişlerin onarım ve güçlendirmesinde kullanılarak, yapı elemanlarının davranışı üzerindeki etkileri incelenmelidir.

- Literatürde, geri dönüştürülmüş PET'den üretilen ve sürdürülebilir bir malzeme olan PET-FRP'nin kiriş davranışı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar sınırlı sayıda [14, 19, 25, 30, 34, 35, 36] ve çoğunluğu son yıllarda yoğunlaşmış çalışmalardır. Ayrıca literatürde PET-FRP'nin düz donatılı ve düşük beton basınç dayanımına sahip kirişlerin güçlendirilmesinde kullanıldığı hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Mevcut malzemenin sınırlı miktarda olması nedeniyle bu çalışma kapsamında sadece kesme açıklığında tam sargı şeklinde uygulanan PET-FRP'nin kiriş davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. PET-FRP kullanılarak katman sayısı ve yapıştırma şekli farklı olarak güçlendirilen kiriş davranışları incelenerek, PET-FRP'nin davranış üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.



KAYNAKLAR

1. Doğangün, A. (2021). *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. (17. Baskı). İstanbul: Birsen Yayın Dağıtım,87-89.
2. Bursa Teknik Üniversitesi. (2023). Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kahramanmaraş depremleri inceleme ve değerlendirme raporu. *BTÜ*. Bursa. 56.
3. Konya Teknik Üniversitesi. (2023). Pazarcık ve Elbistan depremleri raporu (Hatay Bölgesi). *KTÜN*. Konya. 107.
4. İnternet: Korkmaz, H.H. (2023). 2023 Kahramanmaraş depreminde tasarım hatalarının deprem hasarına etkisi. *Türkiye Bilimler Akademisi*, 374. Web: https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-57-3_ch18.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.08.2024.
5. Norris, T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. (1997). Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903–911.
6. Chaallal, O., Nollet, M.J., Perraton, D. (1998). Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP strips. *Journal of Composites for Construction*, 2(2), 111–113.
7. Kachlakev, D., McCurry, D.D. (2000). Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 31(6–7), 445–452.
8. Khalifa, A., Nanni, A. (2000). Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(3), 165–174.
9. Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H. (2004). Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets. *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 258–264.
10. Zhang, Z., Hsu, C.T.T. (2005). Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates. *Journal of Composites for Construction*, 9(2), 158–169.
11. Anil, Ö. (2006). Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load. *Cement and Concrete Composites*, 28(7), 638–649.
12. Mertoğlu, Ç. (2009). *Kesmeye karşı cfrp şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışı*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

13. Toptaş, T. (2009). *Kesme hasarlı betonarme kirişlerin cfrp ile rehabilitasyon*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
14. Jirawattanasomkul, T., Dai, J., Zhang, D., Senda, M., Ueda, T. (2014). Experimental study on shear behavior of reinforced-concrete members fully wrapped with large rupture-strain FRP composites. *Journal of Composites for Construction*, 18(3), A4013009.
15. Baggio, D., Soudki, K., Noël, K. (2014). Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. *Construction and Building Materials*, 66, 634-644.
16. Karzad, A. S., Al Toubat, S., Maalej, M., Estephane, P. (2017). *Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 120, p. 01008). EDP Sciences.
17. Banjara, N. K., Ramanjaneyulu, K. (2017). Experimental and numerical investigations on the performance evaluation of shear deficient and GFRP strengthened reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 137, 520-534.
18. Obaidat, Y.T., Abu-Farsakh, G.A., Ashteyat, A.M. (2019). Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 198, 313-322.
19. Liu, X., Li, Y. (2019). Static bearing capacity of partially corrosion-damaged reinforced concrete structures strengthened with PET FRP composites. *Construction and Building Materials*, 211, 33-43.
20. Hadhood, A., Agamy, M.H., Abdelsalam M.M., Mohamed, H.M., El-Sayed, T.A. (2019). Shear strengthening of hybrid externally-bonded mechanically-fastened concrete beams using short CFRP strips: Experiments and theoretical evaluation. *Engineering Structures*, 201, 109795.
21. Albidah, A., Abadel, A., Abbas, H., Almusallam, T., Al-Salloum, Y. (2019). Experimental and analytical study of strengthening schemes for shear deficient RC deep beams. *Construction and Building Materials*, 216, 673-686.
22. Erkan, İ.H., Aksoylu, C., Alshlash, S., Arslan, M.H. (2019, 07-10 Kasım). *Eğilmeye çalışan betonarme kirişlerde cfrp ile onarım ve güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak irdelenmesi*. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi, Ankara, 163-171.
23. Liu, C., Wang, X., Shi., J., Liu, L., Wu, Z. (2021). Experimental study on the flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed BFRP laminates. *Engineering Structures*, 233, 111801.
24. Yuan, C., Chen, W., Pham, T., Hao, H., Chen, L., Wang, J. (2021). Experimental and analytical study of flexural behaviour of BFRP sheets strengthened RC beams with new epoxy anchors. *Engineering Structures*, 241, 112441.

25. Hawileh, R.A., Mhanna, H.H., Rashed, A.A., Abdalla, J.A., Naser, N.M. (2022). Flexural behavior of RC beams externally bonded with polyethylene terephthalate (PET) fiber reinforced polymer (FRP) laminates. *Engineering Structures*, 256, 114036.
26. Narule, G.N., Sonawane, K.K. (2022). Flexural and shear cracking performance of strengthened RC rectangular beam with variable pattern of the BFRP strips. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(2), 175.
27. Manibalan, P., Abirami, G., Kesavan, S. (2022). Flexural response of RC beam strengthened with BFRP plate. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(2), 142.
28. Do-Dai, T., Chu-Van, T., Tran, D.T., Nassif, A.Y., Nguyen-Minh, L. (2022). Efficacy of cfrp/bfrp laminates in flexurally strengthening of concrete beams with corroded reinforcement. *Journal of Building Engineering*, 53, 104606.
29. Sharma, M.E. (2023). Use of frp sheets to strengthen the existing beams. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 38(3), 215-225.
30. Si, J., Hu, J., Liu, Z., Zeng, Z., Li, K., Ding, X. (2023). Experimental study on flexural performance of reinforced concrete beams strengthened by PET. *Structural Concrete*, 24(5), 5715-5731.
31. Zhao, J., Bao, X., Yang, S., Wang, Z., He, H., Xu, X. (2024). Experimental and theoretical studies on the shear performance of concrete beams reinforced with fiber-reinforced polymer stirrups. *Materials*, 17(3), 593.
32. 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.
33. Şengün, K., Arslan, G. (2024). Performance of RC beams strengthened in flexure and shear with CFRP and GFRP. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 48(1), 117–130.
34. Mei, S. J., Bai, Y.L., Dai, J.G. (2024). Experimental and numerical investigations on shear behavior of RC beams strengthened with U-wrapped PET FRP. *Composite Structures*, 344, 118366.
35. Mei, S. J., Bai, Y.L., Dai, J.G. (2024). Shear strengthening of reinforced concrete beams completely wrapped by large rupture strain (LRS) FRP. *Engineering Structures*, 314, 118361.
36. Bai, Y.L., Tang, Z.K., Mei, S.J. (2024). Experimental study on shear performance of PET FRP-strengthened RC beams without stirrups. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03272.
37. Celep, Z., (2017). *Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. (5. Baskı). İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım, 479-489.

38. Demirkan, D. (2014). *Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme yöntemleri*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
39. İnternet: Yıldız Proje. (2024). Güçlendirme hizmetleri. Web: <https://www.yildizproje.com/bina-guclendirme-hakkinda-her-sey/>, Son Erişim Tarihi: 01.09.2024.
40. İnternet: Hermes Proje. (2024). FRP malzeme-lif takviyeli polimer kompozit malzeme. Web: <https://insapedia.com/frp-malzeme-lif-takviyeli-polimer-kompozit-malzeme/>, Son Erişim Tarihi: 03.09.2024.
41. İnternet: Karadeniz Teknik Proje. (2024). Lifli polimer güçlendirme sistemlerinin avantajları. Web: <https://www.karadenizteknikproje.com/lifli-polimer-guclendirme-sistemlerinin-avantajlari>, Son Erişim Tarihi: 03.09.2024.
42. İnternet: Hermes Proje. (2024). FRP malzeme-lif takviyeli polimer kompozit malzeme. Web: <https://insapedia.com/frp-malzeme-lif-takviyeli-polimer-kompozit-malzeme/>, Son Erişim Tarihi: 03.09.2024.
43. Sarasini F., Tirillò J., Ferrante L., Valente M., Valente T., Lampani L. (2014). Dropweight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, *Composite Part B Engineering*, 59, 204–220.
44. Maraş, M.M. (2021). Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan FRP kompozitin yapısal performansa etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 108-119.
45. Yuvaraj, S., Chithra, K., Nirmalkumar, K., Jeyanth, B. (2023). Performance evaluation of hybrid fibers strengthened reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*.
46. İnternet: Tekno Yapı Kimyasalları A.Ş. (2024). Karbon fiber nedir, karbon fiber nasıl üretilir. Web: <https://teknoyapi.com.tr/tr/bloglar/karbon-fiber-nedir-karbon-fiber-nasil-uretilir>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2024.
47. Chaka, K.T., Ahmed, F.E., Zegeye, L.H., Worku, B.G. (2022). Compressive Strength of Floor Tile Composites from Recycled PET Reinforced with Natural Fibers. *Natural Fibers*, 20(1), 2146249.
48. Doğançün, A. (2021). *Betonarme yapıların hesap ve tasarımı*. (17. Baskı). İstanbul: Birsen Yayın Dağıtım, 439-440.
49. Doğançün, A. (2008). *Betonarme yapıların hesap ve tasarımı*. (4. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi, 472-481.
50. Wight, J., Macgregor, J. (2012). *Reinforced concrete mechanics and design*. New Jersey: Pearson Education, 99-100.

51. Kuzine, K.L., Gutnikov, S.I., Zhukovskaya, E.S., Timoshkin, I.A., Lazoryak, B.I. (2014, 22-26 June). *Basalt Fiber Reinforced Plastics (Bfrp) With Advanced Mechanical Properties*. ECCM16- 16th European Conference On Composite Materials, Seville, Spain.
52. American Society for Testing and Materials International. (2014). ASTM D 3039/D 3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. *ASTM*. USA.
53. İnternet: RST Ölçü Kontrol Enstrümanları ve Otomasyon Hizmetleri San. Tic. Ltd. Şti. (2024). Datalogger nedir. Web: <https://www.rst-elektronik.com/blog/datalogger-nedir>, Son Erişim Tarihi: 10.09.2024.
54. İnternet: RMC Mühendislik. (2024). LVDT sensörleri ile konum ve yer değiştirme ölçümü. Web: <https://rmc.com.tr/lvdt-sensorleri-ile-konum-ve-yer-degistirme-olcumu/>, Son Erişim Tarihi: 10.09.2024.
55. American Concrete Institute. (2014). ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete. *ACI*. Detroit, USA.
56. American Concrete Institute. (2017). ACI 440.2R.17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. *ACI*. Detroit, USA.
57. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). TBDY-18: Türkiye bina deprem yönetmeliği deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar. *AFAD*. Ankara.
58. Türk Standartları Enstitüsü. (2000). TS 500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. *TSE*, Ankara.





Gazili olmak ayrıcalıktır