



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

**BETONARME KİRİŞLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME**  
**YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ VE MALİYET**  
**ANALİZİ**

**Salah ALSHLASH**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ekim-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Salah ALSHLASH tarafından hazırlanan “Betonarme Kirişlerde Onarım ve Güçlendirme Yöntemlerinin Deneysel Olarak İrdelenmesi ve Maliyet Analizi ” adlı tez çalışması 15/10/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

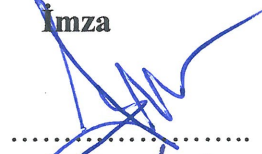


#### Danışman

Dr. Öğr. Üy. İbrahim Hakkı ERKAN

#### Üye

Dr. Öğr. Üy. Nebi ÖZDÖNER

İmza

  
.....  
  
.....  
  
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

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

## DECLARATION PAGE

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



Salah ALSHLASH

Tarih: 01/10/2019

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS

# BETONARME KİRİŞLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ VE MALİYET ANALİZİ

Salah ALSHLASH

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN

2019, 140 Sayfa

Jüri

Dr.Öğr.Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN  
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN  
Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDÖNER

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesi amacıyla farklı tekniklerin uygulandığı bilinmektedir. Bu çalışmayla betonarme yapılarda önemli bir yeri olan kirişlerin eğilme ve kesme etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Bunun için ilk olarak kirişlere ön hasar verilmiş ardından karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar ile onarım/güçlendirme yöntemleri denenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada ½ ölçekli toplam 20 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Numuneler 125x250x2500 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli çekme bölgesinde 3Φ12, basınç bölgesinde 2Φ8 ve etriye aralıkları eğilme için Φ5/10 cm, kesme için Φ5/35 cm olacak şekilde üretilmiştir. Deneysel numuneleri dört noktadan statik düşey yüklemelere maruz kalmış olup a/d oranı 3.11 olarak ayarlanmıştır. Eğilme ve kesme kirişleri için bir adet referans kirişler belirlendikten sonra geriye kalan 9 adet eğilme ve 9 adet kesme kirişleri üçerli gruplara ayrılmıştır. Eğilme kirişleri için ayrılan her bir grup %1, %2 ve %3 deplasman hasar seviyelerine kadar yüklenmiştir. Ardından üç farklı malzeme ile onarım/güçlendirme yapılarak kapasitelerindeki değişim incelenmiştir. Kesme kirişleri ise referans numunenin maksimum yük taşıma kapasitesi belirlendikten sonra %50, %65 ve %85 seviyelerine kadar ön hasar deneylerine tabi tutulmuştur. Ardından üç farklı onarım/güçlendirme malzemeleri yardımıyla desteklendikten sonra yeniden teste tabi tutularak kapasitedeki değişim gözlenmiştir. Yapılan çalışmanın ardından eğilme kirişlerinde %1 hasar seviyesi için kapasitedeki %20 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yöntemi, %2 hasar seviyesi için %28 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yöntemi, %3 hasar seviyesi için %23 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yönteminin en etkili olduğu görülmüştür. Kesme kirişleri için ise %50 hasar seviyesi için %41 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yöntemi, %65 hasar seviyesi için %47 artışla mekanik bağlayıcılar ile onarım/güçlendirme yöntemi ve %85 hasar seviyesi için %50 artışla mekanik bağlayıcılar ile onarım/güçlendirme yönteminin en başarılı yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan onarım ve güçlendirme çalışmalarında ise maliyet bakımından optimum sonucu mekanik bağlayıcıların verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik plaka, Eğilme hasarı, Karbon fiber malzeme (CFRP), Kesme hasarı, Mekanik bağlayıcılar, Onarım/Güçlendirme, Ön hasarlı kiriş.



## ABSTRACT

## MS THESIS

# EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR AND REINFORCEMENT METHODS OF CONCRETE BEAMS AND COST ANALYSIS

Salah ALSHLASH

Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN

2019, 140 Pages

### Jury

Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN  
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN  
Asst. Prof. Dr. Nebi ÖZDÖNER

It is known that different techniques are applied in order to strengthen reinforced concrete structural elements. In this study, the behavior of beams, which are of great importance in reinforced concrete structures, under bending and shear effects was investigated. Initially, the beams were pre-damaged, followed by repair / strengthening methods with carbon fiber reinforced polymer (CFRP), steel plate and mechanical binders. In the experimental study, a total of 20 ½ scale beam samples were prepared. Samples are produced in the dimensions of 125x250x2500 mm rectangular cross-section, 3Φ12 rebar in the tension zone, 2Φ8 rebar in the compression zone, and the spacing of the confinement bars is Φ5 / 10 cm for the bending behavior, and Φ5 / 35 cm for the beams where the shear behavior is desired. The test specimens were subjected to static vertical loading at four points and the ratio of a / d ( length of shear zone / effective cross sectional height) was set to 3.11. After determining one reference beams for each bending and shear tests, the remaining 9 bending and 9 cutting beams were divided into three groups. Each group allocated for bending beams was loaded up to the damage levels of 1%, 2% and 3% displacement. Then the repair / strengthening process was carried out with three different materials and the change in capacity was examined. Shear beams were subjected to preliminary tests up to 50%, 65% and 85% damage after determining the maximum load carrying capacity of the reference sample. After being strengthened by three different repair / strengthening materials, the capacities of the beams were investigated. Following the study, repair / strengthening method with CFRP increases the capacity up to 20% for 1% damage level in bending beams, repair / strengthening method with CFRP increases the capacity up to 28% for 2% damage level, repair / strengthening method with CFRP increases the capacity up to 23% for 3% damage level. According to these results, CFRP was found to be the most effective material for repair / strengthening the beams which damaged under bending effect. Repair / strengthening method with CFRP increases the capacity up to 41% for 50% damage level in shear beams, repair / strengthening method with mechanical binders increases the capacity up to 47% for 65% damage level and repair / strengthening method with mechanical binders increases the capacity up to 50% for 85% damage level. According to these results, mechanical binders was found to be the most effective material for repair / strengthening the beams which damaged under shear effect. The optimum result in terms of the cost for repair / strengthening, has found to be mechanical binders.

**Keywords:** Bending damage, Carbon fiber, Mechanical binders, Predamaged beam, Repairing/strengthening, Shear damage, Steel plate.

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında, bana değerli zamanını harcayan, desteğini üzerinden esirgemeyen her konuda yardımcı olan hayata ve mesleki öğütlerine değer verdiğim manevi abilik yapan sevgili danışmanım sayın Dr . Öğr . Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN' a, Laboratuvar çalışmalarında desteklerini ve deneyimlerini benimle paylaşan heyecanıma ortak olan hocam Dr . Öğr . Üyesi Ceyhun AKSOYLU' ya, tavsiyeleri ve istişareleri ile yol gösteren hocam Prof. Dr. M. Hakan ARSLAN'a, her türlü yardımı esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı teknisyeni Yüksel ÇİFTÇİ' ye, bulunduğum yere olan inancını hiç kaybetmeyen ve her zaman daha ilerisi için beni teşvik eden abim Haitham ALSHELASH' a , doğumdan ölüme kadar bana olan sevgilerinden ve güvenlerinden zerre şüphe duymadığım ve duymayacağım kalbimin en saf yeri ile teşekkürü hak eden AİLEM'e, laboratuvarda deneylerim esnasında sevincimi, umudumu, endişelerimi ve heyecanımı en yakından gören ve yardımlarını hiç esirgemeyen arkadaşlarım Marwan AYAD, Ali MAHAMİD, Talha Polat DOĞAN, Adil SALMAN , Mert ARSLAN, Muhanad HİLANİ, Kader YILMAZ, Hamza ALJENYAT, Muhamad NACAR ve Hesham ALRAGHEB, Mohammad MASRİ, Hüseyin BASUN, Ali YASSAR ve Abdulrahman KHCHİFATİ'e Sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Salah ALSHLASH  
KONYA-2019

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A	: Kesit alanı, mm <sup>2</sup>
B420c	: Nervürlü donat tipi
b <sub>w</sub>	: Kirişin gövde genişliği, mm
C25	: 25 MPa'lı beton sınıfı
d	: Kiriş faydalı yüksekliği, mm
L <sub>p</sub>	: Plastik mafsalsal boyu
M	: Moment, N/mm
P	: Deney elemanlarına uygulanan yatay yük, N
S220	: Düz donatı tipi
W <sub>f</sub>	: Lifli polimer şeritinin genişliği
Ø	: Donatı çapı, mm
ρ	: Kesitteki çekme donatısı oranı
ρ'	: Kesitteki basınç donatısı oranı
δ <sub>y</sub>	: Akma anındaki deplasman değeri (mm)
δ <sub>u</sub>	: Yükün %85'ine karşı gelen deplasman değeri (mm)
μ	: Deplasman süneklik oranı

## Kısaltmalar

14mm, 28mm ve 40mm	: Deplasman hasar seviyesi
40kN, 50kN ve 66kN	: Düşey yük hasar seviyesi
BA	: Betonarme
BBS	: Güçlendiren Eğilme Kiriş
BRB	: Eğilme Referans Numune
C	: Karbon fiber ile güçlendirme yöntemi
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
FRP	: Elyaf Takviyeli Polimerler
GÖ	: Göçme Öncesi Hasar
HSF	: Kablolü Çelik Fiber
K	: Kiriş
KH	: Kontrollü Hasar
LP	: Lifli Polimer
M	: Mekanik bağlayıcılarla güçlendirme yöntemi
RC	: Güçlendirilmiş Beton
S	: Çelik plakalarla güçlendirme yöntemi
SBS	: Güçlendiren Kesma Kiriş
SH	: Sınırlı Hasar
SRB	: Kesma Referans Kirişi
TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
TDY-2007	: Türk Deprem Yönetmeliği -2007
TS-9967-33233	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Genel Açıklamalar .....	1
1.2. Betonarme Kirişteki hasarlar .....	3
1.3. Kesit Hasar Bölgeleri .....	4
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	5
1.5. Çalışmanın Önemi .....	6
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI</b> .....	<b>8</b>
2.1. Karbon Fiber İle İlgili Çalışmalar ( CFRP-FRP ).....	8
2.2. Çelik Plakalar İle İlgili Çalışmalar .....	11
2.3. Mekanik Bağlayıcılar İle İlgili Çalışmalar .....	13
<b>3. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>17</b>
3.1. Deney Numuneleri .....	18
3.2. Deney Numunelerin Boyutları.....	19
3.3. Deney Numunelerin Detayları.....	20
3.4. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri ve Ölçüleri .....	23
3.4.1. Beton .....	23
3.4.2. Donatı .....	27
3.4.3. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) .....	28
3.4.4. Yapısal yapıştırıcılar .....	29
3.5. Betonarme Binaların Onarım ve Güçlendirilme Yöntemleri .....	31
3.5.1. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) .....	32
3.5.2. Çelik plakalar ile güçlendirme.....	33
3.5.3. Mekanik bağlayıcılar ile onarım ve güçlendirme .....	35
3.6. Deney Elemanlarının Üretilmesi .....	36
3.6.1. Kalıpların hazırlanması .....	36
3.6.2. Donatıların hazırlanması .....	37
3.6.3. Beton dökümü.....	39
3.6.4. Ankrajların hazırlanması .....	39
3.6.5. CFRP Şeritlerin hazırlanması ve uygulanması .....	40
3.6.6. Çelik plakaların hazırlanması ve uygulanması .....	43
3.6.7. Mekanik bağlayıcıların hazırlanması ve uygulanması .....	46
3.6.8. Onarılmış ve güçlendirilmiş numunelerin süneklik, enerji tüketme kapasitesi ve rijitliklerinin hesaplanması .....	48
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>50</b>

4.1. Deney Sonuçları.....	50
4.1.1. Eğilme ön hasarlı kiriş numuneleri.....	50
4.1.1.1. 1 Nolu deney elemanı ( BRB ).....	52
4.1.1.2. 2 Nolu deney elemanı ( BBS14mm-S ).....	54
4.1.1.3. 3 Nolu deney elemanı ( BBS14mm-M).....	56
4.1.1.4. 4 Nolu deney elemanı ( BBS14mm-C ).....	59
4.1.1.5. 5 Nolu deney elemanı ( BBS28mm-S ).....	61
4.1.1.6. 6 Nolu deney elemanı ( BBS28mm-C ).....	64
4.1.1.7. 7 Nolu deney elemanı ( BBS28mm-M ).....	67
4.1.1.8. 8 Nolu deney elemanı ( BBS40mm-C ).....	69
4.1.1.9. 9 Nolu deney elemanı ( BBS40mm-M ).....	72
4.1.1.10. 10 Nolu deney elemanı ( BBS40mm-S ).....	74
4.1.2. Kesme hasarlı kiriş numuneleri.....	77
4.1.2.1. 1 Nolu deney elemanı ( SRB ).....	79
4.1.2.2. 2 Nolu deney elemanı ( SBS40kN-M ).....	81
4.1.2.3. 3 Nolu deney elemanı ( SBS40kN-S ).....	83
4.1.2.4. 4 Nolu deney elemanı ( SBS40kN-C ).....	85
4.1.2.5. 5 Nolu deney elemanı ( SBS50kN-M ).....	88
4.1.2.6. 6 Nolu deney elemanı ( SBS50kN-C ).....	91
4.1.2.7. 7 Nolu deney elemanı ( SBS50kN-S ).....	93
4.1.2.8. 8 Nolu deney elemanı ( SBS66kN-C ).....	96
4.1.2.9. 9 Nolu deney elemanı ( SBS66kN-M ).....	98
4.1.2.10. 10 Nolu deney elemanı ( SBS66kN-S ).....	101
4.2. Deney Sonuçların Karşılaştırılması.....	103
4.2.1. Eğilme davranışı gösteren kirişler.....	103
4.2.1.1. Eğilme kirişlerin hasar seviyelerine göre sonuçların karşılaştırılması 105	
4.2.1.2. Eğilme kirişlerin güçlendirme yöntemlerine göre sonuçların karşılaştırılması.....	107
4.2.2. Kesme davranışı gösteren kirişler.....	110
4.2.2.1. Kesme kirişlerin hasar seviyelerine göre sonuçların karşılaştırılması 111	
4.2.2.2. Kesme kirişlerin güçlendirme yöntemlerine göre sonuçların karşılaştırılması.....	114
<b>5. MALİYET ANALİZİ.....</b>	<b>117</b>
5.1. CFRP ile Güçlendirilen Eğilme ve Kesme Kirişlerinin Maliyet Analizi.....	117
5.2. Çelik Plakalar ile Güçlendirilen Eğilme ve Kesme Kirişlerinin Maliyet Analizi	119
5.3. Mekanik Bağlayıcılar ile Güçlendirilen Eğilme ve Kesme Kirişlerinin Maliyet Analizi	121
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>125</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>127</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>129</b>

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Genel Açıklamalar

Betonarme elemanların servis ömürleri boyunca zaman zaman hasara uğradıkları bilinmektedir. Söz konusu bu hasarların oluşumunda birçok etmen vardır. Bazı durumlarda elemanların onarımı/güçlendirilmesi gerekebilir. Bu durum aşağıda belirtilen şartların gerçekleşmesi durumunda karşımıza çıkmaktadır.

- Tasarım veya uygulama aşamasında yapılan hatalar.
- Bina kullanımı sırasında meydana gelen hasarlar, yapının tasarım yüklerinden daha fazla yüklere maruz kalması, yapı üzerinde çalışan ağır makine veya araçlar, binanın kullanım amacında değişiklik yapmak, yapı mevcut taşıyıcı sistemine müdahale etmek, duvar, kolon kaldırmak vb.
- Beton veya donatı çeliğinin hasar görmesi durumunda yük taşıma kapasitesinin düşmesi,
- Tarihi binaların bakım ve onarımı sırasında oluşabilecek hasarlar şeklinde sıralanabilir.

Betonarme elemanların onarım ve güçlendirmesi için yapılacak ilk iş hasar ve çatlakların oluşma nedenlerini anlamak ardından gözlemlenen hasarlara göre sınıflandırma yapmaktır. Hasar seviyesine en uygun onarım yöntemini belirlemek amacıyla, oluşan hasarın türü, oluşum nedenleri, meydana geldiği bölgedeki kesit tesirleri, hasara uğramış taşıyıcı eleman türü ve taşıdığı yük gibi parametreler birlikte değerlendirilmelidir. Ayrıca, mevcut çatlakların daha da büyümesi ve hasarın ilerlemesi halinde, bu hasarın oluşumuna sebep olan etken engellenmedikçe elemanlara uygulanan onarım ve güçlendirmenin faydasının olmayacağı açıktır.

Kesme ve eğilme hasarlarının meydana gelmesi halinde betonarme elemanların mekanik özellikleri değişmektedir. Bu durumda söz konusu elemanların rijitlik ve süneklikleri negatif yönde etkilenmekte dolayısıyla taşıma kapasiteleri de azalmaktadır. Hasarlı elemanlar yetersiz dayanım ve kararlı olmayan bir davranışa sahiptir. Bu nedenle onarım ve güçlendirme uygulamaları elemanların kesme ve eğilme kapasitelerini artırmak, mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır.

Anlaşılabacağı üzere hasarlı elemanlar, eski performansına dönmesi için onarım işlemlerine tabi tutulurken mevcut performansının da üzerinde bir kapasite hedeflenmesi amacıyla güçlendirme işlemlerine tabi tutulmaktadırlar. Bu durumda zaman ve maliyet

kaygısından dolayı optimum sonuçları verecek onarım ve güçlendirme yöntemini seçmek gerekmektedir.

Bu deneysel çalışmada; hasar görmüş betonarme kirişlerin, eğilme ve kesme kapasitelerini arttırmak amacıyla çekme, kesme ve eğilme çatlakların meydana geldiği bölgelere ve bu bölgelerin çevresine karbon fiber kumaş, çelik plaka ve mekanik bağlayıcıların kullanıldığı çeşitli yöntemler ile onarım/güçlendirme işlemleri uygulanmıştır.

Uygulanan yöntemlerin ilkinde hasarlı kirişlerin üzerinde belirlenen bölgelere karbon fiber dokuma kumaşlar U şeklinde sarılmış, uygun yapıştırıcılar vasıtasıyla sabitlenmiş ve böylece kirişlerin onarım/güçlendirilmesi sağlanmıştır. Bu yöntemin dezavantajları ise:

- a. CFRP'nin U şeklinde uygulanması durumunda yeterli bir aderansın sağlanamayarak CFRP'nin artan yükler altında betondan ayrılması sonucu kirişlerin sünekliğinde azalma görülebilir. Dolayısıyla CFRP uygulamalarında aderans boyu önemlidir.
- b. Numunelerin hasarlı durumları göz önüne alındığında, karbon fiber ile güçlendirme işlemi uygularken titiz bir işçilik uygulanmalıdır.

CFRP malzemesinin bu dezavantajlarının yanında çeliğe göre 10-14 kat daha fazla çekme dayanımına sahip olması, hafif olması ve uygulamasının kolay olmasından dolayı her geçen gün kullanımı özellikle inşaat mühendisliği alanında artmaya devam etmektedir.

Uygulanan bir diğer yöntem çelik levhalar ile kirişlerin kesme ve eğilme kapasitelerini artırmaya yönelik olanıdır. Bu yöntem CFRP ile güçlendirmeye oldukça benzemektedir. Burada yapılan CFRP yerleşim şekline benzer olarak ilgili yerlerin çelik levhalar ile onarım/güçlendirilmesidir.

Bu yöntem, yapılan deneysel çalışmalar içerisinde bir önceki CFRP ile onarım/güçlendirme yöntemiyle kıyaslanacak olursa; aynı kalınlıktaki çelik levhalar ile yapılan güçlendirme, karbon fiber elemanlarla yapılan güçlendirme işlemine kıyasla daha sünek davranış sergilemiştir. Bunun sebebi de CFRP uygulamasının kirişleri tam sarmaması sadece U şeklinde bir sarma şeklinde yapılmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim deney esnasında CFRP ile beton arasında ayrılmaların olduğu gözlenmiştir. Fakat genel sonuçlar incelendiğinde çelik levhalar ile yapılan güçlendirme sonucunda ulaşılan dayanım değeri, karbon fiber kullanılan yönteme kıyasla yetersiz kalmaktadır. Bu da kullanılan çelik levhaların rijitliğinin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda çelik levhaların kullanıldığı yöntemle ulaşılan dayanımının artırılması için



levhaların kalınlığını artırmak yeterli olabilecektir.. Bu işlemin dezavantajları ise işletme maliyetinin artması ve uygulama işlemlerinde çeşitli zorluklarla karşılaşılmasıdır.

Mekanik bağlayıcılar ile uygulanan onarım/güçlendirme yöntemi, inşaat mühendisliği alanında oldukça yeni, kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olmasından dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan diğer iki onarım/güçlendirme alternatifine göre de oldukça düşük maliyetli bir yöntemdir. Bu yöntemin uygulanmasında kullanılan elemanlar; çelik çubuklardan üretilmektedir ve epoksi kullanılarak çatlağa dik yönde yapıştırılmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasındaki deneysel çalışmalar neticesinde görüldüğü üzere bu yöntemin ileriki süreçte daha aktif kullanılacağı düşünülmektedir.

## **1.2. Betonarme Kirişteki hasarlar**

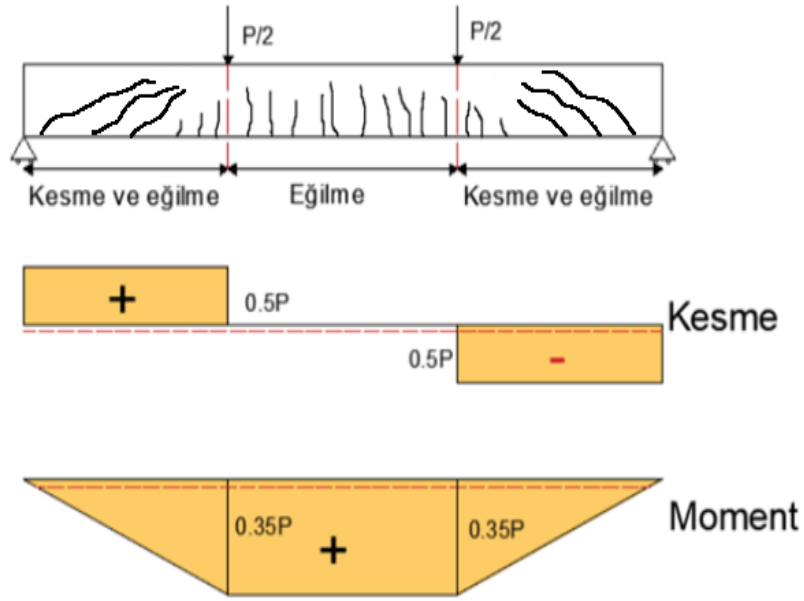
### **1) Eğilme hasarı**

Eğilme çatlakları, çekme etkisinin en yüksek olduğu bölgede oluşur. Bu tür çatlaklar, denge altı kesit tasarımı halinde donatının aktığını, denge üstü tasarımı halinde ise çekme bölgesindeki betonun kapasite yük değerine ulaştığını göstermektedir. Kirişlere uygulanan eğilme deneyleri ile genel olarak gözlemlenen eğilme ve kesme çatlakları, Şekil 1.1'de verilmiştir. Eğilme momentlerinden kaynaklanan çatlaklar, çoğunlukla mesnetlerin üst yüzünde ve açıklıkta kesitin alt yüzünden üst yüzüne doğru düşey doğrultuda eğilme çatlağı olarak kendini gösterir.

Donatısız beton, çekme kuvvetini taşıyamaz. Çatlak, çekme kuvvetine dik yönde oluşur ve giderek genişleyerek kesit yüksekliğince yol alır. Bu çatlağa eğilme çatlağı veya çekme çatlağı denir. Basınç bölgesindeki beton ezilir ve kiriş göçer. (Erkan ve ark., 2019a).

### **2) Kesme hasarı**

Kesme çatlakları, kiriş uçlarında yaklaşık 45° derecelik bir açı ile kesme kuvveti değerinin yüksek olduğu bölgelerde kirişin alt yüzünden üst yüzüne doğru oluşmaktadır, Şekil 1.1 'de kirişlerde kesme çatlakları karşılamak için yerleştirilen enine donatı (etriye) görülmektedir.



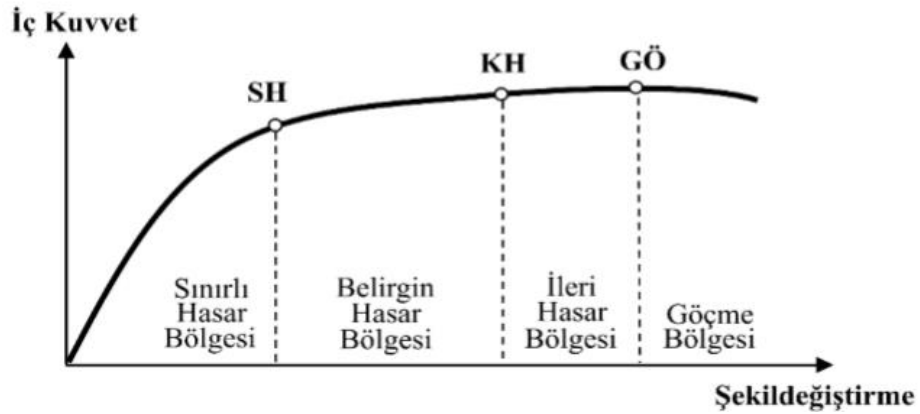
Şekil 1.1. Kirişteki kesme ve eğilme çatlaklar bölgeleri

Kesme çatlağı ani oluşan bir hasardır. Gevrek ve ani bir kırılma türü olduğu için istenmeyen bir durumdur. Kirişlerde kesme çatlakları geniş ise, ağır hasar vardır. Çatlak genişliklerini sınırlandırmak için etriye mesnetlere yakın bölgelerde sıklaştırılır. (Erkan ve ark., 2019b).

### 1.3. Kesit Hasar Bölgeleri

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'ne göre kesitlerinin kritik hasar dereceleri, Şekil 1.2 'de verildiği gibi dört bölge halinde tanımlanmıştır.

- Sınırlı hasar bölgesi: sınırlı hasar (SH)a ulaşmayan elemanlardır.
- Belirgin hasar bölgesi: sınırlı hasar (SH) ve kontrollü hasar (KH) arasındaki kalan elemanlardır.
- İleri hasar bölgesi: kontrollü hasar (KH) ve göçme öncesi hasar (GÖ) arasındaki elemanlardır.
- Göçme bölgesi: göçme öncesi hasar (GÖ)'ü aşan elemanlardır.



Şekil 1.2. Kesit hasar bölgeleri. (TBDY, 2018)

#### 1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemedir. Betonarme yapılarının sünekliğinin ve taşıma gücünün, diğer yapılara göre daha iyi ve aralarında en yaygın olduğu bilinmektedir. Geniş ve eski bir yapı yöntemidir. Depreme karşı dayanıklı bir yapı sistemi olmasının yanında, davranışları çok iyi özellikle basınç etkilerine karşı oldukça iyi performans sergilemektedir. Fakat kapasite değerine ulaştığı zaman ani ve gevrek bir göçme davranışı sergilediği de bilinmektedir. Betonarmede taşıyıcı sisteme sahip yapılarda, betonarme kirişlerin davranışları, yapı performansı için büyük önem taşır. Çeşitli yükleri taşıyabilen elemanlardır. Binalardaki dış ve iç kuvvetleri emniyetli bir şekilde kolonlara aktarırlar. Yapı güvenliği açısından önemli bir görevi üstlenmektedirler. Bu yüzden yük altındaki davranışlarını anlamak önemlidir. Kirişlerde meydana gelen bütün hasarlar, zaman ilerleyip ve yük değerleri artıkça çoğalmaktadır. Bu nedenle kirişlerdeki hasarın onarımı ve betonarme elemanların güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, kirişlerde eğilme ve kesme hasarı oluşturmak için iki farklı enine donatı ile 20 adet kiriş üretilmiştir. Eğilme hasarı oluşturulacak kirişler için enine donatı olarak  $\Phi 5/10$  yerleştirilmiştir ve sırasıyla 14, 28 ve 40 mm'lik deplasman oluşturduktan sonra eğilme çatlakları 3 farklı seviyede ( sınırlı hasar, belirgin hasar ve ileri hasar ) hasar düzeyine ulaşılmıştır. Kesme hasarı oluşturulacak numuneler için enine donatı  $\Phi 5/35$  olarak tasarlanmıştır. Referans numunenin yük taşıma kapasitesi dikkate alınarak kapasitenin %50, %65 ve %85 dilimlerine kadar yük uygulanmıştır. Bu hasarlı kirişler üç farklı güçlendirme yöntemi ile ( karbon fiber, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar ) güçlendirilmiş sonra referans numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılarak bu üç alternatif

yöntemden taşıma gücü, performans ve ekonomi açısından hangisinin daha uygun ve avantajlı olacağı belirlenmiştir.

Özetle bu çalışmanın amacı:

- Hasarın tipe göre en uygun güçlendirme yönteminin belirlenmesi,
- Hasarın seviyelere göre en uygun güçlendirme yönteminin belirlenmesi,
- Ekonomik açıdan en iyi güçlendirme yönteminin belirlenmesi,
- Ön hasar betonarme kirişlerin dış yüklerin etkisi altındaki taşıma gücü ve diğer özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi,
- Ön hasar betonarme kirişlerin dış yüklerin etkisi altındaki sünekliğinin araştırılması ve geliştirilmesi.

Bu amaçla 10 adet kesme hasarlı betonarme kirişten; 1 tanesi referans numune ve 9 tanesi ön hasarlı numune, olacak şekilde ve 10 adet eğilme hasarlı betonarme kirişten; 1 tanesi referans numune ve 9 tanesi ön hasarlı numune olacak şekilde toplam olarak 20 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Ön hasar vermek için onarım ve güçlendirme işlemlerinden önce, imal edilen kirişlere eğilme deneyleri ile hedeflenen hasarlar uygulanmıştır. Daha sonra, hasarlı kirişler 3 farklı alternatif güçlendirme yöntemi ile güçlendirip yeniden eğilme deneylerine tabi tutulmuşlardır.

Son olarak bütün sonuçlar referans kirişleri sonuçları ile birlikte karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

### 1.5. Çalışmanın Önemi

İnşaat sektörü her zaman gelişen ve ekonomi açısından büyük öneme sahip bir sektördür. Bu sektörde en çok tercih edilen yapı sistemleri, taşıma kapasiteleri iyi olduğundan dolayı betonarme yapılardır. Betonarme yapıların taşıyıcı sistemlerinde yapı davranışı açısından büyük önem taşıyan elemanlardan bir tanesi de betonarme kirişlerdir. Bu elemanlar, her zaman farklı kesit tesirleri altında zorlamalara ve hasarlara maruz kalan bir elemanlardır. Zaman ilerledikçe farklı etkilerden eğilme ve kesme hasarı meydana gelmeye başlamaktadır. Bu durumlarda elemanın performansı ve özellikleri olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Yapı güvenliği yetersiz olup can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Hasarlı elemanların eski performansına ulaşmak için onarım, hasarsız halinin mevcut performansını iyileştirmek amacıyla güçlendirme işlemleri uygulanmaktadır. Güçlendirme yönteminin seçilmesinde zaman ve maliyetin avantajlı olduğu en uygun yöntemi seçmek büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada betonarme kirişlere üç farklı seviyede ön hasar verdikten sonra üç farklı güçlendirme yöntemi ile numuneler güçlendirilmiştir. Daha sonra yeniden taşıyabilecekleri yükü yüklenip referans numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kirişlerin performansları, mekanik özellikleri ve güçlendirme yöntemlerinin maliyeti göz önüne alınarak yöntemlerden en uygunu tespit edilmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Bu çalışmada kullanılan güçlendirme yöntemleri ile güçlendirme uygulamalarında, betonarme kirişlerin performansının ve davranışlarının daha doğru tahmin edilebilmesi için konu ile ilgili olan çalışmalardan bazıları bu bölümde özetlenmiştir.

### 2.1. Karbon Fiber İle İlgili Çalışmalar ( CFRP-FRP )

(Özcan ve Yöntem, 2005) yaptığı bu çalışmada, dikdörtgen kesitli betonarme kiriş elemanların elyaf takviyeli polimerler (FRP) ile güçlendirmiştir. Deney elemanlarını üç noktalı eğilme deneyi ile test etmişlerdir. Deneyler, 2200 mm boyunda ve 150 x 250 mm kesitli sekiz adet betonarme kiriş üzerinde, üç grup olarak yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; kirişlerin çekme bölgesinin dış yüzeyine FRP lifleri yapıştırıldığında, kirişlerin eğilme dayanımının diğer bir ifade ile moment kapasitesinin arttığını gözlemlemişlerdir.

(Çetinkaya ve ark., 2011), çalışmalarında yapı laboratuvarlarında dört adet betonarme kirişin elyaf takviyeli polimerler (FRP) malzemelerle onarım ve/veya güçlendirilmesi yapılmıştır. Her kiriş için yük-deplasman eğrisi elde edilerek elemanların statik yük altında kirişlerin davranışı ve performans değişimini incelemişlerdir. Kirişlerin eğilme taşıma kapasitesini artırmak için lifli polimer malzemenin kirişin eğilme bölgesinde boydan boya yapılmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın sonucu FRP malzemeler ile yapılan O/G'nin betonarme kirişlerin taşıma kapasitesi çok büyük ölçüde arttırdığı görülmüştür.

(Kim ve ark., 2012) yaptığı çalışmanın amacı, karbon fiber kullanmanın fizibilitesini incelemektir. Büyük köprü kirişlerinin kayma gerilmelerine karşı güçlendirilmesi veya desteklenmesi için güçlendirilmiş karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) kullanmışlardır. Uygulamanın verimliliğini göstermek için küçük elemanlar üzerinde birçok test yapılmış olmasına rağmen CFRP tutturucuları ve levhaları, büyük elemanların taşınması için güçlendirilmenin nasıl yapılacağı hakkındaki veriler kısıtlıdır. Önemli kesme kuvvetleri ve ayrıca sürtünmenin etkisi ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır.

Betonarme Yapısal elemanlarda sürekli veya yorulma yükleri altında bulunan polimer alternatif malzemeler ve ankraj yapılan köprülerde CFRP kayma dayanımı uygulamaları:

- 1) Onarım ve güçlendirme dahil aşırı yüklerden dolayı sıkıntı belirtileri gösteren köprüler.
- 2) Köprülerin dayanımının artacak şekilde güçlendirilmesi yeniden deformasyon oluşmasını en aza indirmek için yük kapasitesi ilişkisinin araştırılıp incelenmesi.

Çalışmanın sonucunda güçlendirme amacıyla CFRP'i kullandığında kayma kuvvetini etkilediğini bulunmaktadır, a/d oranı 3 olan CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerinin kayma dayanımı 50 % ye kadar artırmaktadır.

(Acar, 2014) çalışmasında kirişlerin güçlendirilmesinde karbon fiber ve çelik levhaları beraber uygulamıştır. Yapılan güçlendirme sonucunda kirişin başlangıç rijitliği, taşıma gücü momenti ve enerji tüketme kapasitesinde artış olduğu ifade edilmiştir.

(Boumaaza ve ark., 2017) yaptığı çalışmada, 4 noktadan bükülmeye maruz betonarme derin kirişlerin onarımına odaklanmaktadır. Farklı seviyelerde yüklendikten sonra kirişler, cam elyafı FRP ile takviye edilmiş bir epoksi reçineden yapılmış bir kompozit malzemenin bağlanmasıyla onarılır. Bu çalışmanın temel amacı, yazarlar tarafından geliştirilen ve kayma kuvveti nedeniyle ani kırılmaları önlemek için çatlakların kritik bölgelerde bantlanmasıyla oluşan yeni bir yöntemin ustalığına katkıda bulunmaktadır. Bu yeni teknik, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, özellikle kirişlerin bantlar veya U şekilli kompozit malzemeler tarafından onarılması durumunda mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlara yol açmıştır. Çalışmada fizibilite, performans ve kirişlerin davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak bu yöntemin kullanılmasında yük taşıma gücü ve yer değiştirme sırasıyla 7.1% ve 26% artırmak mümkündür.

(Alam ve ark., 2018) yaptığı bu deneysel çalışmanın amacı, betonarme kirişin kaymaya karşı güçlendirilmesinde olası uygulama için yüksek dayanımlı doğal elyaf bazlı kompozit plakalar geliştirilmiştir. Deney programında, plakalar işlenmiş ve işlenmemiş koşullarda kenaf, jute ve jute ipi elyafları kullanılarak imal edilmiştir. Yapısal davranışı araştırmak için toplam 8 kiriş numunesi hazırlamışlar. Kirişler muamele edilmiş ve işlenmemiş doğal elyaf kompozit plakalar ve referans kiriş dahil, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) şeritler kullanılarak kesilerek güçlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda kirişlerin kırılma yükü, sünekliği ve çatlak düzenleri karşılaştırarak işlenmemiş kenaf,

jute ve jute halatı kompozit plakaları ile kaymaya karşı güçlendirilmiş kirişler, referans kirişine kıyasla sırasıyla % 35, % 36 ve % 34 daha yüksek dayanım tespit edilmiştir. Doğal elyaf kompozit plakalarla güçlendirilmiş kirişler, CFRP şeritlere kıyasla daha yüksek süneklik ve daha yüksek dayanım gösterilmiştir.

**(Hawileh ve ark., 2018)** yaptığı bu çalışmada, Elyaf takviyeli polimerleri (FRP) güçlendirme malzemesi olarak, epoksi yapıştırıcı ile birlikte kullanılmıştır. Son zamanlarda ortaya çıkan kablolu çelik fiber (HSF) tabakaları da güçlendirme malzemesi olarak kullanmaya başlamıştır. Yazarların yaptığı deneysel çalışmada epoksi yapıştırıcılar kullanarak dıştan yapıştırılmış HSF levhalarla bükülerek güçlendirilmiş 7 adet betonarme (BA) kiriş üretilmiştir. Deneylerde orta ve yüksek kablo yoğunluğu 4.72 ve 7.87 cor / cm olan iki tip HSF levhası kullanmışlardır. İki noktadan eğilme testleri yapılmış ve kirişlerin orta açıklık bölümündeki yük-deplasman verileri, kiriş numunelerinin göçmesine kadar kaydedilmiştir. Deney sonuçları, kontrol kiriş numunesi ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, güçlendirilmiş numunelerin yük taşıma kapasitesinde, kontrol numuneye kıyasla % 29'dan % 62'ye kadar bir artış olduğunu gösterilmiştir. Bununla birlikte, güçlendirilmiş kiriş numunelerin sünekliği, kontrol numunesine göre daha azaldığı sonucuna varmışlardır. Test edilen numunelerin nihai kesit boyutları 240 \* 1840 mm ve yük taşıma kapasitesi, ACI 318-11 ve ACI 440.2R-08 yönetmelikleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen sonuçlar deneysel olarak ölçülenler ile yakın bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Betonarme kirişlerin dış yüzeyine epoksi yapıştırıcılar ile dışarıdan bağlanan HSF tabakalarının etkili bir eğilme mukavemeti olduğu ve kiriş güçlendirmede kompozit malzeme olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

RC: Güçlendirilmiş Beton.

HSF: Kablolu Çelik Fiber.

FRP: Elyaf Takviyeli Polimerler.

**(Aksoylu ve ark., 2019)** yaptığı deneysel çalışmada CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını incelemiştir. Sanayi yapılarında kullanılan prefabrik betonarme T kesitli ön germeli inceltilmiş kirişlerin, yapıda kullandıktan sonra maruz kaldıkları yükler altında bazen eğilme kapasitesine varmadan kesme hasarına uğradığı bilinmektedir. Bu nedenle bu hasarın önlenmesi ve kesme kapasitesinin doğrudan bulunması için TS-9967 ve TS-3233 yönetmelikleri kullanılarak inceltilmiş uçlu



prefabrik aşıklar üretmişler ve 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutmuşlardır. Aşıkların uzunlukları 3200 mm olarak tasarlanmıştır. Aşıklar kullanma sebebi ise eğilme hasarı oluşmadan kesme hasarı oluşması ve performansın gözlemlenebilmesidir. Aşık kirişleri yönetmeliklere uygun imal edilmesine rağmen yapıya ilave olarak düşey yüke maruz kalabilir çatıya biriken kar ve zamanla buza dönüşmesi daha fazla kesme hasarına yol açabilir. Bu nedenle kar yükünden dolayı oluşan kesmenin önlemesi için CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polimer) kullanılması incelenmiştir. CFRP tercih edilmesinin nedeni diğer yöntemlere göre hızlı ve kolay uygulabildiği içindir. GFRP malzemesi oldukça hafif bir malzeme olduğundan yük artışına neden olmaz, ayrıca çelikten 10 - 14 katından daha fazla mukavemet sahibidir. İlk olarak aşık kirişleri TS-9967 yönetmeliğine göre test edilmiştir, daha sonra inceltirilmiş kiriş uç bölgeleri CFRP ile tam ve yarım sargılı durumları ayrı ayrı deneyler altında tabi tutulmuştur. Sonuç olarak yarım sargılı %49 tam sargılı %60 kesme kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca yarım sargılı numuneler tam sargılıya göre daha fazla sünek davranış gösterilmiştir. Çalışmanın devamında (**Gemi ve ark., 2019**) CFRP'nin farklı yerleşimlerine göre deneysel çalışmalar yaparak CFRP'nin hasar analizi üzerine yoğunlaşmışlardır.

## 2.2. Çelik Plakalar İle İlgili Çalışmalar

(**Altın ve ark., 2004**) yaptığı çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin eleman dışından çeşitli düzenlerde yerleştirilen kelepçelerle kesmeye karşı güçlendirilmesi pratik bir yöntemdir. Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan kelepçeler yüksek dayanımlı çok sayıda parçanın özel olarak üretilip bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu çalışmanın amacı sahada kolaylıkla uygulanabilen etkin bir kelepçe türü geliştirilmesidir. Beş adet farklı etriye ve kelepçe oranları ile hazırlanan dikdörtgen kesitli kiriş geliştirilen kelepçelerle güçlendirilip tek düze yükler altında test edilmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler değerlendirmeler yapılarak, güçlendirme yönteminin deney elemanlarının dayanım, rijitlik, süneklik, taşıma gücü ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak geliştirilen kelepçeler kesme çatlaklarını başarılı bir biçimde kontrol ederek çatlakların genişlemesini engellemiş ve elemanda sünek eğilme davranışının gelişmesini sağlamıştır.

(**Demirci, 2011**) yapmış olduğu çalışmada epoksi ile çelik korniyer ve/veya lama epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışını

karşılaştırmalı olarak incelemek için deneysel olarak yapmıştır. Bu amaçla, tamamı 150 x 300 x 1500 mm boyutlarında olan dört farklı kiriş tipi üretilmiştir. 1. tip kiriş (K1) referans numune olup herhangi bir güçlendirme işlemi uygulamadan test edilmiştir. 2. tip kirişde (K2), kirişin alt köşelerine kiriş boyunca 50 x 50 x 5 mm boyutlarında korniyerler yapıştırılmıştır. 3. tip kirişte (K3), kirişin alt köşelerine kiriş boyunca 30 x 30 x 3 mm'lik korniyerler ve kirişin alt yüzüne 30 x 3 mm'lik lamalar yapıştırarak güçlendirme işlemi uygulamıştır. 4. tip kiriş (K4) ise (K3) kirişi gibi güçlendirilmiş, ilave olarak da, kirişin yan yüzeylerine 400 mm aralıklarla 30 x 3 mm'lik lamalar yapıştırılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinden kiriş alt yüzlerine 50 x 50 x 5 mm boyutunda korniyer yapıştırılarak yapılan güçlendirmenin (K2) taşıma kapasitesi maksimum artmış, deplasman da maksimum azalış sağladığı görülmüştür. Korniyer boyutlarının büyük olmasının sonuçlar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Profil boyutundaki artışın çatlak genişliği ve sayısı ters orantılı, buna karşın, kirişin yük taşıma kapasitesinin artması ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmıştır. profil boyutundaki artış ile çatlak genişliği ve çatlak sayısının azaldığı ancak yük taşıma kapasitesinin arttığı sonucuna varılmıştır.

(Aykaç ve Özbek, 2011) yapmış olduğu bu deneysel çalışma olan betonarme kirişlerin alt yüzüne çelik levha yapıştırılarak eğilmeye karşı güçlendirilmesi sıkça uygulanan bir yöntemdir. Ancak bugüne kadar yapılan çalışmalarda önemli süneklik sorunlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada aynı yöntemle güçlendirilmiş kirişlerde dayanımın yanı sıra yeterli bir süneklik kapasitesine ulaşılması için basit ve uygulanabilir bir uç bağlantısı geliştirilmiştir. Deneysel olarak yürütülen çalışmada ikisi karşılaştırma kirişi olmak üzere toplam 8 adet 1/1 ölçekli betonarme numune kiriş hazırlanmış ve test edilmiştir. Üç kiriş sadece eğilmeye karşı, diğer üç kiriş ise hem eğilmeye hem de kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Açıklanmış sonuçlarındaki gibi deneylerde güçlendirme sonrası dayanım yaklaşık iki buçuk kat artmış olmasına rağmen elemanların son derece sünek davrandığı gözlenmiştir.

(Aykaç ve Acar, 2014) çalışmasına benzer olarak kirişlerin çelik levhalarla güçlendirilmesini araştırmıştır. Burada kullandıkları çelik plakaların kalınlığını artırarak bir dizi çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda plaka ve kiriş arasındaki yapıştırma yöntemi iyileştikçe ve plaka kalınlığı arttıkça kirişin eğilme ve basınç dayanımının arttığını belirtmiştir.

### 2.3. Mekanik Bağlayıcılar İle İlgili Çalışmalar

(Gürbüz, 2007) yapılan tez araştırmasında , değişik donatı çaplarında , farklı derinliklerde ve beş tane farklı yapıştırıcı malzemesi kullanarak , donatı çapları ve farklı yüzeyler hazırlanarak seksen adet mekanik bağlayıcı imal edilmiş ve bu bağlayıcılar aksel çekme kuvvetine tabi tutularak davranışları incelenmiştir . kullanılan plak beton karakteristik basıncı 16 Mpa yapıdaki dökülen betonu yansıtmak amacıyla bu deney sonuçlarını özetleyerek ;

- a) mekanik bağlayıcı delik çapları değiştirerek diğer değişkenlere bağlı olarak farklı yönlerde etkilemektedir. Beton ile yapıştırıcı arasındaki yapışma kaybı meydana gelir, göçen mekanik bağlayıcılar yapılan ankraj delik çapı artırılması sonucunda mekanik bağlayıcının dayanımının artmasına neden olur.
- b) ankraj delikleri değişiminde ankraj davranışına doğrudan etki etmektedir. Beton yüzeyleri ile yapışma özelliği zayıf olan malzemelerle delik derinliğini artırarak ankraj dayanımı artmaktadır. Beton yüzeyleri ile yapışma özelliği yeterli olan yapıştırıcı kullanarak ankraj derinliğinin artması sonucunda ankraj tipine etki etmektedir.
- c) yapıştırıcı malzeme türü ankraj davranışına doğrudan etki etmektedir, en önemli etkenlerden bir tanesi. Yapıştırıcı ile beton veya çeliğin sağladığı yapışma yüzeyleri reçine ve serleşici türüne , fiziksel kıvamları ve polimer yapılarına göre değişmektedir.

(Kaya, 2007) yaptığı tez çalışmasında, yapıların güçlendirilmesinde kullanılan tam ve kısmi bağlı ankrajların aksel çekme davranışlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında, deprem güçlendirmelerinde karşılaşılan uygulama boyları esas alınarak, referans yapışma dayanımı numuneleri, tam bağlı ankrajlar ve kısmi bağlı ankrajlar olmak üzere üç grup aksel çekme deneyi yapılmıştır. Bütün ankraj donatıları 16 mm nervürlü donatı olup, aynı mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptir. Referans yapışma deneylerinin tamamı kısmi bağlı ankraj detayı ile gerçekleştirilmiştir. 6Ø serbest derinlik bütün numunelerde sabit olmak üzere 4Ø, 6Ø, 8Ø ve 10Ø derinliklerde temiz yüzeylerde (önce basınçlı hava ile temizlenmiş, ardından fırça ile temizlenerek tekrar basınçlı hava uygulanmış yüzey) ; 4Ø ve 8Ø derinliklerde, tozu atılmış (sadece basınçlı hava ile temizlenmiş yüzey) ve temizlenmemiş yüzeylerde olmak üzere üç farklı yüzey temizliği

koşullarına göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Tam bağlı ankrajlara ait deney grubunda ise, hâlihazırda deprem güçlendirmelerinde. Uygulanan, ankraj donatısının ankraj deliği boyunca yapıştırıldığı ankraj detayı incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır ;

- a) Kısmi bağlı ankrajlar, uygulamalarda kullanılan tam bağlı ankrajlara göre oldukça yüksek göçme dayanımları sergilemişlerdir. Bir kısmi bağlı ankrajın, aynı derinlikteki tam bağlı bir ankraja göre iki kat mertebesinde daha güçlü olduğu deneylerden elde edilen önemli bir sonuçtur. Aynı tasarım yükleri için tam bağlı yerine kısmi bağlı üretilecek ankrajlar, ankraj yapısının en pahalı elemanı olan kimyasal yapıştırıcının sarfiyatında önemli tasarruf sağlayacaktır. Ancak kısmi bağlı ankrajların, yapı kimyasalı ile ankre edilmemiş serbest derinlikleri boyunca korozyon ve çevresel etkilere karşı özel önlemler alınması gerektiği unutulmamalıdır.
- b) Kısmi bağlı tasarlanmış ankrajların tamamında, aynı özelliklere sahip referans yapışma dayanımının %90'ına ulaşıldığı görülmüştür.
- c) Tozu atılmış yüzeylerde yapışma dayanımları, temiz yüzeylerdekilere çok yakın mertebededir. Tozu atılmış numunelere ilişkin hesaplanan enerji yutma büyüklüklerine ilişkin değerler ise diğer tüm tiplerden çok daha büyük çıkmıştır.
- d) Temizlenmemiş yüzeylerde hazırlanan numunelerde göçme yükleri çeşitlilik göstermiş, kimi numunelerde temiz ya da tozu atılmış numuneler mertebesinde yüklere ulaşılırken genel eğilimde bu değerlerin altında kalmıştır.

İlk başta CFRP şeritlerini yapıştıracağımız bölgelerin iyi yapışmasını sağlamak için yapışma alanı fileks fırçasıyla iyice temizlenir. CFRP şeritlerin yapışacağı yüzey alanı temiz olması oldukça önemli bir faktördür. 3 adet eğilme hasarlı numune ve 3 adet kesme hasarlı numune, Toplam 6 adet numuneler de CFPR kullanılmıştır diğerlerinde başka alternatif güçlendirme yöntemleri ile güçlendirilmiştir.

CFRP şeritlere yapıştırılacağı kirişin 3 yüz bölgesini işaretleyerek epoksi yapıştırıcı 1 mm kalınlığında sürülmüştür. Şekil 358 te gösterilmiştir.

Şerit boyutları ise hasar tipine göre 2 farklı boyut ile yapılmıştır

- [1] kesme hasarlı numuneler: 50 \* 500 mm şeritler hazırlanmıştır, mesnet yüzünden itibaren şeritleri epoksi yapıştırıcı kullanılarak kirişe iki yan yüzüne 185 mm ye kadar ve alt yüzüne 125 mm olarak yapıştırılmıştır. 1

adet kiriş numune için 10 adet CFRP şerit kullanılmış, kesme bölgelere sağ ve sol kiriş taraflara yapıştırılmış.

LP kopma birim uzamasıdır. Süreksiz (şeritler halinde) LP kullanılması durumunda LP şeritlerin aralıkları  $f_s$ ,  $f(4)wd +$  değerini geçmeyecektir.

- [2] Eğilme hasarlı numuneler: 300\*2000 mm CFRP şeritler hazırlanmıştır, eğilme bölgesine (orta bölge) epoksi aracıyla kirişin alt yüzüne 125 mm ve her iki yüzüne 85 mm olarak yapıştırılmıştır.

(**Deb, 2012**) çalışmasında, çeşitli yöntemlerle beton yapılar da çatlakların değerlendirilmesi ve onarımının nedenlerini araştırmıştır. Epoksi enjeksiyonu, U şekilli çelik çubuklar, mekanik bağlayıcılar, çimento harcı ve düşük viskoziteli monomerler ve reçineler kullanarak çatlakların onarım ve güçlendirilmesini sağlamıştır.

(**Gribniak ve ark., 2017**), çalışmalarında kirişlerin güçlendirilmesinde karbon fiber kumaş ve çelik çubukların güçlendirmede etkisini araştırmışlardır. Çelik çubukların kirişe içten ve dıştan takviye edilmesi ile çelik çubuklarla beraber karbon fiberin beraber hibrit olarak birleştirilmesi durumlarını ayrı ayrı değerlendirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kiriş kapasitesinde artış olduğu tespit edilmiştir.

Diğer onarım ile ilgili bir (**Topçu ve Gürer, 2005**) çalışmalarında hasar görmüş kirişlerin epoksi enjeksiyonu ile onarılmasının yararlarını araştırmışlardır. 16 farklı tipte hazırlanan kirişler çekme bölgelerinde 2 mm'lik çatlaklar oluncaya kadar orta noktalarından yüklenerek kırılmıştır. Daha sonra bu çatlaklar epoksi enjeksiyonu ile doldurularak onarılmış ve yeniden kırılarak taşıyabileceği yük tespit edilmiştir. Yapılan onarım sonucunda yapılan testte kiriş kapasitesi mevcut durumunun %75'ine ulaşabilmiştir. Sonuç olarak epoksi ile yapılan onarımın uygulanabilir bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

(**Arslan ve Seckinli, 2019**) Bu çalışmada, mevcut yükleri karşılayamayan (yetersiz kapasite) betonarme kirişlerin, kesme ve eğilme momenti kapasitelerinin güçlendirilmesi irdelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, betonarme kirişlerin her bir güçlendirme yönteminin avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ve birbirleriyle karşılaştırılmasıdır. Çalışmada çelik şerit ile güçlendirilen mevcut betonarme kirişlerin

kesme ve eğilme analizleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre güçlendirme işlemi yapılan kirişlerin sünekliği arttığı gözlemlenmiştir.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmanın asıl amacı hasarlı betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi, sünekliği, rijitliği ve diğer özellikleri iyileştirilmesini sağlayacak güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak araştırılması ve bu yöntemlerin maliyetlerinin çıkarılarak en faydalı ve en ekonomik yöntemin belirlenmesidir. Bu amaçla yapısal davranışları farklı olan 2 farklı tipte toplam 20 adet betonarme kiriş imal edilmiştir. Bu kirişlerin 10 âdeti eğilme davranışı, 10 tanesi de kesme davranışı gösterecek şekilde tasarlanmıştır. İmal edilen kirişlere ait yapılan kabullerin detayları aşağıda verilmiştir.

- 1) Beton dayanımı: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY, 2018)'e göre yapılarda kullanılacak en düşük beton dayanımı 25 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre kirişlerin imalatında C25 sınıfında beton kullanılmıştır.
- 2) Kiriş etriyesi ve aralıkları: Kesme davranışı beklediğimiz kirişlerde seçilen etriye aralığı 35cm dir. Eğilme davranışının beklediği kirişlerde ise etriye aralığı 10cm olarak seçilmiştir. Her iki tip kirişlerde etriye aralıkları sabit tutulmuştur. Etriye çapı olarak ise kiriş boyutları göz önünde tutularak 5mm seçilmiştir.
- 3) Donatı tipi: kirişlerin imalatında nervürlü B420c tipi donatı kullanılmıştır. Kirişlerin boyuna donatıları seçilirken dengeli donatı oranından ( $\rho_b=0.0209$ ) daha düşük olacak şekilde tasarlanmış, bunun sonucu olarak da deneylerde kirişlerin denge altı sünek kırılma davranışı göstermesi sağlanmıştır.
- 4) Etriye kancaları: Enine donatıların kancaları 90° olarak seçilmiştir. Bunun nedeni ise kirişlerin, mevcut yapıdaki bir kiriş gibi düşünülmesi ve ülkemizde enine donatı kancalarının hala tam olarak 135° olarak yapılmaması nedeniyle donatı kolları arasında kalan göbek betonunu sarılarak dayanım ve süneklikte istenilen artış sağlanamamaktadır. Ancak kancaların 135° yapılarak beton içine gömülmesi ile bu artışın sağlanma imkanı vardır. Eğer mevcut yapılarda sıklıkla gözleendiği gibi 90° kanca yapılırsa, etriye açılmakta ve göbek betonuna yanal basınç uygulayamadığı için sargı etkisini kaybetmektedir.

### 3.1. Deney Numuneleri

Deneyisel çalışmada kiriş numunelerinin geometrik boyutları ve özellikleri laboratuvar cihazlarının kapasiteleri göz önüne alınarak üretilmiştir. Ahşap kalıplar kullanılarak 20 adet dikdörtgen kesitli betonarme kirişler, deney numunesi olarak hazırlanmıştır. Düşey yük etkisi altındaki deneyler Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir, Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

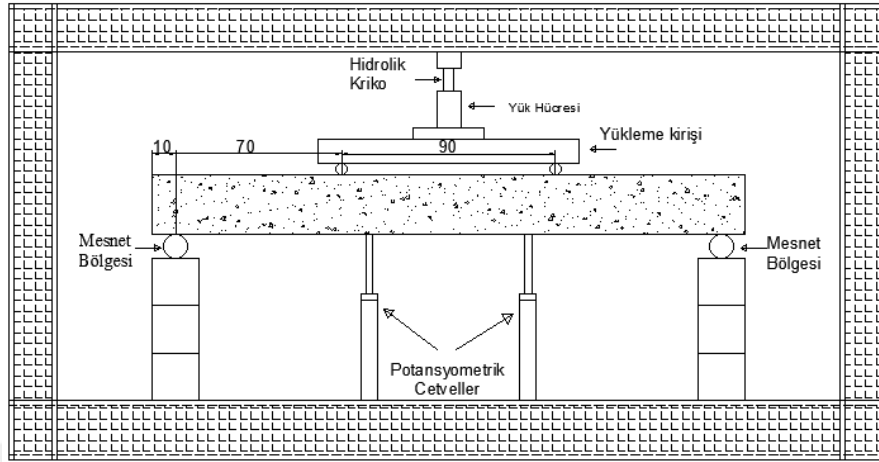


Şekil 3.1. Dikdörtgen kesitli kiriş numuneleri

Deneylerde kullanılan bilgisayar destekli 8 kanallı veri okuma sistemi ile yük ve yer değiştirme okumaları yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Deneylerde düşey yük ölçümleri yük ölçer yardımıyla (Loadcell), yer değiştirmeler ise potansiyometrik cetveller



kullanılarak yapılmıştır. 4 noktalı yükleme düzeneği, yük hücresi (Loadcell) kapasitesi 300 kN kapasiteye sahiptir. Şekil 3.2’de deney düzeneği gösterilmiştir.

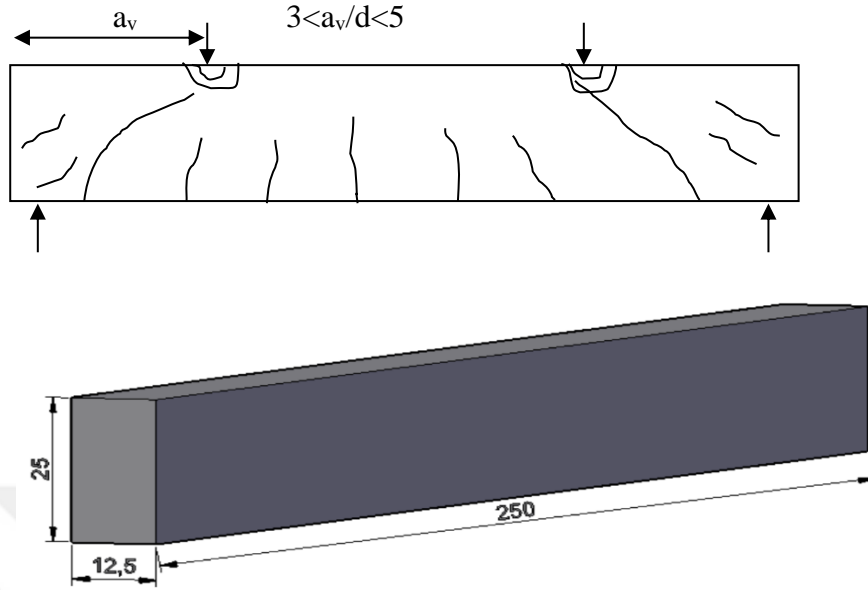


Şekil 3.2. Test yükleme düzeneği (ölçüler cm'dir)

### 3.2. Deney Numunelerin Boyutları

Deney numunelerinin boyutları Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Bütün kiriş numuneleri için aynı boyutlar seçilmiştir. Numuneler, 1/2 ölçekli olarak detaylandırılmıştır. Mevcut numunelerin, bu bölümün başında ayrıntılı olarak açıklanan yapım ve tasarım hatalarını içermesi büyük önem arz etmektedir. Bu konuya özellikle dikkat edilmiş ve ilgili bölümde belirtilmiş olan tüm eksiklikler (beton dayanımındaki yetersizlik vb.) düşünülerek kesit boyutları ve donatılar detaylandırılmıştır. Numune kirişler 2500 mm uzunluğunda, 250 mm yüksekliğinde ve 125 mm genişliğinde tasarlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur. Kesme açıklığı(70cm)/faydalı yükseklik(22.5cm) (a/d) oranı 3.11 olarak

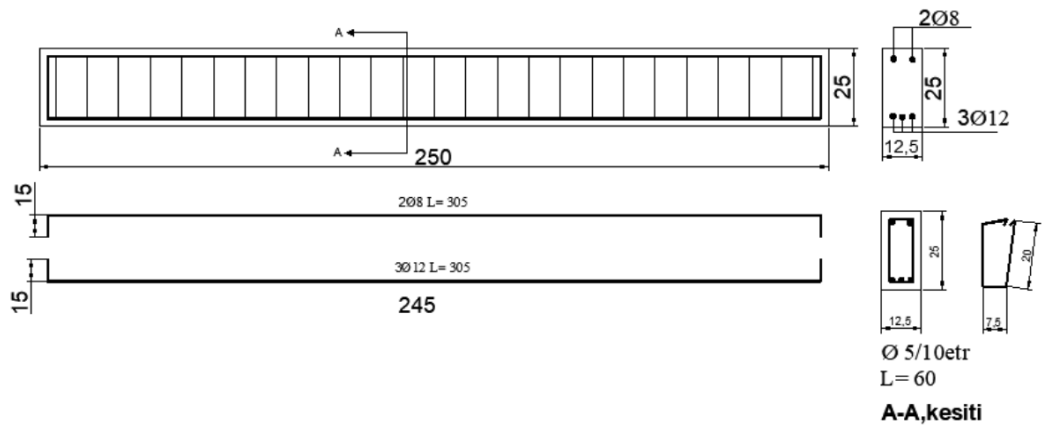
seçilmiştir. Seçilen bu değere göre kirişlerde eğik-kesme-basınç kırılmaları görülür (Doğangün, 2008).



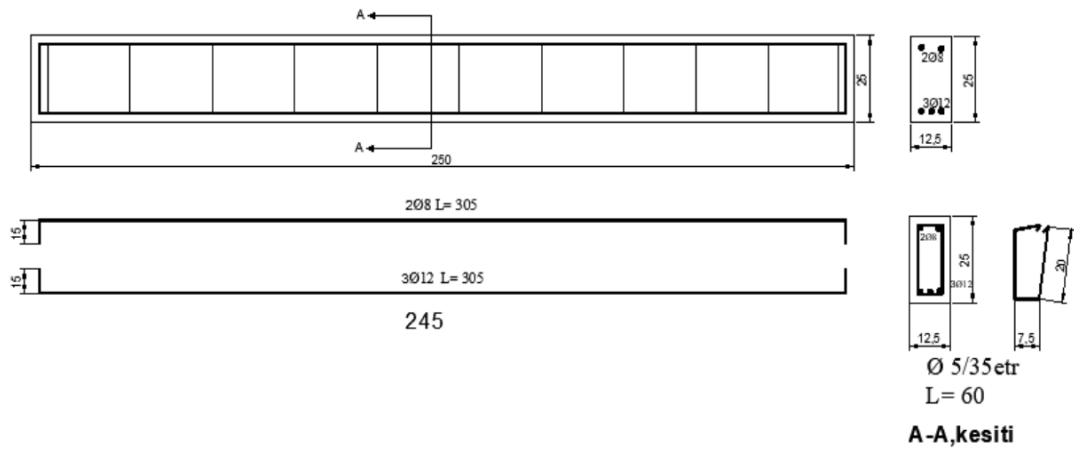
Şekil 3.3. Betonarme kirişler deney elemanlarının boyutları (ölçüleri cm'dir) ve a/d oranı (Doğangün, 2008)

### 3.3. Deney Numunelerinin Detayları

Tüm kiriş numunelerinde boyuna donatı (çekme ve basınç bölgesinde) aynı oranda kullanılmıştır. Kullanılan B420c tipi boyuna donatı basınç donatısı olarak 2 adet nervürlü 8 mm çapında ( $\rho' = 0.00347$ ), çekme donatısı olarak 3 adet nervürlü 12 mm çapında ( $\rho = 0.0117$ ) donatı kullanılmıştır. Kirişlerin donatıları seçilirken dengeli donatı oranından ( $\rho_b = 0.0209$ ) daha düşük olacak şekilde tasarlanması, deneylerde kirişlerin denge altı sünek kırılma davranışı göstermesini sağlamıştır. Bu oran (TS500, 2000)de belirtilen dengeli donatı oranı ( $\rho_b = 0.0305$ )'den küçük olduğundan kirişlerde denge altı donatı bulunmaktadır. Kullanılan S220 tipi etriye donatıları, 5 mm çapında ve nervürsüz donatı olarak seçilmiştir. Fakat numuneler üzerinde farklı türde hasar oluşturmak için 10 adet hazırlanmış eğilme hasarlı olan kirişlerin etriyeleri, 100 mm aralıklarla kullanılmış ve 10 adet hazırlanmış kesme hasarlı olan kirişlerin etriyeleri, 350 mm aralıklarla kirişlere yerleştirilmiştir, Şekil 3.4'de açıklanmıştır.



a) Eğilme kirişi





**b) Kesme kirişı**







Şekil 3.4. Betonarme kirişler deney elemanlarının detayları (ölçüler cm'dir)

### 3.4. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri ve Ölçüleri

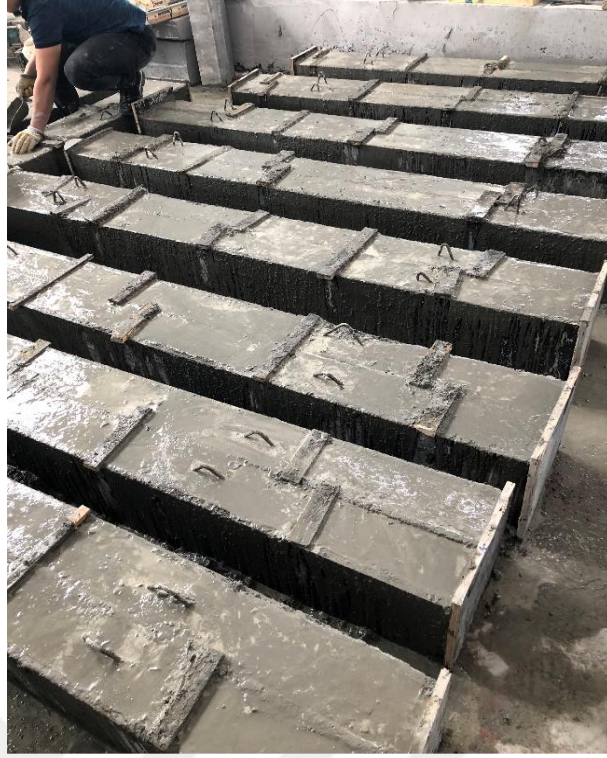
Çalışmanın sonuçlarını doğru incelenebilmesi için bütün numune kirişleri aynı mekanik özelliklere sahip malzemelerden üretilmesi ve aynı şartlar altında değerlendirilmesi gerekmektedir.

#### 3.4.1. Beton

Donatı çeliği ile güçlendirilmemiş, sünek özelliğe sahip olmayan ve deneysel çalışma kapsamındaki kirişlerin imalatında kullanılacak olan beton, aynı karakteristik özellikte malzeme kullanmak amacıyla laboratuvar ortamında betonu hazırlanmamış, hazır beton üreten 'Yardımcı Hazır Beton' firmasından temin edilmiştir. Beton sınıfı olarak (C25) basınç dayanımını 25 MPa olan bir beton kullanmıştır. Şekil 3.5'te dökülen betonarme kiriş numuneleri gösterilmiştir.







**Şekil 3.5.** Kiriş numunelerin beton döküm aşaması

Deneysel çalışmada betonun basınç dayanımı belirlemek amacıyla kiriş numunelerinin üretiminde 3 adet silindir beton numunesi 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki kalıplarda hazırlanmıştır Şekil 3.6'da gösterilmiştir. 28 günden sonra yapılan aksenal basınç testinin sonucunda numune kirişlerinin üretiminde kullanılan beton silindir basınç dayanımı yaklaşık 26 MPa olarak hesaplanmıştır, test sırasında numunenin görüntüsü ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Çizelge 3.1'de ön üretimli silindirlerin beton basınç dayanım değerleri açıklanmıştır.

**Çizelge 3.1.** Numunelerden alınan silindirlerin beton basınç dayanımları

Numune No	Numune Kodu	Yük kN	$f_c$ Basınç Dayanımı MPa
1	S1	487.390	27.59
2	S2	363.826	20.59
3	S3	545.249	30.87
<b>Ortalama</b>			<b>26.35</b>



Şekil 3.6. Alınan silindir numuneler



Şekil 3.7. Beton silindir örneklerinin test edilmesi



### 3.4.2. Donatı

Bu deneysel çalışmada boyuna donatı olarak 2 farklı donatı kullanılmıştır, Kirişlerde kullanılan B420c tipi boyuna donatı çekme bölgesinde  $3\text{Ø}12$  ( $\rho=0.0117$ ) basınç bölgesinde  $2\text{Ø}8$  ( $\rho'=0.00347$ ) olarak seçilmiştir. Kirişlerin donatıları seçilirken dengeli donatı oranından ( $\rho_b=0.0209$ ) daha düşük olacak şekilde tasarlanması, deneylerde kirişlerin denge altı sünek kırılma davranışı göstermesini sağlamıştır. Enine donatı olarak kullanılan S220 tipi etriye donatıları  $\text{Ø}5/10$  cm aralıklarla kirişlere yerleştirilmiştir, kullanılan donatı ve etriyeleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



a) Kirişler donatıları



b) Kirişlere etriyeleri

Şekil 3.8. Betonarme kirişlerin etriye ve donatıları.

### 3.4.3. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP)

Son yıllarda bir çok farklı alanlarda kullanılan bir teknolojidir. Yetersiz sargı donatısı, hasarlı betonarme elemanlarını güçlendirmesi, düşük beton kalitesi ve benzer problemleri çözmesi amacıyla karbon fiber takviyeli polimer ( CFRP ) kullanılmaktadır. Karbon kumaşların şeritleri esnektir ve kolayca kontrol edilebilir, karbon kumaşların özellikleri Çizelge 3.2’de açıklanmıştır.

Polimer malzemelerin ana avantajları başlıca şunlardır:

- Çekme dayanımı yüksektir.
- Donatı çeliğine kıyasla korozyona, çeşitli hava ve çevre koşullarına karşı yüksek direnç gösterir.
- Bu malzemeler hafiftir ve çeşitli inşaat uygulamalarında kullanımı kolaydır.
- Karbon fiber, demire göre yüksek bir dirence sahiptir bu nedenle ağırlığına kıyasla oldukça dayanıklıdır.
- Yüklere ve dinamik etkilere karşı direnci oldukça iyidir.
- Kolayca bulunabilir ( Yerli üretimde ).

#### Karbon Fiber Kumaş ( 600 gr/m<sup>2</sup> 12k twill )

Çizelge 3.2. Karbon fiber kumaş özellikleri (Kompozit, 2019)

Birim Ağırlığı	600 gr/m <sup>2</sup>
Genişliği	100 cm
Çekme Dayanımı	4.200 MPa
Elastiklik Modülü	240.000 MPa
Karbon Oranı	%95
Maksimum Deformasyon	%1.7

### 3.4.4. Yapısal yapıştırıcılar

#### 1) Teknobond 300 tix (Epoksi esash yapıştırıcı)

İki bileşenli, solventsiz, tixotropik özellikli, epoksi esaslı doyumna reçinesi ve yapıştırıcısıdır. Şekil 3.9’da gösterilmektedir. Özellikleri ise Çizelge 3.3’te açıklanmıştır.

#### Bazı avantajları:

- Kolay karıştırılır, mala ve doyumna rulosu ile uygulaması kolaydır.
- Elle doyumna işlemi içindir.
- Düşey ve baş üstü yüzeylerde uygulanır.
- Birçok yüzeye iyi aderans sağlar.
- Yüksek mekanik özelliklere sahiptir.
- Altına ayrı bir astar uygulaması gerekmez.
- Solventsizdir.

**Çizelge 3.3.** (teknobond 300 tix) Özellikleri (Kompozit, 2019)

Renk (A+B)	Kırık Beyaz
Yoğunluk sıvı (kg./lt.)	1,02 ± 0,02
Betona Yapışma ( 7 Gün )	≥3,0 N / mm <sup>2</sup> ( Betondan Kopma )
Eğilme Dayanımı ( 7 gün )	≥25,0 N / mm <sup>2</sup>
Basınç Dayanımı ( 7 Gün )	≥62,5 N / mm <sup>2</sup>
Elastite Modülü ( 7 Gün )	>20,0 Gpa
Karışım Oranı	4 Birim A : 1 Birim B
Pot Life	30 dakika (+20°C)
Tam Mukavemete Ulaşma Süresi	7 gün



Şekil 3.9. Yapıştırıcı olarak kullanılan teknobond 300 tix

## 2) Kimyasal dübel F.1311 (Epoksi yapıştırıcı)

Mekanik bağlayıcılar ve çelik plakalar yöntemlerindeki kullanılan epoksi yapıştırıcı, ankraj yapıştırıcıları ve diğer mekanik ankraj tekniklerine kıyasla daha geniş spektrumlu avantajlar sunan iki bileşenli, yüksek kaliteli kimyasal ankraj enjeksiyon sistemidir. (TSEN-1504-3, 2006) standardına uygun bir malzemedir.

Sarkma yapmayan macun kıvamındadır, Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Kullanım Alanları:

Beton, mermer, taş v.b. Ankraj ve yapıştırma işlerinde, delikli tuğla ve briket duvarlarda, makina ve sistemlerin ankraj ve montaj işlerinde, lamba ve aydınlatma sistemleri montajında, Kimyasal dübel F.1311 özellikleri Çizelge 3.4'te açıklanmıştır.

### Avantajları

- Ekonomiktir, verimi yüksektir.
- Zamandan ve işçilikten tasarruf sağlar.
- Çok hızlı sertleşir ve priz alır.
- Mekanik mukavemeti yüksektir ve uygulamada hızlı mukavemet kazanır.
- Delikli tuğla dahil pek çok yapı malzemesi ile uyumludur.

**Çizelge 3.4.** Kimyasal dübel F.1311 özellikleri (Metsan, 2019)

Basınç dayanımı	8.2 N/mm <sup>2</sup>
Klorür iyonu içeriği	0.0056 %
Camsıya geçiş sıcaklığı (T <sub>g</sub> )	74°C
Yangına tepki	E sınıfı
Parlama noktası	33°C
Uçucu olmayan madde	%87

**Şekil 3.10.** Yapıştırıcı olarak kullanılan Kimyasal dübel F.1311

Kullanılan epoksi yapıştırıcıların özellikleri (TSEN-1504-3, 2006)'nın şartlarına uygundur.

### 3.5. Betonarme Binaların Onarım ve Güçlendirilme Yöntemleri

Onarım ve güçlendirme uygulamalarında, sistem türüne bağlı olarak eleman ve bina sistemi düzeyinde iki farklı yöntemle değerlendirilmektedir. Binanın kolon, perde, kiriş ve birleşim yerleri gibi deprem kuvvetini karşılayan elemanlarında dayanıklılık ve deformasyon kapasitelerinin artırılması için uygulanan yöntem, eleman güçlendirilmesi olarak adlandırılmaktadır.

Binanın taşıyıcı sisteminin dayanıklılığı artırılması, deformasyon koşullarının geliştirilmesi ve ayrıca iç kuvvet dağılımında süreklilik sağlanması için yapıya yeni elemanlar eklenir; birleşim yerleri desteklenir, bina kütlesi azaltılarak deprem tesirlerinin azaltılma işlemleri sistem güçlendirmesi olarak adlandırılmaktadır.

### 3.5.1. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP)

Yapıların ve/veya yapı elemanlarının güçlendirilmesine yönelik farklı malzemelerin kullanımı veya farklı tekniklerin uygulanmasıyla güçlendirme yapılmaktadır. Özellikle eğilme ve kesme etkisi altında kalan yapı elemanlarının güçlendirilmesinde FRP ve CFRP tipi malzemelerin kullanımı bir hayli yaygındır.

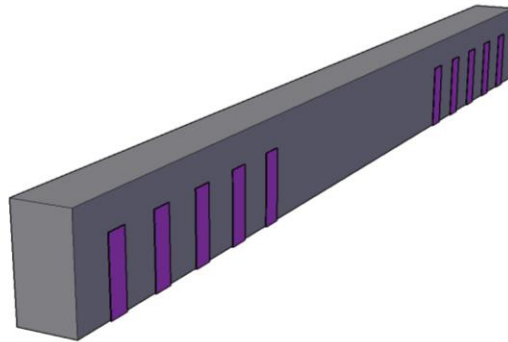
Karbon Fiber, yüksek mukavemetli ve son derece hafif bir malzemedir. Ev uygulamaları, makineler, havacılık, ve diğer ileri teknoloji uygulamaları gibi endüstrilerin tüm alanlarında uygulamalara sahip en yaygın kullanılan kompozit kumaştır. Avantajlarından bazıları:

- Hem pozitif hem de negatif moment bölgeleri için eğilme mukavemetini artırır.
- Kesme dayanımını artırır.
- Kimyasal dayanıklılıkları iyi (korozyon direnci) çatlak genişliklerini azaltır.
- Nemin içeri girmesini azaltarak gelecekteki korozyon hızını geciktirir.
- Yüksek çekme dayanımı, yüksek elastisite modülüne sahiptir.
- Hafiftir, inşa etmek pratik ve kolaydır.

Kiriş güçlendirme, karbon elyafı çekme yüzeyine epoksi yapıştırma uygulaması ile olur ve etkili bir yöntemdir. Hasarlı elemanların boyutlarına göre bu yöntemin boyutları tespit edilir (Şekil 3.11).

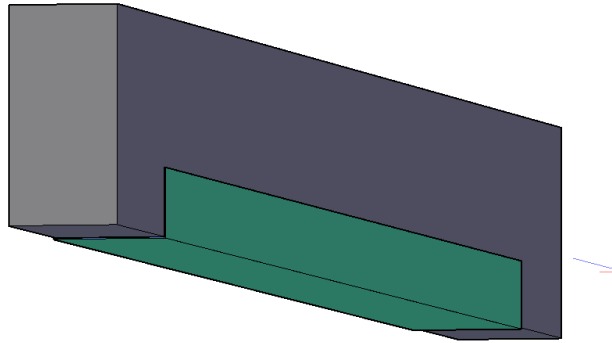
Hasar tespit edilen bölgeler önce basınçlı su veya hava ile temizlenmelidir. Hasar gören bölgede kopan veya burkulan donatılar kesilir, kaynak ile eklenir ve yeniden betonlanarak onarılır.

Oldukça yüksek çekme dayanımlarına sahip karbon şeritlerin betonarme kiriş ve döşemelerde eğilme mukavemetlerini artırmak, sehim kontrollerini sağlamak gibi ek performans vermesi amacı ile uygulanırlar.





a) Kesme kirişi karbon fiber yöntemi ile güçlendirme



b) Eğilme kirişi karbon fiber yöntemi ile güçlendirme

Şekil 3.11. Karbon fiber yöntemin uygulamaları

### 3.5.2. Çelik plakalar ile güçlendirme

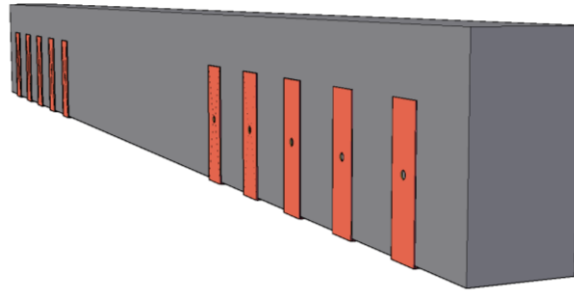
Bu sistemde belirli kalınlıkta ve genişlikteki çelik plakalar, uygulama yapılacak kirişin hasar derecesi ve hasarlı elemanların boyutlarına göre hazırlanır.

Hasarlı elemanın üç ya da dört yönden (tarafı) çelikle kaplanır bu durumda çatlağa yol açan momentlere ve kesme kuvvetlerine karşı kiriş elemanını güçlendirir. Bu yöntemde betonda ezilmiş bölgeler varsa epoksi yada çimento reçine ile kapatılıp çelik

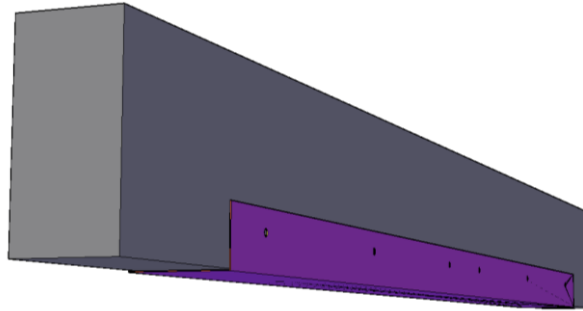
eklenir. Sonra epoksi ya da çimento ile bütün çelik kapatılır böylece çelik plakalar su ve asitlerden korunur. Betonarme ve çelik arasındaki aderansı sağlamak için epoksi yada mekanik yöntem ( bulon, kaynak vb.) yapıştırıcı olarak kullanır (Şekil 3.12).

Avantajlarından bazıları:

- Dinamik yüklere karşı dayanımı artırır.
- Yüksek kesme ve eğilme gerilmelerine karşı dayanıklıdır.
- Donma - çözülme etkilerine karşı durabiliteyi artırır.
- Kolayca bulunabilir ve piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Elemanın fonksiyonlarını olumsuz etkilememektedir.



a) Kesme kirişi çelik plakalar yöntemi ile güçlendirme



b) Eğilme kirişi çelik plaka yöntemi ile güçlendirme

Şekil 3.12. Çelik plakalar yöntemin uygulamaları



### 3.5.3. Mekanik bağlayıcılar ile onarım ve güçlendirme

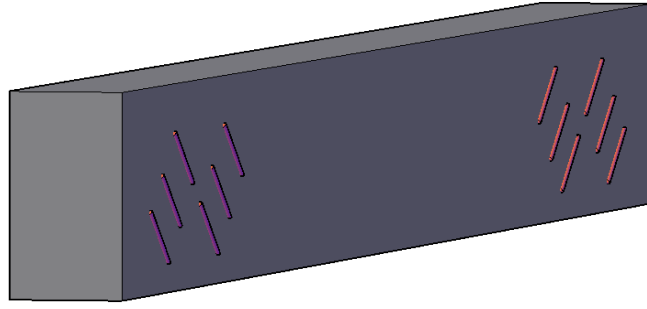
Daha fazla genişlemeyen ve durmuş olan çatlakların genellikle diğer yöntemlerle (epoksi reçinesi, çimento şerbeti ve harç) onarımı yapılır ancak çatlaklar hala genişlemeye devam ediyorsa çatlağın mekanik bağlayıcılarla onarımı ve güçlendirmesi yapılır. Bu dikişler çatlağı kesecek şekilde uygulanır. Ayrıca mekanik bağlayıcılar süresiz oldukları için bu bölgelerde gerilme yığılması olur. En çok döşemelerde kullanılmaktadır.

Mekanik bağlayıcılar çelik çubuklardan yapılır. Hasar tespit edilen bölgeler önce matkap ucu ile 40 mm derinliğinde delik açılır sonra basınçlı su veya hava ile temizlenir. 5 mm çapındaki çubuklar, 2 taraftan 90° eğilerek U şekli verilerek en son mekanik bağlayıcıları denen epoksi malzemesi ile açılan deliklere yerleştirilmektedir. Çubukların uçlarının uygun bir biçimde bağlanması için epoksi kullanılır. Hasarlı elemanların boyutlarına göre mekanik bağlayıcıların boyutları tespit edilecektir (Şekil 3.13).

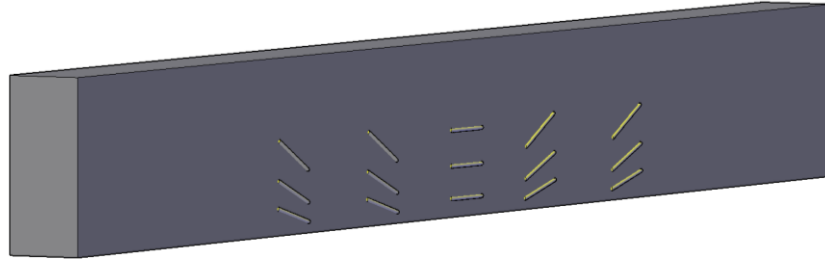
Ezilmiş bölgeler veya parçalanma varsa ilk o yerleri temizledikten sonra epoksi ya da çimento reçinesi ile doldurulup çelik elemanlar eklenmektedir.

Mekanik bağlayıcılar bağladıkları yüzeyler arasında oluşturdukları sürtünme kuvveti ile kuvvet aktarımı yaparlar. Mekanik bağlayıcılar ile çatlak yüzeylerine dik yönde bir kuvvet uygulandığı zaman, diğer bir deyişle vidalar sıkıştırıldığı zaman etkili olarak çalışmaya başlar. Eğer çatlağın genişleme eğilimi varsa, çatlağa dik yöndeki çubuklarda ek gerilmeler oluşmaya başlar. Çatlak, çubuklarda oluşan ek gerilmelere karşılık olan birim uzama miktarlarına kadar açılabilir.

- İşlemleri çok kolay olduğundan daha az işçi sayısına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Güçlendirme yöntemlerinin maliyeti en ucuz olanlardandır.
- Kıрма dökme uygulamadan yapılmaktadır.
- Güçlendirme işlemlerini yapmak için binanın kullanımının durdurulmasına gerek yoktur.
- Güçlendirme, elemanın boyutları değiştirmemektedir ve alan kaybı olmamaktadır.



a) Kesme kirişi mekanik bağlayıcılar yöntemi ile güçlendirme



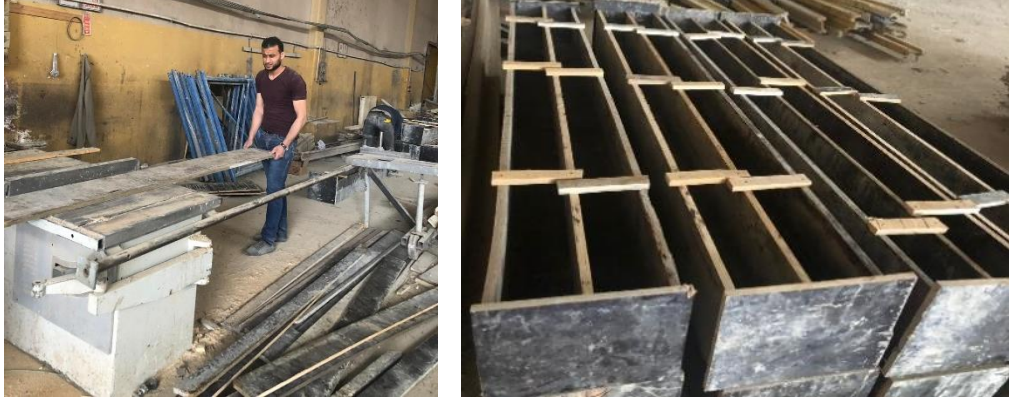
b) Eğilme kirişi mekanik bağlayıcılar yöntemi ile güçlendirme

Şekil 3.13. Çelik plakalar yöntemin uygulamaları

### 3.6. Deney Elemanlarının Üretilmesi

#### 3.6.1. Kalıpların hazırlanması

Kiriş numunelerinde dikdörtgen şekilli ahşap kalıplar kullanılmıştır. Her numune için ayrı ahşap kalıp yapıldığından, kalıplar birer kez kullanılmıştır. Ahşap kullanma sebebi hem üretimi hızlı olması hemde ucuz olmasıdır. Dediğim gibi birer kez kullanılacağından 20 adet kalıp yapılmıştır. Kalıpların içine donatı kafesleri koyularak kiriş numuneleri beton dökümüne hazırdır. Beton dökümüne hazır kalıpları Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. Ahşap kiriş kalıplarının hazırlanması

### 3.6.2. Donatıların hazırlanması

Deneyde ki kiriş numunelerin detaylı bir şekilde tasarlanmasından sonra üretime geçilmiştir. Üretim aşamasında kirişlerde uygulanacak donatı kafesinin üretimine başlanmıştır. Deneydeki kullanılan çekme donatısı ve montaj donatısı aynı elemanlardandır. Tüm Kirişlerin çekme yüzüne 12 mm çapında 3 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Kirişlerde çekme donatısı ( $\rho=0.0117$ )"dur ve basınç bölgesinde 2Ø8 ( $\rho'=0.00347$ ) olarak kullanılmıştır. Kirişlerin donatıları seçilirken dengeli donatı oranından ( $\rho_b=0.0209$ ) daha düşük olacak şekilde tasarlanması, deneylerde kirişlerin denge altı sünek kırılma davranışı göstermesini sağlamıştır. Kesme donatısı olarak 5 mm çapında düz kapalı etriyeler kullanılmıştır. Donatı kafesi koyulmuş kiriş numunesi 1 resim 2.2. de verilmiştir. Kiriş numunesi 2 farklı hasar tipi oluşturmak için iki farklı etriye aralıklı tasarlanmıştır. Eğilme hasarlı kirişlere etriye aralığı 100 mm olarak ve kesme hasarlı kirişlere 350 mm olarak koyulmuştur (Şekil 3.15 - Şekil 3.16- Şekil 3.17 - Şekil 3.18)'da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Kesme kiriş numunelerine ait donatı detayları



Şekil 3.16. Kesme kiriş numunelerine ait donatı detayları



Şekil 3.17. Kiriş numunelerinde kullanılan etriye



Şekil 3.18. Kiriş numunelerinde kullanılan etriye



### 3.6.3. Beton dökümü

Beton dökümüne fabrikadan hazır beton getirilmiş kirişlere beton dökülmüştür. Dökümde C25 sınıfı hazır beton kullanılmıştır. Beton dökümü esnasında betonun kalıp içerisinde homojen bir şekil yerleşmesi için betona sıkıştırma işlemleri uygulanmıştır. Beton dökümü Şekil 3.19’de açıklanmıştır.



Şekil 3.19. Kiriş numunelerin beton döküm aşaması

### 3.6.4. Ankrajların hazırlanması

Kiriş numunelerinin takviye edilmesinde 6 mm çapında sonsuz dişli metrik vidalar kullanılmıştır, Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Çelik plakalar yöntemi ile güçlendirmiş olan kiriş numunelerinde ankraj vidaları kullanılmamıştır. Bu durumda plakalar kirişlere yapıştırmak için 4 mm derinliğinde vidalar tespit edildiği deliklere yerleştirilmiştir. Aynı zamanda mekanik bağlayıcıları üretmek için 5 mm çapında düz çelik donatıları kullanılmıştır, bu parçaların boyutları çatlağın genişliğine ve uzunluğuna göre üretilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Vidaların özellikleri (Civata, 2019)

Deney Eleman No	Vidalar		
	Çapı (mm)	Derinlik (mm)	Sayısı
RB14mm-2	6	40	12
RB28mm-3	6	40	12
RB40mm-2	6	40	12
S40kN-1	6	40	20
S50kN-1	6	40	20
S66kN-2	6	40	20

**Şekil 3.20.** Kiriş numunelerinde kullanılan vida

### 3.6.5. CFRP Şeritlerin hazırlanması ve uygulanması

İlk başta CFRP şeritlerinin yapıştırılacak bölgelerinin tam aderansı için yapışma alanı tel fırçasıyla iyice temizlenmesi gerekir. Onarım ve güçlendirmede CFRP şeritlerin yapışacağı yüzey alanının temiz olması oldukça önemli bir faktördür. 3 adet eğilme ön hasarı verilmiş numune ile 3 adet kesme ön hasarı verilmiş numune olmak üzere toplam 6 adet numunede CFPR kullanılmıştır. Diğer ön hasarlı kirişlerde ise alternatif güçlendirme yöntemleri (çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar) kullanılmıştır.

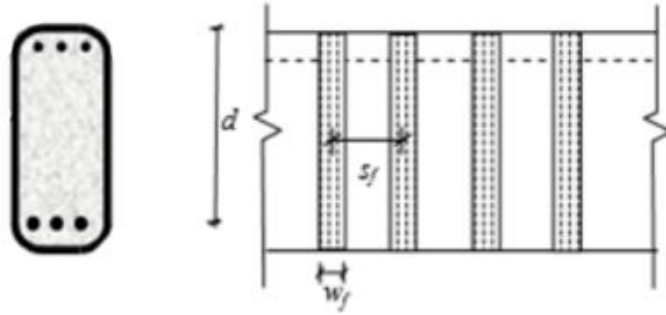
CFRP şeritlerinin uygulanacağı kirişlerin üç tarafındaki bölgeler işaretlenerek epoksi yapıştırıcı 1 mm kalınlığında sürülmüştür. Bununla ilgili işlemler Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterilmiştir.

Kullanılacak şerit boyutları ise hasar tipine göre 2 farklı boyut belirlenerek yapılmıştır. Kullanılan CFRP elemanlarının boyutları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

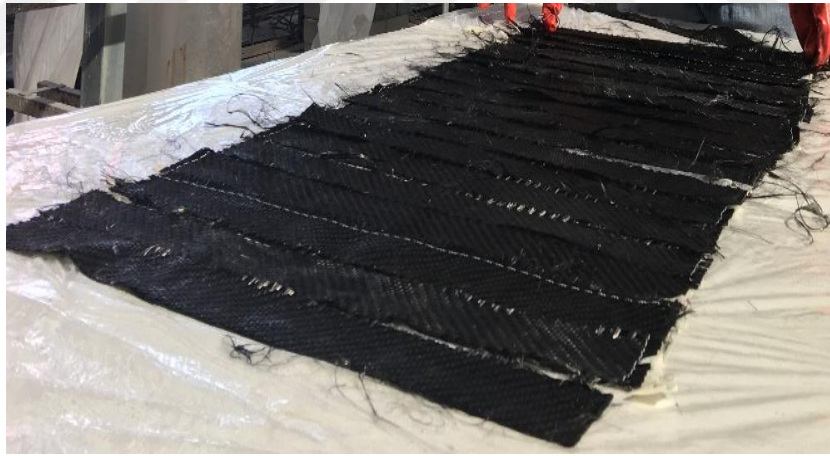
- 1) Kesme hasarlı numuneler: 50 \* 500 mm şeritler hazırlanarak mesnet yüzünden itibaren CFRP şeritler epoksi yapıştırıcı kullanılarak kirişe iki yan yüzüne 185

mm ye kadar ve alt yüzü 125 mm olacak şekilde yapıştırılmıştır. 1 adet kiriş numune için 10 adet CFRP şerit kullanılmış olup, kesme hasarı oluşabilecek bölgelere uygulanmıştır. Bu işleme ait detaylı resimler Şekil 22’de verilmiştir.

Uygulamanın süreksiz şeritler halinde kullanılması durumunda şerit aralıklarının  $s_f$ ,  $(w_f + \frac{d}{4})$  değerini geçmemesi istenmektedir. Bu çalışmada şerit aralıkları 10 cm seçilmiş olup TBDY2018 de verilen bağıntıdaki değeri geçmemektedir. Şekil 3.21’de (TBDY, 2018).



Şekil 3.21. Kirişlerde karbon fiber uygulamanın detayları, (TBDY, 2018)



Şekil 3.22. Kesme kirişlerde kullanılan karbon fiber şeritleri (Kompozit, 2019)

- 2) Eğilme hasarlı numuneler: 300\*2000 mm CFRP şeritler hazırlanarak eğilme bölgesine (orta bölge) epoksi kullanılarak kirişin alt yüzeyine 125 mm, ve her iki yan yüzüne ise 85 mm olarak uygulanmıştır (Şekil 3.23).





Şekil 3.23. Eğilme kirişlerde kullanılan karbon fiber şeritleri (Kompozit, 2019)

Çizelge 3.6. Deneysel elemanların CFRP şerit detayları.

Deneysel Eleman No	CFRP Şerit				
	Boy (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Ağırlık (Gr)	Sayısı
Kesme Kirişleri	500	50	0.097	185	10
Eğilme Kirişleri	2000	300	0.097	390	1



Şekil 3.24. CFRP uygulamasında kullanılan epoksi reçinesinin hazırlanması





Şekil 3.25. Kesme kirişlerde kullanılan karbon fiber uygulaması



Şekil 3.26. Eğilme kirişlerde kullanılan karbon fiber uygulaması

### 3.6.6. Çelik plakaların hazırlanması ve uygulanması

Betonarme kirişlerde onarım ve daha iyi bir süneklik elde etmek için ilk başta çelik plakaları yapıştırılacağı bölgelerin aderansının iyi olabilmesi için yapışma alanı iyice temizlenmelidir. Çelik plakalarla onarım ve güçlendirme işlemi için üç adet eğilme ön hasarlı numune ve üç adet kesme ön hasarlı numune olmak üzere toplam 6 adet numune hazırlanmıştır. Ön hasar verilen diğer kirişler için ise alternatif onarım ve güçlendirme yöntemleri uygulanmıştır.

Çelik plakaların uygulanacağı kirişin üç tarafı işaretlenerek, epoksi yapıştırıcı 1 mm kalınlığında sürülmüştür.

Onarım ve güçlendirme için seçilen plaka boyutları ise hasar tipe göre 2 farklı boyut tercih edilerek uygulanmıştır.

- 1) Kesme ön hasarlı numuneler: 50 \* 500 mm plakalar hazırlanıp, mesnet yüzünden itibaren plakaları epoksi yapıştırıcı ile her plaka için bir bulon ankrajı kullanılarak kirişe iki yan yüzüne 185 mm ye kadar, alt yüzüne ise 125 mm olacak şekilde ankrajı yapılmıştır. 1 adet kiriş numune için 10 adet mekanik bağlayıcı (her mesnet bölgesinde 5 er adet olmak üzere) kullanılmış olup kesme hasarının beklendiği bölgelere (sağ ve sol kiriş mesnetlerine) uygulanmıştır. Bu işlemlere ait uygulama resimleri Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Kesme kirişlerde kullanılan çelik plakalar uygulaması (Şen, 2019)

- 2) Eğilme ön hasarlı numuneler: Eğilme ön hasarlı kiriş numuneleri için 300\*2000 mm boyutlarında U şeklinde çelik plakalar hazırlanmıştır. Kirişin eğilme bölgesi olan (açıklık bölgesi, orta bölge) epoksi ve bulonlar aracılığıyla önceden hazırlanan çelik plaka, kirişin alt yüzüne 125 mm, her iki yüzüne 85 mm olacak şekilde uygulanmıştır. Bu uygulamaya ait resimler Şekil 3.28’de verilmiştir.

Eğilme ve kesme ön hasarlı betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirmesinde kullanılan çelik plakaların sayısı ve boyutları Çizelge 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.28. Eğilme kirişlerde kullanılan çelik plakası uygulaması (Şen, 2019)

**Çizelge 3.7.** Eğilme ve kesme ön hasarlı kirişler için çelik plakaların boyutları

Deney Eleman No	Çelik Plaka			
	Boy (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Sayısı
Kesme Kirişler	500	50	1.2	10
Eğilme Kirişler	2000	300	1.2	1

### 3.6.7. Mekanik bağlayıcıların hazırlanması ve uygulanması

Eğilme ve kesme ön hasarı verilen betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirmesinde kullanılan mekanik bağlayıcılar 5 mm'lik düz çelik çubuklardan seçilmiştir. Mekanik bağlayıcılar olarak kullanılan çeliklerin tipi S220 olarak belirlenmiştir. Mekanik bağlayıcılar 2 taraftan 90° eğilerek U şekli verilerek eğilme ve kesme hasarı oluşan bölgelere 6mm çapında ve 4cm derinliğinde delikler açılarak uygulanmıştır. Çelik plakalar ve mekanik bağlayıcılar için açılan bu ankraj delikleri aderansın artması için basınçlı hava ile temizlenmiştir. Delikler açıldıktan sonra mekanik bağlayıcılar epoksi ile çatlağa dik olacak şekilde uygulanmıştır. Ön hasar verilen eğilme ve kesme kirişlerinde kullanılan mekanik bağlayıcı sayı ve boyutları Şekil 3.29 ile Çizelge 3.8'de verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Deney elemanlarının mekanik bağlayıcıların detayları.

Deney Eleman No	Mekanik Bağlayıcılar		
	Çapı (mm)	Derinlik (mm)	Sayısı
BBS14mm-M	5	40	12
BBS28mm-M	5	40	18
BBS40mm-M	5	40	22
SBS40kN-M	5	40	8
SBS50kN-M	5	40	12
SBS66kN-M	5	40	16





Şekil 3.29. Kiriş numuneler kullanılan mekanik bağlayıcılar uygulaması

### 3.6.8. Onarılmış ve güçlendirilmiş numunelerin süneklik, enerji tüketme kapasitesi ve rijitliklerinin hesaplanması

#### a) Sünekliğin değerlendirilmesi

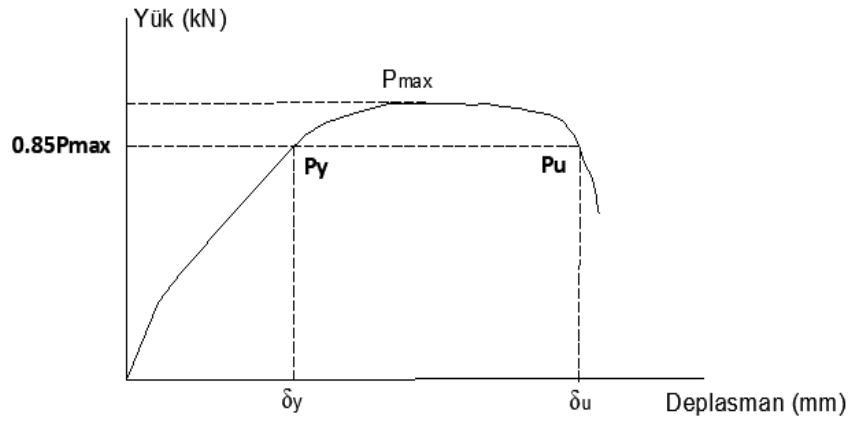
Süneklik; bir yapının elemanlarının yük taşıma kapasitesinde herhangi bir artış olmadığı halde deplasman miktarının artması şeklinde tanımlanmaktadır. (Balık, 2012). Bir betonarme kiriş için olması gereken minimum süneklik oranının değeri 4 ve 5 arasındadır (Aykaç ve Yılmaz, 2011). Süneklik, maksimum yükün yüzde 85 ine kadar yaptığı deplasmanın, elemanın akmaya kadar yaptığı deplasmanına oranıdır. Süneklik sınırları içinde kalan dayanım düşüşü %15 kabul edilmektedir,  $P_u = 0.85 * P_{max}$  (Aykaç ve Yılmaz, 2011). Bundan dolayı elemanların süneklik oranları bulunurken Şekil 3.30'da gösterildiği gibi maksimum yükün %85'ine karşılık gelen deplasman değerlerinin akma anındaki deplasmana bölünmesiyle elde edilmiştir. Denklem 1'de süneklik katsayısının hesapı verilmiştir.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

Denklem 1'de,

$\delta_y$ : Akma anındaki deplasman değeri (mm).

$\delta_u$ : Yükün %85'ine karşı gelen deplasman değerini (mm) göstermektedir.



Şekil 3.30. Sistem sünekliğinin değerlendirilmesi grafiği

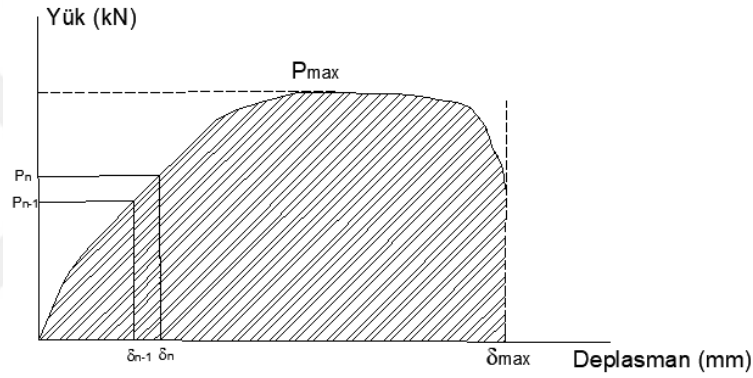
Bu çalışmada deney numunelerinin süneklikleri ile ilgili grafikler, deney sonuçları kısmında verilmiştir.

### b) Tüketilen enerjinin değerlendirilmesi

Betonarme deney kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenmektedir (Balık, 2012).

Aşağıdaki yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanı bulmak için öncelikle eğrinin altındaki bir birimlik alan bulunur ve daha sonra bu alanlar maksimum deplasmana kadar toplanır. Bu alanları toplayarak Şekil 3.31'deki gibi bir alan hesaplanmış olacaktır. Enerji tüketiminin birimi ise  $j$ , Joule dir.

Her numune kiriş için enerji alanları hesaplanmıştır, hesap edilen enerji alanlarının toplanarak toplan tüketilen enerjisi hesap edilmiştir.



Şekil 3.31. Sistem enerji tüketimin değerlendirilmesi grafiği

### c) Elemanların rijitliğinin değerlendirilmesi

Yapı elemanlarında, yük altında elemanın deplasman yapmaya karşı koyma gücü rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik arttıkça, aynı yük altında oluşan şekil değiştirme miktarıda azalacaktır. Deprem, rüzgar, kar gibi çeşitli yükler altında oluşan çatlaklar elemanın eğilme ve kayma rijitliklerinde önemli azalmalara sebep olmaktadır. Bu etki sonucunda deplasman miktarı artarak yapının dayanımı azalmaktadır. Betonarme kirişlerin rijitliği maksimum yükün %40'ına karşılık gelen yükün, aynı yükteki deplasmana oranı olarak alınabilir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Deney Sonuçları

- ❖ Deney elemanlarının sonuçlarını irdelemek için deneysel çalışma dört aşamaya bölünmüştür.
  - 1) İlk aşama: Numune üretilmesi.
  - 2) İkinci aşama: Ön yükleme ve ön hasar verme aşaması.
  - 3) Üçüncü aşama: Ön hasarlı numunelerin onarım ve güçlendirmesi.
  - 4) Dördüncü aşama: Onarılmış ve güçlendirilmiş numunelerin tekrar yüklemesi (son aşama).
- ❖ Üretilen deney elemanları 2 farklı hasar tipine göre gruplandırılmıştır.
  - 1) Eğilme ön hasarlı betonarme kirişler
  - 2) Kesme ön hasarlı betonarme kirişler

#### 4.1.1. Eğilme ön hasarlı kiriş numuneleri

Kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını, sünekliğini, enerji tüketme kapasitelerini, onarım ve güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini araştırmak için 10 adet 125\*250\*2500 mm boyutlarında betonarme kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Kirişlerde etriye olarak  $\Phi 5/100$  mm ve boyuna donatı ise 3 $\Phi 12$  olarak seçilmiştir. 1 adet referans numune ve 9 adet ön hasarlı numune üretilmiştir. Üretilen ve eğilme davranışı beklenen bu kirişlere ait numara, ön hasar seviyesi ve güçlendirme yöntemleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çalışmada ilk olarak referans numune maksimum göçme yüküne kadar yüklenmiştir. Daha sonra diğer kirişler ise önceden belirlenen hasar seviyeleri olan %1, %2 ve %3 deplasman hasar oranlarına kadar yüklenerek eğilme hasarları kontrollü bir şekilde oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalardaki kirişlerin farklı hasar seviyelerinde oluşan çatlaklar ve yük-deplasman grafikleri değerlendirilmiştir. CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilmiş kirişlere ait deneysel çalışma detayları verilmiştir.



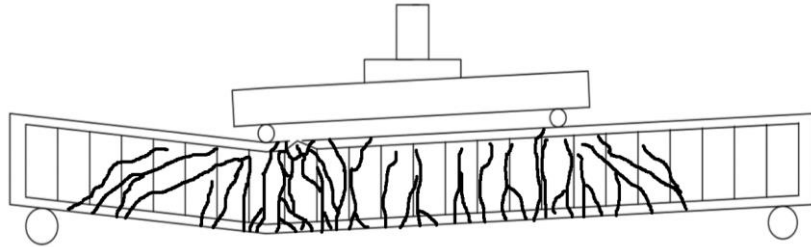
**Çizelge 4.1.** Deneysel çalışmada test edilen eğilme ön hasarlı numuneler.

<b>Deney No</b>	<b>Kiriş Kodu</b>	<b>Hasar Tipi</b>	<b>Ön Hasar Seviyesi</b>	<b>Onarım ve Güçlendirme Yöntemi</b>
1	BRB	Eğilme Hasarı	-	-
2	BBS14mm-S	Eğilme Hasarı	14mm Deplasman	Çelik Güçlendirme
3	BBS14mm-M	Eğilme Hasarı	14mm Deplasman	Mekanik Bağlayıcılar
4	BBS14mm-C	Eğilme Hasarı	14mm Deplasman	Karbon Fiber
5	BBS28mm-S	Eğilme Hasarı	28mm Deplasman	Çelik Güçlendirme
6	BBS28mm-C	Eğilme Hasarı	28mm Deplasman	Karbon Fiber
7	BBS28mm-M	Eğilme Hasarı	28mm Deplasman	Mekanik Bağlayıcılar
8	BBS40mm-C	Eğilme Hasarı	40mm Deplasman	Karbon Fiber
9	BBS40mm-M	Eğilme Hasarı	40mm Deplasman	Mekanik Bağlayıcılar
10	BBS40mm-S	Eğilme Hasarı	40mm Deplasman	Çelik Güçlendirme

- BRB : Eğilme referans kirişi.  
BBS : Güçlendiren eğilme kiriş.  
14mm, 28mm ve 40mm : Deplasman hasar seviyesi.  
S : Çelik plakalarla güçlendirme yöntemi.  
M : Mekanik bağlayıcılarla güçlendirme yöntemi.  
C : Karbon fiber ile güçlendirme yöntemi.

#### 4.1.1.1. 1 Nolu deney elemanı ( BRB )

Yapılan eğilme deneylerinin ilki referans numunedir. Bu numune kirişin eğilme kapasitesine erişmesine kadar yüklenmiştir. Yüklemeler yük ve deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. BRB deney elemanında oluşan ilk çatlak 40 kN yük ve 3.01 mm deplasmanda görülmüştür. Oluşan bu çatlaklar tipik eğilme kirişlerinde görülen moment çatlakları şeklindedir. Numunenin akma yüküne kadar 10 kN'luk artışlarla ilerlenmiştir. Akma anında kirişin yük taşıma kapasitesi 110 kN ve bu andaki deplasman değeri 14 mm olarak gözlenmiştir. Akma yükünden sonra deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Deplasman kontrollü yüklemelerde her 5 mm deplasmanda bir durulmuştur. Numune aktıktan sonra pekleşme aşamasına geçerek maksimum 111.14 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 20.62 mm'dir. Numune 87 kN yük seviyesinde ve 30 mm düşey deplasmana eriştiğinde donatıda burkulma meydana gelmiştir. Deneyin tamamlanması betonun basınç bölgesinde ezilme 96.43 kN yük seviyesinde ve deplasman değeri 47.8 mm olduğu anda gerçekleşmiştir. BRB numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Meydana gelen bütün çatlakları incelenmiştir. Deney numune ait son hali Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.



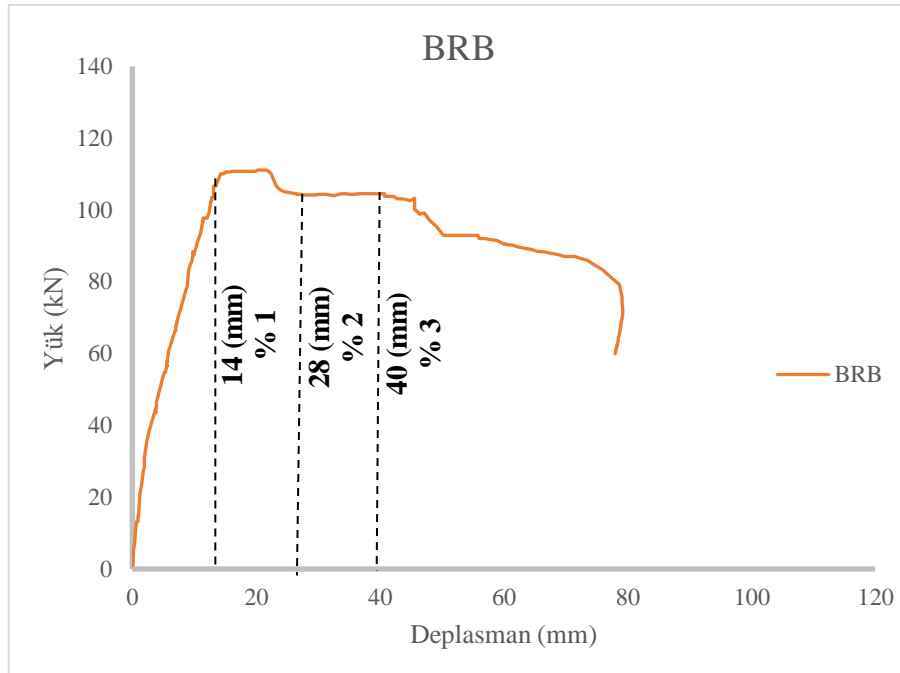
Şekil 4.1. Eğilme referans kiriş numunenin son hali

Donatı 110 kN yük ve 14 mm deplasman noktasında akmıştır, bu noktada sınırlı hasar bölgesi tanımlanmaktadır, bu durumda düşey deplasman oranı  $\frac{14}{1150} = 0.012 \approx$  %1 kabul edilmiştir, buna göre eğilme hasar seviyeleri %1, %2 ve %3 düşey deplasman oranlarından yüklenerek oluşturulmuştur, bu hasar seviyeleri sırasıyla ( 14 – 28 ve 40 ) mm deplasman karşılamaktadır.

Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{49.5}{11.15} = 4.439$  olarak tespit edilmiştir. Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 31.12 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 7.27687 kj değerlerindedir.



Şekil 4.2. Göçme anındaki eğilme referans numunesi



Şekil 4.3. Eğilme referans numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.2. 2 Nolu deney elemanı ( BBS14mm-S )

Bu numune kirişinde ilk hasar seviyesinin ( %1 ) olması için 14 mm düşey deplasmana kadar yük uygulanmıştır. Kiriş numunesinde oluşan ilk çatlak 38.62 kN yük ve 3.39 mm deplasman değerinde orta bölgede eğilme çatlakları olarak oluşmuştur. Yükleme kontrollü bir şekilde devam ederken deplasman değeri ve çatlak oluşumları artmaya ve genişlemeye devam etmiştir. 111.15 kN yük değerinde çekme donatısı akma noktasına ulaştı ve bu yükteki deplasman değeri 13.8 mm'dir.

111.75 kN yüke ulaştığı anda deplasman değeri 14 mm'dir. Hasarlı kiriş numune Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Bu numuneyi çelik plaka ile güçlendirmek için kirişin yüzü tel fırçasıyla temizlenmiştir. Önceden tespit edilen noktalarda 6 mm çapında delikler açılmıştır. Açılan delikler kompresör kullanılarak temizlenmiştir. Temizlenen delikler epoksi ile doldurulmuştur ve bulonlar yerleştirilmiştir ve çelik plakalar epoksi ile monte edilmiştir. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kirişler, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney numunesine 10 kN'luk periyotlar halinde yükleme işlemi uygulanmıştır. Güçlendirilen kirişe yüklerken her 10 kN yük için 1 mm deplasman oluşmuştur, yük arttıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Var olan eğilme çatlakları 32.97 kN yük ve 3.13 mm deplasman değerinde genişlemeye başlamıştır. İlk kesme çatlakları 67.65 kN ve 6.94 mm deplasman noktasında numunenin sağ mesnedine yakın oluşmuştur. Yükleme devam ettikçe çatlaklar ilerlemeye devam etmiştir. Bu elemanda 80.11 kN yük değerine ulaşıldığı anda çelik plakalar yük taşımaya başlamıştır. 122.18 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri 13.62 mm'dir. 31.029 mm düşey deplasman değerinde ise kirişin sağ tarafındaki çelik plakalar burkulmaya başlamıştır bu andaki yük değeri 127.21 kN'dur. Deplasman 40 mm değerinde beton basınç bölgesinde ezilmeye başlamış ve çelik plaka betondan ayrılmaya başlamıştır. 81.32 mm deplasman değerine ulaşıldığında basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve bu andaki yük değeri 117.6 kN'dur. Bu deney elemanı, maksimum 127.215 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 31.02 mm'dir. Çelik plaka ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi %15 artışı göstermektedir. Aynı zamanda %30 deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Kirişin son hali Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu numuneye ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. ( PDB-14mm-S ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.5. ( BBS14mm-S ) Nolu kiriş numunenin son hali

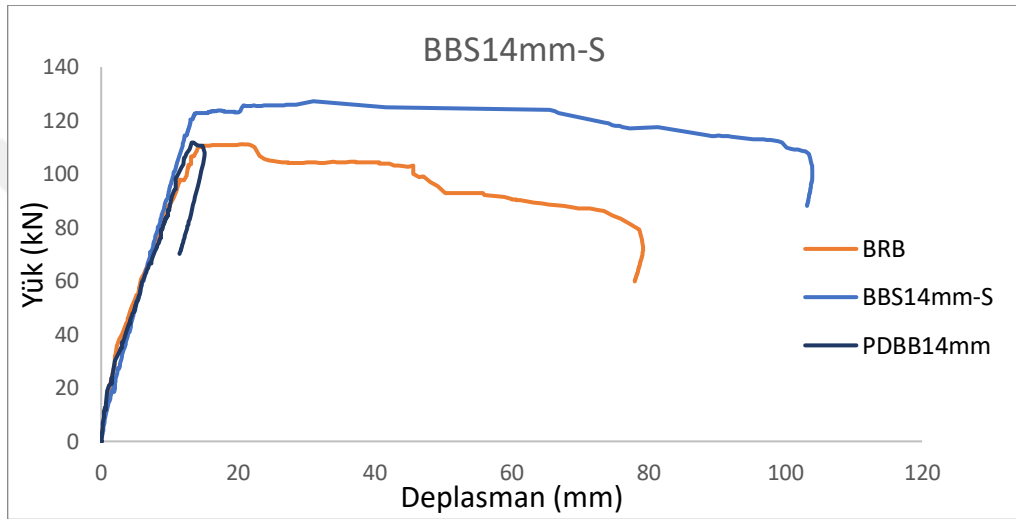
Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{103.2}{11.55} = 8.935$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 19.31 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 11.82745 kj değerlerindedir.





Şekil 4.6. Göçme anındaki ( BBS14mm-S ) nolu kiriş numune



Şekil 4.7. ( BBS14mm-S ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.3. 3 Nolu deney elemanı ( BBS14mm-M)

Bu numunede ön hasar olarak 14 mm düşey deplasman verilmesi hedeflenmiştir. Bu deney elemanında ilk eğilme çatlağı 37.8 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 2.72 mm dir. Yüklemeye devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. 114.91 kN yük değerinde çekme donatısı akma noktasına ulaştı ve bu yükteki deplasman değeri 13.36 mm'dir. Yük 115.07 kN ulaştınca deplasman değeri 14 mm ye ulaşmıştır ve deneye burada son verilmiştir. Bu hasarlı numune ait Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Numune yüzeyleri tel fırça yardım ile temizlenmiştir. Ön deneyde oluşan çatlaklar tespit edilerek mekanik bağlayıcıların nerelere montaj yapılacağı tespit edilmiştir. 6 mmlik matkap ucu ile 40 mm derinliğinde delikler açılmıştır. Kompresör kullanılarak delikler temizlenmiş ve epoksi ile doldurulmuştur. 5 mm çapında mekanik bağlayıcılar

yerleştirilmiştir. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir.

Güçlendirme uygulanan eğilme kiriş numunesinin ikinci deneyine başlanmıştır. Bu elemanda 39 kN yük değerine ulaşıldığı anda mekanik bağlayıcılar var olan çatlakların genişlemesini engellemeye başlamıştır. yeni ilk eğilme çatlağı 40 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 4.22 mm dir. Elemanda oluşan ilk kesme çatlağı ise 69.11 kN yük değerinde oluşmuştur ve bu andaki deplasman değeri 7.7 mm'dir. Yükleme devam ederken yeni çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Çekme donatıları 110.82 kN yük değerindeyken akma noktasına ulaşmıştır ve bu andaki deplasman değeri 13.02 mm'dir. Eleman, 118.04 kN yük değerindeyken kapasitesine ulaşmıştır, bu andaki deplasman değeri 36.32 mm'dir. 50.45 mm deplasman değerine ulaşıldığında basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve beton ezilmeye başlamıştır ve bu andaki yük değeri 112.94 mm'dir. Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen bu kiriş %7 değerinde yük taşıma gücü kazanmıştır. Aynı zamanda %14 deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Bu numuneye ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Deney numunesine ait son hali Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.8. ( PDB14mm-M ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.9. ( BBS14mm-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

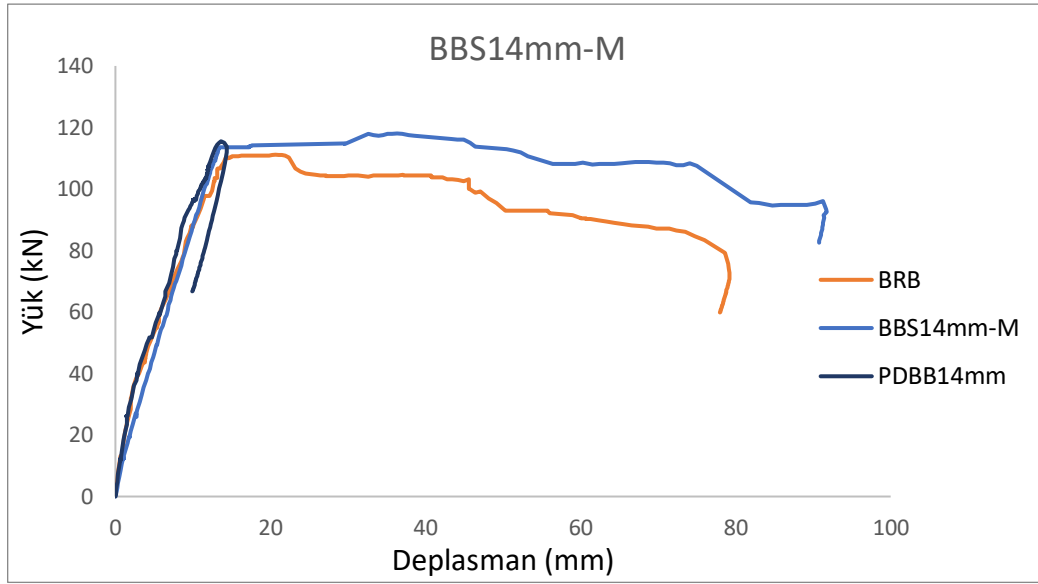
Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_a} = \frac{78.3}{11.51} = 6.8$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 17.78 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 9.38784 kj değerlerindedir.



Şekil 4.10. Göçme anındaki ( BBS14mm-M ) nolu kiriş numune





Şekil 4.11. ( BBS14mm-M ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

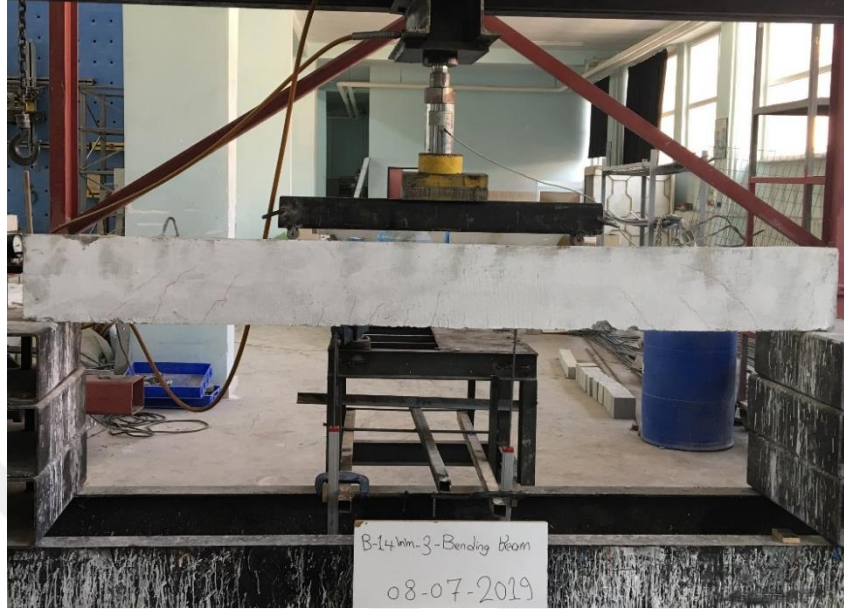
#### 4.1.1.4. 4 Nolu deney elemanı ( BBS14mm-C )

Bu numunede ön hasar olarak 14 mm düşey deplasman verilmesi hedeflenmiştir. Bu deney elemanında ilk eğilme çatlakları 42.12 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 1.64 mm dir. Yüklemeye devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Yük 115.29 kN ulaşınca deplasman değeri 14 mm ye ulaşmıştır ve deney burada son verilmiştir. Hasarlı numune kiriş Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

CFRP ile güçlendirmek için numune yüzeyleri tel fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra epoksi karışımının hazırlanması için üretici firmanın tavsiyesi üzerine A ve B bileşenleri 4/1 oranında karıştırılmıştır. Kullanılacak CFRP miktarı tartılarak kullanılacak epoksi miktarı belirlenmiştir. A bileşeninden CFRP ağırlığı kadar alınmıştır. B bileşeninden 1/4 oranında kullanılarak karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi, CFRP şeritlerine ve kirişe sürülmüştür. CFRP şeritleri kirişlerde tespit edilen eğilme bölgelerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme işlemi yapılmıştır.

Bu elemanda 125.4 kN yük değerine ulaşıldığı anda CFRP yük taşımaya başlamıştır. Elemanda oluşan ilk kesme çatlakları ise 130.16 kN yük değerinde sol mesnede yakın oluşmuştur ve bu andaki deplasman değeri 12.48 mm’dir. Yüklemeye devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Deney elemanı, 133.81 kN yük değerindeyken kapasitesine ulaşmıştır, bu andaki deplasman değeri 13.44 mm’dir. Bu deney elemanı bir

anda kesme hasarından gitmiş, süneklilik sağlamamış bu yüzden sünekliliği söz konusu değildir. Bu numuneye ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Deney numunesine ait son hali Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.12. ( PDB14mm-C ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



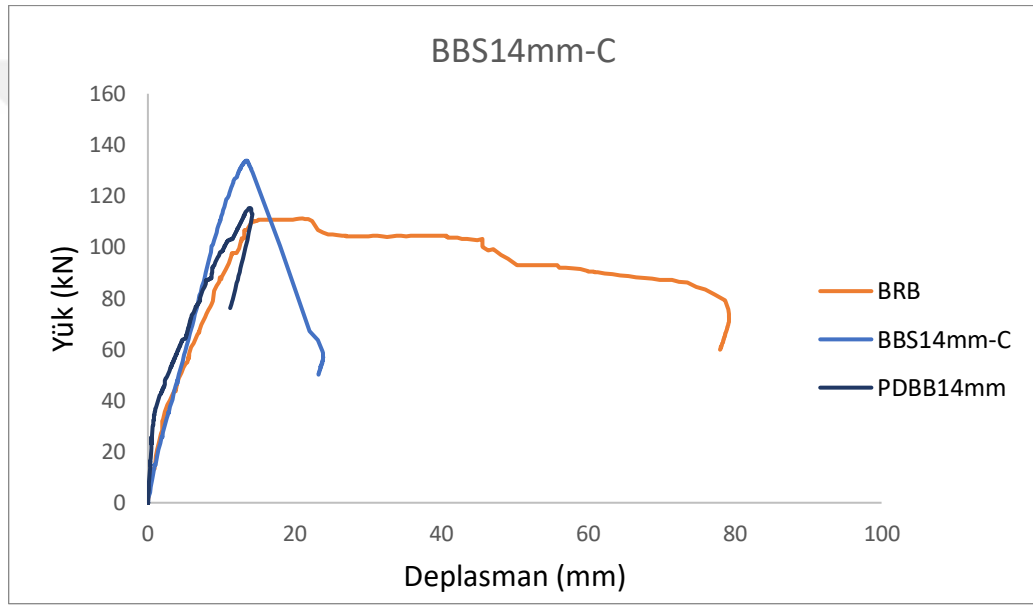
Şekil 4.13. ( BBS14mm-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

CFRP ile güçlendirilen bu kiriş %20 değerinde dayanım kazanmıştır. Aynı zamanda bu kiriş numune kesme hasarından kırılmış ve süneklilik sağlamamıştır.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 51.03 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 2.00757 kj değerlerindedir.



Şekil 4.14. Göçme anındaki ( BBS14mm-M ) nolu kiriş numune



Şekil 4.15. ( BBS14mm-C ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.5. 5 Nolu deney elemanı ( BBS28mm-S )

Bu numune kirişinde ilk hasar seviyesinin ( %2 ) olması için 28 mm düşey deplasmana kadar yük uygulanmıştır. Kiriş numunesinde oluşan ilk çatlak 42.2 kN yük ve 3.65 mm deplasman değerinde orta bölgede eğilme çatlakları olarak oluşmuştur. Yükleme kontrollü bir şekilde devam ederken deplasman değeri ve çatlak oluşumları artmaya ve genişlemeye devam etmiştir. 116.04 kN yük değerinde çekme donatısı akma noktasına ulaştı ve bu yükteki deplasman değeri 13.8 mm'dir.

115.17 kN yüke ulaştığı anda deplasman değeri 28 mm'dir. Orta hasar seviyesindeki numune Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Bu numuneyi çelik plaka ile güçlendirmek için kirişin yüzü tel fırçasıyla temizlenmiştir. Önceden tespit edilen noktalarda 6 mm çapında delikler açılmıştır. Açılan delikler kompresör kullanılarak temizlenmiştir. Temizlenen delikler epoksi ile doldurulmuştur ve bulonlar yerleştirilmiştir ve çelik plakalar epoksi ile monte edilmiştir. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kirişler, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney numunesine 10 kN'luk periyotlar halinde yükleme işlemi uygulanmıştır. Güçlendirilen kirişe yüklerken her 10 kN yük için 1 mm deplasman oluşmuştur, yük artıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Var olan eğilme çatlakları 37.5 kN yük ve 3.18 mm deplasman değerinde genişlemeye başlamıştır. İlk kesme çatlağı 64.67 kN ve 6.34 mm deplasman noktasında numunenin sağ mesnedine yakın oluşmuştur. Yükleme devam ettikçe çatlaklar ilerlemeye devam etmiştir. Bu elemanda 76.35 kN yük değerine ulaşıldığı anda çelik plakalar yük taşımaya başlamıştır. 121.71 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri 13.6 mm'dir. 30.24 mm düşey deplasman değerinde ise kirişin sağ tarafındaki çelik plakalar betondan ayrılamaya başlamıştır bu andaki yük değeri 120.94 kN'dür. Deplasman 38 mm değerinde beton basınç bölgesinde ezilmeye başlamış ve çelik plaka burkulmaya başlamıştır. 55.49 mm deplasman değerine ulaşıldığında basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve bu andaki yük değeri 109.15 kN'dur. Bu deney elemanı, maksimum 122.61 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 15.8 mm'dir. Çelik plaka ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %10 artışı göstermektedir. Aynı zamanda %25 deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Kirişin son hali Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.





Şekil 4.16. ( PDB28mm-S ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



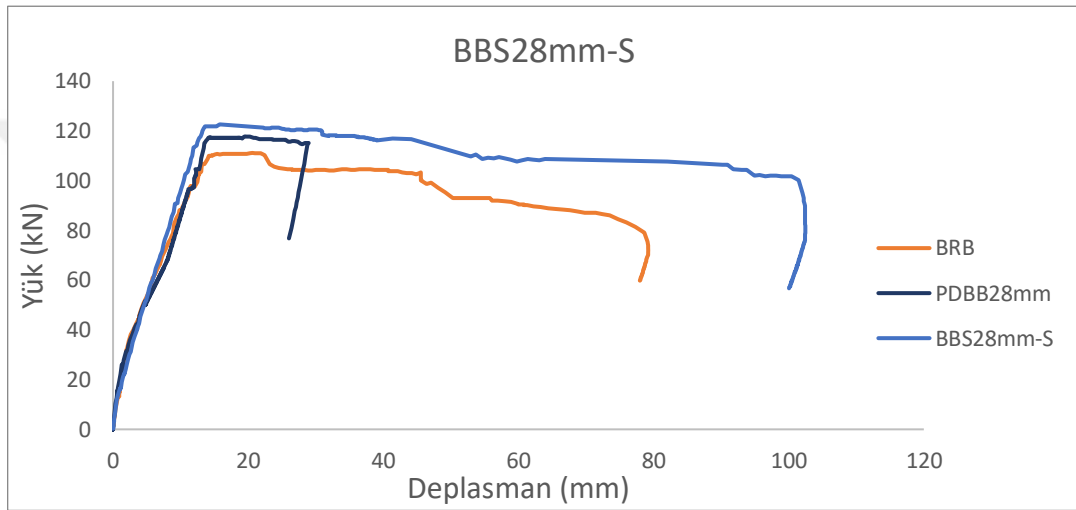
Şekil 4.17. ( BBS28mm-S ) Nolu kiriş numunenin son hali

Deney elemanın süneklığı ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{93.92}{11.1} = 8.461$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanına ait deney ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 51.37 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 10.84823 kj değerlerindedir.



Şekil 4.18. Göçme anındaki ( BBS28mm-S ) nolu kiriş numune



Şekil 4.19. ( BBS28mm-S ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.6. 6 Nolu deney elemanı ( BBS28mm-C )

Bu numune kirişinde ilk hasar seviyesinin ( %2 ) olması için 28 mm düşey deplasmana kadar yük uygulanmıştır. Bu deney elemanında oluşan ilk çatlak 40.18 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 3.3 mm dir. yük 107.158 kN ve deplasman 14.27 değerlerinde donatı akmaya başlamış. İlk yükleme 110.4 yük ve 28 mm deplasman oluşturduğunda ilk yükleme bitmiştir, ön hasar 28 mm deplasman olarak verilmiştir. Bu numunenin orta hasar hali Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

CFRP ile güçlendirmek için numune yüzeyleri tel fırça yardım ile temizlenmiştir. Daha sonra epoksi karışımının hazırlanması için üretici firmanın tavsiyesi üzerine A ve B bileşenleri 4/1 oranında karıştırılmıştır. Kullanılacak CFRP miktarı tartılarak kullanılacak epoksi miktarı belirlenmiştir. A bileşeninden CFRP ağırlığı kadar alınmıştır. B bileşeninden 1/4 oranında kullanılarak karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi,

CFRP şeritlerine ve kirişe sürülmüştür. CFRP şeritleri kirişlerde tespit edilen eğilme bölgelerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme işlemi yapılmıştır. Güçlendirilen kiriş ise Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



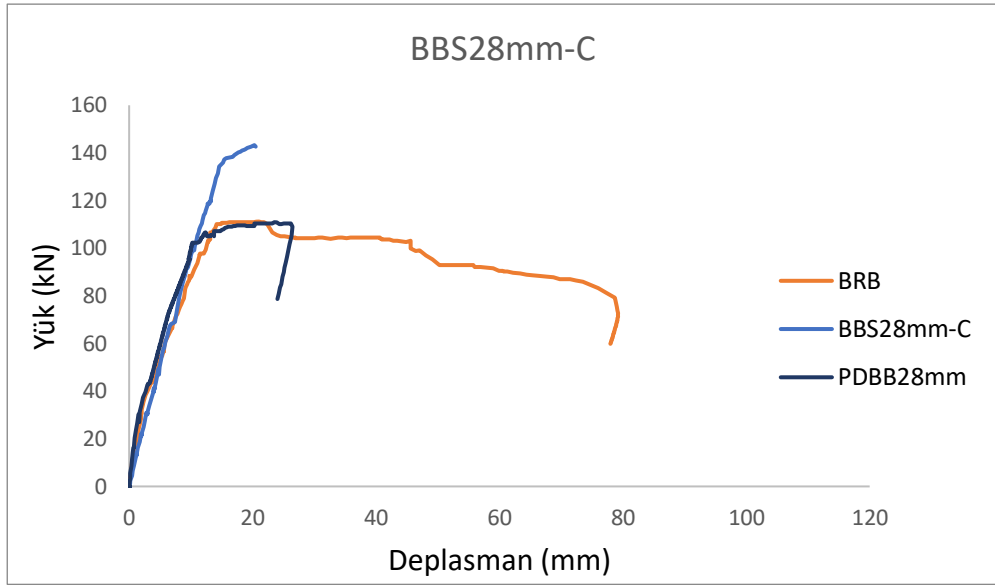
Şekil 4.20. ( PDB28mm-C ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.21. ( BBS28mm-C ) Nolu kiriş numunenin son hali

Bu numune yükleme esnasında deney elemanının işçilik hatasından dolayı paspayı fazla bırakılmış ve sağ mesnette, yük 124.25 kN ve deplasman 20.3 mm değerine ulaşıldığında kirişin sağ taraftaki mesnetinde ani kesme oluşarak kiriş bir anda kırılmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere projede belirtilen pas payına mutlak suretle uyulmalıdır. Bu deney numunesi ile ilgili şekil ve grafikler Şekil (4.22 ve 4.23)’te gösterilmiştir.

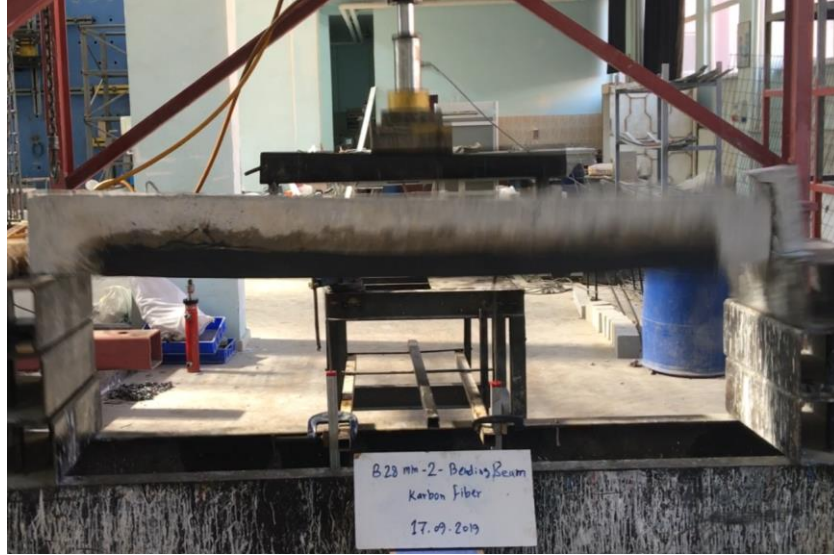




**Şekil 4.22.** ( BBS28mm-C ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri







Şekil 4.23. ( BBS28mm-C ) Nolu kiriş numunesinin göçme anı

#### 4.1.1.7. 7 Nolu deney elemanı ( BBS28mm-M )

Bu numunede ön hasar olarak 28 mm düşey deplasman verilmesi hedeflenmiştir. Bu deney elemanında ilk eğilme çatlakları 43.28 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 3.15 mm dir. Yüklemeye devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Yük 110.79 kN ulaştığında deplasman değeri 28 mm ye ulaşmıştır ve deneye burada son verilmiştir. 110.5 kN yük değerinde çekme donatısı akma noktasına ulaşmış ve bu yükteki deplasman değeri 13.88 mm olarak ölçülmüştür. Bu numunenin orta hasar hali Şekil 4.24'te gösterilmiştir.

Daha sonra numune yüzeyleri tel fırça yardımı ile temizlenmiştir. Ön deneyde oluşan çatlaklar tespit edilerek mekanik bağlayıcıların nerelere montaj yapılacağı tespit edilmiştir. 6 mm lik matkap ucu ile 40 mm derinliğinde delikler açılmıştır. Kompresör kullanılarak delikler temizlenmiş ve epoksi ile doldurulmuştur. 5 mm çapında mekanik bağlayıcılar yerleştirilmiştir. Güçlendirme işlemi tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir.

Güçlendirme uygulanan eğilme kiriş numunesinin ikinci deneyine başlanmıştır. Bu elemanda 42.2 kN yük değerine ulaşıldığında mekanik bağlayıcılar var olan çatlakların genişlemesini engellemeye başlamıştır. Yeni ilk eğilme çatlakları 42.15 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 4.18 mm dir. Elemanda oluşan ilk kesme çatlakları ise 70.94 kN yük değerinde oluşmuştur ve bu andaki deplasman değeri 7.25 mm'dir. Yüklemeye devam ederken yeni çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Eleman, 118.55 kN

yük değerindeyken kapasitesine ulaşmıştır ve çekme donatısı akmaya başlamıştır, bu andaki deplasman değeri 14.07 mm'dir. 57.57 mm deplasman değerine ulaşıldığında basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve beton ezilmeye başlamıştır ve bu andaki yük değeri 107.32 mm'dir. Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen bu kiriş %7 değerinde dayanım kazanmıştır. Aynı zamanda %14 deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Bu numuneye ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Deney numunesine ait son hali Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'de verilmiştir.



Şekil 4.24. ( PDB28mm-M ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



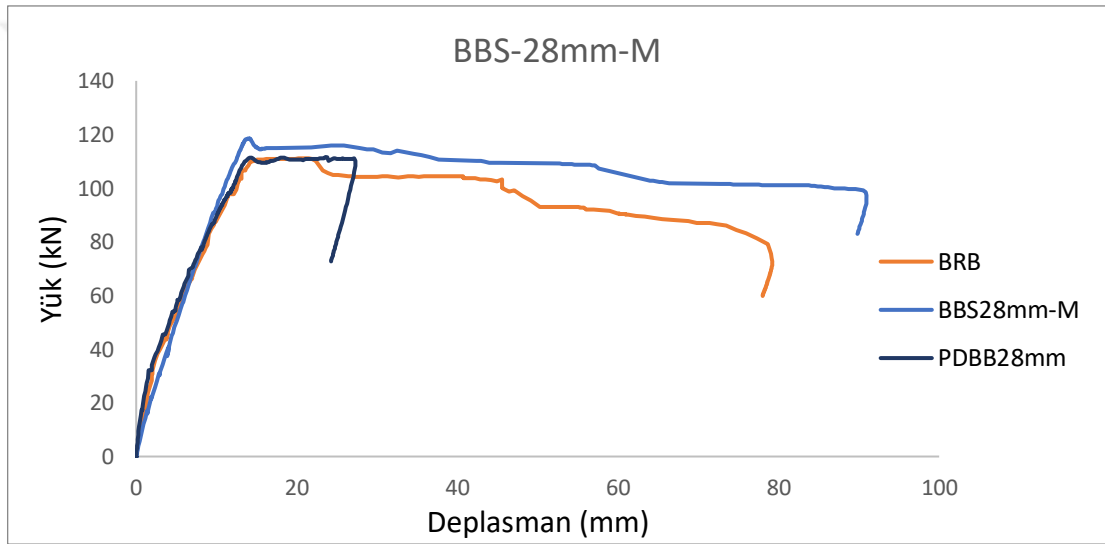
Şekil 4.25. ( BBS28mm-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

Deney elemanın sünekliliği ise  $\mu = \frac{\delta}{\delta} \frac{u}{a} = \frac{84.9}{11} = 7.71$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 19.35 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 9.21395 kj değerlerindedir.



Şekil 4.26. Göçme anındaki ( BBS28mm-M ) nolu kiriş numune



Şekil 4.27. ( BBS28mm-M ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.8. 8 Nolu deney elemanı ( BBS40mm-C )

Bu numune kirişinde ilk hasar seviyesinin ( % 3 ) olması için 40 mm düşey deplasmana kadar yük uygulanmıştır. Bu deney elemanında oluşan ilk çatlak 45.85 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 3.1 mm dir. Yüklemeye devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Yük 118.3 kN değerinde çekme donatısı akmaya başlamış ve bu andaki deplasman değeri 13.79 mm'dir. Yük 110.54 kN ulaşıncaya deplasman değeri 40 mm ye ulaşmıştır ve deneye burada son verilmiştir. Bu numunenin ileri hasar seviyesindeki hali Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

CFRP ile güçlendirmek için numune yüzeyleri tel fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra epoksi karışımının hazırlanması için üretici firmanın tavsiyesi üzerine A ve

B bileşenleri 4/1 oranında karıştırılmıştır. Kullanılacak CFRP miktarı tartılarak kullanılacak epoksi miktarı belirlenmiştir. A bileşeninden CFRP ağırlığı kadar alınmıştır. B bileşeninden 1/4 oranında kullanılarak karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi, CFRP şeritlerine ve kirişe sürülmüştür. CFRP şeritleri kirişlerde tespit edilen eğilme bölgelerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme işlemi yapılmıştır.

Bu elemanda 120.45 kN yük değerine ulaşıldığı anda CFRP yük taşımaya başlamıştır. 123.73 kN yükte akma meydana gelmiştir ve bu andaki deplasman değeri 13.48 mm'dir. CFRP'de açılma olmadan yük taşımaya devam etmiştir. Elemanda oluşan ilk kesme çatlakları ise 136.3 kN yük değerinde sol mesnede yakın oluşmuştur ve bu andaki deplasman değeri 27.73 mm'dir. Yükleme devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Deney elemanı, 136.3 kN yük değerindeyken kapasitesine ulaşmıştır ve basınç bölgesinde beton ezilme başlamış, bu andaki deplasman değeri 27.7 mm'dir. 33.19 mm deplasmanda basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve bu andaki yük değeri 112.48 kN'dur.

CFRP ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numunesiyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %23 artışı göstermiştir. Deplasman değerleri ise %42 azalma gözlenmiştir. Bu numuneye ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Deney numunesine ait son hali Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'de verilmiştir.



Şekil 4.28. ( PDB40mm-C ) Nolu hasarlı kiriş numunesi





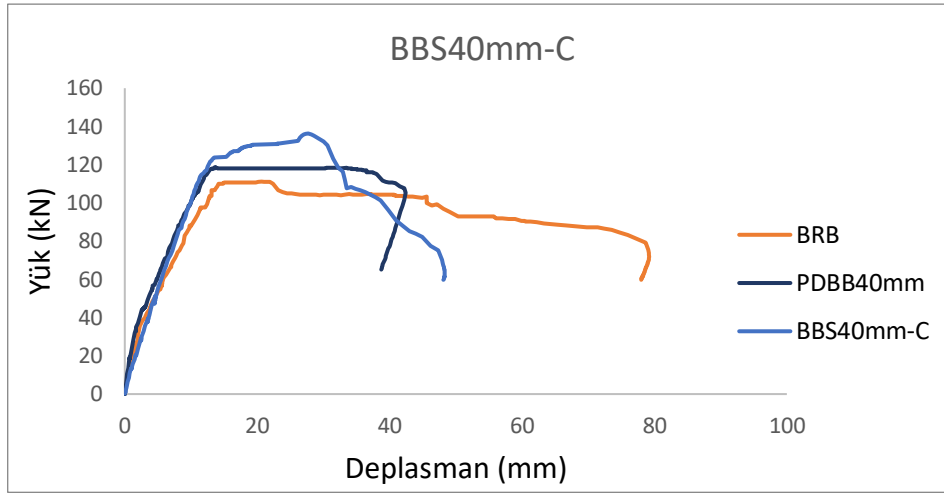
Şekil 4.29. ( BBS40mm-C ) Nolu kiriş numunenin son hali

Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_a} = \frac{33}{12} = 2.75$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 20.47 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 4.877184 kj değerlerindedir.



Şekil 4.30. Göçme anındaki ( BBS40mm-C ) nolu kiriş numune



Şekil 4.31. ( BBS40mm-C ) Nolu kiriş numunesinin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.9. 9 Nolu deney elemanı ( BBS40mm-M )

Bu numunede ön hasar olarak 40 mm düşey deplasman verilmesi hedeflenmiştir. Bu deney elemanında ilk eğilme çatlakları 44.26 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 4.43 mm'dir. Yükleme devam ederken çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Yük 108.16 kN ulaştığında deplasman değeri 40 mm ye ulaşmıştır ve deneye burada son verilmiştir. 110.25 kN yük değerinde çekme donatısı akma noktasına ulaştı ve bu yükteki deplasman değeri 14.8 mm'dir. Hasarlı kirişin hali Şekil 4.32'de gösterilmiştir.

Güçlendirme işlemi için numune yüzeyleri tel fırça yardım ile temizlenmiştir. Ön deneyde oluşan çatlaklar tespit edilerek mekanik bağlayıcıların nerelere montaj yapılacağı tespit edilmiştir. 6 mm lik matkap ucu ile 40 mm derinliğinde delikler açılmıştır. Kompresör kullanılarak delikler temizlenmiş ve epoksi ile doldurulmuştur. 5 mm çapında mekanik bağlayıcılar yerleştirilmiştir. Güçlendirme işlemini tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir.

Daha sonra güçlendirme uygulanan eğilme kiriş numunesinin ikinci deneyine başlanmıştır. Bu elemanda 40.2 kN yük değerine ulaşıldığında mekanik bağlayıcılar var olan çatlakların genişlemesini engellemeye başlamıştır. Yeni ilk eğilme çatlakları 44.51 kN yükte oluşmuştur ve bu andaki deplasman 5.83 mm dir. Elemanda oluşan ilk kesme çatlakları ise 68.89 kN yük değerinde oluşmuştur ve bu andaki deplasman değeri 9.17 mm'dir. Yükleme devam ederken yeni çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Eleman, 106.16 kN yük değerindeyken kapasitesine ulaşmıştır ve çekme donatısı akmaya başlamıştır, bu andaki deplasman değeri 15.3 mm'dir. 30.02 mm deplasman değerine ulaşıldığında beton ezilmeye başlamıştır ve bu andaki yük değeri 101.93 mm'dir. 40.06

mm deplasmanda basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve bu andaki yük değeri 95.68 kN'dur. Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneye karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %5 azalma göstermektedir. Deplasman değerleri ise %62 azalma gözlenmiştir. Kirişin son hali Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



Şekil 4.32. ( PDB40mm-M ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



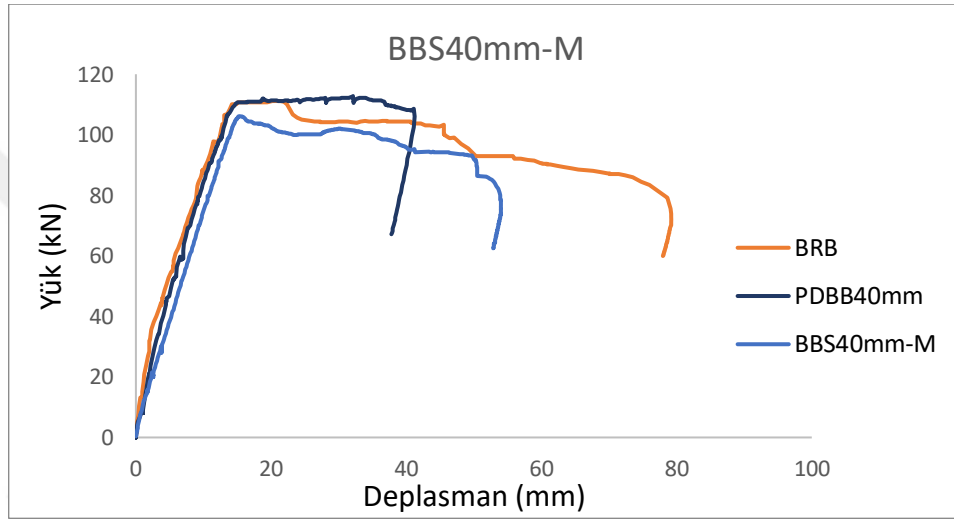
Şekil 4.33. ( BBS40mm-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_a} = \frac{50.3}{12.25} = 4.106$  olarak tespit edilmiştir. Bu

numuneye ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Bu deney elemanın başlangıç rijitlik değeri ise 40.47 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 4.65058 kj değerlerindedir.



Şekil 4.34. Göçme anındaki ( BBS40mm-M ) nolu kiriş numune



Şekil 4.35. ( BBS40mm-M ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.1.10. 10 Nolu deney elemanı ( BBS40mm-S )

Bu numune kirişinde ilk hasar seviyesinin ( %3 ) olması için 40 mm düşey deplasmana kadar yük uygulanmıştır. Kiriş numunesinde oluşan ilk çatlak 43.06 kN yük ve 3.74 mm deplasman değerinde orta bölgede eğilme çatlakları olarak oluşmuştur. Yükleme kontrollü bir şekilde devam ederken deplasman değeri ve çatlak oluşumları artmaya ve genişlemeye devam etmiştir. 109.41 kN yük değerinde çekme donatısı akma noktasına ulaştı ve bu yükteki deplasman değeri 13.73 mm'dir.

111.44 kN yüke ulaştığı anda deplasman değeri 40 mm'dir. İleri hasar seviyesindeki kiriş numunesi Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

Bu numuneyi çelik plaka ile güçlendirmek için kirişin yüzü tel fırçasıyla temizlenmiştir. Önceden tespit edilen noktalarda 6 mm çapında delikler açılmıştır. Açılan delikler kompresör kullanılarak temizlenmiştir. Temizlenen delikler epoksi ile



doldurulmuştur ve bulonlar yerleştirilmiştir ve çelik plakalar epoksi ile monte edilmiştir. Güçlendirme işlemi tamamlanmış kirişler, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney numunesine 10 kN'luk periyotlar halinde yükleme işlemi uygulanmıştır. Güçlendirilen kirişe yükleme yapılırken her 10 kN yük için 1 mm deplasman oluşmuştur, yük artıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Var olan eğilme çatlakları 38.17 kN yük ve 4 mm deplasman değerinde genişlemeye başlamıştır. İlk kesme çatlağı 65.33 kN ve 6.52 mm deplasman noktasında numunenin sol mesnedine yakın oluşmuştur. Yükleme devam ettikçe çatlaklar ilerlemeye devam etmiştir. Bu elemenda 74.1 kN yük değerine ulaşıldığı anda çelik plakalar yük taşımaya başlamıştır. 119.88 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri 14.91 mm'dir. Yükleme arttıkça yükün sabit kaldığı ve deplasmanın arttığı gözlenmiştir. 31.02 mm düşey deplasman değerinde ise kirişin sol tarafındaki çelik plakalar betondan ayrılamaya başlamıştır. Bu andaki yük değeri 126.21 kN'dur. Deplasman 41 mm değerinde ise beton basınç bölgesinde ezilmeye başlamış ve çelik plaka burkulmaya başlamıştır. 59.31 mm deplasman değerine ulaşıldığında basınç donatısında burkulma meydana gelmiştir ve bu andaki yük değeri 123.6 kN'dur. Bu deney elemanı, maksimum 126.21 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 15.8 mm'dir. Çelik plaka ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %14 artışı göstermektedir. Aynı zamanda %25 deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Kirişin son hali Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir.



Şekil 4.36. ( PDB40mm-S ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.37. ( BBS40mm-S ) Nolu kiriş numunenin son hali

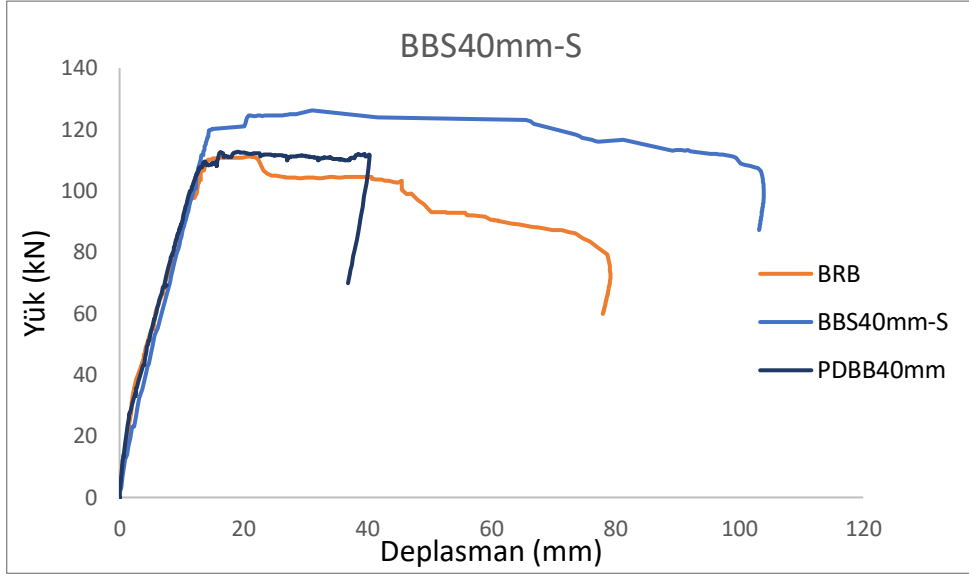
Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{103}{12.75} = 8.07$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanına ait deney son yükleme sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.39’da gösterilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 31.72 kN/mm ‘dir ve enerji tüketim kapasitesi 11.64581 kj değerlerindedir.



Şekil 4.38. Göçme anındaki ( BBS40mm-S ) nolu kiriş numune



Şekil 4. 39. ( BBS40mm-S ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2. Kesme hasarlı kiriş numuneleri

Kirişlerin kesme etkisi altındaki davranışını, sünekliğini, enerji tüketme kapasitelerini, onarım ve güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini araştırmak için 10 adet 125\*250\*2500 mm boyutlarında betonarme kiriş numuneleri hazırlanmıştır. Kirişlerde etriye olarak  $\Phi 5/350$  mm ve boyuna donatı ise 3 $\Phi 12$  olarak seçilmiştir. 1 adet referans numune ve 9 adet ön hasarlı numune üretilmiştir. Üretilen ve kesme (gevrek) davranışı beklenen bu kirişlere ait numara, ön hasar seviyesi ve güçlendirme yöntemleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çalışmada ilk olarak referans numune kesme kapasitesine ulaşincaya kadar yüklenmiştir. Ardından diğer kirişler için her bir güçlendirme alternatifi ile %50, %65 ve %85 yük taşıma kapasitesine kadar yüklenerek hasarları kontrollü bir şekilde oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalardaki kirişlerin farklı hasar seviyelerinde oluşan çatlaklar ve yük-deplasman grafikleri değerlendirilmiştir. CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilmiş kirişlere ait tasarım detayları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

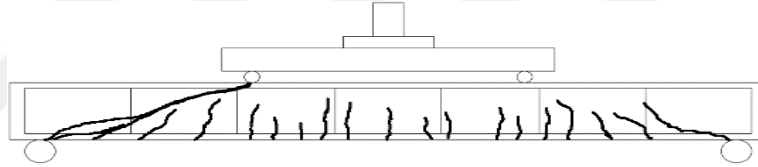
**Çizelge 4.2.** Deneyde test edilmiş kesme hasarlı kiriş numuneler.

Deney No	Kiriş Kodu	Hasar Tipi	Hasar Seviyesi	Güçlendirme Yöntemi
1	SRB	Kesme Hasarı	-	-
2	SBS40kN-M	Kesme Hasarı	40kN Düşey Yük	Mekanik Bağlayıcılar
3	SBS40kN-S	Kesme Hasarı	40kN Düşey Yük	Çelik Güçlendirme
4	SBS40kN-C	Kesme Hasarı	40kN Düşey Yük	Karbon Fiber
5	SBS50kN-M	Kesme Hasarı	50kN Düşey Yük	Mekanik Bağlayıcılar
6	SBS50kN-C	Kesme Hasarı	50kN Düşey Yük	Karbon Fiber
7	SBS50kN-S	Kesme Hasarı	50kN Düşey Yük	Çelik Güçlendirme
8	SBS66kN-C	Kesme Hasarı	66kN Düşey Yük	Karbon Fiber
9	SBS66kN-M	Kesme Hasarı	66kN Düşey Yük	Mekanik Bağlayıcılar
10	SBS66kN-S	Kesme Hasarı	66kN Düşey Yük	Çelik Güçlendirme

- SRB : Kesme referans kirişi.
- SBS : Güçlendiren kesme kiriş.
- 40kN, 50kN ve 66kN : Düşey yük hasar seviyesi.
- S : Çelik plakalarla güçlendirme yöntemi.
- M : Mekanik bağlayıcılarla güçlendirme yöntemi.
- C : Karbon fiber ile güçlendirme yöntemi.

#### 4.1.2.1. 1 Nolu deney elemanı ( SRB )

Yapılan kesme deneylerinin ilki referans numunedir. Bu numune kirişin kesme kapasitesine ulaşmaya kadar yüklenmiştir. Yüklemeler yük ve deplasman kontrolü olarak gerçekleştirilmiştir. SRB deney elemanında oluşan ilk çatlak 39.24 kN yük ve 4.13 mm deplasmanda görülmüştür. Oluşan bu çatlaklar tipik kesme kirişlerinde görülen moment çatlakları şeklindedir. Numunenin kapasite yüküne kadar 10 kN'luk artışlarla ilerlenmiştir. Numune, maksimum 77.49 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 11.16 mm'dir. deney sırasında kirişin sağ tarafında oluşan kesme çatlaklarından dolayı bu kiriş kesme kırılması ile göçmüştür ve bu yüzden süneklik sağlamamıştır. Deney sonunda 75.48 kN yük ve 12.77 mm deplasman değeri ölçülmüştür. SRB numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Meydana gelen bütün çatlaklar incelenmiştir. Deney numunesine ait son hali Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4.40. Kesme referans kiriş numunenin son hali

Kesme kirişleri için deney numunelerine referans kirişin yük taşıma kapasitesi olan 77.49 kN luk yükün %50, %65 ve %85 oranı olan sırasıyla 40kN, 50kN ve 66kN luk ön yüklemeler uygulanarak ön hasar verme işlemi yapılmıştır.

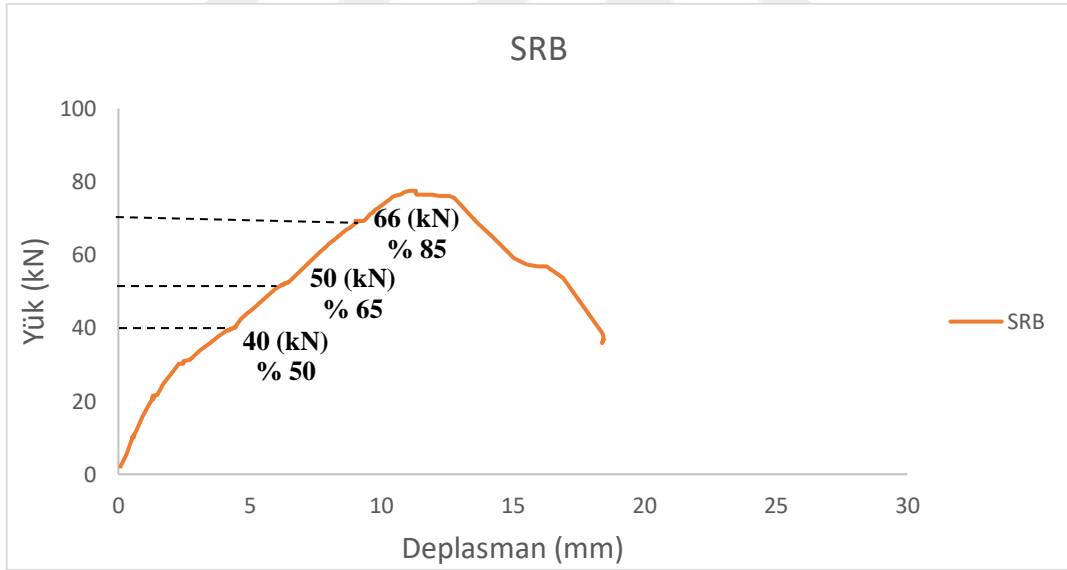


Kesme kirişlerinin referans numunesi olan deney elemanı bir anda kesme hasarından kırılmış ve sünek bir davranış göstermemiştir. Bu yüzden bu kiriş için süneklik söz konusu değildir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 26.06 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 976.01 J değerlerindedir.



Şekil 4.41. Kesme referans kiriş numunenin göçme anı



Şekil 4.42. Kesme referans kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.2. 2 Nolu deney elemanı ( SBS40kN-M )

Bu deney numunesini yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Bu numune kirişinde ilk hasar seviyesinin ( %50 ) olması için 40 kN yük'e kadar yük uygulanmıştır. Yükleme 10 kN periyotlarla yapılmıştır. Yükün 38.43 kN luk değerinde ilk çatlak orta bölgede eğilme çatlakları olarak oluşmaya başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 4.01 mm'dir. Yükleme periyotları arttıkça çatlaklar artmıştır. Hedeflenen hasar seviyesi olan 40kN luk yüke ulaşılmıştır ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.43).

Daha sonra ön hasar verilen bu numune mekanik bağlayıcılarla güçlendirme çalışmalarına başlanmıştır. Kiriş numunesi temizlenmiş ve mekanik bağlayıcıların yerleri tespit edilmiştir. Bu numune için 8 adet mekanik bağlayıcı yapılması tasarlanmıştır. Mekanik bağlayıcıların yerleştirileceği noktalar 6 mm çapında matkapla 40mm derinliğinde delikler açılmıştır. Açılan bu delikler kompresör yardımı ile temizlenmiştir. Açılan deliklere kimyasal dübel F.1311 marka tip epoksi uygulanmıştır. Mekanik bağlayıcıların montajı yapılmıştır. Kiriş numunesi, epoksinin priz süresini tamamlanması için 24 saat bekletilmiştir.

Mekanik bağlayıcılarla güçlendirilen kiriş numunesi yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme deneyine başlanmıştır. İlk eğilme çatlakları kirişin orta bölgesinde 39.34 kN'da görülmüştür, bu anda deplasman ise 3.12 mm olmuştur. Yükleme devam ettikçe çatlaklar artmış ve genişlemiştir. Oluşan ilk kesme çatlakları ise 59.75 kN yük ve 5.72 mm deplasman değerindedir. Maksimum 90.18 kN yük taşıyarak kiriş kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 12.31 mm'dir. Deney elemanı gevrek kırılma göstererek bir anda kesme hasarından dolayı göçmüş ve sünek bir davranış göstermemiştir. Bu deneyle ilgili grafikler ve kirişin son hali Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da gösterilmiştir.





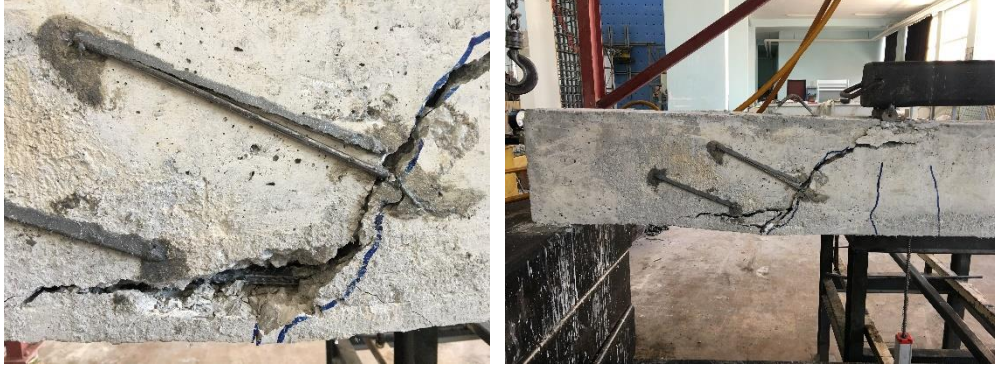
Şekil 4.43. ( PDSB40kN-M ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



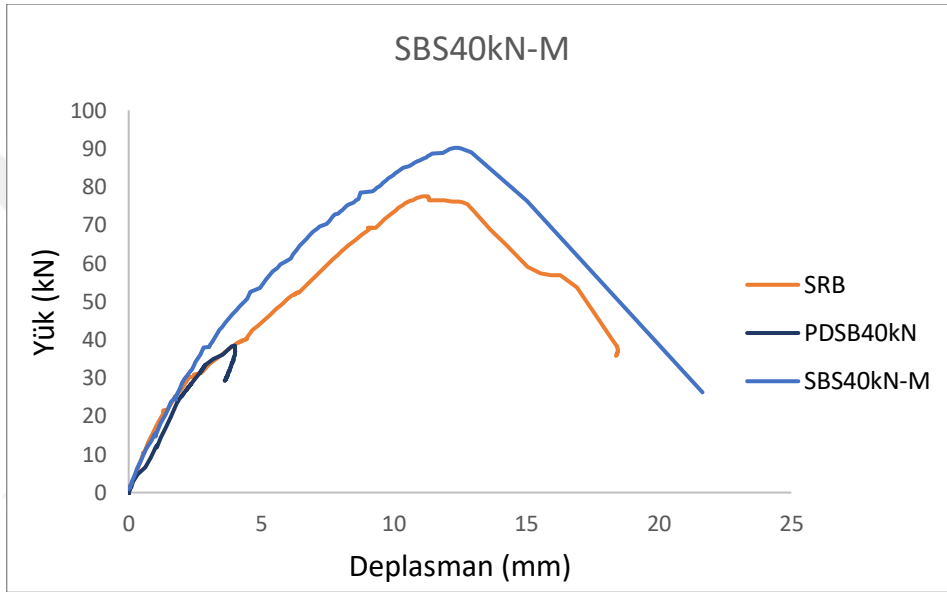
Şekil 4.44. ( SBS40kN-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %17 artışı göstermektedir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 93.19 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 1.27815 kj değerlerindedir.



Şekil 4.45. Göçme anındaki ( SBS40kN-M ) nolu kiriş numune



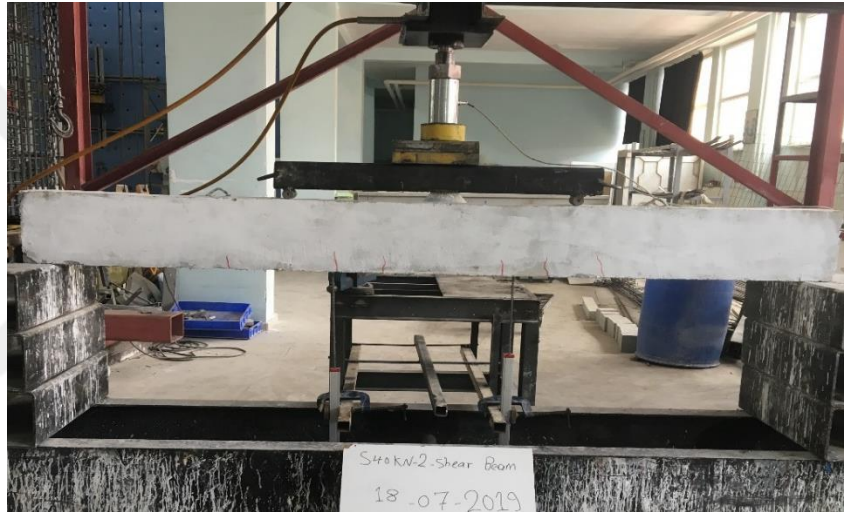
Şekil 4.46. ( SBS40kN-M ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.3. 3 Nolu deney elemanı ( SBS40kN-S )

Bu deney elemanında ön hasar seviyesinin ( %50 ) oluşması için 40 kN yüke kadar yüklenmiştir. Oluşan ilk çatlak 37.77 kN yük ve 3.46 mm deplasmanda görülmüştür. 40 kN yüke ulaştığı anında deplasman değeri 4.02 mm'dir (Şekil 4.47).

Bu numuneyi çelik plakalarla güçlendirmek için önce yüzey temizleme işlemi yapılmıştır. Önceden tespit ettiğimiz noktaları 8 mm'lik çapında delikler açılmıştır. Açılan delikler kompresör yardımı ile temizlenmiştir. Temizlenen delikler epoksi ile doldurulmuştur ve 6 mm'lik bulonlar ekilmiştir. Çelik plakalar epoksi ile monte edilmiştir. Güçlendirme işlemi tamamladığımız kirişi 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney numunesine 10 kN'luk periyotlar halinde yükleme işlemi uygulanmıştır. Güçlendirilen kirişe yükleme yapılırken her 10 kN yük

için 1 mm deplasman oluşmuştur. 37.89 kN yükte var olan çatlakları genişlemeye başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri 4.17 mm'dir ve yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yük artıka çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. 61.62 kN yükte ve 7.42 mm deplasman değerlerinde çelik plakalar yük taşımaya başlamıştır. Oluşan ilk kesme çatlağı 79.99 kN ve 10.52 mm deplasman noktasında numunenin sağ mesnedine yakın yerde oluşmuştur. Bu deney elemanı maksimum 100.79 kN yük taşıyarak kapasitesine oluşmuştur. Bu andaki deplasman değeri ise 14.74 mm'dir. Deney elemanı gevrek kırılma göstererek bir anda kesme hasarından dolayı göçmüş ve sünek bir davranış göstermemiştir. Bu deneyle ilgili grafikler ve kirişin son hali Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.47. ( PDSB40kN-S ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.48. ( SBS40kN-S ) Nolu kiriş numunenin son hali

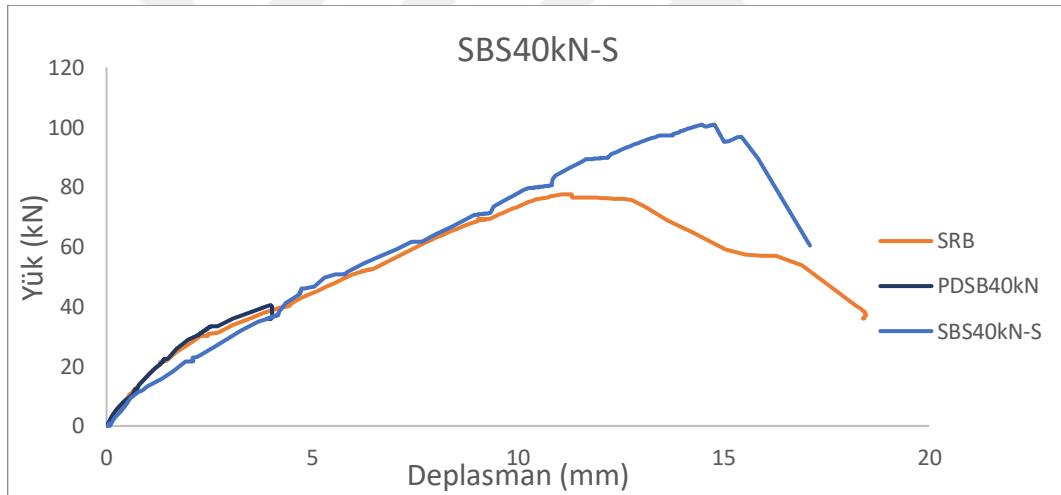


Çelik plakalar ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %30 artışı göstermektedir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 15.98 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 1.06448 kj değerlerindedir.



Şekil 4.49. Göçme anındaki ( SBS40kN-S ) nolu kiriş numune



Şekil 4.50. ( SBS40kN-S ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.4. 4 Nolu deney elemanı ( SBS40kN-C )

Bu deney numunesinde ön hasar seviyesinin ( % 50 ) oluşması için 40 kN yüke kadar yüklenmiştir. Oluşan ilk çatlak 40.52 kN yük ve 4.05 mm deplasmanda görülmüştür. Bu seviyede deney başlangıçta belirlenen ön hasar seviyesine geldiği için durdurulmuştur. (Şekil 4.51).

Daha sonra kiriş numunesi CFRP ile güçlendirmek için numunenin yüzeyleri tel fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra epoksi karışımının hazırlanması için üretici

firmanın tavsiyesi üzerine A ve B bileşenleri 4/1 oranında karıştırılmıştır. Kullanılacak CFRP miktarı tartılarak gereken epoksi miktarı belirlenmiştir. A bileşeninden CFRP ağırlığı kadar alınmıştır. B bileşeninden ise A bileşeninin 1/4 oranında kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi, CFRP şeritlerine ve kirişe sürülmüştür. CFRP şeritleri kirişlerde tespit edilen kesme bölgelerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemi tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme işlemi yapılmıştır. Güçlendirilen kirişe yükleme yapılırken her 10 kN yük için 1 mm deplasman oluşmuştur. 42.18 kN yükte kirişte daha önce var olan çatlaklar genişlemeye başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri 3.36 mm'dir ve yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yük artıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir.

Bu elemanda 62.05 kN yük değerine ulaşıldığı anda CFRP yük taşımaya başlamıştır. Oluşan ilk kesme çatlağı 101.62 kN ve 12.18 mm deplasman noktasında numunenin sağ mesnedine yakın oluşmuştur. Bu deney elemanı maksimum 108.517 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 15.6 mm'dir. Deney elemanı gevrek kırılma göstererek bir anda kesme hasarından dolayı göçmüş ve sünek bir davranış göstermemiştir. İlgili grafikler ve numunenin son hali Şekil 4.52, Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te gösterilmiştir.



Şekil 4.51. ( PDSB40kN-C ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



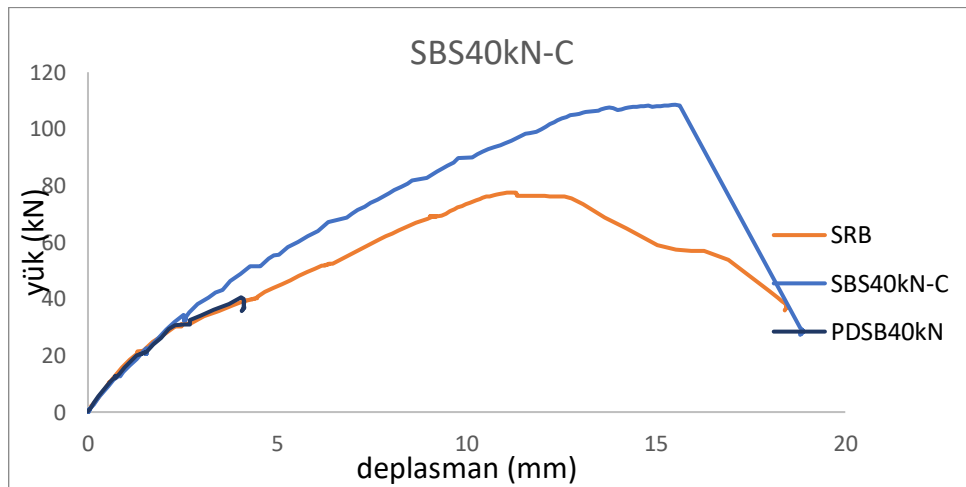
Şekil 4.52. ( SBS40kN-C ) Nolu kiriş numunenin son hali

Karbon fiber ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri % 41 artışı göstermektedir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 66.21 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 1.32428 kj değerlerindedir.



Şekil 4.53. Göçme anındaki ( SBS40kN-C ) nolu kiriş numune



Şekil 4.54. ( SBS40kN-C ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

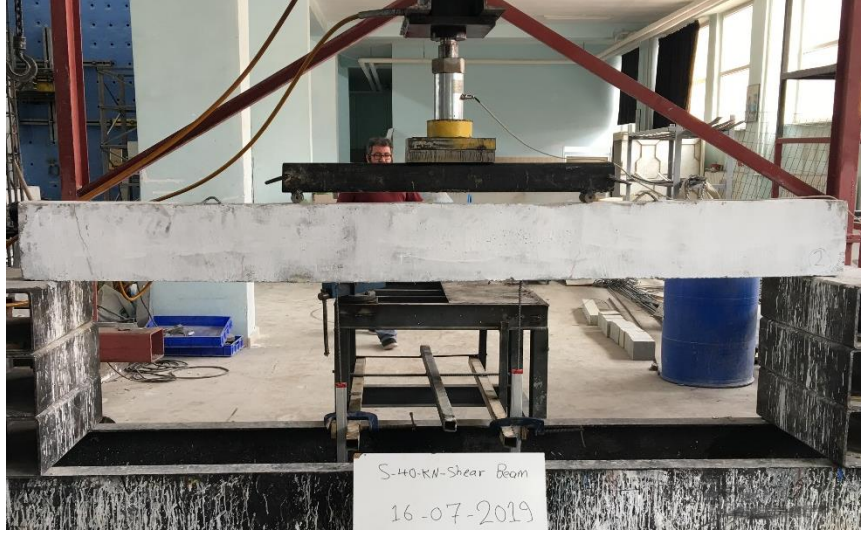
#### 4.1.2.5. 5 Nolu deney elemanı ( SBS50kN-M )

Deney numunesi yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Bu deney elemanında ön hasar seviyesinin ( % 65 ) olması için 50 kN yük'e kadar yük uygulanmıştır. Yükleme 10 kN periyotlarla artarak yapılmıştır. Deney elemanında 43.15 kN luk yükte ilk çatlak orta bölgede eğilme çatlakları şeklinde oluşmaya başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 3.31 mm'dir. Yükleme periyotları arttıkça çatlaklar artmıştır. Hedeflenen ön hasar seviyesi olan 50 kN yük 4.44 mm deplasman değerinde gerçekleşmiştir. Bu seviyede deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.55).

Daha sonra deney elemanına mekanik bağlayıcılarla güçlendirme çalışmalarına başlanmıştır. Kiriş numunesinin yüzeyi temizlenmiş ve mekanik bağlayıcıların yerleri tespit edilmiştir. Bu numune için 12 adet mekanik bağlayıcı yapılması tasarlanmıştır. Mekanik bağlayıcıların yerleştirileceği noktalara 6 mm çapında matkapla 40mm derinliğinde delikler açılmıştır. Açılan bu delikler kompresör yardımı ile temizlenmiştir. Açılan deliklere kimyasal dübel F.1311 marka tip epoksi uygulanmıştır. Mekanik bağlayıcıların montajı yapıldıktan sonra kiriş numunesi, epoksinin priz süresini tamamlanması için 24 saat bekletilmiştir.

Mekanik bağlayıcılarla güçlendirilen kiriş numunesi yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme deneyine başlanmıştır. 41.44 kN yük ve 3.7 mm deplasman değerlere ulaştığında var olan çatlaklar genişlemeye başlamış ve yeni eğilme çatlakları kirişin orta bölgesine doğru oluşmaya da başlamıştır. Yükleme devam ettikçe çatlaklar artmış ve genişlemiştir. Oluşan ilk kesme çatlağı ise 79.21 kN yük ve 8 mm deplasman değerinde görülmüştür. Bu anda mekanik bağlayıcılar çatlağın oluşmasını engellemeye başlamıştır. 109.7 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri 13.17 mm'dir. Yükleme arttıkça yükün sabit kaldığı ve deplasmanın arttığı gözlenmiştir. Deney elemanı maksimum 112.47 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 23.29 mm'dir.





Şekil 4.55. ( PDSB50kN-M ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.56. ( SBS50kN-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen bu deney elemanın referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %47 artışı göstermektedir. Aynı zamanda bu güçlendirilen kiriş sünek bir davranış göstererek deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Göçme andaki deplasman değeri ise 26 mm'dir.. Kirişin son hali Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de gösterilmiştir.

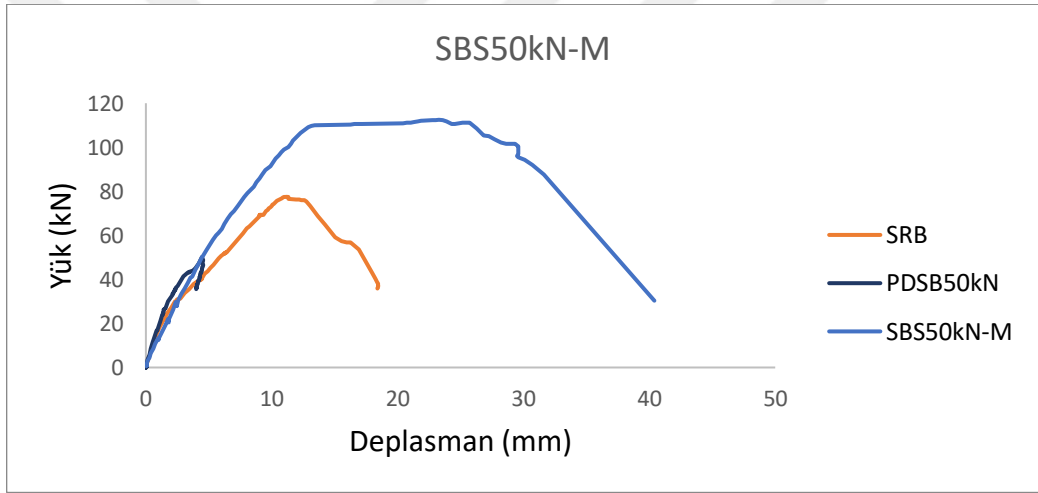
Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_a} = \frac{29.52}{10.42} = 2.83$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanına ait deney ön yükleme sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.58'de gösterilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 70.17 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 3.34361 kj değerlerindedir.



Şekil 4.57. Göçme anındaki ( SBS50kN-M ) nolu kiriş numune



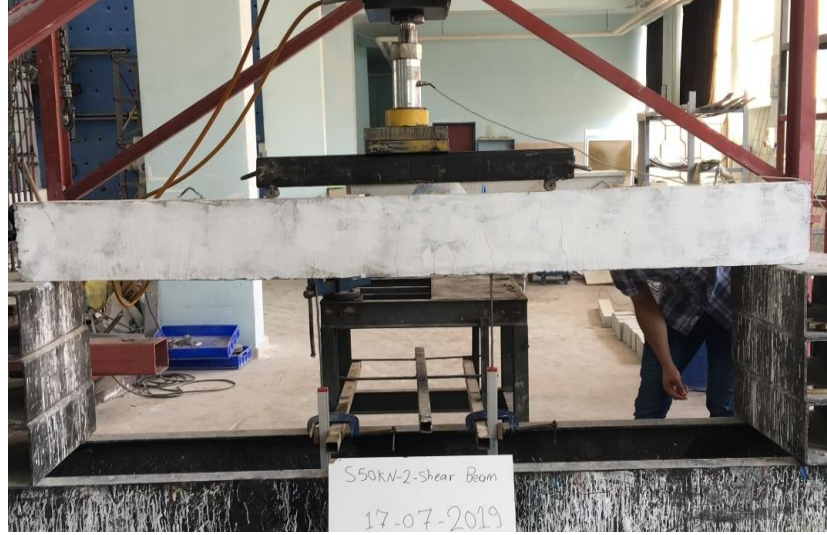
Şekil 4.58. ( SBS50kN-M ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.6. 6 Nolu deney elemanı ( SBS50kN-C )

Bu deney numunesi ön hasar seviyesinin ( % 65 ) oluşması için 50 kN yüke kadar yüklenmiştir. 41.81 kN da ilk çatlak orta bölgede eğilme çatlakları şeklinde oluşmaya başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 3.85 mm'dir. Yükleme periyotları arttıkça çatlaklar da artmıştır. Hedeflenen ön hasar seviyesinin yük değeri olan 50 kN yüke 5.4 mm deplasman değerinde ulaşılmış ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.59).

Deney numunesini CFRP ile güçlendirmek için numune yüzeyleri tel fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra epoksi karışımının hazırlanması için üretici firmanın tavsiyesi üzerine A ve B bileşenleri 4/1 oranında karıştırılmıştır. Kullanılacak CFRP miktarı tartılarak gerekli epoksi miktarı belirlenmiştir. A bileşeninden CFRP ağırlığı kadar alınmıştır. B bileşeninden ise A bileşeninin 1/4 oranında kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi, CFRP şeritlerine ve kirişe sürülmüştür. CFRP şeritleri kirişlerde tespit edilen kesme bölgelerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemi tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney elemanına 10 kN periyotlarla yükleme işlemi yapılmıştır. Güçlendirilen kirişe yükleme yapılırken her 10 kN yük için 1 mm deplasman oluşmuştur. Deney elemanında 41.5 kN yükte var olan çatlaklar genişlemeye başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri 3.46 mm'dir ve yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yük artmaya devam ettikçe çatlaklar oluşmaya ve var olan çatlaklar genişlemeye devam etmiştir.

Bu deney elemanında 64.27 kN yük değerine ulaşıldığı anda CFRP yük taşımaya başlamıştır. Oluşan ilk kesme çatlağı 102.47 kN ve 11.08 mm deplasman noktasında numunenin sol mesnedine yakın yerde oluşmuştur. 110.26 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri 12.22 mm'dir. Yükleme arttıkça yükün sabit kaldığı ve deplasmanın arttığı gözlenmiştir. Bu deney elemanı maksimum 110.27 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 12.97 mm'dir. Bu kiriş bir anda kesme hasarından kırılmış ve sünek bir davranış göstermemiştir.



Şekil 4.59. ( PDSB50kN-C ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.60. ( SBS50kN-C ) Nolu kiriş numunenin son hali

Karbon fiber ile güçlendirilen bu deney elemanı referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %43 artışı göstermektedir. Göçme anındaki deplasman değeri ise 13.9 mm'dir. Kirişin son hali Şekil 4.60 ve Şekil 4.61'de gösterilmiştir.

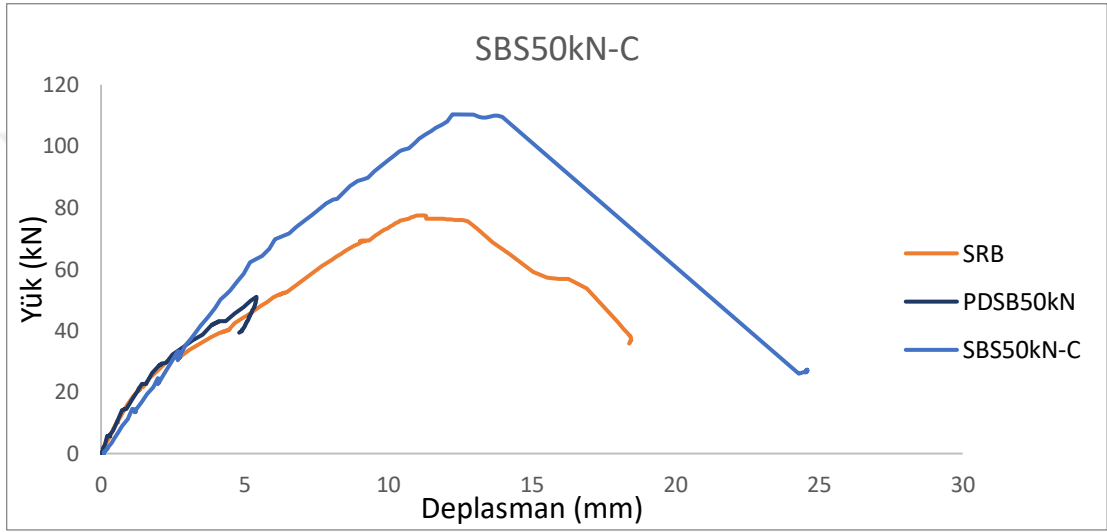
Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_a} = \frac{16}{9.74} = 1.642$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanın başlangıç rijitlik değeri ise 13.22 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 1.66704 kj değerlerindedir. Bu deney elemanına ait deney ön yükleme sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.62'de gösterilmiştir.





Şekil 4.61. Göçme anındaki ( SBS50kN-C ) nolu kiriş numune



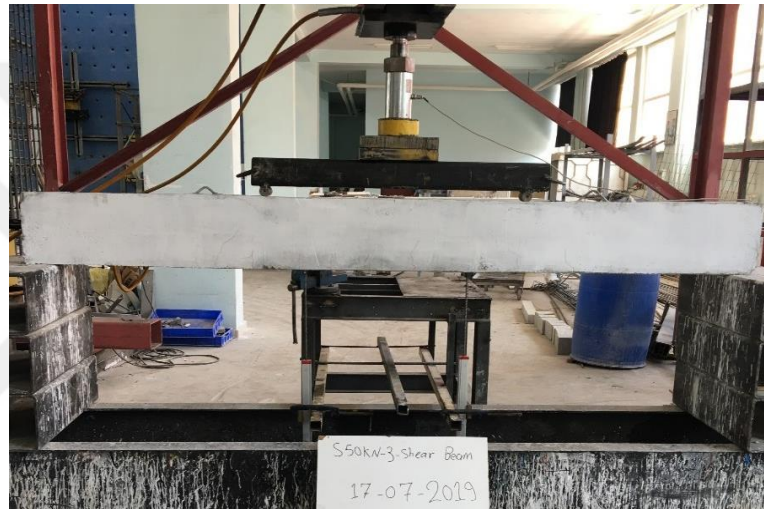
Şekil 4.62. ( SBS50kN-C ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.7. 7 Nolu deney elemanı ( SBS50kN-S )

Bu deney elemanında ön hasar seviyesinin ( %65 ) oluşması için 50 kN yüke kadar yüklenmiştir. Oluşan ilk çatlak 41.14 kN yük ve 4.4 mm deplasmanda görülmüştür. Deney elemanı 50 kN yüke ulaştığı anda deplasman değeri 5.61 mm'dir. Bu hasar seviyesindeki hasarlı numune Şekil 4.63'de gösterilmiştir.

Bu deney elemanını çelik plakalarla güçlendirmek için önce elemanın yüzeylerinin temizleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra önceden tespit edilen noktalara 8 mm'lik çapında delikler açılmıştır. Delikler kompresör aracılığıyla temizlenmiştir. Temizlenen delikler epoksi ile doldurulmuştur ve deliklere bulonlar yerleştirilmiştir. Daha önce hazırlanan çelik plakalar epoksi ile monte edilmiştir. Elemanın güçlendirme işleminin tamamlanmasından sonra, 24 saat kür süresi için beklenilmiştir. Kür süresinden sonra numune yeniden yüklenmiştir. Yükleme sırasında yük 10 kN'luk periyotlar şeklinde

uygulanmıştır. Güçlendirilen kirişe yükleme yapılırken her 10 kN yük için 1 mm deplasman oluşmuştur. Numune üzerindeki 43.21 kN luk yük seviyesinde var olan çatlaklar genişlemeye başlamıştır. Deneysel elemanında bu andaki deplasman değeri 4.69 mm'dir ve yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yük arttıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. 60.94 kN yükte ve 8.82 mm deplasman değerlerinde çelik plakalar yük taşımaya başlamıştır. Oluşan ilk kesme çatlakları 80.36 kN ve 9.77 mm deplasman noktasında numunenin sağ mesnedine yakın yerde oluşmuştur. Bu deneysel elemanı maksimum 112.45 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 19.02 mm'dir. Bu deneyle ilgili grafikler Şekil 4.66'da gösterilmiştir.



Şekil 4.63. ( PDSB50kN-S ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.64. ( SBS50kN-S ) Nolu kiriş numunenin son hali



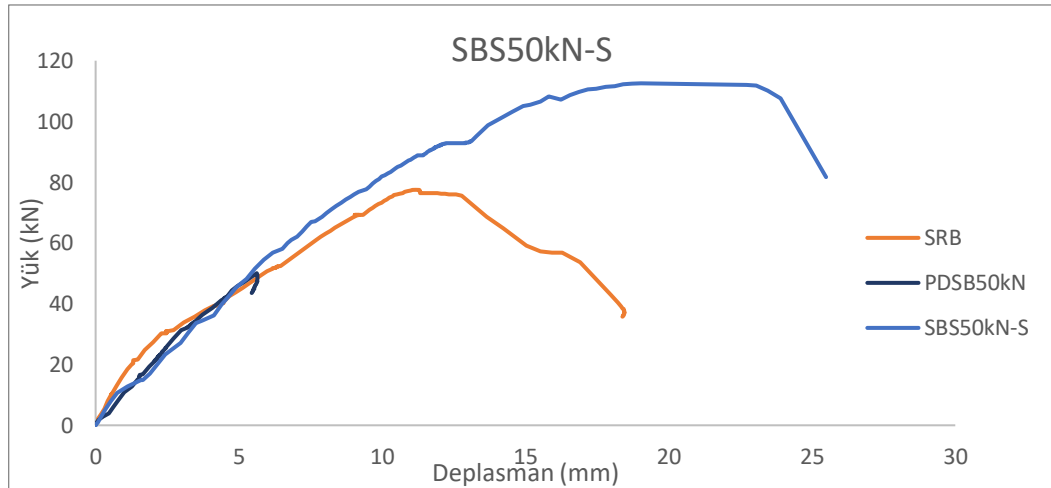
Çelik plakalar ile güçlendirilen bu deney elemanı referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %46 artış göstermektedir. Deney sonrası çelik plakalar ile güçlendirilen deney numunesi deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Göçme anındaki deplasman değeri ise 23.89 mm'dir. Kirişin son hali Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te gösterilmiştir.

Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{42.41}{13.3} = 1.835$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 15.56 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 2.04855 kj değerlerindedir.



Şekil 4.65. Göçme anındaki ( SBS50kN-S ) nolu kiriş numune



Şekil 4.66. ( SBS50kN-S ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.8. 8 Nolu deney elemanı ( SBS66kN-C )

Bu deney numunesi ön hasar seviyesinin ( % 85 ) oluşması için 66 kN yüke kadar yüklenmiştir. 38.9 kN da ilk çatlak orta bölgede eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 2.6 mm'dir. Yükleme periyotları arttıkça çatlaklar artmıştır. Amaçlanan 66 kN yük ileri hasar olarak 6.31 mm deplasman değerinde gerçekleştirilmiştir ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.67).

Deney elemanını CFRP ile güçlendirmek için numune yüzeyleri tel fırça yardımı ile temizlenmiştir. Daha sonra epoksi karışımının hazırlanması için üretici firmanın tavsiyesi üzerine A ve B bileşenleri 4/1 oranında karıştırılmıştır. Kullanılacak CFRP miktarı tartılarak gerekli epoksi miktarı belirlenmiştir. A bileşeninden CFRP ağırlığı kadar alınmıştır. B bileşeninden ise A bileşeninin 1/4 oranında kullanılarak karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi, CFRP şeritlerine ve kirişe sürülmüştür. CFRP şeritleri kirişlerde tespit edilen kesme bölgelerine yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemi tamamlanmış kiriş, 24 saat kür süresinden sonra yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney elemanına 10 kN periyotlarla yükleme işlemi yapılmıştır. Eleman üzerinde 38.47 kN yükte var olan çatlaklar genişlemeye başlamıştır. Bu andaki deplasman değeri 3.12 mm'dir ve yeni çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yük arttıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir.

Bu elemanda 62.81 kN yük değerine ulaşıldığı anda CFRP yük taşımaya başlamıştır. Oluşan ilk kesme çatlağı 82.64 kN ve 7.76 mm deplasman noktasında numunenin sol mesnedine yakın yerde oluşmuştur. 111.21 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri 12.44 mm'dir. Yükleme arttıkça yükün sabit kaldığı ve deplasmanın arttığı gözlenmiştir. Bu deney elemanı maksimum 112.85 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 14.28 mm'dir. Bu deney elemanı kısmen gevrek davranış göstererek kesme hasarından kırılmış ve çok fazla sünek bir davranış göstermemiştir. Deney elemanı ile ilgili grafikler Şekil 4.70'ta verilmiştir.



Şekil 4.67. ( PDSB66kN-C ) Nolu hasarlı kiriş numunesi



Şekil 4.68. ( SBS66kN-C ) Nolu kiriş numunenin son hali

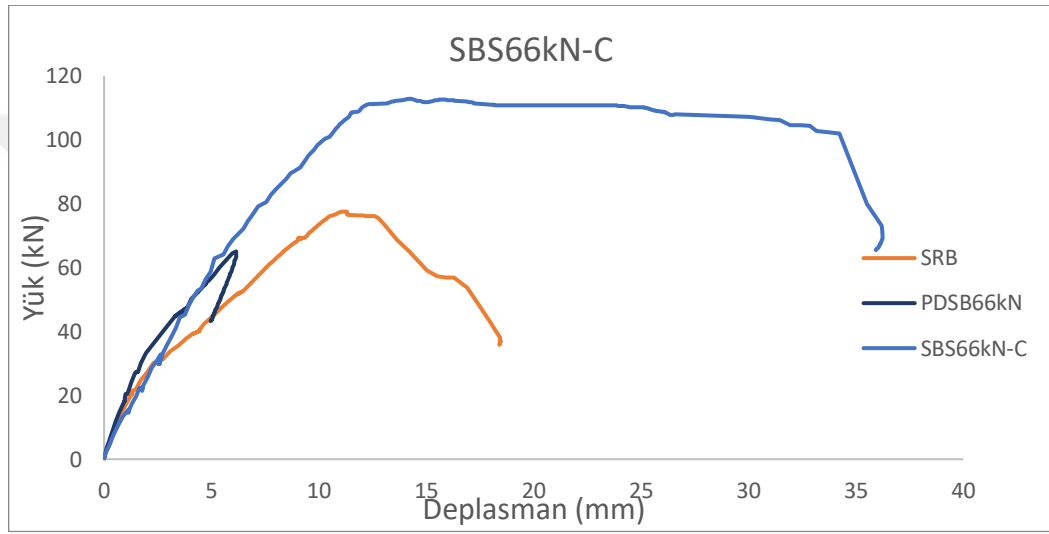
Karbon fiber ile güçlendirilen bu deney elemanı referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %46 artışı göstermektedir. Deney sonunda karbon fiber ile güçlendirilen deney numunesi bir miktar deplasman yapabilme özelliği kazanmıştır. Göçme anındaki deplasman değeri ise 34.23 mm'dir. Kirişin son hali Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da gösterilmiştir.

Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{35}{9.6} = 3.465$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 35.77 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 3.36722 kj değerlerindedir.



Şekil 4.69. Göçme anındaki ( SBS66kN-C ) nolu kiriş numune



Şekil 4.70. ( SBS66kN-C ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.9. 9 Nolu deney elemanı ( SBS66kN-M )

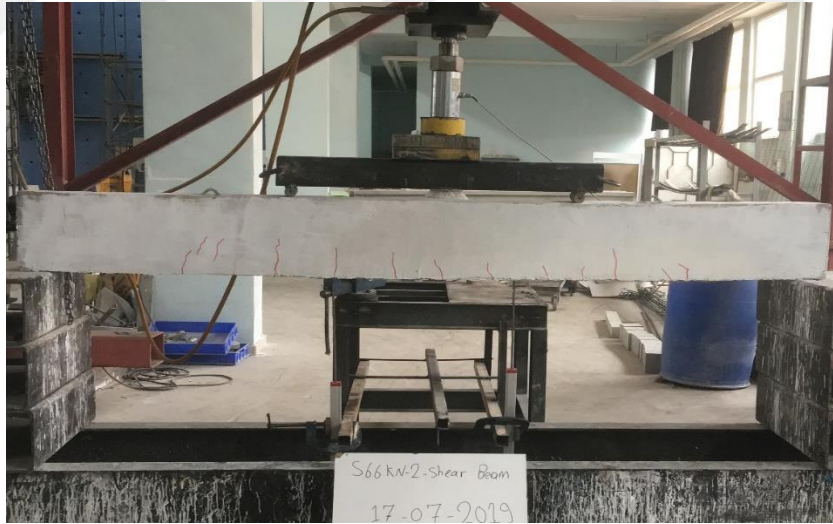
Bu deney elemanında ön hasar seviyesinin ( % 85 ) olması için 66 kN yük'e kadar yük uygulanmıştır. Yükleme 10 kN periyotlarla yapılmıştır. Eleman üzerinde 38.88 kN yük seviyesinde ilk çatlaklar orta bölgede eğilme çatlakları şeklinde oluşmaya başlamıştır. Elemanın bu andaki yaptığı deplasman değeri ise 3.06 mm'dir. Yükleme periyotları arttıkça çatlaklar artmıştır. Hedeflenen ön hasar seviyesi olan 66 kN yük 7.21 mm deplasman değerinde gerçekleştirilmiştir. Deney bu seviyede sonlandırılmıştır (Şekil 4.71).

Deney elemanına ön hasar verildikten sonra bu numunenin mekanik bağlayıcılarla güçlendirme çalışmalarına başlanmıştır. Kiriş numunesinin yüzeyleri temizlenmiş ve mekanik bağlayıcıların yerleri tespit edilmiştir. Bu numune için 16 adet mekanik bağlayıcı yapılması tasarlanmıştır. Mekanik bağlayıcıların yerleştirileceği noktalara 6



mm çapında matkapla 40mm derinliğinde delikler açılmıştır. Açılan bu delikler kompresör yardımı ile temizlenmiştir. Açılan deliklere kimyasal dübel F.1311 marka tür epoksi uygulanmıştır. Daha sonra mekanik bağlayıcıların montajı yapılmıştır. Mekanik bağlayıcıların uygulanmasından sonra kiriş numunesi, epoksinin priz süresini tamamlanması için 24 saat bekletilmiştir.

Mekanik bağlayıcılarla güçlendirilen kiriş numunesi yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. 10 kN periyotlarla yükleme deneyine başlanmıştır. Deney elemanı 40.35 kN yük ve 3.67 mm deplasman değerlerine ulaştığında eleman üzerinde var olan çatlaklar genişlemeye başlamış ve yeni eğilme çatlakları orta bölgeye oluşmaya da başlamıştır. Yükleme devam ettikçe çatlaklar artmış ve genişlemiştir. Oluşan ilk kesme çatlağı ise 76.28 kN yük ve 7.48 mm deplasman değerinde görülmüştür. Bu anda mekanik bağlayıcılar çatlağın oluşmasını engellemeye başlamıştır. 108.67 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır ve bu yükteki deplasman değeri ise 13.429 mm'dir. Yükleme arttıkça yükün sabit kaldığı ve deplasmanın arttığı gözlenmiştir. Deney elemanı maksimum 115.59 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 36.02 mm'dir.



**Şekil 4.71.** ( PDSB66kN-M ) Nolu hasarlı kiriş numunesi





Şekil 4.72. ( SBS66kN-M ) Nolu kiriş numunenin son hali

Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen bu deney elemanı referans numuneyle karşılaştırınca yük taşıma kapasitesi değeri %50 artışı göstermektedir. Güçlendirme işleminde kullanılan mekanik bağlayıcılar deney elemanına deplasman yapabilme özelliği kazandırmıştır. Göçme anındaki deplasman değeri ise 51.88 mm'dir. Kirişin son hali Şekil 4.72 ve Şekil 4.73'te gösterilmiştir.

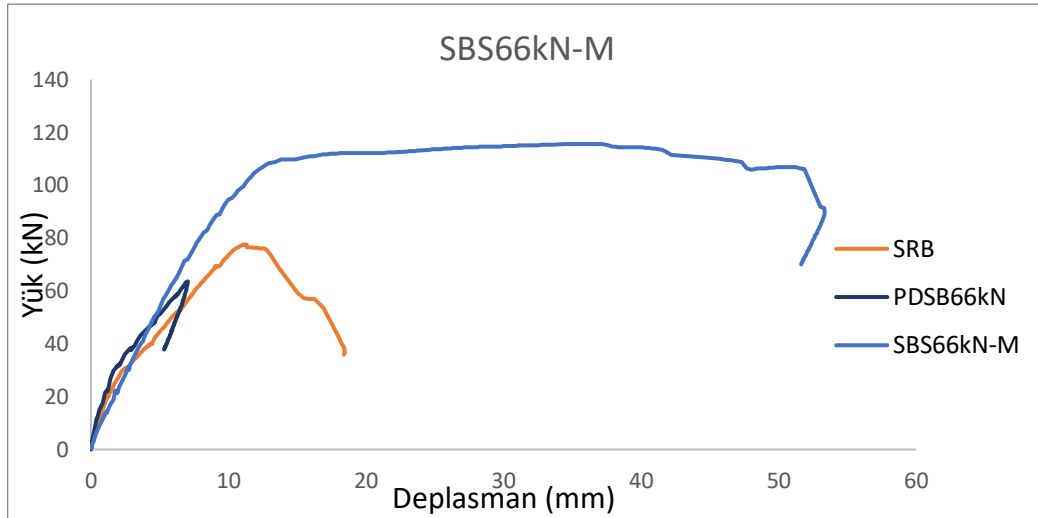
Deney elemanın sünekliği ise  $\mu = \frac{\delta u}{\delta a} = \frac{52.5}{10.8} = 4.861$  olarak tespit edilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 24.82 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 5.33234 kJ değerlerindedir.

Bu deney elemanına ait deney son yükleme sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.74'te gösterilmiştir.



Şekil 4.73. Göçme anındaki ( SBS66kN-M ) nolu kiriş numune



Şekil 4.74. ( SBS66kN-M ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

#### 4.1.2.10. 10 Nolu deney elemanı ( SBS66kN-S )

Bu deney elemanında ön hasar seviyesinin ( %85 ) oluşması için numune 66 kN yüke kadar yüklenmiştir. Deney elemanında oluşan ilk çatlak 38.96 kN yük değerinde orta bölgede eğilme çatlakları şeklinde oluşmuştur. Bu anda yer değiştirmesi ölçülen numunenin deplasmanı 3.26 mm dir. Yükleme kontrollü bir şekilde devam ederek deplasman değeri artmaya ve çatlak genişlemeye devam etmiştir. Görülen ilk kesme çatlakları 48.65 kN yük 4.97 mm deplasman değerinde kirişin sağ mesnedine yakın yerde oluşmuştur. Eleman 66 kN yüke ulaştığı anda deplasman değeri 7.62 mm'dir. İleri ön hasar seviyesindeki numune Şekil 4.75'te gösterilmiştir.

Ön hasar verilen kirişi çelik plakalarla güçlendirmek için kirişin yüzeyleri temizlenerek önceden tespit edilen noktalara 8 mm çapında delikler açılmıştır. Delikler kompresör aracıyla temizlenmiştir. Temizlenen delikler epoksi ile doldurulmuştur ve bulonlar eklenmiştir. Çelik plakalar epoksi ile monte edilmiştir. Güçlendirme işlemi tamamlanan kiriş 24 saat kür süresini bekledikten sonra yeniden yüklenmiştir. Numuneyi yüklerken yük 10 kN'luk artışlarla ilerlemiştir. Güçlendirilmiş kirişe yükleme yapılırken her 10 kN yük için deney elemanında 1 mm deplasman oluşmuştur. Yükleme sırasında 36.74 kN yük ve 4.16 mm deplasman değerlerinde var olan çatlaklar açılmaya başlamıştır ve yeni eğilme çatlakları orta bölgeye oluşmaya da başlamıştır. Yükleme devam ettikçe çatlaklar artmış ve genişlemiştir. 59.06 kN yükte ve 6.99 mm deplasman değerlerinde çelik plakalar yük taşımaya başlamıştır. Elemanda oluşan ilk kesme çatlakları 74.11 kN yük 9.01 mm deplasman değerinde kirişin sol mesnedine yakın yerde görülmüştür. Yük

artıkça çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Bu deney elemanı maksimum 112.53 kN yük taşıyarak kapasitesine ulaşmıştır. Bu andaki deplasman değeri ise 15.51 mm'dir. Bu deney elemanı referans numune sonuçları ile karşılaştırarak yük taşıma kapasitesi % 46 artışı göstermektedir. Kirişin son hali Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de gösterilmiştir.



Şekil 4.75. ( PDSB66kN-S) Nolu hasarlı kiriş numunesi



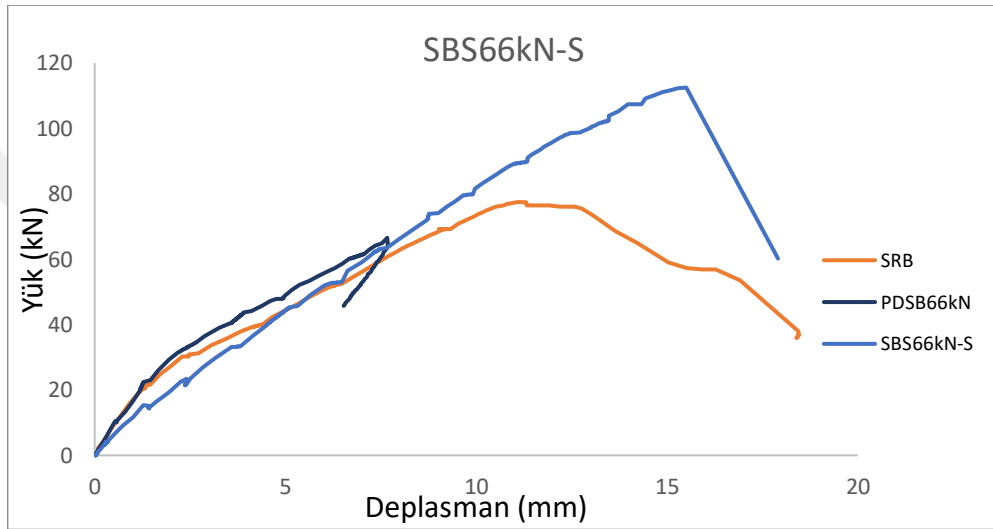
Şekil 4.76. ( SBS66kN-S ) Nolu kiriş numunenin son hali

Bu deney elemanına ait deney son yükleme sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.78'de gösterilmiştir.

Bu deney elemanının başlangıç rijitlik değeri ise 13.5 kN/mm 'dir ve enerji tüketim kapasitesi 1.18897 kj değerlerindedir.



Şekil 4.77. Göçme anındaki ( SBS66kN-S ) nolu kiriş numune



Şekil 4.78. ( SBS66kN-S ) Nolu kiriş numunenin yük-deplasman grafikleri

## 4.2. DeneY Sonuçların Karşılaştırılması

Planlanan deneY programına göre toplam 20 adet  $\frac{1}{2}$  ölçek, 125mmx250mmx2500mm boyutlarında betonarme kirişler imal edilip teste tabii tutulmuştur. Üretilen 20 kirişin 10 adedi eğilme davranışı, geri kalan 10 adedi ise kesme davranışı gösterecek şekilde donatıları detaylandırılmıştır.

### 4.2.1. Eğilme davranışı gösteren kirişler

Üretilen kirişlerin eğilme davranışı gösterebilmeleri için sargı donatıları (etriye) 10 cm ara ile seçilmiştir. Dolayısıyla bu kirişlerde hasar eğilme momenti etkisiyle görülmüştür. Eğilme kirişlerine ait deneY sonuçları Çizelge 4.3 – Çizelge 4.4 de toplu olarak verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Deneide test edilmiş eğilme kiriş numunelerinin sonuçları

Numune kodu	Maksimum yük (kN)	Maksimum deplasman (mm)	Akma yükü (kN)	Göçme anındaki yük (kN)	Göçme Mekanizması
BRB	111.14	80	110	86	Eğilme
BBS14mm-S	127.21	103.68	122.18	105.77	Eğilme
BBS14mm-M	118.04	91.68	110.82	93.41	Eğilme
BBS14mm-C	133.81	-	-	-	Kesme
BBS28mm-S	122.61	101.5	121.71	100.2	Eğilme
BBS28mm-C	142.61	-	137.79	-	Gevrek kırılma/Deney hatası
BBS28mm-M	118.55	90.87	118.55	98.44	Eğilme
BBS40mm-C	136.13	29	123.73	134	Eğilme
BBS40mm-M	106.16	50.2	106.16	91.74	Eğilme
BBS40mm-S	126.21	102.99	119.88	107.46	Eğilme

**Çizelge 4.4.** Deneide test edilmiş eğilme kirişlerinin süneklik, rijitlik ve enerji tüketim davranışları

Numune NO	Numune kodu	Süneklik oranı	Başlangıç rijitlik değeri (kN/mm)	Tüketilen enerji değeri (kJ)
1	BRB	4.43	31.12	7.27687
2	BBS14mm-S	8.92	19.3	11.82745
3	BBS14 mm-M	8.6	17.78	9.38784
4	BBS14mm-C	-	51.03	2.00757
5	BBS28mm-S	8.46	51.37	10.84823
6	BBS28mm-C	-	-	-
7	BBS28mm-M	7.71	19.35	9.21395
8	BBS40mm-C	2.75	20.47	4.87718
9	BBS40mm-M	4.1	40.47	4.65058
10	BBS40mm-S	8.07	31.72	11.64581

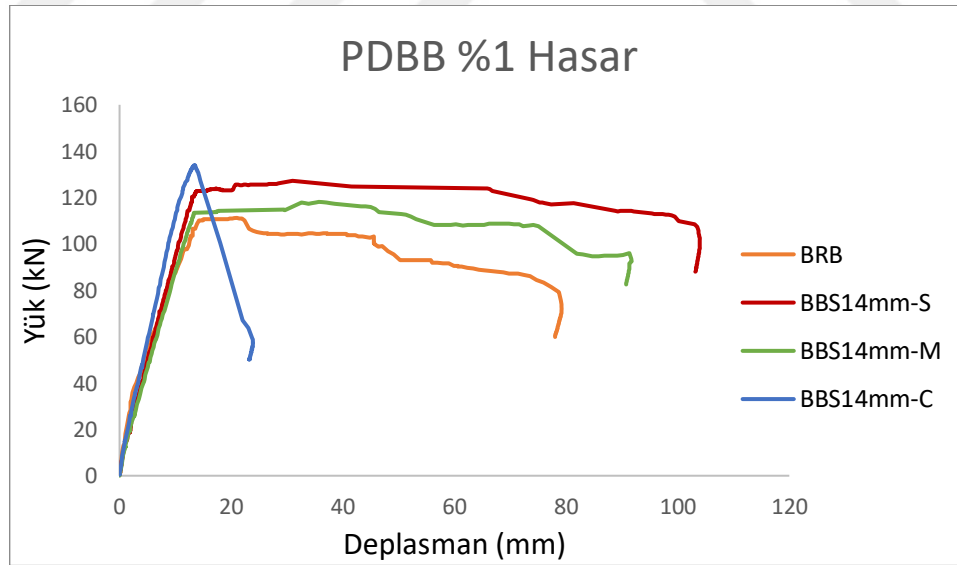


#### 4.2.1.1. Eğilme kirişlerin hasar seviyelerine göre sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde sırasıyla 14mm, 28mm ve 40mm düşey deplasman seviyelerinde hasara uğratılmış eğilme kirişlerinin sırasıyla CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılarla güçlendirilmeleri sonrası kapasitelerindeki değişim incelenmiştir. Yapılan tüm karşılaştırmalar kesme kirişlerinin hasar seviyelerine göre yapılmıştır.

##### 1) 14mm'lik deplasman(%1) hasar seviyesindeki güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

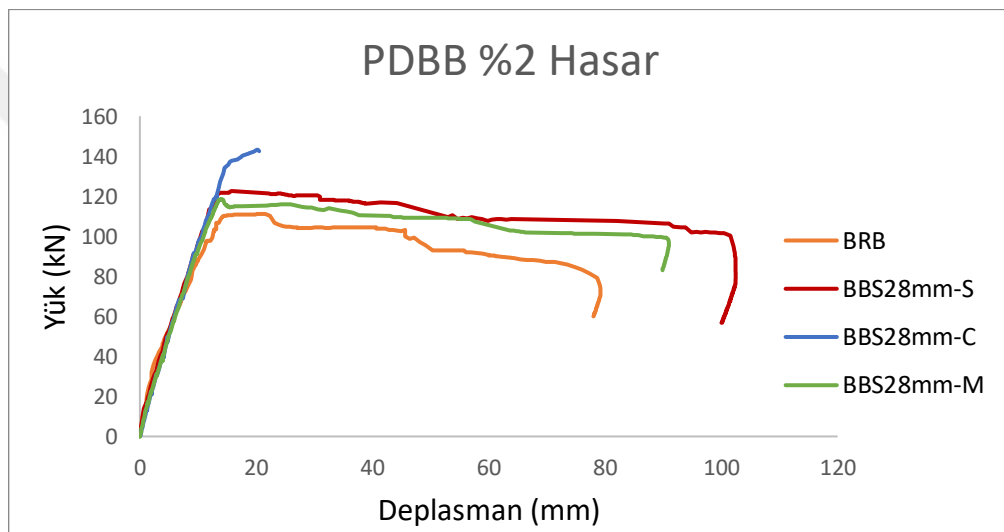
Güçlendirilen kirişlerde, referans kirişe göre enerji tüketme kapasitesi çelik plaka ile güçlendirilen kirişlerde en fazla çıkmıştır. Karbon fiber ile güçlendirilen kirişler ise kesme hasarından dolayı kırılmış ve süneklik sağlamamıştır. Maksimum yük taşıma kapasitesi ise sırasıyla karbon fiber, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar yöntemleri ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur, bu numunenin ilgili grafikleri Şekil 4.79'da gösterilmiştir.



Şekil 4.79. 14mm'lik deplasman hasar seviyesindeki güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

## 2) 28mm'lik deplasman hasar seviyesindeki güçlendirilen kirişlerin karşılaştırılması

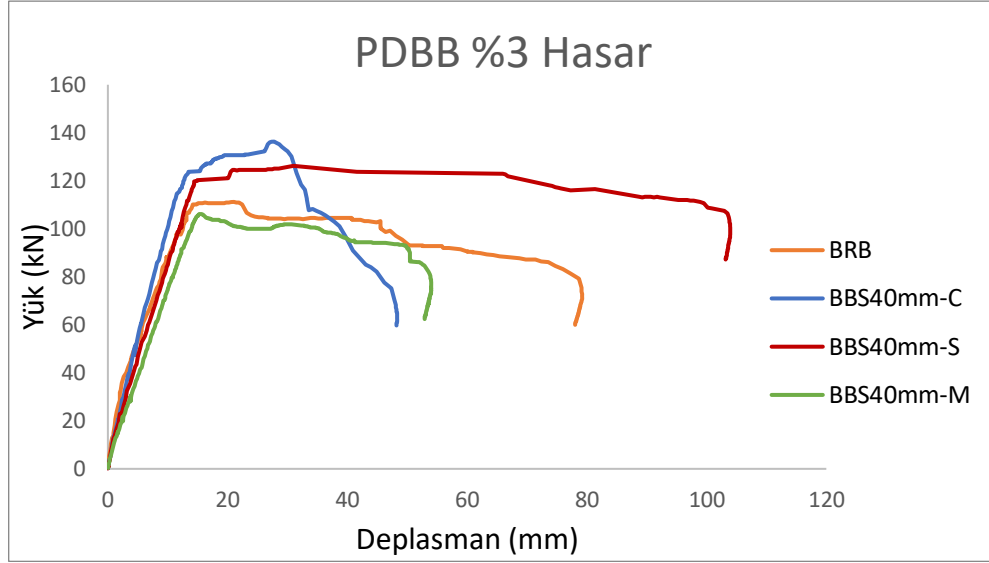
Güçlendirilen kirişlerde, referans kirişe göre enerji tüketme kapasitesi çelik plaka ile güçlendirilen kirişlerde en fazla çıkmıştır. Karbon fiber ile güçlendirilen kirişler ise kesme hasarından dolayı kırılmış ve sünek davranış göstermemiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesi ise sırasıyla karbon fiber, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar yöntemleri ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur, bu numunenin ilgili grafikleri Şekil 4.80'da gösterilmiştir.



Şekil 4.80. 28mm'lik deplasman hasar seviyesindeki güçlendirilen kirişlerin karşılaştırılması

## 3) 40mm'lik deplasman hasar seviyesindeki güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

Güçlendirilen kirişlerde, referans kirişe göre enerji tüketme kapasitesi çelik plaka ile güçlendirilen kirişlerde en fazla çıkmıştır. Karbon fiber ile güçlendirilen kirişler ise kesme hasarından dolayı kırılmış ve sünek davranış göstermemiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesi ise sırasıyla karbon fiber, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar yöntemleri ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur. , bu numunenin ilgili grafikleri Şekil 4.81'de gösterilmiştir.



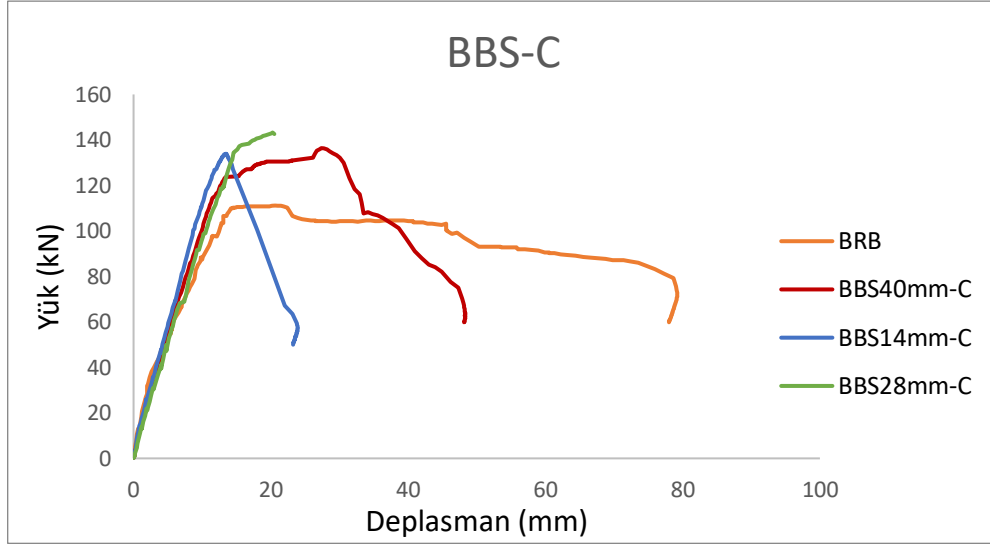
Şekil 4.81. 40mm'lik deplasman hasar seviyesindeki güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

#### 4.2.1.2. Eğilme kirişlerin güçlendirme yöntemlerine göre sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde hasara uğratılmış eğilme kirişlerinin sırasıyla CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılarla güçlendirilmeleri sonrası kapasitelerindeki değişim incelenmiştir. Yapılan tüm karşılaştırmalar kesme kirişlerinin hasar seviyelerine göre yapılmıştır.

##### 1) Karbon fiber ile güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

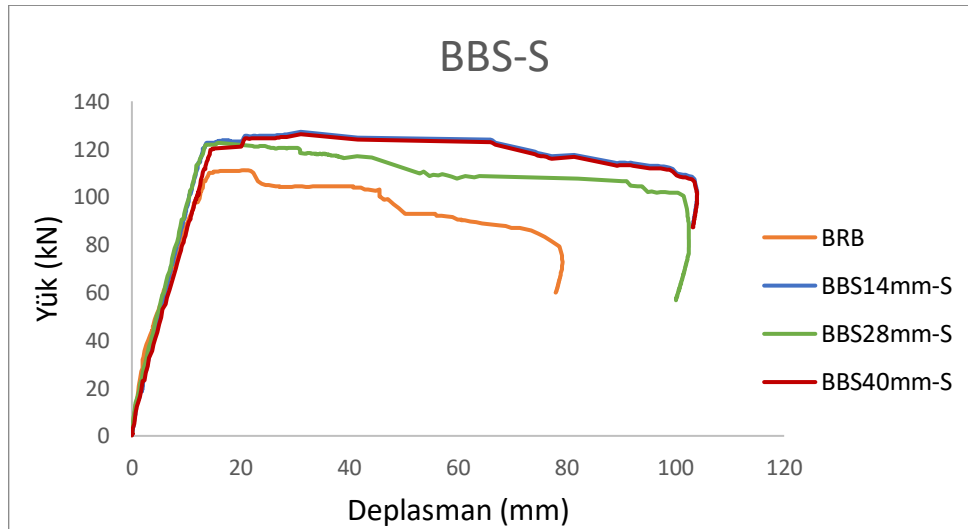
Bu bölümde eğilme davranışı gösteren kirişlerin ön hasar seviyelerine göre CFRP ile güçlendirilmiş durumları karşılaştırılmıştır. Referans kirişe göre, farklı hasar seviyeleri kirişlerde en fazla deplasman yapan kiriş 40 mm'lik hasarlı kiriş olsa da, hiç biri referans numune kadar sünek davranmamıştır. 14 mm'lik ön hasar verilen kiriş, gevrek bir davranış göstererek kesme hasarından göçmüştür. Bunun yanı sıra ön hasara uğratılan kiriş numunelerin maksimum yük taşıma kapasitesi referans numunesinden oldukça fazla olmuştur. En fazla yük taşıma kapasitesi 28 mm'lik ön hasarlı kirişte, en az yük taşıma kapasitesi artışı ise 40 mm'lik ön hasarlı kirişte görülmüştür Şekil 4.82.



Şekil 4.82. Karbon fiber yöntemi ile güçlendirilen eğilme kirişlerinin karşılaştırılması

## 2) Çelik plaka ile güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

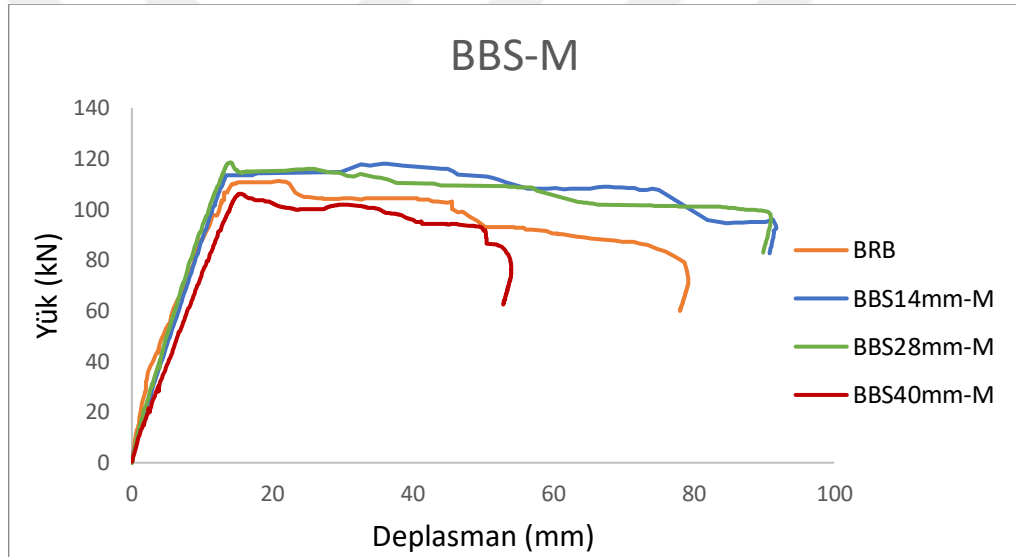
Bu bölümde eğilme davranışı gösteren kirişlerin ön hasar seviyelerine göre çelik plaka ile güçlendirilmiş durumları karşılaştırılmıştır. Ön hasar verilir sonrasında güçlendirilen kirişler referans kirişe göre maksimum yüklerinde %10-%15 lik bir artış görülmüştür. Ayrıca güçlendirilen numunelerin enerji tüketme kabiliyetleri de önemli ölçüde artmıştır. Güçlendirilen kirişlerin sünekliği de %25-%30 civarında artmış görülmüştür Şekil 4.83.



Şekil 4.83. Çelik plaka yöntem ile güçlendirilen eğilme kirişlerinin karşılaştırılması

### 3) Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen eğilme kirişlerin karşılaştırılması

Bu bölümde eğilme davranışı gösteren kirişlerin ön hasar seviyelerine göre mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilmiş durumları karşılaştırılmıştır. Ön hasar veriliş sonrasında güçlendirilen kirişler referans kirişe göre maksimum yüklerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Mekanik bağlayıcılar ile farklı ön hasar verilen betonarme kirişlerin enerji tüketebilme kapasiteleri bir miktar iyileşmiştir. Güçlendirilen kirişlerin sünekliğinde de önemli bir değişiklik görülmemektedir. Ancak eğilme hasarı olarak ileri hasar verilen (40mm) kirişin mekanik bağlayıcılar ile onarılma ve güçlendirme sonrası tekrar eski haline (referans numune davranışına yakın) gelmesi bile bu yöntemin etkili bir onarma yöntemi olduğunu göstermektedir Şekil 4.84.



Şekil 4.84. Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen eğilme kirişlerinin karşılaştırılması



#### 4.2.2. Kesme davranışı gösteren kirişler

Planlanan deney programına göre toplam 20 adet  $\frac{1}{2}$  ölçek, 125mmx250mmx2500mm boyutlarında betonarme kirişler imal edilip teste tabii tutulmuştur. Üretilen 20 kirişin 10 adedi eğilme davranışı, geri kalan 10 adedi ise kesme davranışı gösterecek şekilde donatıları detaylandırılmıştır. Kesme davranışını görebilmek için bu kirişlerin sargı donatısı (etriye)  $\Phi 5/350$  olarak belirlenmişti. Kesme davranışı gösteren kirişlerin deney sonuçları toplu olarak Çizelge (4.5 ve 4.6)'da verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Deneyde test edilmiş kesme kiriş numunelerinin sonuçları

Numune kodu	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Deplasman (mm)	Akma Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Mekanizması
SRB	77.49	11.31	-	77.49	Kesme
SBS40kN-M	90.18	12.71	-	90.18	Kesme
SBS40kN-S	100.79	14.78	-	100.79	Kesme
SBS40kN-C	108.51	15.6	-	108.51	Kesme
SBS50kN-M	112.47	26.27	109.7	108.4	Eğilme
SBS50kN-C	110.27	13.96	110.23	109.61	Eğilme
SBS50kN-S	112.45	23.89	110.47	107.65	Eğilme
SBS66kN-C	112.85	34.23	111.21	101.96	Eğilme
SBS66kN-M	115.59	51.88	108.87	106.13	Eğilme
SBS66kN-S	112.53	15.51	-	112.53	Kesme

**Çizelge 4.6.** Deneyde test edilmiş kesme kiriş numunelerinin özellikleri

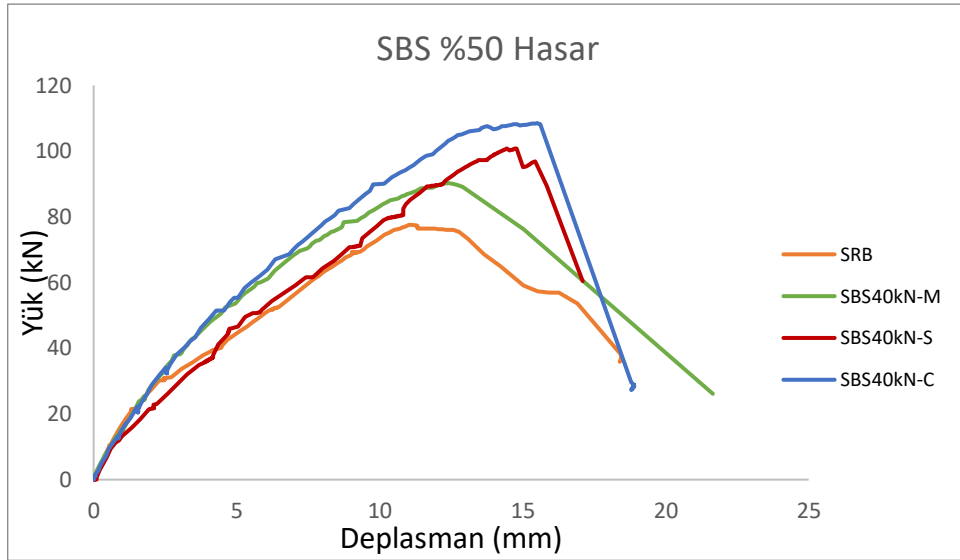
Numune NO	Numune Kodu	Süneklik Oranı	Başlangıç Rijitlik Değeri (kN/mm)	Tüketilen Enerji Değeri (kJ)
1	SRB	-	26.06	0.97601
2	SBS40kN-M	-	93.19	1.27815
3	SBS40kN-S	-	15.98	1.06448
4	SBS40kN-C	-	66.21	1.32428
5	SBS50kN-M	2.83	70.17	3.34361
6	SBS50kN-C	1.64	13.22	1.66704
7	SBS50kN-S	1.83	15.56	2.04855
8	SBS66kN-C	3.46	35.77	3.36722
9	SBS66kN-M	4.86	24.82	5.33234
10	SBS66kN-S	-	13.5	1.18897

#### 4.2.2.1. Kesme kirişlerin hasar seviyelerine göre sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde sırasıyla 40 kN, 50 kN ve 66 kN yük seviyelerinde hasara uğratılmış kesme kirişlerinin sırasıyla CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılarla güçlendirilmeleri sonrası kapasitelerindeki değişim incelenmiştir. Yapılan tüm karşılaştırmalar kesme kirişlerinin hasar seviyelerine göre yapılmıştır.

##### 1) 40 kN'luk yük (%50 hasarlı) seviyesindeki kesme kirişlerinin güçlendirilme sonrası karşılaştırılması

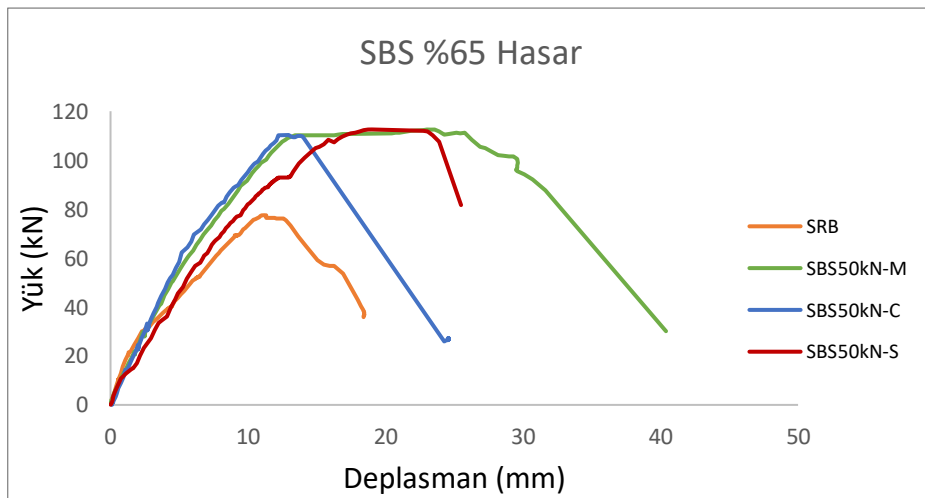
Kesme davranışı gösteren ve güçlendirilen kirişlerde, referans kirişe göre enerji tüketme kapasitesi karbon fiber ile güçlendirilen kirişlerde en fazla çıkmıştır. Bu seviye hasarındaki güçlendirilen kirişler ise kesme hasarından dolayı kırılmış ve sünek davranış göstermemişlerdir. Maksimum yük taşıma kapasitesi ise sırasıyla karbon fiber, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar yöntemleri ile güçlendirilen kirişlerde olmuştur. Şekil 4.85.



Şekil 4.85. 40kN'luk düşey yük ön hasar seviyesindeki güçlendirilen kesme kirişlerin karşılaştırılması

## 2) 50 kN'luk yük (%65 hasarlı) seviyesindeki kesme kirişlerinin güçlendirilme sonrası karşılaştırılması

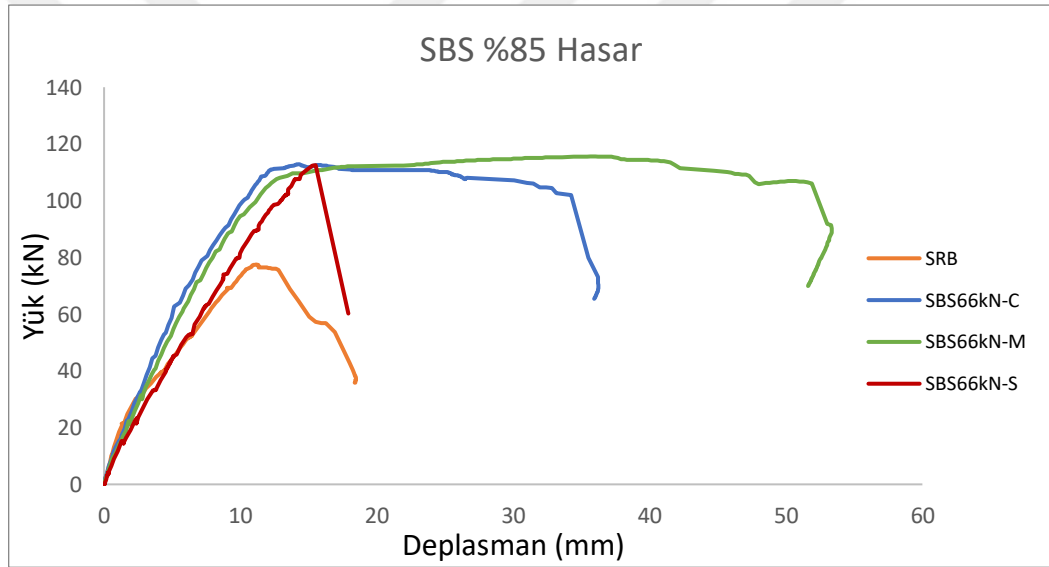
Kesme davranışı gösteren ve güçlendirilen kirişlerde, referans kirişe göre enerji tüketme kapasitesi mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen kirişlerde en fazla çıkmıştır. Bu ön hasar seviyesinde güçlendirilen kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesi ise bütün yöntemlerde tutarlı bir şekilde %47 'ye varan bir artış görülmüştür. Ayrıca güçlendirilen kirişlerin deplasman yapabilme kabiliyetlerinde de önemli miktarda artış görülmüştür. Mekanik bağlayıcılarla yapılan onarma ve güçlendirme işlemi sonrası, kesme davranışı beklenen kirişe önemli derecede süneklik kazandırması dikkat çekicidir Şekil 4.86.



Şekil 4.86. 50kN'luk düşey yük hasar seviyesindeki güçlendirilen kesme kirişlerin karşılaştırılması

### 3) 66 kN'luk yük (%85 hasarlı) seviyesindeki kesme kirişlerinin güçlendirilme sonrası karşılaştırılması

Kesme davranışı gösteren ve güçlendirilen kirişlerde, referans kirişe göre enerji tüketme kapasitesi yine mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen kirişlerde en fazla çıkmıştır. Bu ön hasar seviyesinde güçlendirilen kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesi ise bütün yöntemlerde tutarlı bir şekilde %50 'ye varan bir artış görülmüştür. Ayrıca güçlendirilen kirişlerin deplasman yapabilme kabiliyetlerinde de önemli miktarda artış görülmüştür. Mekanik bağlayıcılarla yapılan onarma ve güçlendirme işlemi sonrası, kesme davranışı beklenen kirişe önemli derecede süneklik kazandırması dikkat çekicidir. Hatta bu kiriş eğilme davranışı göstererek göçmeye ulaşmıştır Şekil 4.87 ve Şekil 4.88.



Şekil 4.87. 66kN'luk düşey yük hasar seviyesindeki güçlendirilen kesme kirişlerin karşılaştırılması



Şekil 4.88. 66kN'luk ön hasar verilen kesme kirişin mekanik bağlayıcılar ile güçlendirme sonrası eğilme davranışı göstermesi

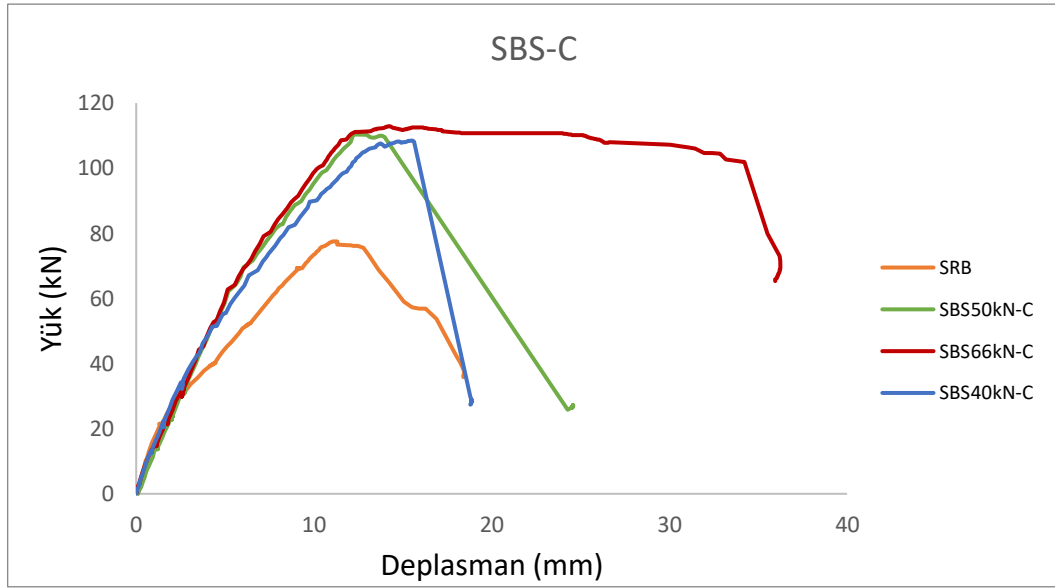
#### 4.2.2.2. Kesme kirişlerin güçlendirme yöntemlerine göre sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde kesme kirişlerinin sırasıyla CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılarla güçlendirilmeleri sonrası kapasitelerindeki değişim incelenmiştir. Yapılan tüm karşılaştırmalar kesme kirişlerinin hasar seviyelerine göre yapılmıştır.

##### 1) Karbon fiber ile güçlendirilen kesme kirişlerin karşılaştırılması

Bu bölümde kesme davranışı gösteren kirişlerin ön hasar seviyelerine göre CFRP ile güçlendirilmiş durumları karşılaştırılmıştır. Referans kirişe göre, farklı hasar seviyeleri için güçlendirilmiş kirişlerin maksimum taşıdığı yükler %50'ye yakın artmıştır Şekil 4.89.

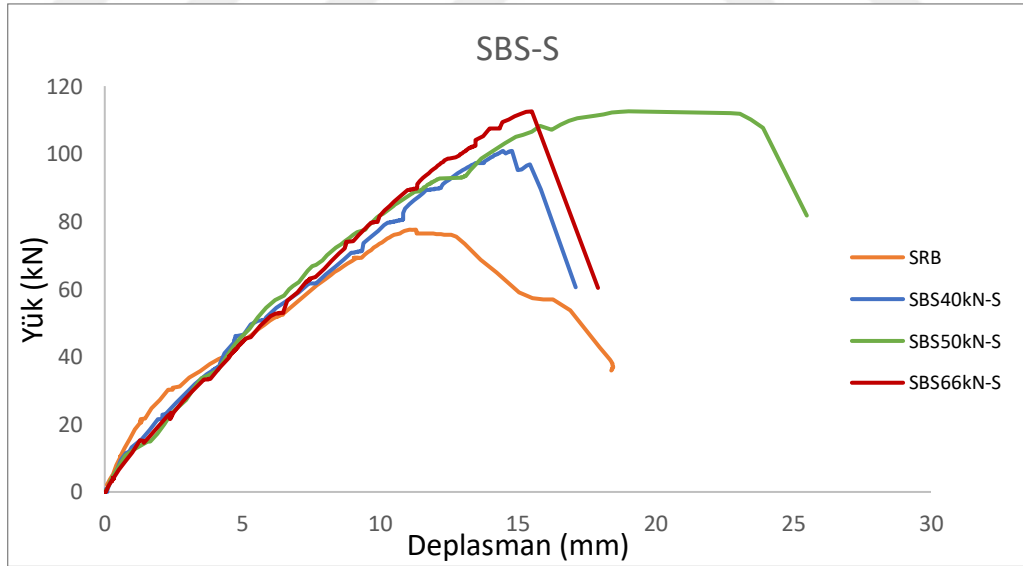




Şekil 4.89. Karbon fiber yöntemi ile güçlendirilen kesme kirişlerinin karşılaştırılması

## 2) Çelik Plakalar ile güçlendirilen kesme kirişlerin karşılaştırılması

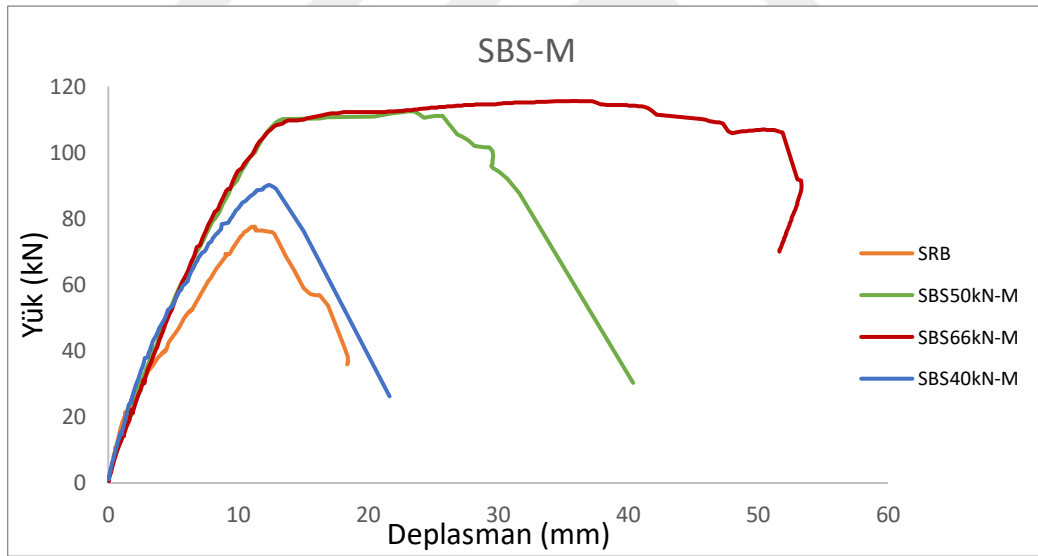
Çelik plakalar ile güçlendirilen ve farklı ön hasar verilen kirişlerin taşıdıkları maksimum yük %50'ye yakın artmıştır Şekil 4.90.



Şekil 4.90. Çelik plakalar yöntemi ile güçlendirilen kesme kirişlerinin karşılaştırılması

### 3) Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen kesme kirişlerin karşılaştırılması

Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen ve %65-%85 ön hasar verilen kirişlerin taşıdıkları maksimum yük %50'ye yakın artmıştır. Ancak %50 ön hasar verilen kirişin mekanik bağlayıcılar ile güçlendirmesi sonucu maksimum yükteki artış nispeten düşük görülmüştür. Ancak bu tarz ekonomik ve uygulaması son derece basit bir yöntemle güçlendirilen kirişlerin referans kirişe göre daha fazla yük taşıması ve daha fazla sünek olması bile dikkat çekicidir. Özellikle %85 ön hasar verilen kesme kirişinin tıpkı eğilme kirişi gibi sünek davranması bu yöntemin ne kadar etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu kirişlerin güçlendirmesinde ön hasar seviyesi arttıkça kullanılan mekanik bağlayıcı sayısı da artmaktadır. Mekanik bağlayıcıların sayısının artması ve konumunun değişmesi sonucu kesme davranışı göstermesi beklenen kirişler eğilme davranışı göstererek sünekliği önemli derecede artmıştır. Bu da kesme kirişlerinin ekonomik ve pratik bir şekilde eğilme davranışı gösterebileceğini göstermiştir. Şekil 4.91.



Şekil 4.91. Mekanik bağlayıcılar yöntemi ile güçlendirilen kesme kirişlerinin karşılaştırılması

## 5. MALİYET ANALİZİ

Bu çalışmada 3 farklı güçlendirme yöntemi, 2 farklı davranış gösteren kiriş tipi ve 3 farklı hasar seviyeleri içeren toplam 38 adet kiriş deneyi yapılmıştır. Toplamda 20 adet kiriş üretilmiş olup bunlardan 2 tanesi referans kiriş olarak değerlendirilmiştir. Geri kalan 18 kirişin 9 adedi eğilme davranışı, geri kalan 9 adedi ise kesme davranışı gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Bu 18 adet kiriş her biri kendi davranış tipine uygun farklı ön hasar verilerek ve daha sonra bu hasarlı kirişler onarım veya güçlendirilerek tekrar deneye tabii tutulmuştur.

Mevcut betonarme yapıların onarımı ve güçlendirmesi son derece zahmetli ve maliyetlidir. Günümüzde her ne kadar teknolojinin ilerlemesine paralel olarak bu yöntemlerin daha ekonomik ve pratik olması yönünde çabalar vardır. Bu çalışmanın son bölümünde ise yapılan onarım ve güçlendirme işlemlerinin maliyeti çıkarılmış olup maliyet/performans bakımından hangi yöntemin daha ekonomik, aynı zamanda daha pratik olduğu belirlenmeye çalışılacaktır.

Seçilen her bir güçlendirme yöntemi için kesme ve eğilme davranışı gösteren kirişlerin maliyeti detaylı olarak çıkarılmıştır.

### 5.1. CFRP ile Güçlendirilen Eğilme ve Kesme Kirişlerinin Maliyet Analizi

CFRP ile güçlendirilen eğilme ve kesme kirişlerinde kullanılan malzemeler tezin diğer bölümlerinde verilmiştir. Çizelge 5.1 de eğilme ve kesme kirişleri için malzeme ve işçilik maliyetleri verilmektedir.

**Çizelge 5.1** CFRP ile güçlendirilen eğilme ve kesme kirişlerinin maliyet analizi

	Eğilme Kirişleri			Kesme Kirişleri		
	Ön hasar seviyesi (Açıklık ortası deplasman)			Ön hasar seviyesi (Maksimum taşınan yük/ön yükleme)		
	14mm-MH (%1)	28mm-BH (%2)	40mm –İH (%3)	%50	%65	%85
CFRP malzeme (m <sup>2</sup> )	0,6 m <sup>2</sup>	0,6 m <sup>2</sup>	0,6 m <sup>2</sup>	0,25 m <sup>2</sup>	0,25 m <sup>2</sup>	0,25 m <sup>2</sup>
Epoksi reçine	60 TL	60 TL	60 TL	40 TL	40 TL	40 TL
İşçilik(saat)	3 saat	3 saat	3 saat	5 saat	5 saat	5 saat
Maliyet (TL)	191.1 TL	191.1 TL	191.1 TL	153.5 TL	153.5 TL	153.5 TL
Maliyet (USD) 30.09.2019 tarihli kur	33.95 USD	33.95 USD	33.95 USD	27.2 USD	27.2 USD	27.2 USD
1 adet Betonarme kiriş imalat maliyeti (TL)	155.65 TL	155.65 TL	155.65 TL	148.087 TL	148.087 TL	148.087 TL
1 adet Betonarme kiriş imalat maliyeti (USD) 30.09.2019 tarihli kur	27.59 USD	27.59 USD	27.59 USD	26.25 USD	26.25 USD	26.25 USD
Güçlendirme maliyeti/ Elemanın kendi maliyeti	%122	%122	%122	%103	%103	%103

CFRP malzeme:  $m^2$  olarak hesaplama yapıldı. CFRP malzemenin  $m^2$  maliyeti 140 TL/  $m^2$

Epoksi Reçine: toplamda 1 teneke, her bir kirişe kullanılan epoksi kadar karşılığı olan TL yazıldı.

İşçilik: Her bir güçlendirme işlemi için kiriş başına çalışılan süre. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 birim fiyatlarına göre birinci sınıf ustanın saatlik ücreti. Poz No:10.100.1068. 15.7 TL/saat, (TÇŞB, 2019).

1 Adet betonarme kirişin maliyeti: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 yılı birim fiyatlarına göre hazırlanmıştır.

Çizelge 5.1.'e göre CFRP ile eğilme kirişlerinin güçlendirme maliyeti kirişin kendi maliyetini %22 geçmektedir. Kesme kirişlerinde ise bu değer yaklaşık olarak kirişin kendi maliyetine yakındır.

## **5.2. Çelik Plakalar ile Güçlendirilen Eğilme ve Kesme Kirişlerinin Maliyet**

### **Analizi**

Çelik plakalar ile güçlendirilen eğilme ve kesme kirişlerinde kullanılan malzemeler tezin diğer bölümlerinde verilmişti. Çizelge 5.2 de eğilme ve kesme kirişleri için malzeme ve işçilik maliyetleri verilmektedir.



Çizelge 5.2 Çelik plakalar ile güçlendirilen eğilme ve kesme kirişlerinin maliyet analizi

	Eğilme Kirişleri			Kesme Kirişleri		
	Ön hasar seviyesi (Açıklık ortası deplasman)			Ön hasar seviyesi (Maksimum taşınan yük/ön yükleme)		
	14mm-MH (%1)	28mm-BH (%2)	40mm –İH (%3)	%50	%65	%85
Çelik plaka malzeme (kg)	5.65 kg	5.65 kg	5.65 kg	2.355 kg	2.355 kg	2.355 kg
Epoksi reçine	15 TL	15 TL	15 TL	22.5 TL	22.5 TL	22.5 TL
İşçilik(saat)	2 saat	2 saat	2 saat	3 saat	3 saat	3 saat
Maliyet (TL)	111.036 TL	111.036 TL	111.036 TL	96.54 TL	96.54 TL	96.54 TL
Maliyet (USD) 30.09.2019 tarihli kur	19.68 USD	19.68 USD	19.68 USD	17.11 USD	17.11 USD	17.11 USD
1 adet Betonarme kiriş imalat maliyeti (TL)	155.65 TL	155.65 TL	155.65 TL	148.087 TL	148.087 TL	148.087 TL
1 adet Betonarme kiriş imalat maliyeti (USD) 30.09.2019 tarihli kur	27.59 USD	27.59 USD	27.59 USD	26.25 USD	26.25 USD	26.25 USD
Güçlendirme maliyeti/ Elemanın kendi maliyeti	%71	%71	%71	%65	%65	%65

Çelik plaka malzeme: kg olarak hesaplama yapıldı. Çelik plaka malzemenin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 birim fiyatlarına göre kg maliyeti 11.44 TL/ kg

Epoksi: Eğilme kirişleri için 1 kirişe 1 tüp kullanıldı. Kesme kirişleri için 1 kirişe 1.5 tüp kullanıldı. 1 tüp epoksinin maliyeti 15 TL dir.

İşçilik: Her bir güçlendirme işlemi için kiriş başına çalışılan süre. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 birim fiyatlarına göre birinci sınıf ustanın saatlik ücreti. Poz No:10.100.1068. 15.7 TL/saat

1 Adet betonarme kirişin maliyeti: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 yılı birim fiyatlarına göre hazırlanmıştır.

Çizelge 5.2.'ye göre çelik plakalar ile eğilme ve kesme kirişlerinin güçlendirme maliyetleri kirişin kendi maliyetinden %30-35 civarında düşük çıkmaktadır.

### **5.3. Mekanik Bağlayıcılar ile Güçlendirilen Eğilme ve Kesme Kirişlerinin Maliyet Analizi**

Mekanik Bağlayıcılar ile güçlendirilen eğilme ve kesme kirişlerinde kullanılan malzemeler tezin diğer bölümlerinde verilmişti. Çizelge 5.3 de eğilme ve kesme kirişleri için malzeme ve işçilik maliyetleri verilmektedir.

**Çizelge 5.3** Mekanik bağlayıcılar ile güçlendirilen eğilme ve kesme kirişlerinin maliyet analizi

	Eğilme Kirişleri			Kesme Kirişleri		
	Ön hasar seviyesi (Açıklık ortası deplasman)			Ön hasar seviyesi (Maksimum taşınan yük/ön yükleme)		
	14mm-MH (%1)	28mm-BH (%2)	40mm –İH (%3)	%50	%65	%85
Mekanik bağlayıcı malzeme (kg)	0.37 kg	0.776 kg	1.0164 kg	0.468 kg	0.702 kg	0.936 kg
Epoksi reçine	15 TL	22.5 TL	30 TL	15 TL	22.5 TL	30 TL
İşçilik(saat)	1 saat	1.5 saat	2 saat	1 saat	1.5 saat	2 saat
Maliyet (TL)	32.2 TL	49.17 TL	65.5 TL	32.58 TL	48.88 TL	65.17 TL
Maliyet (USD) 30.09.2019 tarihli kur	5.7 USD	8.71 USD	11.61 USD	5.77 USD	8.66 USD	11.55 USD
1 adet Betonarme kiriş imalat maliyeti (TL)	155.65 TL	155.65 TL	155.65 TL	148.087 TL	148.087 TL	148.087 TL
1 adet Betonarme kiriş imalat maliyeti (USD) 30.09.2019 tarihli kur	27.59 USD	27.59 USD	27.59 USD	26.25 USD	26.25 USD	26.25 USD
Güçlendirme maliyeti/ Elemanın kendi maliyeti	%20	%31.5	%42	%22	%33	%44

Mekanik bağlayıcı malzeme: kg olarak hesaplama yapıldı. Çelik plaka malzemenin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 birim fiyatlarına göre kg maliyeti 4.029 TL/ kg

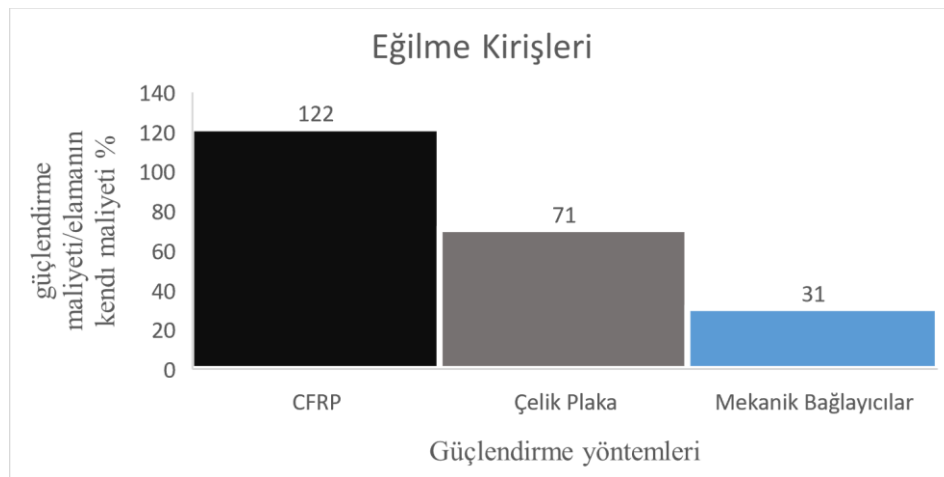
Epoksi: Eğilme kirişleri için ön hasar durumuna göre 1 kirişe 1-2 tüp arası epoksi kullanıldı. Kesme kirişleri için ön hasar durumuna göre 1 kirişe 1-2 tüp arası epoksi kullanıldı.

İşçilik: Her bir güçlendirme işlemi için kiriş başına çalışılan süre. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 birim fiyatlarına göre birinci sınıf ustanın saatlik ücreti. Poz No:10.100.1068. 15.7 TL/saat

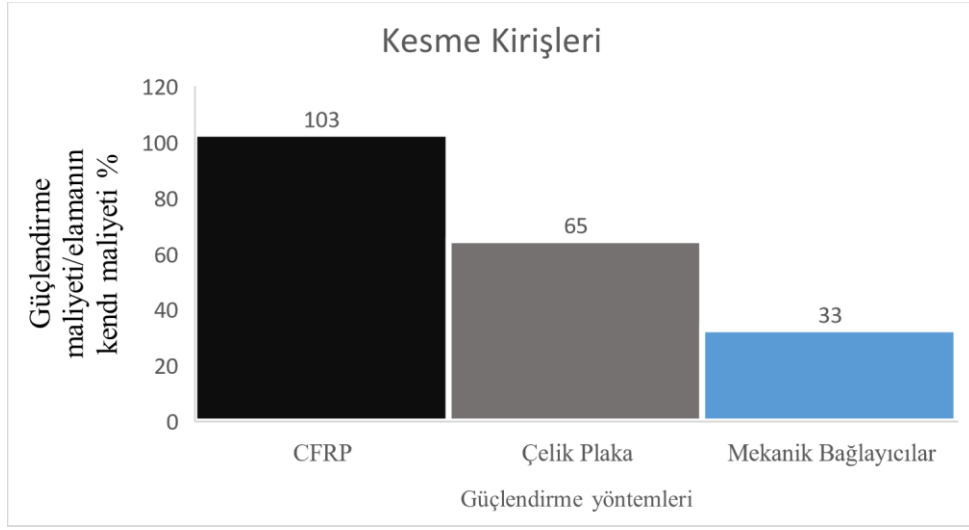
1 Adet betonarme kirişin maliyeti: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 yılı birim fiyatlarına göre hazırlanmıştır.

Çizelge 5.3, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'ye göre mekanik bağlayıcılar ile eğilme ve kesme kirişlerinin güçlendirme maliyetleri kirişin kendi maliyetinden %55-80 civarında düşük çıkmaktadır.

Deney elemanlarına yapılan onarım ve güçlendirme maliyetlerine göre şüphesiz en ekonomik yöntem mekanik bağlayıcılar görülmektedir. Eğilme ve kesme kirişlerinin taşıma güçleri, süneklik, rijitlik gibi faktörleri beraber değerlendirildiğinde ise en fazla dayanım katkısı olan CFRP malzeme ile yapılan güçlendirme yöntemi ön plana çıkmaktadır. Maliyet/performans beraber değerlendirildiğinde ise iyi bir tasarımla mekanik bağlayıcılar ile hem onarım görevini yerine getirmekte (mevcut hasarlı kirişleri eski orijinal dayanımlarına getirmekte) hem de mevcut elemanlara özellikle kesme davranışı gösterebilecek elemanlara önemli ölçüde süneklik katmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada mekanik bağlayıcıların etkin performansı öne çıkmaktadır.



Şekil 5.1. Eğilme kirişlerin maliyet karşılaştırma grafiği



**Şekil 5.2.** Kesme kirişlerin maliyet karşılaştırma grafiği

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek Lisans Tez çalışması kapsamında farklı davranış gösteren betonarme kirişlere farklı ön hasarlar verilmek suretiyle ve bu kirişlerin farklı onarım-güçlendirme yöntemleri uygulanarak bu yöntemlerin hem performans hem de maliyet açısından değerlendirilmelerinin deneysel olarak yapıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Özellikle %85 hasar seviyesindeki kesme kirişlerinin mekanik bağlayıcılar kullanılarak onarım/güçlendirilmesi sonucu kapasitedeki %50 artış ve kiriş davranışının tipik eğilme kiriş davranışına dönüşmüş olması bu yöntemin ciddi oranda etkisini göstermektedir.
2. Kesme kirişlerinin çelik plakalar ile onarım/güçlendirilmesinde referans numuneye göre kapasitede %50'ye yakın artış sağlanmıştır.
3. Ön hasarlı eğilme kirişlerinin onarım/güçlendirilmesinde deney sonundaki tüketilen enerji miktarları bakımından çelik plakaların CFRP ve mekanik bağlayıcılara göre daha yüksek sonuç vermesi daha sünek davranış sergilediğini göstermektedir.
4. Süneklik bakımından değerlendirildiğinde ön hasarlı eğilme kirişleri sırasıyla  $S > M > C$  ilişkisine sahiptir.
5. Başlangıç rijitlikleri bakımından ise eğilme kirişleri karşılaştırıldığında  $C > M > S$  ilişkisi görülmektedir.
6. Ön hasarlı eğilme kirişlerinin maksimum yük taşıma kapasiteleri bakımından  $C > S > M$  ilişkisi mevcuttur.
7. Ön hasarlı kesme kirişlerinin maksimum yük taşıma kapasiteleri bakımından genel olarak birbirlerine yakın olmakla beraber  $M > C > S$  ilişkisi olduğu görülmektedir.
8. Ön hasarlı kesme kirişlerinin onarım/güçlendirilmesi neticesinde özellikle mekanik bağlayıcıların sünek davranışları deney sonunda diğer yöntemlere göre oldukça fazla enerji tükettiğini göstermektedir.
9. Başlangıç rijitlikleri bakımından ön hasarlı kesme kirişlerinin onarım/güçlendirmesine yönelik karşılaştırma yapılırsa mekanik bağlayıcılar ve CFRP yaklaşık benzer performansı gösterirken çelik plaka yöntemi çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır.



**10.** Ön hasarlı kesme kirişlerini süneklikleri bakımından değerlendirdiğimizde sünek

kiriş davranışında literatürde 4-5 aralığında olan kirişlerin sünek olduğu belirtildiğinden mekanik bağlayıcıların 4.86 süneklik katsayısı ile tipik eğilme kiriş davranışı gösterdiği söylenebilir.

**11.** Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde kesme ve eğilme ön hasarlı deneylerin

onarım/güçlendirilmesine yönelik en ekonomik yöntemin mekanik bağlayıcılar olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak yapılan çalışmada kullanılan üç farklı onarım/güçlendirme yönteminden biri olan mekanik bağlayıcıların ön plana çıktığı söylenebilir. Pratik, ekonomik ve kolay uygulanabilir olması ileriki çalışmalara ışık tutacağını düşündürmektedir. Gelecekte özellikle mekanik bağlayıcıların kiriş üzerindeki optimum yerleşimine yönelik çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Acar, D., 2014, Çelik Levha Ve Karbon Kumaşlarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Davranış Ve Dayanımı Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* 108
- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y., Gemi, L. ve Arslan, M. H., 2019, İnceltmiş Uçlu Betonarme Prefabrik Aşıkların Kesme Kapasitelerinin CFRP uygulaması ile Artırılması, *International Science and Academic Congress (INSAC'19)*, Konya, 285-291.
- Alam, M. A., Al Riyami, K. J. C. ve Materials, B., 2018, Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates, 162, 683-696.
- Altın, S., Özgür, A. ve Gökten, Y., 2004, Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Bir Kelepçe Uygulaması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19 (4).
- Arslan, M. H. ve Seckinli, M., 2019, Comparison of design and application criteria for various methods used in reinforced concrete beam strengthening, *Global Journal of Arts Education*, 9 (1), 035-042.
- Aykaç, B. ve Acar, D., 2014, Betonarme Kirişlerin Diştan Yapıştırılmış Karbon Kumaş Ve Çelik Levhalardan Oluşan Kompozit Malzemeye Güçlendirilmesi, *J Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, 29 (1).
- Aykaç, S. ve Özbek, E., 2011, T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalar ile Güçlendirilmesi, *Teknik Dergi*, 22 (106), 5319-5334.
- Aykaç, S. ve Yılmaz, M., 2011, Düzenli Üçgen Veya Dairesel Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış Ve Dayanımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26 (3).
- Balık, F. S., 2012, Betonarme dolgu duvarla güçlendirilmiş deprem davranışı yetersiz betonarme çerçevelerin davranışına pencere boşluklarının etkisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Boumaaza, M., Bezazi, A., Bouchelaghem, H., Benzennache, N., Amziane, S. ve Scarpa, F., 2017, Behavior of pre-cracked deep beams with composite materials repairs.
- Çetinkaya, N., Kaplan, H. ve Şenel, Ş. M., 2011, Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer (Frp) Malzemeler Kullanılarak Onarım Ve Güçlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (3), 291-298.
- Civata, Y., 2019, Anonim, <https://www.yetgincivata.com/>:
- Deb, S., 2012, Causes Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures.
- Demirci, E., 2011, Çelik korniyer ve lamalar yapıştırmak suretiyle betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 4 (2), 103-112.
- Doğangün, A., 2008, Betonarme yapıların hesap ve tasarımı: DBYBHY-2007 TS500-2000 ve Deprem yönetmeliği-2007'ye uygun, Birsen yayınevi, p.
- Erkan, İ. H., Aksoylu, C., Alshlash, S. ve Arslan, M. H., 2019a, Eğilme Etkisi Altındaki Betonarme Kirişlerin Hasar Seviyelerine Yönelik Deneysel Çalışma, *International Conference on Multidisciplinary Sciences (icomus)*, İstanbul, 118-128.
- Erkan, İ. H., Aksoylu, C., Alshlash, S. ve Arslan, M. H., 2019b, Kesme Önlemi Alınmamış Betonarme Kirişlerin Hasar Seviyelerine Uygun Etkin Onarım Yöntemlerinin Deneysel Olarak Araştırılması. , *International Conference on Multidisciplinary Sciences (icomus)*, İstanbul, 129-137.

- Gemi, L., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O. ve Arslan, M. H. J. C. S., 2019, Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite, 111399.
- Gribniak, V., Tamulenas, V., Ng, P.-L., Arnautov, A. K., Gudonis, E. ve Misiunaite, I. J. M., 2017, Mechanical behavior of steel fiber-reinforced concrete beams bonded with external carbon fiber sheets, 10 (6), 666.
- Gürbüz, T., 2007, Yapıların güçlendirilmesinde kullanılan kimyasal ankrajların eksenel çekme etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Hawileh, R., Nawaz, W. ve Abdalla, J., 2018, Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with Hardwire Steel-Fiber sheets, *Construction and Building Materials*, 172, 562-573.
- Kaya, Y., 2007, Yapıların güçlendirilmesi uygulamalarında kullanılacak kısmi bağlı ankraj detayı ve yüzey temizliği koşulları altında ankrajların eksenel çekme davranışlarının incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kim, Y., Quinn, K., Satrom, N., Garcia, J., Sun, W., Ghannoum, W. M. ve Jirsa, J. O., 2012, Shear strengthening of reinforced and prestressed concrete beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets and anchors.
- Kompozit, N., 2019, anonim, istanbul, <https://www.kompozit.net>:
- Metsan, G., 2019, anonim, <http://www.metsan.gen.tr/tr/product/chemical-anchors/item/EMS-DUBELL-F1311-Chemical-Anchor/>:
- Özcan, Z. ve Yöntem, K., 2005, Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemeler ile Güçlendirilmesi, *Deprem Sempozyumu, Kocaeli*.
- Şen, D., 2019, anonim, [http://www.sendemir.com.tr/?gclid=Cj0KCQjw3JXtBRC8ARIsAEBHg4nuwpYJOGe22EZ600whGdgdTzhPp6vwGA6b-IMRka0U6PZTJkpZWAQaAmIMEALw\\_wcB](http://www.sendemir.com.tr/?gclid=Cj0KCQjw3JXtBRC8ARIsAEBHg4nuwpYJOGe22EZ600whGdgdTzhPp6vwGA6b-IMRka0U6PZTJkpZWAQaAmIMEALw_wcB):
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Resmi Gazete,
- Sayı: 30364 (Mükerrer), 18 Mart, Ankara.
- TÇŞB, 2019, 2019 yılı birim fiyatları. Bakanlığının, Ç. v. Ş. Ankara: 752.
- Topçu, İ. B. ve Gürer, C., 2005, Hasarlı Betonarme Kirişlerin Epoksi İle Onarılması, *Deprem Sempozyumu*, 982-988.
- TS500, 2000, TÜRK STANDARDI Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Ankara.
- TSEN-1504-3, 2006, Beton yapıların korunması ve tamiri için mamuller ve sistemler - Tarifler, gerekler, kalite kontrol ve uygunluk değerlendirmesi - Bölüm 3: Yapısal olan ve yapısal olmayan tamir. Beton yapıların korunması ve tamiri için mamuller ve sistemler - Tarifler, gerekler, kalite kontrol ve uygunluk değerlendirmesi - Bölüm 3: Yapısal olan ve yapısal olmayan tamir. Ankara: 27.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Salah ALSHLASH  
**Uyruğu** : Suriye  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Hasaka 02.01.1993  
**Telefon** : 0 505 076 3348  
**E-Posta** : [saleh.alshlash6@gmail.com](mailto:saleh.alshlash6@gmail.com)

### EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: <b>Abi Tammam</b>	<b>Kudat</b>	<b>Hasaka</b>	<b>2010</b>
Üniversite	: <b>Al-Furat</b>		<b>Rakka</b>	<b>2015</b>
Yüksek Lisans	: <b>Konya Teknik Üniv.</b>		<b>Konya</b>	<b>2019</b>
Doktora	:			

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015	ALHAİTHAM	Mühendis

### BECERELER

-MS Office ( Excel. Word. Excess. Power point ...)  
 -AutoCAD

### YABANCI DİLLER

\*Arapça  
 \*İngilizce

### YAYINLAR

- 1) İbrahim Hakkı ERKAN, Ceyhun AKSOYLU , **Salah ALSHLASH**, Musa Hakan ARSLAN, “ KESME ÖNLEMİ ALINMAMIŞ BETONARME KİRİŞLERİN HASAR SEVİYELERİNE UYGUN ETKİN ONARIM YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI” International Conference on Multidisciplinary Sciences (icomus) 22-24 August 2019 • Titanic Business Kartal Hotel • İstanbul/Turkey
- 2) İbrahim Hakkı ERKAN, Ceyhun AKSOYLU , **Salah ALSHLASH**, Musa Hakan ARSLAN, “EĞİLME ETKİSİ ALTINDAKİ BETONARME KİRİŞLERİN HASAR SEVİYELERİNE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMA” International Conference on Multidisciplinary Sciences (icomus) 22-24 August 2019 • Titanic Business Kartal Hotel • İstanbul/Turkey

- 3) İbrahim Hakkı ERKAN, Ceyhun AKSOYLU, **Salah ALSHLASH**, Musa Hakan ARSLAN, "REPAIR / STRENGTHENING OF PRE-DAMED SHEAR BEAMS WITH STEEL PLATES" The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference in Seydişehir/TURKEY (IATENS'19), October 4 -6 2019
- 4) **Salah ALSHLASH**, Ceyhun AKSOYLU, İbrahim Hakkı ERKAN, Musa Hakan ARSLAN, "STRENGTHENING OF PRE-DAMED BENDING BEAMS WITH STEEL PLATES", The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference in Seydişehir/TURKEY (IATENS'19), October 4 -6 2019

