

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HASARLI BETONARME KİRİŞLERİN DIŞ DONATILAR İLE  
GÜÇLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Batuhan YÜKSEL**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Yapı Anabilim Dalı**

**MANİSA 2014**

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HASARLI BETONARME KİRİŞLERİN DIŞ DONATILAR İLE  
GÜÇLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Batuhan YÜKSEL**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Temmuz 2014**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Temmuz 2014**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Ali DEMİR (CBÜ)**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Muhittin BAĞCI(CBÜ)**  
**Yrd. Doç. Dr. Gözde SARI**

**MANİSA 2014**

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER.....	i
SEMBOL LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
TEŞEKKÜR.....	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Genel.....	3
2.2. Geçmişteki Çalışmalar.....	3
2.2.1. Çelik Levha Ekleme Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi.....	4
2.2.2. Mantolama Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi.....	16
2.2.3. FRP (Fiber Reinforced Polymer) Elemanların İlavesi Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi.....	26
2.2.4. Kelepçe Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi.....	44
2.3. Betonarme Elemanların Kesme Davranışları.....	50
3. KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ.....	53
3.1. Amaç ve Kapsam.....	53

3.2. Elek Analizi (TS 3530 EN 933-1).....	53
3.3. Su.....	54
3.4. Çimento.....	55
3.5. Kimyasal Katkılar.....	55
3.6. Beton Basınç Deneyi.....	56
3.7. Beton Çekme Deneyi.....	57
3.8. Donatı Çekme Deneyi.....	57
3.9. Epoksi.....	58
3.10. CFRP.....	59
4. KİRİŞ ELEMANLARIN ÜRETİLMESİ.....	60
4.1. Amaç ve Kapsam.....	60
4.2. Kesitlerin Kesme Dayanım Hesabı.....	60
4.3. Kiriş Deney Elemanları.....	62
5. KİRİŞ DENEY ELEMANLARINA HASAR VERİLMESİ.....	65
6. KİRİŞ DENEY ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ.....	67
6.1. Genel.....	67
6.2. GK1 Kirişinin Güçlendirilmesi.....	67
6.3. GK2 Kirişinin Güçlendirilmesi.....	69
6.4. GK3 Kirişinin Güçlendirilmesi.....	72
7. KİRİŞ DENEYLERİNİN YAPILMASI.....	74
7.1. Deney Düzeneginin Hazırlanması.....	74
7.2. Yükleme Sistemi.....	74
7.3. Ölçüm Düzeni.....	76
8. DENEY SONUÇLARI.....	79

8.1. Genel.....	79
8.2. Deney Elemanı Referans Kiriş.....	79
8.3. Deney Elemanı GK1 Kiriş.....	81
8.4. Deney Elemanı GK2 Kiriş.....	84
8.5. Deney Elemanı GK3 Kiriş.....	86
9. DEĞERLENDİRMELER.....	88
9.1. Genel.....	88
9.2. Taşıma Gücü.....	88
9.3. Rijitlik.....	89
9.4. Süneklik.....	90
9.5. Enerji Tüketim Kapasitesi.....	90
9.6. Maliyet.....	91
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	92
10.1. Sonuçlar.....	92
10.2. Öneriler.....	93
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	96

## SEMBOL LİSTESİ

Semboller	Açıklamalar
a	Kirişe gelen yükün mesnete olan uzaklığı
d	Faydalı yükseklik(mm)
E	Elastisite modülü
fcd	Beton tasarım basınç dayanımı ( $N/mm^2$ )
fck	Beton karakteristik silindir basınç dayanımı ( $N/mm^2$ )
F	Kuvvet
Fsu	Donatı çekme dayanımı ( $N/mm^2$ )
fyd	Yapı çeliği hesap dayanımı ( $N/mm^2$ )
fy	Akma dayanımı ( $N/mm^2$ )
fu	Kopma dayanımı ( $N/mm^2$ )
kN	Kilo Newton
kNm	Kilo newton metre
kNmm	Kilo newton milimetre
L	Çubuk boyu (mm)
M	Bulon çapı
MPa	Mega Paskal
nf	Lifli Polimer sargı tabaka sayısını
P	Açıklıktaki yük (N)
Pu	Kopma yükü (kN)
Py	Akma yükü (kN)
sf	Lifli polimerler arasındaki uzaklık (mm)
t	Kalınlık (mm)
tf	Lifli polimer etkili kalınlığı
Vc	Kesme kuvvetine betonun katkısı (kN)
Vcr	Kesitin kesmede çatlama dayanımı (kN)
Vf	CFRP şeritler tarafından taşınan kesme kuvveti (kN)
Vr	Kesitin kesme dayanımı (kN)
Vs	Keleççeler tarafından taşınan kesme kuvveti (kN)
Vw	Etriye donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti (kN)
Wf	Lifli polimer şerit genişliği
δ	Deplasman (mm)

$\delta_u$	Göçmede deplasman (mm)
$\delta_y$	Akmada deplasman (mm)
$\mu$	Süneklik
$\rho$	Kirişte çekme donatısı oranı
$\rho_b$	Kirişte dengeli donatı oranı
$\epsilon_f$	Lifli polimer etkin birim uzama sınırı
$\epsilon_{fu}$	Lifli polimer kopma birim uzaması

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (levha başı tutulmamış güçlendirilmiş kirişler).....	5
Şekil 2.2. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (levha başı tutulmuş güçlendirilmiş kirişler).....	5
Şekil 2.3. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (levha başı tutulmuş kalın levha ile güçlendirilmiş kirişler).....	6
Şekil 2.4. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (onarılmış hasarlı kirişler).....	6
Şekil 2.5. Uysal'ın çalışmasının sonuç grafikleri ( 3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük deplasman grafiği.....	9
Şekil 2.6. Uysal'ın çalışmasının sonuç grafikleri ( 6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük deplasman grafiği.....	10
Şekil 2.7. Tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri.....	12
Şekil 2.8. Yeni donatı kafesi teşkili ve Z demiri uygulama detayı.....	24
Şekil 2.9. Deney numunelerinin donatı yerleşim detayı.....	27
Şekil 2.10. Deney numunesi üzerine FRP şeritlerin yapıştırılması planı.....	27
Şekil 2.11. Güçlendirmede kullanılan FRP liflerin kesit planı.....	28
Şekil 2.12. FRP ankraj çivilerinin kesit planı.....	28
Şekil 2.13. 45°'lik açıyla uygulanan CFRP'li kiriş.....	31
Şekil 2.14. 90°'lik açıyla uygulanan CFRP'li kiriş.....	32
Şekil 2.15. Kirişlere CFRP ve GFRP yapıştırma şekli.....	36
Şekil 2.16. Tanık kirişin yük-yer değiştirme grafiği.....	37
Şekil 2.17. CFRP kirişin yük- yer değiştirme grafiği.....	38
Şekil 2.18. GFRP kirişin yük- yer değiştirme grafiği.....	38



Şekil 2.19. Yalın kiriş testi (A1).....	40
Şekil 2.20. Yalın kiriş testi (A2).....	40
Şekil 2.21. Onarılp FRP plaka ile güçlendirilmiş kiriş (A1) ile aynı yöntemle (sargısız) doğrudan güçlendirilen yalın kirişin (A3) yük deplasman grafiği.....	41
Şekil 2.22. Yalın kiriş ve FRP plaka ile O/G yapılmış kiriş test sonuçlarının karşılaştırılması.....	41
Şekil 2.23. Doğrudan güçlendirilen yalın kiriş A4 ile O/G yapılmış A2 kirişinin yük deplasman grafiği.....	42
Şekil 2.24 Yalın kiriş ile FRP plaka ve FRP dokuma ile O/G yapılmış kiriş test sonuçları.....	42
Şekil 2.25. O/G yapılmış A1 ve A2 kirişlerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 2.26. Doğrudan güçlendirme yapılmış A3 ve A4 numunelerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 2.27. Kelepçe detayı ve yerleşim şeması.....	45-46
Şekil 2.28. Kelepçe detayı.....	49
Şekil 2.29. Eğik çatlakların oluşumu.....	51
Şekil 3.1. Agrega Karışımlarının Gradasyon Eğrileri.....	54
Şekil 3.2. Tek Eksenli Yükleme Altında Silindir Numune ve Kompresometre.....	56
Şekil 3.3. Çekme Deneyine Tabi Tutulan Donatı.....	57
Şekil 4.1. Deney elemanlarının donatı kafesleri.....	63
Şekil 4.2. Deney elemanlarının kalıba yerleştirilmesi.....	63
Şekil 4.3. Deney elemanlarının beton dökümü.....	64
Şekil 5.1. Hasar verilen kirişlerde kılcal çatlak oluşumu.....	65
Şekil 5.2. Hasar verilen kirişlerde kılcal çatlak oluşumu.....	66
Şekil 6.1. Referans kirişin donatı özellikleri.....	67
Şekil 6.2. GK1 kirişinin güçlendirme planı.....	67
Şekil 6.3. Enine dış donatı detayı.....	68

Şekil 6.4. GK1 kirişinin dış donatılar ile sarılarak güçlendirilmesi.....	69
Şekil 6.5. GK2 kirişinin güçlendirme planı.....	70
Şekil 6.6. GK2 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi.....	71
Şekil 6.7. GK2 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi.....	71
Şekil 6.8. GK3 Kirişinin güçlendirme planı.....	72
Şekil 6.9. GK3 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi.....	73
Şekil 6.10. GK3 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi.....	73
Şekil 7.1. Yükleme sistemi-yük hücresi, ve U profil.....	74
Şekil 7.2. Yükleme sistemi.....	75
Şekil 7.3. Yükleme sisteminin genel görüntüsü.....	75
Şekil 7.4. Potansiyometrik Cetvel Konumları.....	76
Şekil 7.5. Potansiyometrik Cetvel Konumları.....	77
Şekil 7.6. 8 Kanallı Dinamik Veri Toplama Cihazı.....	77
Şekil 7.7. 8 Kanallı Dinamik Veri Toplama Cihazı.....	78
Şekil 8.1. Referans Kirişin yük-deplasman grafiği.....	80
Şekil 8.2. Referans kirişte göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	80
Şekil 8.3. Referans kirişte göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	81
Şekil 8.4. GK1 Kirişinin yük-deplasman grafiği.....	82
Şekil 8.5. GK1 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	82
Şekil 8.6. GK1 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	83
Şekil 8.7. GK1 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	83
Şekil 8.8. GK2 Kirişinin yük-deplasman grafiği.....	84
Şekil 8.9. Deney sonunda kirişi saran CFRP kumaşında görülen yırtıklar.....	85
Şekil 8.10. GK2 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	85

Şekil 8.11. GK3 Kirişinin yük-deplasman grafiği.....	86
Şekil 8.12 CFRP'nin kiriş gövdesinden sıyrılması.....	87
Şekil 8.13. GK3 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları.....	87
Şekil 9.1. Deney kirişlerinin yük-deplasman eğrileri.....	89

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri.....	8
Çizelge 2.2. Deney elemanlarının özellikleri.....	14
Çizelge 2.3 Deney sonuçları.....	15
Çizelge 2.4. Üretilen kirişlere ait boyut ve geometrik özellikler.....	17
Çizelge 2.5. Kirişlere ait süneklik oranları.....	18
Çizelge 2.6. Kirişlerin eğilme rijitlikleri.....	18
Çizelge 2.7. Kirişlerin enerji tüketme kapasiteleri.....	19
Çizelge 2.8. Deney elemanları.....	20
Çizelge 2.9. Hasar verilen kirişlerin teorik ve deney değerleri.....	21
Çizelge 2.10. Güçlendirilen kirişler ile referans kirişlerin teorik ve deney değerleri.....	22
Çizelge 2.11. Hasarlı kirişlerin donatı detayları ile deneysel ve teorik kırılma yükleri.....	23
Çizelge 2.12. Mantolu kirişlerin donatı detayları ile deneysel ve teorik kırılma yükleri.....	25
Çizelge 2.13. Deney elemanlarının adlandırılması ve özellikleri.....	27
Çizelge 2.14. Numunelerin ilk çatlama ve göçme anında taşıdıkları kesme kuvvetleri.....	29
Çizelge 2.15. Kiriş numunelerinin sembol ve isimleri.....	30
Çizelge 2.16. Kiriş numunelerinin en fazla yük karşısındaki deplasman değerleri.....	32
Çizelge 2.17. Kiriş numunelerine yerleştirilen strengelerin şekli ve isimleri.....	33
Çizelge 2.18. Kiriş numunelerinin en fazla yüke karşı kesme çatlakları.....	33
Çizelge 2.19. Kirişlerin enerji tüketme kapasiteleri.....	34
Çizelge 2.20 Kiriş numuneleri sembol ve isimleri.....	36
Çizelge 2.21. Deney elemanlarının özellikleri.....	45
Çizelge 2.22. Deney sonuçları.....	47

Çizelge 2.23. Deneysel çalışma programı.....	48
Çizelge 2.24. Deney sonuçları.....	49
Çizelge 3.1. Beton Üretiminde Kullanılan Suyun Kimyasal Analiz Sonucu.....	54
Çizelge 3.2. Çimentonun Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özellikleri.....	55
Çizelge 3.3. Kullanılan Katkının Teknik Özellikleri.....	56
Çizelge 3.4. Üretimde Kullanılan Betonun Basınç Dayanımı.....	57
Çizelge 3.5. Üretimde Kullanılan Betonun Çekme Dayanımı.....	57
Çizelge 3.6. Üretimde Kullanılan Donatının Karakteristik Özellikleri.....	58
Çizelge 3.7. Epoksi harcının özellikleri.....	58
Çizelge 3.8. CFRP'nin özelliği.....	59
Çizelge 5.1. Deney elemanları ve özellikleri.....	60
Çizelge 9.1. Deney elemanlarında hesaplanan rijitlik değerleri.....	89
Çizelge 9.2. Deney elemanlarına ait süneklik oranları.....	90
Çizelge 9.3. Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi.....	91
Çizelge 9.4. Deney elemanlarının güçlendirme maliyetleri.....	91

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
C20	Beton sınıfı
CFRP	Karbon lifle güçlendirilmiş polimer
C01,C02,C03	Karbon lifli kiriş modeli
G01,G02,G03	Cam lifli kiriş modeli
FRP	Lifle güçlendirilmiş polimer
GFRP	Cam lifle güçlendirilmiş polimer
GK1	Güçlendirilmiş Kiriş 1
GK2	Güçlendirilmiş Kiriş 2
GK3	Güçlendirilmiş Kiriş 3
Hi-CFRP	Yüksek elastisite modüllü karbon lifli polimer
ISO	International Organization for Standardization
LP	Lifli Polimer
LVDT	Elektronik yer değiştirme ölçer.
O/G	Onarım ve güçlendirme
REF Kirişi	Rerefans Kiriş
S420	Yapı çeliği
T01,T02,T03	Tanık kiriş numuneler

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca, bu araőtırmayı planlayıp yöneten, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, deneysel çalıőmalarımınla bizzat kendisi ilgilenen ve takip eden danışmanım, değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ali DEMİR'e teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili babama ve anneme sonsuz teşekkür ederim.

## ÖZET

Kesme dayanımı yetersiz olan betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için birçok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin eleman dışından çeşitli düzenlerde yerleştirilen kelepçelerle kesmeye karşı güçlendirilmesi pratik bir yöntemdir. Bu yöntemlerden bir tanesi ve belki en kolay ve hızlı uygulananı da lifli polimerlerin epoksi ile kiriş yüzeyine dışarıdan yapıştırılarak yapılan güçlendirme şeklidir. Burada verilen çalışmanın amacı, kesmeye karşı dış kelepçeler ve karbon lifli polimerler ile güçlendirilen hasarlı kirişlerin dayanım ve davranışlarının incelenmesi ve güçlendirme yönteminin etkinliği ile oluşan göçme mekanizmalarının araştırılmasıdır. Deneysel çalışma, biri yalın, üçü güçlendirilmiş kiriş olmak üzere toplam dört adet kiriş modeli ile gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları artan monotonik yükler altında test edilmiştir. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi, rijitlik ve maliyetler bakımından irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, kelepçe kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişin yeterli davranış sergilediği görülmüştür. Diğer deney elemanlarının sünekliği ve göçme modları da kullanılan CFRP şeritlerin genişliğine ve yerleşim düzenine göre farklılık göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme Kirişler, CFRP, Dış Kelepçe, Güçlendirme, Hasar



## ABSTRACT

There are various shear strengthening techniques applicable to the shear deficient reinforced concrete beams. External clamps are practical tools for strengthening slender beams with low shear strength capacity. Among these, the use of externally bonded Fiber Reinforced Polymer (FRP) strips may be considered as a relatively novel, easy and fast technique for shear strengthening. The purpose of this study is to investigate the level of shear strengthening attained through external clamps and CFRP strips. Besides, shear behavior, and failure mechanisms are also evaluated. Four reinforced concrete beams including one reference and three strengthened beams were tested under monotonically increasing gravity loads. On basis of the experimental study, the performance of the specimens were evaluated as regards strength, ductility, energy dissipation stiffness and costs. At the end of the study, it was observed that satisfactory behaviors can be achieved with using external clamps for strengthening of reinforced concrete beam. Test results showed that ductility ratio and failing modes of others change depend on the CFRP composites width and arrangement.

**Keywords:** *Reinforced Concrete Beams, CFRP, Damage, External Clamp, Strengthening, Damage*

## 1.GİRİŞ

### 1.1.Genel

Betonarme yapılara etkiyen çeşitli dış kuvvetler ve yapım aşamalarındaki eksiklikler, özellikle çerçeveden oluşmuş yapıların kirişlerinde hasar verici kesme kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Kirişlerde oluşan ve gevrek olarak bilinen bu kırılma türü yapıdan istenilen sünekliği dolayısıyla enerji sönmüleme kapasitesini önemli derecede düşürmektedir.

Oluşan bu hasarı ortadan kaldırmak ve kirişlerin kesme kapasitelerini arttırmak için literatürde birçok yöntem önerilmiş ve uygulanmıştır. Bunlardan bazıları: beton katman eklenmesi, FRP ve çelik plaka yapıştırılması, mantolama yapılması ve dışarıdan uygulanan kelepçe veya diğer isimleriyle dış donatı, dış etriye eklenmesidir.

Konuyla ilgili geçmişte yapılmış deneysel çalışmalarda değişik formlarda epoksi ile kiriş kesme bölgesine yapıştırılan CFRP'nin kesme dayanımını arttırdığı ortaya konmuştur. Benzer şekilde kiriş dışından yerleştirilen kelepçelerin de elemanın kesme dayanımını arttırdığı ve eleman davranışını kesme göçmesinden sünek eğilme davranışına taşıdığı ortaya konmuştur. Bu çalışmalarda kullanılan kelepçeler etkinliği tartışılan çelik şeritlerden, genelde de yüksek dayanımlı çok sayıda çelik elemanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kullanılan kelepçe türlerinin hepsi özel üretimi gerektirmekte ve eleman üzerinde yerleştirilmesi de bazen sorunlu olabilmektedir. Çalışmada kullanılan CFRP ise Telateks firması tarafından METYX Composite Reinforcements markası adı altında üretilmiş olup ISO 9001:2008 QA System standardına sahiptir.

Çalışmada birisi referans, üçü güçlendirilmiş olmak üzere dört adet deney elemanı tek düze yükler altında denenmiştir. Çalışmada, iki adet kiriş CFRP ile diğeri ise dışarıdan yerleştirilen kelepçeler ile güçlendirilmiştir. Deney sonuçları; dayanım, süneklik, enerji tüketimi, rijitlik ve maliyet bakımından irdelenmiştir.

### 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada kesme kapasitesi yetersiz olan hasarlı betonarme dikdörtgen kirişlerin CFRP ile yapıştırma ve dış donatı ekleme (kelepçe ile sarma) yöntemleri güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Güçlendirilen bu kirişler yüklemeye tabi tutularak elde edilen yük taşıma kapasiteleri, rijitlikleri, süneklikleri, enerji tüketme kapasiteleri ve maliyetlerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında 4 adet betonarme dikdörtgen kiriş üretilmesi planlanmaktadır. Betonarme kirişlerin beton basınç dayanımlarının 16 MPa'dan daha küçük olması hedeflenmektedir. Kesme kapasitesi yetersiz kirişler Ø8/425 mm eksik etriyeli ve çekme bölgesinde 3Ø14 donatı olacak şekilde üretilen kirişler kesme bölgesinde ilk kılcal çatlak görülene kadar yüklenecek ve hasar verilecektir. Güçlendirilmesi yapılmış kirişler üç farklı tipte hazırlanmıştır. İlk olarak 100 mm aralıklarla her iki kesme bölgesine yerleştirilen enine dış donatılarla, ikinci olarak CFRP'nin her iki kesme bölgesinin tamamına yapıştırılması son olarak da CFRP'nin şeritler halinde kesilerek her iki kesme bölgesine de 100 mm aralıklarla yapıştırılması durumları ile kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Güçlendirilen kirişler iki noktadan yüklemeye tabi tutulacaktır, yüklemeler iki noktadan çelik transfer kirişi kullanılarak yapılacaktır. Enine dış donatılar ise Demir (2012) tarafından geliştirilen yöntem ile uygulanacaktır. CFRP kiriş kesme bölgelerine yapıştırılmadan önce ıslak bir bezle temizlenecek ve sonra epoksi enjekte edilerek yapıştırılacaktır.

Son olarak önerilen güçlendirme yöntemlerinden en etkilisi ve maliyeti en düşük olanı belirlenmeye çalışılacaktır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Genel

Bu bölümde geçmişte kiriş elemanların farklı yöntemlerle güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar ile betonarme elemanların kesme davranışı ve kesmeye karşı dayanım hesabı konularındaki çalışmalar incelenmiştir.

### 2.2. Geçmişteki Çalışmalar

Betonarme kirişler öz ağırlıklar, ilave ağırlıklar, hareketli yükler, deprem etkileri, zemin oturmaları ve sıcaklık farklarından dolayı çeşitli etkilere maruz kalabilirler. Bu etkiler altında kirişlerde hasarlar veya kalite ve özellik kayıpları oluşabilir. Bu nedenlerden dolayı kirişlerin onarılma/güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir. Kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili deneysel ve analitik çalışmalar geçmişten günümüze devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalar kirişlerin dayanımlarını, rijitliklerini veya sünekliklerini arttırmaya yöneliktir.

Uygulamada ve literatürde bireysel elemanlar genellikle çelik levha ekleme yöntemi, mantolama (beton katman ilavesi), FRP (fiber reinforced polymer) elemanların ilavesi ve dış donatı ekleme ile güçlendirilmektedir.

Betonarme kirişlere çelik levha ekleyerek onarım veya güçlendirilmesi ile ilgili yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kirişin alt veya yan yüzüne delikli veya deliksiz çelik levhalar eklenmiş ve güçlendirilen kirişlerde rijitlik, süneklik, ve dayanım gibi parametrelerde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çelik levhanın kirişe eklenmesi için epoksi ile yapıştırma veya bulon ile birleştirme gibi farklı yöntemler denenmiş olup bu yöntemlerden hangilerinin rijitlik, dayanım ve sünekliği arttırmada daha olumlu sonuçlar verdiği ile ilgili olarak da çalışmalar yapılmıştır.

Kirişlerin betonarme mantolama ile güçlendirme yöntemi ile ilgili de literatürde yapılmış pek çok çalışma bulunmakta olup bu çalışmalarda mantolama ile güçlendirme yöntemlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Betonarme mantolama yöntemi ile güçlendirilen kirişlerin yük altında süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasitelerinde önemli bir artış sağlandığı görülmüştür.

Son zamanlarda, karbon veya cam fiber takviyeli polimer levhalar kullanılarak kiriş onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar da yapılmaktadır. Bu çalışmalarda CFRP veya GFRP levhalar betonarme kirişe epoksi ile yapıştırılmıştır. Bu malzemeler ile kiriş güçlendirilmelerinde rijitlik ve dayanımlarda artışlar gözlenmesine rağmen, yeterli sünekliklerin elde edilmesinde sıkıntılar olmuştur.

Bir başka güçlendirme yöntemi olan kelepçe ile güçlendirme yöntemi de literatürdeki yerini almış olup betonarme kirişlerin dışından çeşitli düzenlerde yerleştirilen kelepçelerin civata, pul ve çelik profiller yardımıyla kirişlere kelepçelenmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Bu

bölümde, geçmişte çelik levha ekleme yöntemi, mantolama (beton katman ilavesi), FRP (fiber reinforced polymer) elemanların ilavesi ve dış donatı (dış etriye) ekleme yöntemi ile güçlendirme gibi farklı güçlendirme yöntemleri kullanılarak yapılan bazı çalışmalara yer verilmektedir.

### 2.2.1. Çelik Levha Ekleme Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi

Arslan (1991) çalışmasında, epoksi ile çelik levhalar yapıştırılarak yalnızca eğilme altında onarılmış/güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tekdüze yükler altındaki davranış ve dayanımlarının araştırılmasını amaçlamıştır. Çalışmada ele alınan güçlendirme, kirişin pozitif moment bölgesinde çekme yüzüne epoksi ile çelik levha yapıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Arslan (1991) çalışmasında, simetrik yerleştirilmiş eşit iki tekil yük altında denenen kirişler, 150x250 mm dikdörtgen kesitli olup sonradan 150x2 mm kesitli ya da 150x4 mm kesitli çelik levhalarla güçlendirilmiştir. Denenen dokuz kirişin tümünde 2Ø14 çekme donatısı, 2Ø10 montaj donatısı ve 150x2 mm ya da 150x4 mm güçlendirme levhası kullanılmıştır. Deney elemanlarının betonları hazır beton fabrikasından sipariş edilerek üç aşamada dökülmüş olup elemanların karakteristik dayanımları  $f_{ck}=200-275 \text{ kg/cm}^2$ 'dir. Dokuz deney kirişinden biri, güçlendirme ve onarımın davranış ve dayanım üzerindeki etkisini araştırmak için yalın kiriş (referans kirişi) olarak düzenlenmiştir. Diğer kirişler ise,

- Güçlendirme levhası uygulaması (yalın kirişe göre),
- Güçlendirme levhası uzunluğu (uzun levha ( $l_t=240 \text{ cm}$ ) ya da kısa levha ( $l_t=120 \text{ cm}$ ) ile güçlendirme ),
- Güçlendirme levhası ucunun durumu (boşta, kaynaklı ya da dik ve eğik başlıklı),
- Güçlendirme levhası kalınlığı (ince (0,2 cm veya kalın (0,4 cm) levha kullanılması),
- Yüksüz onarım (kiriş yükleri askıya alınarak yapıştırma işleminin yapılması),
- Yüklü onarım (kiriş yük altında iken yapıştırma işleminin yapılması), değişkenlerinin davranış ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş, yalın kiriş ile ve de birbirileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada kullanılan elemanların isimleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Şekil 2.1., Şekil 2.2., Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'te çalışmasının sonuç grafikleri sunulmuştur.

YK ( R ) : Yalın kiriş (referans kirişi)

GKB : Levha kısa ve ince, yüksüz, başlıksız (güçlendirilmiş)

GUB : Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıksız (güçlendirilmiş)

GUK : Levha uzun ve ince, yüksüz, kaynaklı (güçlendirilmiş)

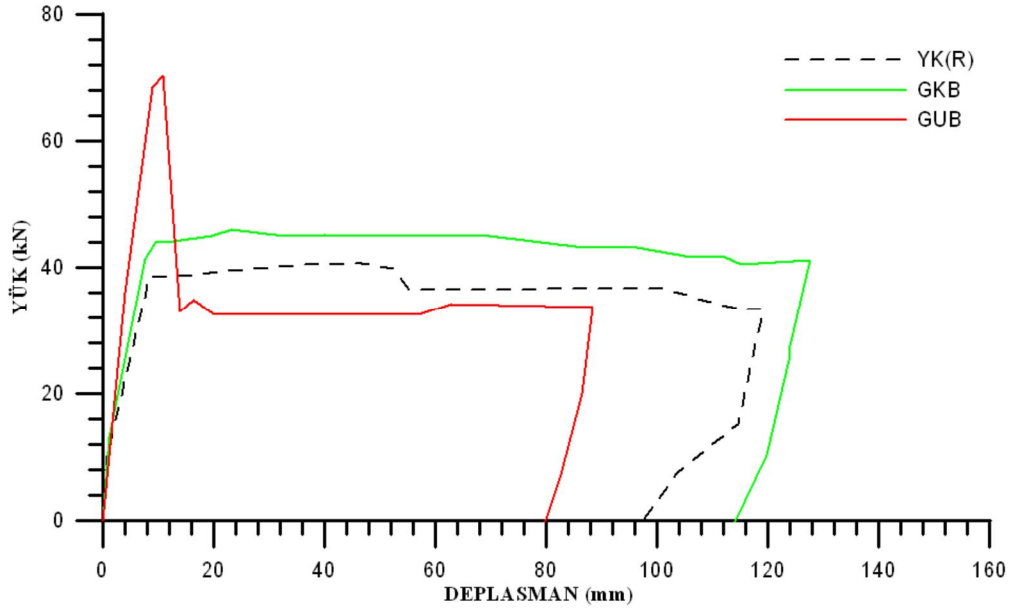
GUE : Levha uzun ve ince, yüksüz, eğik başlıklı (güçlendirilmiş)

GUD : Levha uzun ve ince, yüksüz, dik başlıklı (güçlendirilmiş)

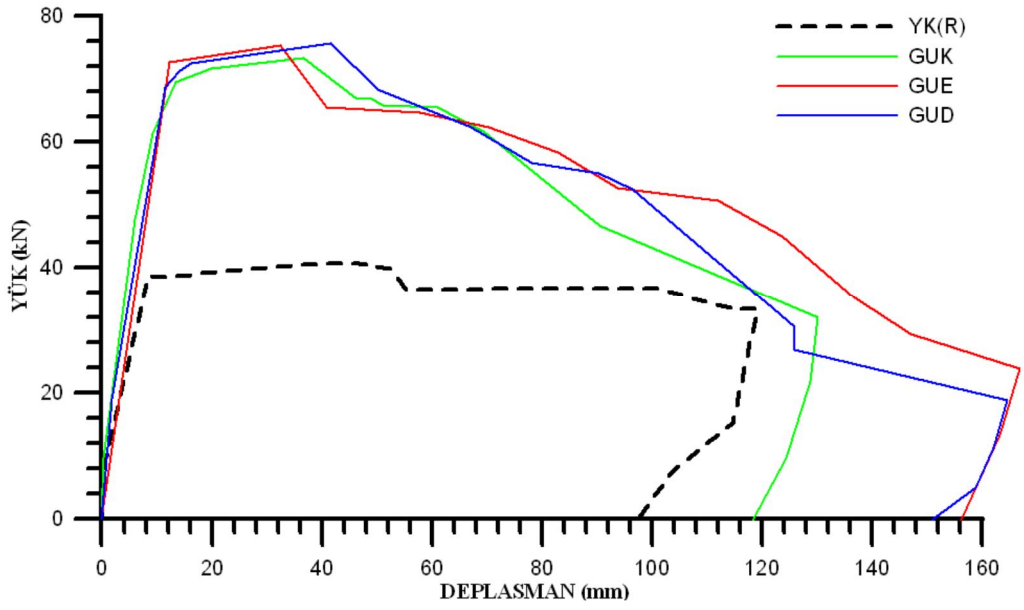
GU'D : Levha uzun ve kalın, yüksüz, başlıklı (güçlendirilmiş)

ODU : Levha uzun ve ince, yüksüz, başlıklı (onarılmış hasarlı kiriş)

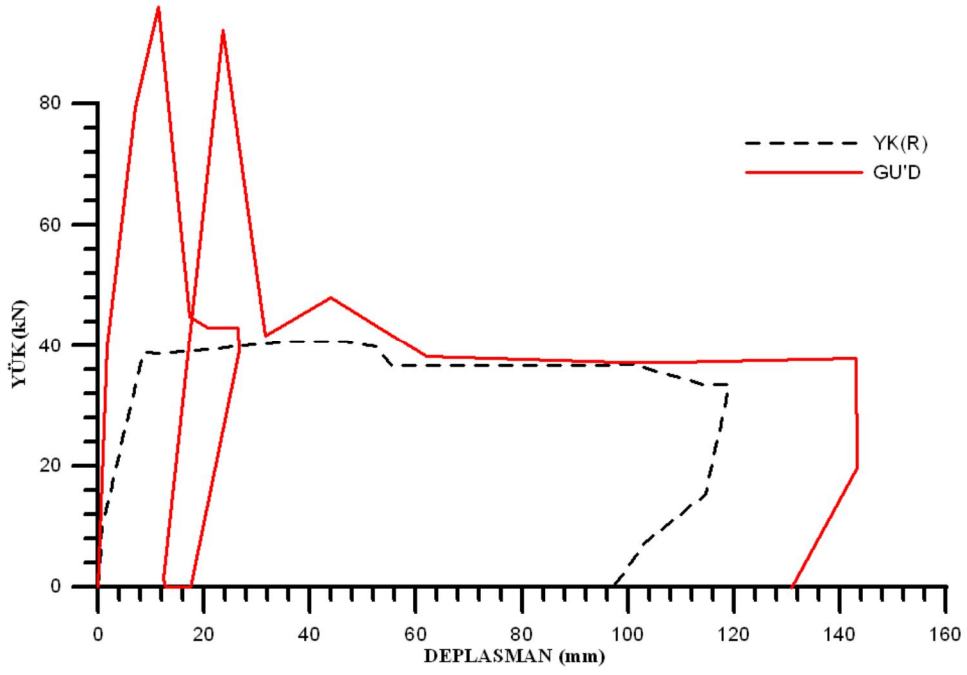
O'UD : Levha uzun ve ince, yüklü, başlıklı (onarılmış hasarlı kiriş)



Şekil 2.1. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (levha başı tutulmamış güçlendirilmiş kirişler)

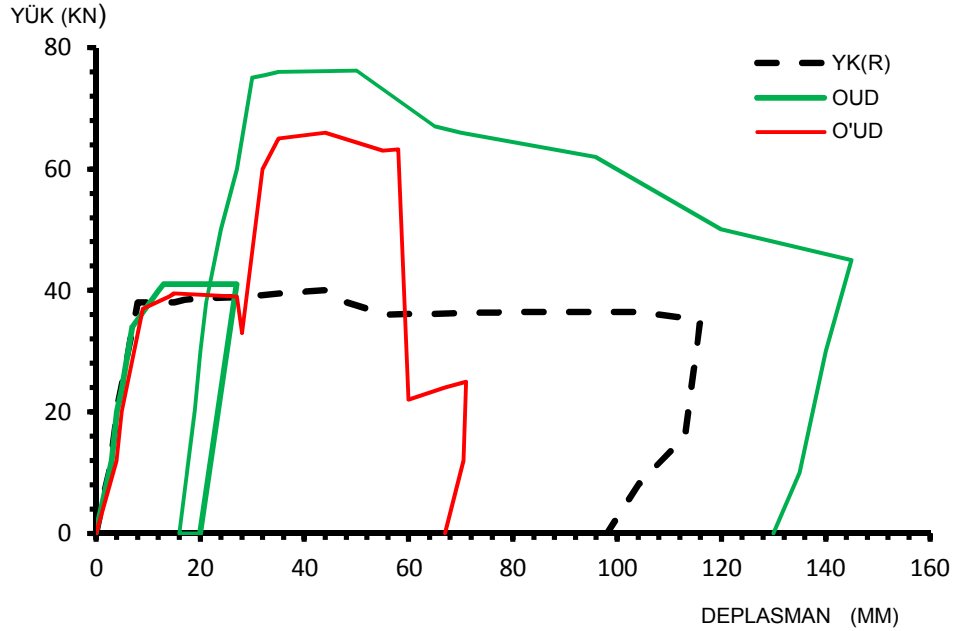


Şekil 2.2. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (levha başı tutulmuş güçlendirilmiş kirişler)



Şekil 2.3. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (levha başı tutulmuş kalın levha ile güçlendirilmiş kirişler)

(Not: GU'D kirişi deneye başladıktan sonra plakada büyük çekme kuvveti olması nedeniyle levha başlarından ayrılmıştır. Levhaya tekrar epoksi sürülerek ve levha başları yeniden dik ve eğik başlıklarla bağlanarak deney devam edilmiştir.)



Şekil 2.4. Arslan'ın çalışmasının sonuç grafikleri (onarılmış hasarlı kirişler)

Araştırma sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır :

- Epoksi ile çelik levha yapıştırma yöntemi ile betonarme kiriş onarım ve güçlendirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiş ancak, kısa levha ile güçlendirme çok başarısız olmuştur.
- Levhanın olabildiğince uzatılması gerektiği ve levha uçlarının mutlaka tutulması gerektiği belirtilmiştir.
- Güçlendirme levhalarının iki ucu eski donatıya kaynaklandığında ya da başlıklar yardımıyla tuturulduğunda güçlendirmede ve yüksüz onarımda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak yük altında yapılan onarımlar başarılı sonuçlar vermemiştir.
- Levhayı aşırı kalınlaştırma, dayanımı amaçlanan düzeyde artıramamanın yanı sıra çok tehlikeli davranışa da yol açmaktadır.
- İyi düzenlenmiş, boyu yeterince uzun, uçları sağlıklı biçimde yerinde tutulmuş levhalarla yapılan yüksüz onarımda ve güçlendirmede amaçlanan dayanım sağlanabilmekte ancak akma ötesi davranışın betonarme kirişteki kadar iyi olması sağlanamamaktadır.
- Deney modellerindeki bütün kirişler referans kirişin altında bir süneklik oranına sahiptir. En iyi süneklik oranına GKB kirişi ulaşmıştır. GUB ve O'UD kirişleri referans kirişin altında enerji tüketimi göstermiş olup diğer kirişler referans kirişin üstüne çıkmışlardır.

Uysal (2006) çalışmasında, eğilme altındaki betonarme kirişlerin epoksi ile yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışmasında delikli çelik levha ile yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerin daha sünek bir hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 1/1 ölçekli 200x500x4500 mm boyutlarında biri referans (yalın) kiriş olmak üzere dokuz adet kiriş tek düze yükler altında denenmiştir. Kalınlıkları  $t=3$  mm ve  $t=6$  mm olan delikli çelik levhalar kiriş alt yüzeylerine epoksi ile yapıştırılarak güçlendirme yapılmıştır. Enkesitteki delik çaplarının toplamı düşüldükten sonra arta kalan metalik alanın genişliği 120 mm'dir. Buna göre 3 mm'lik levhalarda  $3 \times 120 = 360$  mm<sup>2</sup>, 6 mm'lik levhalarda ise  $6 \times 120 = 720$  mm<sup>2</sup>'lik, çekme donatısı olarak çalışacak ek alanlar elde edilmiştir.

Denenen dokuz kirişin tümünde 3Ø14 (BÇ-IIIa kalitesinde) çekme donatısı, 2Ø10 (BÇ-IIIa kalitesinde) basınç donatısı kullanılmıştır. Çekme donatısı minimum donatı miktarının iki katından biraz fazla olup, uygulamadaki olağan donatılı kirişleri yansıtmaktadır. Herhangi bir kesme problemi ile karşılaşılmaması amaçlandığından, tüm kirişler oluşabilecek en büyük kesme zorlamalarını karşılayabilecek şekilde Ø8/100 mm lik etriyeler ile donatılmıştır. Deney elemanlarının betonları hazır beton fabrikasından sipariş edilerek dökülmüştür. Betonların ortalama karakteristik dayanımları ( $f_{ck}$ ) 20 MPa'dır. Çalışma kapsamında aşağıdaki değişkenlerin dayanım ve davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir.

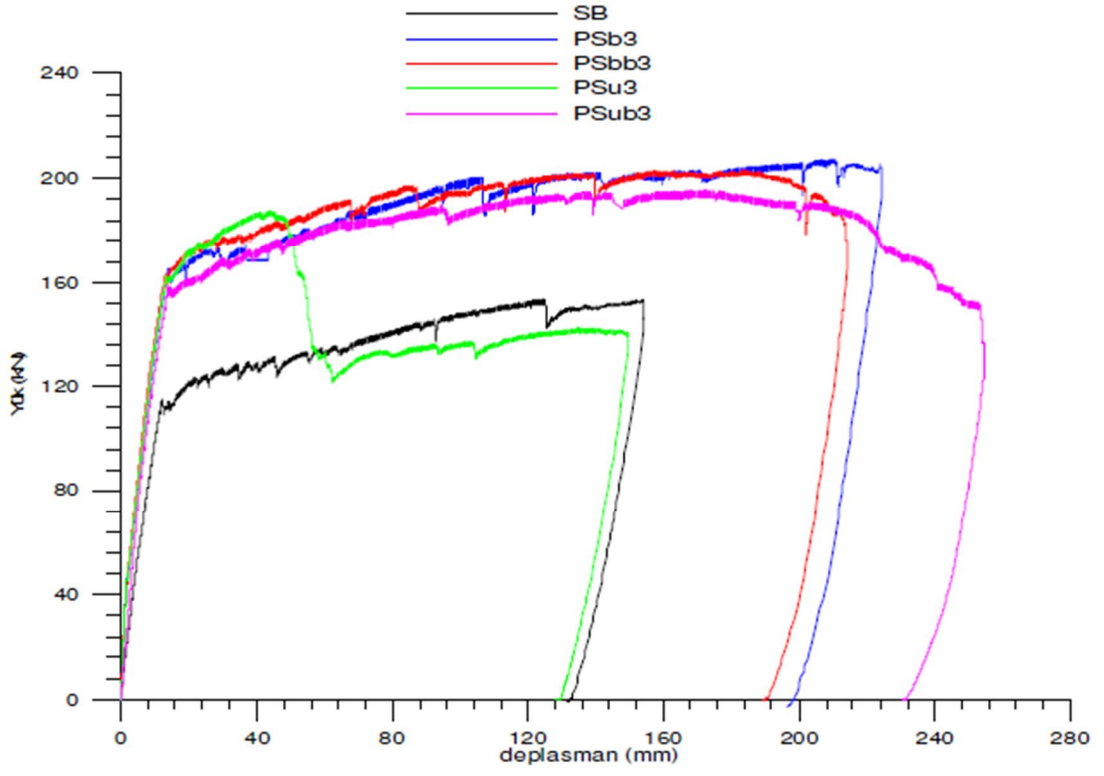
- Delikli çelik levha kullanımının süneklik ve yüzeyler arasındaki yük aktarımına etkisi,
- Çelik levha kesit alanı ve kalınlığı,
- Yapıştırma yöntemi (alt ve/veya yan yüzlerden),



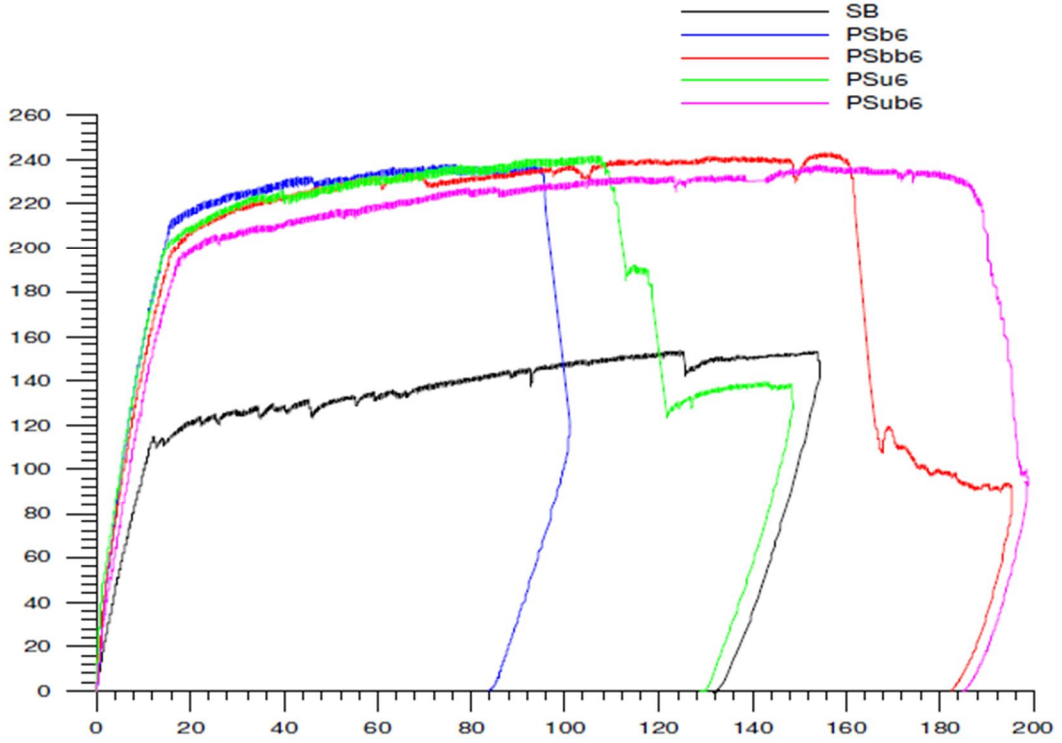
- Yan yüzlere tespit edilen levhanın uzunluğu ve aralarında oluşturulan derz aralıklarının değişimi,
- Epoksi ile yapıştırılan levhaların alt ve/veya yan yüzlerden çelik bulonlarla desteklenmesi, parametre olarak ele alınmış ve araştırılmıştır. Çizelge 2.1.'de deney elemanlarının özellikleri, Şekil 2.5. ve Şekil 2.6.'da ise çalışmasının sonuç grafikleri sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri

<b>KİRİŞ ADI</b>	<b>İŞLEM TÜRÜ</b>	<b>LEVHA KALINLIĞI (mm)</b>	<b>EPOKSİ İLE YAPIŞTIRILAN LEVHA YÜZEYİ</b>	<b>BULONLA BAĞLANTI</b>
SB	Yalın	-	-	-
PSb3	Güçlendirme	3	Alt	Yok
PSb6	Güçlendirme	6	Alt	Yok
PSbb3	Güçlendirme	3	Alt	Alt yüzde
PSbb6	Güçlendirme	6	Alt	Alt yüzde
PSu3	Güçlendirme	3	Alt ve yan	Yok
PSu6	Güçlendirme	6	Alt ve yan	Yok
PSub3	Güçlendirme	3	Alt ve yan	Yan yüzde
PSub6	Güçlendirme	6	Alt	Yan yüzde



Sekil 2.5. Uysal'ın çalışmasının sonuç grafikleri  
( 3 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği)



Sekil 2.6 Uysal'ın çalışmasının sonuç grafikleri  
( 6 mm'lik levhalarla desteklenen kirişlerin yük-deplasman grafiği)

Deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Delikli çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarında, dayanım ve rijitliğin yanı sıra yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmıştır.
- Güçlendirmede delikli çelik levha kullanılmasıyla delikler ovalleşerek daha fazla deformasyona izin vermiş buna bağlı olarak da düz levhalara göre süneklik kapasitelerinde belirgin ve yeterli artışlar gerçekleşmiştir.
- Delikli levha enkesitindeki metalik alan ile yapışma yüzeyine iletilen kuvvet doğru orantılı olduğundan, levha kalınlığının süneklik kapasitesini belirgin şekilde etkilediği görülmüştür. Deneylerde kalın levhalı elemanlar, ince levhalı elemanlardan daha az bir süneklik göstermiştir. Buna rağmen kalın levhalı elemanlarda levha ile birlikte sağlanan çekme donatısı oranının TS500'de izin verilen maksimum donatı oranına ( $0.85\rho_b$ ) yaklaşık eşit olduğu ve bu durumda bile elde edilen en küçük süneklik oranının 8 civarında olduğu görülmüştür. Betonarme sünek kirişlerde, kabul edilebilir en küçük süneklik oranının 4–5 civarında olduğu göz önüne alındığında maksimum donatı oranına yakın kirişlerde ulaşılan bu süneklik oranlarının oldukça yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

- Tüm elemanlarda hedeflenen teorik tasıma güçlerine ulaşılmıştır. Alt yüzüne delikli çelik levha yapıştirılmış betonarme kirişlerin tasıma gücü hesaplarının betonarmede monolitik kirişler için uygulanan tasıma gücü yöntemi ile hesaplanabileceği görülmüştür.
- Tüm elemanlarda yeterli bir eğilme rijitliği elde edilmiştir. Beklendiği gibi kalın levhalı elemanlarda daha büyük rijitlikler elde edilmiştir.
- Tüm elemanlarda yeterli süneklik kapasitelerine ulaşılmış olmasına rağmen, süneklik kapasitesini garanti altına almak için levhaların alt veya yan yüzlerden bulonlarla desteklenmesinin oldukça faydalı olduğu ve bunun süneklik kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Özellikle kalın levhalı elemanlarda bulonlarla desteklenmiş elemanların, bulonsuz elemanlara göre çok daha fazla sünek davrandıkları görülmüştür.
- Alt yüze yapıştirılan levhanın yan yüz levhaları ile desteklenmesinin de süneklik kapasitesini arttırmada etkili olabileceği görülmüştür. Ancak kullanılan yan yüz levha sayısı ile derz sayı ve aralığının çok önemli olduğu ve davranışı olumlu veya olumsuz yönlerde etkileyebileceği gözlenmiştir. Beklenenin tersine kiriş yan yüzünde boydan boya yan yüz levhası kullanılması süneklik kapasitesini önemli ölçüde düşürmüştür. Bu elemanlarda levhada oluşan uzama deformasyonları derz civarlarında yoğunlaşmış ve buna bağlı olarak levhalar erkenden koparak kirişler gevrek bir şekilde kırılmıştır. Süneklik kapasitesini arttırmak için yan yüz levhalarında oluşturulan derz sayısının artırılması da ancak bir ölçüde başarılı olmuştur.

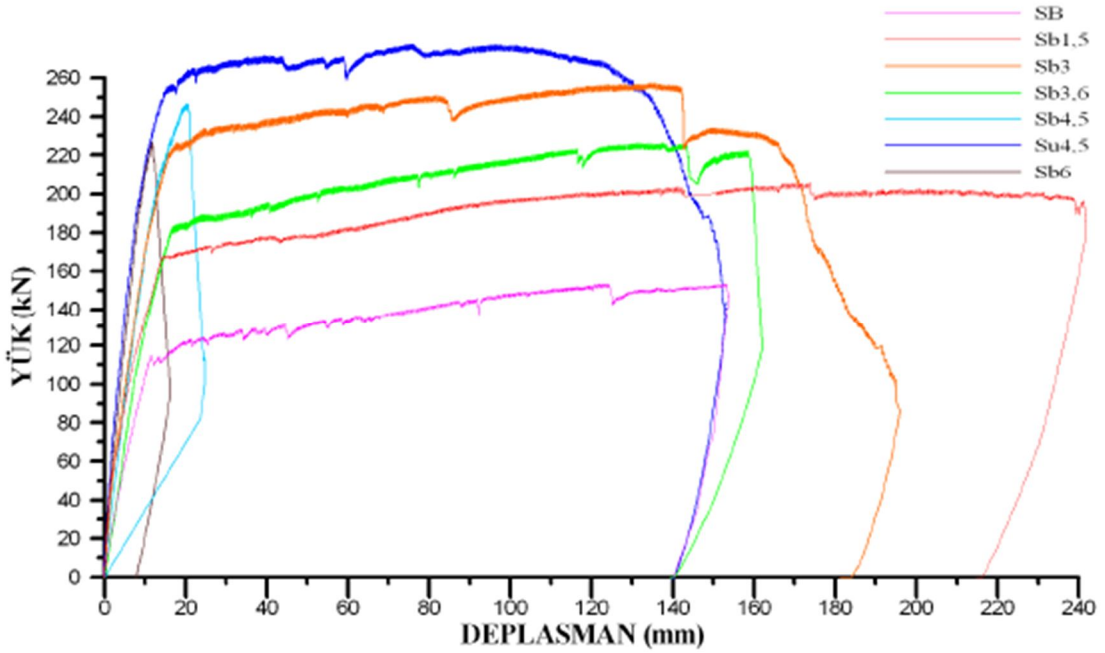
Karahan (2008) çalışmasında betonarme kirişlerin epoksi ile yapıştirılmış çelik levha ile eğilmeye karşı güçlendirilmesinin, elemanın dayanımı ve davranışı üzerine etkilerini incelenmiştir. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 1/1 ölçekli 200x500x4500 mm boyutlarında biri referans (yalın) kiriş olmak üzere yedi adet kiriş tek düze yükler altında denenmiştir. Model kirişlerde epoksi ile yapıştirılan 1,5/3/3,6/4,5/6 mm kalınlıklarındaki çelik levhalar güçlendirme elemanı olarak kullanılmıştır. Denenen yedi kirişin tümünde 3Ø14 (BÇ-IIIa kalitesinde) çekme donatısı, 2Ø10 (BÇ-IIIa kalitesinde) basınç donatısı kullanılmıştır. Çekme donatısı minimum donatı miktarının iki katından biraz fazla olup, uygulamadaki olağan donatılı kirişleri yansıtmaktadır. Herhangi bir kesme problemi ile karşılaşılmaması ve elemanların eğilme yönünden incelenmesi amaçlandığından, tüm kirişler oluşabilecek en büyük kesme zorlamalarını karşılayabilecek şekilde Ø8/100 mm lik etriyeler ile donatılmıştır. Deney elemanlarının betonları hazır beton fabrikasından sipariş edilerek dökülmüştür. Betonların ortalama karakteristik dayanımları (fck) 20 MPa'dır. Çalışma kapsamında aşağıdaki değişkenlerin dayanım ve davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Yapıştırma yönteminin etkinliği: Epoksi ile yapıştirılmış çelik levhaların eğilme dayanımı ve davranışı üzerindeki etkilerinin nasıl olacağı,
- Güçlendirme levhası kalınlığı: Çelik levha kalınlığının davranış ve dayanım üzerindeki etkisi,

-Güçlendirme levhasının yapıştırma yöntemi: Çelik levhaların kiriş alt yüzüne veya alt yüzüne yapıştırıldıktan sonra U şeklindeki levhaların kirişin alt yüzüne ve yan yüzlerine yapıştırılmasının davranış ve dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş, yalın kiriş ile ve de birbirileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan elemanların isimleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- SB: Referans olarak kullanılacak kiriş (Yalın kiriş).
- Sb1,5: Sadece alt yüzüne epoksi ile 1,5 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Sb3: Sadece alt yüzüne epoksi ile 3,0 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Sb3,6: Sadece alt yüzüne epoksi ile 3,6 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Sb4,5: Sadece alt yüzüne epoksi ile 4,5 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş
- Su4,5: Alt yüzden epoksi ile yapıştırılmış 4,5 mm kalınlığındaki çelik levhanın yan yüzlerden 3 mm kalınlığında U şeklindeki levhalarla desteklenmesi ile güçlendirilmiş kiriş
- Sb6: Sadece alt yüzüne epoksi ile 6,0 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş

Şekil 2.7.'de tüm deney elemanlarına ait yük deplasman grafiği sunulmuştur.



Şekil 2.7. Tüm deney elemanlarının yük deplasman grafikleri

Deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme yönteminden başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel elemanlarının büyük bir kısmında yeterli dayanım ve süneklik elde edilmiştir.
- Deneysel elemanlarında hedeflenen taşıma güçlerine ulaşılmış ve güçlendirme levhalarının kapasite üzerine etkisinin betonarme monolitik kirişler için uygulanan taşıma gücü yöntemiyle hesaplanabileceği görülmüştür.
- Alt yüzüne epoksi ile 1,5 mm kalınlığında çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş Sb1,5 kirişi dayanım ve süneklik açısından çok iyi sonuçlar vermektedir. Deneysel çalışmada 1,5 mm'lik çelik levha kullanılması ile yalın kirişin üzerinde bir dayanım ve süneklik elde edilmiştir.
- Levha kalınlığının artırılarak alt yüzden yapılan güçlendirmeler de (Sb3, Sb3,6) dayanım ve süneklik açısından yeterli sonuçlar vermektedir.
- Kalın levha (Sb4,5, Sb6) kullanılması durumunda sadece alt yüzünden yapıştırma işlemi yeterli olmamaktadır. Levha uçlarında oluşan kayma gerilmelerinden dolayı levha uç kısmından beton tabakasını da alarak sıyrılıp gevrek kırılma oluşturmaktadır. Ancak U şeklinde çelik levha (Su4,5) kullanılması ile sünek bir davranış sağlanmıştır.
- Deneysel çalışmada, uç kısımlardan levhanın sıyrılması sonucu gevrek göçmenin olduğu elemanların dışında en düşük süneklik oranı 9 olarak hesaplanmıştır. Uçlardan sıyrılmanın olduğu elemanlarda da gerekli ek tedbirlerin alınması durumunda minimum süneklik oranı şartının sağlandığı görülmüştür.
- Yapılan deneysel çalışmalarda elemanların tamamında istenen eğilme rijitlikleri sağlanmıştır. Kalın levha kullanılan elemanlarda (Sb4,5-Sb6), büyük eğilme rijitlikleri elde edilmiş ancak gevrek göçme oluşması sonucunda rijitliklerde ani düşüş oluşmuştur. Bu tür ani rijitlik kayıplarının önlenmesi için sıyrılmanın engellenmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda bu husus incelenerek tasarlanan elemanın (Su4,5) yeterli bir eğilme rijitliği ve sünekliği sağladığı anlaşılmıştır.

Aykaç ve diğerleri (2011) yaptıkları çalışmada çelik levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin sünek bir davranış göstermesi için gerekli önlemlerin araştırılıp ortaya konmasını amaçlamışlardır. Bunun için yeni bir uç bağlantı detayı geliştirilmiş ve test edilmiştir. Bu amaçla uygulamada sıkça karşılaşılan 1/1 ölçekli 200x500x4500 mm boyutlarında ikisi referans (yalın) kiriş olmak üzere sekiz adet betonarme T kesitli kiriş tek düze yükler altında denenmiştir. Kirişlerin sadece açıklık bölgesi güçlendirilmiştir. Güçlendirme yönteminin etkinliği araştırılırken; yetersiz dayanım türü (kesme ve/veya eğilme), kiriş üst yüzünde basınç levhası olup olmayacağı, levhanın kirişe kenetlenme türü (epoksili veya epoksisiz) ve kesmeye karşı önlem alınıp alınmadığı, parametre olarak ele alınmıştır. En iyi levha uç bağlantı detayı, parametre olarak ele alınmamış ve tüm elemanlarda aynı uç bağlantısı kullanılmıştır. Kiriş alt yüzüne yapıştırılan levha alanı da parametre olarak ele alınmamış tüm kirişlerde sabit tutulmuştur. Ancak levhada ve kirişte olası en büyük zorlamaların oluşması için, yönetmeliğin izin verdiği en büyük donatı oranına yakın bir

levha alanı seçilmiştir, (Levha+boyuna donatı için  $\rho \cong 0.02$ ). Tabla kalınlığı 100 mm ve tabla genişliği 400 mm olup gerçekte bu değer etkili tabla genişliğinden çok küçüktür. Ancak çalışmada T kesit kullanılmasının gerçek amacı, güçlendirme işlemlerinin tablaya rağmen nasıl yapılacağına cevap bulmak olduğundan, bu genişlik ile yetinilmiştir. Tüm kirişlerin çekme bölgesinde 3Ø14, basınç bölgesinde ise 2Ø10 + 4Ø8 boyuna donatı kullanılmıştır. Ø8 mm'lik donatılar döşemenin kiriş doğrultusundaki boyuna donatıları olup tablanın dört köşesine yerleştirilmiştir. Ayrıca kiriş eksenine dik doğrultudaki tabla donatısı alt yüzde Ø8/300 mm, üst yüzde ise Ø8/150 mm olarak seçilmiştir. Sadece eğilmeye karşı güçlendirilen kirişlerde herhangi bir kesme sorunu oluşmaması için kiriş boyunca Ø8/100 mm etriye kullanılmıştır. Eğilmenin yanı sıra kesmeye karşı da güçlendirilecek kirişlerde ise Ø8/500 mm etriye kullanılmıştır. Tüm donatılar S420 çeliğinden seçilmiştir. Çizelge 2.2.'de deney elemanlarının özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Deney elemanlarının özellikleri

KİRİŞ ADI	YETERSİZ DAYANIM TÜRÜ	LEVHA KALINLIĞI (mm)	KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRME	LEVHA UYGULAMA METODU
RB	Eğilme	-	-	-
RS	Eğilme + Kesme	-	-	-
S1	Eğilme	6	Yok	Alt Yüze Epoksiyle
S2	Eğilme	6	Yok	Alt ve Üst Yüze Epoksisiz
S3	Eğilme	6	Yok	Alt ve Üst Yüze Epoksiyle
S4	Eğilme + Kesme	6	Var	Alt Yüze Epoksiyle
S5	Eğilme + Kesme	6	Yok	Alt Yüze Epoksiyle
S6	Eğilme + Kesme	6	Var	Alt ve Üst Yüze Epoksiyle

Çizelgede yer alan RB ve RS elemanları referans (yalın) kirişlerdir. RB sadece eğilme dayanımı, RS ise hem eğilme hem de kesme dayanımı yetersiz olan bir kirişi temsil etmektedir. RB ve RS elemanlarında, sırasıyla kiriş boyunca Ø8/100 mm ve Ø8/500 mm etriye kullanılmıştır. Tablodaki S-elemanları güçlendirilmiş kirişlerdir. S4 ve S6 dışındaki tüm elemanlar sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. S4 ve S6 elemanları ise eğilmenin yanı sıra kesmeye karşı da güçlendirilmiştir. Sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiş S1 ve S5 elemanlarında güçlendirme, bu elemanların alt yüzüne çelik levha yapıştırılarak yapılmıştır. S2 ve S3 elemanları da sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Ancak bu elemanların güçlendirilmesi hem çekme hem de basınç yüzüne çelik levha eklenerek yapılmıştır. S2 elemanında levha ile kiriş arasında epoksi yapıştırıcı kullanılmamıştır. S4 ve S6 elemanları ise hem eğilmeye hem de kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Çekme yüzündeki levhalar kiriş alt

yüzüne epoksi ile yapıştırılmıştır (S2 hariç). Ayrıca tüm çekme levhalarının uçları kiriş yan yüzüne 7M20'lik bulonlarla tutturulmuştur. Bulonlar kiriş yan yüzüne epoksi ile ankre edilmiştir. Bulon sayısı çelik levhada olabilecek en büyük kuvveti taşıyacak şekilde belirlenmiştir. Güçlendirme işlemi yapılmış tüm elemanların çekme levhasında aynı uç detayı kullanılmıştır. Daha iyi bir süneklik elde etmek için bazı elemanların basınç yüzüne de çelik levha koyulmuştur. Çelik levhanın eni tabla genişliğine eşit ve 400 mm, kalınlığı çekme levhasına eşit ve 6 mm, boyu ise 1.70 m olarak seçilmiştir (moment sıfır noktaları arasındaki mesafenin %80i). İlerleyen yük aşamalarında basınç levhasının yüzeyden ayrılıp burkulmasını önlemek için, basınç levhası, kirişin iki tarafından tablaya M12/200 mm lik bulonlarla bağlanmıştır. S4, S5 ve S6 elemanlarının eğilme dayanımının yanı sıra kesme dayanımı da yetersizdir. Bu elemanlardan S4 ve S6 eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilmiş, S5 ise sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirme, kiriş yan yüzüne 200 mm aralıklarla yerleştirilen ve ard germe verilen bulonlarla (M10/200 mm) yapılmıştır. 10 mm çaplı bulonlar 12 Nm tork ile sıkılarak, her bir bulonda yaklaşık 6 kN ard germe kuvveti oluşturulmuştur. Tüm elemanlarda ortalama beton dayanımı  $f_c=16$  MPa, boyuna donatıların akma dayanımı  $f_y=450$  MPa ve kopma dayanımı  $f_u=620$  MPa olarak belirlenmiştir. Kullanılan çelik levhanın akma ve kopma dayanımı 280 MPa olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına ait tablo ise Çizelge 2.3.'te sunulmuştur.

Çizelge 2.3 Deney sonuçları

Eleman adı	$P_{yh}$ (kN)	$P_{yd}$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$P_{yd}/P_{yh}$	$\mu=\delta u/\delta y$
RB	117	117	135	14	1,00	20
RS	117	117	136	15	1,00	14
S1	298	293	310	18	0,98	10
S2	335	272	350	17	0,81	14
S3	335	309	350	17	0,92	16
S4	298	280	321	17,5	0,94	11
S5	298	290	323	17,5	0,97	6
S6	335	300	350	17,5	0,90	16

$P_{yh}$ : Hesap taşıma gücü

$\delta_y$ : Akma anındaki sehim

$P_{yd}$ : Deney taşıma gücü

$\delta_u$ : Dayanımdaki % 15 lik kayba karşı gelen sehim

$P_u$ : Ulaşılan en büyük yük

$\mu$ : Süneklik oranı

Deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;



- Eğilmeye karşı çelik levha kullanılarak uygulanan güçlendirme tekniğinden oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deney elemanları hedeflenen taşıma gücüne ulaşmış ve oldukça sünek davranmıştır.
- Hiç epoksi kullanılmamış elemanlarda bile, çekme levhasını uçtan tutan yan levha ve bulonlarda herhangi bir sıyrılma, ezilme veya kopma belirtisi gözlenmemiştir.
- Eğilmeye karşı önerilen güçlendirme yönteminin, kesme dayanımı üzerinde de olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Etriyesi oldukça az ve sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiş kiriş bile, eğilme taşıma gücüne ulaşabilmiştir.
- Çekme levhası, epoksi kullanılmadan, sadece uçlardan tutturulmuş eleman bile yeterli bir dayanım ve süneklik gösterebilmiştir.
- Güçlendirme işleminde, çekme levhasının yanı sıra, basınç yüzünde de çelik levha kullanımının eleman süneklik kapasitesini oldukça arttırdığı görülmüştür.

### **2.2.2. Mantolama Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi**

Can (2002) çalışmasında, kirişlerin betonarme mantolama ile onarım yöntemlerinin davranış ve dayanım üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada düşey yükler altında hasar gören ve onarımı mümkün olan orta hasarlı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin tam mantolanması araştırılmıştır. Bu amaçla toplam 9 adet kiriş üretilmiştir. Üretilen kirişler normal donatılı olup kirişlerin eğilme dayanımı yetersizdir. 10x16 cm kesitli 220 cm boyunda 6 adet kiriş C16 beton ve S420 yapı çeliği kullanılarak üretilmiş ve açıklık ortasına etkiyen yüklerle yüklenmiştir. Daha sonra bu kirişlere mantolama yapılarak açıklık ortasına etkiyen yüklerle tekrar denenmiş ve referans kirişlerle karşılaştırılmıştır. 3 adet kiriş ise 16x26 cm kesitli, C30 beton ve S420 yapı çeliği kullanılarak referans kiriş olarak üretilmiş ve açıklık ortasında etkiyen yüklerle yüklenmiştir. Üretilen kirişlere ait boyut ve geometrik özellikler aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Üretilen kirişlere ait boyut ve geometrik özellikler

DENEY ELEMANI	BETON SINIFI	KESİT TİPİ	BOYUTLAR	HESAP AÇIKLIĞI (CM)
K1	C16	Dikdörtgen	10x16x220	200
K2	C16	Dikdörtgen	10x16x220	200
K3	C16	Dikdörtgen	10x16x220	200
K4	C16	Dikdörtgen	10x16x220	200
K5	C16	Dikdörtgen	10x16x220	200
K6	C16	Dikdörtgen	10x16x220	200
RKM1	C30	Dikdörtgen	16x26x220	200
RKM2	C30	Dikdörtgen	16x26x220	200
RKM3	C30	Dikdörtgen	16x26x220	200

Üretilen 6 adet 10x16x220 cm ebattaki kirişler altta 2Ø12 çekme donatısı, üstte 2Ø8 montaj ve Ø8/15 cm ara ile etriye kullanılarak üretilmiştir. Referans kirişlerde ise 4Ø12 çekme donatısı kullanılarak kesite uygun donatı oranı elde edilerek üretilmiştir.

Elde edilen orta derecede hasar verene kadar yükleme yapılmıştır. Yükleme donatının tamamen akmasına ve beton basınç bölgesindeki betonun ezilmesine ulaşmadan yaklaşık 5 mm kalıcı sehim olana kadar devam ettirilmiştir. Hasar verilen tüm kirişlerde sünek davranış gözlemlenmiştir. İlk çatlakların kiriş ortasında olduğu ve eğilme çatlakları olduğu görülmüştür. Yükleme arttıkça çatlak sayısında ve genişliğinde artış gözlemlenmiştir.

Hasarlı kirişlerin onarımında kiriş tamamen etriye ile sarılarak alttan 2Ø12, üstten 2Ø8 montaj donatısı ilave edilmiştir. Donatı ilaveleri yapılmadan tüm kiriş beton yüzleri çentiklenerek pürüzlendirilmiştir. S420 yapı çeliği 2Ø12 alttan ve Ø8/15 etriyeler eski etriyelerin arasına getirilip kiriş alt bölgesi paspayına kadar açılarak yeni donatının eski donatıyla bağlantısı sağlanmıştır. Hazırlanan kirişler antifriz ve akışkanlaştırıcı katkıları katılarak C30 betonu ile onarılmış ve 28 gün laboratuvar koşullarında bakımı yapılmıştır.

Mantolama işlemi tamamlandıktan sonra kirişler tam orta açıklığında hidrolik pres yardımıyla yüklenmiştir. Tüm kirişlere ait süneklik oranları Çizelge 2.5., kirişlerin eğilme rijitlikleri Çizelge 2.6. ve kirişlerin enerji tüketme kapasiteleri Çizelge 2.7.'de sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Kirişlere ait süneklik oranları

<b>Deney Elemanı</b>	<b>Akma Anındaki Deplasman (<math>\delta_y</math>) mm</b>	<b>Kopma Anındaki Deplasman (<math>\delta_u</math>) mm</b>	<b>Süneklik (<math>\delta_u/\delta_y</math>)</b>
K1	6,2	35,0	5,6
K2	6,1	28,4	4,7
K3	6,0	31,2	5,2
K4	5,1	35,3	6,9
K5	5,0	23,8	4,8
K6	4,6	30,7	6,7
RKM1	6,9	43,1	6,2
RKM2	8,0	49,8	6,2
RKM3	7,0	48,2	6,9

Çizelge 2.6. Kirişlerin eğilme rijitlikleri

<b>Deney Elemanı</b>	<b>Akmanın Rijitliği (kN/mm)</b>	<b>Kopmanın Rijitliği (kN/mm)</b>
K1	3,73	0,67
K2	3,73	0,80
K3	3,73	0,70
K4	4,33	0,67
K5	4,70	0,93
K6	4,70	0,75
RKM1	3,48	0,57
RKM2	3,27	0,55
RKM3	3,73	0,60

Çizelge 2.7. Kirişlerin enerji tüketme kapasiteleri

Deney Elemanı	Enerji Tüketme Kapasitesi (kNmm)
K1	168119,79
K2	133091,99
K3	145486,86
K4	174353,92
K5	111402,98
K6	154353,48
RKM1	160430,42
RKM2	195658,12
RKM3	164760,39

Deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Araştırmaya esas olan kiriş alt yüzeyinin pas payına kadar açılarak eski kiriş çevresinin tam etriyelerle sarılması ve kiriş çekme bölgesine iki adet donatı yerleştirilmesi yöntemiyle başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- Mantolama yapılan kirişler referans kirişlerle aynı davranışı sergilemiş olup bütün deney elemanlarında hedeflenen dayanımlara hemen hemen ulaşılmıştır.
- Güçlendirilen kirişler kendi aralarında yakın süneklik oranları göstermelerine rağmen referans kirişlere oranla daha az bir süneklik göstermişlerdir. Buna rağmen hedeflenen süneklik oranlarına ulaşmışlardır.
- Bütün deney elemanlarının rijitlik değerlerine bakıldığında onarılmış kirişlerin daha fazla rijit oldukları gözlemlenmiştir. Ancak bütün elemanlarda yeterli rijitlik elde edilememiştir.
- Güçlendirilmiş deney elemanların hepsinde enerji tutma kapasitelerinin onarım öncesindeki kiriş kesitine oranla daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Güçlendirilmiş bütün deney elemanlarının taşıdığı maksimum yük güçlendirilme yapılmadan önceki duruma göre daha fazladır. Bütün kirişlerin kırılma modu eğilme kırılmasıdır. Onarılan kirişlerin taşıdığı maksimum yük referans kirişlerin taşıdığı maksimum yükleri aşmamıştır.
- Bütün kirişlerde akma durumuna ulaşılmıştır. Kirişlerde onarım kısa sürede yapılmıştır. Onarılan kiriş yüzeylerinin hazırlığının iyi olması aderansı arttırmıştır.

Önal ve diğerleri (2005) çalışmasında betonarme taşıyıcı elemanlardan, düşey yükler altında hasar gören ve onarımı mümkün olan (orta hasarı aşmayacak durumda) betonarme kirişlerin boyuna donatı, sargı donatısı ve beton ilavesi ile yeni bir beton katmanı oluşturulması şeklindeki (mantolama) onarımı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma altısı referans, altısı üzerinde de alttan U şeklinde etriyeler sarılarak çekme donatısı ilave edilip mantolanan toplam 12 kiriş üzerinde yapılmıştır. Serbest açıklığı 2000 mm olan basit mesnetli dikdörtgen kesitli

kirişler üretilmiştir. Üretilen kirişlerde C16 hazır betonu ve S420 yapı çeliği kullanılmıştır. Çizelge 2.8.'de verildiği gibi 12 adet deney elemanı üç seri olarak planlanmış ve her bir dökümde üçer adet olmak üzere 9 adet 100x160x2200 mm ebadında C16 betonu ve S420 çeliği kullanılarak üretilen kirişlerin esas donatısı 2Ø12, montaj donatısı 2Ø8 ve etriyesi ise Ø8/150' dir. Üç adet de mantolama sonucunda ulaşılan kesitte elde edilen değerlerle karşılaştırmak için C30 betonu ve S420 yapı çeliği kullanılarak donatı oranı aynı olmak kaydıyla referans kiriş üretilmiştir. Üretilen referans kirişlerde çekme bölgesinde 4Ø12 donatı kullanılmıştır.

Çizelge 2.8. Deney elemanları

Deney Elemanı	İşlem Türü ve Kesiti (mm)	Numune Hazırlama Yöntemi
KM11 KM12 KM13 KM21 KM22 KM23	Önce 100x160 Onarıldıktan sonra 160x260	Mantolama: Kirişe alt tarafından U şeklinde etriye ve 2Ø12 donatı ilave edilmiştir.
RKMk1 RKMk2 RKMk3	100x160	100x160 mm kesitli referans kiriş
RKMb1 RKMb2 RKMb3	160x260	160x260 mm kesitli referans kiriş

Elde edilen kirişlerden 3 seri kiriş (3x3=9 adet) 200 cm açıklıkta bir ucu sabit diğer ucu hareketli basit mesnetli deney setinde orta derecede hasar (kirişlerde 2 mm civarında çatlakların oluşumu) verene kadar yükleme yapılmıştır. Yükleme 1962 N'luk artışlar halinde uygulanmıştır. Her yük aşamasında 1/2 ve 1/4 açıklıklarında oluşan deplasman değerleri kompratörlerden serbest gözle okunarak kaydedilmiştir. Kirişler önceden hesaplanmış taşıma gücüne kadar yüklenmiş, fakat donatının tamamen akmasına ve basınç bölgesindeki betonun ezilmesine ulaşmadan, yaklaşık olarak 8 mm kalıcı sehim olana kadar çalışmaya devam edilmiştir. (Önal ve diğerleri, 2005).

Birinci serideki deney kirişleri KM11, KM12, KM13 olarak adlandırılmıştır. Birinci serideki kirişlerin çatlakları açıklık ortasında ve eğilme çatlakları olduğu yük arttıkça çatlak sayısında ve genişliğinde de artış olduğu gözlenmiştir. Çatlak uzunlukları dik olarak basınç bölgesine taşınmış ve kiriş üst yüzeyine 40 mm kalana kadar uzanmıştır.

İkinci serideki kirişler KM 21, KM 22, KM 23 olarak isimlendirilmiştir. Bu serideki kirişler yukarıda anlatıldığı gibi kırılarak hasar verilmiştir. Kirişlere hasar verilirken uygulanan yük, yük

tablasından ve deplasman değerleri de komparatörden okunarak kaydedilmiştir. Hasar verilen kirişlerin hesap değerleri Çizelge 2.9.'da sunulmuştur.

Çizelge 2.9. Hasar verilen kirişlerin teorik ve deney değerleri

Numunenin Adı	Teorik M max. kN.mm	Deney M max. kN.mm	Teorik Pu kN	Deney Pu kN	Merkez Çökme mm
KM11	10630x10 <sup>3</sup>	11000x10 <sup>3</sup>	21,26	22,0	19,00
KM12	10630x10 <sup>3</sup>	12000x10 <sup>3</sup>	21,26	24,0	18,75
KM13	10630x10 <sup>3</sup>	11000x10 <sup>3</sup>	21,26	22,0	22,00
KM21	10630x10 <sup>3</sup>	10000x10 <sup>3</sup>	21,26	20,0	14,00
KM22	10630x10 <sup>3</sup>	10500x10 <sup>3</sup>	21,26	21,0	13,90
KM23	10630x10 <sup>3</sup>	11000x10 <sup>3</sup>	21,26	22,0	10,70
RKMk1	10630x10 <sup>3</sup>	9500x10 <sup>3</sup>	21,26	19,0	32,10
RKMk2	10630x10 <sup>3</sup>	10500x10 <sup>3</sup>	21,26	21,0	27,60
RKMk3	10630x10 <sup>3</sup>	10000x10 <sup>3</sup>	21,26	24,0	31,25

9 adet kirişe hasar verildikten sonra güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Beton enkesit alanının yeniden eklenecek beton alanı ile derinleştirilmesi, bu eklenen alana yeni çekme donatılarının konması, bunu yaparken de yeni ve eski betonların birbirine kaynaştırılmasında sorun olmaması için eski kiriş yüzeyleri çentikler açılarak pürüzlendirilmiştir. Kiriş alt bölgesi pas payına kadar açılmıştır. Böylece yeni konulan donatıların eski donatılara ankraji sağlanmıştır. Hasarlı kirişlerin birinci ve ikinci grubuna (6 kiriş) alttan 2Ø12 çekme donatısı ve eski etriyelerin arasına U şeklinde Ø8/150 mm etriyeler yerleştirilmiştir. Çimento ağırlığının %1,4 oranında normal akışkanlaştırıcı katılarak elde edilen C 30 betonu ile çevresi sarılarak kirişin onarımı yapılmıştır.

Güçlendirilen 6 kiriş ile 3 adet referans kiriş (RKMb1, RKMb2, RKMb3) ve 3 adet orta hasarlı referans kiriş (RKMk1, RKMk2, RKMk3) aynı yöntemle yüklemeye tabi tutulmuştur. Kirişlere hasar verilirken uygulanan yük, yük tablasından ve deplasman değerleri de komparatörden okunarak kaydedilmiştir. Onarımı yapılan kirişler ile referans kirişlerin hesap değerleri Çizelge 2.10' da sunulmuştur.

Çizelge 2.10. Güçlendirilen kirişler ile referans kirişlerin teorik ve deney değerleri

Numunenin Adı	Teorik M max. kN.mm	Deney M max. kN.mm	Teorik Pu kN	Deney Pu kN	Merkez Çökme mm
KM11	26000x10 <sup>3</sup>	27300x10 <sup>3</sup>	52.00	34,0	31,0
KM12	26000x10 <sup>3</sup>	27850x10 <sup>3</sup>	52.00	33,5	28,0
KM13	26000x10 <sup>3</sup>	26540x10 <sup>3</sup>	52.00	32,5	29,0
KM21	26000x10 <sup>3</sup>	25370x10 <sup>3</sup>	52.00	35,0	26,5
KM22	26000x10 <sup>3</sup>	25500x10 <sup>3</sup>	52.00	34,5	28,4
KM23	26000x10 <sup>3</sup>	25000x10 <sup>3</sup>	52.00	34,0	27,0
RKMk1	10630x10 <sup>3</sup>	9500x10 <sup>3</sup>	21,26	13,5	28,0
RKMk2	10630x10 <sup>3</sup>	10500x10 <sup>3</sup>	21,26	13,6	32,5
RKMk3	10630x10 <sup>3</sup>	10000x10 <sup>3</sup>	21,26	13,6	28,0
RKMb1	26700x10 <sup>3</sup>	27140x10 <sup>3</sup>	53,40	42,0	43,0
RKMb2	26700x10 <sup>3</sup>	26970x10 <sup>3</sup>	53,40	46,5	50,0
RKMb3	26700x10 <sup>3</sup>	27018x10 <sup>3</sup>	53,40	46,0	43,0

Deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Mantolanan deney elemanlarının tümünde enine donatının kenetlenmesi başarılı olmuştur. Yeni donatının ankraji başarılı olarak gerçekleşmiş ve tam olarak sürekli donatı davranışı elde edilmiştir. Ayrıca eski kirişin C 16 betonu ile yeni mantolamada kullanılan C 30 betonu arasında süreklilik ve yük aktarımı hususunda tam bir kaynaşma sağlamış ve herhangi bir sorun olmamıştır.

- Birinci ve ikinci seri kirişler, alttan U yarım etriyeleri ile bağlanarak donatı ilave edilip onarılan kirişlerin taşıma gücü çok az farklılıkla hemen hemen aynı, enerji yutma kapasiteleri birbirine çok yakın, rijitliklerindeki azalma KM11 hariç diğerlerinin değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Sünek davranışlarında ise KM21 ve KM23 modelleri eksik sünek davranışı göstermişlerdir.

- Onarım için hazırlanan modellerin dayanım ve eğilme davranışları incelendiği zaman bütün kirişlerin onarımdan önce ulaştıkları maksimum yükü aştığı görülmüştür. Bütün kirişlerin kırılma şekli eğilme kırılmasıdır. Onarılan kirişlerin gücü referans kirişlerin gücüne yakındır. Onarım sonucu artan kesit ve donatı yüzdesi nedeni ile kirişler rijitleşmiştir. Yük taşıma kapasiteleri ve enerji yutma kapasiteleri daha büyüktür. Bütün elemanlarda akma durumuna ulaşılmıştır. Elemanlarda onarım ve güçlendirme işlemi kısa sürede yapılmıştır. Onarılan kiriş yüzeylerinin hazırlığının iyi olması aderansı arttırmıştır.

- Genel olarak uygulanan onarım ve güçlendirme yöntemlerinden mantolamada başarılı bir sonuç alınmıştır.

Altun ve diğerleri (2002) çalışmasında deprem sonrası güçlendirilmiş betonarme kiriş elemanların taşıma gücü performanslarının deneysel incelenmesine yönelik araştırma

yapılmıştır. Bu amaçla, kiriş elemanları 200 cm uzunluğunda 15x15 cm, 20x15 cm ve 20x20 cm kesitlerinde toplam 9 adet imal edilmiştir. Betonarme kirişler uygun kür şartlarında 28 gün bekletilerek statik yükler altında deneye tabii tutulmuştur. Bu kirişler maksimum hasar seviyesine kadar yüklenerek hasar verilmiştir. Hasarlı betonarme kirişler pas payları alındıktan sonra çekme kırılması oluşacak şekilde dizayn edilerek mantolanmıştır. Çalışmada mevcut donatılar ile mantolu kesit donatıları Z demiri ile birbirlerine bağlanmıştır. Betonarme kirişler için 10 cm kalınlığında manto betonu imal edilerek 200 cm uzunluğunda 35x35 cm, 40x35 cm ve 40x40 cm kesitlerinde toplam 9 adet mantolu betonarme kiriş eleman üretilmiştir.

Betonarme kiriş elemanlar 200 cm açıklığında 15x15 cm, 20x15 cm, 20x20 cm. boyutlarında 3x3 adet olarak çekme kırılması oluşacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Deneylerde C20 betonu ve S420 sınıfı donatı çeliği kullanılmıştır. Kırılan kirişlerin donatı detayları ile deneysel ve teorik kırılma yükleri Çizelge 2.11.'de verilmiştir.

Çizelge 2.11. Hasarlı kirişlerin donatı detayları ile deneysel ve teorik kırılma yükleri

<b>Deney Elemanı</b>	<b>Çekme Donatısı mm</b>	<b>Kesme Donatısı mm</b>	<b>Teorik Kırılma Yüğü kN</b>	<b>Deneysel Kırılma Yüğü kN</b>
No:1 15x15 cm	2Ø12	Ø8/10	8,52	19,9
No:2 15x15 cm	2Ø12	Ø8/10	8,52	23,3
No:3 15x15 cm	2Ø12	Ø8/10	8,52	23,0
No:1 20x15 cm	3Ø12	Ø8/10	12,9	31,5
No:2 20x15 cm	3Ø12	Ø8/10	12,9	28,1
No:3 20x15 cm	3Ø12	Ø8/10	12,9	28,5
No:1 20x20 cm	3Ø12	Ø8/10	19,6	55,5
No:2 20x20 cm	3Ø12	Ø8/10	19,6	62,6
No:3 20x20 cm	3Ø12	Ø8/10	19,6	62,2



Statik yükler altında mevcut kirişlere hasar verildikten sonra deformasyonlu halde yükleme bırakılmış ve betonarme kirişte güçlendirme deformasyonlu halde iken yapılmıştır. Pas payı alınmış hasarlı kiriş ile yeni kiriş elemanı donatı kafesi içerisine yerleştirilip beton dökülerek mantolu betonarme kiriş imalatı gerçekleştirilmiştir. Yeni kesitli numuneler 28 gün sonunda statik yükler altında yüklenerek taşıma gücü değerleri deneysel olarak bulunmuştur. Yapılan mantolama tekniğinde yeni donatıların Z demirleri yardımıyla çok kısa süreli kaynaklama sonucunda mevcut donatılarla kenetlenmeleri sağlanmıştır. Böylelikle elemanın kesme ve eğilme dayanımı artırılmıştır. Betonarme hesaplamalarda mantolamada çekirdek bölgesi kirişinin çekme ve kesme donatıları ihmal edilerek, yeni kesit boyutlarına göre donatı dizaynı yapılmıştır. Kesitin bu şekilde dizaynı atalet değerlerini artırıp buna bağlı olarak da gerilme değerleri azaldığı için teorik olarak kesit taşıma gücünde önemli artışlar olabilmektedir. (Gavrilovic et al, 1983, Demir, 1992). İmal edilen yeni donatı kafesi teşkili ve Z demiri uygulama detayı Şekil 2.8'de sunulmuştur.



Şekil 2.8. Yeni donatı kafesi teşkili ve Z demiri uygulama detayı

Mantolu betonarme kirişler 28 gün sonunda statik yükler altında deneye tabii tutularak kırılmıştır. Mantolanıp yüklenen kirişlere ait donatı detayları ile deneysel ve teorik kırılma yüklerine ait sonuçlar Çizelge 2.12.'de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Mantolu kirişlerin donatı detayları ile deneysel ve teorik kırılma yükleri

<b>Deney Elemanı</b>	<b>Çekme Donatısı mm</b>	<b>Kesme Donatısı mm</b>	<b>Teorik Kırılma Yüğü kN</b>	<b>Deneysel Kırılma Yüğü kN</b>
No:1 35x35 cm	4Ø12	Ø8/10	118,1	262,5
No:2 35x35 cm	4Ø12	Ø8/10	118,1	247,3
No:3 35x35 cm	4Ø12	Ø8/10	118,1	245,8
No:1 40x35 cm	5Ø12	Ø8/10	145,3	283,0
No:2 40x35 cm	5Ø12	Ø8/10	145,3	295,8
No:3 40x35 cm	5Ø12	Ø8/10	145,3	295,2
No:1 40x40 cm	5Ø12	Ø8/10	171,1	337,0
No:2 40x40 cm	5Ø12	Ø8/10	171,1	342,5
No:3 40x40 cm	5Ø12	Ø8/10	171,1	339,0

Deney sonrası aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Mantolu betonarme kiriş elemanı tipik kiriş davranışı sergileyerek kırılmıştır. Deney programının bütün elemanları göçmeye eğilmede çekme kırılması ile ulaşımlardır.
- Mevcut ve mantolu betonarme kirişlerin deneysel taşıma gücü değerleri ile teorik taşıma gücü değerleri arasında artı bir kapasite bulunmuştur. Bu oranlar mevcut kirişlerde ortalama 2.64 iken mantolu betonarme kirişlerde ortalama 2.00 civarında gerçekleşmiştir.
- Mantolu betonarme kiriş elemanların taşıma gücü sonuçları incelendiğinde betonarme kesitten beklenen davranışı sergilediği için farklı zamanlarda imal beton tabakalarının, birlikte çalışmış olduğunu göstermiştir. Ancak kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde mantolu betonarme kirişlerin kesit alanları arttıkça süneklik özelliklerinin azaldığı dolayısıyla enerji yutma kapasitelerinin düştüğü gözlenmiştir.

### 2.2.3. FRP (Fiber Reinforced Polymer) Elemanların İlavesi Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi

Vulaş (2010) çalışmasında kesme dayanımı yetersiz kirişlerin lifli polimerler ile yapıştırılarak güçlendirilmesi yöntemini araştırmıştır. Bu yöntemi uygularken döşemeye ankraj yapmanın ve farklı mekanik özelliklere sahip karbon lifli polimer şerit, cam lifli polimer şerit, yüksek elastisite modüllü liflere sahip lifli polimer şeritlerin dayanıma ve davranışa etkisinin irdelenmesi çalışmanın amacı olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda bir adet kontrol elemanı, güçlendirmede kullanılacak üç farklı malzemeyi döşemeye ankraj yaparak ve yapmayarak test etmek için altı adet eleman olmak üzere toplam yedi adet T kesitli basit mesnetli kesmeye karşı yetersiz deney elemanı modellenerek tasarlanmış ve imal edilmiştir. İmal edilen bütün kirişlerde geometri, boyuna donatı çapı ve adedi, etriye çapı ve aralıkları aynıdır. Ayrıca güçlendirmede kullanılan FRP şeritlerin tamamı aynı kalınlıkta ve eksenden eksene aynı aralıkta yapıştırılmıştır. Deneysel programda göz önünde bulundurulmuş parametre her bir FRP malzemesinin döşemeye ankrajlı ve ankrajsız olarak yapıştırılmasıdır.

Çalışmada üç farklı FRP (Fiber Reinforced Polimer) lif kullanılmıştır. Bunlar GFRP (cam lifli polimer), CFRP ( karbon lifli polimer) ve Hi-CFRP ( yüksek elastisite modüllü karbon lifli polimer) 'dir.

Yapısal güçlendirmeler esnasında, CFRP liflerin ve GFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması için kullanılan yapıştırıcı Sikadur 330 iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesidir. Hi-CFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması için yapıştırıcı olarak Sikadur 300 iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesi kullanılmıştır. Ayrıca tüm ankrajlı deney kirişlerinde, CFRP, GFRP ve Hi-CFRP ankraj çivilerinin, kiriş tabliye altının kiriş yan yüzeyleri ile birleştiği bölgelerde tabliye içine doğru 45° açı yapacak şekilde açılan ankraj deliklerine yerleştirilmesi esnasında da epoksi olarak Sikadur 330 kullanılmıştır.

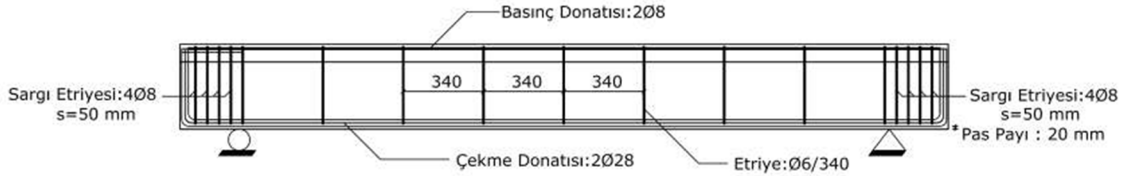
Tüm deney elemanlarında, beton basınç dayanımı  $f_{ck} = 12$  MPa, pas payı 20 mm, çekme donatı çapı  $d = 28$  mm (2Ø28), basınç donatısı çapı  $d = 8$  mm (2Ø8), enine donatı çapı  $d_w = 6$  mm ve enine donatı aralığı merkezden merkeze 340 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Deney elemanlarında BÇ-IIIa kalitesinde nervürlü çelikler kullanılmıştır. Numune adlandırılmada kullanılan ilk karakter olan B bloğu Türkçede kiriş kelimesinin İngilizcedeki karşılığı olan beam kelimesini belirtmektedir. Numune adlandırılmasında kullanılan ikinci karakter bloğu kesme güçlendirmesinde kullanılan lifli polimer elyafın cinsini belirtmektedir. İkinci bloktaki C ifadesi CFRP'nin, G ifadesi GFRP'nin, H ifadesi ise Hi-CFRP' nin kullanıldığını ifade etmektedir. Numune adlandırılmasında kullanılan üçüncü karakter bloğu kesme güçlendirmesinde kullanılan lifli polimer elyafın kirişe yapıştırılma şeklini belirtmektedir. Üçüncü bloktaki U ifadesi kirişe yapıştırılan lifli polimer elyafın uçlardan kiriş tabliyesine ankre edilmediğini, A ifadesi ise lifli polimer elyafın uçlarından kiriş tabliyesine ankre edildiğini ifade etmektedir. Şahit numunenin adlandırılmasında herhangi bir güçlendirme uygulanmadığından sadece ikinci blok kullanılmış

olup V ile ifade edilmiştir. Örnek olarak güçlendirme esnasında CFRP kullanılmış, yapıştırma şekli ankrajlı olarak uygulanmış numunenin adlandırılması BCA şeklindedir. Deney elemanlarının adlandırılması ve özellikleri Çizelge 2.13.'te gösterilmiştir.

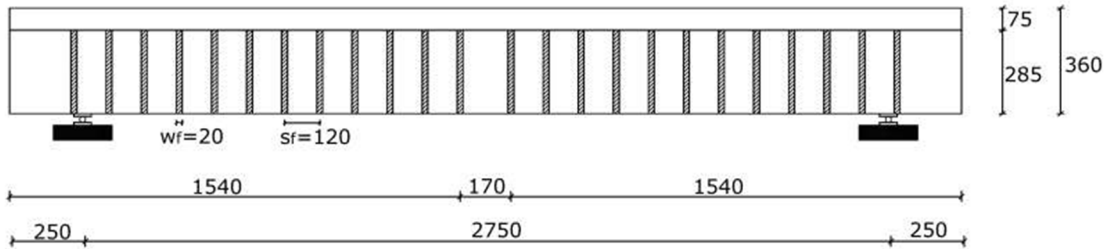
Çizelge 2.13. Deney elemanlarının adlandırılması ve özellikleri

Numune Adı	Hedef Beton Dayanımı (MPa)	Çekme Donatısı Çapı (mm)	Basınç Donatısı Çapı (mm)	Etriye Çapı/Aralığı (mm/mm)	Yapıştırılan Lifin Cinsi
BV	12	28	8	6/340	-
BCU	12	28	8	6/340	CFRP
BCA	12	28	8	6/340	CFRP
BGU	12	28	8	6/340	GFRP
BGA	12	28	8	6/340	GFRP
BHU	12	28	8	6/340	Hi-CFRP
BHA	12	28	8	6/340	Hi-CFRP

Deney numunelerinin donatı yerleşim detayı, deney numunesi üzerine FRP şeritlerin yapıştırma planı, güçlendirmede kullanılan FRP liflerin kesit planı ve FRP ankraj çivilerinin kesit planı sırasıyla Şekil 2.9., Şekil 2.10., Şekil 2.11. ve Şekil 2.12.'de sunulmuştur.

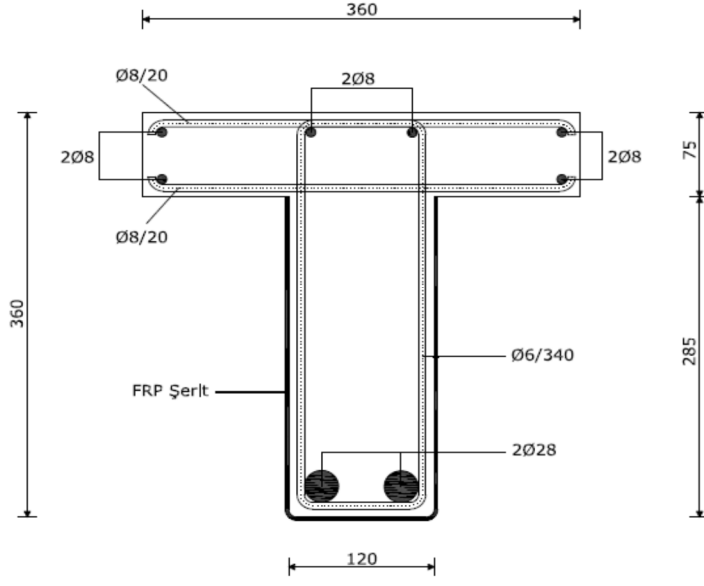


Şekil 2.9. Deney numunelerinin donatı yerleşim detayı



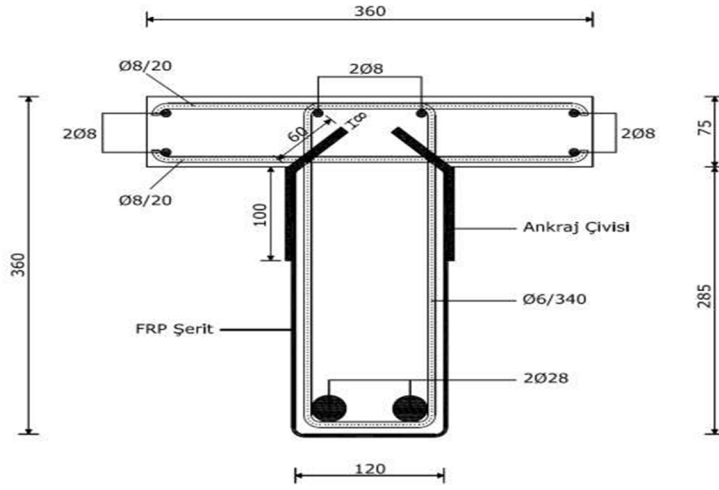
(Not: ölçüler mm'dir)

Şekil 2.10. Deney numunesi üzerine FRP şeritlerin yapıştırılması planı



(Not: ölçüler mm'dir. Köşeler  $r = 15$  mm yuvarlatılmıştır.)

Şekil 2.11. Güçlendirmede kullanılan FRP liflerin kesit planı



(Not: ölçüler mm'dir)

Şekil 2.12. FRP ankraj çivilerinin kesit planı

Üretilen deneyi numuneleri hidrolik krika ile yüklenerek kesme testlerine tabi tutulmuş ve deney süresince numunelerde oluşan kesme çatlakları genişliği ve FRP liflerin üzerinde meydana gelen birim deformasyonlar kaydedilmiştir. Yapılan yüklemde kesme açıklığı 1290 mm, kiriş faydalı derinliği ise 340 mm dir. Deney sonucunda elde edilen veriler ışığında numunelerin ilk çatlama ve göçme anında göstermiş oldukları kesme kuvvetleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 2.14. Numunelerin ilk çatlama ve göçme anında taşıdıkları kesme kuvvetleri

Yük Türü \ Numune	BV	BCU	BCA	BGU	BGA	BHU	BHA
<b>Gözlenebilen İlk Kılcal Çatlağın Açıldığı Yük (kN)</b>	28	35	40	35	42	35	35
<b>Kesme Göçmesinin Gerçekleştiği Yük (kN)</b>	55	62	82	61	77,5	55	62

Deney verileri ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Deneyler neticesinde test edilen tüm kirişlerde kesme göçmesi gözlenmiştir. Tüm kirişlerde sağ ya da sol kesme açıklığında açılan kesme çatlağının döşemeye ulaşmasından sonra deneyler sonlandırılmıştır. Çekme donatılarının yüksek moment kapasitesi ihtiyacı sebebiyle büyük çapta seçilmesi nedeniyle ( $\varnothing 28$ ) deneyler esnasında açılan ve göçme mekanizmasının olduğu ana kesme çatlakları, çekme donatısı boyunca mesnet bölgesine doğru ilerlemiş ve çok büyük çatlak genişliklerine ulaşmıştır. Hatta şahit numunede dışarıdan herhangi bir FRP elyaf yapıştırılmadığından kirişin dış yüzeyinde betonu saracak bir sargılama olmaması nedeniyle açılan çatlak neticesinde pas payı olarak nitelendirilen bölge çatlak boyunca dökülmüş ve çekme donatıları ortaya çıkmıştır.
- Kirişlere FRP şeritlerin yapıştırılması ile yapılan güçlendirilme yönteminde, bu şeritlerin ankraj çivileri yardımıyla döşemeye monte edilmesi ile yapılan uygulama, tek başına U şeklinde yapıştırılan FRP şeritlere göre güçlendirmede çok daha etkindir.
- Mekanik özellikleri nedeniyle çok gevrek bir malzeme olan Hi-CFRP liflerin U şeklinde bükülmesi ve kirişlerin yüzeyine, köşeleri eğrileştirilmiş olmasına rağmen, yapıştırılması esnasında çok sıkça kopması nedeniyle kesme güçlendirmesinde Hi-CFRP liflerin kullanılması önerilmemektedir.
- Cam Elyaf ve normal elastisite modüllü Karbon Elyaf ile güçlendirilen elemanlarda FRP şerit altında oluşan çatlakların zamanla genişledikleri ve bu genişleyen çatlakları geçen FRP şeritlerin ilerleyen deformasyon seviyelerinde koparak kirişlerde güç tükenmesine ulaşıldığı gözlenmiştir. Diğer taraftan yüksek elastisite modüllü Karbon Elyaf (Hi-CFRP) ile güçlendirilen numunelerde FRP şeridinin altında oluşan ilk kılcal çatlak Hi-CFRP liflerin kopmasına sebep olduğu ve Hi-CFRP ile güçlendirilen numunelerin ankraj detayından bağımsız olmak kaydıyla şahit numune kapasitesinden daha yukarı çıkamadığı gözlenmiştir.

Dündar (2008) çalışmasında kesme dayanımı yetersiz dikdörtgen kesitli kirişlerin lifli polimerler (CFRP) ile yapıştırılarak güçlendirilmesi yöntemini araştırmıştır. Bu çalışmanın amacı kesme kapasitesi yetersiz olan betonarme kirişlerin kesme kapasitesini arttırmaya yönelik bir

güçlendirme tekniği olarak uygulamada yaygın bir biçimde kullanılan, kirişlerin kesme bölgesinin CFRP ile kaplanması yönteminin, kiriş davranış ve dayanımı üzerindeki etkilerinin deneysel araştırılması, çeşitli değişkenlere bağlı olarak elde edilecek sonuçlarla sağlıklı bir hesap yönteminin geliştirilmesi ve uygulama ilkelerinin belirlenmesidir. Bu amaçla 150x250x2200 mm ebatlarında, C20 betonu ve S420 inşaat çeliği kullanılarak 9 adet kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Üretilen dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin 3 tanesi kontrol numunesidir. Diğer kirişlerin üretimi ise 3 tane deney numunesinin eğilme bölgesine ve CFRP'nin 45° açıyla kesme bölgesine, 3 tanesinin de eğilme bölgesine ve CFRP'nin 90° açıyla kesme bölgesine sarılması amacıyla yapılmıştır. 9 adet kiriş numunesinin tamamının köşeleri yarıçapı 30 mm olacak şekilde yuvarlatılmıştır. Deneyde üretilen kiriş numunelerinin sembol ve isimleri Çizelge 2.15.'de sunulmuştur.

Çizelge 2.15. Kiriş numunelerinin sembol ve isimleri

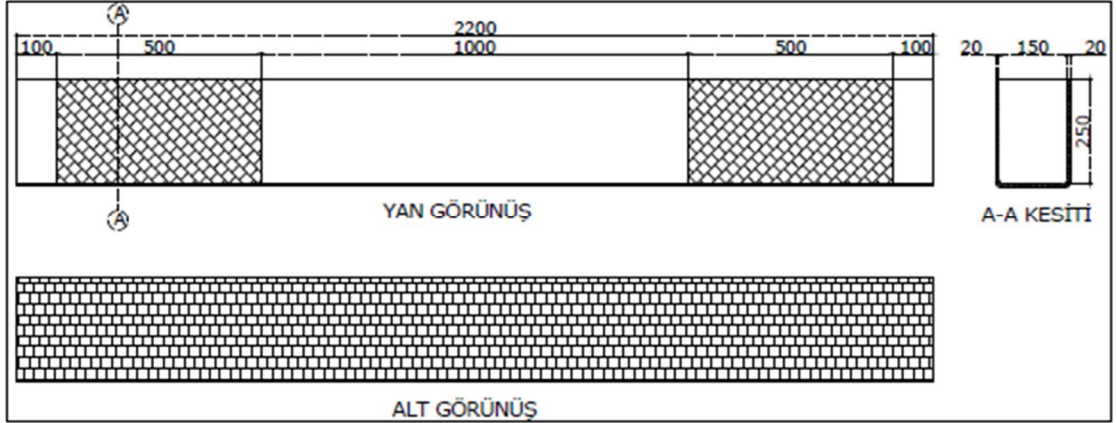
Deney Numuneleri Sembolleri	Güçlendirme Malzemesi ve Şekli
K01	Güçlendirme Yapılmayan Kontrol Numunesi
K02	Güçlendirme Yapılmayan Kontrol Numunesi
K03	Güçlendirme Yapılmayan Kontrol Numunesi
KE01	45°'lik açıyla uygulanan CFRP'li Kiriş Numunesi
KE02	45°'lik açıyla uygulanan CFRP'li Kiriş Numunesi
KE03	45°'lik açıyla uygulanan CFRP'li Kiriş Numunesi
KD01	90°'lik açıyla uygulanan CFRP'li Kiriş Numunesi
KD02	90°'lik açıyla uygulanan CFRP'li Kiriş Numunesi
KD03	90°'lik açıyla uygulanan CFRP'li Kiriş Numunesi

Deneyde üretilen kirişlerin ölçüleri ve donatı oranları aynıdır. Donatı olarak 8 mm'lik ve 6 mm'lik nervürlü inşaat çeliği kullanılmıştır. Kiriş çekme bölgesinde 3Ø8, basınç bölgesinde ise 2Ø8 donatı kullanılmış olup enine donatılar Ø6/100 mm olarak üretilmişlerdir..

Güçlendirilecek deney numunelerinde kullanılan CFRP şeritler MBRACE® FIBER C1-30 karbon lifli dokuma malzemesi kullanılmıştır. MBRACE® FIBER, Mbrace® FRP (lifli polimer) sistemi içinde yer alan karbon, cam veya aramid esaslı, tek yönlü, lifli polimer kumaş (FRP) malzemelerdir. CFRP, Karbon liflerden oluşan 330 g/m<sup>2</sup> ağırlığındaki tek doğrultuda ve lifli polimer olan fiber 0,50x50 m rulo şeklindedir. Kirişin yüzeylerine uygulanacak CFRP şeritlerinin kiriş numunelerine yapıştırılmasında MBT-MBRACE® ADESIVO (SATURANT) marka yapıştırıcı

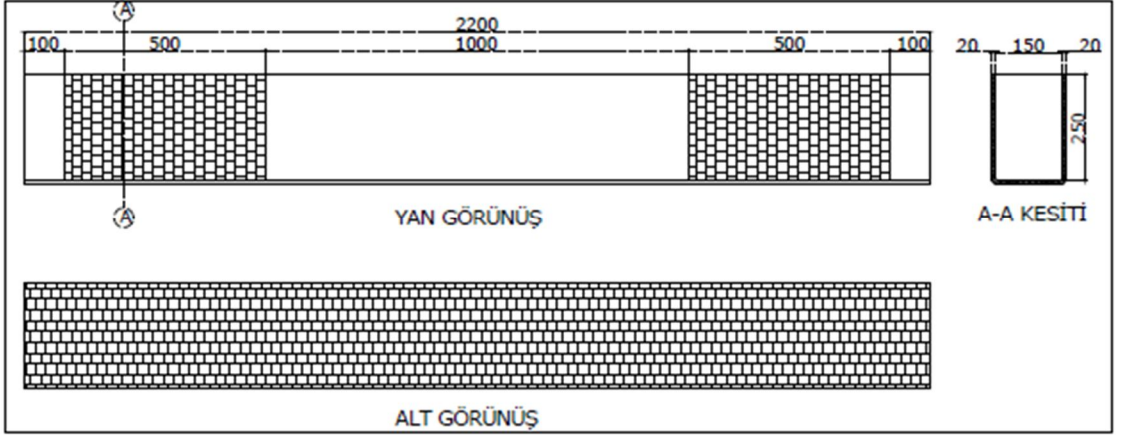
kullanılmıştır. Yapıştırma sistemi için özel olarak geliştirilmiş, iki bileşenli, solventsiz, yüksek dayanımlı, epoksi esaslı özel yapıştırıcı kullanılmıştır.

Tüm kiriş numuneleri alt tarafında iki köşesi boydan 30 mm yarıçap ile yuvarlatılmıştır. İlk üç numune kontrol numunesi olarak ayrılmıştır. Bu numunelere hiç bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Diğer 6 numunenin eğilme ve kesme bölgesinde güçlendirmesi yapılmıştır. Kesme bölgelerinin güçlendirilmesinde CFRP tekstillerinin iki farklı açıda uygulaması yapılmıştır. Birinci ve ikinci uygulamada CFRP 45° ve 90°'lik açıyla kesme bölgesine sarılmıştır (Şekil 2.13. ve Şekil 2.14.). Kiriş her iki yanı, kösedan 100 mm içeride olmak kaydıyla yan yüzeyi 500 mm boyunda çizilerek güçlendirme bölgesi belirlenmiştir. Epoksi tekstillerin yapıştırılacağı işaretli bölgeye ilk kat için 1,8 kg/m<sup>2</sup>, ölçüsünde epoksi sürülmüştür. 6 kiriş numunesine CFRP tekstilleri altta hava kalmayacak şekilde yapıştırılmıştır. Bir gün sonra CFRP üstü 0,9 kg/m<sup>2</sup> miktar epoksi ile kapatılmıştır. Bir hafta sonra çatlak tespiti yapmakta kullanılacak olan birim deformasyon ölçerler tespit edilen yerlere epoksi ile yapıştırılmıştır. Bu işlemten 10 gün sonra kiriş numunelerine yükleme deneyleri yapılmıştır. Kiriş numuneler üzerinde önceden belirlenmiş 3 bölgeden çatlak değişimleri izlenmiştir. Hassasiyeti 0.01mm olan deplasman ölçer LVDT kirisin tam ortasına yerleştirilmiştir.



Şekil 2.13. 45°'lik açıyla uygulanan CFRP'li kiriş





Şekil 2.14. 90°'lik açıyla uygulanan CFRP'li kiriş

Yükleme deney elemanına hidrolik pres ile kiriş açıklığının üst kısmından iki noktadan uygulanmıştır. Kirişin oturduğu açıklık 2000 mm'dir. Üstten yük uygulama açıklığı 666 mm olarak ayarlanmıştır.

Deney numunelerinde güçlendirme sonunda dayanımda artışlar görülürken deplasman değerlerinde ise azalmalar olmuştur. KE numunelerinde kirişlerin dayanım artışı %50 olurken %50 deplasman azalması, KD numunelerinde ise kirişlerin dayanım artışı %70 olurken %50 deplasman azalması olmuştur. Kiriş numunelerinin en fazla yük karşısındaki deplasman değerleri aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 2.16. Kiriş numunelerinin en fazla yük karşısındaki deplasman değerleri

Kiriş Numuneler	En Büyük Yük (kN)	Deplasman (mm)
K01	45,99	14,25
K02	45,60	12,15
K03	45,90	12,73
KE01	67,69	6,51
KE02	66,65	7,15
KE03	65,56	6,12
KD01	75,64	5,76
KD02	76,44	6,45
KD03	79,19	8,17

Kirişlerin kesme bölgesinin bir yüzüne toplam 2 adet birim deformasyon ölçer 45° ve 30° açıyla yerleştirilmiştir. Aynı işlem eğilme bölgesi için de yapılmıştır.

Çizelge 2.17. Kiriş numunelerine yerleştirilen strengelerin şekli ve isimleri

Kanal	Koyuldukları Yere Göre Deformasyon Ölçerler
S1	45°'lik açıyla koyulan deformasyon ölçer
S2	30°'lik açıyla koyulan deformasyon ölçer
S3	Kirişin orta alt bölgesine koyulan deformasyon ölçer

Kontrol numunelerinde kesme çatlakları, ortalama S2'de 2,6 mm, S3'de 0,19 mm olmuştur. CFRP'li numunelerin S2 numarasında %99 çatlak azalması olurken, S3 kanalında %240 çatlaklar artmıştır. Kesme etkisinin S1 numaralı bölgeye kaydığı sonucu çıkarılmıştır.

Çizelge 2.18. Kiriş numunelerinin en fazla yüke karşı kesme çatlakları

Kiriş Numuneler	En Büyük Yük (kN)	S1-Birim Deformasyon Ölçer (mm)	S2-Birim Deformasyon Ölçer (mm)
K01	45,99	0,019	0,014
K02	45,60	0,017	0,086
K03	45,90	0,081	0,007
KE01	67,69	0,001	0,035
KE02	66,65	0,002	0,054
KE03	65,56	0,007	0,014
KD01	75,64	0,191	0,019
KD02	76,44	0,020	0,117
KD03	79,19	0,003	0,106

CFRP'li güçlendirme ile dayanım artışı gerçekleşmiş ve bu bölgedeki iyileşmeler kiriş rijitliğini arttırmıştır. Kirişlerdeki tüketilen enerji akma ve göçme noktaları bulunarak hesaplanmıştır. Bütün kirişler için elde edilen grafikler üzerinden hesaplanan alanlar Çizelge 2.19.'da sunulmuştur.

Çizelge 2.19. Kirişlerin enerji tüketme kapasiteleri

<b>Kiriş Numuneler</b>	<b>Max. Pu (kN)</b>	<b>Sehim (mm)</b>	<b>Enerji Tüketme Kapasitesi (Joule)</b>
K01	67,326	68,44	1918,29
K02	67,620	68,03	2756,88
K03	63,994	76,57	1659,56
KE01	97,873	39,14	1592,41
KE02	93,394	28,56	1811,86
KE03	90,091	34,65	1499,42
KD01	108,486	43,39	1888,56
KD02	96,716	29,57	1554,53
KD03	100,209	40,08	1764,95

Deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır,

- Güçlendirilen kirişler artan yükler etkisi ile gevrek kesme kırılması şeklinde göçmeye ulaşmıştır.
- Güçlendirilen deney elemanlarında dayanım olarak belirli oranda artış sağlanmasına rağmen süneklik ve enerji tüketimi yönünden kontrol elemanlarına göre önemli azalmalar olmuştur.
- Güçlendirmede kullanılan tekstiller tel, tel yırtılmıştır. Kenarlardan yukarı doğru kıvrılan CFRP'ler en çok hemen kıvrım bölgesinden 40 mm'lik bölgeden zorlandığı gözlenmiştir. Yanlardan 40 mm üstünün güçlendirmeye katkısının bu yöntemle fayda sağlamadığı gözlenmiştir.
- 90° açıyla uygulanan CFRP ile güçlendirilen kirişlerin dayanımı, 45° ile güçlendirilen kiriş numunelerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- 90° açıyla uygulanan CFRP ile güçlendirilen deney elemanları kontrol deney elemanlarına göre ortalama %60 daha fazla yük taşımışlardır. Bu oran 45° ile güçlendirilen elemanlarda %50 de kalmıştır.
- En büyük deplasman değerlerine kontrol numunelerinde ulaşılmış olup CFRP ile güçlendirilen numunelerde süneklik değerlerinde önemli düşüşler olmuştur.
- Kirişlerin eğilme çekme gerilmelerin en fazla olduğu kiriş alt ortasından ölçülen çatlak değerleri kontrol numunelerde 9.3 mm iken KD kirişlerde 0.25 mm, KE kirişlerde 0.74 mm olarak gerçekleştiği görülmüştür.
- Kirişlerdeki en fazla çatlama, kirişin 500 mm içe doğru birinci kesme bölgesine 45° ile yerleştirilen 150 mm boyundaki birim deformasyon ölçer kullanılarak ölçülebilmektedir. Kesme bölgelerinde kontrol numunelerinde 0.55 mm çatlama olmasına karşın, aynı yerde çatlama KE grubunda 0.29, KD grubunda 0.16 mm olarak gerçekleşmiştir.

Yazgı (2007) çalışmasında dikdörtgen kesitli basit mesnetlenmiş kirişlerin eğilme yönünden karbon ve cam liflerle güçlendirilmesini araştırmıştır. Çalışmasının amacı deprem yükleri ve çeşitli nedenlerle hasar gören kirişlerin yük altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemektir. Bu nedenle aşağıdaki parametrelerin etkinliği araştırılmıştır.

- Betonarme elemanın taşıma gücüne katkısı,
- FRP'nin davranışı,
- Teorik verilerin deney sonucu ile mukayesi,
- CFRP ile GFRP'nin arasındaki fark,
- FRP uygulama şeklinin güçlendirmeye katkısı,
- Kesme, eğilme ve basınç bölgelerindeki çatlaklar takip edilerek yük yer değiştirme değerleri karşılaştırılıp yorumlar yapılmıştır.

Çalışmada 160x200x2200 mm ebatlarında, C20 betonu ve S420 yapı çeliği kullanılarak 9 adet betonarme kiriş numuneleri üretilmiştir. Bütün kiriş numunelerinde 11Ø8 etriye kullanılmış olup kirişin her iki başında 1/3 kesme bölgesinde %50 sıklaştırma yapılarak her iki başa 3'er adet daha etriye yerleştirilmiş ve toplamda 17 adet etriye kullanılmıştır. Çekme bölgesinde ve basınç bölgesinde 2Ø8 donatı kullanılmıştır.

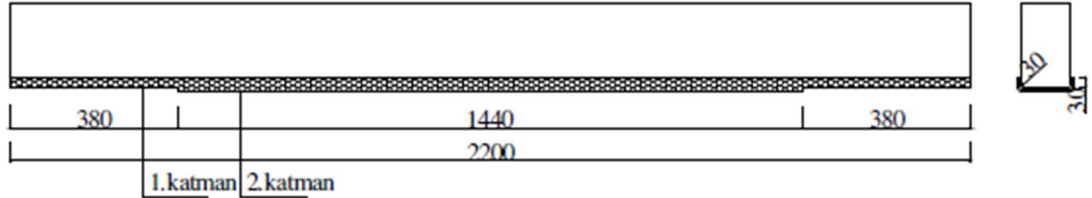
Üretilen kirişlerin sertbest açıklığı 2 metredir. Bu kirişlere CFRP ve GFRP tekstilleri kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Yapılan güçlendirme 3 kiriş tanık olmak üzere, 3 çift kat CFRP ve tek katı her iki uçtan 38 cm eksik şekilde, 3 çift kat GFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik şekilde eğilme ve çekme bölgesi güçlendirilmiştir. Kiriş numuneleri sembol ve isimleri aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2.20 Kiriş numuneleri sembol ve isimleri

Kiriş Numuneler	Güçlendirme Malzemesi ve Şekli
Ş01	Tanık
Ş02	Tanık
Ş03	Tanık
C04	Çift kat CFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik olacak şekilde eğilmede çekme
C05	Çift kat CFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik olacak şekilde eğilmede çekme
C06	Çift kat CFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik olacak şekilde eğilmede çekme
G07	Çift kat GFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik olacak şekilde eğilmede çekme
G08	Çift kat GFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik olacak şekilde eğilmede çekme
G09	Çift kat GFRP tek katı her iki uçtan 38 cm eksik olacak şekilde eğilmede çekme

Güçlendirmede kullanılan CFRP, Karbon liflerden oluşan 230 gr/cm<sup>2</sup> ağırlığındaki tek doğrultulu fiber donatı 0,60 x 50 m rulo olarak Sika Wrap 230 C'dir.

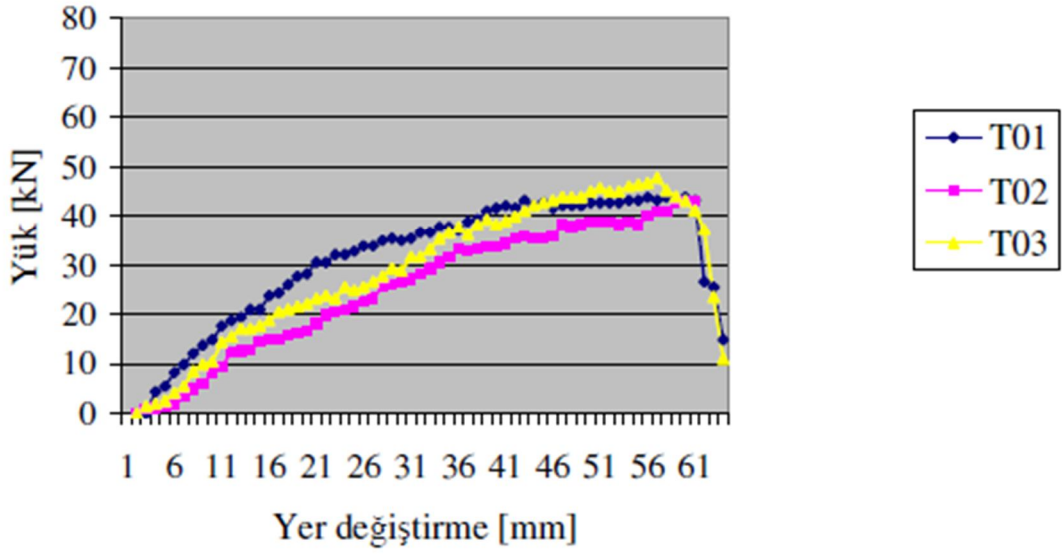
Çalışmada kullanılan GFRP, cam liflerden meydana gelen metre karesi 430 gr olan tek doğrultuda, 0,60 m eninde ve 50 m boyunda olan Sika Wrap 430 G isimli FRP kullanılmıştır. FRP tekstilleri deney kirişlerine A ve B bileşenli Sikadur 330 isimli epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. A ve B bileşenleri kendi kaplarında 3 dakika karıştırıldıktan sonra A bileşeni üzerine B bileşeni ilave edilerek karıştırılmıştır. Bu yeni karışım son kez 3 dakika kadar daha karıştırıldıktan sonra alçı perdah mala spatula ile kiriş yüzeylerine sürülmüştür. Hazırlanan deney kirişlerine epoksi, tekstillerin yapıştırılacağı bölgeye sürülmüştür. Kirişler CFRP ve GFRP ile altta hava kalmayacak şekilde yapıştırılmıştır (Şekil 2.15.).



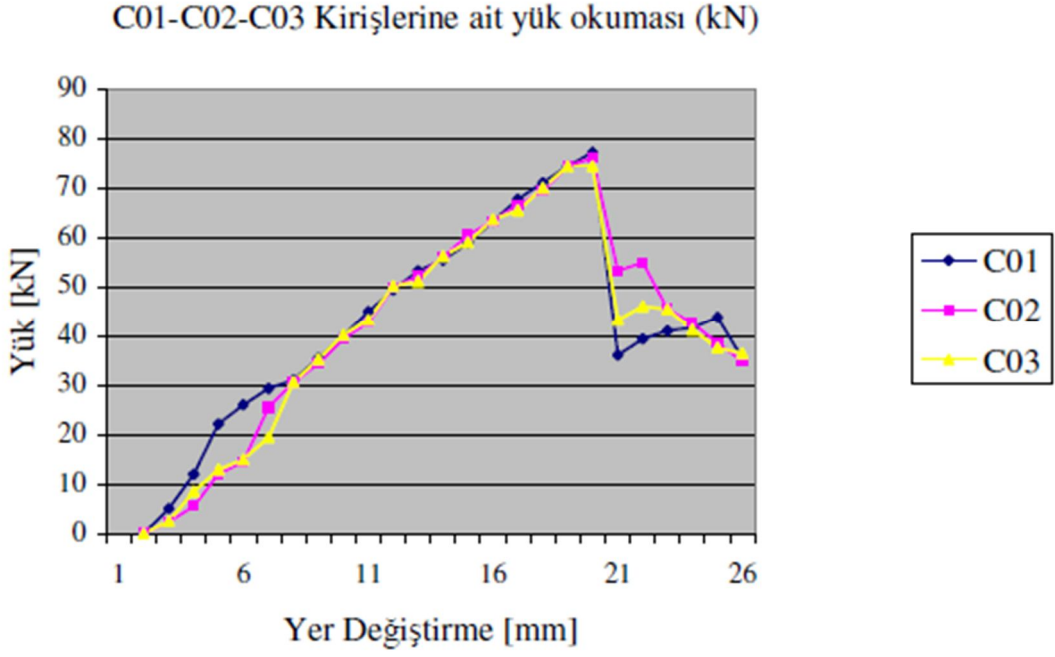
Şekil 2.15. Kirişlere CFRP ve GFRP yapıştırma şekli

Yüklemeler sonucunda tasıma gücü, yer değiştirme ve çatlak değerleri elde edilmiştir. Daha sonra tanık numune ve güçlendirilmesi yapılmış kirişler karşılaştırılmıştır. Kirişlere dört noktalı yüklemeye yapılmıştır. Yükleme yapılan yerler arası 660 mm olacak şekilde sabitlenmiştir. Mesnetler sabit ve hareketli olarak ayarlanmıştır. Kiriş numuneleri üzerinde önceden yerleri belirlenmiş altı bölgeden çatlak değişimleri izlenmiştir. Hassasiyeti 0.01 mm 29 olan yer değiştirme ölçer (LVDT) kiriş tam ortasından kaydedilmiştir. Yükleme sonrasında okunan değerler sonucunda ortaya çıkan yük- yer değiştirme grafikleri aşağıda sunulmuştur.

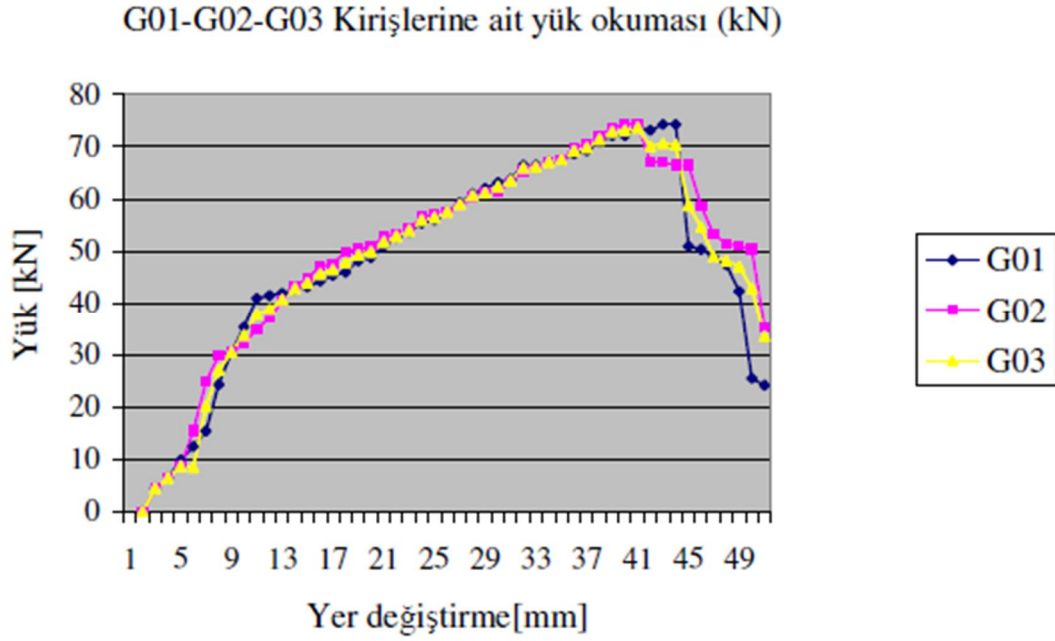
T01-T02-T03 Kirişlerine ait yük okuması (kN)



şekil 2.16. Tanık kirişin yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 2.17. CFRP kirişin yük- yer değişirme grafiği



Şekil 2.18. GFRP kirişin yük- yer değişirme grafiği

Deneyler sonrasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

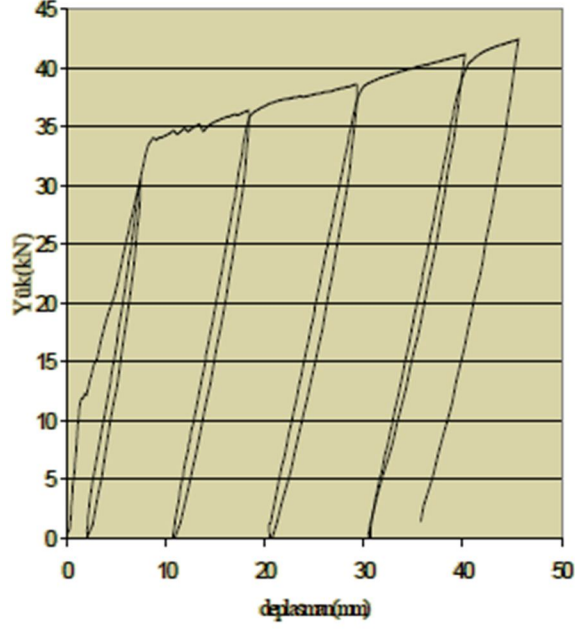
- CFRP ve GFRP tekstilleri ile güçlendirme dayanım ve rijitlik açısından başarılı sonuçlar vermiştir. Güçlendirilen kirişler en büyük kırılma yüklerine ulaşmış olup kendi aralarında da dayanım açısından benzerlik göstermektedirler.

- Tekstil malzemelerinin ikinci kat yapıştırılan malzemenin bitiş noktasından, yani kirişten 38 cm içerde çatlaklıklar meydana gelmiştir.
- En büyük enerji tüketiminin GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde olduğu görülmektedir. Tanık kirişler, GFRP ile güçlendirilen kirişlere oranla % 15 daha az enerji tüketmiştir. En düşük enerji tüketiminin CFRP ile güçlendirilen kirişlerde olduğu görülmektedir.
- Kirişlerin yer değiştirme değerleri tanık 43,8 mm, CFRP 22,8 mm, GFRP 32 mm olarak gerçekleşmiştir. Güçlendirilen kirişler tanık kirişlere göre daha az süneklik göstermişlerdir.

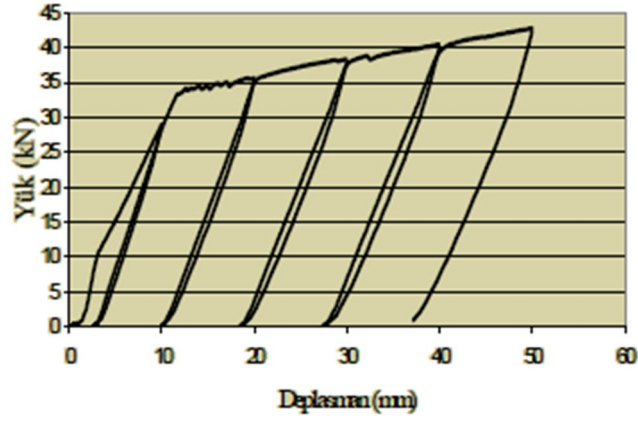
Çetinkaya ve diğerleri (2003) çalışmasında betonarme kirişlerin FRP malzemelerle onarım ve/veya güçlendirilmesini incelemişlerdir. Bu amaçla çalışmada 15x25x270 cm kesitli 4 adet eğilme yönünden yetersiz betonarme kiriş üretilmiştir. Ortalama beton basınç dayanımı 31.7 MPa'dır. Numunelerin üretilmesinde nervürlü BÇ III donatılar kullanılmıştır. Onarım ve güçlendirmede kullanılan FRP malzemeler ve epoksi yapıştırıcılar SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Kullanılan CFRP plaka: Sika Carbodur S. 50 x 1.2 mm kesitinde ve 2500 mm uzunluğundadır. Sargı için kullanılan FRP dokuma malzemesi SİKA Wrap 230C, 0.13 mm kalınlığında ve 30 cm eninde rulo halindedir.

DeneySEL çalışma üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde deney kirişlerinden iki tanesi herhangi bir onarım veya güçlendirilme yapılmadan statik yüklemeye tabi tutulmuş ve yalın kirişlerin yük – deplasman ilişkileri elde edilmiştir. İkinci bölümde önceden yüklemeye tabi tutularak taşıma gücüne ulaşan ve hasar gören deney kirişlerinin onarımı yapılmış ve iki değişik güçlendirme yöntemi uygulanmıştır. Üçüncü bölümde ise hasar görmeden, doğrudan güçlendirilen deney kirişleri statik yüklemeye tabi tutulmuş ve taşıma gücünün sonuna kadar yük deplasman eğrileri elde edilmiştir. Deney kirişleri orta bölgede bir yükleme açıklığı bırakacak şekilde iki eşit noktasal yük ile yüklenmiştir. Yükleme işlemi deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir ve yükleme sonucunda numunelerin taşıma gücüne ulaşması ve plastik deformasyonların oluşması sağlanmıştır. Gerilme yığılmalarından dolayı FRP malzemelerin köşe dönüşlerinde kopmaması için dikdörtgen kesitli kiriş elemanların köşeleri  $r=2$  cm yarı çapında ovalleştirilmiştir. Yapılan deneylerde önce yalın kirişler eğilme testine tabi tutulmuş ve yük-deplasman değerleri elde edilmiştir (Şekil 2.19. ve Şekil 2.20.). Yalın kiriş deneyleri sırasında nervürlü demir donatılı kirişlerdeki tipik eğilme çatlakların şekli görülmüştür. Sünek bir davranış elde edilmiştir.





Şekil 2.19. Yalın kiriş testi (A1)

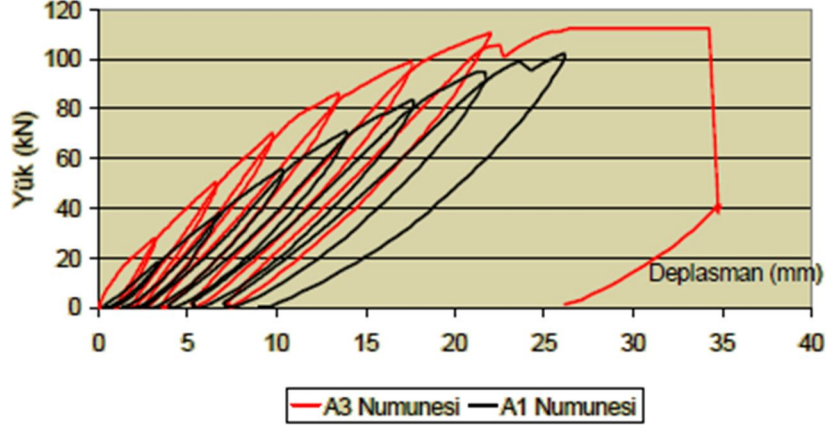


Şekil 2.20. Yalın kiriş testi (A2)

Yalın kirişlerin yükleme deneyleri tamamlandıktan sonra, onarım için deformasyonu geri almak üzere ters olarak yeniden yüklenmiştir. Deformasyonları geri alınmış olan deney kirişi, test çerçevesinden dışarı alınmış ve çatlaklarına özel epoksi reçine enjekte edilmesi için elektrikli matkap ile delikler açılmıştır. Açılan delikler hava kompresörü ile iyice temizlendikten sonra deliklere enjeksiyon memeleri yerleştirilmiş, çatlakların diğer tarafları epoksi reçine ile kapatılmıştır. 24 saat sonra, özel enjeksiyon makinesi ile memelerden çatlaklara epoksi reçine sıkılmıştır.

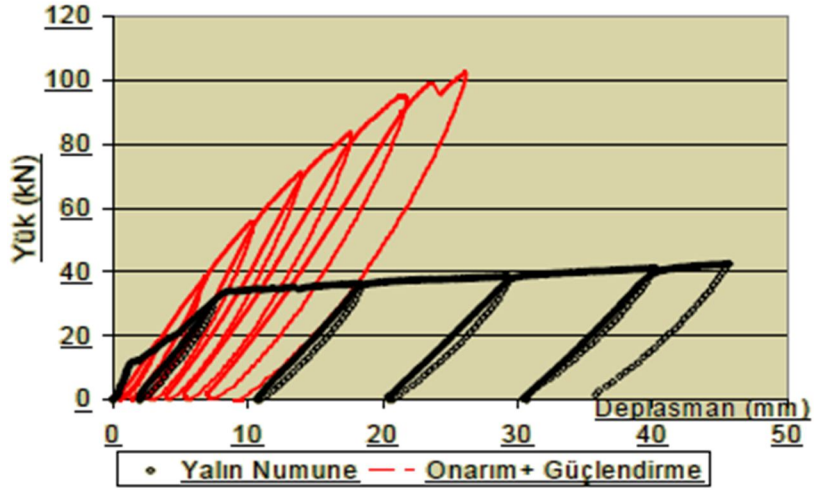
Onarım tamamlandıktan sonra yapılan güçlendirme yöntemi iki farklı şekilde gerçekleşmiştir. İlk yöntemde deney kirişlerinden A1 hasarlı yalın kirişi alt yüzüne, mesnetten mesnete, CFRP şerit, (1.2 x 50 mm.) yapıştırılarak güçlendirme yapılmıştır. Aynı yöntemle doğrudan güçlendirilen A3

numunesi ile karşılaştırılmış ve doğrudan güçlendirilen kirişin sünekliliği onarıp güçlendirilen kirişin sünekliliğinden % 28 fazla ve yük taşıma kapasitesi de onarıp güçlendirilen kirişin kapasitesinden % 10 fazla olduğu görülmüştür (Şekil 2.21.).



Şekil 2.21. Onarıp FRP plaka ile güçlendirilmiş kiriş (A1) ile aynı yöntemle (sargısız) doğrudan güçlendirilen yalın kirişin (A3) yük deplasman grafiği

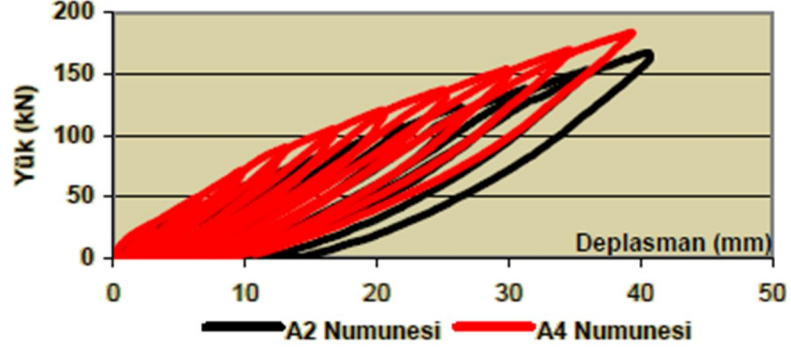
Yapılmış olan güçlendirme yöntemi ile kiriş taşıma gücünün 2.5 kat arttığı görülmüştür (Şekil 2.22.). Yalın kirişlerden farklı olarak, kesme çatlakları oluşmuş ve kiriş sünekliliği azalmıştır.



Şekil 2.22. Yalın kiriş ve FRP plaka ile O/G yapılmış kiriş test sonuçlarının karşılaştırılması

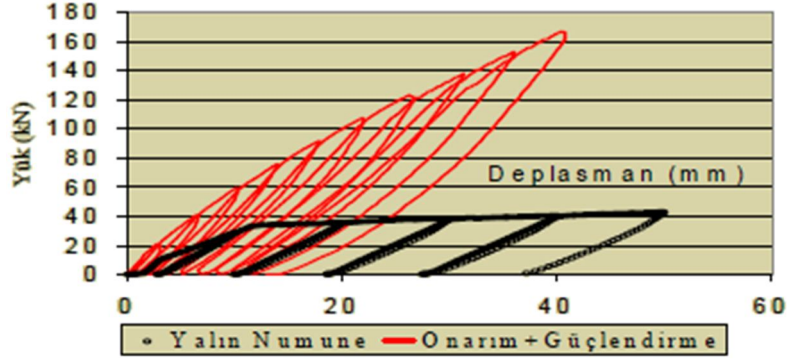
İkinci yöntemde ise deney kirişlerinin alt yüzlerine CFRP şeritler yapıştırmaya ek olarak kiriş yüzeyi de CFRP Wrap dokuma ile lifler kiriş eksenine dik olacak şekilde sarılmış, yapılan bu uygulama ile daha sünek bir davranış elde edilmiştir. Aynı yöntemle doğrudan güçlendirilen A4

numunesi ile karşılaştırılmıştır. Hasar gördükten sonra onarılıp güçlendirilen kiriş testi ile hasar görmeden güçlendirilen kiriş test sonuçları yaklaşık olarak aynıdır. Kesme çatlakları görülmemiş olup yalnızca eğilme çatlakları oluşmuştur.

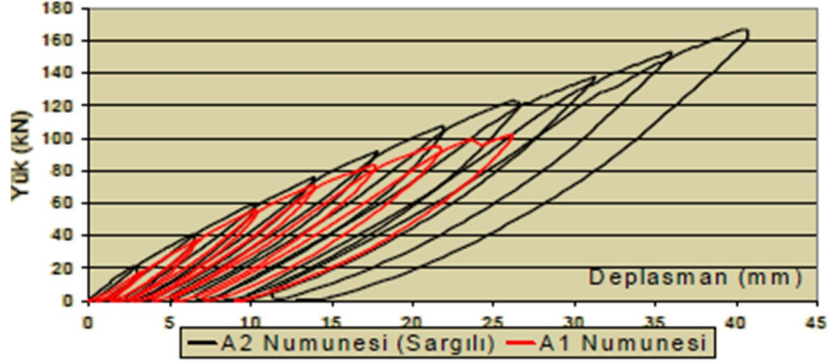


Şekil 2.23. Doğrudan güçlendirilen yalın kiriş A4 ile O/G yapılmış A2 kirişinin yük deplasman grafiği

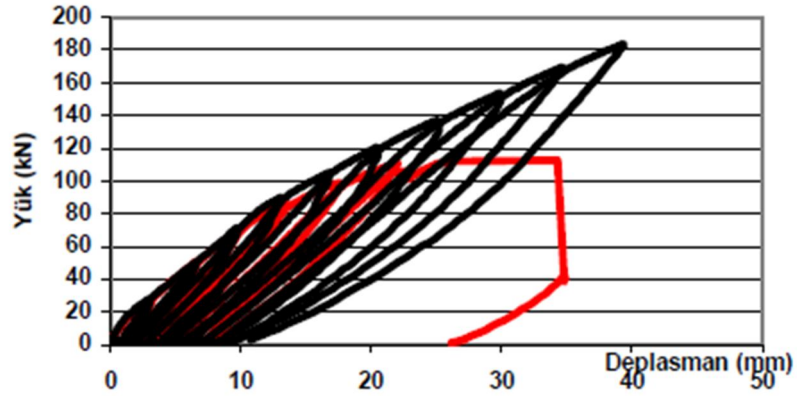
Bu kirişlerde de taşıma gücü yalın kirişlerin yaklaşık 4 katına çıkmıştır. Yalnızca kiriş alt bölgesine FRP şerit yapıştırma ile güçlendirmeye göre kirişin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği çok büyük ölçüde artmıştır.



Şekil 2.24 Yalın kiriş ile FRP plaka ve FRP dokuma ile O/G yapılmış kiriş test sonuçları



Şekil 2.25. O/G yapılmış A1 ve A2 kirişlerinin karşılaştırılması



Şekil 2.26. Doğrudan güçlendirme yapılmış A3 ve A4 numunelerinin karşılaştırılması

Deney sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- CFRP ile O/G ve doğrudan güçlendirme yöntemi ile başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.
- CFRP plaka ile alttan yapıştırılarak yapılan O/G yöntemi ile kiriş taşıma gücü kapasitesi yalın kirişe göre yaklaşık 2,5 kat artmıştır. CFRP plaka ile alttan yapıştırılıp ve kiriş eksenine dik yönde sargılama yapılarak O/G yöntemi ile kiriş taşıma gücü kapasitesi yalın kirişe göre yaklaşık 4 kat artmıştır.
- En yüksek taşıma gücü kapasitelerine hasar almadan doğrudan güçlendirilen kirişler ulaşmışlardır.
- Alttan FRP plaka ile yapıştırılarak O/G yapılan ve doğrudan güçlendirilen kirişlerin süneklik düzeylerinde ciddi azalmalar görülmüştür. Deney kirişlerinin alt yüzlerine CFRP şeritler yapıştırmaya ek olarak kiriş yüzeyi de CFRP Wrap dokuma ile sarılarak yapılan güçlendirilen A2 ve A4 numuneleri ise daha iyi bir süneklik göstermiştir.

#### 2.2.4. Kelepçe Yöntemi İle Kirişlerin Güçlendirilmesi

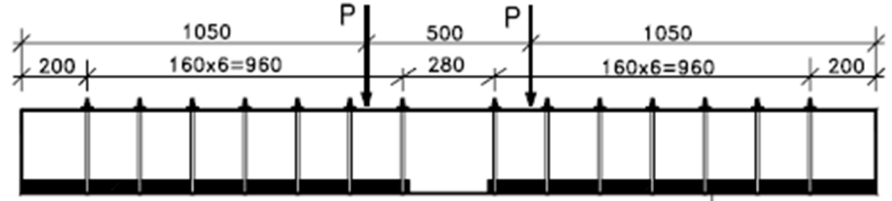
Altın ve diğerleri (2004) çalışmasında kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin eleman dışından yerleştirilen yüksek dayanımlı kelepçelerle kesmeye karşı güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışmanın amacı, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme gereksinimini karşılayabilen, sahada üretilebilen ve uygulaması kolay bir kelepçe türünün geliştirilmesidir. Bu çalışmada geliştirilen kelepçe normal bir donatının "U" biçiminde bükülüp açık olan uçlarından çelik bir lama ile kirişe sabitlenmesiyle oluşturulmuştur. Düzenlenen deneysel çalışmada farklı düzeylerde yetersiz etriyeli dikdörtgen kesitli kirişler bu tür kelepçeler kullanılarak güçlendirilmiştir. Deney elemanları kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı ( $a/d$ ) dört olacak bir biçimde simetrik iki tekil yük altında test edilerek dayanımları ve sergiledikleri davranışlar incelenmiştir. Deney elemanlarının gözlenen davranışları ve testlerden elde edilen veriler ışığında dayanım, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizmaları irdelenmiştir. Deney elemanlarının boyuna donatıları aynı olup, çekme donatısı için 2Ø20 mm nervürlü donatı, basınç donatısı olarak 2Ø12 mm düz inşaat demiri kullanılmıştır. Deney elemanlarında kapalı etriyeler Ø6 mm çapında donatılardan üretilmiştir. Deney programında beş adet kiriş test edilmiştir. Elemanlardan biri referans elemanı olup diğerleri güçlendirme amacıyla üretilen yetersiz etriye donatılı elemanlardır. Referans deney elemanı Kiriş-1 Ø6/60 mm aralıklı etriyelerle donatılmıştır. Etriye donatıları Kiriş-2 deney elemanında Ø6/180 mm aralıkla, Kiriş-3 deney elemanında Ø6/240 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanlarının etriye donatısı oranı, referans elemanının etriye donatısına oranları sırasıyla 0.34 ve 0.25'dir. Kiriş-4 deney elemanı içinde etriye bulunmamaktadır. Kiriş-5 deney elemanı önceden hasar görmüş bir kiriş elemanıdır. Kiriş-5 deney elemanının etriye donatısı Kiriş-3 elemanı ile özdeştir. Kiriş 2, Kiriş 3, Kiriş 4 ve Kiriş 5 deney elemanları kesme dayanımı yetersiz deney elemanlarıdır. Bu elemanlarda kesme dayanımı gereksinimi dışarıdan yerleştirilen kelepçelerle sağlanmıştır.

Kiriş-2, Kiriş-3, Kiriş-4 ve Kiriş-5 deney elemanlarında kesme dayanımı gereksinimi eleman dışından yerleştirilen kelepçeler ile sağlanmıştır. Bu elemanlara yerleştirilen kelepçe donatısı oranlarının Kiriş-1 deney elemanının etriye donatısına oranı ( $\rho_{CL}/\rho_{S(kiriş-1)}$ ) Kiriş-2 için 0.66, Kiriş-3 için 0.75, Kiriş-4 için 1.00 ve Kiriş-5 için 0.75'dir. Deney programında yer alan elemanların özellikleri Çizelge 2.21.'de verilmiştir.

Çizelge 2.21. Deney elemanlarının özellikleri

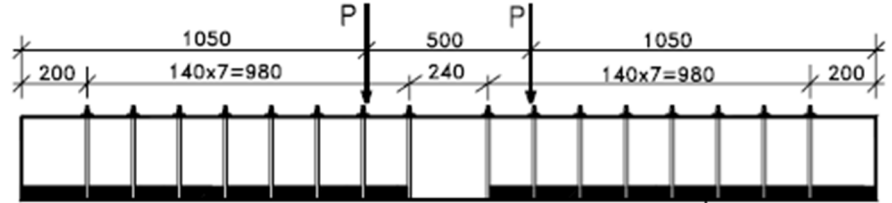
Deney elemanı	Etriye Oranı ( $\rho_S$ )	Kelepçe Oranı ( $\rho_{CL}$ )	$\frac{\rho_S}{\rho_{S(kiriş-1)}}$	$\frac{\rho_{CL}}{\rho_{S(kiriş-1)}}$	$f_c$ MPa	a/d
Kiriş-1 (referans)	0,0062	-----	1,00	-----	18,3	4
Kiriş-2	0,0021	0,0041	0,34	0,66	19,0	4
Kiriş-3	0,0016	0,0046	0,25	0,75	20,0	4
Kiriş-4	-----	0,0062	-----	1,00	18,6	4
Kiriş-5	0,0016	0,0046	0,25	0,75	19,2	4

Güçlendirilen deney elemanlarının etriyeleri ile dışarıdan yerleştirilen kelepçe donatılarının oranlarının toplamı referans kirişin etriye oranına eşittir. Kelepçe donatıları deney elemanlarının kesme açıklıklarına yerleştirilmiştir. Deney elemanlarında kelepçelerin yerleşimi ve kelepçe detayı Şekil 2.27'de sunulmuştur.



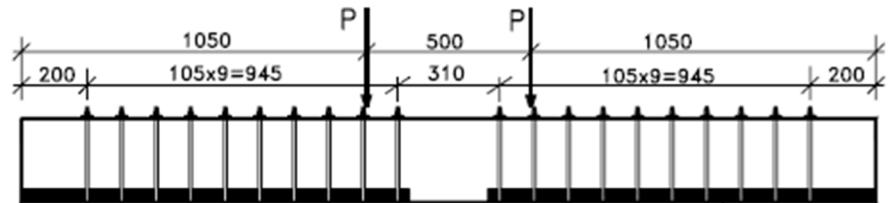
a) Deney Elemanı Kiriş-2

40x40x5 Çelik Profil



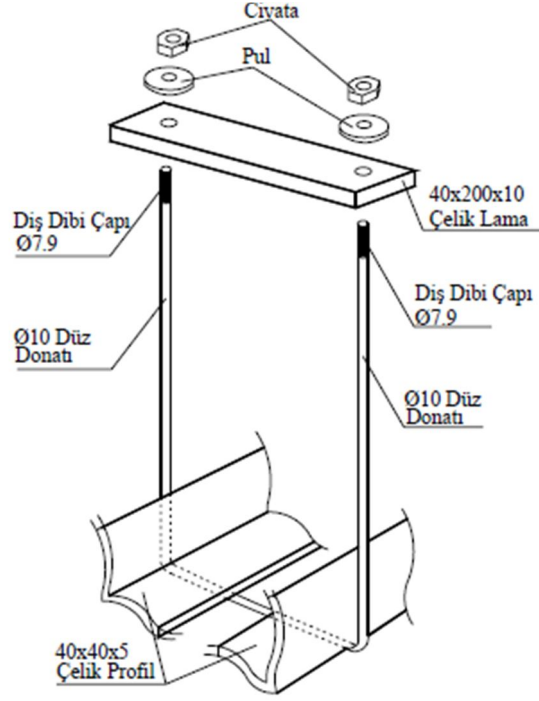
b) Deney Elemanı Kiriş-3 ve Kiriş-5

40x40x5 Çelik Profil



c) Deney Elemanı Kiriş-4

40x40x5 Çelik Profil



Şekil 2.27. Kelepçe detayı ve yerleşim şeması  
(Not: Ölçüler mm'dir.)

Deney elemanlarında güçlendirme işlemi kelepçelerin kiriş dışından ve belirlenen kesitlere yerleştirilmesiyle uygulanmıştır. Kelepçeler uçlarında ince dişler açılmış (diş dibi çapı  $\text{Ø}7.9$  mm)  $\text{Ø}10$  mm çapta düz bir donatıdan imal edilmiştir. "U" biçiminde bükülerek hazırlanan kelepçeler kiriş üstünden yerleştirilen  $45 \times 200 \times 10$  mm boyutlarında çelik lamalara açılan deliklerden geçirilip somunlar yardımıyla kiriş üst yüzeyinden sıkıca bağlanmışlardır. Kelepçelerin kirişin kabuk betonunu ezmesini önlemek için kiriş altında köşelere  $40 \times 40 \times 5$  mm kesitli çelik korniyerler yerleştirilmiştir. Kirişin yüklenmesiyle kelepçede oluşan çekme kuvvetlerinin kiriş alt köşelerinde kabuk betonunu kırarak kelepçelerin etkinliğinin kaybolması bu çelik korniyerlerin yerleştirilmesiyle önlenmiştir. Deney elemanları bilgisayar denetimli yükleme ve ölçüm sistemi kullanılarak test edilmiştir. Deneyler yükleme çerçevesi yardımıyla yapılmıştır. Yükleme  $200$  kN kapasiteli bir hidrolik kriko ile uygulanıp,  $300$  kN kapasiteli bir yük hücresi ile kontrol edilmiştir. Deney elemanlarında orta nokta deplasmanı ve kesme çatlakları LVDT'ler (Lineer Variable Displacement Transducer) yardımıyla elektronik olarak ölçülmüştür. Deney sonuçları aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2.22. Deney sonuçları

Deney elemanı	Akma yükü (kN)	Göçme yükü (kN)	Akmada Deplasman $\delta_y$ (mm)	Göçmede Deplasman $\delta_u$ (mm)	Akmada rijitlik (kN/mm)	Göçmede rijitlik (kN/mm)	Süneklik Oranı $\delta_u/\delta_y$
Kiriş-1	67	72	9,2	48,2	7,28	1,49	5,24
Kiriş-2	68	69	9,8	26,0	6,94	2,65	2,65
Kiriş-3	68	72	8,1	34,6	8,40	2,08	4,27
Kiriş-4	64	70	9,0	39,2	7,11	1,79	4,36
Kiriş-5	66	68	9,1	29,8	7,25	2,28	3,28

Deney sonrası aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Kesme dayanımı yetersiz kirişlerin eleman dışından yerleştirilen kelepçelerle kesme dayanımı yetersizliğinin giderilmesi yöntemi başarılı bir tekniktir.

- Kesme dayanımı yetersiz kirişlerin kesme kırılması biçiminde beklenen davranışı, kirişin güçlendirilmesiyle birlikte değişim göstererek eleman davranışına sünek eğilme davranışının hakim olması sağlanmaktadır. Elemanlarda kesme göçmesi biçiminde beklenen davranış kelepçelerle eğilme davranışına dönüştürülmüştür.

Kelepçeler kesme çatlaklarını başarılı bir biçimde kontrol ederek çatlakların genişlemesini sınırlamışlardır.

- Güçlendirilen kirişlerin maksimum kesme dayanımları, referans kirişin dayanıma yakındır. Kelepçeler kesme gereksinimini başarıyla sağlamıştır.

- Deney elemanlarının akma yükleri ve bu yükteki deplasmanları birbirlerine yakındır. Elemanların göçme yükü düzeyinde hesaplanan rijitlik değerleri birbirinden farklıdır. Kiriş-1 referans elemanının göçmede ölçülen rijitlik değeri akmada ölçülen değerden %80 küçüktür. Rijitlik azalımı güçlendirilen Kiriş-3 ve Kiriş-4 elemanlarında %75, Kiriş-2 elemanında %62 ve Kiriş-5 elemanlarında %69 olarak elde edilmiştir.

- Kiriş-2 elemanı 2.65 süneklik oranı ile deneysel programın en düşük süneklik değerine sahiptir. Kiriş-3 ile Kiriş-4 deney elemanları süneklik oranları 4.27 ve 4.36 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Kiriş-1 referans elemanı süneklik oranından %19 ve %17 daha düşük olmasına rağmen Kiriş-3 ve Kiriş-4 deney elemanları oldukça sünek bir davranış sergilemişlerdir. Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-1 referans elemanından %37 daha az süneklik oranına sahiptir.

- Güçlendirilen Kiriş-3 ve Kiriş-4 elemanları referans elemanından sırasıyla %33 ve %31 daha az enerji tüketirken, Kiriş-2 elemanı güçlendirilen modeller içerisinde en az enerji tüketen elemandır. Kiriş- 5 elemanının tükettiği enerji yaklaşık Kiriş-2 elemanına eşittir.

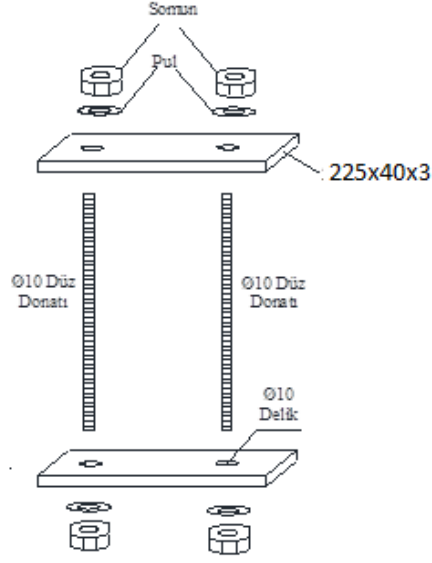


Demir (2012) çalışmasında, kesme kapasitesi yetersiz olan betonarme kirişlerin dış donatılar ile güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışma kapsamında kirişlerin hem eğilme hem de çekme dayanımını arttırılabilmesi için literatürdeki yöntemlere alternatif bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kirişlerin çekme bölgesi boyunca paspayı kalınlığında oluklar açılarak boyuna çekme donatıları bu oluklara epoksi ile yerleştirilmiştir. Buna ek olarak kirişler dıştan eklenen kelepçeler ile kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Deneyle sonuçunda dış kelepçelerin kirişlerin süneklik ve enerji tüketme kapasitelerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

Çalışma kapsamında 21 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden 6 tanesi etriyesiz (KA), geriye kalan 15 tanesi ise Ø8/400 mm eksik etriyeli (KB) olarak üretilmiştir. Üretilen deney elemanlarının beton basınç dayanımı 16,76 MPa'dır. Tüm deney elemanlarında S420 yapı çeliği kullanılmıştır. KA deney elemanlarının çekme bölgesinde 2Ø12 donatı olup KB deney elemanlarının çekme bölgesinde 2Ø12, basınç bölgesinde ise 2Ø10 donatı bulunmaktadır. Üretilen kirişler daha sonra farklı şekillerde güçlendirilmiş ve 2000 mm açıklıklı bir ucu sabit diğer ucu hareketli basit mesnetli deney setinde denenmiştir. Deneysel çalışma programı, dış kelepçe detayı ve deney sonuç çizelgesi aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2.23. Deneysel çalışma programı

Deney	Deney Sayısı	İç Etriye	Dış Kelepçe	Dış Boyuna Donatı	Kaynaklı Birleşim
KA-1	3	Yok	Yok	Yok	Yok
KA-2	3	Yok	Ø10/75	2Ø12	Yok
KB-1	3	Ø8/400	Yok	Yok	Yok
KB-2	3	Ø8/400	Ø10/75	Yok	Yok
KB-3	3	Ø8/400	Ø10/150	Yok	Yok
KB-4	3	Ø8/400	Ø10/75	2Ø12	Yok
KB-5	3	Ø8/400	Ø10/75	2Ø12	Var



Şekil 2.28. Kelepçe detayı

Toplam 21 deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 2.24. Deney sonuçları

Test	Çatlamada	Akmada		En Büyük Yük (kN)	Göçmedeki Deplasman (mm)	Süneklik	Enerji Tüketme Kapasitesi (kN-mm)	Kırılma Şekli
	Yük (kN)	Yük (kN)	Deplasman (mm)					
KA1	40.3	76.5	6.50	81.6	6.7	1.0	379	S
KA2	89.4	161.4	13.2	171.8	21.2	1.6	7882	S-F
KB1	45.6	110.2	11.3	110.5	11.5	1.0	910	S
KB2	64.6	116.6	10.5	130.2	105.6	10.1	12994	F
KB3	61.2	100.7	12.9	118.1	113.9	8.8	11615	F
KB4	110.3	179.1	19.8	201.2	54.6	2.8	9980	S-F
KB5	102.2	171.5	21.4	176.4	38.3	1.8	6112	S-F

S: Kesme, F: Eğilme, S-F: Kesme+Eğilme

Deneylerden sonra aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Güçlendirilen bütün deney elemanları referans kirişin üzerinde bir taşıma gücüne ulaşmışlardır.
- Geliştirilen güçlendirme tekniği ile deney elemanların hepsinde süneklik kapasitelerinde artışlar görülmüştür.
- Deneysel programda güçlendirilen kirişlerin enerji tüketme kapasitelerinde artışlar görülmüş olup KB2 kirişi en yüksek enerji tüketme kapasitesine ulaşmıştır.

- Dıştan kelepçe uygulamasında kelepçe aralığı tayini dayanım ve sünekliği önemli oranda değiştirmektedir.
- Deney elemanlarında kesme kırılması biçiminde beklenen göçme formu uygulanan kelepçe yöntemiyle deney elemanlara sünek bir davranış kazandırmış ve kesme kırılmasını eğilme kırılmasına çevirmiştir.

### 2.3. Betonarme Elemanların Kesme Davranışları

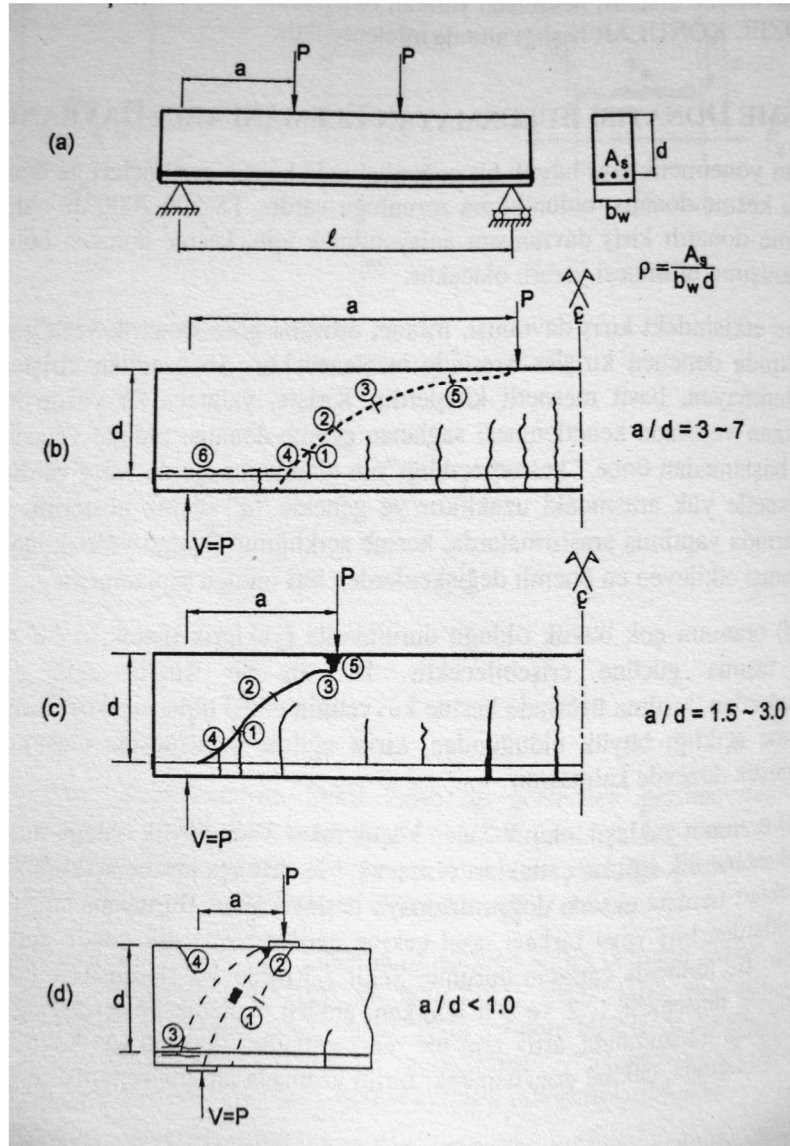
Betonarme elemanların kesme davranışını belirleyen en önemli faktörlerden biri de kirişe gelen yükün mesnete olan uzaklığının ( $a$ ), faydalı derinliğe ( $d$ ) oranıdır. Bu oranın ( $a/d$ ) aynı özellikli kirişlerde alacağı farklı değerler, bu kirişlerde farklı dayanımlara, çatlak oluşumuna ve göçme mekanizmasına neden olmaktadır.

$a/d$  oranının çok büyük olduğu durumda ( $a/d > 7$ ) kiriş taşıma gücüne çekme donatısının akması ile ulaşmaktadır. Bu şekilde yüklü bir kirişte, asal çekme gerilmelerinin düşük düzeyde kalışı nedeniyle kirişte eğik çatlaklar oluşmamakta ve dolayısıyla göçme üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmamaktadır.

$a/d$  oranının yaklaşık  $3 < a/d < 7$  olduğu durumlarda önce kiriş eksenine dik eğilme çatlakları oluşacak, yük arttıkça kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlayacaktır. Bu uzama sırasında sözü edilen çatlaklardan biri veya birkaçı, asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşmeye başlayacaktır. Bu aşamada çatlağın durumu, Şekil 2.29. (b) de 1 ve 2 ile gösterilmiştir. Şekil 2.29. (b) de çatlak ilerlemesi 1, 2 ve 3 ü izlerken, aniden 4 ile gösterilen eğik çatlak oluşur. Bu çatlak oluştuğunda, artık tam bir eğik çatlama durumu söz konusudur. Bu aşamaya ulaşıldığında, çekme donatısındaki birim uzamada ani bir sıçrama gözlenir. Bu sıçrama, eğik çatlamanın neden olduğu bir gerilme uyumunu gösterir. Eğik çatlama donatıda ani gerilme artışına neden olduğundan, donatıya paralel aderans çatlakları oluşmaya başlar. Yük biraz arttırıldığında, eğik çatlak Şekil 2.29. (b) de 5 ve 6 ile işaretlenen yönde hızla gelişir ve kiriş kırılır. Bu kırılma son derece ani ve gevrek bir kırılmadır. Şekil 2.29. (b) de donatıya paralel gelişen 6 numaralı çatlak aderans çatlağıdır ve o yörede kenetlenmenin ne kadar zayıf olduğunu göstermektedir. (Ersoy ve diğerleri, 2004).

$a/d$  oranının daha küçük olduğu durumlarda ( $1.5 < a/d < 3$ ) kirişlerde eğik kesme çatlağı oluşmakta ancak bu çatlaklar noktasal yükün altındaki basınç gerilmeleri nedeni ile kiriş üst seviyesine kadar gelişmemekte ve Şekil 2.29 (c) de 2 ile 4 olarak işaretlenen eğik çatlak oluşuktan sonra da kiriş yük taşımaya devam etmektedir. Bu durumda çatlak üstündeki çatlama bölgesi yüksek basınç ve kayma gerilmelerine maruz kalmakta ve yükün daha büyük düzeylerinde bu bölgede beton basınç gerilmeleri aşılıp Şekil 2.29. (c) de 5 olarak işaretlenen beton ezilmekte ve kiriş kırılmaktadır.

$a/d$  oranının çok küçük olduğu durumlarda ise ( $a/d \leq 1.0$ ) kiriş kırılma konumuna ulaşmadan donatı akar, yani kiriş eğilme kapasitesine ulaşır. Kırılma iki ayrı biçimde oluşabilir. Birincisi Şekil 2.29. (d) de 1 ve 2 ile işaretlenen gövdenin basınç gerilmeleri nedeni ile ezilmesidir. İkincisi de Şekil 2.29. (d) de 3 olarak işaretlenen basıncın aktarılması sırasında donatıda oluşan yüksek gerilmeler nedeni ile mesnet ötesinde kenetlenmenin yok olmasıdır. Bilinen eğilme davranışından çok değişik olarak mesnet bölgesinde donatıdaki gerilmeler çok yüksek olduğundan, bu tür kırışlerde kenetlenme büyük sorun yaratır. Gergili kemer davranışının doğal sonucu olarak, Şekil 2.29. (d) de 4 olarak işaretlenmiş kiriş üst yüzünde çekme çatlakları da oluşabilir (Ersoy ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.29. Eğik çatlakların oluşumu

Tez çalışmamız kapsamında üretimi planlanan üretimi planlanan 4 adet kiriş eleman ise a/d oranı 2,14 olarak tasarlanmış ve yüklenmiştir. Deney yapılan tüm kiriş elemanları Şekil 2.29. (c) deki gibi kırılmıştır.

### **3. KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ**

#### **3.1. Amaç ve Kapsam**

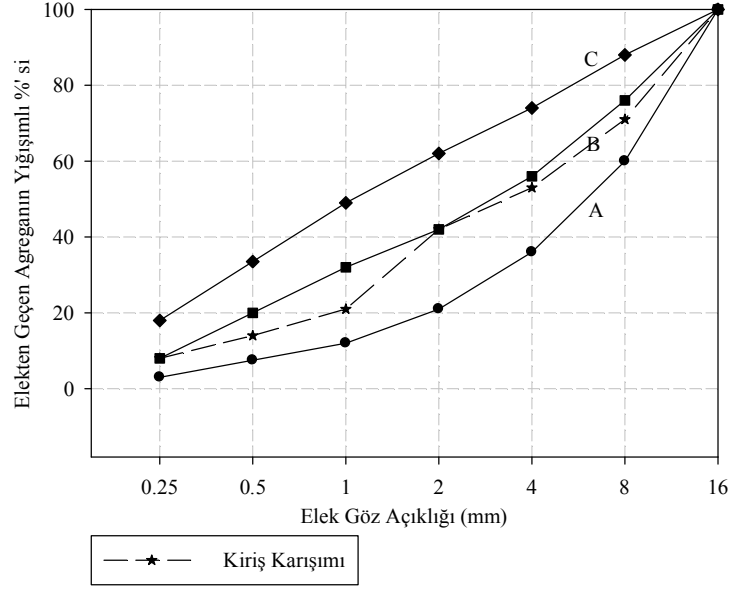
Deney sonuçlarının sağlıklı bir şekilde yorumlanması ve deney elemanlarının dayanım, süneklik ve enerji tüketme kapasitesi gibi özelliklerinin birbiriyle kıyaslanması açısından betonun ve çeliğin birçok özelliğinin deneysel çalışmalar ile belirlenmesi gerekmektedir. Üretimi planlanan kirişlerin hedeflenen beton dayanımlarına ulaşabilmek için özenli ve kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler ile agregaların genel özelliklerini bulmamızı sağlayan elek analizleri, sıkışık ve gevşek birim ağırlıkları, özgül ağırlıkları, ilgili standartlar göz önünde bulundurularak bulunmuştur.

Hedeflenen beton dayanımlarına ulaşabilmek için de çok sayıda beton karışım hesapları yapılmış ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen 28 günlük 150x300 mm boyutlarında silindir numuneler basınç testlerine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak belirlenen karışım oranlarına göre kirişlerin üretimi yapılmıştır.

Güçlendirmede kullanılacak olan CFRP ve epoksinin kimyasal ve fiziksel özellikleri de üretici firma tarafından alınmıştır.

#### **3.2.Elek Analizi (TS 3530 EN 933-1)**

İstenen beton dayanımına ulaşmak için ince agrega olarak en büyük tane boyutu 3 mm olan kırmakum ile iri agrega olarak en büyük tane boyutu 12 mm olan kırmataş kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda agrega karışımları için belirlenen gradasyon eğrileri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Agrega Karışımlarının Gradasyon Eğrileri

### 3.3. Su

Hazırlanan betonlarda karışım suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır. Bu suyun Celal Bayar Üniversitesi Kimya Bölümünde yapılan kimyasal analizi sonucunda elde edilen bulgular Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Beton Üretiminde Kullanılan Suyun Kimyasal Analiz Sonucu

Özellik/Bileşen	Miktarı/Değeri
Ph	7.38
İletkenlik	993
Organik Madde (mg/lt)	3.09
Klor (mg/lt)	107
Kalsiyum Sertliği (mg/lt)	283.4
Mg Sertliği (mg/lt)	145.8
Sülfat (mg/lt)	52.26

### 3.4. Çimento

Beton üretiminde kullanılan çimento tipi CEM I 42.5 R İzmir Batıçim fabrikasından temin edilmiştir. Üretici firmadan alınan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik deney sonuçları ortalama olarak Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çimentonun Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özellikleri

Çimento Tipi	CEM I 42 R ( TS EN 197-1 e uygun olarak )			
Kimyasal Özellikler	Sonuçlar (%)	Fiziksel özellikler	Sonuçlar	
SiO <sub>2</sub>	23,75	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	3,03	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,81	İncelik	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3962
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,73		0,032 mm elek üstü kalan (%)	13,4
CaO	57,16		0,090 mm elek üstü kalan (%)	0,5
MgO	0,94			
SO <sub>3</sub>	2,86			
K <sub>2</sub> O	1,01	Priz Süreleri (Saat)	Başlangıç	02:30
Na <sub>2</sub> O	0,33		Son	03:50
Kızdırma Kaybı	2,34	Hacim Sabitliği (mm)		1
Klor	0,017	Mekanik Özellikler		
Serbest Kireç	1,34			
		Zaman (gün)	Basınç Dayanımı (MPa)	
		2	25,8	
		7	39,4	
		28	49,8	

### 3.5. Kimyasal Katkılar

Beton üretiminde teknik özellikleri Çizelge 3.3.'de verilen katkı kullanılmıştır.



Çizelge 3.3. Kullanılan Katkının Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	Akışkanlaştırıcı
Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk kg/l	1.055-1.095 20 °C de
Ph	3-7
Klorür Yüzdese	En fazla %0.1, klorür içermez
Alkali Miktarı	En fazla %4
Kullanım Miktarı	Çimentonun %0.4-%1' i

### 3.6. Beton Basınç Deneyi

Silindir numuneler üzerinde tek eksenli basınç deneyleri uygulanarak betonun basınç ve çekme dayanımları ile elastisite modülleri belirlenmiştir (Çizelge 3.4.). Silindir numunelerin basınç dayanımları ve elastisite modülleri TS3502 (1981) ve TS EN 12390-3 (2003) koşullarına uygun şekilde belirlenmiştir. Basınç dayanımı ve elastisite modülünün belirlenebilmesi amacı ile düşeyde iki yatayda bir adet şekil değiştirme ölçümü yapabilen kompressometre ve 2500 kN kapasiteli pres kullanılmıştır (Şekil 3.2). Gerilme-şekil değiştirme değerleri eş zamanlı olarak TDG A18b isimli veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılmıştır. Betonun elastisite modülünün belirlenebilmesi amacı ile betonun en büyük basınç dayanımının %40' ına orijinden başlayan bir çizgi çizilmiştir. Çizilen bu doğrunun eğimi ile betonun elastisite modülü hesaplanmıştır (Erdoğan, 2003).



Şekil 3.2. Tek Eksenli Yükleme Altında Silindir Numune ve Kompressometre

Çizelge 3.4. Üretimde Kullanılan Betonun Basınç Dayanımı

Numune	Silindir Numune Adedi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
C16	12	15.73	22000

### 3.7. Beton Çekme Deneyi

Betonların çekme dayanımları için ACI-318-99 (1999) tarafından önerilen denklem kullanılmıştır.  $f_t'$  betonun çekme dayanımını,  $f_c'$  betonun basınç dayanımını göstermektedir. Denklem ampirik olduğu için birim olarak MPa kullanılmıştır.

$$f_t' = 0.33 \sqrt{f_c'} \quad (3.1.)$$

Çizelge 3.5. Üretimde Kullanılan Betonun Çekme Dayanımı

Nunume	Beton Çekme Dayanımı (MPa)
C16	1.35

### 3.8. Donatı Çekme Deneyi

Kirişlerin üretiminde 6 ve 14 mm çaplı donatı çeliği kullanılmıştır. Bunların yanında güçlendirme aşamasında kelepçeler için 10 mm çaplı bağlantı çubukları kullanılmıştır. TS708 (2010) koşullarına göre her bir donatı çapı için 3 adet numune seti oluşturulmuş ve çekme deneyine tabi tutulmuştur ve Şekil 3.3.' de gösterilmiştir. Deneyler sonucunda donatıların akma dayanımları ( $f_y$ ) ve kopma dayanımları ( $f_u$ ) belirlenmiş ve Çizelge 3.6.' da gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çekme Deneyine Tabi Tutulan Donatı

Çizelge 3.6. Üretimde Kullanılan Donatının Karakteristik Özellikleri

Numune	Adet	Akma Dayanımı ( $f_{yk}$ ) MPa	Kopma dayanımı ( $f_{yu}$ ) MPa	Elastisite Modülü ( $E_s$ ) MPa
Ø6	3	470	575	210000
Ø14	3	440	530	207000
Kelepçe Ø10	3	455	550	211000

### 3.9. Epoksi

Dıştan uygulanacak CFRP şeritlerin deney elemanlarına yapıştırılmasında özel epoksi harcı kullanılmıştır (Çizelge 3.7.). Kullanılan epoksi iki bileşenli, suya dayanıklı, yüksek dayanımlı solventsiz yapıştırma harcıdır.

Deneylerde kullanılan epoksinin birçok kullanım alanı olup beton, taş, metal, ağaç ve yapı malzemeleri için çok iyi bir yapıştırıcı maddedir. Uygulaması kolaydır. Uygulamadan önce, sonra ve kür sonrası neme dayanıklıdır. Yüksek mukavemete sahiptir ve devamlı yükler altında iyi bir sünme dayanımı göstermektedir. Sıcaklık ve aşınma dayanımları yüksek olup darbelere karşı dayanıklıdır.

Çizelge 3.7. Epoksi harcının özellikleri

Görünüş	A karışım beyaz B karışım Gri
Yoğunluk	1,31 kg/litre
Karışım oranı	A/B = 4/1 (Ağırlıkça)
Karışım ömrü	+35°C 30 dakika, +10°C 90 dakika
Viskozite	Hamur gibi akıcı değil
Uygulama sıcaklığı	+10°C - +35°C
Aderans	Birgün sonra yapılan çekme deneyinde beton kopuyor reçine kopmuyor
Çekme dayanımı	30 MPa 7 gün+23 derece
Elastisite modülü	3800 MPa 7 gün+23 derece
Raf ömrü	24 ay 15 – 25 derece

### 3.10. CFRP

Güçlendirmede kullanılan CFRP, Karbon liflerden oluşan 228 gr/cm<sup>2</sup> ağırlığındaki tek doğrultulu fiber donatı 1,27 x 8 m rulo olarak Metyx Composites CL200E10A'dır. Metyx Composites CL200E10A betonarme, yığma ve ahşap yapıların eğilme ve kayma dayanımını arttırmak için kullanılır. Çok hafif bir malzeme olup kompleks şekilli yapılara uygulanabilmektedir (kolonlar, kirişler, bacalar, kazıklar ve duvarlar ). Kimyasal ve çevre şartlarına dayanıklıdır. Yüksek dayanımlıdır ve korozyon riski yoktur. Kullanılan CFRP'nin özelliği Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. CFRP'nin özelliği

Birim Ağırlığı (gr/m <sup>2</sup> )	228
Rulo eni (m)	1,27
Rulo boyu (m)	8
Lif yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	1,78
Çekme dayanımı (MPa)	4200
Elastisite modülü (MPa)	238000
Kopma uzaması - $\epsilon_u$ (%)	1,8

Hazırlanan deney kirişlerine epoksi, tekstillerin yapıştırılacağı bölgeye sürülmüştür. Kirişler CFRP ile altta hava kalmayacak şekilde yapıştırılmıştır.

## 4. KİRİŞ ELEMENLARININ ÜRETİLMESİ

### 4.1. Amaç ve Kapsam

Üretilen betonarme dikdörtgen kesitli kirişlerin ölçüleri laboratuvar koşulları içerisinde gerçekleştirilebilecek ve uygulamadaki durumları yansıtabilecek şekilde seçilmiştir. Elemanların davranış ve dayanımlarının belirlenebilmesi için toplam 4 adet kesme kapasitesi yetersiz kiriş üretilmiştir. Eksik etriyeli olarak üretilen bu kirişlerden 3 tanesi laboratuvar ortamında hafif şiddette hasar verildikten sonra güçlendirilmiştir. Geriye kalan tek kiriş ise referans kiriş olup deneyler sonunda güçlendirilen deney elemanlarıyla dayanım ve davranış gibi parametreleri karşılaştırmak için üretilmiştir. Çizelge 5.1.'de kullanılan deney elemanları ve özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney elemanları ve özellikleri

Kiriş Tipi	Deney Sayısı	İç Etriye	Enine Dış Donatı	CFRP
REF	1	Ø6/425	Yok	Yok
GK1	1	Ø6/425	Ø10/100/3	Yok
GK2	1	Ø6/425	Yok	Var
GK3	1	Ø6/425	Yok	Var
Toplam	4	-	-	

Deneysel çalışma ile kesme kapasiteleri yetersiz betonarme kirişlerin çelik kelepçeler ile sarılması, CFRP'nin epoksi yardımıyla kiriş kesme bölgesinin tamamına 'U' şeklinde yapıştırılması ve CFRP kumaş liflerinin 6'şar cm kalınlığında parçalar halinde kesilerek yine epoksi yardımıyla kiriş kesme bölgesine 'U' şeklinde yapıştırılması gibi 3 farklı durumda kesme kapasitelerinin artırılması hedeflenmiştir. Kelepçeler ve CFRP ile kirişlerin sarılması ve sargı etkisi oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu 3 farklı durum için kirişlerin kesme kapasiteleri, süneklik, rijitlik ve enerji tüketme kapasitelerindeki değişim ile maliyetleri incelenmiştir.

### 4.2. Kesitlerin Kesme Dayanım Hesabı

Yetersiz kesme donatısına sahip betonarme yapı elemanlarının kesme dayanımlarının artırılmasına yönelik hesap yöntemleri TS 500 (2000) ve DBYBHY (2007) yönetmeliklerinde bulunmaktadır. Kesme kuvvetine betonun katkısı  $V_c$  tanımlandığı yönetmeliklerdeki eşitlikleri

aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. Kesitin kesme dayanımı ( $V_r$ ), beton katkısı ( $V_c$ ) ve kesme donatısı katkısının ( $V_w$ ) toplanması ile elde edilir. (TS 500, 2000).

$$V_r = V_c + V_w \quad (4.1.)$$

$$V_c = 0,8 \times V_{cr} \quad (4.2.)$$

$$V_{cr} = 0,65 \times f_{ctd} \times b_w \times d \times \left(1 + \gamma \frac{N_d}{A_c}\right) \rightarrow \gamma = 0 \text{ alınabilir.} \quad (4.3.)$$

$$V_c = 0,8 \times 0,65 \times f_{ctd} \times b_w \times d \quad (4.4.)$$

Etriye katkısı ise aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} \times f_{ywd} \times d \quad (4.5.)$$

Lifli polimerlerle sargılanmış kirişlerin kesme dayanımı aşağıdaki denklemde verilmiştir.(DBYBHY,2007).

$$V_r = V_c + V_s + V_f \leq V_{max} \quad (4.6.)$$

Denklemden;

$V_c$  : Beton tarafından taşınan kesme kuvveti

$V_s$  : Kesme donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti

$V_f$  : CFRP şeritler tarafından taşınan kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Kesme kuvveti dayanımına LP sargının katkısı  $V_f$  sargılamanın şeritler halinde olması durumunda aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$V_f = \frac{2 n_f t_f w_f E_f \varepsilon_f d}{s_f} \quad (4.7.)$$

Yukarıdaki denklemde  $n_f$  tek yüzdeki LP sargı tabaka sayısını,  $t_f$  bir tabaka LP için etkili kalınlığı,  $w_f$  LP şeridinin genişliğini,  $E_f$  LP elastisite modulünü,  $\varepsilon_f$  LP etkin birim uzama sınırını,  $d$  eleman faydalı yüksekliğini,  $s_f$  ise LP şeritlerin, eksenden eksene olmak üzere, aralıklarını göstermektedir. Sargılamanın sürekli yapılması durumunda,  $w_f = s_f$  alınacaktır. Etkin birim uzama değeri ise aşağıdaki denkleme göre alınacaktır.

$$\varepsilon_f \leq 0,004 \quad (4.8.)$$

$$\varepsilon_f \leq 0,50 \varepsilon_{fu} \quad (4.9.)$$

Yukarıda belirtilen  $\varepsilon_{fu}$  LP kopma birim uzamasıdır. Süreksiz (şeritler halinde) LP kullanılması durumunda LP şeritlerin aralıkları  $s_f$ , ( $w_f + d \div 4$ ) değerini geçmeyecektir.

Dıştan kelepçe yöntemi ile sarılmış kirişlerin kesme dayanımı da aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$V_r = V_c + V_w + V_s \quad (4.10.)$$

Denklemden;

$V_c$  : Beton tarafından taşınan kesme kuvveti

$V_w$  : Etriye donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti

$V_s$  : Kelepçeler tarafından taşınan kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Deney yalın kirişleri için kesme hesabı yapılırsa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$V_r = 0,8 \times V_{cr} + V_w$$

$$V_r = 0,8 \times 0,65 \times f_{ctd} \times b_w \times d \times \left(1 + \gamma \frac{N_d}{A_c}\right) + \frac{A_{sw}}{s} \times f_{ywd} \times d$$

$$V_r = (0,8 \times 0,65 \times 1,4 \times 150 \times 280) \times (1) + \frac{2 \times 28,86 \times 420 \times 280}{425}$$

$$V_r = 46215 \text{ N} \rightarrow V = 46 \text{ kN}$$

$$P = 2V = 92 \text{ kN (kesmede kırılma yükü)}$$

$$F_c = F_s$$

$$0,85 \times 16 \times 150 \times k_{1c} = 3 \times 154 \times 420$$

$$k_{1c} = 95,12 \text{ mm}$$

$$M_d = M_r$$

$$(P \div 2) \times 0,6 = 45,1 \rightarrow P = 150,3 \text{ kN}$$

92 < 150,3 olduğu için kiriş kesme kuvvetleri etkisi altında kırılacaktır.

### 4.3. Kiriş Deney Elemanları

Deney elemanlarının hazır hale getirilip test edilmesi için yapılan tüm işlemler laboratuvar koşullarında gerçekleşmiştir. Deneyler her bir eleman için donatı kafesinin ve kalıbının hazırlanması ardından betonun üretilip dökülmesi ve son olarak da kirişlere ilk kılcal çatlak gözle görülünceye kadar hasar verip güçlendirme işleminin uygulanıp test aşamasına geçilmesi şeklinde olmaktadır.

İlk olarak elemanların donatı kafesleri detaylarda belirtilen ölçülerde hazırlanmıştır. Boyuna donatı olarak kullanılan Ø14 mm çapında nervürlü inşaat demirleri tasarlanan boyda kesilip bükülmüştür. Ø6 mm çapında donatı kullanılarak önceden hazırlanan bükme kalıbı içerisinde gerekli etriye üretimi yapılmıştır. Daha sonra Ø6 mm çapında montaj donatıları bağlanmış etriyeler üstten ve alttan kiriş çekme ve basınç donatısına bağ teli ile bağlanarak donatı kafesleri hazırlanmıştır (Şekil 4.1.).

Kalıplar plywood malzemeden üretilmiş olup beton dökümü için laboratuvarında hazırlanmıştır. Daha sonra kalıbın iç yüzeyi betonu kalıptan alırken kolaylık sağlaması amacıyla yağlanmış ve donatı kafesleri paspayı bırakacak şekilde kalıbın içine yerleştirilmiştir (Şekil 4.2).

Bütün bu işlemlerden sonra beton dökümü aşamasına gelinmiştir. Laboratuvarında betoniye yardımcıyla hazırlanan beton vibratör kullanılarak kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 4.3). Betonun yeterli priz alması için yaklaşık iki gün beklenmiş ve kalıplar sökülüştür. Kirişler ve betondan alınan silindir numuneleri ıslak çuvallarla sarılarak 28 gün boyunca kür yapılmıştır.



Şekil 4.1. Deney elemanlarının donatı kafesleri



Şekil 4.2. Deney elemanlarının kalıba yerleştirilmesi





Şekil 4.3. Deney elemanlarının beton dökümü

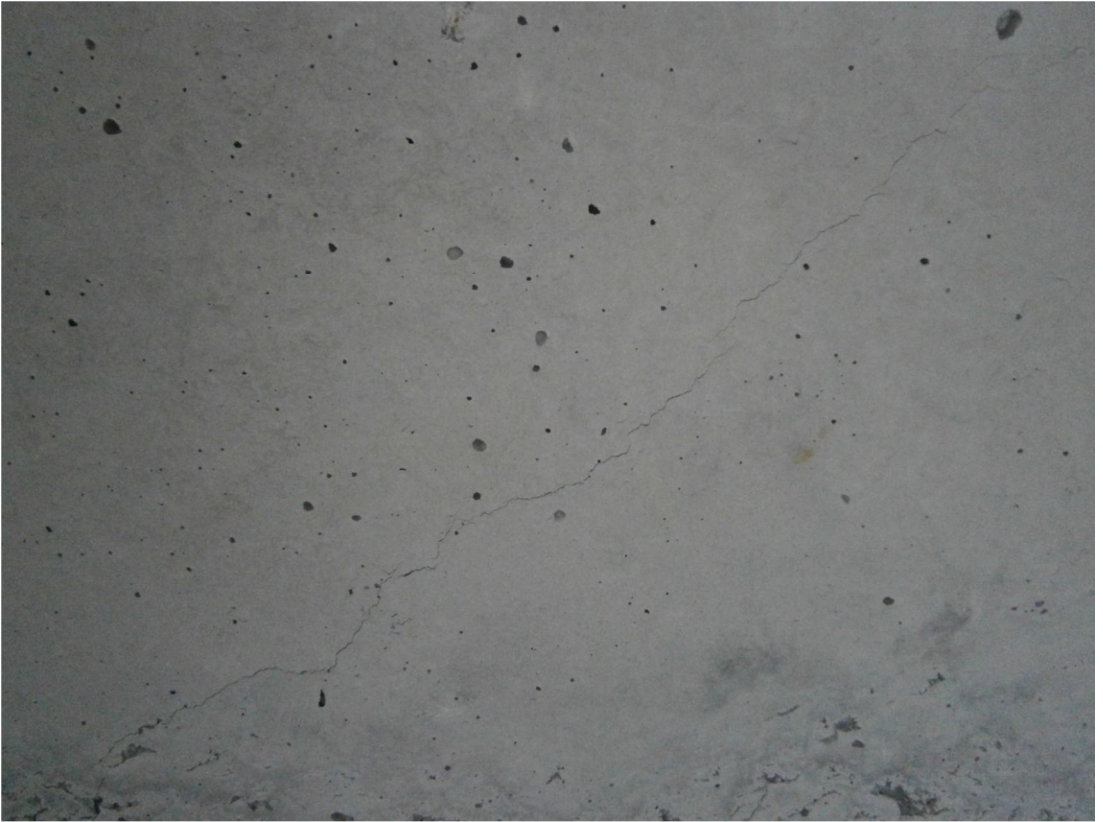
## 5. KİRİŞ DENEY ELEMANLARINA HASAR VERİLMESİ

Tez çalışması kapsamında üretilen 3 adet deney kiriş kesme bölgesinde ilk kılcal çatlak gözle görülene kadar yüklenmiştir. Hasar verilen kirişler daha sonra güçlendirilerek yüklenmiş ve referans kirişle karşılaştırılmıştır. Deney kirişlerinin tamamında kılcal kesme çatlakları oluştuğu ve bu çatlakların kiriş kesme bölgesi ile mesnet bölgesi arasında 45°'lik bir açı yaparak uzandığı gözlenmiştir (Şekil 5.1., Şekil 5.2.).

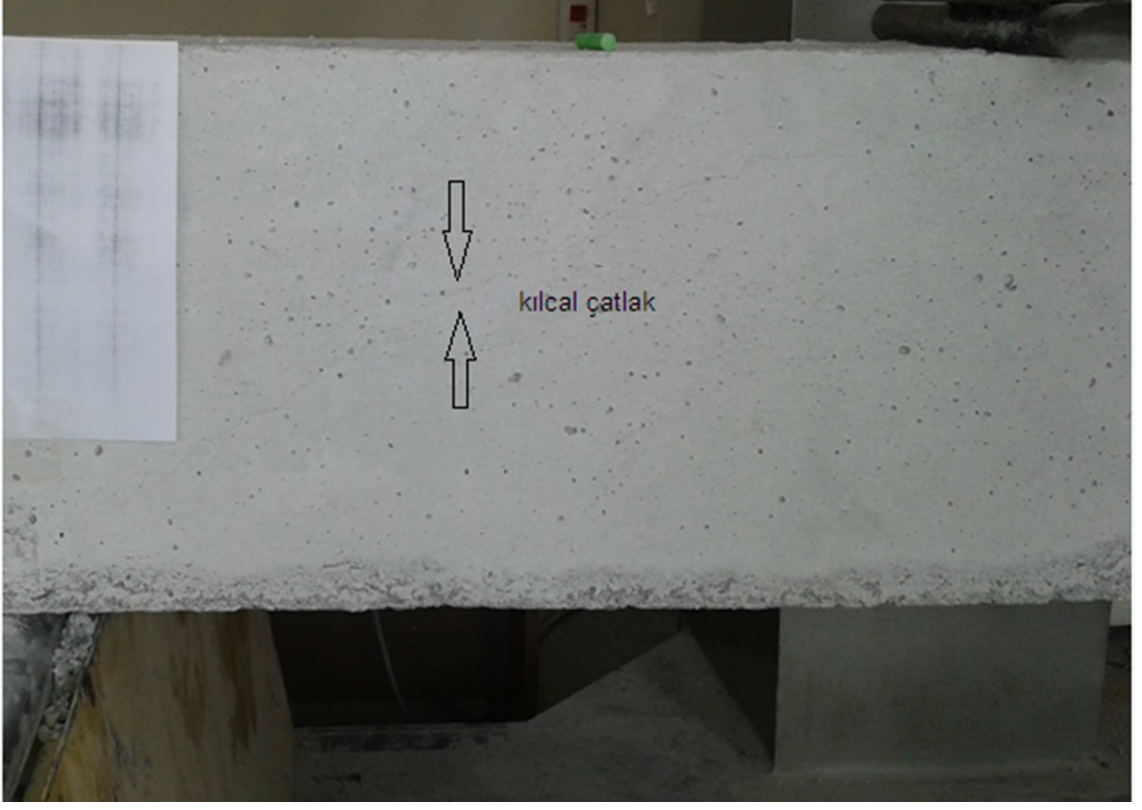
İlk hasar verilen GK1 kirişi 51.22 kN değerine kadar yüklenmiştir. Okunan bu değerde ilk kılcal kesme çatlakları gözlenmiş olup deplasman değeri ise 5,72 mm'dir. Kesme çatlakları kiriş sol ve sağ mesnet kısmından 95 mm uzaklıkta mesnete doğru 45°'lik açıyla kiriş gövdesinde oluşmuştur.

İkinci hasar verilen GK2 kirişi 53.77 kN değerine kadar yüklenmiştir. Okunan bu değerde ilk kılcal kesme çatlakları gözlenmiş olup deplasman değeri ise 6,03 mm'dir. GK2 kirişinde okunan ilk çatlakların yük değerinin diğer kirişlere oranla biraz daha yüksek olmasının sebebi bu kirişin kalıp ve beton işçiliğinin daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır.

Son olarak GK3 kirişine hasar verilmiştir. Bu kirişte okunan yük değeri 49,63 kN deplasman değeri ise 5,61 mm'dir.



Şekil 5.1. Hasar verilen kirişlerde kılcal çatlak oluşumu

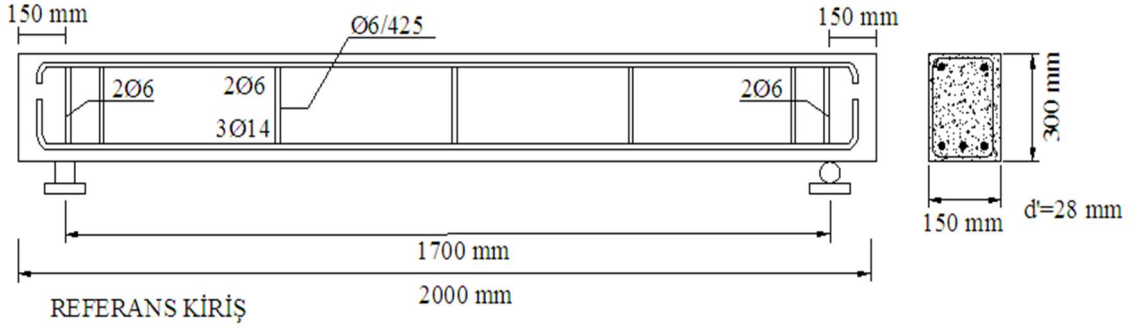


Şekil 5.2. Hasar verilen kirişlerde kılcal çatlak oluşumu

## 6.KİRİŞ DENEY ELEMANLARININ GÜÇLENDİRİLMESİ

### 6.1. Genel

Kesme kapasitesi yetersiz olan kirişler  $\text{Ø}6/425$  mm eksik etriyeli ve çekme bölgesinde  $3\text{Ø}14$  donatı olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 6.1.).

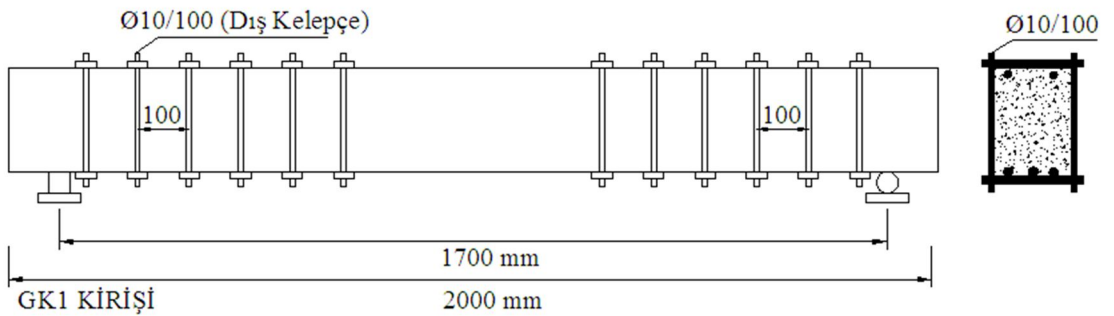


Şekil 6.1. Referans kirişin donatı özellikleri

Güçlendirilmesi yapılmış kirişler ise 3 farklı tipte hazırlanmıştır. Bu bölümde güçlendirmesi yapılan GK1 GK2 ve GK3 kirişlerinin güçlendirme planı ve detayları sunulmuştur.

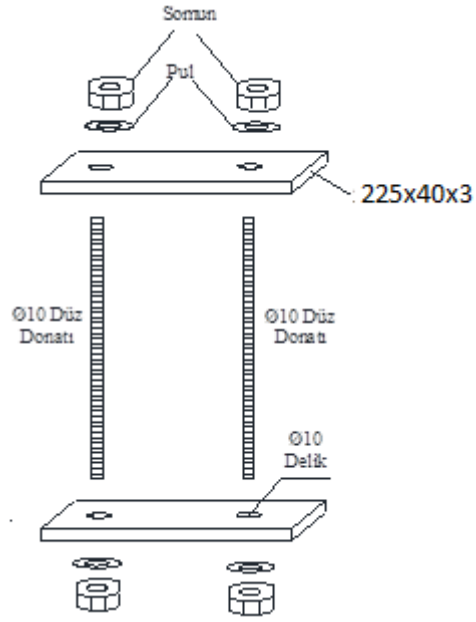
### 6.2. GK1 Kirişinin Güçlendirilmesi

GK1 kirişi Demir (2012) tarafından geliştirilen özel bir yöntemle güçlendirilmiştir. Güçlendirmede 10 mm kalınlığında özel olarak üretilen donatılar yardımıyla her iki kiriş kesme bölgesi sarılmıştır. GK1 kirişinin güçlendirme planı Şekil 6.2.'de sunulmuştur.



Şekil 6.2. GK1 kirişinin güçlendirme planı

Demir (2012) tarafından geliştirilen enine dış donatı detayı Şekil 6.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Enine dış donatı detayı

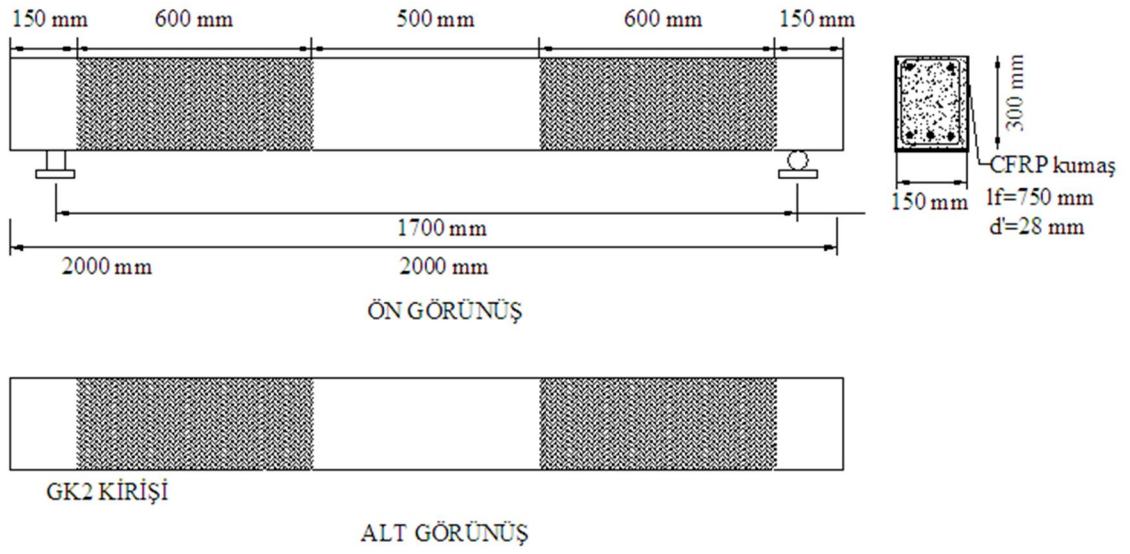
Dış donatılar laboratuvar ortamında 3 mm kalınlığındaki çelik levha, somun ve pul yardımıyla kirişlere başarıyla yerleştirilmiştir (Şekil 6.4.).



Şekil 6.4. GK1 kirişinin dış donatılar ile sarılarak güçlendirilmesi

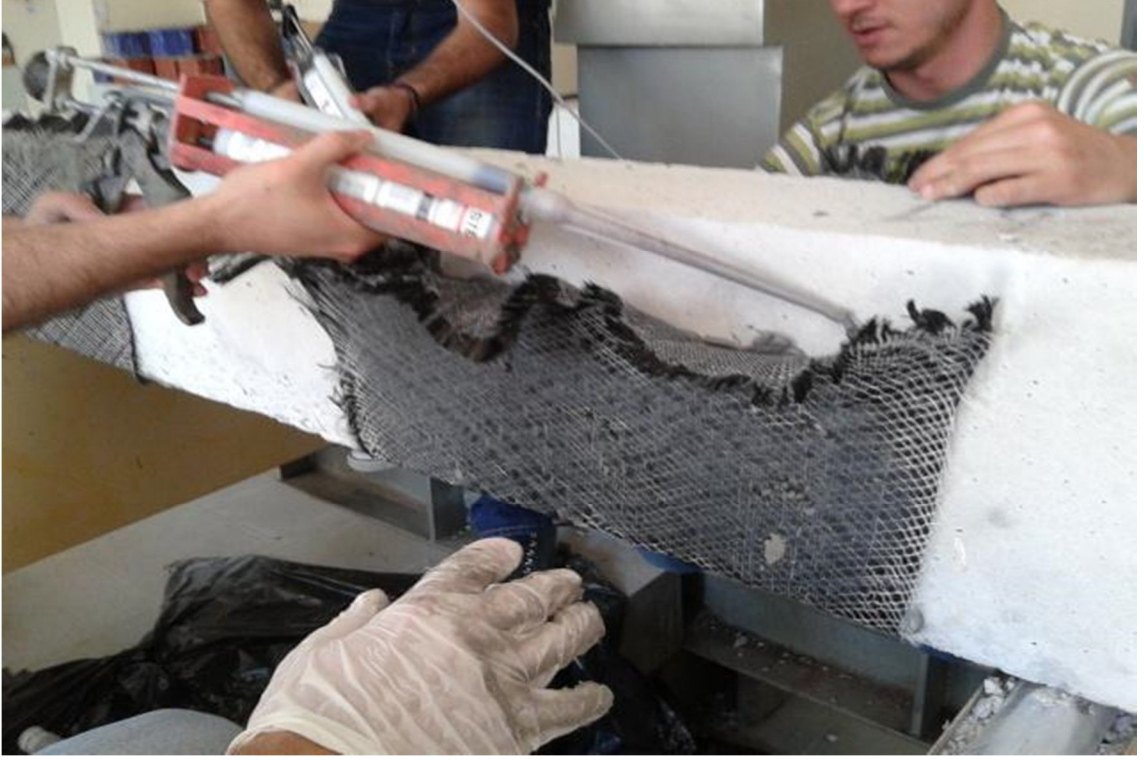
### 6.3. GK2 Kirişinin Güçlendirilmesi

GK2 kirişi CFRP'nin kiriş kesme bölgesinin tamamına epoksi yardımıyla sarılması yöntemiyle güçlendirilmiştir. 750 mm boyunda ve 600 mm eninde kesilen CFRP kirişe 'U' şeklinde sarılmıştır. GK2 kirişinin güçlendirme planı Şekil 6.5.'te sunulmuştur.



Şekil 6.5. GK2 kirişinin güçlendirme planı

CFRP malzemeler için yüzey hazırlığı çok önemlidir. Bu malzemelerin uygulamasındaki en önemli sorun malzemenin sıyırılması ve betonun paspayı tabakasını alarak sıyırılmasıdır. Bu yüzden CFRP uygulamasından önce kiriş yüzeyleri ıslak bir bezle silinmiş ve tozdan arındırılmıştır. Yapıştırma esnasında da kumaş ile kiriş yüzeyi arasında hava kalmamasına özen gösterilmiştir (Şekil 6.6., Şekil 6.7.).



Şekil 6.6. GK2 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi

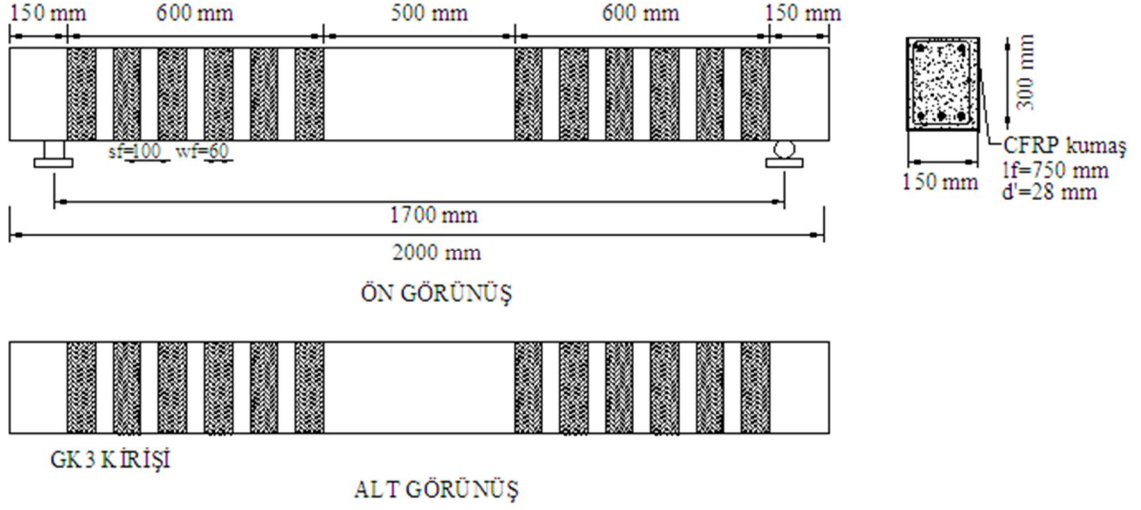


Şekil 6.7. GK2 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi



#### 6.4. GK3 Kirişinin Güçlendirilmesi

GK3 kirişi ise 60 mm genişliğinde kesilen CFRP ile kesme bölgesi boyunca epoksi yardımıyla sarılarak güçlendirilmiştir. CFRP kumaşı kirişe 'U' şeklinde ve eksenden eksene 100 mm aralıklarla yapıştırılmıştır. GK3 kirişinin güçlendirme planı Şekil 6.8.'de sunulmuştur.



Şekil 6.8. GK3 Kirişinin güçlendirme planı

GK2 kirişinde de olduğu gibi epoksi ile yapıştırma işleminden önce kiriş yüzey temizliği yapılmış ve altta hava kalmayacak şekilde CFRP kiriş kesme bölgesine 'U' şeklinde yapıştırılmıştır (Şekil 6.9., Şekil 6.10.).



Şekil 6.9. GK3 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi



Şekil 6.10. GK3 kirişinin Karbon takviyeli kumaş lifleriyle sarılıp güçlendirilmesi

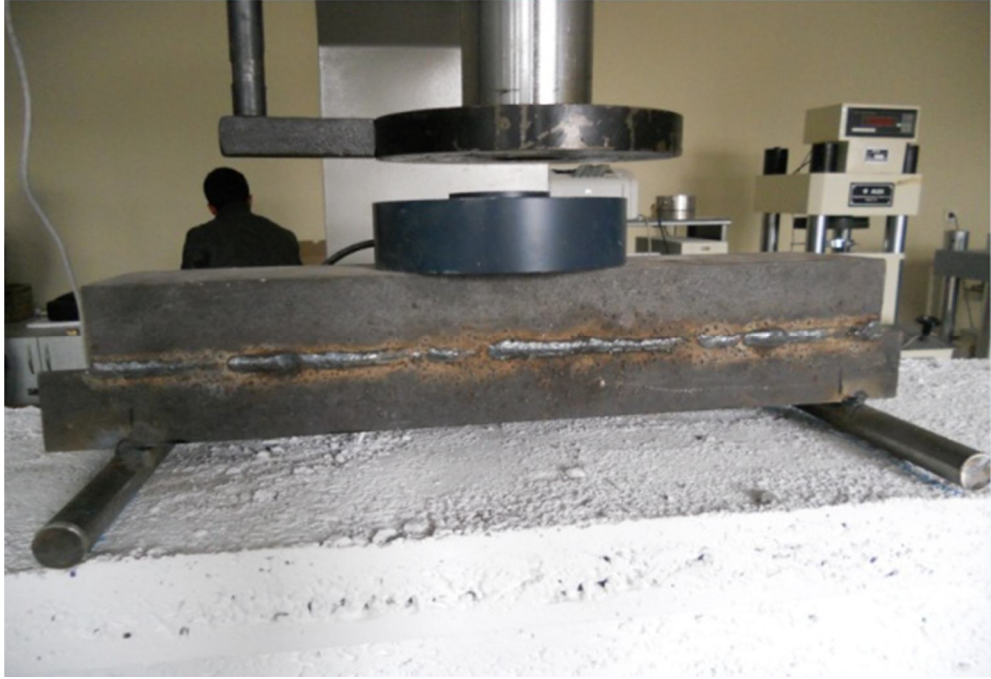
## 7. KİRİŞ DENEYLERİNİN YAPILMASI

### 7.1. Deney Düzeneğinin Hazırlanması

Deneyler Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği laboratuvarında hazırlanmış ve yapılmıştır.

### 7.2. Yükleme Sistemi

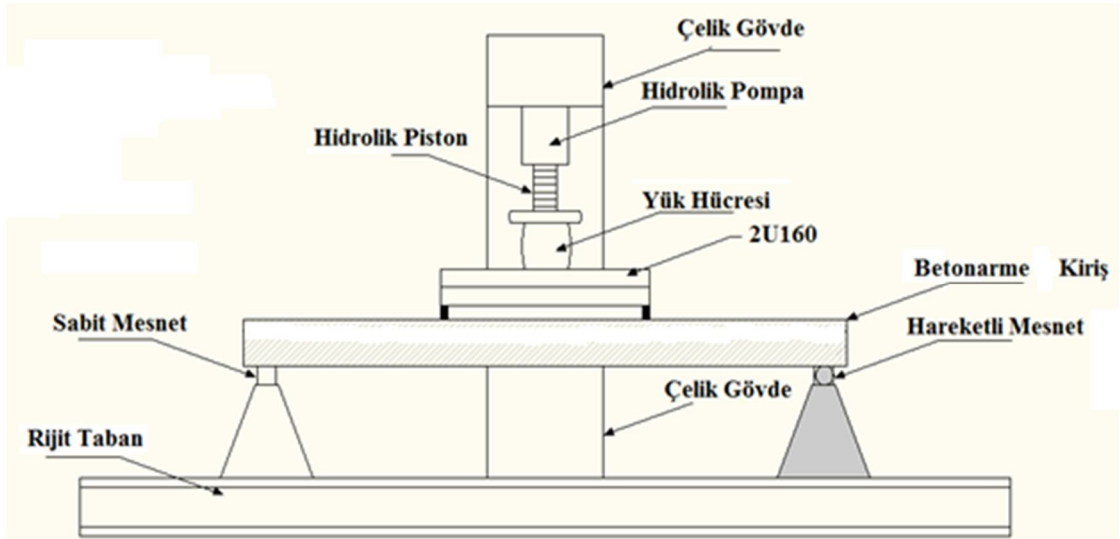
Kirişlere dış yük olarak, kirişlerin net açıklığının 1/3 mesafesinden iki noktalı tekil yükleme yapılmıştır. Yükleme hidrolik piston yardımıyla 2U160 profili vasıtasıyla betonarme kirişe aktarılmıştır. Yükleme hızı bilgisayar ile kontrol edilebilen, yük kapasitesi 250 kN olan yük hücresi kullanılmıştır. Kiriş yükleme hızı 0.5 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Kiriş deney elemanların mesnetleri biri sabit diğeri hareketli olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 7.1., 7.2. ve 7.3.'te yükleme sisteminin ayrıntıları gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Yükleme sistemi-yük hücresi, ve U profil



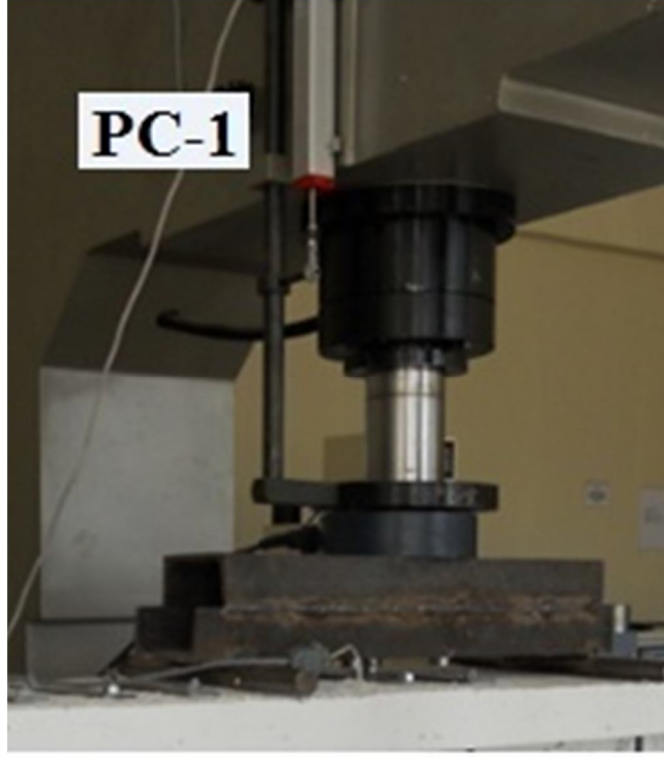
Şekil 7.2. Yükleme sistemi



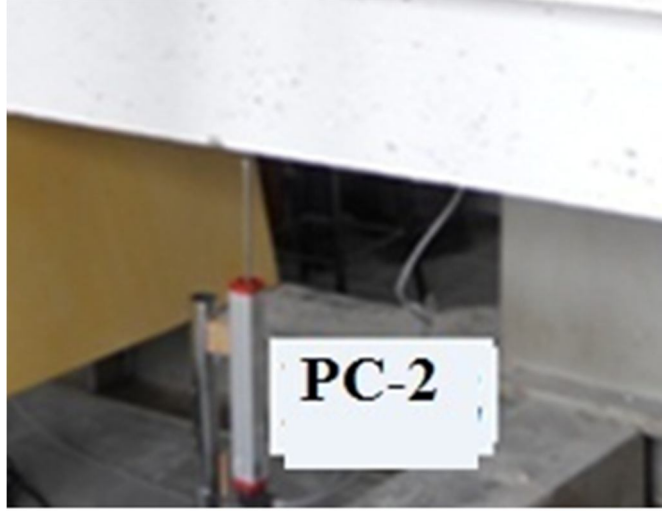
Şekil 7.3. Yükleme sisteminin genel görüntüsü

### 7.3. Ölçüm Düzeni

Çalışma kapsamında deplasmanları ölçmek için 2 adet potansiyometrik cetvel (PC) kullanılmıştır. Boyuna donatılara ise 1 adet strain gauge (SG) bağlanmıştır. Bu ölçüm cihazları yardımıyla ölçülen yük, deplasman ve şekil değiştirme değerleri 8 kanallı dinamik veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılarak kirişlerin yük deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 7.4.-7.7.'de ölçüm düzeneğini gösterilmiştir. Potansiyometrik cetvelin biri kirişin altına, diğeri hidrolik sistem üzerine bağlanmıştır.



Şekil 7.4. Potansiyometrik Cetvel Konumları



Şekil 7.5. Potansiyometrik Cetvel Konumları



Şekil 7.6. 8 Kanallı Dinamik Veri Toplama Cihazı



Şekil 7.7. 8 Kanallı Dinamik Veri Toplama Cihazı

## 8. DENEY SONUÇLARI

### 8.1. Genel

Bu bölümde deney sonuçları ve deney sırasındaki gözlemler ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ilk olarak referans kiriş (REF) test edilmiştir. İkinci aşamada ise farklı şekilde güçlendirilen hasarlı GK1, GK2 ve GK3 kirişleri test edilmiş ve kırılmıştır. Referans kiriş ve güçlendirilmiş kirişlerin göçme anına kadarki davranışları ve elde edilen deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Her deney elemanı için yük-deplasman grafikleri, çatlak oluşumları ve genel davranışları verilmiştir.

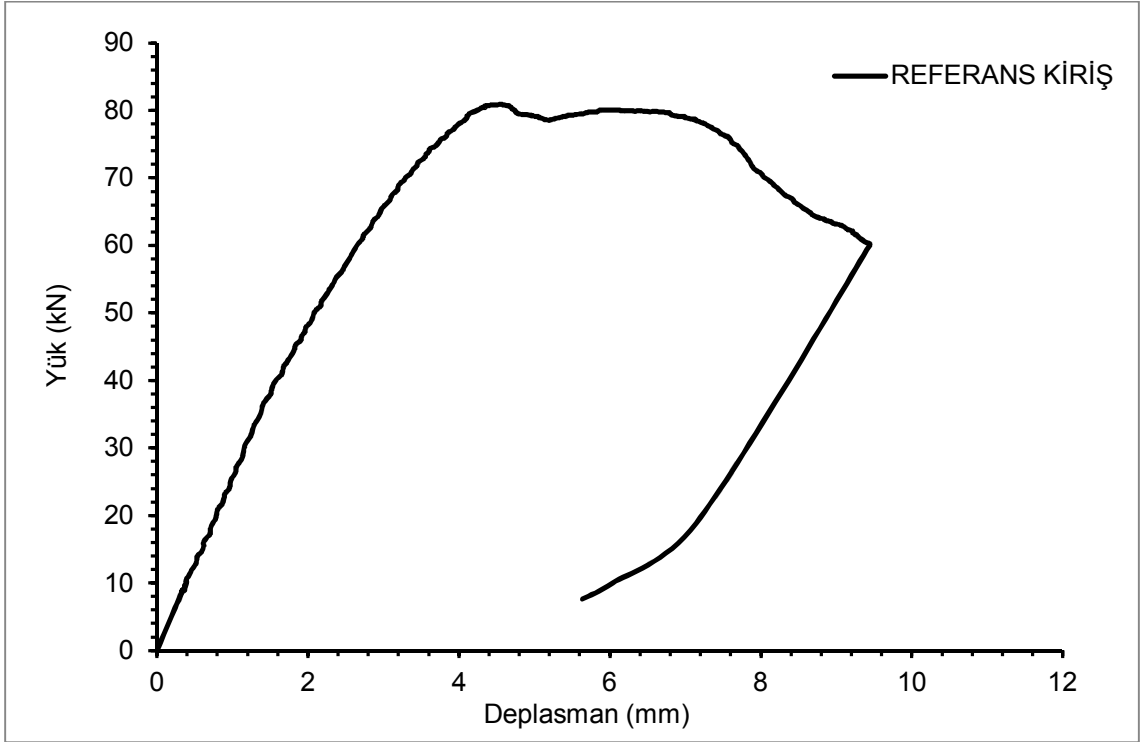
### 8.2. Deney Elemanı Referans Kiriş

Deneysel programda ilk olarak referans kiriş test edilmiş ve deney elemanı tamamen kırılarak deneye son verilmiştir. Kesme dayanımı yetersiz olarak üretilen referans kirişin yük deplasman grafiği Şekil 8.1.'de sunulmuştur.

Referans kirişte (REF), ilk kesme çatlak 48 kN kesme kuvveti altında sol mesnet kısmından 100 mm uzaklıkta mesnete doğru 45°'lik açıyla kiriş gövdesinde oluşmuştur. 2,03 mm deplasman değerinde görülen kılcal kesme çatlak yüklemeye devam edilmesiyle genişlemiş ve yaklaşık 7 mm genişliğine ulaşmıştır. 80,88 kN yük ve 4,57 mm deplasman değerinde donatı akmaya başlamış ve 79,83 kN yük ve 6,61 mm değerlerinde kiriş kırılarak deneye son verilmiştir (Şekil 8.2., Şekil 8.3.).

Referans kiriş beklenildiği gibi kesme kuvveti etkisi altında gevrek bir şekilde aniden kırılmış ve yeterli süneklik yapamamıştır.





Şekil 8.1. Referans Kirişin yük-deplasman grafiği



Şekil 8.2. Referans kirişte göçme sonucu oluşan kesme çatlakları

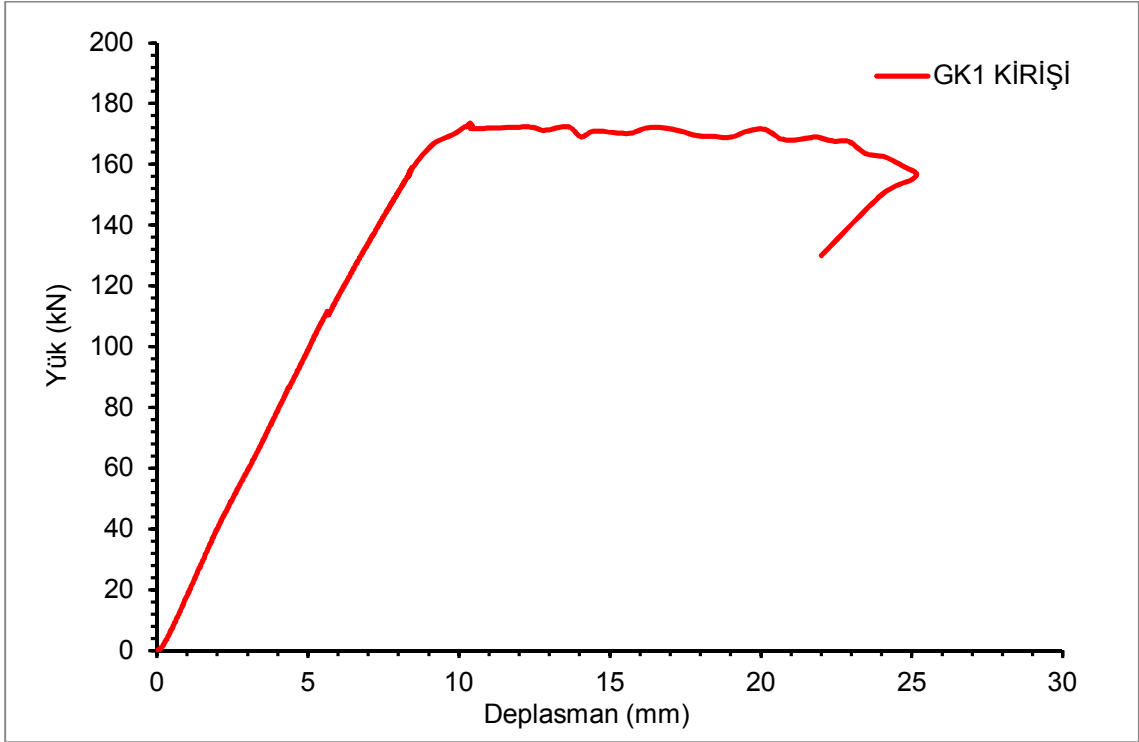


Şekil 8.3. Referans kirişte göçme sonucu oluşan kesme çatlakları

### 8.3. Deney Elemanı GK1 Kirişi

Deney aşamasında ikinci olarak kiriş dışından dış donatı ekleme yöntemi uygulanarak güçlendirilen GK1 kirişi yüklenerek test edilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirilen GK1 kirişinin yük-deplasman grafiği Şekil 8.4.'te sunulmuştur. Deneye başladıktan sonra 172,55 kN yük ve 10,28 mm deplasman değerinde donatıda akma başlamıştır. Yük artmaya devam ettikçe kesme hasarlı bölgedeki çatlaklar az miktarda genişlemiş, kelepçeler çatlak genişliğini sınırlandırmış ve 4 mm civarında tutmuşlardır. Yük 169 kN ve 21,80 mm deplasman değerinde ise kiriş kesme kapasitesine ulaşmış ve göçmüştür (Şekil 8.5., Şekil 8.6., Şekil 8.7.). Kelepçeyi oluşturan kiriş basınç ve çekme yüzeylerindeki 3 mm kalınlığındaki levhaların tamamına yakınında eğilmeler görülmüştür.

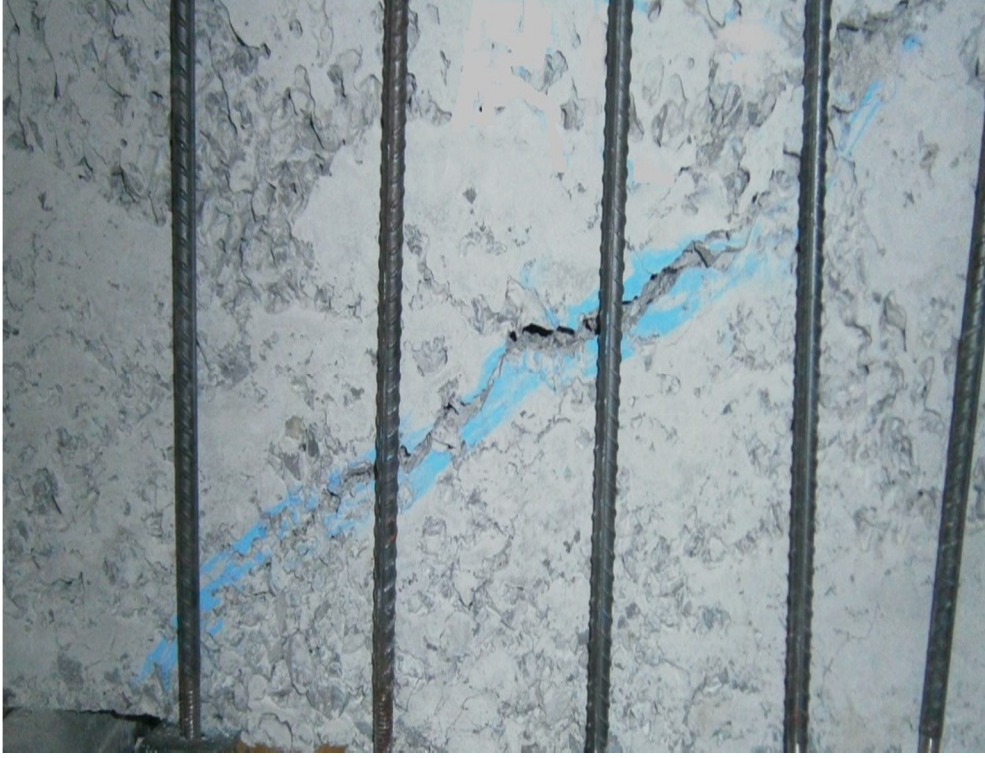
Kelepçe ile güçlendirilen GK1 kirişinde önemli yük ve deplasman artışları sağlanmıştır. Kiriş kesme çatlakları ile göçmüş olmasına rağmen 45°'lik çatlaklar daha yavaş ilerlemiş ve ani bir göçme yaşanmamıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde hasarlı bir kirişin kelepçeler ile başarı ile güçlendirilebileceği anlaşılmıştır.



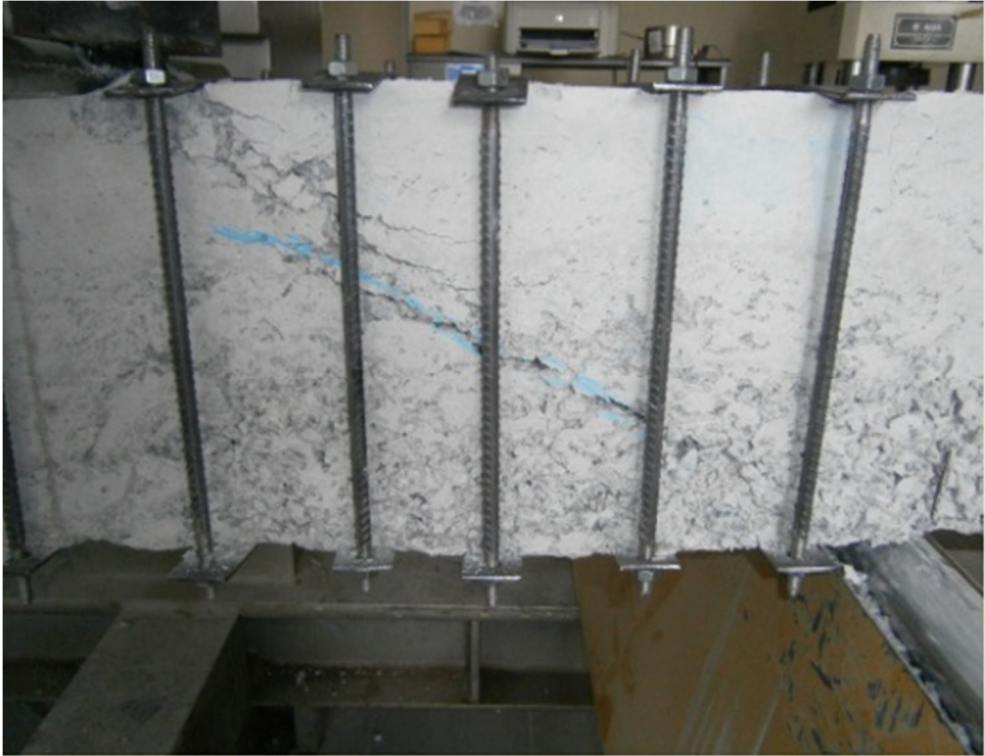
Şekil 8.4. GK1 Kirişinin yük-deplasman grafiği



Şekil 8.5. GK1 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları



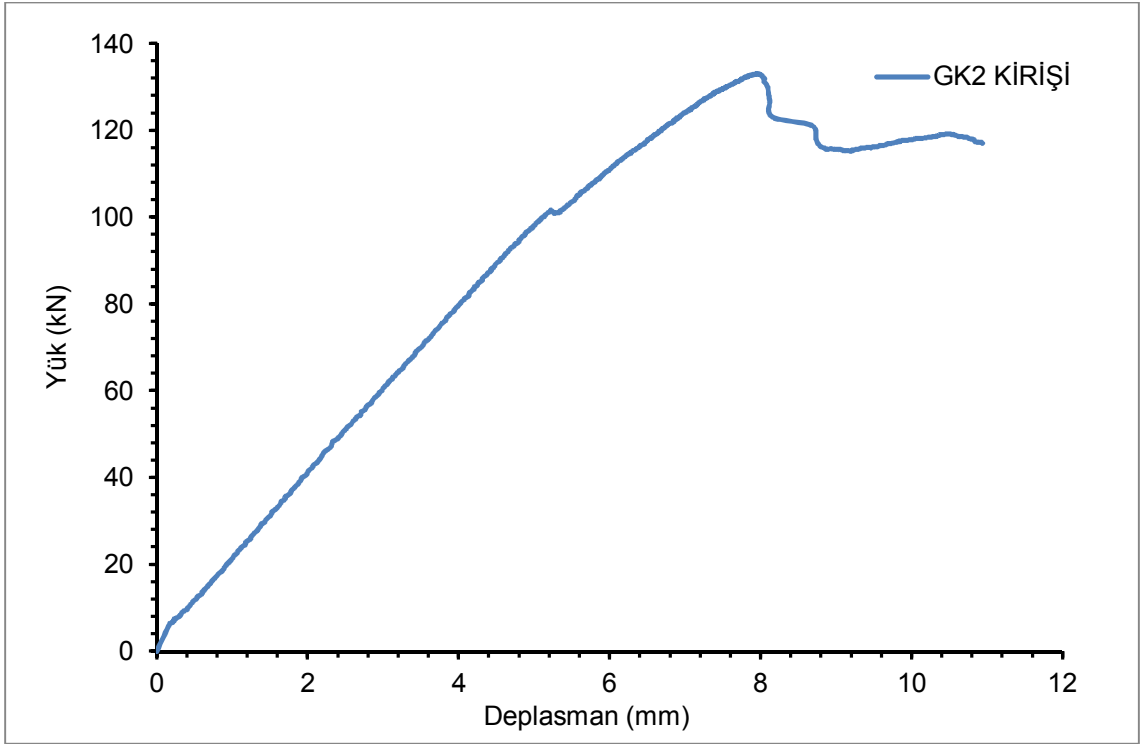
Şekil 8.6. GK1 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları



Şekil 8.7. GK1 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları

#### 8.4. Deney Elemanı GK2 Kirişi

Kesmeye karşı uygulanan ikinci güçlendirme yönteminde ise CFRP epoksi ile kiriş kesme bölgesine 'U' şeklinde yapıştırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 8.8.'de sunulmuştur. Deneye başladıktan sonra 133,08 kN yük ve 7,95 mm deplasman değerinde donatı akmaya başlamıştır. Yük 119,22 kN ve deplasman 10,46 mm değerine ulaştığında ise kiriş kesme kapasitesine ulaşmış ve göçmüştür. Kirişi saran CFRP'de kiriş gövde kısmında ve kiriş eksenine dik bir vaziyette oluşan yırtılmalar görülmüştür (Şekil 8.9.). Kılcal kesme çatlak genişlikleri deney sonunda 8 mm genişliğine kadar çıkmıştır (Şekil 8.10). Uygulanan güçlendirme yöntemiyle dayanımda önemli artışlar sağlanmasına rağmen oldukça kötü süneklik değerlerine ulaşılmış ve ani bir göçme yaşanmıştır.



Şekil 8.8. GK2 Kirişinin yük-deplasman grafiği



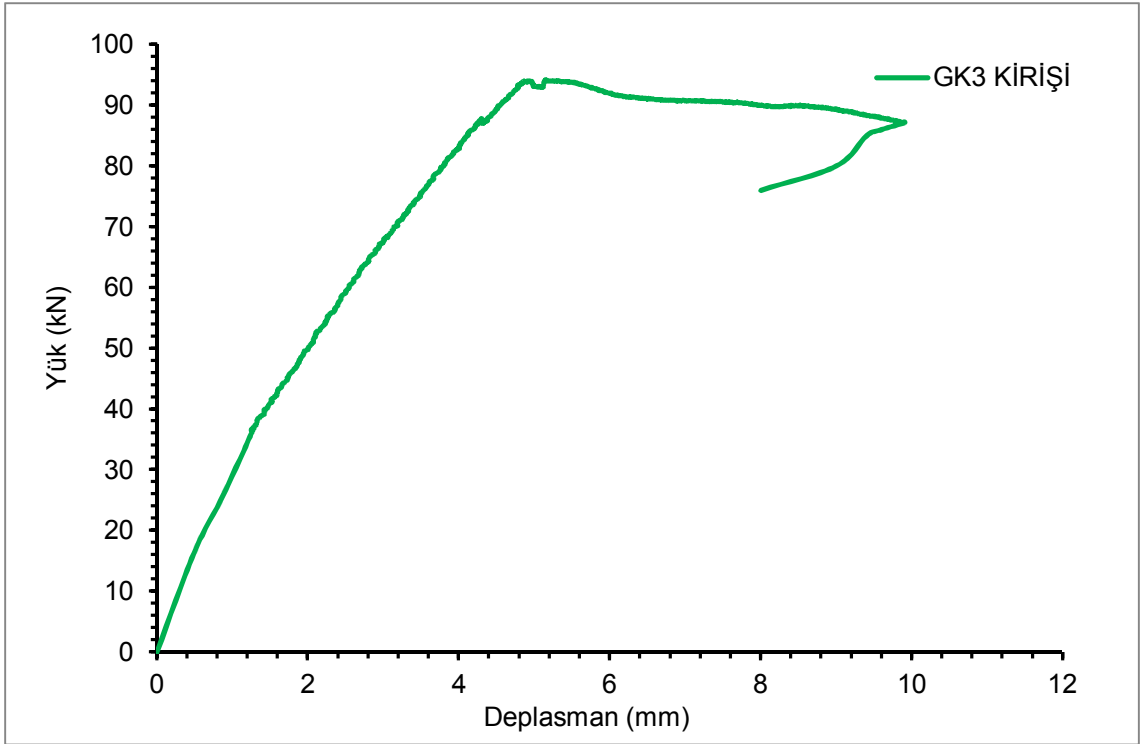
Şekil 8.9. Deney sonunda kirişi saran CFRP'de görülen yırtıklar



Şekil 8.10. GK2 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları

### 8.5. Deney Elemanı GK3 Kiriş

Yapılan son güçlendirme deneyinde ise 60 mm genişliğinde kesilen CFRP kiriş kesme bölgesine 100 mm aralıklarla 'U' şeklinde yapıştırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 8.11.'de sunulmuştur. Deneye başladıktan sonra 93,96 kN yük ve 4,87 mm deplasman değerinde donatı akmaya başlamıştır. Yük 88,20 kN ve deplasman 9,49 mm değerine ulaştığında ise kiriş kesme kapasitesine ulaşmış ve göçmüştür. Kirişi saran CFRP kiriş gövdesinden koparak sıyrılmıştır (Şekil 8.12.). Kesme çatlak genişlikleri deney sonunda 10 mm genişliğe ulaşmıştır (Şekil 8.13).



Şekil 8.11. GK3 Kirişinin yük-deplasman grafiği



Şekil 8.12. CFRP'nin kiriş gövdesinden sıyrılması



Şekil 8.13. GK3 kirişinde göçme sonucu oluşan kesme çatlakları



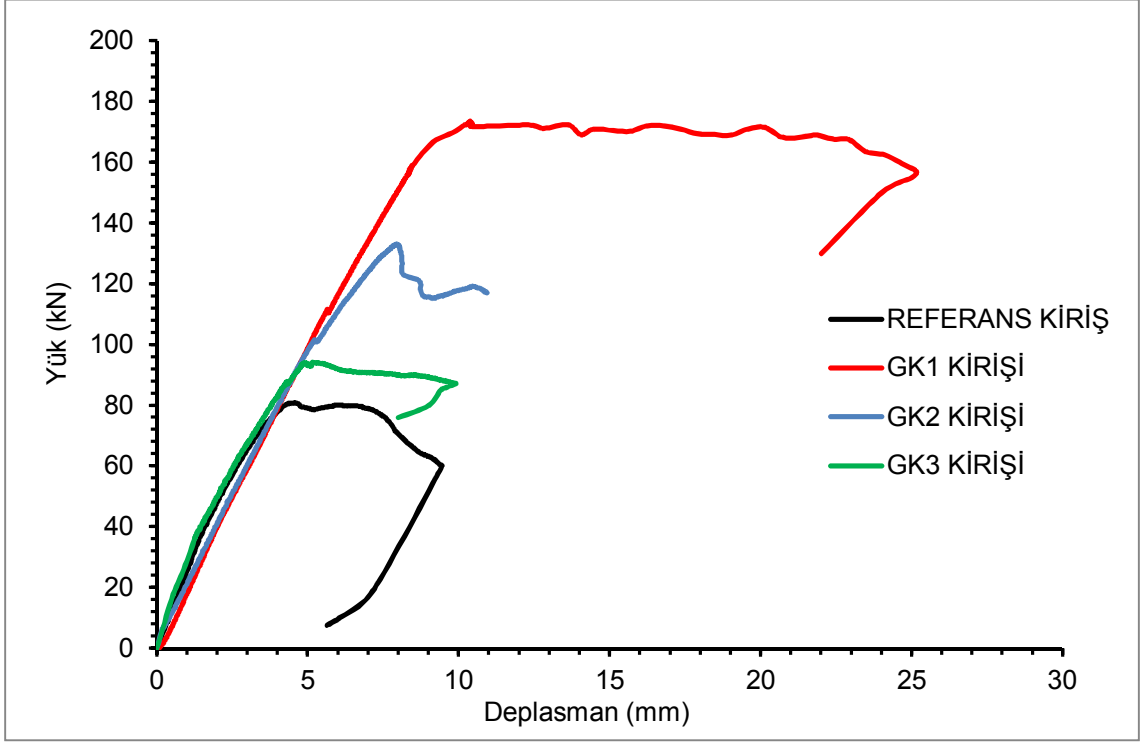
## 9. DEĞERLENDİRMELER

### 9.1. Genel

Bu bölümde, deney elemanlarının testlerinden elde edilen bulgular ışığında kesme dayanımı yetersiz kirişlerin dıştan yerleştirilen kelepçelerle ve 'U' şeklinde yapıştırılan CFRP'ler ile kesmeye karşı güçlendirme tekniğinin elemanların davranış, dayanım, rijitlik, süneklik, enerji tüketimi ve maliyeti yönünden etkileri incelenmiştir. Dış donatı ekleme ve CFRP ile yapıştırma yöntemleri ile güçlendirilen kirişlerin artan yükler altındaki davranışları, referans kiriş ile karşılaştırılmış ve kullanılan güçlendirme tekniklerinin etkinliği irdelenmiştir.

### 9.2. Taşıma Gücü

Referans kiriş ile dış donatılar ile güçlendirilen GK1 kirişi ve CFRP ile güçlendirilen GK2 ve GK3 kirişlerinin deney sonrasında ulaşılan taşıma güçlerinde büyük farklılıklar görülmüştür. Deney kirişlerinin yük-deplasman eğrileri üst üste çizilmiş ve Şekil 9.1.'de sunulmuştur. Güçlendirilen tüm deney elemanlarının dayanımında artışlar sağlanmıştır. GK1 deney elemanında referans kirişe göre % 113 dayanım artışı görülürken bu artış oranı GK2 kirişinde % 65, GK3 kirişinde ise %16'dır. GK1 ve GK2 deney elemanlarında hedeflenen taşıma gücü değerlerine ulaşılmasına rağmen GK3 elemanında küçük bir taşıma gücü artışı sağlanmıştır. Deneyler sonucunda kelepçelerin, CFRP' ye oranla hasarlı kirişlerin yük taşıma kapasiteleri üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.



Şekil 9.1. Deney kirişlerinin yük-deplasman eğrileri

### 9.3. RİJİTLİK

Deney elemanlarının rijitlik değerleri yük deplasman eğrilerinden hesaplanmıştır. Akmada rijitlik değerleri elemanların yük deplasman grafiklerinde belirlenen akma anındaki yük değerinin deplasman değerine oranı, göçmede rijitlik değerleri ise elemanların yük deplasman grafiklerinde belirlenen göçme anındaki yük değerinin deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Akma ve göçme yükü düzeylerinde hesaplanan rijitlikler Çizelge 9.1.'de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Deney elemanlarında hesaplanan rijitlik değerleri

Deney elemanı	Akma yükü (kN)	Göçme yükü (kN)	Akmada Deplasman $\delta_y$ (mm)	Göçmede Deplasman $\delta_U$ (mm)	Akmada Rijitlik (kN/mm)	Göçmede Rijitlik (kN/mm)
REF. KİRİŞ	80,88	79,83	4,57	6,61	17,70	12,08
GK1 KİRİŞİ	172,55	169	10,28	21,80	16,79	7,75
GK2 KİRİŞİ	133,08	119,22	7,95	10,46	16,74	11,40
GK3 KİRİŞİ	93,96	88,20	4,87	9,49	19,29	9,29

Deney elemanlarının akmadaki rijitlikleri birbirine çok yakındır. Elemanların göçme yükü düzeyindeki rijitlik değerleri ise birbirinden farklıdır. Rijitlik azalımı referans kirişte % 32, GK1, GK2 ve GK3 kirişlerinde ise sırasıyla % 54, % 32 ve % 52 oranındadır.

#### 9.4. SÜNEKLİK

Süneklik, dayanımda önemli bir kayıp olmaksızın deformasyon yapabilme yeteneği olduğu için süneklik oranı ulaşılan dayanımın ne kadar korunduğunun iyi bir göstergesi olacaktır. Bu oranın genellikle 4~5'ten daha küçük olması istenmez. Bu çalışmada süneklik oranı kopma anındaki deplasman değerinin akma anındaki deplasman değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarına ait süneklik oranları Çizelge 9.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 9.2. Deney elemanlarına ait süneklik oranları

Deney Elemanı	Akma Anındaki Deplasman $\delta_y$ (mm)	Kopma Anındaki Deplasman $\delta_u$ (mm)	Süneklik ( $\delta_u / \delta_y$ )
REF. KİRİŞ	4,57	6,61	1,45
GK1 KİRİŞİ	10,28	21,80	2,12
GK2 KİRİŞİ	7,95	10,46	1,32
GK3 KİRİŞİ	4,87	9,49	1,95

Çizelgede belirtilen değerler incelendiğinde GK1 ve GK3 deney elemanlarının yalın kirişe oranla daha yüksek süneklik oranına sahip olduğu görülmektedir. GK1 kirişi yalın kirişten % 46 daha fazla sünek davranarak deney programının en fazla süneklik gösteren elemanı olmuştur. GK3 kirişi ise yalın kirişten % 34 daha fazla bir süneklik oranına sahiptir. GK2 kirişi ise deneysel programdaki en kötü süneklik oranına sahip eleman olup yalın kirişten % 9 daha kötü bir süneklik göstermiştir.

#### 9.5. ENERJİ TÜKETME KAPASİTESİ

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanların hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Bu alan tüm elemanlarda joule cinsinden hesaplanmış ve Çizelge 9.3.'te topluca sunulmuştur.

Çizelge 9.3. Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi

Deney Elemanı	Max Pu (kN)	Sehim (mm)	Enerji Tüketme Kapasitesi (joule)
REF KİRİŞ	80,88	4,57	480
GK1 KİRİŞİ	172,55	10,28	3400
GK2 KİRİŞİ	133,08	7,95	1040
GK3 KİRİŞİ	93,99	5,31	630

GK1 kirişinde enerji tüketme kapasitesi yalın kirişe göre % 608 oranında artmıştır. Güçlendirilen diğer elemanlar GK2 ve GK3 kirişleri ise referans kirişe göre sırasıyla % 117 ve % 31 daha fazla enerji tüketme kapasitesine sahiptirler.

### 9.6. Maliyet

Değerlendirmeler bölümünde son olarak güçlendirilen deney elemanlarının maliyetleri karşılaştırılmış ve hangi yöntemin daha ekonomik olduğu ile ilgili çalışma yapılmıştır (Çizelge 9.4.).

Çizelge 9.4. Deney elemanlarının güçlendirme maliyetleri

Güçlendirilen Kiriş Maliyet	GK1	GK2	GK3
Somun	22,56 TL	-	-
Pul	11,04 TL	-	-
Çelik Levha	18,00 TL	-	-
Ø10 İnşaat demiri+dış dibi açılması	240 TL	-	-
CFRP	-	239 TL	239 TL
Epoksi	-	50 TL	40 TL
Epoksi Tabancası	-	25 TL	25 TL
<b>TOPLAM:</b>	291,60 TL	314 TL	304 TL

Yukarıdaki çizelgeden de anlaşılacağı gibi deney kirişlerinde farklı güçlendirme metotları uygulanmasına karşın güçlendirme maliyetleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Güçlendirmede CFRP veya dış donatı ekleme durumlarında maliyet faktörü belirleyici rol oynamamaktadır.

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 10.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında hasarlı betonarme kirişlerin farklı teknikler ile güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneyler ile elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Kesme kapasitesi yetersiz olarak tasarlanan kirişlerin tümü kesme çatlakları ile göçmüştür.
- Dörtgen kirişler iki noktadan çelik transfer kirişi ile monotonik artan yükler ile yüklenmiştir. Kirişlerde hasar oluşturabilmek için yüklemeye başlanmış ve kirişler izlenmiştir. İlk çatlak oluştuğunda yüklemeye son verilmiştir. Tüm kirişlerin ilk çatlakları yaklaşık 50 kN yük seviyesinde oluşmuştur.
- Hasarlandırılan kirişler onarılmadan güçlendirilmiştir. Üç farklı güçlendirme tekniği kullanılmıştır. Bunlardan birincisi dış kelepçe uygulaması, diğerleri ise CFRP uygulamasıdır. İkinci yöntemde CFRP kesme bölgesine komple sarılmış, üçüncü yöntemde ise kesme bölgesine şeritler halinde sarılmıştır.
- Kesme dayanımı yetersiz hasarlı kirişlerin eleman dışından yerleştirilen kelepçelerle güçlendirilmesi diğer yöntemlere göre daha başarılı bir tekniktir.
- Kesme dayanımı yetersiz kirişlerin eleman dışından kelepçe yerleştirilmesi ile elemanın yük taşıma ve deplasman artışları diğer kirişlere oranla epeyce arttırılmıştır. Diğer taraftan CFRP ile güçlendirmede ise azda olsa yük artışı sağlanmış olmasına rağmen istenen oranda deplasman artışları sağlanamamıştır. Deneyler sonucunda CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kelepçe ile güçlendirilen kirişlere nazaran daha ani göçtüğü gözlenmiştir.
- CFRP'nin kiriş kesme bölgesine şeritler halinde sarılmasıyla güçlendirilen GK3 Kirişi, CFRP'nin eleman kesme bölgesine komple sarıldığı GK2 Kirişine göre daha sünek davranmış ancak GK2 Kirişi kadar taşıma gücü gösterememiştir.
- Güçlendirilen bütün deney elemanları referans kirişin üstünde bir taşıma gücüne ulaşmışlardır. En yüksek taşıma gücüne GK1 kirişi ulaşmıştır.
- Deney elemanlarının hepsinde akma düzeyinde görülen rijitlikler birbirine çok yakındır. Buna karşın göçme rijitliklerinde farklılıklar görülmüştür.
- Güçlendirilen deney elemanlarının tamamında enerji tüketme kapasitesi referans kirişe göre daha yüksektir. En büyük artış dış kelepçe ile güçlendirilen kirişten elde edilmiştir.
- Deney kirişleri birbirine yakın maliyet bedelleri ile güçlendirilmiştir.

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında, betonarme yapıların birçoğunda bulunan hasarlı kirişlerin farklı yöntemler ile güçlendirilmesi sağlanmıştır. Dış kelepçe yönteminin CFRP yöntemi ile güçlendirilen kirişlerin davranışına oranla çok daha etkili olduğu gözlenmiştir. Büyük artışlar elde edilen dış kelepçe yöntemi ile yapılarda bulunan hasarlı kirişlerin düşük maliyetler ile başarılı bir şekilde güçlendirilebileceği anlaşılmıştır.

## 10.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında yapılanlara ek olarak daha sonra yapılabilecek çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

- Bu çalışmada hasarlı kirişler onarım yapılmadan güçlendirilmiştir. Onarım yapıldıktan sonra uygulanan bir güçlendirme yöntemi ile elde edilecek sonuçlar merak konusudur.
- Benzer çalışmalarda ve gerçek uygulamalarda CFRP ile güçlendirme yöntemlerinde yaşanan süneklik sorununun giderilmesi için yapıştırımda daha elastik yapıştırıcılar kullanılması ile elde edilecek sonuçlar merak konusudur.
- CFRP ile güçlendirmede farklı tipte sargı şekilleri ve birden fazla katlar halinde yapıştırma yöntemleri denenerek elde edilen sonuçlar başka bir merak konusudur.

## KAYNAKLAR

- 1- ACI-318-99: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99), American Concrete Institute, 1999.
- 2- Altın, S., Anıl, Ö., Gökten, Y., 2004. Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde bir kelepçe uygulaması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(4): 415-422, 2004.
- 3- Altun, F., Haktanır, T., Özcan, D. M.ve Vekli, M., 14 Ekim 2002. Mantolu Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi. ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 14 Ekim 2002.
- 4- Arslan, M., 1991. Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23-71, 1991.
- 5- Aykaç, S., Özbek, E., 2011. T-Kesitli Betonarme kirişlerin çelik levhalar ile güçlendirilmesi. İMO Teknik Dergi, 344:5319-5334, 2011.
- 6- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- 7- Can Ö., 2002. Hasarlı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin betonarme mantolama onarımı üzerine deneysel bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-45, 2002.
- 8- Çetinkaya, N., Kaplan, H., Senel, M.S., Betonarme kirislerin lifli polimer (FRP) malzemeler kullanarak onarım ve güçlendirilmesi. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(3): 291-298, 2003.
- 9- Demir, H., 1992, Depremden Hasar Görmüş Betonarme Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1992.
- 10- Demir, A., 2013, Kesme Kapasitesi Yetersiz Olan Kirişlerin Dış Donatılar İle Güçlendirilmesi, Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Proje No: 2012-33, Manisa, 2013.
- 11- Dündar B., 2008. Kesme yönünden yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilerek kesme kapasitelerinin artırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-47, 2008.
- 12- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 2003.
- 13- Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2004. "Betonarme", Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul, 459-473, 2004.
- 14 - Gavrilovic, P., Ignatiev, N., Kremezis, P., Laszlo, N., Nedli, P., Ozmen, G., Syrmakezis, C., 1983. Repair and Strengthening of Reinforced Concrete, *Stone and Brick-Masonry Buildings*, United Nations Development Programme, Vienna.

- 15- Karahan, S., 2008. Betonarme kirişlerin çelik levhalarla güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-85, 2008.
- 16- Önal, M., ve Tokgöz, H., 2005/1. Hasarlı Betonarme Kirişlerin Onarımı Üzerine Deneysel Bir Çalışma. Sigma Dergisi, 83-96, 2005/1.
- 17- TS 500: Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- 18- TS 708: Çelik – Betonarme İçin – Donatı Çeliği, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2010.
- 19- TS 3502, Betonda E-modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1981.
- 20- TS 3530 EN 933–1: Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu, Ankara, 1999.
- 21- TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3 :Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Ankara, 2003.
- 22- Uysal, A., 2006. Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara , 1-75, 2006.
- 23- Vulaş, Z., 2010. Betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının lifli polimerlerle artırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010.
- 24- Yazgı, Z., 2007. Dikdörtgen kesitli basit mesnetlenmiş kirişlerin eğilme yönünden karbon ve cam liflerle güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,1-45, 2007.



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi: 17.04.1988

Doğum Yeri: İzmir

Mezun Olunan Lise ve Yılı: Vali Nevzat Ayaz Lisesi-2006

Mezun Olunan Üniversite ve Yılı: Süleyman Demirel Üniversitesi-2011

Çalışılan Kurum: Atayol Yapı Denetim (2011), Glabba İnşaat (2012),Uşak İl Özel İdaresi (2013-)