

**KESMEYE KARŞI CFRP ŞERİTLERLE
GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞI**

Çelebi MERTOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2009
ANKARA**

Çelebi MERTOĞLU tarafından hazırlanan “Kesmeye Karşı CFRP Şeritlerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Davranışı” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Sinan ALTIN

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA

.....

Mimarlık Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Sinan ALTIN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Hüsnü CAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür ANIL

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi

Tarih: 05 / 05 / 2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Çelebi MERTOĞLU

**KESMEYE KARŞI CFRP ŞERİTLERLE
GÜÇLENDİRİLEN BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Çelebi MERTOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2009**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı kesmede yetersiz betonarme kirişlerin U biçimli CFRP şeritlerle güçlendirme tekniğinin araştırılmasıdır. Yetersiz kesme donatılı biri referans altısı güçlendirilen toplam yedi kiriş test edilmiştir. Güçlendirilen kirişlerde, kiriş yan yüzeyine yapıştırılan CFRP şeritlerin eksenler arasındaki mesafeleri 125 mm, 150 mm ve 200 mm olarak seçilmiştir. Güçlendirilen altı kirişin üçünde CFRP şerit uçları fan ankrajlarıyla kiriş gövdesine sabitlenmiştir. Test sonuçları CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe ve ankraj uygulaması göz önünde bulundurularak tartışılmış ve değerlendirilmiştir. CFRP şeritler kesmede yetersiz kirişlerin kesme dayanımını artırmasına rağmen kesmeden göçmeye engel olamamıştır. CFRP şerit uçları ankrajlı güçlendirilen kirişlerde sünek eğilme davranışı gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.145
Anahtar Kelimeler : Betonarme kiriş, güçlendirme, CFRP şerit
Sayfa Adedi : 102
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Sinan ALTIN

**BEHAVIOUR OF STRENGTHENED RC BEAMS
WITH CFRP STRAPS AGAINST SHEAR**

(M. Sc. Thesis)

Çelebi Mertoğlu

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

May 2009

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the strengthening technique of shear deficient beams with U shape CFRP straps. Totally seven deficient shear reinforced beams one of which is a reference member were tested. Axis to axis distance (s_f) of bonded CFRP straps on to beam web are chosen as 125 mm, 150 mm and 200 mm. End of the CFRP strap at three of the six strengthened beams were fixed with fan type CFRP anchorages. Experiment results were discussed by taking into account of the effects of axis to axis distance between CFRP straps and application of anchorages. Although CFRP straps improved the deficient shear strength of the beam, they can not prevent the shear failure. Ductile flexural behavior observed at the specimens at which CFRP anchorages were used.

Science Code	: 911.1.145
Key Words	: RC beams, strengthening, CFRP straps
Page Number	: 102
Adviser	: Prof. Dr. Sinan ALTIN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, bu araştırmayı planlayıp yöneten, değerli yardım ve katkılarıyla çalışmayı yönlendiren Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN' a teşekkür ederim.

Tez çalışmasının gerçekleşmesinde, bilgisi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Özgür ANIL' a ve Sayın Yrd. Doç. Dr M. Emin KARA ' ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Tolga TOPTAŞ, Rafet Özgür OCAKLI ve Eray ÖZBEK 'e teşekkür ederim.

Böyle bir çalışma içerisinde yer almam için beni yönlendiren ve çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Açıklamalar.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
1.3. Konuyla İlgili Geçmişteki Çalışmalar	4
2. DENEY ELEMANLARI.....	14
2.1. Genel	14
2.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	15
2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	24
2.3.1. Beton.....	24
2.3.2. Donatılar.....	25
2.3.3. CFRP	26
2.3.4. Epoksi (Sikadur 330)	26
2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanışı.....	27
2.4.1. Güçlendirme İşlemleri.....	29

	Sayfa
3. LABORATUAR TEKNOLOJİSİ	34
3.1. Genel	34
3.2. Yükleme ve Deney Düzeni.....	34
3.3. Ölçüm Düzeneği ve Veri Toplanması.....	36
3.3.1. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni.....	36
3.3.2. Toplanan verilerin değerlendirilmesi.....	37
4. DENEYLER	39
4.1. Deney Elemanı 1 (Referans Elemanı).....	39
4.2. Deney Elemanı 2.....	41
4.3. Deney Elemanı 3.....	47
4.4. Deney Elemanı 4.....	53
4.5. Deney Elemanı 5.....	58
4.6. Deney Elemanı 6.....	64
4.7. Deney Elemanı 7.....	70
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	75
5.1. Deney Elemanlarının Davranışı	77
5.2. Kesme Dayanımı.....	82
5.3. Rijitlik.....	84
5.4. Süneklik	85
5.5. CFRP Şeritlerde Birim Deformasyonlar.....	87
5.6. Kirişte Kesme Dayanımı Hesabı	91
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
6.1. Sonuçlar	97

	Sayfa
6.2. Öneriler	99
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Deney elemanları	19
Çizelge 2.2. Beton karışım oranı	24
Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları	25
Çizelge 2.4. Donatıların özellikleri.....	25
Çizelge 2.5. CFRP'nin özellikleri.....	26
Çizelge 2.6. Sikadur 330'nun özellikleri	27
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti.....	76
Çizelge 5.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları	83
Çizelge 5.3. Deney elemanlarında rijitlikler (kN/mm)	84
Çizelge 5.4. Deplasman süneklilik oranları	86
Çizelge 5.5. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri	88
Çizelge 5.6. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları.....	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deney elemanlarının donatı şeması.....	17
Şekil 2.2. Güçlendirilen deney elemanları	20
Şekil 2.3. Kiriş çelik kalıp kesiti	27
Şekil 2.4. Kiriş kesitinde ankraj detayı.....	32
Şekil 3.1. Tipik bir deney elemanında yükleme ve ölçüm düzeni	35
Şekil 3.2. Serbest cisim diyagramı	36
Şekil 4.1. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 1	40
Şekil 4.2. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 2	42
Şekil 4.3. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2	44
Şekil 4.4. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 3	47
Şekil 4.5. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3	50
Şekil 4.6. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 4.....	53
Şekil 4.7. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 4	56
Şekil 4.8. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 5	59
Şekil 4.9. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5	61
Şekil 4.10. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 6	65
Şekil 4.11. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 7	71
Şekil 4.12. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7.....	73
Şekil 5.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3 ve 4.....	77
Şekil 5.2. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 5, 6 ve 7	79
Şekil 5.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2 ve 5.....	80

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 3 ve 6.....	81
Şekil 5.5. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 4 ve 7.....	81
Şekil 5.6. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 2 ve 5	89
Şekil 5.7. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 3 ve 6	90
Şekil 5.8. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 4 ve 7	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Beton dökümü.....	28
Resim 2.2. Standart silindir numune testi.....	29
Resim 2.3. CFRP şerit yerleşiminin işaretlenmesi	30
Resim 2.4. Kirişte yüzey hazırlığı.....	30
Resim 2.5. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyine yapıştırılması	31
Resim 2.6. Ankraj detayları	31
Resim 2.7. Kirişte ankraj uygulaması	33
Resim 4.1. Göçmeden sonra, deney elemanı 1	40
Resim 4.2. CFRP şeridin kiriş yüzeyinden soyulması	42
Resim 4.3. Göçmeden sonra, deney elemanı 2.....	43
Resim 4.4. CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması	48
Resim 4.5. Göçmeden sonra, deney elemanı 3.....	49
Resim 4.6. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması	54
Resim 4.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 4.....	55
Resim 4.8. Tabla betonunda ezilme, Deney elemanı 5.....	59
Resim 4.9. Göçmeden sonra, deney elemanı 5.....	60
Resim 4.10. Tabla betonunda ezilme, Deney elemanı 6.....	65
Resim 4.11. Göçmeden sonra, deney elemanı 6.....	66
Resim 4.12. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 7	71
Resim 4.13. Göçmeden sonra, deney elemanı 7	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Tekil yükün mesnete olan uzaklığı
A_v	Kayma donatısı kesit alanı
b_w	Kiriş altı kesit genişliği
d	Kiriş faydalı yüksekliği
E_f	CFRP elastisite modülü
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun çekme dayanımı
f_y	Kayma donatısı akma dayanımı
GF	BDÖ uzama oranı
$GAIN$	BDÖ kazanç faktörü
M	Eğilme momenti
n_f	Tek yüzdeki CFRP şerit tabaka sayısı
s	Etriye aralığı
s_f	Karbon fiber şeritlerin merkezleri arası uzaklığı
P	Kesme kuvveti
V	Deney elemanının taşıdığı toplam kesme kuvveti
V_o	BDÖ'de ölçülen gerilim değişimi
V_c	Betonun taşıdığı kesme kuvveti
V_f	CFRP şeritlerin taşıdığı kesme kuvveti
V_i	BDÖ'deki başlangıç gerilimi
V_s	Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti
w_f	Karbon fiber şeritlerin genişliği
ε	CFRP şeritlerdeki birim uzama
ε_f	CFRP birim uzaması

Simgeler ρ ρ_w δ_{2net} δ_1 δ_2 δ_3 **Açıklama**

Boyuna donatı oranı

Kesme donatısı oranı

Kiriş orta noktası düşey net deplasmanı

Sol mesnet çökmeleri

Kiriş orta noktası düşey deplasmanı

Sağ mesnet çökmeleri

Kısaltmalar**Açıklama****ABYYHY**

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik

ACI

American Concrete Institute

CFRP

Karbon lif donatılı polimer

FRP

Lif donatılı polimer

EBR

Dış yüzey güçlendirmesi

NSM

Yüzey altı güçlendirmesi

LVDT

Elektronik doğrusal deplasman ölçer

TS 500

Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

1. GİRİŞ

1.1. Genel Açıklamalar

Hasarsız yapı elemanlarının, dayanımının ve davranışının iyileştirilmesi güçlendirme başlığı altına girmektedir. Betonarme yapılarda, kullanım amacı değişikliğinden veya değişen çevresel şartlardan dolayı ek yükler ve ek zorlanmalar oluşabilmektedir. Bu durumlarda yapı elemanlarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı betonarme yapı elemanlarda yatay taşıyıcı olarak bilinen kirişleri güçlendirme gereksinimi doğabilmektedir. Her güçlendirme tekniğinin avantajları ve dezavantajlarının belirlenebilmesi için betonarme kirişlerin güçlendirilmesi ile ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışmaların çokluğu uygulamada da çeşitliliği beraberinde getirmiştir.

Betonarme kirişler, eğilmeye ek olarak kesme kuvveti de taşımak durumundadırlar. Betonun kesme dayanımı oldukça yüksek olduğundan, betonarme kirişlerde kesme kırılmasına pek rastlanmaz. Buna karşın, kesme ve normal gerilmelerin neden olduğu asal çekme gerilmeleri, betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle önemli sorunlar doğurur. Betonun kesme ve basınç dayanımı, çekme dayanımından yüksek olduğundan basit kesme durumunda bile kırılma, asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşur. Basit kesme durumunda, asal çekme ve asal basınç gerilmeleri kesme gerilmesine eşit olacağından kırılma, en düşük dayanım olan çekme nedeni ile oluşacaktır. Asal çekme gerilmeleri, kesme gerilmelerinin etkidiği yüzeye 45°'lik açı yapan bir düzlem üzerinden etkiyeceğinden, kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla meydana gelecektir. Asal çekme gerilmelerinden oluşan bu tür çatlama, “eğik çatlak” olarak adlandırılır [1].

Kirişlerin kesme kuvveti etkisinde ani ve gevrek kırılmasını engellemek için TS500 ve Deprem yönetmeliğinde kiriş uzunluğu boyunca enine donatı

koyulması zorunlu tutulmaktadır. Kesme donatılarının bulunması eğik çatlakların oluşmasını engellemez fakat yerleştirilen kesme donatıları eğik çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlar. Ayrıca kirişe sünek bir davranış kazandırır.

Kesme donatılı bir kirişin, eğik çatlama oluncaya kadar kesme donatısız kiriş gibi davranmaktadır. Eğilme çatlağı oluşuncaya kadar etriyede herhangi bir gerilme oluşmamaktadır. Eğilme çatlağı oluşuktan sonra çatlakla kesişen etriyelerde büyük gerilmeler oluşmaktadır. Eğer etriyeler çok seyrek olarak kirişe yerleştirilirse eğik çatlakla herhangi bir etriye kesişmediğinde etriyelerin hiçbir faydası olmayacaktır. Oluşan eğilme çatlağı etriyeyi kirişin alt veya üst ucunda kestiğinde ise fazla etkili olamayacaktır. Bu aşamaya gelindiğinde hem çatlak yeterince gelişmiş olacak, hem de kesişme noktasının ötesinde kalan etriye boyu ile yeterli kenetlenme sağlanamayacaktır. Eğik çatlağın en az bir etriyeye rastlaması için etriye aralığının $d/2$ den büyük olmaması gerekir [1].

Güçlendirilmeye gereksinim duyan kirişlerde, yapıldığı dönemin yönetmeliklerinin eksikliği, kullanılan beton ve çeliğin gerekli dayanımda olmaması, kirişte yetersiz donatı kullanılması başlıca güçlendirilme nedenleri olarak sıralanabilir. Kesme dayanımı, kesme donatısı alanının yüksek sıcaklık, korozyon, nem, zemin tuzluluğu, kötü işçilik, malzeme kusurları gibi sebeplerden dolayı azalmaktadır. Kesme kapasitesi bakımından yetersiz olan betonarme elemanlara güçlendirme amacı ile birçok metot uygulanmaktadır. Kirişlerin güçlendirilmesinde betonarme manto ve çeliğin yanı sıra kesiti artırmayan, yapıya ek yük getirmeyen karbon lif donatılı polimerler (CFRP) kullanılmaya başlanmıştır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, yetersiz kesme donatılı betonarme kirişlerin Karbon lif donatılı polimerlerin şeritler halinde (CFRP) kiriş gövdesinin dış yüzeyinden yapıştırılarak kesmeye karşı güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında kiriş yüzeyine yapıştırılan CFRP şeritlerinin soyulmasını engellemek için ankraj uygulaması yapılmıştır.

Bu çalışmada 7 adet $\frac{1}{2}$ ölçekli, yetersiz kesme donatılı, basit mesnetli betonarme kiriş test edilmiştir. Deney elemanlarının tamamında etriye oranı $\rho_w=0,00157$ dir. Bu etriye oranı bulunması gereken etriye oranının yaklaşık $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Planlanan deneysel çalışmada, bir eleman yetersiz kesme donatılı olup referans deney elemanı olarak kullanılmıştır. Deney programının diğer altı elemanı U biçiminde CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirildikten sonra test edilmiştir. Tüm deney elemanlarında kesmeye karşı güçlendirmede kullanılan U biçimli CFRP şeritler 50 mm genişliğinde seçilmiştir. Kiriş yüzeyine yapıştırılan CFRP şeritlerin eksen aralığı (s_f) 125 mm, 150 mm ve 200 mm seçilmiştir. Güçlendirilen altı kirişin üçünde şerit uçlarında ankraj kullanılmamış, diğer üç kirişin güçlendirilmesinde şerit uçlarında fan türü CFRP ankraj kullanılmıştır. Test sonuçları referans deney elemanı ile karşılaştırılmış ve kullanılan CFRP fan ankrajının kirişlerin göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmada göz önünde bulundurulan değişkenler;

a) CFRP şerit eksen aralıkları

b) Şerit uçlarında kullanılan fan ankrajıdır.

1.3. Konuyla İlgili Geçmişteki Çalışmalar

Khalifa ve Nanni 2000 yılındaki yaptıkları çalışmada 6 adet T kesitli kirişlerin, kesme kapasitesini artırmak için, karbon lif donatılı polimerlerin (CFRP) güçlendirilmesi incelenmiştir. CFRP miktarı ve dağılımı (tüm yüzeyin kaplanması yada şeritler ile), uygulama şekli (iki yüzeye veya U tek parça halinde), çift doğrultulu ve tek doğrultulu CFRP ile güçlendirme ve ankrajı araştırma konularıdır. Kirişlerin kesme açıklığında hiç etriye bulunmamaktadır. Dört nokta yüklemesi yapılmış, a/d oranı 3 seçilmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda Kiriş taşıma kapasitesi değişik güçlendirme uygulamaları sonrası %145'lere varan artışlar sağlanmıştır. Ayrıca, ankraj uygulamasının kirişin göçme modunu değiştirdiği, iki yana ayrı ayrı yapıştırılan şeritlerin, U şeritlerden daha az yük taşıdığı, yapılan deneylerde iki eleman arasında %40 daha fazla CFRP kullanılmasına rağmen aynı taşıma gücü elde delmiştir. Bu da optimum bir CFRP kullanımının yeterli olduğunu göstermektedir. Son olarak da kiriş eksenine paralel yapıştırılan şeritlerin kesme kapasitesine etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir [2].

Khalifa ve Nanni 2002 yılındaki çalışmalarında, kesme dayanımı yetersiz olan dikdörtgen kesitli kirişleri CFRP levhalarla güçlendirmişlerdir. Deneysel çalışmada 12 adet tam ölçekli basit mesnetli kiriş test edilmiştir. Deney elemanları, etriye kullanılan ve etriye kullanılmayan elemanlar şeklinde iki ana gruba ayrılmıştır. Bu iki ana grup da, a/d oranına göre iki gruba ayrılmıştır. Her grup için bir kontrol kirişi kullanılmış ve diğer sekiz eleman CFRP levhalarla güçlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlarda; dıştan yapıştırılan CFRP levhaların kirişin kesme kapasitesini %40 ile %138 oranında artırdığı görülmüştür. Ayrıca, CFRP levhalarla güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitesinin, CFRP levhalarla güçlendirilmemiş kirişlerin kesme kapasitesinden daha büyük olduğu görülmüştür. Kesme kapasitesinin artırılmasında CFRP levhaların, a/d oranından etkilendiği gözlenmiştir.

Analitik olarak hesaplanan kesme dayanımının deney sonuçlarına göre kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [3].

Akyüz ve Özdemir çalışmalarında CFRP ile hazırlanan ankrajların çekme deneyi sonucu taşıdığı yükler araştırılmıştır. Bu amaçla 4 metre uzunluğunda 3 adet betonarme kirişler kullanılmıştır. Bütün betonarme kirişler 300x400 mm enkesitlidir. Çalışmada incelenen parametreler beton basınç dayanımı, ankraj şerit genişliği ve ankraj tipidir. Betonarme kirişler 28 günlük basınç dayanımında 3 farklı (10 MPa, 16 MPa, 20 MPa) değerlerine sahiptir. Üç farklı genişlikteki şeritler (80 mm, 120 mm, 160 mm) kullanılarak CFRP ankraj filizleri hazırlanmıştır. 70 mm, 100 mm ve 150 mm olan 3 farklı ankraj derinliği belirlenmiştir. CFRP ankraj filizlerinin hazırlanması sırasında tip 1, tip 2 isimli iki teknik kullanılmıştır. Birinci tip ankrajda, CFRP şeritleri eşit genişlik ve yükseklikte iki tabakaya bölünmüştür. Ardından bu CFRP şeritler epoksi uygulamasıyla dairesel form verilmiştir. CFRP şeritlerin silindirik formlarından ayrılmasını önlemek için, dairesel form verilmiş ankrajların uçları CFRP şeritlere bağlanmıştır. CFRP ankrajların 1 cm altında epoksi reçinesi içine gömülüp 1 gün bekledikten sonra CFRP şeritler ankraj filizleri olarak kullanıma hazır hale gelmiştir CFRP ankraj filizinin alt kısmındaki epoksinin amacı, ankraj çevresinde sert bir kısım elde etmektir. İkinci tip ankrajda, CFRP şerit genişlikleri kesilmiş ve epoksi reçinesi sürülerek donatı etrafına sarılmıştır. Bu teknik CFRP şeritleri aynı hizaya yönelmiş düzgün ankraj filizleri elde etmek için geliştirilmiştir.

Birinci seri testler sonunda, sonuçlar genel bir kanıya varmanın çok zor olduğu geniş bir dağılıma sahip olmuştur. Bu testlerde en önemli nokta işçilik kalitesi olarak görülmüştür. İlk seri testler sonucu varılacak tek sonuç CFRP ankraj filizleri için etkin gömülme derinliği kavramının olduğudur. Bu derinliğin ötesinde, filizlerin gerilme kapasitesi arttırılmamıştır. Kullanılan parametreler için etkin gömülme derinliği 100 mm olarak görülmüştür. Bu sonuç ikinci seri testlerle bağdaşmaktadır. İkinci seri testler sonucunda, 70 mm ve 100 mm gömülme derinlikli ankraj filizleri üstte sıg beton konisi ile çekme göçmesi

meydana getirmiştir. Bu sıg koni derinliği de 50 mm'dir. Diğer taraftan, 150 mm içeri gömülen filizler için CFRP parçalanması gözlemlenmiştir. Kullanılan parametrelerde, maksimum gerilme kapasitesi, 100 mm gömülme derinliğine sahip CFRP ankraj filizlerinde gözlemlenmiştir. Sıg gömülme derinlikleri için, örneğin 70 mm, 10 MPa'dan 16 MPa'ya kadar CFRP ankraj filizlerinin gerilme kapasitesi üzerindeki beton basınç dayanımı etkisi, önemli değildir. Ancak gömülme derinliği arttıkça, beton basınç dayanımının etkisi daha önemli hale gelmiştir [4].

Al-Amery ve Al-Mahaidi çalışmalarında, betonarme kirişlerin CFRP plakalarla kesme ve eğilmeye karşı güçlendirmesi amacıyla yapılmıştır. Bir referans elemanı ve CFRP plakalarla güçlendirilmiş altı kiriş test edilmiştir. CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmasını engellemek için CFRP bantlar kullanılmıştır. Bu testler sonucunda farklı CFRP şeritler arasındaki şekil değiştirme ve deformasyon değerleri aynı oranda değişmiştir. Ayrıca bazı CFRP plakalar beton yüzeyinden soyulmuştur. Deneyler sonuçları sonucunda FRP bantların ve şeritlerin birlikte çalışması sayesinde kiriş dayanımında önemli kazanımlar olmuştur. Kirişler, CFRP'nin kiriş yüzeyinden soyulması engellenmiş ve kirişler sünek bir davranış göstermiştir. CFRP şeritler kullanılarak kirişlerin kesme dayanımları arttırılmıştır. CFRP plakaların kiriş yüzeyinden soyulması, geliştirilen bir ankraj yöntemi sayesinde önlenmiştir. CFRP şeritler CFRP plakaları kirişe ankrajlarla sabitlendiğinde eğilme dayanımındaki artış %95'in üstünde olmuştur. Ancak CFRP plakaların tek başına kullanımı sadece %15 lik bir kazanç sağlamıştır [5].

Wegian ve Abdalla çalışmalarında, FRP (fiber reinforced plastic), GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymers), ve CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmada 7 kiriş test edilmiştir. 3 kiriş GFRP, 2 kiriş FRP, 2 kirişte CFRP, ile güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı deneylerin sonucunda; FRP ile yapılan güçlendirmelerin başarılı olduğu ve bu güçlendirme tekniğinin uygulanabilir olduğu görülmüştür. Deneysel ve

teorik verilerin birbiriyle uyum sağladığı görülmüştür. FRP ile güçlendirilen kirişlerde gerilme ve deplasmanlar normal etriyeli kirişlere göre daha fazla olmuştur. FRP ile güçlendirilen kirişlerde çatlaklar normal etriyeli kirişlere göre daha az oluşmuştur. FRP çubuklarla güçlendirilen betonarme kirişlerin sağladığı çekme kapasitesi standartlardaki etriyeli elemanların çekme kapasitelerinden daha fazla çıkmıştır. FRP ile güçlendirilen kirişler ACI 440'ta belirtilen değerlere göre daha yüksek kesme dayanımı göstermişlerdir [6].

Abdelhak Bousselham ve Omar Chaallal 2005 yılındaki çalışmalarında T kesitli, 3000 mm uzunluğundaki 12 adet betonarme kirişin çift doğrultulu CFRP ile güçlendirilmesi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; kullanılan CFRP miktarı, etriye miktarı ve a/d (a : kiriş kesme açıklığı, d : kiriş faydalı yüksekliği) etkileri araştırılmıştır. Deneylerde kirişlere üç nokta yüklemesi uygulanmıştır.

Deneylerin sonucu olarak; faydalı yüksekliği (d) büyük kirişler, faydalı yüksekliği küçük kirişlere oranla daha fazla kesme dayanımı göstermişlerdir. Buna karşın narin kirişlerde CFRP'nin kesme kapasitesine katkısı daha çok olmuştur. Kontrol numunelerine göre narin kirişlerin orta nokta deplasmanları, derin kirişlere oranla daha çok olduğu görülmüştür. Narin kirişlerde, derin kirişlere nazaran kesme kapasitesindeki artış daha fazla olmuştur. İki kat uygulanan CFRP'nin derin kirişlerde belirgin bir katkı sağlamadığı, narin kirişlerde kesme kapasitesinde büyük artışlar sağladığı görülmüştür. Etriyelerin narin kirişlerde büyük katkı sağladığı ama derin kirişlerde kesme dayanımına katkıda bulunmadığı görülmüştür. Bir katman CFRP ile güçlendirilen kirişlerde iki katmanla güçlendirilenlerden daha çok birim deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kontrol numunelerine göre etriye birim deformasyonları daha düşük çıkmıştır. Ama özellikle narin kirişlerde etriyelerin yük alarak, akma kapasitesine eriştiği görülmüştür. Betonun, içinde bulunan etriye ve dışında tüm yüzeyi saran CFRP'nin katkısıyla daha büyük birim deformasyonlar yapabildiği görülmüştür [7].

Bencardino ve Spadea, Swamy 2006 yılındaki çalışmalarında kesme dayanımı yetersiz kirişlerin CFRP şeritler ile güçlendirilerek sünek eğilme davranışı sergilemesi hedeflenmiştir. Kirişleri kesmeye karşı güçlendirmek ve güçlendirme şeritlerinin faydasını arttırmak amacıyla 4 tane deney elemanı hazırlanmıştır. Güçlendirme yapılmamış ilk iki elemanın a/d (a: kiriş kesme açıklığı, d: kiriş faydalı yüksekliği) oranları 6,9 ve 3,4'tür. Güçlendirilen deney elemanlarının a/d oranları 3,4'tür. Güçlendirilen deney elemanlarının birisi ankrajlı diğeri ankrajsız olarak üretilmiştir. Dört noktadan uygulanan yükleme ile deney elemanları test edilerek çatlak, kesme kapasiteleri ve göçme modları gözlemlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır; CFRP şeritlerle ankrajsız olarak güçlendirilen kiriş kesme kırılmasından dolayı göçmüştür. Ancak CFRP şeritler ile ankrajlı olarak güçlendirilen kirişler kesmeye karşı güçlendirilmiş olup yüksek mukavemet ve deformasyon gösterip boyuna donatının akması sonucu göçmüştür. Bu çalışma CFRP şeritler ile birlikte ankraj uygulamasının yetersiz kesme donatılı betonarme kirişlerde göçme modunu değiştirdiğini göstermiştir. Kesmeye karşı zayıf olan kirişlerin yüzeylerine ankrajsız uygulanan CFRP şeritler kirişin göçme modunu değiştirememiştir ve kiriş yine kesme kırılmasından dolayı göçmüştür. Kirişlere CFRP şeritler ankrajlı uygulandığında, kirişin kesme kapasitesi büyük oranda artmıştır ve betonarme kiriş sünek bir kırılma sonucu göçmüştür. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımları ve deformasyon ankraj uygulaması ile artırılmıştır [8].

Barros ve Dias 2006 yılındaki Bu çalışmada kirişlerin NSM (near surface mouthed) tekniği ve EBR (externall bonded reinforcement) ile güçlendirilmesiyle kesme dayanımlarının artırılması amaçlanmıştır. NSM (near surface mouthed) tekniği, beton yüzeyine CFRP şeritlerinin epoksi harcı kullanılarak yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme yöntemidir. EBR (externall bonded reinforcement) tekniği ise şeritlerin yerleştirileceği yerlerde

etkiye üzerinde bulunan beton tabakasının alınarak şeritlerin yapıştırılması ve üzerinin epoksi harcıyla doldurulması yöntemidir. Bu yöntemlerin uygulanması için dört noktalı eğilme deneyleri uygulanmıştır. Bu çalışmada kirişler dört grupta toplanmışlardır. Bunlar; kesme donatısız kirişler, kesme donatılı kirişler, ıslak katmanlı CFRP ile güçlendirilen kirişlerin NSM (near surface mouthed) ve EBR (externall bonded reinforcement) tekniği ile CFRP ile güçlendirilen kirişlerdir. Şeritlerin etkisi güçlendirme teknikleri tesirindeki boyuna çekme donatı oranı ve a/d oranına bağlı olarak incelenmiştir. Bütün deney elemanlarından alınan sonuçlarda en iyi sonucu yatay eksenle 45° açı yaparak CFRP şeritler uygulanan NSM kirişleri göstermiştir. Yalnızca kesme dayanımını arttırmakla kalmamış göçmedeki deformasyonda da büyük bir artış gözlemlenmiştir. NSM tekniğinin EBR ye göre daha üstün özellikleri bu deneylerde gözlemlenmiş ayrıca hızlı ve basit uygulanabilirliğiyle NSM ön plana çıkmıştır. EBR tekniği için ACI ve fib deki analitik formüllerle yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır. NSM tekniği için Nanni ve diğerlerinin çalışmalarında da bilgiler verilmiştir. NSM, CFRP tekniği ile yapılan eğilme deneylerinde CFRP şeritlerdeki gerilmeler Nanni ve diğerlerinin çalışmalarında kullandıkları formüller kullanılarak hesaplanmıştır. CFRP kullanılarak hazırlanan kirişlerde %72 daha fazla kesme dayanımının olduğu görülmüştür. CFRP ile yapılan güçlendirmelerde taşıma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. NSM tekniği CFRP ile yapılan güçlendirme teknikleri arasında en etkili yöntem olmuştur. Bu etki sadece yük taşıma kapasitesini arttırmada değil kirişin göçme deformasyon kapasitesinde de gözlemlenmiştir. Kullanılan yöntemlerde taşıma kapasitelerine göre sırasıyla EBR ve NSM teknikleri %54 ve % 83 başarı sağlamışlardır. Aynı karşılaştırmada maksimum deformasyonlardaki artış sırasıyla %77 ye %307'dir. Kesme donatılı kirişlere göre NSM tekniği ile güçlendirilen kirişler maksimum yük altında %9 daha fazla deplasman yapmıştır. NSM uygulamada EBR'den daha basit bir tekniktir. EBR CFRP tekniği ACI'a göre %2 ile %8 daha yüksek dayanım sağladığı deneysel olarak ispatlanmıştır [9].

Özgür Anıl 2006 yılındaki çalışmasında CFRP şeritlerle kesmeye karşıya güçlendirilmiş 6 kiriş test edilmiştir. Hazırlanan 6 adet "T" kesitli kiriş tersinir tekrarlanır yükler altında deneysel test edilmiştir. Deneysel çalışmanın değişkenleri; CFRP şeritlerin genişliği, şeritlerin yüzeylere uygulanma kombinasyonları ve düzenlenmesi, şerit uçlarına uygulanan ankrajdır. Deneysel çalışmaların sonucunda CFRP kompozit malzemenin kirişe dış yüzeyden epoksi yardımıyla uygulanması ile kesme dayanımı bakımından yetersiz olan kirişlerin güçlendirildiği görülmüştür. Epoksi ile birlikte kesme açıklığı boyunca kiriş yüzeyine uygulanan CFRP şeritlerin kesmeye karşı güçlendirmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. CFRP şeritlerin düzenlenmesi ve genişliği her elemanda farklı olarak denenmiş ve sonuçları incelenmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları ACI 440'ta yer alan kriterlerle karşılaştırılmıştır ve analitik olarak yaklaşımların doğru olduğu görülmüştür [10].

Jayaprakash ve arkadaşları 2007 yılındaki çalışmasında betonarme kirişlerin çift doğrultulu CFRP ile güçlendirilerek kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmada toplam 16 kiriş test edilmiştir. Bunların 4'ü referans elemanıdır. 6 kiriş hasar verilip CFRP ile onarılmıştır. 6 kiriş ise CFRP ile güçlendirilerek üretilmiştir. Çalışmada ele alınan deney değişkenleri; boyuna çekme donatısı oranı, kesme açıklığının etkili yüksekliğe oranı (a/d), CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe, CFRP şeritlerin sayısı ve yerleşimidir. Kirişler basit mesnet şartlarında test edilmiştir.

Deneyler sonucunda CFRP ile güçlendirilen kirişlerin referans elemanlarına göre kesme dayanımları % 11 ile % 139 arasında artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Kiriş yüzeyine uygulanan CFRP şeritler kirişte etriye görevi yapmışlardır. Bu sayede kirişlerin kesme kapasitesi artmıştır. Güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımları, boyuna donatı oranının %56 artırılması ile %76 artmıştır. 45° açıyla uygulanan CFRP şeritli kirişlerde oluşan çatlak dağılımı

90° açı ile uygulanan CFRP şeritli kirişlerden daha az olmuştur. 45° açıyla uygulanan CFRP şeritli kirişler 90° açıyla uygulanan CFRP şeritli kirişlere göre % 42 daha fazla kesme kapasitesine ulaşmıştır. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafeler azaldıkça kirişlerde rijitlik artmıştır. Bu tekniğin uygulanmasında işçiliğin önemi çok büyüktür ve bu yüzden yüzeyin hazırlanması ve epoksi uygulama işleminin titiz yapılması deney sonuçlarını etkileyecektir. Kullanılacak CFRP şeritlerinin genişliklerinin düşük olmaması gereklidir ($w_f < 80$ mm). Bunun dışında şeritlerin beton yüzüne uygulanmasında pratik zorluklar vardır. 90° açıyla uygulanan CFRP için "U" şeklinde, 45° açıyla uygulanan CFRP için "L" şeklinde uygulama tavsiye edilmiştir [11].

Gyuseon Kim ve arkadaşları 2007 yılındaki çalışmalarında, FRP ile kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışını incelemek için 11 deney elemanı hazırlanmıştır. Deney elemanlarının hazırlanmasında en büyük boyutu 25 mm olan iri taneli agregalı Portland çimentosu kullanılmıştır. Deney elemanlarından alınan beton numunelerinin 28 gün sonunda ortalama maksimum basınç dayanımı 34.7 Mpa çıkmıştır. Kirişler, 25x25 cm dikdörtgen enkesite ve sırasıyla 140 ve 200 cm etkin açıklığa sahiptir. Kesme güçlendirme malzemesi olarak CFRP ve karbon fiber şeritler (CFS) kullanılmıştır. Deney elemanlarında çekme donatısı olarak 4 adet 16 mm çapında nervürlü donatı ve basınç donatısı olarak 13 mm çapında 2 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Deneysel değişkenleri a/d oranı (a: kiriş kesme açıklığı, d: kiriş faydalı yüksekliği), şerit tipi ve yerleştirme yönüdür (CFRP ve CFS malzemesinin tek parça ve şerit halinde dik-diyagonal olarak). a/d oranı olarak 1,7 ve 2,2 seçilmiştir. Birim şekil değiştirme ve deplasmanları ölçmek için birim deformasyon ölçer (strain gauge) ve LVDT kullanılmıştır. Kullanılan birim deformasyon ölçerlerin uzunluğu 5 mm ve 90 mm'dir. Bunların birim şekil değiştirme sınırları ise sırasıyla %3 ve %2'dir. LVDT'nin kapasitesi 50 mm ve ölçüm hassasiyeti %1'dir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar şunlardır; Kesmede CFS ile güçlendirilen bütün kirişler kesme çatlağından göçmüştür. CFRP ile güçlendirilen kirişler (tek parça CFRP kullanılarak güçlendiren deney elemanı hariç) FRP'lerin deformasyonu ile oluşan gevrek kesme göçmesi sonucu göçmüştür. Özellikle, CFRP şeritlerle diyagonal olarak (45^0) güçlendirilen deney elemanı eğilme çatlakları sonucu göçmüştür. Çünkü CFRP şeritler, yükleme noktası ve mesnette oluşabilecek diyagonal çekme çatlaklarının büyümesini engellemiştir.

Tek parça CFRP kullanılarak düşey doğrultuda güçlendirilen deney elemanı sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür. Güçlendirilen diğer deney elemanları kesme kırılmasından göçmüştür. Kesme dayanımı FRP'ye bağlı olarak %50 ile %70 arasında artış göstermiştir. Eğik CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişinin kesme dayanımı, dikey CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişin kesme dayanımından %14 daha fazla çıkmıştır. CFS ile güçlendirilen kirişler de aynı eğilimi göstermiştir. 45 derece açıyla CFS ile güçlendirilenlerin dayanımı, dikey şeritlerle güçlendirilen kirişlerden %8 ile %12 arasında daha fazla çıkmıştır [12].

Francesca Ceroni, ve arkadaşları 2007 yılındaki çalışmalarında CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesi için hazırlanmış farklı ankraj çözümlerinin etkisinin belirlenmesi için 14 elemanın deneysel çalışması planlanmıştır. Kolon kiriş bağlantılarının gerçek geometrilerine benzemesi için numuneler T şeklindedir. Her eleman 300 mm aralıklı iki beton blok olarak yapılmıştır. Deney elemanlarının karşılıklı iki kenarı üzerine 100 mm genişlikli karbon şeritler uygulanmıştır. 6 elemanda CFRP şeritler tüm yüzey boyunca konurken, diğer 8 elemanda fiber şeritler beton bloğun 90 derecelik köşeleri epoksi doldurup 25 mm çaplı dairesel form verilerek T kesitin alt kenarına kadar uzatılmıştır. CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesi için geliştirilen ankrajlar 4 farklı şekilde uygulanmıştır. Ankrajlar 4 şekilde de kiriş tabla birleşim yerinde yakın tablaya uygulanmıştır. Birinci tipte fan ankrajlar tablanın üst kısmına geçmiş ve tüm ankrajlar birbirine CFRP kumaşla bağlantısı sağlanmıştır. İkinci tipte ankrajlar

tablanın üstüne geçmiş ve uçları fan şeklinde açılmıştır. Üçüncü tipte ankrajlar tablanın üstüne geçmiş ve karşılıklı ankrajlar tek parça halinde birleştirilmiştir. Dördüncü tipte fan ankrajlar tablanın üstüne geçmemiş, karşılıklı ankrajların birbirleriyle bağlantısı yapılmamış ve tabla altında fan biçiminde yapıştırılmıştır. Uygulanan fan ankrajların derinliği 75 mm, ankraj çapı 7 mm olarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu farklı tipte mekanik ankrajlarla CFRP şeritler ile güçlendirilen beton elemanların davranışı, dayanımı ve göçme modu ile ilgili bilgiler elde edilmiştir. Deney elemanları, analitik denklemlerle hesaplanan maksimum yüke erişmeden FRP şeritlerde soyulma oluşmuştur. Test edilen ankraj sistemlerinde en iyi sonuç, kiriş çekme göçmesine ulaştığında elde edilmiştir. En kötü sonuç FRP şeritlerin L şekilli ankrajsız ve ankrajlı olduğu durumda elde edilmiştir. Bu durumda soyulma yükünü hesaplamak için göçme mekanizmasının ilave analizleri tamamlanmamıştır [13].

2. DENEY ELEMANLARI

2.1. Genel

Kesme etkisinde kirişlerin gevrek kırılmalarını önlemek amacıyla tüm yönetmelikler kirişte etriye donatısı bulundurulmasını zorunlu tutmuştur. Kesme donatısının temel işlevi, eğik çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlayarak kirişte sünek eğilme davranışının gelişmesinin sağlanmasıdır.

Yetersiz kesme donatılı kirişlerde kesme davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biride a/d (a : kiriş kesme açıklığı, d : kiriş faydalı yüksekliği) oranıdır.

a/d oranının 7'den büyük olduğu kirişte göçme eğilmede taşıma kapasitesine ulaşmasıyla olmaktadır. Kesme açıklığı büyük olduğu için küçük kesme kuvvetlerine karşılık büyük eğilme momenti meydana gelirken, oluşan eğilme çatlaklarının büyümesiyle kesit eğilme göçmesine erişir. Kesme kuvvetinin oluşturduğu eğik çekme gerilmeleri küçük olduğu için eğik çatlaklar kirişin göçmesinde etkili olmaz. Eğilme çatlaklarının kirişte yayılarak gelişmesi sonucunda kiriş büyük deformasyonlar yapar.

a/d oranının 3'ten büyük 7'den küçük olduğu durumda, kesme açıklığı azaldığı için eğilme momenti artarken, kesme kuvveti de büyüyecektir. Yükün arttırılmasıyla eğilme çatlakları oluşurken, eğik çekme gerilmeleri kiriş gövdesinde artarak çatlamaya neden olur. Eğik çatlağın eğimi düşük olduğu için kemerlenme etkisinin yükün taşınmasında önemli bir katkısı olmaz. Göçme yüküne yakın eğilme çatlakları ilerleyerek kesme çatlaklarıyla birleşir. Göçmede betondaki eğik çatlaklar etkili olduğu için göçme gevrek niteliktedir.

a/d oranının 1,5'den büyük 3'ten küçük olduğu durumda kirişte kesme çatlağının oluşup ilerlemesi söz konusu olamaz. Çatlakların oluşmasına rağmen kiriş aniden kırılmayacak ve yük taşımaya devam edecektir. Kirişe

etkiyen yük asal basınç gerilmeleri yönünde mesnete aktarılır. Yük ve mesnet arasında bir basınç çubuğu oluşur. Bu duruma ulaşan kirişte eğilmenin yanı sıra gergili kemer davranışı da gözlemlenir. Çekme donatısı gergi görevini üstlenirken basınç gerilmelerini taşıyan kemer görevini de beton oluşturur. Bu aşamaya ulaşan kiriş artık yük taşıyamaz ve betonda ezilmeye başlayan bölgeler gözlemlenir. Bu kırılma türü “kayma-ezilme” türü bir kırılmadır ve gerçek eğik çekme kırılması kadar ani gelişmez. Çatlamaya neden olan yük kayma-ezilmeye neden olan yükten küçüktür.

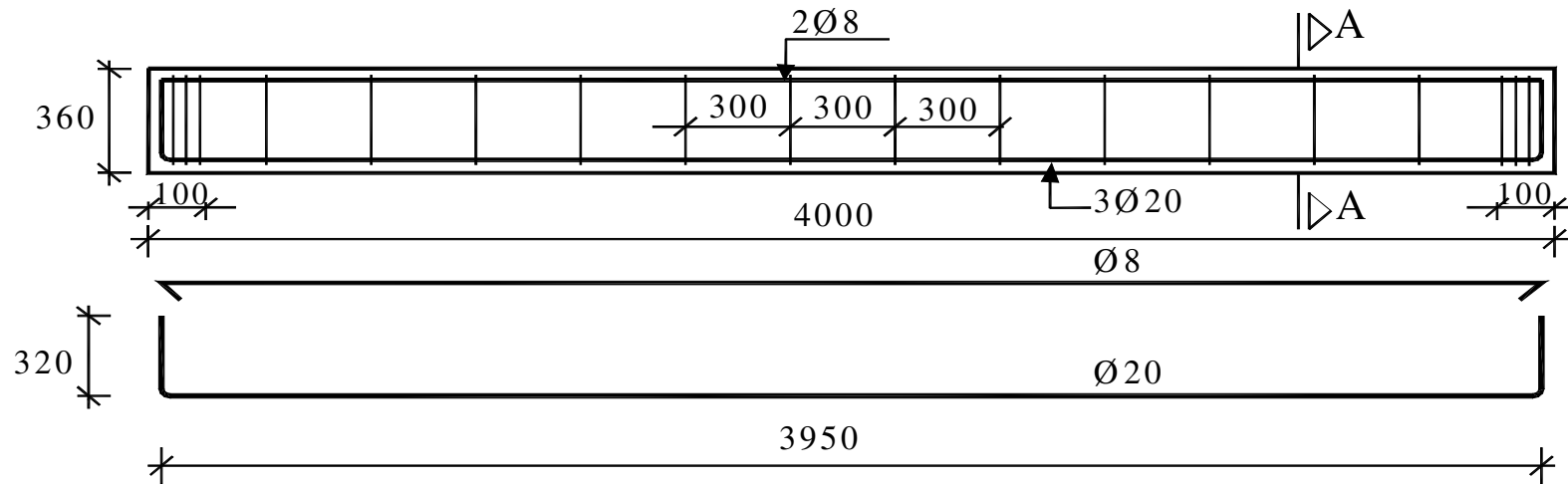
a/d oranının 1,5’den küçük olduğu durumda kemerlenme etkisi önem kazanır. Kirişin güç tüketmesinde kesitin eğilme kapasitesi etkili olur. Kiriş, eğilme momenti kapasitesine erişirken yük dolayısıyla kesme kuvveti büyük değerlere ulaşsa bile kesme kuvveti yük ile mesnet arasında oluşan oldukça dik beton basınç çubuklarıyla mesnete iletildiği için kirişin dayanımına kesme kuvvetinin etkisi azdır. Bu durumda göçme, kesitin eğilme dayanımına erişildikten ve kiriş büyük düşey deplasman yaptıktan sonra yükü mesnete ileten beton basınç çubuğundaki ezilme ile ortaya çıkar. Kemerlenmenin kısmen veya tamamen ortaya çıktığı son iki durumda da çekme donatısının mesnetlerdeki kenetlenmesinin sağlanamaması ani bir göçmenin ortaya çıkmasına neden olur.

Bu bölümde üretilen deney elemanları ve geliştirilen güçlendirme tekniğinin detayları verilmiştir. Bu deneysel çalışmada yetersiz kesme donatılı kirişlerin kesme dayanımı gereksinimi CFRP şeritlerle sağlanmıştır. Deney elemanları gevrek kesme kırılmasının açıkça gözlenebileceği ($a/d=5$) yükleme şartları altında test edilmiştir.

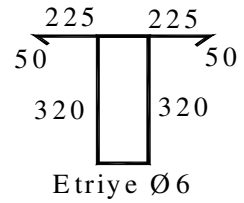
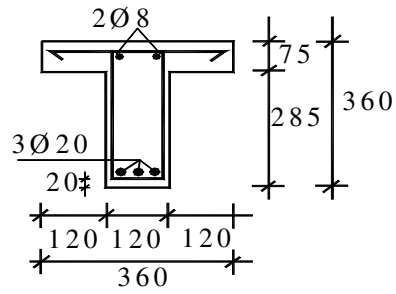
2.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının tasarımı ve boyutlandırılmasında laboratuvar koşulları ve ölçüm aletlerinin kapasiteleri göz önünde bulundurulmuştur. Deney elemanları 1/2 ölçekli, yetersiz kesme donatılı kirişler olarak tasarlanmıştır.

Deney elemanlarının hepsinde aynı tür donatılar kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak 20 mm çapında 3 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Deney elemanlarında boyuna donatı oranı $\rho=0,02246$ olup, dengeli donatı oranından ($\rho=0,03005$) küçüktür. Montaj donatısı olarak 2 adet nervürlü 8 mm çapında donatı kullanılmıştır. Etriyeler 6 mm çapında düz donatıdan üretilmiş, 300 mm aralıklarla kirişe yerleştirilmiştir. Deney elemanlarında etriye donatısı oranı $\rho_w=0,00157$ 'dir. Mesnetlerde lokal kırılmaların önlenmesi amacıyla tüm kirişlerin uçlarına 3 adet etriye 33 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Test kirişlerinin kesme dayanımları, 25 MPa beton basınç dayanımı için, ortalama 50 kN olarak tasarlanmıştır. Yetersiz kesme donatılı bu kirişlerin güçlendirildikten sonra beklenen sünek eğilme davranışı altında eğilme kapasitesinde taşıyabileceği kesme kuvveti yaklaşık 88 kN olarak beklenmektedir. Böylece güçlendirmelerin yaklaşık 38 kN kesme kuvveti taşıması hedeflenmiştir. Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı detayları Şekil 2.1'de verilmiştir.



A - A Kesiti



Ölçüler mm dir.

Şekil 2.1. Deney elemanlarının donatı şeması

Çalışmada toplam 7 adet yetersiz kesme donatılı deney elemanı üretilerek test edilmiştir. 7 elemandan birisi referans elemanıdır. Deney programının diğer 6 elemanı kesmeye karşı CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Güçlendirilen deney elemanlarına 50 mm genişliğinde kiriş gövdesini sargılayan U biçimli CFRP şeritler üç farklı aralıkla kirişe yapıştırılmıştır. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafeler (s_f) 125, 150, 200 mm olarak seçilmiştir.

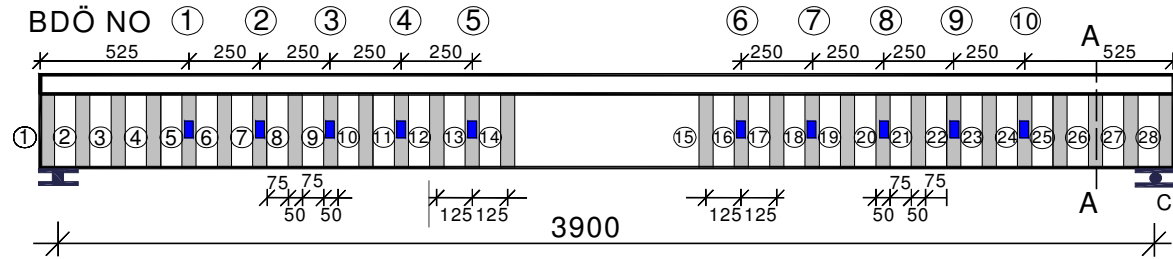
ABYYHY 2007’de, CFRP’nin şeritler halinde kullanılması durumunda şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin (s_f), şerit genişliği (w_f) ile kiriş faydalı yüksekliğinin (d) dörtte birinin toplamından ($w_f+d/4$) küçük olması koşulu bulunmaktadır [15]. Yönetmelikteki bu koşula göre kullanılabilecek maksimum şerit aralığı 132,5 mm’dir. Bu deneysel çalışmada güçlendirme için seçilen ilk şerit aralığı yönetmelik koşullarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Şerit eksenleri arasındaki aralık 125 mm olan deney elemanında 45°’lik bir kesme çatlağı en fazla etkin 2 adet CFRP şerit ile kontrol edilmektedir. Çalışmada seçilen diğer iki şerit eksen aralığı (150 mm ve 200 mm) ile güçlendirilen kirişlerde yönetmelik koşulu ile belirlenen şerit aralıkları ile güçlendirilen kirişlerin birbirlerine göre davranışları incelenmiştir. Şerit aralıklarının deney elemanlarının kesme dayanımlarının gereksinimine katkıları araştırılmıştır. Deney elemanları 2, 3 ve 4’de U biçimli CFRP şeritler kiriş gövdesini sargılayacak biçimde ve şeritler arasındaki mesafeler sırasıyla 125 mm, 150 mm ve 200 mm olacak şekilde yapıştırılmıştır. Deney elemanları 4, 5 ve 6’da sırasıyla 125 mm, 150 mm ve 200 mm aralıklı U biçimli CFRP şerit uçları ikişer adet fan ankrajı ile kirişe sabitlenmiştir. Ankrajların biri kiriş tablası ile gövdesinin birleştiği kesite yatayla 60° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Diğer ankraj kiriş tablasının 50 mm altına, kiriş gövdesine yatay doğrultuda yerleştirilmiştir. Şerit ucundaki bu iki ankrajla kiriş tablası altında gelişen kiriş gövdesi ile kiriş tablasını ayıran kesme çatlaklarının kontrol edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca kiriş gövdesinde gelişen eğik kesme çatlaklarının kontrol edilmesi de bu ankrajlarla sağlanmıştır. Yatayla 60° açı yapan ankrajın düşey bileşeni, CFRP şeritlerinde oluşan kesme kuvvetinden dolayı kiriş yüzeyinden erken soyulmayı engellemiştir.

Ankrajlar CFRP şerit liflerinde kiriş gövdesi ile kiriş tablası birleşiminde gerilme yığılmasını azaltarak şeritlerin kiriş yüzeyinden erken soyulması engellemiştir. Literatürde 20 mm ankraj çapı için etkin gömülme derinliğinin 100 mm olmasını önermiştir. Etkin gömülme derinliği ile ankraj çapı arasındaki oran 5'tir [4]. Bu deneysel çalışmada ankrajlar için literatürde verilen etkin gömülme boyu ile ankraj çapı arasındaki oran kullanılmıştır. Deney elemanlarının geometrik koşullarından dolayı ankraj gömülme derinliği 50 mm, ankraj çapı 10 mm belirlenmiştir. ABYYHY 2007'de CFRP şeritlerin kiriş çevresini tamamen sarmasını zorunlu tutmuştur [15]. Ancak uygulamada mevcut döşeme ve donatıların CFRP şeritlerin kiriş çevresini sargılamasını çoğu zaman imkansız hale getirmektedir. Buna ilave olarak güçlendirme uygulamasını çok zahmetli bir duruma getirmektedir. Bu nedenle CFRP şeritlerin kirişleri tamamen sargılanması yerine, şerit uçları ankrajlarla sabitlenerek 120 mm uzunluğunda bir kısmı kiriş tablasına yapıştırılmıştır. Deney elemanlarının özellikleri ve yapılan güçlendirme biçimleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

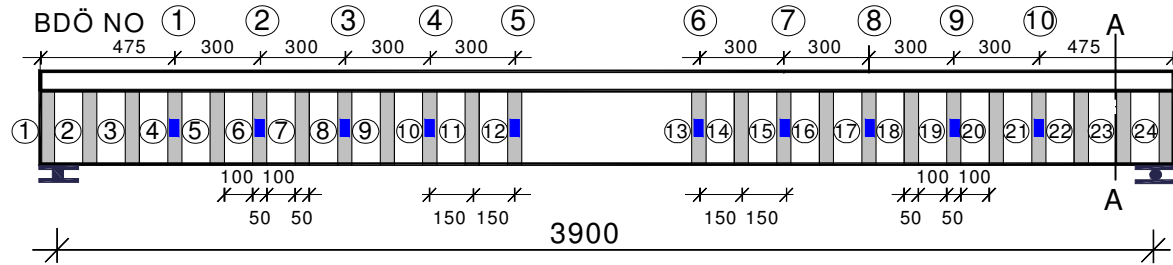
Çizelge 2.1. Deney elemanları

Deney Elemanı No	(a/d)	Etriye		CFRP Şerit Aralığı s_f (mm)	Ankraj
		Çap/Aralık (mm)	Oranı ρ_w		
1 (Referans)	5	Ø6/300	0,00157	-	Yok
2 (Güçlendirme)	5	Ø6/300	0,00157	125	Yok
3(Güçlendirme)	5	Ø6/300	0,00157	150	Yok
4(Güçlendirme)	5	Ø6/300	0,00157	200	Yok
5(Güçlendirme)	5	Ø6/300	0,00157	125	Var
6(Güçlendirme)	5	Ø6/300	0,00157	150	Var
7(Güçlendirme)	5	Ø6/300	0,00157	200	Var

Deney elemanlarında yapıştırılan U biçimli CFRP şeritlerin detayları ve şeritlere yerleştirilen birim deformasyon ölçerler Şekil 2.2'de verilmiştir.

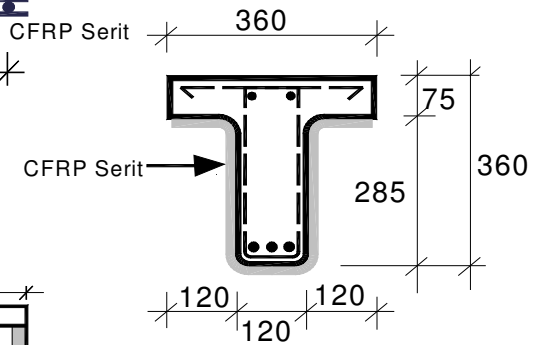


a) Deney Elemanı 2, $w_f=50$ mm, $s_f=125$ mm



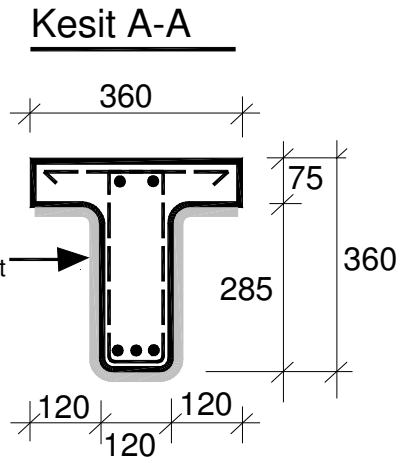
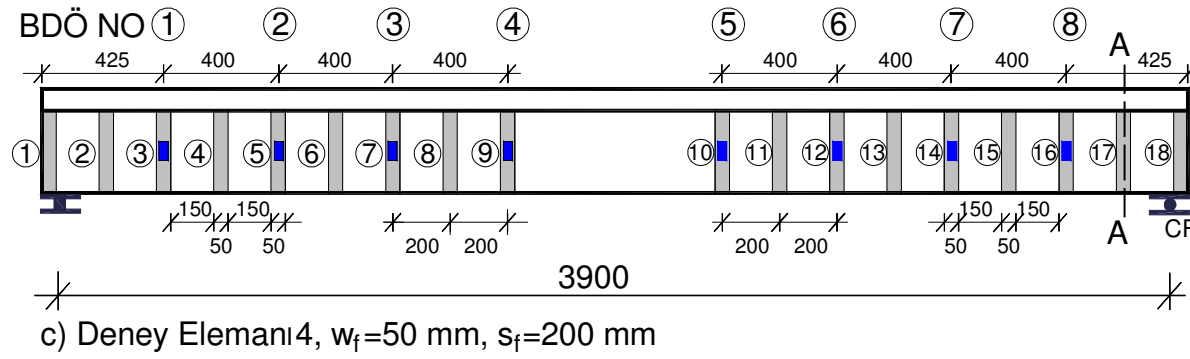
b) Deney Elemanı 3, $w_f=50$ mm, $s_f=150$ mm

Kesit A-A



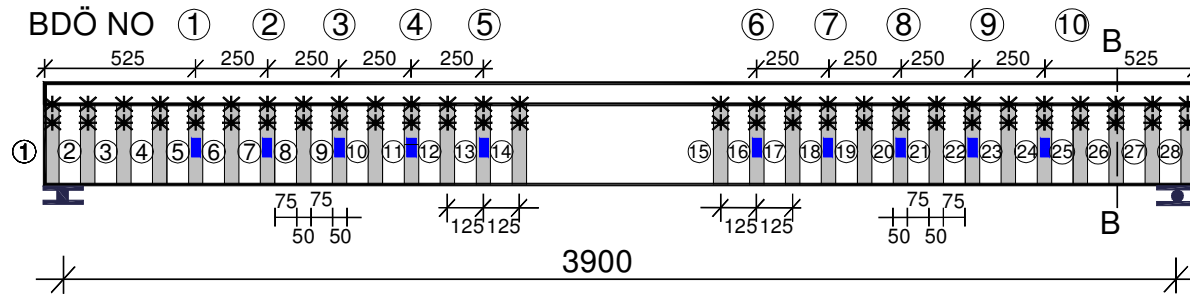
■ Birim deformasyon ölçer (BDÖ)
Ölçüler mm'dir

Şekil 2.2. Güçlendirilen deney elemanları

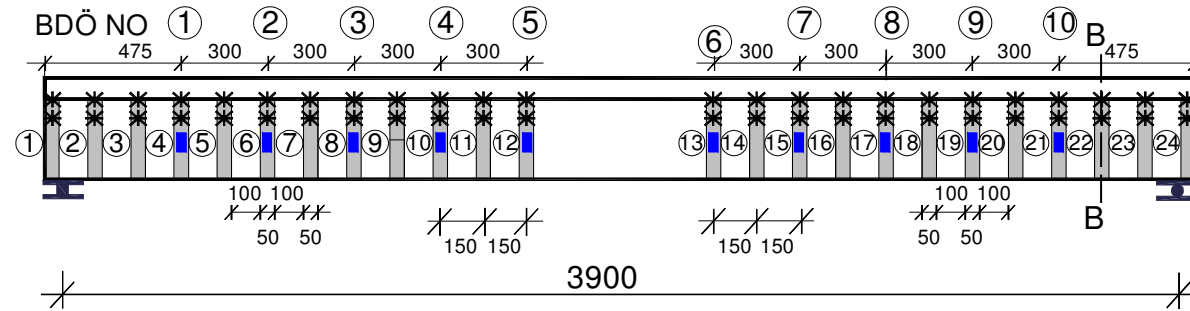


■ Birim deformasyon ölçer (BDÖ)
Ölçüler mm'dir

Şekil 2.2 (Devam). Güçlendirilen deney elemanları

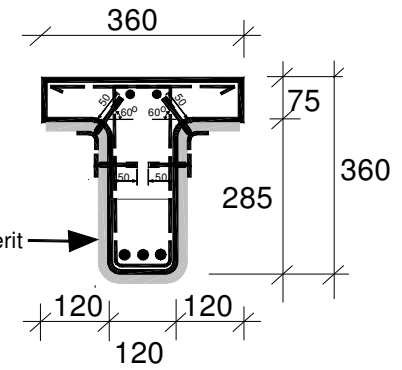


d) Deney Elemanı 5, $w_f=50$ mm, $s_f=125$ mm



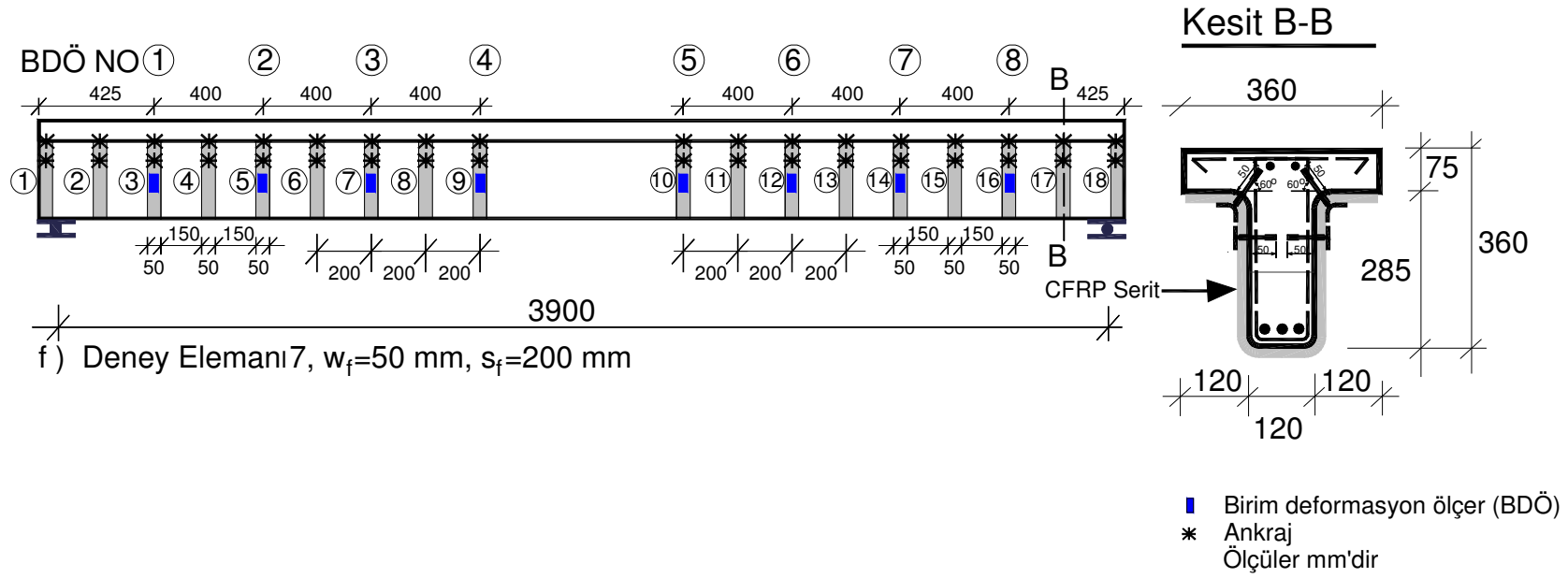
e) Deney Elemanı 6, $w_f=50$ mm, $s_f=150$ mm

Kesit B-B



- Birim deformasyon ölçer (BDÖ)
- * Ankraj
- Ölçüler mm'dir

Şekil 2.2 (Devam). Güçlendirilen deney elemanları



Şekil 2.2 (Devam). Güçlendirilen deney elemanları

2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Deneylerden elde edilen verilerin sağlıklı karşılaştırabilmesi için deney elemanlarının üretiminde kullanılan malzemelerin aynı karakteristik özelliklerde olmasının sağlanması çok önemlidir. Deneysel çalışmada kullanılan tüm malzemelerin aynı olması için donatı alımlarında ve beton üretimlerinde özen gösterilmiştir.

2.3.1. Beton

Deney elemanlarında beton basınç dayanımının 25 Mpa olması hedeflenmiştir. Tüm deney elemanlarda aynı beton karışımı kullanılmıştır. Beton karışım oranı Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Beton karışım oranı

Malzeme	Ağırlık (kg)	Ağırlıkça Oranı (%)
Su	195	8,6
Kum (0-7 mm)	650	28,9
Çakıl (7-15 mm)	1107	49,2
Portland Çimento	300	13,3
Toplam	2252	100

Betonun karakteristik basınç dayanımını belirlemek için beton dökümünde alınan 5 adet standart silindir numune test edilmiş, numunelerin testi sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin ortalaması alınmıştır. Silindir numuneleri 150mmx300mm boyutlarındadır. Standart silindir numunelerin ortalama beton basınç dayanımları her deney elemanı için Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları

Deney Elemanı No	f_{ck} (Mpa)
1	25,0
2	24,8
3	24,9
4	25,2
5	24,9
6	25,0
7	24,8

2.3.2. Donatılar

Deney elemanlarında kullanılan donatıların özelliklerini belirlemek için her çaptaki donatıdan 3'er adet örnek alınarak çekme deneyi yapılmıştır. Donatıların ortalama akma ve kopma dayanımları Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Donatıların özellikleri

Donatı Çapı (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)
6	S220	275,0	385,8
8	S420	304,2	425,2
20	S420	475,0	610,2

2.3.3. CFRP

SikaWrap 230C kuru uygulama yöntemiyle uygulama için tek doğrultulu karbon lif donatılı polimerlerdir. Kullanım alanı çok geniş olup özellikle son yıllarda betonarme elemanlarının güçlendirme ve rehabilitasyonlarda yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Betonarme yapılarda tasarım ve imalat hatalarının giderilmesinde, kusurlu donatılı elemanları güçlendirmede, yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerini arttırmada gibi birçok amaçla kullanılmaktadır. SikaWrap 230C birim ağırlığının çok küçük olması nedeniyle yapıya ek yük getirmemektedir. Ayrıca kopma dayanımının donatıya göre çok fazla oluşu, korozyon riskinin bulunmaması nedenleriyle betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesi için elverişli bir malzemedir. Uygulaması kolay ve oldukça pratiktir. Çalışmada kullanılan CFRP'nin özellikleri Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. CFRP'nin özellikleri

Ağırlık	220 gr/m ²
Kalınlık	0,12 mm
Çekme Dayanımı	4100 MPa
Elastisite Modülü	231.000 MPa
Kopmadaki Uzama	% 1,7
Lif Yapısı	%99 ana doğrultuda, %1 destekleyici doğrultuda lif

2.3.4. Epoksi (Sikadur 330)

SikaWrap 230C malzemesinin kiriş yüzeyine yapıştırılması için kullanılan yapıştırıcı Sikadur 330 epoksi esaslı doyurma reçinesidir. Bu yapıştırıcı iki bileşenden oluşmaktadır (A: Ana reçine, B: Sertleştirici). Epoksidede karışım oranları (A:B) 4:1 dir. Sikadur 330 malzemesi bütün yüzeylere kolayca uygulanabilir olması, iyi aderans sağlaması, kimyasallardan etkilenmemesi bu sayede uzun bir süreç içinde özelliklerini koruması güçlendirme amaçlı

Beton dökümünden önce çelik kalıp yağlanmıştır. Hazırlanan donatı kafesi çelik kalıbın içine yerleştirildikten sonra beton dökümü yapılmıştır. Kalıba yerleştirilen beton dikkatli bir şekilde vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Deney elemanlarının beton dökümü Resim 2.1'de verilmiştir.



Resim 2.1. Beton dökümü

Beton dökümü sırasında kalıpta oluşabilecek deformasyonları engellemek için kalıbın tablasına çelik profilden üretilen kancalar takılmıştır. Beton döküldükten üç gün sonra giriş ve standart silindir numuneler kalıptan çıkarılmış laboratuarda aynı şartlar altında 28 gün kür uygulanmıştır. Standart silindir numune testi Resim 2.2'de verilmiştir.



Resim 2.2. Standart silindir numune testi

2.4.1. Güçlendirme İşlemleri

CFRP şeritlerin hazırlanışı ve yüzeylere yapıştırılması

Deney elemanlarının gövdesine yapıştırılacak U biçimli şeritler 930 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde CFRP kumaştan kesilerek hazırlanmıştır. Deney elemanlarında CFRP şeritlerin yerleşim bölgeleri işaretlenmiştir. CFRP şeritlerinin yerleşiminin işaretlenmesi Resim 2.3'te verilmiştir. CFRP şeritlerin yapışacağı kiriş yan yüzeyinde beton şerbeti temizlenmiş ve betonda granülometrinin görünmesi sağlanmıştır. CFRP şerit uçlarında kullanılacak fan ankrajları için kirişlerde ankraj yerleri işaretlenip delikler matkap ile açılmıştır. Kirişte yüzey hazırlığı Resim 2.4'de verilmiştir.



Resim 2.3. CFRP şerit yerleşiminin işaretlenmesi



Resim 2.4. Kirişte yüzey hazırlığı

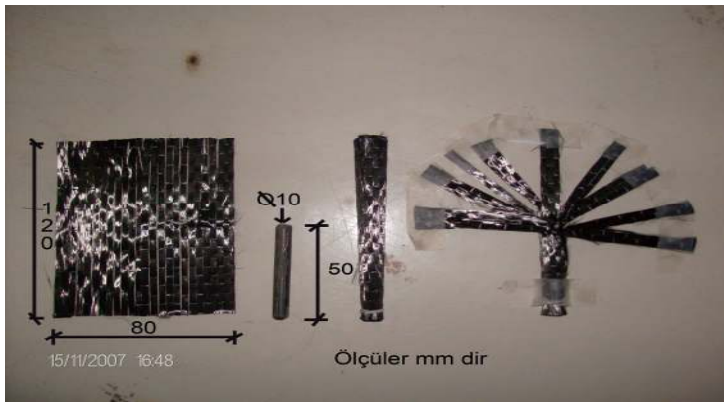
Her epoksi (Sikadur 330) karışımı (A:B) 4:1 oranında 500 gr yapılmıştır. Hazırlanan karışım spatula ile 1 mm kalınlığında şeritlerin yerleştirileceği kiriş yüzeyine sürülmüştür. 930 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde hazırlanan CFRP şerit çizilen çizgi doğrultusunda gergin bir şekilde yüzeye yapıştırılmıştır. Yapıştırma sırasında lif doğrultusunun bozulmaması için özen gösterilmiştir. İyi bir yapışmanın gerçekleştirilmesi için CFRP şeritlerin epoksiye doyurulması sağlanmıştır. CFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması Şekil 2.5'de verilmiştir.



Resim 2.5. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyine yapıştırılması

Ankrajların Hazırlanması ve uygulanması

Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan fan ankrajları, 50 mm uzunluğunda 10 mm çapındaki donatıya, 80 mm genişliğinde 120 mm uzunluğunda CFRP şerit sarılarak üretilmiştir. CFRP şeritlerde donatının dışında kalan 70 mm'lik kısım 10 mm genişliğinde 8 adet CFRP şerit fan şeklinde ayrılmıştır. Hazırlanan ankrajların detayı Resim 2.6'da verilmiştir. Ankrajlar hazırlanırken CFRP şeritlerin sarılmasına ve CFRP şerit liflerine zarar verilmemesine özen gösterilmiştir.



Resim 2.6. Ankraj detayları



Resim 2.7. Kirişte ankraj uygulaması

3. LABORATUAR TEKNOLOJİSİ

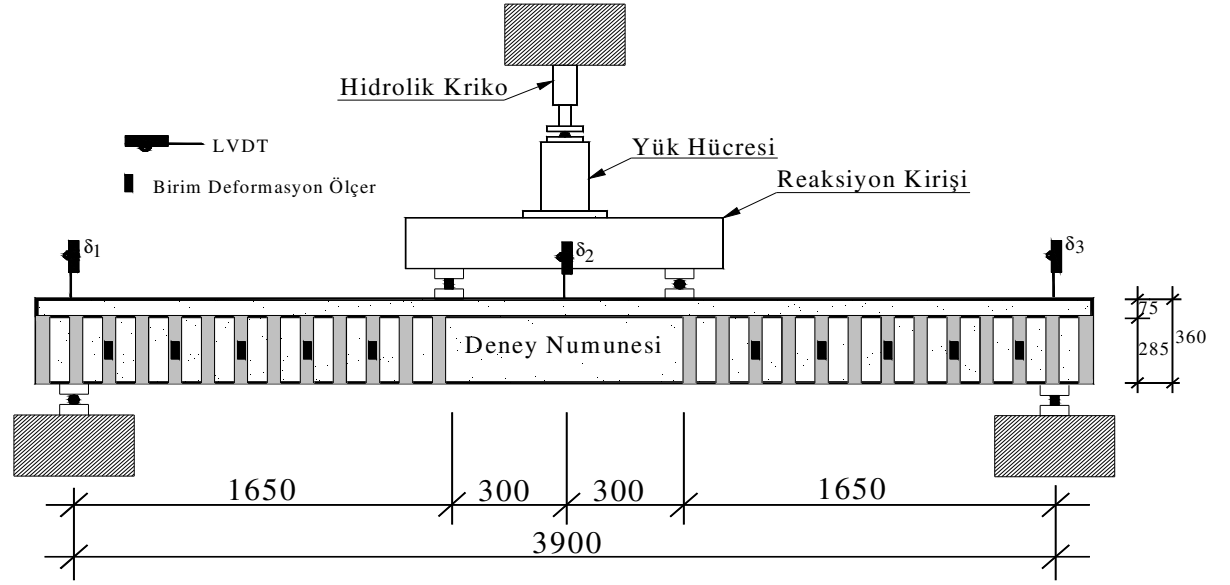
3.1. Genel

Deneyler Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği laboratuvarında bulunan 200 kN kapasiteli deney çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları tek düze yüklemeler altında test edilmiştir. Yükleme sıfırdan başlayarak artırılmış ve kırışte kırılma gerçekleşinceye kadar devam edilmiştir. Yük hidrolik krika ile verilmiş, yükün büyüklüğü yük hücresi (Load-Cell) ile ölçülmüştür.

3.2. Yükleme ve Deney Düzeni

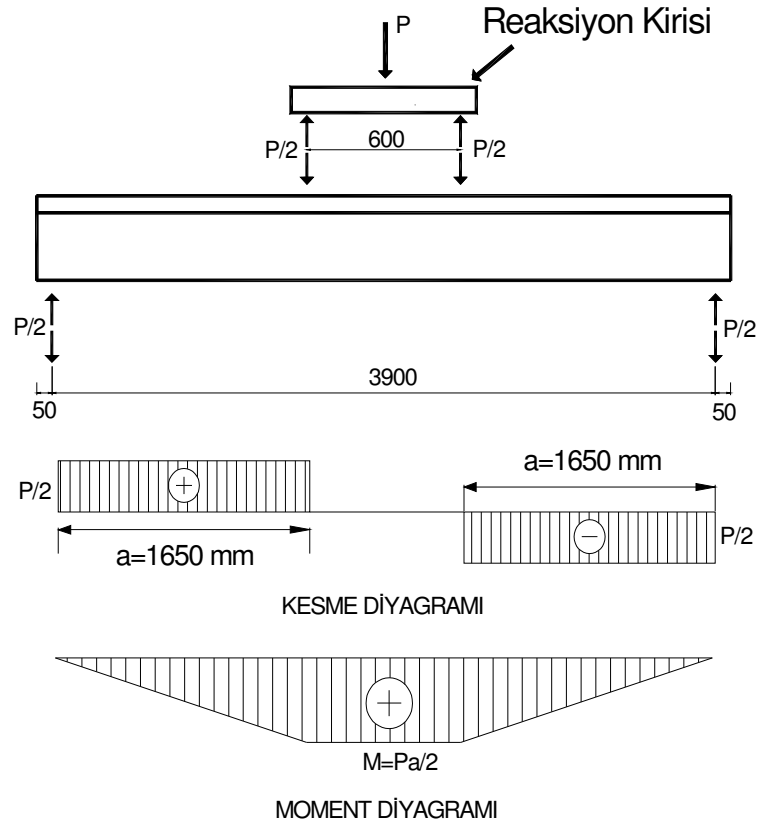
Deney elemanlarının testinde kullanılan yükleme ve ölçüm düzeneği şematik olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. Deney elemanları basit kiriş olacak şekilde mesnetlenmiştir. Yapı laboratuvarındaki yükleme düzeneği yüksek dayanımlı U çelik profillerinden yapılmıştır. 4 m uzunluğundaki deney elemanları U200 profillerinden hazırlanan ve mesnet altlarına konulan çelik kutu profiller üzerine yerleştirilmiştir. Deney elemanında sabit ve hareketli mesnet koşullarını oluşturmak için dikdörtgen ve dairesel kesitli çelik çubuklar kullanılmıştır. Basit mesnetli deney elemanları simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Hidrolik krikodan uygulanan yük kiriş üstüne simetrik yerleştirilen 1200 mm uzunluğunda bir reaksiyon kirişi yardımıyla deney elemanına aktarılmıştır. Reaksiyon kirişi 600 mm açıklıklı basit mesnetlerle kiriş üstüne yerleştirilmiştir. Hidrolik krikonun ucuna yerleştirilen yük hücresinin (Load-Cell) kapasitesi 400 kN'dur .

Deney elemanlarının yükleme tekniğini gösteren serbest cisim diyagramı ve deney elemanlarının iç kuvvetleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Deney elemanları, tekil kuvvetler arasında sabit moment etkisi altında eğilmeye zorlanırken, kesme açıklığında momentle birlikte sabit kesme kuvveti etkisi altında bulunmaktadır.



Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.1. Tipik bir deney elemanında yükleme ve ölçüm düzeni



Şekil 3.2. Serbest cisim diyagramı

3.3. Ölçüm Düzeneği ve Veri Toplanması

3.3.1. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni

Deneylerde kiriş orta nokta deplasmanı ve mesnet çökmeleri elektronik deplasman ölçüm aletleri (LVDT) ile ölçülmüştür. LVDT'ler 0.0001mm ye kadar olan deplasman değişimlerini ölçebilmektedir. LVDT'ler ile alınan deney verileri veri toplayıcı ile bilgisayara aktarılarak istenilen grafikler oluşturulmuştur.

Deneylerde sağ mesnet çökmesi, sol mesnet çökmesi ve kiriş orta deplasmanını ölçmek için kiriş üzerine yerleştirilen 3 adet LVDT kullanılmıştır. Kiriş uçlarında kullanılan LVDT'ler 100×10^{-6} mm ölçüm hassasiyetinde 50

mm, orta nokta deplasmanını ölçen LVDT ise 50×10^{-6} mm ölçüm hassasiyetinde 200 mm kapasitededir.

CFRP şeritlerinde birim uzamaları ölçmek için şeritlerin üzerine Tokyo Sokki firmasının ürettiği FLA 10-11 tipi birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Birim deformasyon ölçerler bir taşıyıcı üzerinde bulunan birbirine paralel bağlantılı tellerden oluşmuştur. Kullanılan birim deformasyon ölçerlerin direnci 120Ω 'dur. Birim deformasyon ölçerlerin en önemli parametresi uzama oranıdır (GF). Uzama oranı, birim deformasyon ölçerin birim uzamada gösterdiği direnç değişimidir. Birim deformasyon ölçerler 0,01 mm/mm ölçüm kapasitesindedir.

3.3.2. Toplanan verilerin değerlendirilmesi

Deney elemanının orta noktasındaki net deplasman değeri Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\delta_{net} = \delta_2 - \left(\frac{\delta_3 + \delta_1}{2} \right) \quad (3.1)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

δ_1 : Sol mesnet çökmesi (mm)

δ_3 : Sağ mesnet çökmesi (mm)

δ_2 : Kiriş orta noktası düşey deplasmanı (mm)

CFRP şeritlerinin birim uzama değerleri Eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_o = -\frac{GFx\varepsilon}{4} \times \left(\frac{1}{1 + GFx\frac{\varepsilon}{2}} \right) \times V_i \times GAIN \quad (3.2)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V_o : Birim deformasyonda ölçülen gerilim değişimi (volt)

V_i :Birim deformasyon ölçerdeki başlangıç gerilimi (volt)

GF:Uzama oranı

GAIN :Kazanç faktörü

ε :CFRP şeritlerdeki birim uzama değeri (mm/mm)

Eşitlikte başlangıç gerilimi (V_i) 5 V, uzama oranı (GF) 2, kazanç faktörü (GAIN) 410 alınmıştır.

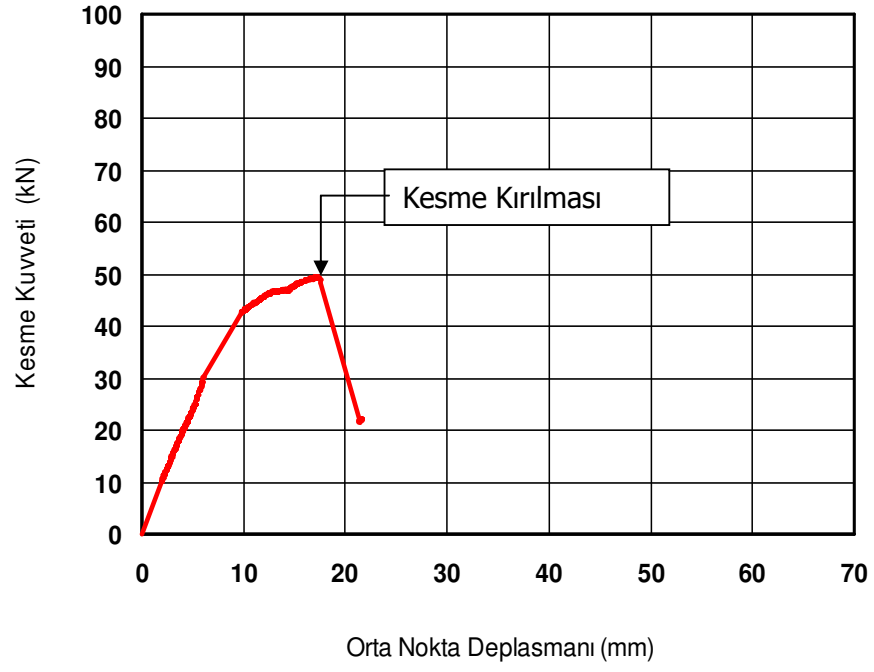
4. DENEYLER

Deneyler sırasında yük hücresinden ve LVDT'lerden alınan ölçümlerden Yük-Deplasman (yük kesme kuvvetini, deplasman kiriş orta noktasındaki net deplasmanı ifade etmektedir) grafikleri oluşturulmuştur. CFRP şeritlerdeki birim deformasyon ölçerler ve yük hücresinden alınan değerler kullanılarak yük-birim deformasyon (yük kesme kuvvetini ifade etmektedir) grafikleri oluşturulmuştur.

4.1. Deney Elemanı 1 (Referans Elemanı)

Güçlendirilen deney elemanları ile karşılaştırmak amacıyla üretilmiş yetersiz kesme donatılı referans elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.

Referans kirişinde ilk eğilme çatlağı sabit moment bölgesinde 20,1 kN'da oluşmuştur. Bu yük düzeyinde orta nokta deplasmanı 4,3 mm olarak ölçülmüştür. Yük düzeyinin artmasıyla eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Referans elemanında ilk eğik çatlak sağ kesme açıklığında 37 kN'da oluşmuştur. Bu yük düzeyinde deplasman 7,5 mm olarak ölçülmüştür. Yükün artmasıyla kirişin sağ ve sol kesme açıklıklarında eğik çatlakların sayısı artmıştır. Yükün 47 kN'da sağ ve sol kesme açıklıklarındaki eğik çatlaklar kiriş tablasına kadar ulaşmıştır. Ayrıca bu yük düzeyinde kirişin sol açıklığında, çekme donatısı doğrultusunda kiriş altında aderans çatlağı da gözlenmiştir. Referans elemanı 49,51 kN yükte sol kesme açıklığında ana kesme çatlağının genişlemesi sonucu kesme kırılmasından dolayı göçmüştür. Deney elemanının göçmeden sonraki görünüşü Resim 4.1'de verilmiştir. Kirişin göçme yükündeki orta nokta deplasmanı 17 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 1

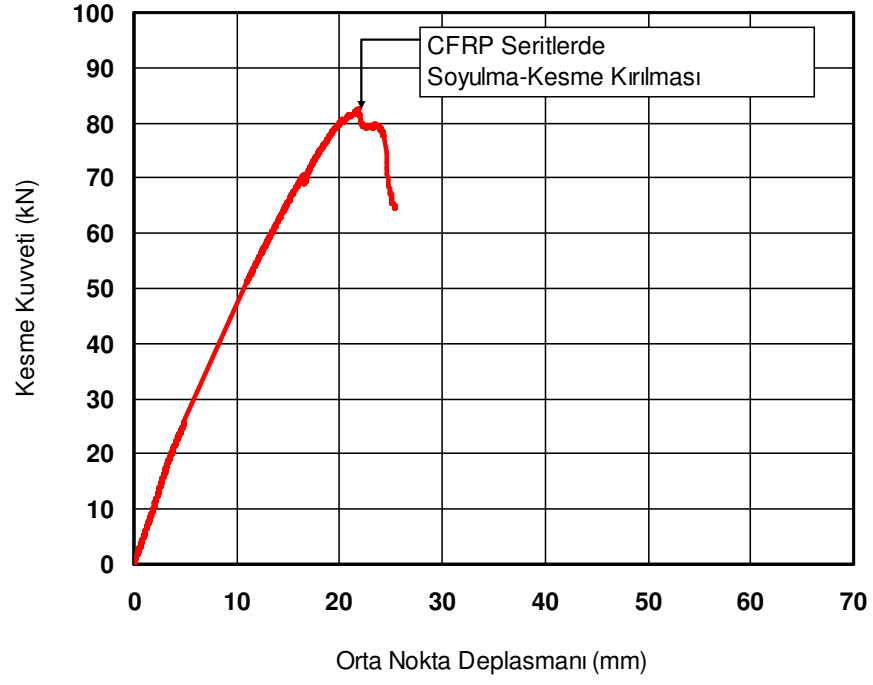


Resim 4.1. Göçmeden sonra, deney elemanı 1

4.2. Deney Elemanı 2

Eksenleri arasında 125 mm mesafe olan CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.3’de verilmiştir.

Deney elemanında 21 kN yükte ilk eğilme çatlağı sabit moment bölgesinde kılcal düzeyde oluşmuştur. Bu yük düzeyinde orta nokta deplasmanı 3,8 mm ölçülmüştür. Yüklemin artmasıyla kılcal eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Deney elemanında ilk kesme çatlağı 39 kN yükte sol kesme açıklığında 4. şerit ile 5. şerit arasında oluşmuştur. Yükün artmasıyla birlikte şeritler arasında kılcal kesme çatlakları oluşmuştur. Ancak bu yük düzeylerinde kesme çatlakları şeritlerin altından geçememiştir. 76 kN yükte sağ kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı 7 ve 8 numaralı şeritlerin altından geçerek tablaya ulaşmıştır. 82,55 kN yükte 7. CFRP şeridin kiriş yüzeyinden soyulması sonucunda kiriş kesme kırılmasından dolayı göçmüştür. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması Resim 4.2’de verilmiştir. Göçme yükündeki orta nokta deplasmanı 21.96 mm ölçülmüştür. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.3’de verilmiştir. CFRP şeritlerde en büyük birim deformasyon değeri ana kesme çatlağının üzerinde bulunan 9 numaralı şeritte 0,0042 mm/mm ölçülmüştür. 7 numaralı birim deformasyon ölçerde 0,004 mm/mm ölçülmüştür. 1, 2, 3, 5, 6, 8 ve 10 numaralı birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değerleri 0,00060-0,0025 mm/mm arasında değişmiştir.



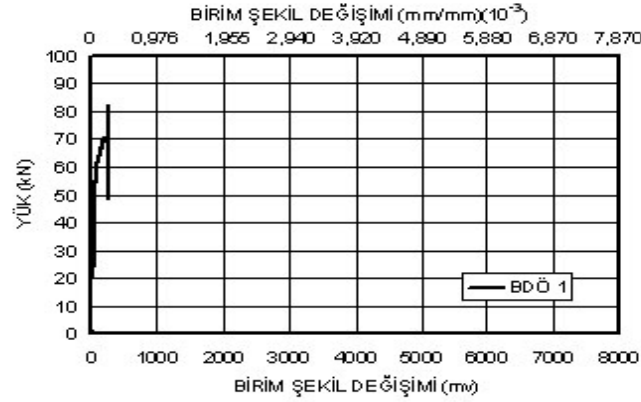
Şekil 4.2. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 2



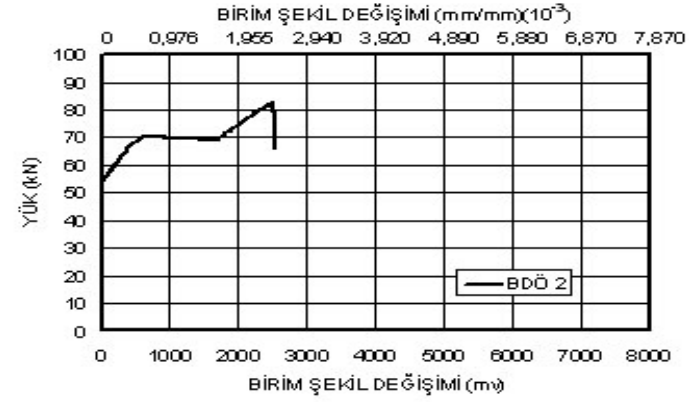
Resim 4.2. CFRP şeridin kiriş yüzeyinden soyulması



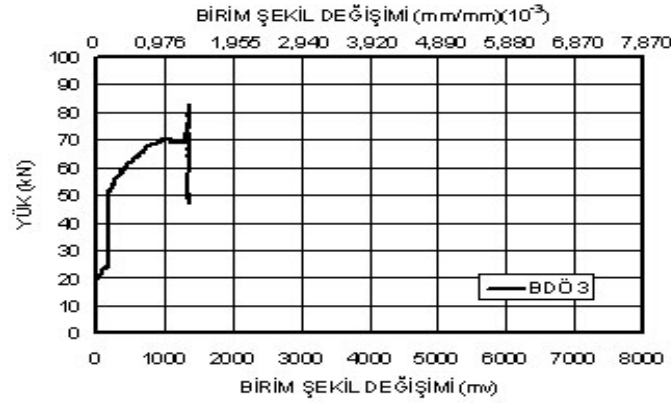
Resim 4.3. Göçmeden sonra, deney elemanı 2



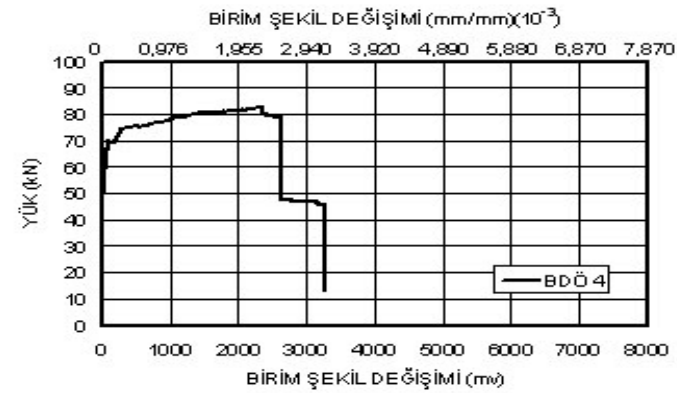
a)



b)



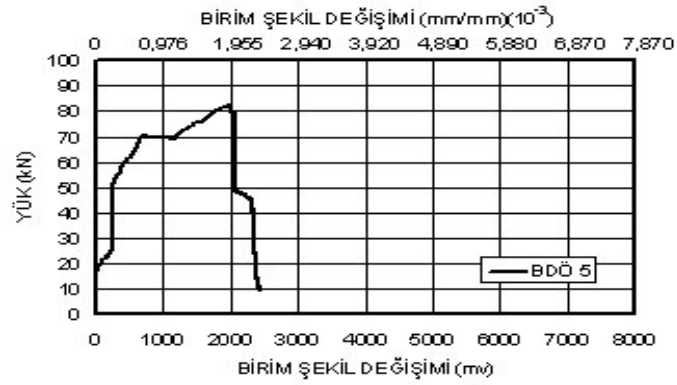
c)



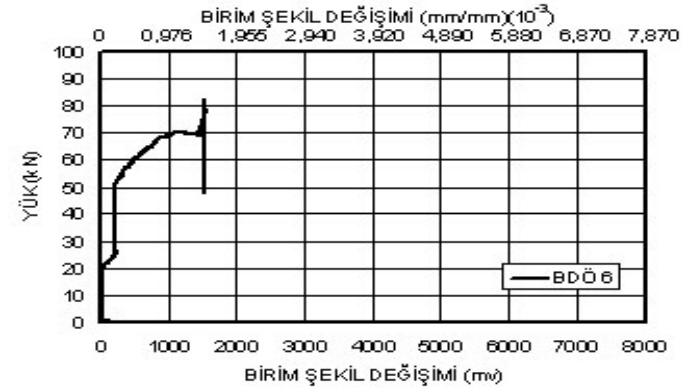
d)

Şekil 4.3. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2

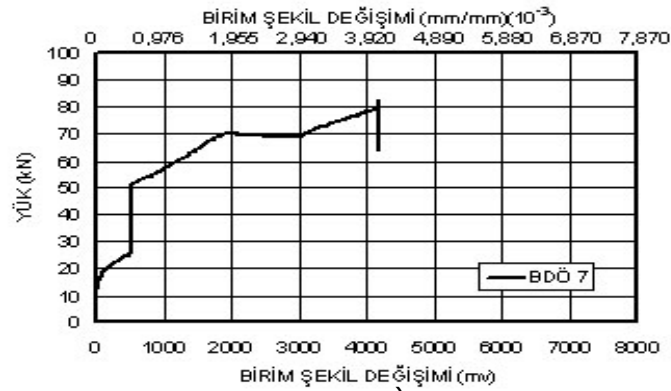
- a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3,
d) Birim deformasyon ölçer 4



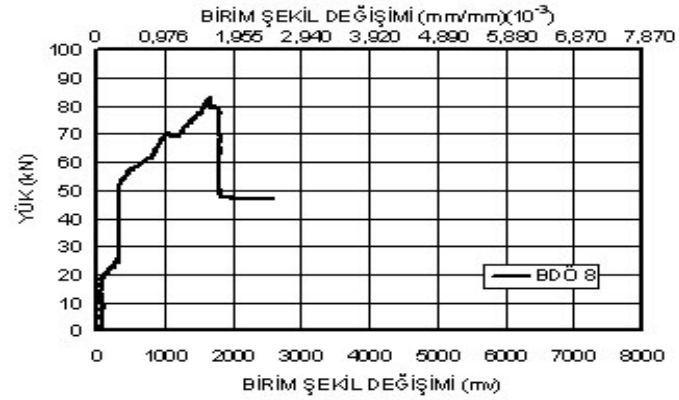
e)



f)



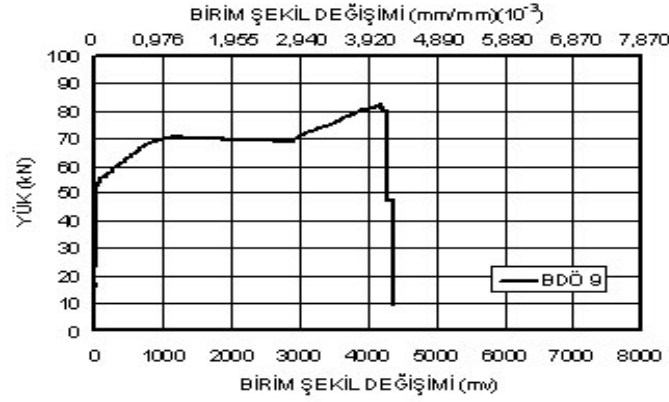
g)



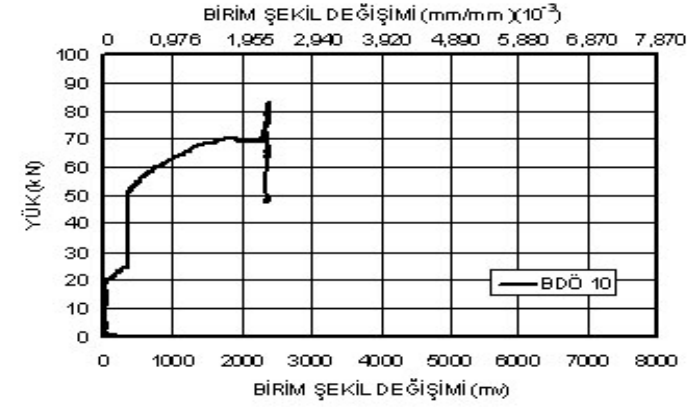
h)

Şekil 4.3 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2

e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



i)



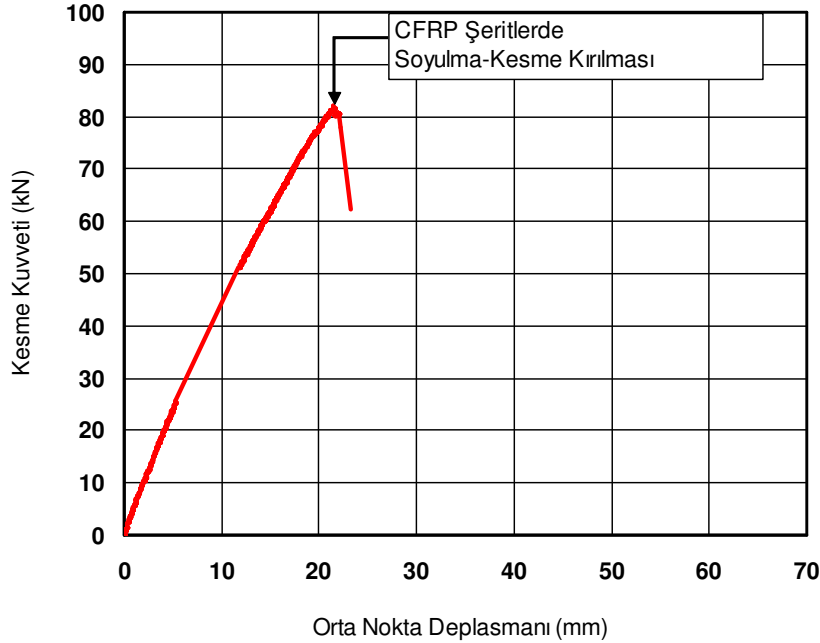
j)

Şekil 4.3 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2
i) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10

4.3. Deney Elemanı 3

Eksenleri arasında 150 mm mesafe olan CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.5'de verilmiştir.

Deney elemanında 19,1 kN yükte sabit moment bölgesinde ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Bu yük düzeyinde 3,5 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Yükün artmasıyla sabit moment bölgesindeki kılcal eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. 43 kN'da sol kesme açıklığında ilk kesme çatlağı oluşmuştur. Yüklemenin devam etmesiyle birlikte sağ ve sol kesme açıklıklarındaki şeritler arasında kılcal eğik çatlakların sayısı artmıştır. 50 kN yük düzeyine kadar birim deformasyon değerleri 0,001 mm/mm değerini geçmemiştir. 50 kN yük düzeyinden sonra 1, 2, 4, 5 ve 10 numaralı birim deformasyon ölçerlerde hızlı artış olmuştur. 62 kN yükte kesme çatlakları kiriş tablasına kadar ulaşmıştır.



Şekil 4.4. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 3

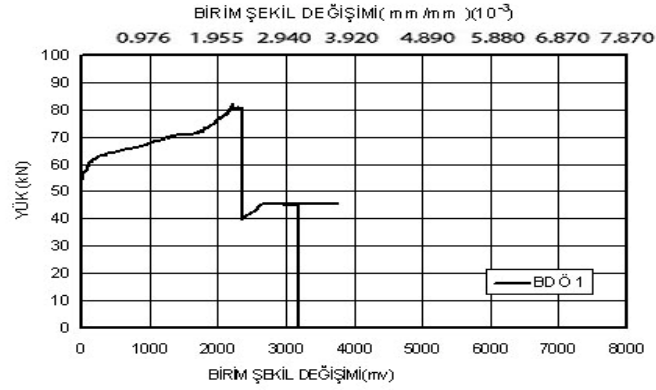
81,2 kN yükte sol kesme açıklığındaki 3. şerit tabla ile kiriş gövdesinin birleştiği noktadan soyulması sonucu kiriş kesme kırılması sonucu göçmüştür. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması Resim 4.4'de verilmiştir. Göçme yükündeki orta nokta deplasmanı 21,5 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.5'de verilmiştir. CFRP şeritlerde en büyük birim deformasyon değeri ana kesme çatlağının üzerinde bulunan 10 numaralı CFRP şeritte 0,0046 mm/mm ölçülmüştür. 1, 2 ve 4 numaralı birim deformasyon ölçerde birim deformasyon 0,0036 mm/mm ölçülmüştür. 5 numaralı birim deformasyon ölçerde birim deformasyon 0,004 mm/mm ölçülmüştür.



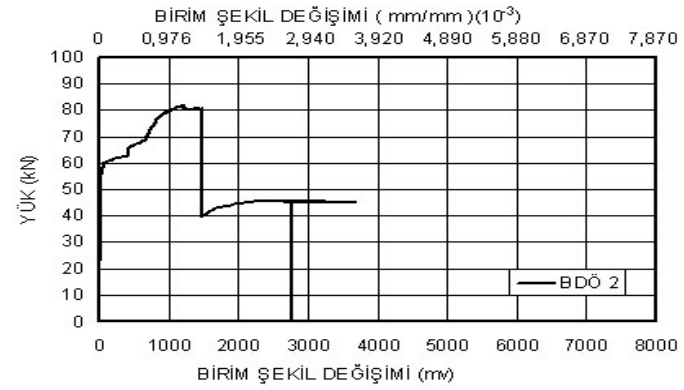
Resim 4.4. CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması



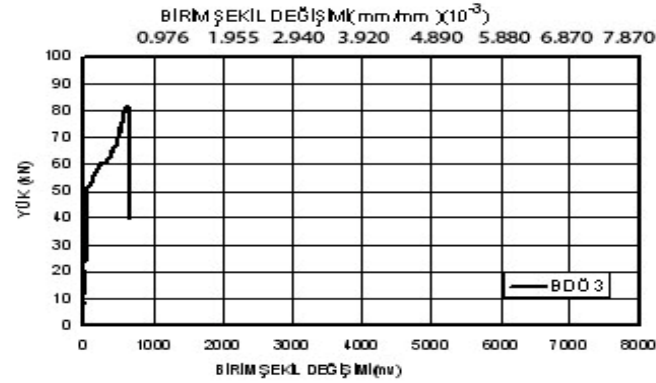
Resim 4.5. Göçmeden sonra, deney elemanı 3



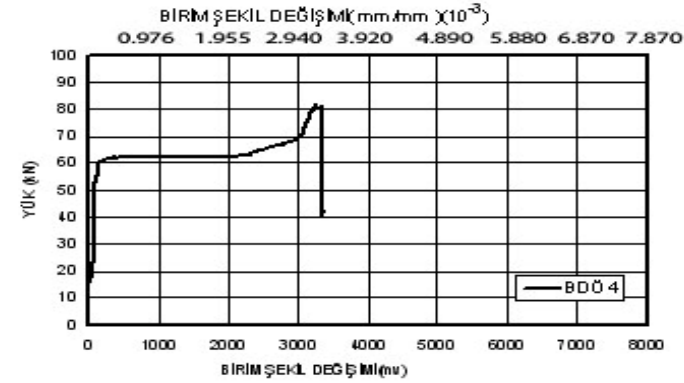
a)



b)



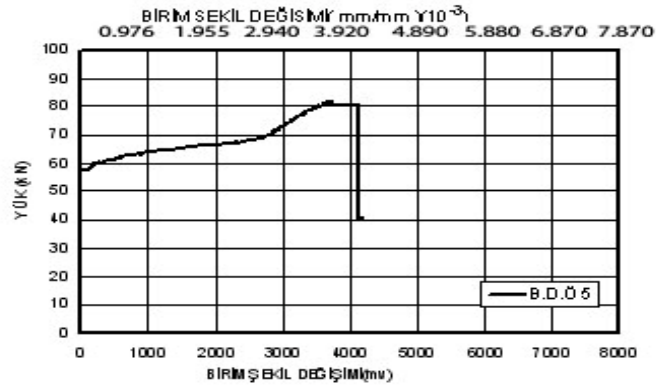
c)



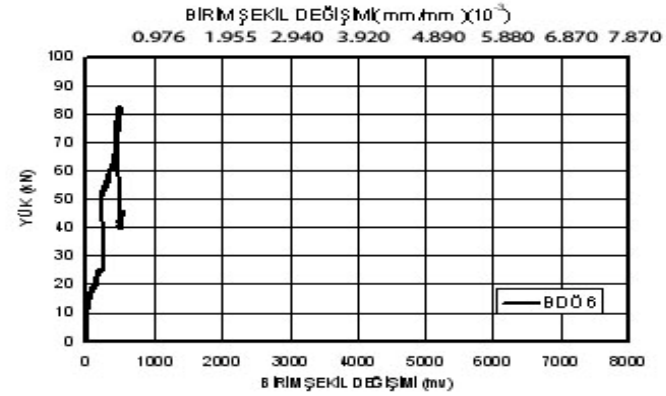
d)

Şekil 4.5. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3

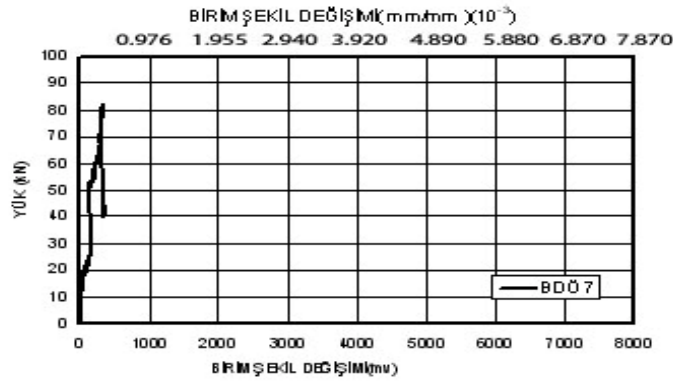
- a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3,
d) Birim deformasyon ölçer 4



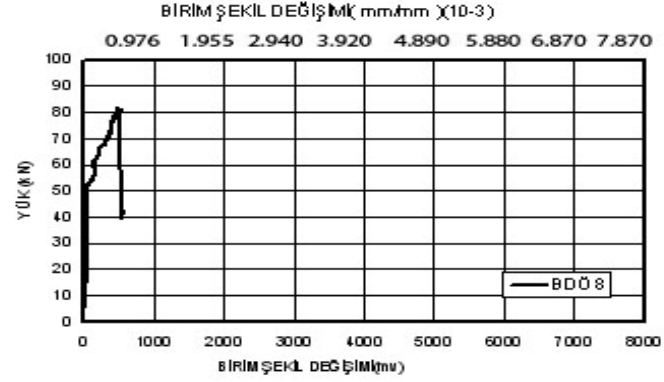
e)



f)



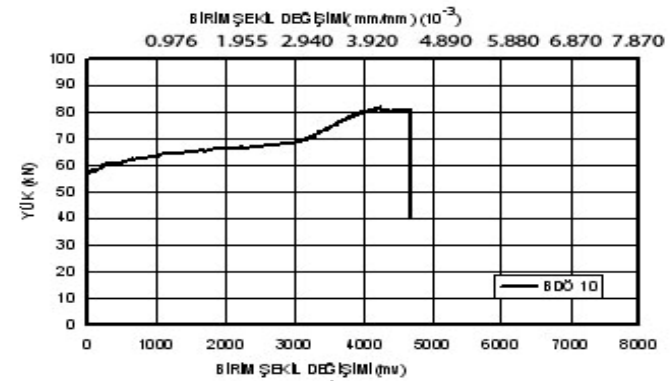
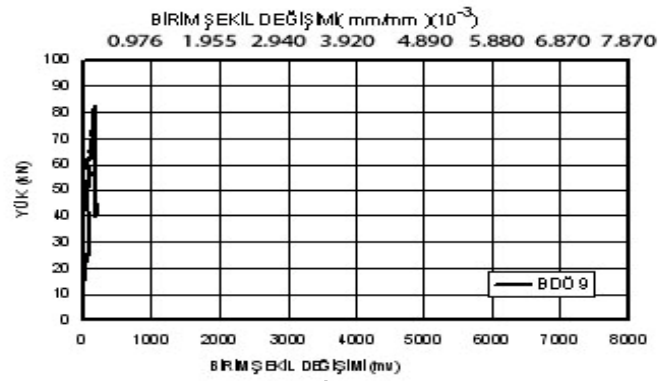
g)



h)

Şekil 4.5 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3

e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7,
h) Birim deformasyon ölçer 8

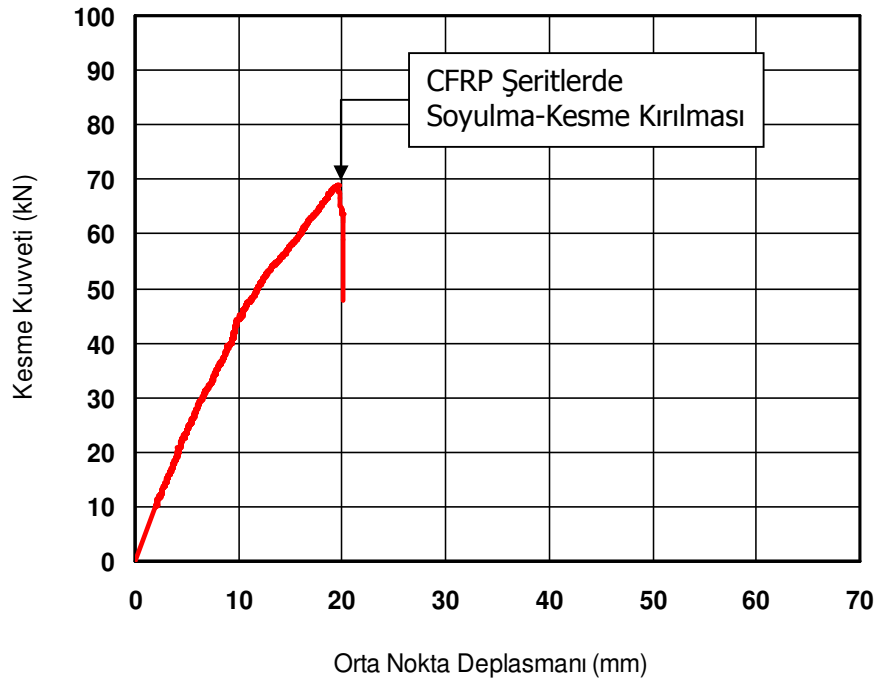


Şekil 4.5 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3
 ı) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10

4.4. Deney Elemanı 4

Eksenleri arasında 200 mm mesafe olan CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden alınan yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.

Deney elemanında ilk eğilme çatlağı 23,8 kN yükte 4,61 mm deplasman değerinde oluşmuştur. Yükün artmasıyla eğilme çatlağı sayısı da artmıştır. 33 kN'da kirişte sağ kesme açıklığında ilk eğik çatlak kılcal düzeyde oluşmuştur. Bu yük düzeyinde sol kesme açıklığında da eğik çatlak oluşmuştur. 35 kN'da 1 numaralı birim deformasyon ölçerdeki birim deformasyon değeri 0,001 mm/mm'yi geçmiştir. Yükün artmasıyla eğik çatlaklar kılcal düzeyde şeritler arasında gelişmiştir.



Şekil 4.6. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 4

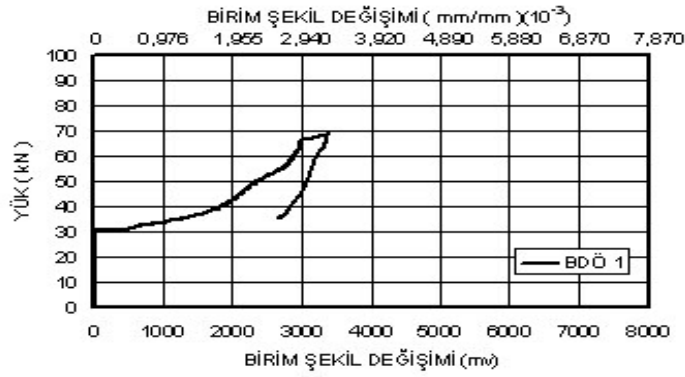
43,5 kN'da sağ kesme açıklığındaki ana kesme atlağı CFRP şeridin altından ilerleyerek tablaya kadar ulaşmıştır. Bu yük düzeyinde orta nokta deplasmanı 9,38 mm olarak ölçülmüştür. Bu yük düzeyinde 3 numaralı birim deformasyon ölçerdeki birim uzama değerinde hızla artış gözlemlenmiştir. Yüklemenin devam edilmesiyle sağ ve sol kesme açıklığındaki tüm eğik çatlaklar kiriş tablası ulaşmıştır. 50 kN yükten itibaren 2 numaralı birim deformasyon lerden alınan birim uzama değerinde hızla artış başlamıştır. 67,5 kN'da sol kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı zerindeki CFRP şeritte kiriş yüzeyi ile tablanın keşiştiği köşeden soyulmaya başlamıştır. 69,04 kN yükte 19,8 mm orta nokta deplasman değerinde sol kesme açıklığındaki CFRP şeridin yüzeyden soyulmasıyla kesme çatlağı hızla genişlemiş ve kiriş kesme kırılması sonucu göçmüştür. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması Resim 4.6'da verilmiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.7'de verilmiştir. CFRP şeritlerde en büyük birim deformasyon değerine ana kesme çatlağının üzerinde bulunan 2 numaralı CFRP şeritte 0,0048 mm/mm ölçülmüştür. 4, 5, 7 ve 8 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,00030-0,0025 mm/mm arasında değişmiştir.



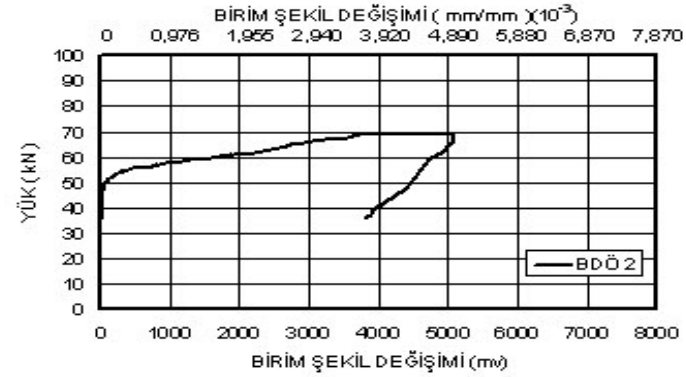
Resim 4.6. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması



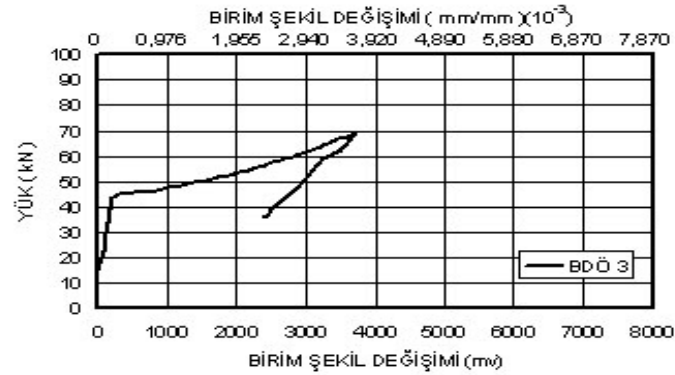
Resim 4.7. Göçmeden sonra, deney elemanı



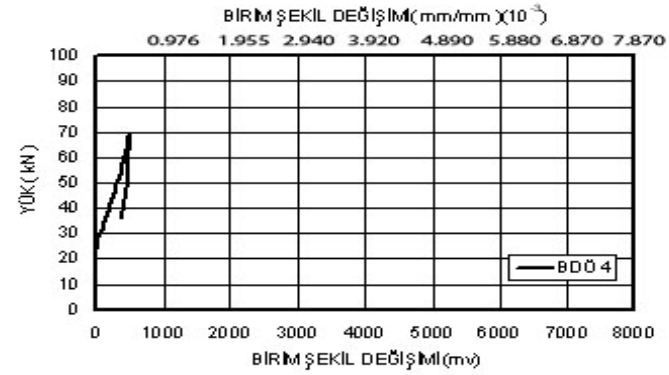
a)



b)



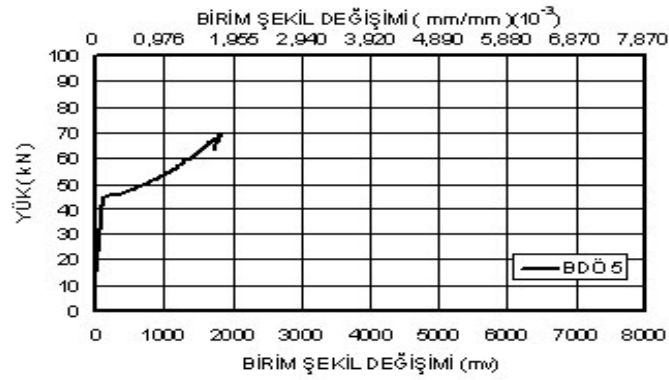
c)



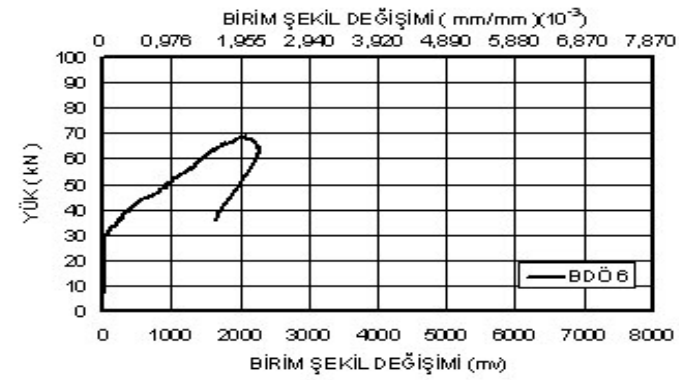
d)

Şekil 4.7. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 4

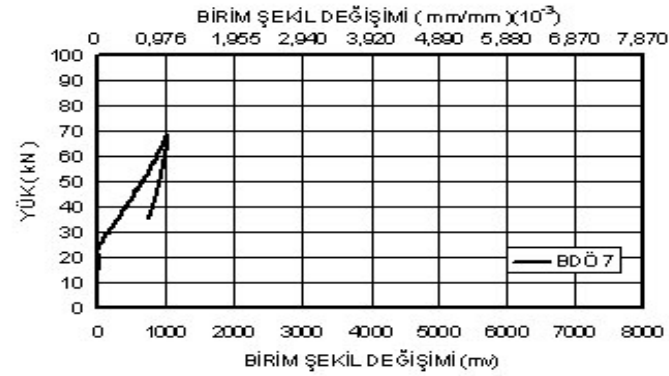
- a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3,
d) Birim deformasyon ölçer 4



e)



f)



g)



h)

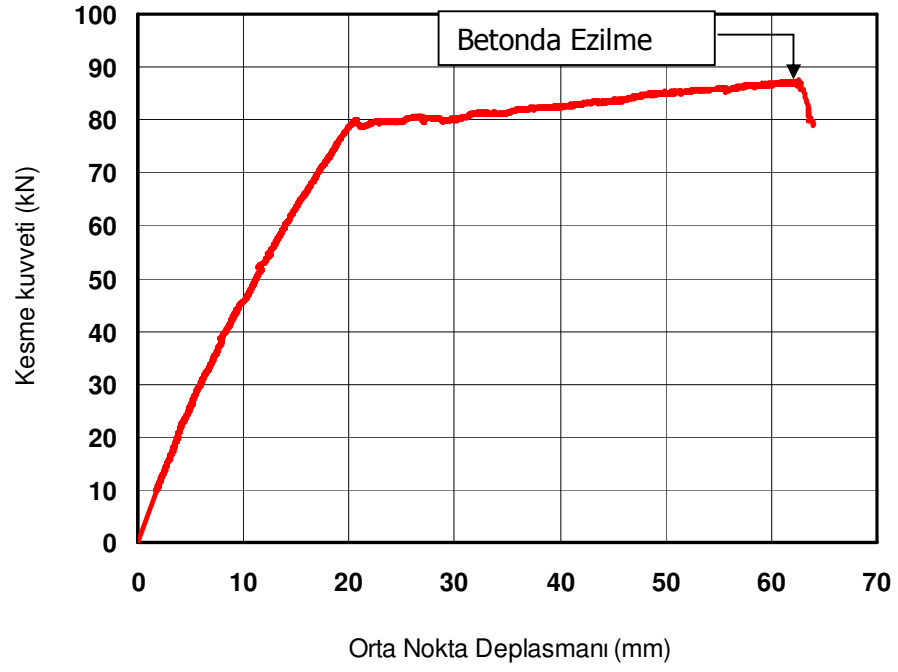
Şekil 4.7 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 4

e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7,
h) Birim deformasyon ölçer 8

4.5. Deney Elemanı 5

Eksenleri arasında 125 mm mesafe olan CFRP şeritlerin uçları ankraj kullanılarak güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir.

Deney Elemanında 22,7 kN yükte ilk eğilme çatlağı sabit moment bölgesinde oluşmuştur. Bu yük düzeyindeki orta nokta deplasmanı 4,0 mm ölçülmüştür. Bu yük düzeyinde 2, 3, 5, 8 numaralı birim deformasyon ölçerlerde birim deformasyon artışı gözlenmiştir. 32 kN yükte 2 numaralı birim deformasyon ölçerde birim deformasyon değeri 0,001 mm/mm ölçülmüştür. 46 kN yükte sağ kesme açıklığında ilk kılcal kesme çatlağı oluşmuştur. 50 kN yükte 3 ve 7 numaralı birim deformasyon ölçerlerde birim deformasyon değerleri hızla artmıştır. Yükün artmasıyla şeritler arasındaki eğik çatlakların sayısında artış gözlenmiştir. 67,5 kN yükte eğik çatlaklar şeritlerin altından geçerek kiriş tablasına ulaşmıştır. Bu yük düzeyindeki orta nokta deplasmanı ise 16,30 mm ölçülmüştür. Bu yük düzeyinde CFRP şeritlerde herhangi bir bozulma veya kiriş yüzeyinden soyulma gözlenmemiştir. 79,43 kN yükte 20,70 mm deplasman değerinde kiriş eğilme kapasitesine ulaşmış, ana çekme donatısı akmıştır. 87,30 kN'da sabit moment bölgesinde kiriş tablasındaki beton, basınç gerilmeleri altında ezilerek göçmüştür. Deney elemanının tabla betonundaki ezilme Resim 4.8'de verilmiştir. Deney elemanı sünek eğilme davranışı sergilemiştir. Göçme anındaki orta nokta deplasman değeri 64 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.9'da verilmiştir. CFRP şeritlerde maksimum birim deformasyon 3, 8 ve 9 numaralı birim deformasyon ölçerlerde 0,0055 mm/mm oluşmuştur. 1, 2, 4, 5, 6, 7 ve 10 numaralı deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,0035-0,0050 mm/mm arasında ölçülmüştür.



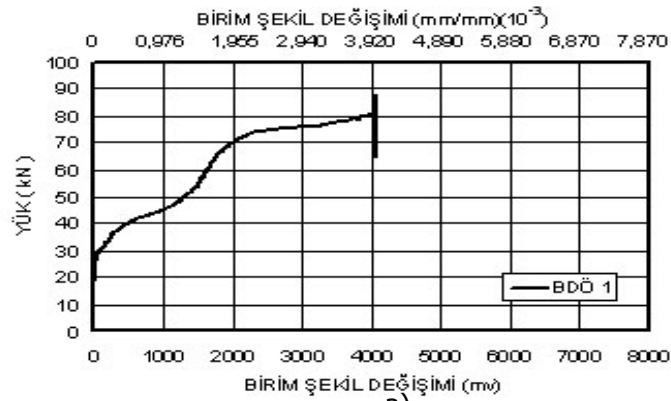
Şekil 4.8. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 5



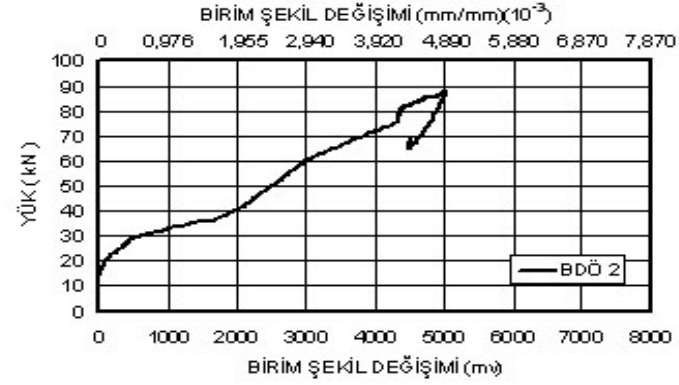
Resim 4.8. Tabla betonunda ezilme, Deney elemanı 5



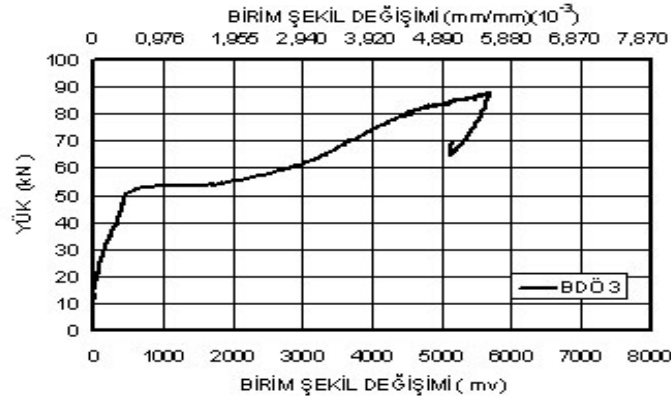
Resim 4.9. Göçmeden sonra, deney elemanı 5



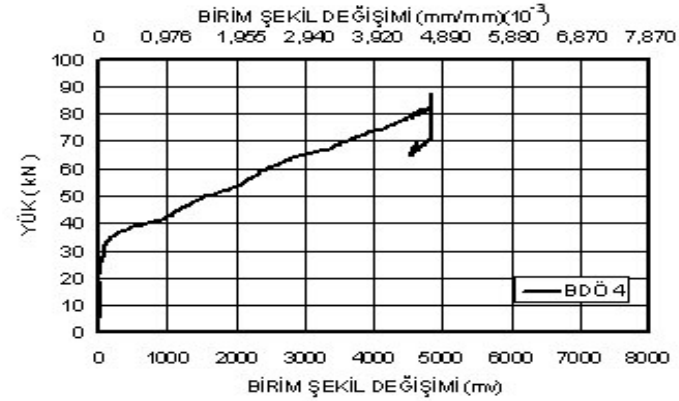
a)



b)



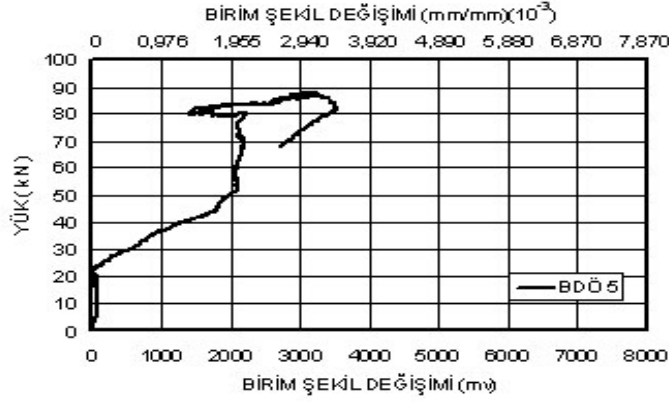
c)



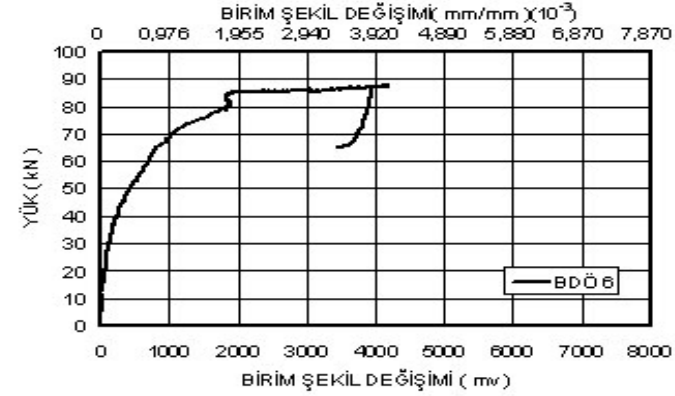
d)

Şekil 4.9. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5

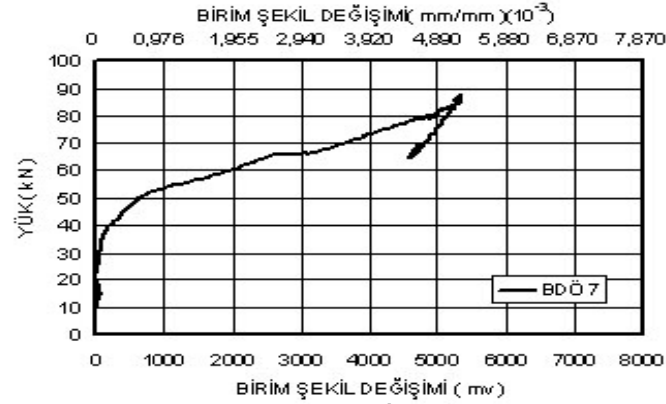
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



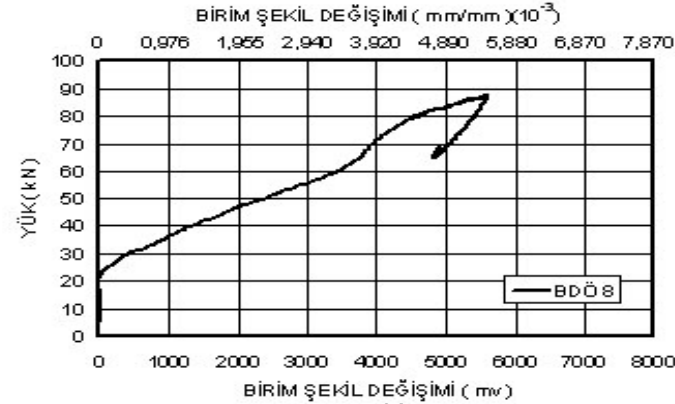
e)



f)



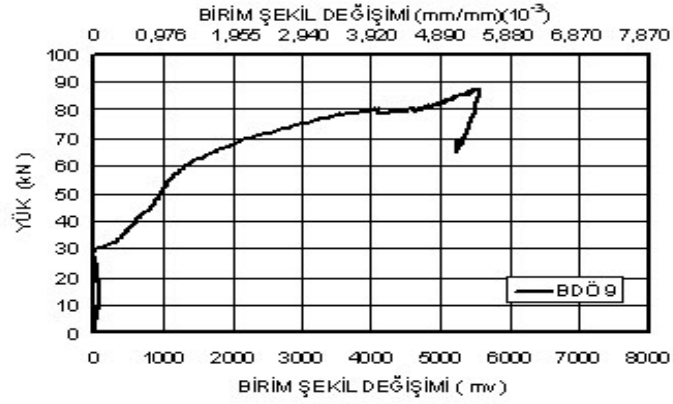
g)



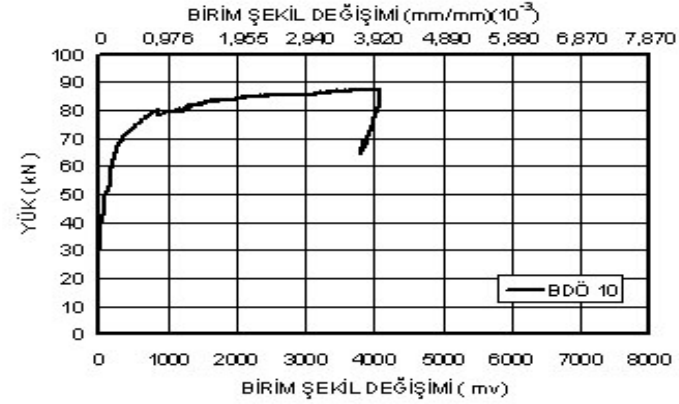
h)

Şekil 4.9 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5

e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7,
h) Birim deformasyon ölçer 8



i)



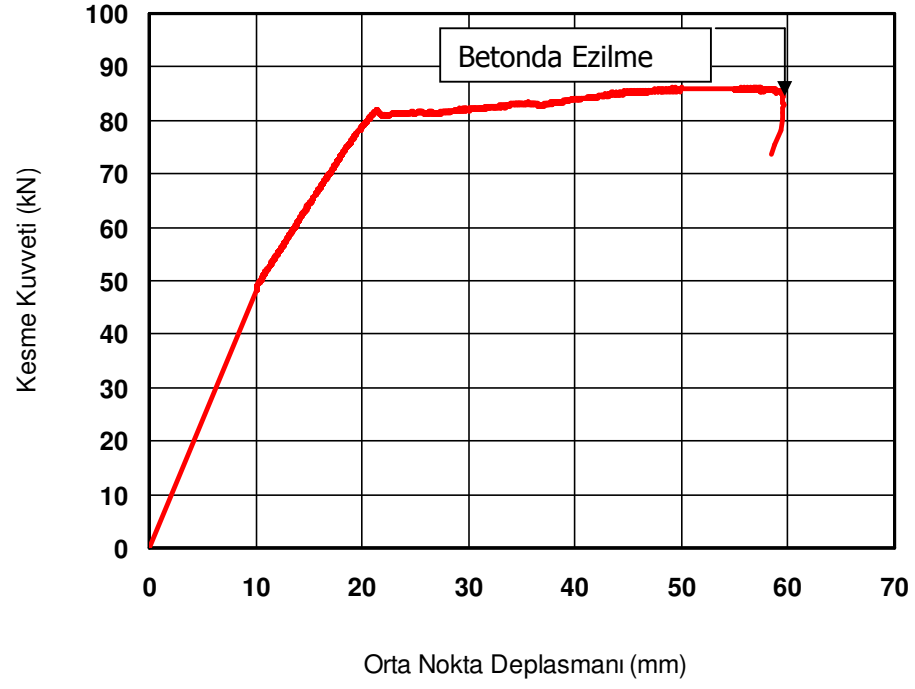
j)

Şekil 4.9 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5
i) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10

4.6. Deney Elemanı 6

Eksenleri arasında 150 mm mesafe olan CFRP şeritlerin uçları fan ankrajı kullanılarak güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir.

Deney elemanında 20,70 kN yükte 3,70 mm orta nokta deplasman değerinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Yükün artmasıyla eğilme çatlakları sayısında artış gözlenmiştir. 34 kN yükte 8 mm orta nokta deplasman değerinde sağ kesme açıklığında ilk eğik çatlak oluşmuştur. Yüklemenin devam etmesiyle eğik çatlaklar, şeritler arasında artış göstermiştir. Ancak eğik çatlaklar CFRP şeritleri geçememiştir. 48 kN yükte eğik çatlaklar şeritler altından geçerek kiriş tablasına ulaşmıştır. Birim deformasyon ölçerlerde 50 kN yük düzeyine kadar deformasyon değeri 0,001 mm/mm'i geçmemiştir. Bu yük düzeyinden sonra birim deformasyonlarda hızla artış gözlemlenmiştir. 81,27 kN ve 22 mm deplasman değerinde ana çekme donatısı akma kapasitesine ulaşmıştır. Bu yük düzeyinde şeritlerde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. 85,80 kN yük, 59,5 mm deplasman değerinde beton basınç bölgesindeki tabla betonunun ezilmesi sonucu kiriş göçmüştür. Kiriş tablasında oluşan beton ezilmesi Resim 4.10'da verilmiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.11'de verilmiştir. Kiriş sünek eğilme davranışı sergilemiştir. CFRP şeritlerde maksimum birim deformasyon 3 numaralı birim deformasyon ölçerde 0,0058 mm/mm oluşmuştur. 2, 4, 10 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon 0,0056 mm/mm ölçülmüştür. 1 numaralı birim deformasyon ölçerde maksimum birim deformasyon 0,005 mm/mm ölçülmüştür. 6, 7, 8 ve 9 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum deformasyon değerleri 0,0030-0,0040 mm/mm arasında değişmiştir.



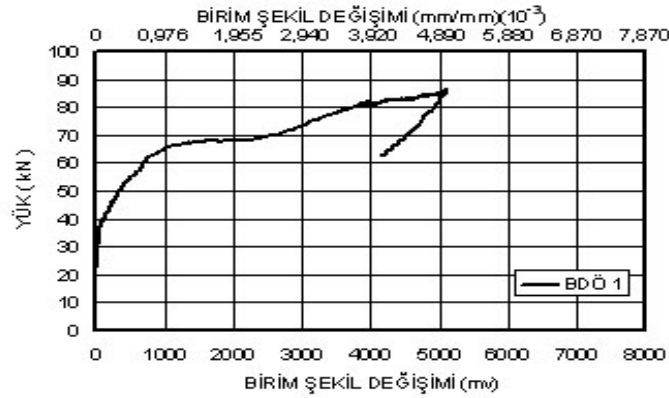
Şekil 4.10. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 6



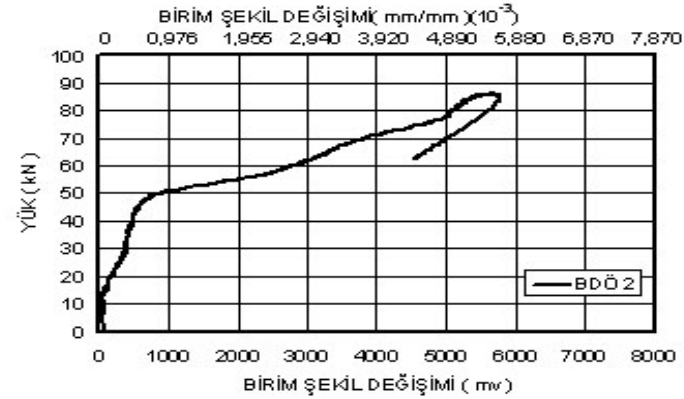
Resim 4.10. Tabla betonunda ezilme, Deney elemanı 6



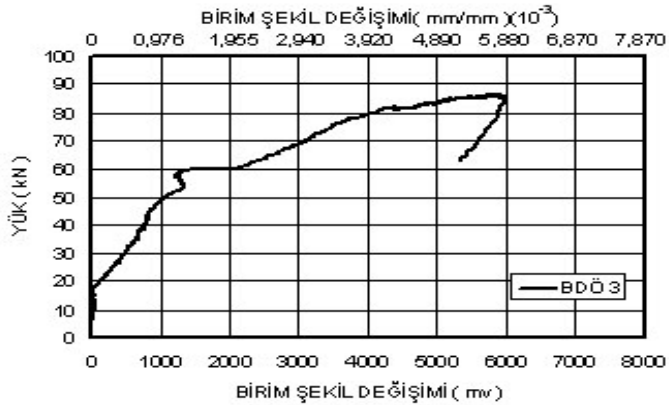
Resim 4.11. Göçmeden sonra, deney elemanı 6



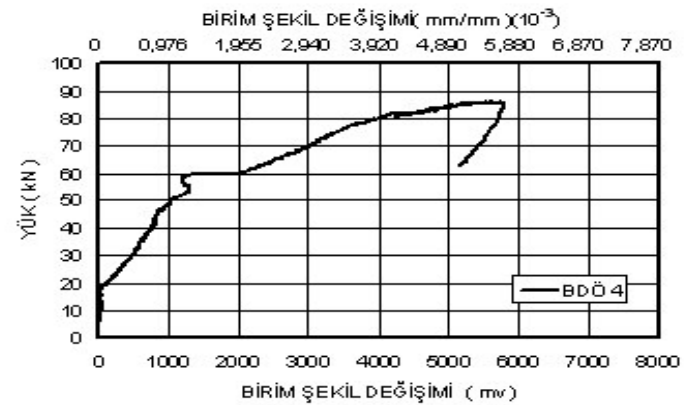
a)



b)



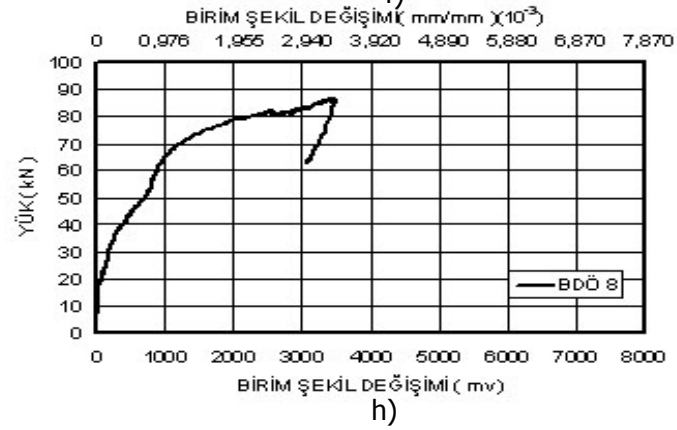
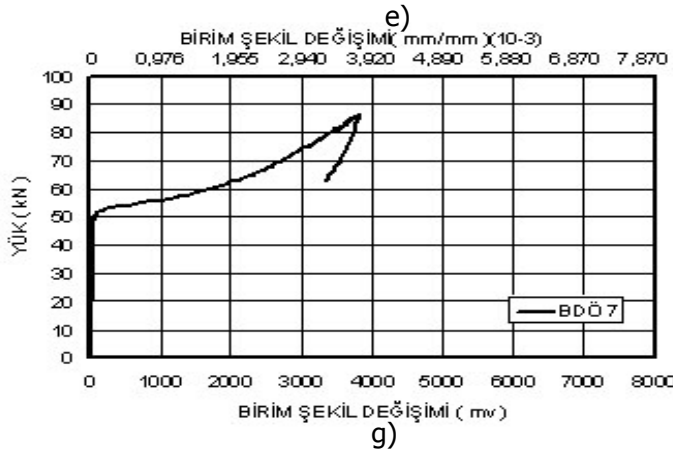
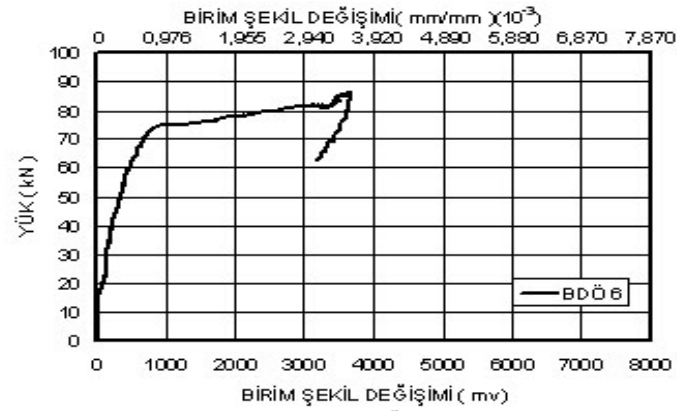
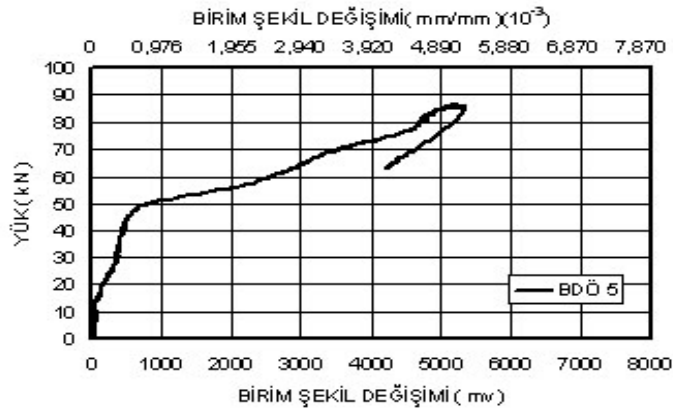
c)



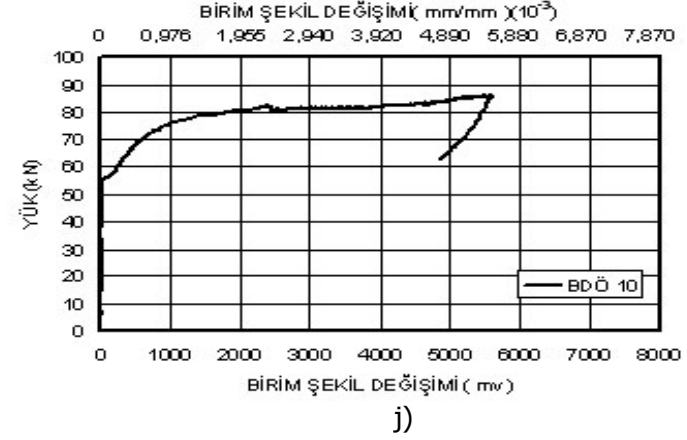
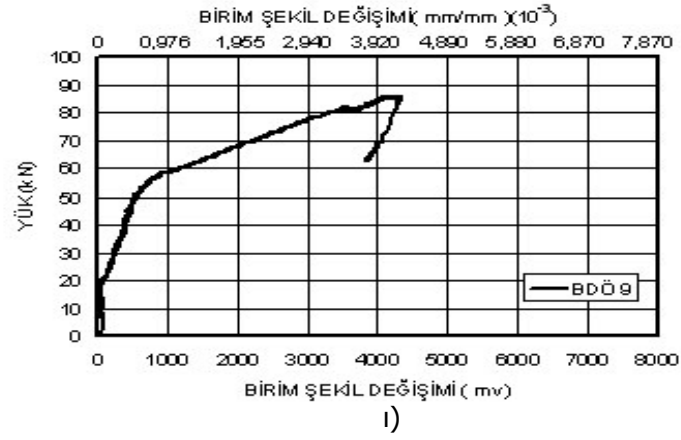
d)

Şekil 4.11. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6

a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



Şekil 4.11 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7,
h) Birim deformasyon ölçer 8

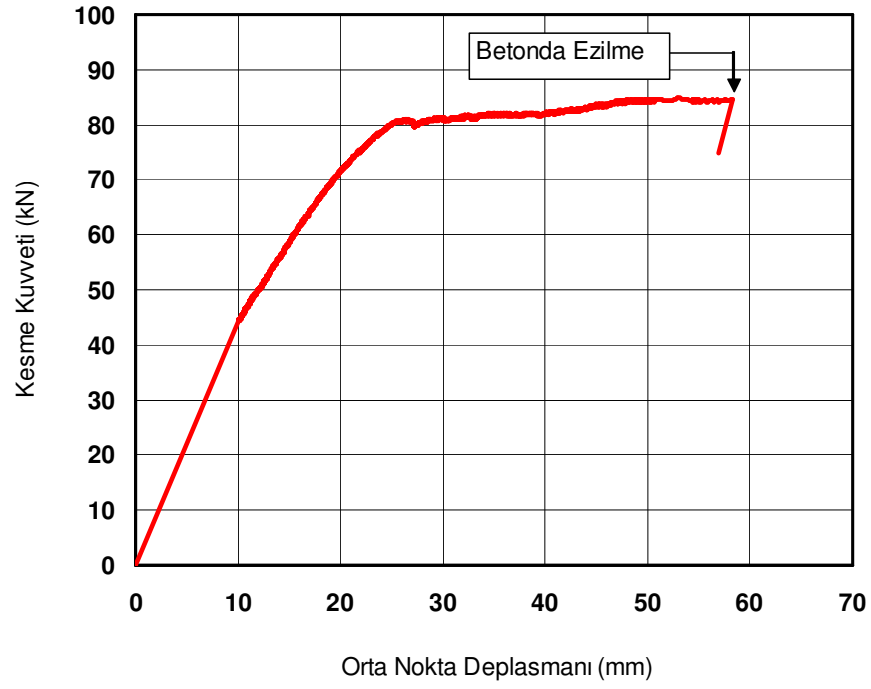


Şekil 4.11 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6
 ı) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10

4.7. Deney Elemanı 7

Eksenleri arasında 200 mm mesafe olan CFRP şeritlerin uçları fan ankrajı yapılarak güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.13'de verilmiştir.

Deney elemanında 18,4 kN yükte 3,30 mm orta nokta deplasman değerinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Yükün artmasıyla eğilme çatlakları sayısında artış gözlenmiştir. 40 kN yükte 9,00 mm orta nokta deplasman değerinde sağ kesme açıklığında ilk eğik çatlak oluşmuştur. Bu yük düzeyinde tüm birim deformasyon ölçerlerdeki birim deformasyon değerleri 0,001 mm/mm'nin altındadır. Bu yük düzeyinden itibaren 6 ve 8 numaralı birim deformasyon ölçerlerde hızlı artış gözlemlenmiştir. Yüklemenin devam etmesiyle eğik çatlaklar şeritler arasında artış göstermiştir. Ancak CFRP şeritleri geçememiştir. 50 kN'da eğik çatlaklar CFRP şeritlerin altından geçerek tablaya ulaşmıştır. Bu yük düzeyinde 2 ve 7 numaralı birim deformasyon ölçerlerde hızlı artış olmuştur. 80,62 kN ve 25,70 mm deplasman değerinde ana çekme donatısı akma kapasitesine ulaşmıştır. Bu yük düzeyinde şeritlerde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. 84,50 kN yük düzeyinde 58,70 mm deplasman değerinde beton basınç bölgesindeki betonun ezilmesi sonucu kiriş göçmüştür. Deney elemanının tabla betonunda oluşan beton ezilmesi Resim 4.12'de verilmiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.13'de verilmiştir. Kiriş sünek eğilme davranışı sergilemiştir. CFRP şeritlerde maksimum birim deformasyon 2 numaralı deformasyon ölçerde 0,0071 mm/mm oluşmuştur. 1, 6, 7 ve 8 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,0052-0,0058 mm/mm arasında ölçülmüştür. 4, 5 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum deformasyon değerleri 0,0018-0,0025 mm/mm arasında değişmiştir.



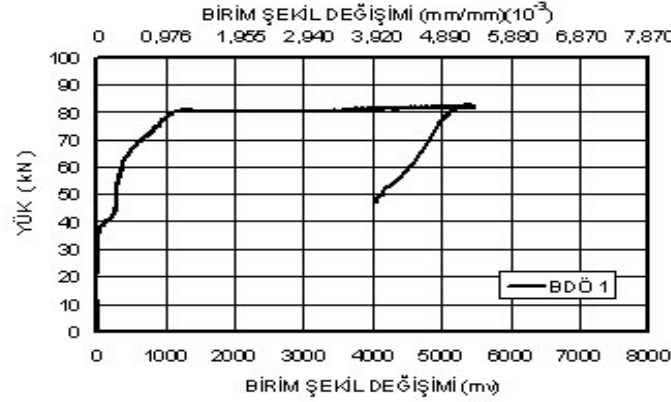
Şekil 4.11. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 7



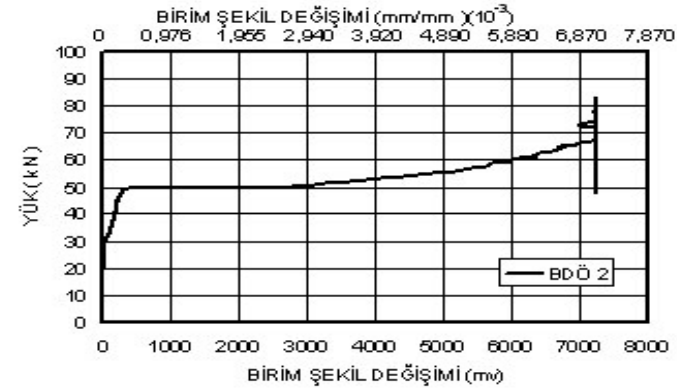
Resim 4.12. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 7



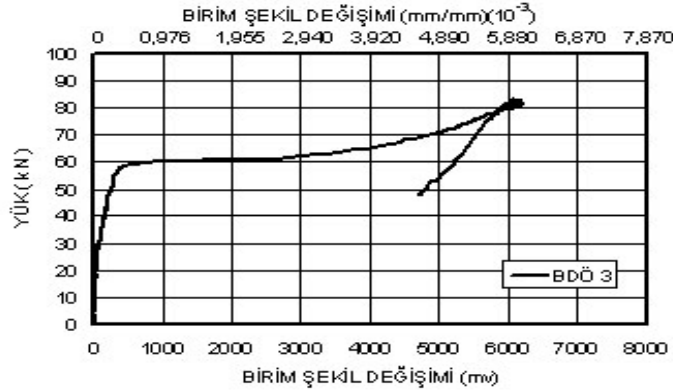
Resim 4.13. Göçmeden sonra, deney elemanı 7



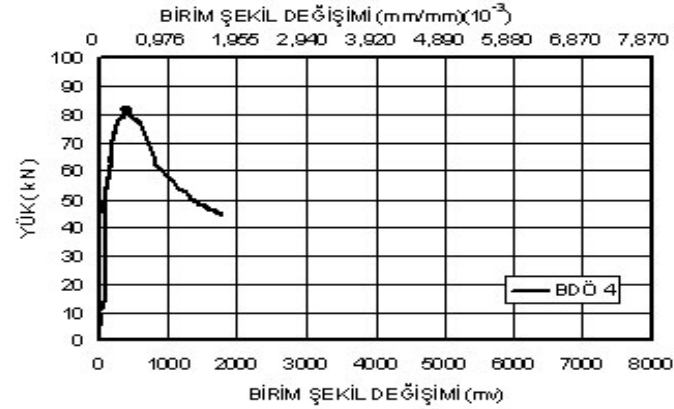
a)



b)



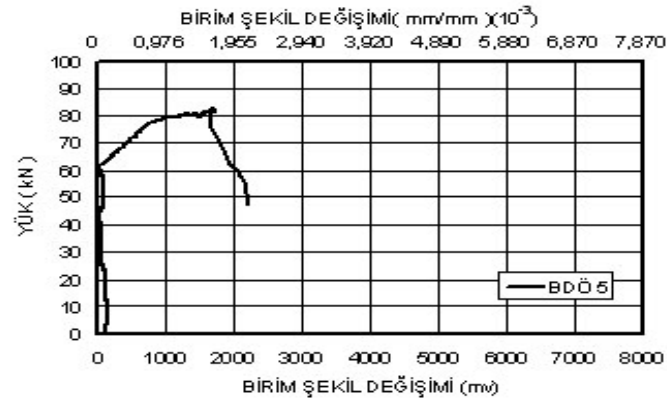
c)



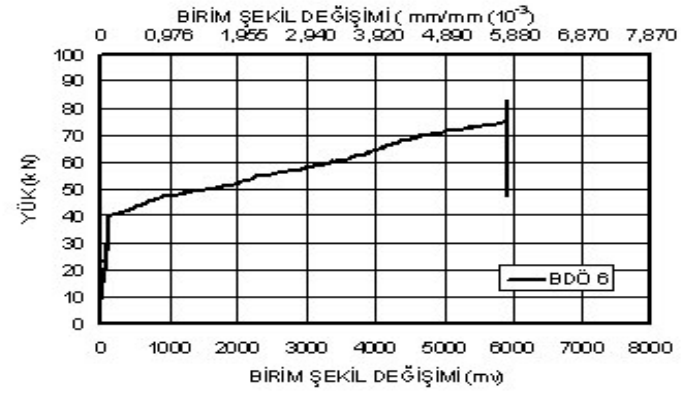
d)

Şekil 4.12. Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7

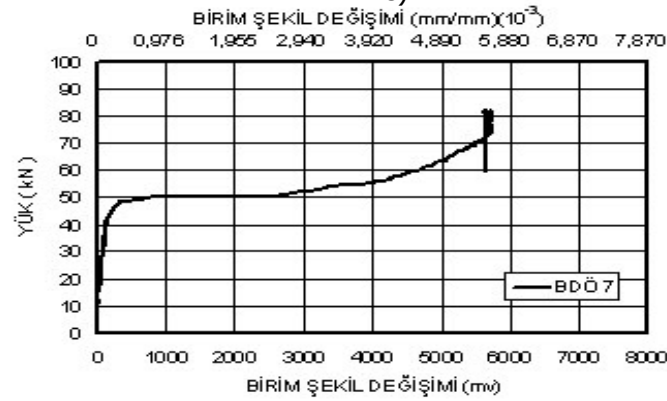
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



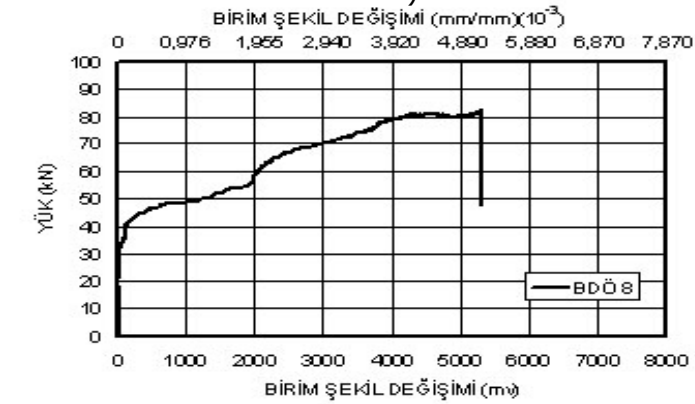
e)



f)



g)



h)

Şekil 4.13 (Devam). Yük-birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7

e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7,
h) Birim deformasyon ölçer 8

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe ve fan ankrajı uygulamasının deney elemanlarının kesme dayanımları, rijitlikleri, süneklikleri ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, testler sırasında deney elemanlarının davranışları karşılaştırılarak tartışılmıştır. Değerlendirmeler deney elemanlarından alınan verilerle oluşturulan yük-deplasman ve CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyon değerleri kullanılarak elde edilen yük-birim deformasyon grafiklerinden yararlanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları ile ABYYHY 2007 (Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında yönetmelik), ACI 318 (American Concrete Institute) ve ACI 440 (American Concrete Institute) yönetmeliklerinde verilen kesme dayanımı eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplama sonuçları karşılaştırmıştır [15, 16, 17]. Deney elemanlarının Bölüm 4'te detayları ile verilen test anlatımları test sonuçları olarak Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

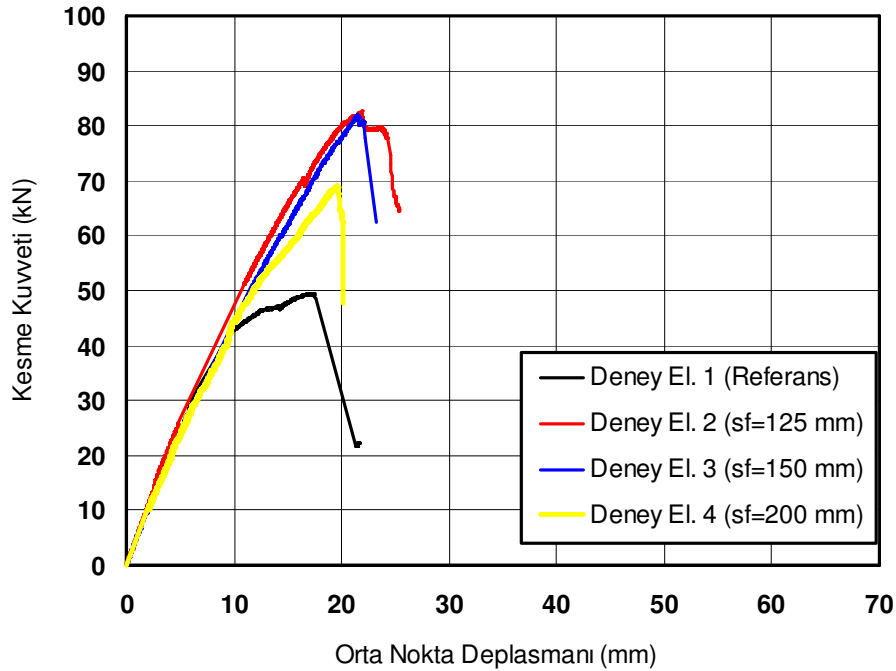
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti

Deney Elemanı No	İlk Eğilme Çatlağı Yüğü (kN)	İlk Kesme Çatlağı Yüğü (kN)	Akma Yüğü (kN)	Akma Yüğündeki Deplasman (mm)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğündeki Deplasman (mm)	Göçme Mekanizması
1(Referans)	20,10	37,00	-	-	49,51	17,00	Kesme
2 (Güçlendirme)	21,00	39,00	-	-	82,55	21,96	Kesme
3 (Güçlendirme)	19,10	43,00	-	-	81,20	21,50	Kesme
4 (Güçlendirme)	23,80	33,00	-	-	69,04	19,80	Kesme
5 (Güçlendirme)	22,70	46,00	79,43	20,70	87,30	64,00	Eğilme
6 (Güçlendirme)	20,70	34,00	81,27	22,00	85,80	59,50	Eğilme
7 (Güçlendirme)	18,40	40,00	80,62	25,70	84,50	58,70	Eğilme

5.1. Deney Elemanlarının Davranışı

Güçlendirilen deney elemanlarında, CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe ve şerit uçlarında ankraj uygulamasının kirişlerin davranışı üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için yük-deplasman grafikleri gruplandırılarak Şekil 5.1-5.5'te verilmiştir. Deney elemanlarının davranışları gruplanan bu grafikler yorumlanarak birbirleri ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

Ankajsız CFRP şeritler ile güçlendirilen deney elemanları 2, 3 ve 4'ün yük-deplasman grafikleri referans deney elemanının (deney elemanı 1) yük-deplasman grafiği ile birlikte Şekil 5.1'de verilmiştir. Verilen bu grafikte üç farklı aralıklı ($s_f=125$ mm, 150 mm ve 200 mm) ankajsız CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının davranışları hem birbirleriyle, hem de referans elemanı ile karşılaştırılmıştır.



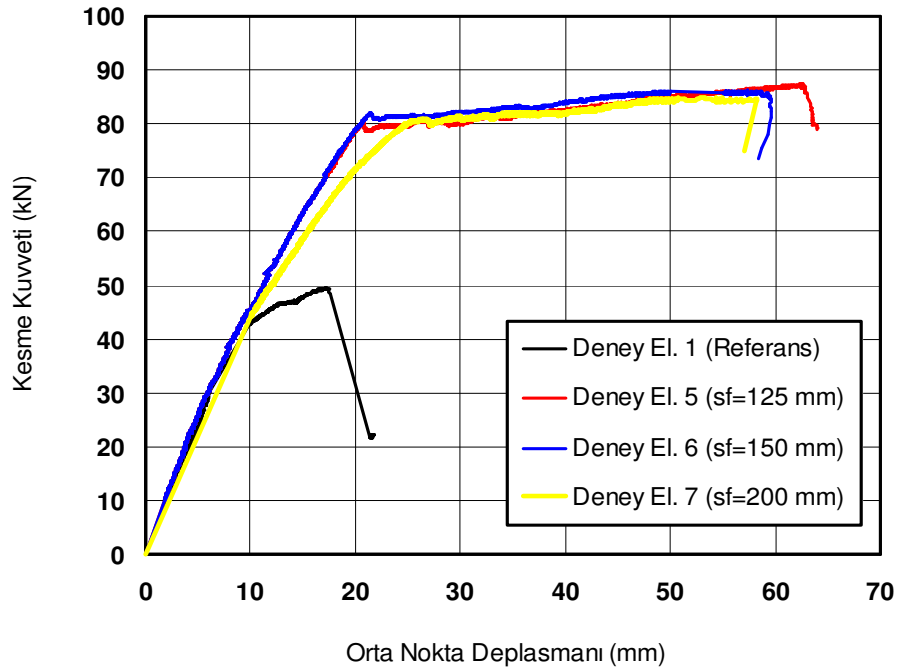
Şekil 5.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3 ve 4 (Ankajsız şerit aralıklarının karşılaştırılması)

Referans deney elemanı, güçlendirilen 2, 3 ve 4 nolu deney elemanları ile birlikte 43 kN yük düzeyine kadar yaklaşık aynı rijitlikle deformasyon

yapmışlardır. Bu yük düzeyinden sonra referans elemanı kesme kuvveti taşıma kapasitesini hızla kaybederek kesmeden göçmüştür. Referans deney elemanının kesme kuvveti taşıma kapasitesi 49,51 kN ve bu yükte ölçülen kiriş orta nokta deplasmanı 17 mm'dir. CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanları şeritlerin kesme çatlaklarını kontrol etmedeki başarıları ölçüsünde bir davranış sergilemişler ve referans deney elemanından daha büyük kesme kapasitesine ulaşmışlardır.

43 kN kesme kuvvetinden sonra şerit eksen aralığı 200 mm olan deney elemanı 4'ün rijitliği güçlendirilen diğer deney elemanlarına göre artan kesme kuvveti altında önemli oranlarda azalmıştır. Bu deney elemanında maksimum kesme kuvveti kapasitesi 69,04 kN ve bu yükte ölçülen kiriş orta nokta deplasmanı 19,80 mm'dir. Bu deney elemanı referans deney elemanından %39 daha büyük kesme dayanımı sergilemiştir. CFRP şerit eksenleri arasında 125 mm ve 150 mm mesafelerle kesmeye karşı güçlendirilmiş deney elemanları 2 ve 3 benzer rijitlikle yaklaşık aynı kesme kuvveti altında kesmeden göçmüşlerdir. Her iki deney elemanında çekme donatıları akma sınırına erişmiştir. Göçme yük düzeylerinde deney elemanı 2'nin orta nokta deplasmanı 21,96 mm, deney elemanı 3'ün orta nokta deplasmanı 21,50 mm ölçülmüştür. Deney elemanları 2 ve 3 göçmede, eksenleri arasında 200 mm mesafeyle güçlendirilen deney elemanı 4'den daha büyük kesme kapasitesine ve daha büyük deplasman değerine ulaşmışlardır. Deney elemanları 2 ve 3 göçmeye kadar yaklaşık aynı rijitlikle benzer davranış sergilemişler ve referans elemanından ortalama %65, deney elemanı 4'ten %20 daha fazla kesme dayanımı elde edilmiştir.

Ankrajlı CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanları yetersiz kesme donatılı kirişlerin kesme dayanımlarını artırmasına rağmen sünek eğilme davranışı gelişmesini sağlayamamıştır. Yönetmelik eşitlikleri kullanılarak belirlenen CFRP şerit aralığı ($s_f=125$ mm) kirişte sünek eğilme davranışının gelişmesi için yetersiz kalmıştır.



Şekil 5.2. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 5, 6 ve 7 (Ankrajlı şerit aralıklarının karşılaştırılması)

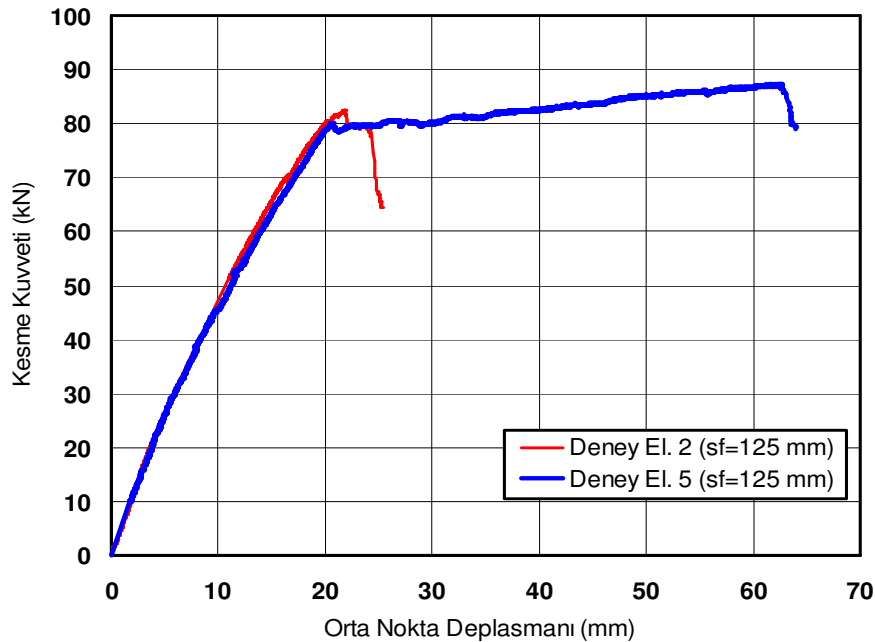
CFRP şerit uçları fan türü ankrajla sabitlenerek güçlendirilen deney elemanları 5, 6 ve 7'nin yük-deplasman grafikleri referans elemanın (deney elemanı 1) yük-deplasman grafiği ile birlikte Şekil 5.2'de verilmiştir. Verilen bu grafikte üç farklı aralıkta ($s_f=125$ mm, 150 mm ve 200 mm) CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının davranışları hem birbirleriyle, hem de referans elemanı ile karşılaştırılmıştır.

Deney elemanları 5, 6 ve 7, 43 kN yük düzeyine kadar referans elemanı ile yaklaşık aynı rijitlikte deformasyon yapmışlardır. CFRP şeritlerin uçları fan ankraji kullanılarak kirişe sabitlenerek güçlendirilen bu deney elemanlarının çekme donatıları akma kapasitesine erişmişlerdir. Deney elemanlarının çekme donatıları akma dayanımına eriştikten sonra büyük deplasmanlar yapmışlar, sünek eğilme davranışı sergilemişlerdir.

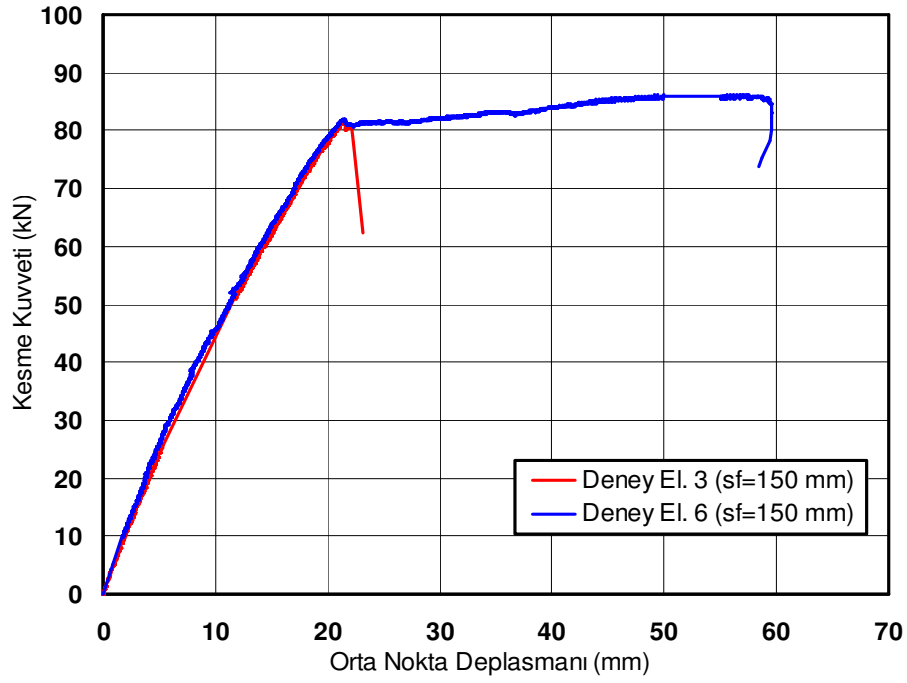
43 kN yük düzeyinden sonra deney elemanları 5 ve 6 benzer rijitlikle akma yüküne ulaşmışlardır. Deney elemanları 5 ve 6'nın akma yükü değerlerindeki

kiriş orta nokta deplasmanları ortalama 21,48 mm ölçülmüştür. Deney elemanı 7'nin rijitliği 43 kN yük düzeyinden itibaren deney elemanları 5 ve 6'ya göre daha fazla azalarak 25,70 mm orta nokta deplasman değerinde akma dayanımına ulaşmıştır. Akma yük düzeylerinde deney elemanı 7'nin deney elemanları 5 ve 6'dan fazla orta nokta deplasmanı yapmasının nedeni CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafenin artmasından dolayı çekme donatısı akma yüküne erişinceye kadar eğik çatlakların sayısının ve çatlak genişliklerinin diğer deney elemanlarından fazla olmasıdır.

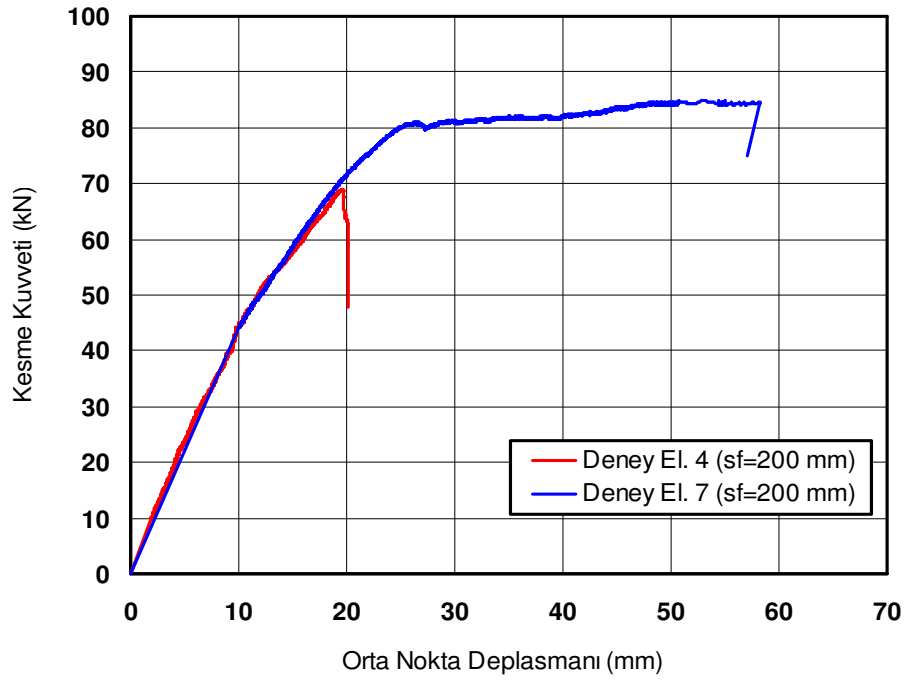
Deney elemanları 5, 6 ve 7'nin çekme donatıları akma yüküne eriştikten sonra sünek eğilme davranışı sergilemişler ve tabla betonlarında gelişen ezilme sonucu göçmüşlerdir. Geliştirilen fan ankrajları CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiştir. Göçme yük düzeylerinde deney elemanı 5 64 mm, deney elemanı 6 59,50 mm, deney elemanı 7 58,70 mm orta nokta deplasmanı yapmıştır.



Şekil 5.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2 ve 5 (Ankrajın etkisi)



Şekil 5.4. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 3 ve 6 (Ankrajın etkisi)



Şekil 5.5. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 4 ve 7 (Ankrajın etkisi)

Şekil 5.3'te şerit eksenleri arasında 125 mm mesafe olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri, Şekil 5.4'te şerit eksenleri arasında 150 mm mesafe olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri, Şekil 5.5'te şerit eksenleri arasında 200 mm mesafe olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri verilmiştir. Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te geliştirilen fan ankrajların kiriş davranışı üzerindeki etkisi şerit eksen aralıkları özdeş olan deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Deney elemanları 2 ve 5 akma yük düzeylerine kadar benzer davranış sergilemişlerdir. Akma yükünde deney elemanı 2 CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması sonucu kesmeden göçmüştür. Deney elemanı 5'te uygulanan fan ankrajlar CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiş ve deney elemanı 5 sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür.

Deney elemanları 4 ve 7 69 kN yük düzeyine kadar benzer davranış sergilemişlerdir. 69,04 kN yük düzeyinde deney elemanı 4 kesmeden göçmüştür. Deney elemanı 7'de uygulanan fan ankrajlar kiriş kesme dayanımını %22 artırmış, kiriş çekme donatıları akma yüküne erişmiştir. Deney elemanı 7 sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür.

5.2. Kesme Dayanımı

CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafeler ve uygulanan fan ankrajların deney elemanlarının kesme dayanımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının akma ve göçmede ölçülen dayanım değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları

Deney Elemanı No	Akma Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
1(Referans)	-	49,51
2 (Güçlendirme)	-	82,55
3 (Güçlendirme)	-	81,20
4 (Güçlendirme)	-	69,04
5 (Güçlendirme)	79,43	87,30
6 (Güçlendirme)	81,27	85,80
7 (Güçlendirme)	80,62	84,50

Şerit eksenleri arasında 125 mm ve 150 mm mesafe olan deney elemanları 2 ve 3'ün kesme dayanımı referans elemanının kesme dayanımından ortalama %65 fazla ölçülmüştür. CFRP şeritlerinin eksenleri arasındaki mesafe arttığında güçlendirilen elemanların referans elemanına göre kesme dayanımındaki artış azalmıştır. Şerit eksenleri arasında 200 mm mesafe olan deney elemanı 4'ün kesme dayanımı referans elemanına göre %40 fazla ölçülmüştür. CFRP şeritlerin uçları fan ankrajla sabitlenerek güçlendirilen elemanlarda (deney elemanları 5, 6 ve 7) çekme donatıları akmış ve sünek eğilme davranışı sergileyerek beton basınç bölgesindeki ezilme sonucu göçmüşlerdir. CFRP şerit uçları ankrajlı deney elemanlarının göçme yükleri referans elemanın göçme yüküne göre ortalama %73 artmıştır. Uygulanan fan ankrajı şerit aralılıkları özdeş olan deney elemanı 7'nin göçme yükünü deney elemanı 4'ün göçme yükünden %22 arttırmıştır.

5.3. Rijitlik

Bu bölümde deney elemanlarının rijitlik değerleri (başlangıç rijitliği, akmada rijitlik, göçmede rijitlik) birbirleriyle karşılaştırılmıştır. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafelerin ve uygulanan fan akrajlının deney elemanlarının rijitlikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının testlerinden elde edilen yük-deplasman eğrileri kullanılarak başlangıç rijitliği, akmada rijitlik, göçmede rijitlik olmak üzere üç farklı rijitlik değeri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Rijitlikler elemanların yük deplasman eğrilerinin orijini ile göz önünde bulundurulan yük değerine karşı gelen noktaları birleştiren doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanında test sırasında gözlenen ilk çatlağın olduğu yükün bu yük altında ölçülen kiriş orta noktası deplasmanına oranı olarak hesaplanmıştır. Akma ve göçme rijitlikleri ise bu yük düzeylerine karşı gelen noktalar ile orijini birleştiren doğruların eğimi olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarının rijitlik değerleri ve başlangıç rijitliğine göre akma ve göçme rijitliklerinin azalımı Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney elemanlarında rijitlikler (kN/mm)

Deney Elemanı No	Başlangıç Rijitliği	Akmada Rijitlik	Göçmede Rijitlik	Rijitlik Azalımı(%)	
				Akmada	Göçmede
1	4,67	-	2,91	-	38
2	5,52	-	3,75	-	32
3	5,45	-	3,77	-	31
4	5,16	-	3,46	-	32
5	5,68	3,83	1,36	32	76
6	5,59	3,69	1,44	34	74
7	5,57	3,13	1,44	43	74

CFRP şeritlerle ankrajsız güçlendirilen deney elemanlarının rijitlik değerleri (başlangıç rijitliği ve göçme rijitliği) referans elemanının rijitlik değerlerine

(başlangıç rijitliği ve göçme rijitliği) göre artmıştır. Deney elemanları 2, 3, 5 ve 6'da bir kesme çatlağı etkin 2 adet CFRP şerit ile kontrol edilirken, deney elemanları 4 ve 7'de bir kesme çatlağı etkin 1 adet CFRP şeritle kontrol edilmiştir. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafenin artmasıyla referans elemanının rijitlik değerlerine göre güçlendirilen deney elemanlarının rijitlik değerleri artış azalmıştır.

Başlangıç rijitlikleri, referans elemanının başlangıç rijitliğine göre deney elemanı 2 ve 3'te ortalama %17, deney elemanı 4'te %10 artmıştır. Göçme rijitlikleri, referans elemanının göçme rijitliğine göre deney elemanı 2 ve 3'te %29, deney elemanı 4'te %19 artmıştır.

Referans elemanının başlangıç rijitliğine göre deney elemanları 5, 6 ve 7'nin başlangıç rijitlikleri ortalama %20 artmıştır. Geliştirilen fan ankrajlar deney elemanları 5, 6 ve 7'nin referans elemanına göre başlangıç rijitliklerindeki artışın, deney elemanları 2, 3 ve 4'ün referans elemanına göre başlangıç rijitliklerindeki artıştan fazla olmasını sağlamıştır. Deney elemanları 5, 6 ve 7'nin göçme rijitlikleri ortalama 1,41 hesaplanmıştır.

5.4. Süneklik

Testlerden elde edilen yük-deplasman eğrileri kullanılarak deney elemanları için deplasman süneklik oranları hesaplanmıştır. Deney elemanlarında süneklik, göçme yükündeki deplasman değerinin akma yükündeki deplasman değerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Deney elemanlarının deplasman süneklik oranları Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deplasman süneklik oranları

Deney Elemanı No	Akmada Deplasman (mm)	Göçme Deplasmanı (mm)	Süneklik Oranları
1	-	17,00	-
2	-	21,96	-
3	-	21,50	-
4	-	19,80	-
5	20,70	64,00	3,09
6	22,00	59,50	2,70
7	25,70	58,70	2,28

Ankrajlı CFRP şeritler ile güçlendirilen deney elemanları kesme kırılması sonucu göçmüştür. CFRP şerit uçlarının ankrajla sabitlenerek güçlendirilen deney elemanları sünek eğilme davranışı sergilemiştir. CFRP şeritler arasındaki mesafe arttıkça deney elemanlarının deplasman süneklik oranları azalmıştır. Süneklik oranları deney elemanı 5'te 3,09, deney elemanı 6'da 2,70 ve deney elemanı 7'de 2,28 hesaplanmıştır. Geliştirilen fan ankraj ve CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe, deney elemanlarının deplasman süneklik oranı üzerinde etkilidir. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe arttırıldığında eğik çatlakları kontrol eden etkin CFRP şerit sayısı azalmıştır. Etkin CFRP şerit sayısının azalmasıyla deney elemanı 7 çekme donatısı akma yüküne erinceye kadar deney elemanları 5 ve 6'dan daha fazla deplasman yapmıştır. Deney elemanı 5'in sünekliği, deney elemanı 6'nın sünekliğinden %14, deney elemanı 7'nin sünekliğinden %35 daha fazla hesaplanmıştır. Deney elemanı 6'nın sünekliği deney elemanı 7'nin sünekliğinden %18 fazla hesaplanmıştır.

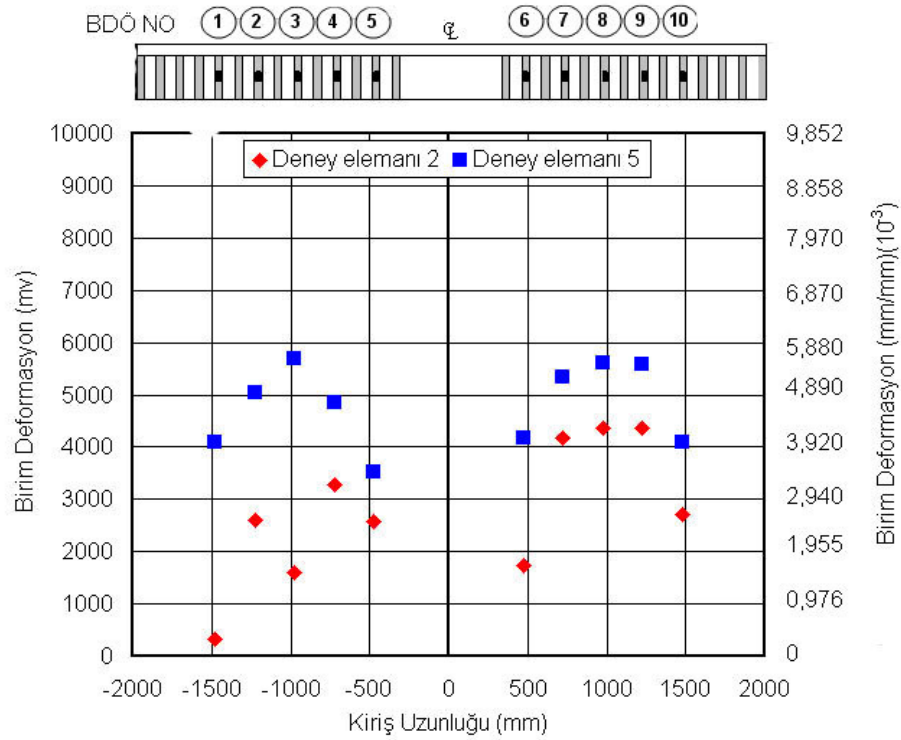
5.5. CFRP Şeritlerde Birim Deformasyonlar

Güçlendirilen deney elemanları 2, 3, 5 ve 6'da CFRP şeritler üzerine 10 adet, deney elemanları 4 ve 7'de CFRP şeritler üzerine 8 adet birim deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden alınan maksimum değerler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Deney elemanlarının testleri sırasında gelişen ana kesme çatlakları üzerindeki CFRP şeritlerden alınan birim deformasyon değerleri Çizelge 5.5'te koyu olarak belirtilmiştir. CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerleri geliştirilen fan ankrajların etkisinin tartışılması için CFRP şerit eksen araklıkları özdeş olan elemanlar gruplandırılarak deney elemanlarının üzerindeki dağılımları Şekil 5.6 - 5.8'de verilmiştir.

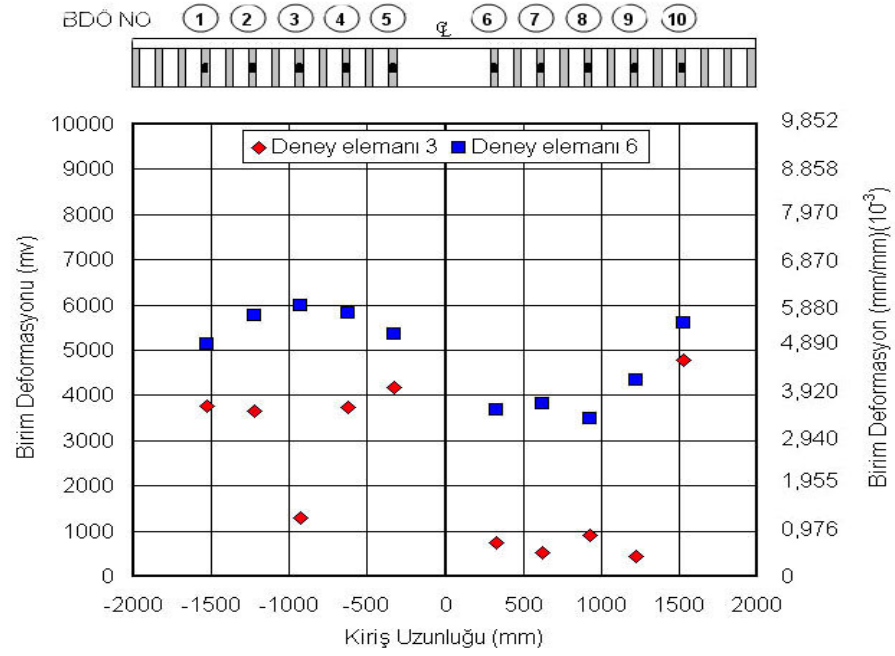
Çizelge 5.5. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri

	Deney Elemanı 2	Deney Elemanı 3	Deney Elemanı 4	Deney Elemanı 5	Deney Elemanı 6	Deney Elemanı 7
B.D.Ö	Maksimum Birim Deformasyon Değeri (mm/mm)					
1	0,00031	0,00360	0,00330	0,00400	0,00500	0,00540
2	0,00250	0,00360	0,00490	0,00480	0,00560	0,00710
3	0,00150	0,00120	0,00290	0,00550	0,00580	0,00610
4	0,00320	0,00360	0,00050	0,00470	0,00560	0,00170
5	0,00250	0,0040	0,00170	0,00340	0,00520	0,00210
6	0,00160	0,00040	0,00210	0,00410	0,00350	0,00580
7	0,00400	0,00046	0,00090	0,00520	0,00370	0,00560
8	0,00420	0,00090	0,00050	0,00550	0,00330	0,00520
9	0,00420	0,00040	-	0,00550	0,00400	-
10	0,00260	0,00460	-	0,00400	0,00560	-

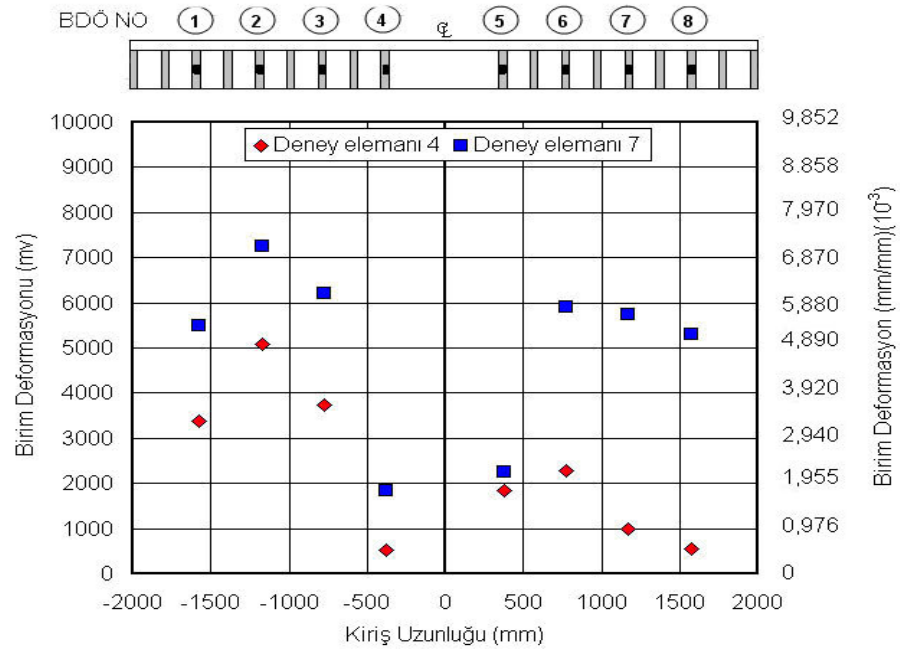
Ankrajlı deney elemanlarında CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerlerinin ortalaması 4738 mv hesaplanmıştır. Bu 0,0045 mm/mm değerine karşı gelmektedir. Yönetmeliklerde CFRP şeritlerin birim uzama değeri sınırı 0,004 mm/mm verilmiştir. Ankrajlı deney elemanlarındaki CFRP şeritlerden ölçülen maksimum birim deformasyonların ortalaması yönetmeliklerdeki sınır koşuldaki %12,5 daha fazla çıkmıştır. Ankrajlı elemanlarda ölçülen maksimum birim deformasyon değerlerinin ortalaması 6113 mv ölçülmüştür. Bu değer 0,0060 mm/mm'ye karşı gelmektedir. Ankrajlı deney elemanlarındaki CFRP şeritlerden ölçülen maksimum birim deformasyonların ortalaması yönetmelikteki sınır koşuldaki %50 daha fazla çıkmıştır.



Şekil 5.6. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 2 ve 5 ($s_f=125$ mm)



Şekil 5.7. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 3 ve 6 ($s_f=150$ mm)



Şekil 5.8. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 4 ve 7 ($s_f=200$ mm)

CFRP şeritler ve uygulanan fan ankrajları kirişte kesme dayanımının artmasını sağlamıştır. Deneylerde uygulanan fan akrajlar CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulmasına engel olmuş ve kirişler sünek eğilme kırılması sonucunda göçmüştür. Ankrajlı deney elemanlarında CFRP şeritlerin üzerindeki birim deformasyon ölçerlerden yönetmeliklerde verilen sınır koşuldanda daha büyük değerler ölçülmüştür. Şerit eksenleri arasındaki mesafenin artmasıyla CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyonlar artmıştır. Çünkü CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe arttığında deney elemanlarında oluşan kesme çatlaklarına karşı gelen etkin CFRP şerit sayısı azalmıştır.

5.6. Kirişte Kesme Dayanımı Hesabı

Yetersiz kesme donatılı deney elemanlarının kesme kırılmasından göçmesini engellemek için yapılan CFRP şeritlerin kesme dayanımı hesabı TS 500, ABYYHY 2007, fib, EC2, ACI 318 ve ACI 440 komite raporunda verilen eşitlikler kullanılarak yapılmıştır [14 - 19]. ABYYHY 2007, CFRP'nin şeritler halinde kullanılması durumunda şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin (s_f), CFRP şerit genişliği ile kiriş faydalı yüksekliğinin dörte birinin toplamını ($w_f+d/4$) geçmemesi, CFRP şeritlerin kirişin çevresinin tamamen sarılması ve en az 200 mm bindirme yapılması koşulu bulunmaktadır. Bu koşula göre çalışmadaki maksimum şeritlerin eksen aralığı 132,5 mm olması gerekmektedir. Deney elemanları 2 ve 5'de bu koşula uygun olarak şerit eksenleri arasında 125 mm belirlenmiştir. Ancak deney elemanları 3 ve 6'da 150 mm, deney elemanları 4 ve 7'de 200 mm şerit eksen aralıkları uygulanarak afet yönetmeliğinin dışındaki değerlerde CFRP şeritlerin kiriş kesme dayanımına katkısı değerlendirilmiştir. Uygulamada mevcut döşeme ve donatılardan dolayı CFRP şeritlerinin kirişin çevresini tamamen sarması zor görünmektedir. Bu nedenle kirişi tamamen sargılamak yerine şerit uçlarının 120 mm uzunluğunda bir kısmı kiriş tablasının altına yapıştırılmıştır. Şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemek için deney elemanları 5, 6 ve 7'de CFRP şerit uçları fan ankrajı kullanılarak sabitlenmiştir. Deney

elemanlarının kesme dayanımları 5.1-5.4 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = V_c + V_s + V_f \quad (5.1)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V = Deney elemanının taşıdığı toplam kesme kuvveti

V_c = Betonun taşıdığı kesme kuvveti

V_s = Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti

V_f = CFRP şeritlerinin taşıdığı kesme kuvveti

Betonun taşıdığı kesme kuvveti Eşitlik 5.2'de verilmiştir.

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c} b_w \cdot d}{6} \quad (\text{ACI 318}) \quad (5.2)$$

$$V_c = 0,65 \sqrt{f_{ctk}} b_w \cdot d \quad (\text{TS 500})$$

$$f_{ctk} = 0,35 \sqrt{f_c} \quad (\text{TS 500})$$

$$V_c = [0,12.k.(100\rho_l.f_c.)^{1/3} - 0,15.N_u / A_c].b_w \cdot d \quad (\text{EC2})$$

Eşitliklerde kullanılan terimler aşağıda verilmiştir

V_c = Betonun taşıdığı kesme kuvveti

f_c = Betonun basınç dayanımı

f_{ctk} = Betonun çekme dayanımı

b_w = Kiriş kesit genişliği

d = Kiriş faydalı yüksekliği

ρ_l = Boyuna donatı oranı

N_u = Beton eksenel kuvveti

A_c = Beton en kesit alanı

Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti Eşitlik 5.3'te verilmiştir.

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (\text{ACI 318, EC2, TS 500}) \quad (5.3)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

- V_s = Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti
 A_v = Kesme donatısı kesit alanı
 f_y = Kesme donatısı akma dayanımı
 s = Etriye aralığı

CFRP şeritlerinin taşıdığı kesme kuvveti eşitlik 5.4.'te verilmiştir.

$$V_f = \frac{2.n_f.t_f.w_f.E_f.\varepsilon_f.d}{s_f} \quad (\text{ABYYHY}) \quad (5.4)$$

$$V_f = \frac{A_{fv}f_{fe}(\sin\alpha + \cos\alpha)d_f}{s_f} \quad (\text{ACI 440})$$

$$A_{fv} = 2.n_f.t_f.w_f$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe}E_f$$

$$V_f = 0.9.\varepsilon_{fd,e}.E_{fu}.\rho_f.b_w.d(\cot\Phi + \cot\alpha).Sina \quad (\text{fib})$$

$$\rho_f = \frac{2.t_f.b_f}{b_w.s_f}$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

- V_f = CFRP şeritlerin taşıdığı kesme kuvveti
 A_{fv} = CFRP şerit enkesit alanı
 f_{fe} = CFRP şerit kopma gerilmesi
 n_f = Tek yüzdeki CFRP tabaka sayısı
 w_f = CFRP şerit genişliği
 E_f = CFRP elastisite modülü
 ε_f = CFRP birim uzaması
 d = Kiriş faydalı yüksekliği
 d_f = CFRP şerit yapışma boyu
 s_f = CFRP şerit aralığı
 b_f = CFRP şerit genişliği (*fib*)
 Φ = Çatlak açısı
 α = Kiriş eksenine ile CFRP şerit yapıştırılma açısı

Betonarme kirişlerin taşıdığı kesme kuvvetinde a/d oranı etkilidir. a/d oranının betonarme kiriş davranışı üzerindeki etkinliği Bölüm 2.1’de verilmiştir. Ancak yönetmeliklerde verilen eşitliklerde a/d oranının kiriş davranışı üzerindeki etkisi göz önünde tutulmamaktadır.

Hesaplamalarda kesme donatılarının kesit alanları 56.54 mm^2 , akma dayanımları 275 Mpa alınmıştır. CFRP şeritler için elastisite modülü 231000 MPa, maksimum birim uzama 0,004 mm/mm olarak alınmıştır. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları

Deney Elemanı	S _r (mm)	Kesme Dayanımı (kN)				Ölçülen Hesaplanan		
		Ölçülen (kN)	Hesaplanan (kN)			ABYYHY & TS 500	ACI 318 & ACI 440	EC2 & fib
			ABYYHY & TS 500	ACI 318 & ACI 440	EC2 & fib			
1	-	49,51	62,15	50,10	48,38	0,79	0,98	1,02
2	125	82,55	91,24	72,59	71,05	0,90	1,14	1,16
3	150	81,20	86,45	68,89	67,30	0,94	1,18	1,21
4	200	69,04	80,62	64,37	62,69	0,86	1,07	1,10
5	125	87,30	91,33	72,66	71,09	0,96	1,20	1,23
6	150	85,80	86,54	68,95	67,34	0,99	1,24	1,27
7	200	84,50	81,51	65,02	63,12	1,04	1,30	1,34

Ankrajlı deney elemanlarında ölçülen kesme dayanımları ACI 318-440'a göre yapılan analitik hesaplamalardan ortalama %13 büyük elde edilmiştir. Ancak ankrajlı deney elemanları için ölçülen kesme dayanımları, ABYYHY'e göre yapılan analitik hesaplamalardan % 10 küçük elde edilmiştir. ABYYHY'deki beton kesme dayanımı eşitliği ACI'daki beton kesme kuvveti eşitliğinden farklı olduğundan, TS500 - ABYYHY'e göre yapılan hesaplamalar ölçülen kesme dayanımlarından büyük hesaplanmıştır [15, - 17]. Ayrıca ABYYHY'de CFRP şerit kesme kuvveti eşitliğinde kiriş faydalı yüksekliği kullanılmaktadır. ACI 440'da CFRP şerit yapışma boyu kullanılmaktadır. Ankrajlı deney elemanları için Fib - EC2'e göre yapılan analitik hesaplamalar %16 fazla çıkmıştır. CFRP şerit uçları ankrajlı deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları ACI'a göre yapılan analitik hesaplamalardan ortalama %25 fazla ölçülmüştür. Ankrajlı deney elemanları için Fib - EC2'e göre yapılan analitik hesaplamalar %28 fazla çıkmıştır. Deney elemanlarında kullanılan fan ankrajları CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını önlemesi şeritlerin büyük deformasyonlar yapmasını ve CFRP şeritlerin daha fazla kesme kuvveti taşımasını sağlamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada yedi adet yetersiz kesme donatılı deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanı bir güçlendirme yapılmayan referans elemanıdır. Deney elemanları 2, 3 ve 4 yalnız CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Deney elemanları 5, 6 ve 7 CFRP şeritlerinin uçları kiriş yüzeyine geliştirilen fan ankrajlarla sabitlenerek güçlendirilmiştir. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe, deney elemanları 2 ve 5'te 125 mm, deney elemanları 3 ve 6'da 150 mm, deney elemanları 4 ve 7'de 200 mm olarak uygulanmıştır. Deney elemanları 5, 6 ve 7'de CFRP şerit uçları 2 adet fan ankrajla kirişe sabitlenmiştir. Ankrajlar kiriş tablası ile gövde birleşim noktasına düşey doğrultu ile 30^0 ve kiriş tablasından 50 mm mesafede yatay doğrultuda uygulanmıştır. Testlerde deney elemanlarının kesme dayanımı, rijitlik, süneklik, göçme mekanizmaları ve CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyonlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Ankajsız CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında kesme dayanımları artmasına rağmen CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden erken soyulmasıyla kesme kırılmasından dolayı göçmüşlerdir. Referans elemanının kesme dayanımına göre deney elemanları 2 ve 3'ün kesme dayanımları ortalama %65, deney elemanı 4'ün kesme dayanımı %39 artmıştır. CFRP şeritlerin uçları fan ankraji kullanılarak sabitlenen deney elemanlarının göçme modları değişmiş, bu elemanlarda sünek eğilme davranışı gelişmiştir. CFRP şeritlerin uçlarında kullanılan ankrajlarla güçlendirilen deney elemanlarının kesme dayanımları ortalama %73 artmıştır. Deney elemanları akma yükünden sonra göçme yüküne kadar büyük deformasyonlar yaparak basınç bölgesindeki betonun ezilmesi sonucu göçmüştür. Fan ankrajları deney elemanlarının göçme modunun değişmesini ve kesme dayanımının artmasını sağlamıştır.

- CFRP şeritler, güçlendirilen deney elemanlarının başlangıç rijitliklerini artırmıştır. Ankrajsız CFRP şeritlerle güçlendirilen elemanların başlangıç rijitlikleri referans elemanının başlangıç rijitliğine göre, deney elemanları 2 ve 3'te ortalama %17, deney elemanı 4'te %10 artmıştır. CFRP şeritlerin uçları ankrajla sabitlenen deney elemanlarında başlangıç rijitliği referans elemanının başlangıç rijitliğinden ortalama %20 daha büyük elde edilmiştir.
- CFRP şeritlerin uçları ankrajla sabitlenen deney elemanları sünek eğilme davranışı göstermişlerdir. Bu deney elemanlarının süneklik oranları ortalama 2.68 olarak hesaplanmıştır. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe süneklik oranı üzerinde etkili olmuştur. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe arttırıldığında süneklik azalmıştır. Şerit eksen aralığı 125 mm olan deney elemanı, şerit eksen aralığı 150 mm olan deney elemanından %15, şerit eksen aralığı 200 mm olan deney elemanından ise % 35 daha fazla süneklik sergilemiştir.
- Ankrajsız CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında, CFRP şeritlerin maksimum birim deformasyonları yönetmeliklerde verilen 0,004 mm/mm sınır koşuluna yakın değerlerde ölçülmüştür. Şerit uçları ankrajı deney elemanlarında ölçülen maksimum birim deformasyonlar yönetmeliklerde verilen sınır koşuldan %50 daha fazla elde edilmiştir.
- CFRP şeritlerle ankrajsız güçlendirilen deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları ABYYHY'de verilen eşitliklere göre hesaplanan değerlerden %10 büyük hesaplanmıştır. Ankrajsız güçlendirilen deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları, ACI 318 – 440 ve fib- EC2'de verilen eşitliklere göre hesaplanan değerlerden sırasıyla %13 ve %16 büyük çıkmıştır. CFRP şerit uçları ankrajlı deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları ACI'da verilen eşitliklere göre hesaplanan değerlerden %25 fazla elde edilmiştir. Ankrajlı deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları ABYYHY'de verilen eşitliklere göre hesaplanan değerlerle örtüşmektedir.

Şerit uçlarının ankrajla sabitlenmesi kiriş yüzeyinden erken soyulmayı engellemiş ve ölçülen maksimum birim deformasyon değerinin artmasını sağlamıştır.

6.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Kesme donatısı yetersiz kirişlerin CFRP şeritlerle güçlendirilmesi uygulamada kullanılabilir. CFRP şerit uçlarının sabitlenmesi sünek eğilme davranışının elde edilebilmesi için önem taşımaktadır. Uygulamada hassas işçilik yöntemin başarısı için önemli etkindir.
- CFRP şerit uçları tek fan ankrajla kirişe sabitlendiğindeki performansı belirlenmelidir. CFRP şerit uçlarının tek ankrajla sabitlenmesi uygulamada önemli kolaylıklar sağlayacaktır.
- CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden erken soyulmasının engellenmesi için ankraj dışındaki tekniklerde araştırılmalıdır. Şerit uçlarının CFRP kumaşlar yapıştırılarak kiriş yüzeyine sabitlenmesi uygulamada önemli kolaylıklar sağlayacaktır.
- Araştırma kapsamında kullanılan güçlendirme tekniğinin, tersinir tekrarlanır yükler altında performanslarının belirlenmesi gerekmektedir.
- Araştırma kapsamında kullanılan güçlendirme tekniğinin, beton dayanımı düşük kirişler üzerindeki etkinliği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., Özcebe, G., "Betonarme: temel ilkeler, TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine (1998) göre hesap", **Evrım Yayınevi**, İstanbul, 20, 89, 459, 463-468 (2007).
2. Khalifa, A., Nanni, A., "Improving shear capacity of existing RC section beams using CFRP composites", **Cement & Concrete Composites**, 22:165-174 (2000).
3. Khalifa, A., Nanni, A., "Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites" **Construction and Building Materials**, 16: 135 -146 (2002).
4. Akyüz, U., Özdemir, G., "Mechanical properties of CFRP anchorages" **13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver**, Canada, 1-6 (2004).
5. Riyadh, A., Riadh, A., "Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps", **Composite Structures**, 75: 457-464 (2005).
6. Wegian, F.M., Abdalla, H.A., "Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers", **Composite Structures**, 71: 130-138 (2005).
7. Bousselham, A., Chaallal, O., "Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP", **Cement & Concrete Composites**, Part B, 37: 37-46 (2006).
8. Bencardino, F., Spadea, G., Swamy, R.N., "The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates", **Construction and Building Materials**, 1-10 (2006).
9. Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., "Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams", **Cement & Concrete Composites**, 276-292 (2006).
10. Anıl, Ö., "Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load", **Cement & Concrete Composites**, 638-649 (2006).
11. Jayaprakash, J., Samad, A.A.A., Abbasovich, A.A., Abang, A., Abang, A., "Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips", **Construction and Building Materials**, Malaysia, 46-62 (2007).

12. Gyuseon, K., Jongsung, S., Hongseob, O., "Shear strength of strengthened RC beams with FRPs in shear", ***Construction and Building Materials***, 1-10 (2007).
13. Francesca, C., Marisa, P., Stjin, M., Luc, T., "Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets", ***Construction and Building Materials***, 1-10 (2008).
14. TS 500, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 30-32 (2000).
15. 2007 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY), ***Bayındırlık ve İskan Bakanlığı***, Ankara, 130, 150-154 (2007).
16. ACI Committee 440, "State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", ***American Concrete Institute***, Detroit, Michigan; 68 (1996).
17. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99)", ***American Concrete Institute***, Detroit, 369 (1995).
18. Commission of the European Communities, Eurocode No. 2: Design of concrete structures-part 1: ***General rules and rules for buildings***, prEN 1992-1-1 draft, 85, 89 (2002).
19. FIB bulletin, "Externally Bonded FRP Requirement for RC Structures", Technical Report, ***Fédération International du Béton***, France, 14: 60-63 (2001).

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : MERTOĞLU, Çelebi
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 02/10/1984, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 326 79 99
e-mail : cmertoglu84@hotmail.com

Eğitim**Eğitim Birimi****Mezuniyet Tarihi**

Lisans

Kırıkkale
Üniversitesi/
İnşaat Mühendisliği
Bölümü

2006

Lise

Kanuni Lisesi

1998

İş Deneyimi**Yer****Görev**

2006-2007

KRET İNŞAAT

Saha Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce