

**KESME HASARLI BETONARME KİRİŞLERİN
DİYAGONAL CFRP ŞERİTLERLE REHABİLİTASYONU**

Rafet Özgür OCAKLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2009

ANKARA

Rafet Özgür OCAKLI tarafından hazırlanan KESME HASARILI BETONARME KİRİŞLERİN DİYAGONAL CFRP ŞERİTLERLE REHABİLİTASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sinan ALTIN

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği 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

Prof. Dr. Mehmet UTKU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.

Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 27/05/2009

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 bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Rafet Özgür OCAKLI

**KESME HASARLI BETONARME KİRİŞLERİN
DİAGONAL CFRP ŞERİTLERLE REHABİLİTASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Rafet Özgür OCAKLI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mayıs 2009

ÖZET

Betonarme kirişlerin yeterli kesme dayanımına sahip olmadığı durumlarda, dayanım yetersizliğinin giderilmesi için kullanılan tekniklerin bir tanesi de CFRP şeritlerin epoksi ile kiriş yüzeyine yapıştırılmasıdır. Yapılan bu çalışmanın amacı, önceden kesme hasarı verilmiş kirişlerde, oluşan eğik çatlaklara dik yönde yapıştırılacak diyagonal CFRP şeritlerle onarılan kirişlerin performansının deneysel olarak araştırılmasıdır. Bu çalışmada 1/2 ölçekli, kesme açıklığı etkili yüksekliğine oranı 5 olan, 4000 mm uzunluğunda; 1 adet referans, 3 adet fan ankrajsız diyagonal CFRP şeritlerle onarılmış ve 3 adet fan ankrajlı diyagonal CFRP şeritlerle onarılmış kiriş olmak üzere toplam 7 adet kiriş test edilmiştir. Deney elemanlarının davranışları diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafe ve ankraj uygulamasının bulunması değişkenleri yönünden incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler; rijitlik, süneklik ve dayanım bakımından değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Rehabilitasyon yönteminin özellikle ankrajlı deney elemanlarını eğilme davranışına götürdüğü, sünekliğinde ve kesme dayanımında artış sağlandığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 911.1.145
Anahtar Kelimeler : Betonarme Kirişler, Kesme Dayanımı, Diyagonal CFRP Şeritler, Onarım
Sayfa Adedi : 124
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Sinan ALTIN

**REHABILITATION OF SHAER DAMAGED REINFORCED CONCRETE
BEAMS WITH DIAGONAL CFRP**

(M. Sc. Thesis)

Rafet Özgür Ocaklı

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2009

ABSTRACT

Pasting the CFRP strips on the beam surface with epoxy is one of the methods used in the case of poor shear strength of the reinforced concrete beam. The aim of this study is to investigate the performance of the beams by diagonal CFRP strips pasted perpendicular to the inclined cracks on a pre-damaged beam. In this study, 7 beams have been tested as 1 reference beam which has ½ scale, 5 as ratio of shear openness and effective height and 4000 mm length; 3 beams with no fan anchorage and diagonal CFRP strips; 3 beams with fan anchorages and diagonal CFRP strips. Behaviors of the experiment components have been analyzed according to the horizontal distance between the axis' of diagonal CFRP strips and the existence of anchorages. The results of the experiments have been evaluated and argued according to the rigidity, ductility and strength. It has seen that the rehabilitation method makes the anchored beams bent and increase their ductility and shear strength.

Science Code : 911.1.145
Keywords : R.C. Beams, Shear Strenght, Diagonal CFRP Ribbon, Repair
Number of pages : 124
Thesis supervisor : Prof. Dr. Sinan ALTIN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, araştırmamı planlayıp yöneten, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Laboratuvar çalışmalarımda bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Özgür ANIL, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin KARA ve Sayın Uzman Faruk OGÜN'e teşekkür ederim. Ayrıca, hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli arkadaşlarım Sayın İnş. Müh. Tolga TOPTAŞ, Sayın İnş. Müh. Çelebi MERTOĞLU ve Sayın İnş. Yük. Müh. Eray ÖZBEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca ellerinden gelen tüm imkanları bana sunan, beni yönlendiren ve yetiştiren çok kıymetli babam Aziz OCAKLI ve çok kıymetli annem Pakize OCAKLI'ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
RESİMLER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. DENEY ELEMANLARI	11
2.1. Genel	11
2.2. Deney Elemanları	13
2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	24
2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanması	28
2.4.1. Betonarme kirişlerin hazırlanması	28
2.4.2. Deney elemanlarının onarılması	30
3. LABORATUAR TEKNOLOJİSİ	38
3.1. Genel	38
3.2. Yükleme ve Deney Düzeneği	38
3.3. Ölçüm Düzeni ve Deney Verilerinin Toplanması	41
4. DENEYLER	44
4.1. Deney Elemanı 1	44

Sayfa

4.2. Deney Elemanı 2	47
4.3. Deney Elemanı 3	54
4.4. Deney Elemanı 4	62
4.5. Deney Elemanı 5	69
4.6. Deney Elemanı 6	77
4.7. Deney Elemanı 7	85
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ.....	92
5.1. Deney Elemanlarının Davranışı	94
5.2. Kesme Dayanımı.....	102
5.3. Rijitlik	103
5.4. Süneklik	105
5.5. Şeritlerde Birim Deformasyonlar	106
5.6. Kirişte Kesme Dayanımı Hesabı.....	111
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	118
6.1. Sonuçlar	118
6.2. Öneriler	120
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	124

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri.....	17
Çizelge 2.2. 1 m ³ beton için karışım ağırlıkları ve oranları	24
Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları.....	25
Çizelge 2.4. Donatıların özellikleri	26
Çizelge 2.5. Karbon lif donatılı polimerlerin özellikleri.....	27
Çizelge 2.6. Epoksi'nin Özellikleri.....	28
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti	93
Çizelge 5.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları	102
Çizelge 5.3. Deney elemanlarında rijitlikler (kN/mm)	104
Çizelge 5.4. Deplasman - süneklilik oranları	105
Çizelge 5.5. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri.....	107
Çizelge 5.6. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları	116

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deney elemanları donatı detayları	15
Şekil 2.2. Onarılan deney elemanları, Deney elemanı 2	18
Şekil 2.3. Kiriş çelik kalıp kesiti	29
Şekil 2.4. CFRP şeritlerin uygulama adımları	34
Şekil 2.5. Kiriş kesitinde fan ankraj detayı	36
Şekil 3.1. Kirişte oluşan iç kuvvetler	40
Şekil 3.2. LVTD'lerin yerleşim şeması.....	42
Şekil 3.3. Kiriş deformasyon geometrisi.....	43
Şekil 4.1. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 1	45
Şekil 4.2. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 2	47
Şekil 4.3. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2	50
Şekil 4.4. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 3	54
Şekil 4.5. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3	58
Şekil 4.6. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 4	62
Şekil 4.7. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 4.....	66
Şekil 4.8. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 5	69
Şekil 4.9. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5	73
Şekil 4.10. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 6	77
Şekil 4.11. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6.....	81
Şekil 4.12. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 7	85
Şekil 4.13. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7	89
Şekil 5.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3 ve 4	95

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 5, 6 ve 7	97
Şekil 5.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2 ve 5	99
Şekil 5.4. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 3 ve 6	100
Şekil 5.5. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 4 ve 7	101
Şekil 5.6. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 2 ve 5 ($s_f=125$ mm)	108
Şekil 5.7. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 3 ve 6 ($s_f=150$ mm)	109
Şekil 5.8. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 4 ve 7 ($s_f=200$ mm)	110

RESİMLER LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Beton dökümü tamamlanmış deney elemanı	30
Resim 2.2. Kiriş yüzeyinin hazırlanması	31
Resim 2.3. CFRP şeritlerin kirişe yapıştırılması	32
Resim 2.4. CFRP şeridin kiriş altında doğrultu değiştirmesi	32
Resim 2.5. 100 x 250 mm’lik CFRP parçaların kiriş altına yapıştırılması	33
Resim 2.6. Fan ankraj detayı	36
Resim 2.7. Fan ankraj uygulaması	37
Resim 4.1. Deneye hazır kiriş, deney elemanı 1	44
Resim 4.2. Göçmeden sonra deney elemanı, deney elemanı 1	46
Resim 4.3. Sol kesme açıklığı ana kesme çatlağı, deney elemanı 1	46
Resim 4.4 Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 2	48
Resim 4.5. Göçmeden sonra, deney elemanı 2	49
Resim 4.6. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 3	55
Resim 4.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 3	56
Resim 4.8. Sol kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı, deney elemanı 3	57
Resim 4.9. CFRP şeritlerde soyulma, deney elemanı 3	57
Resim 4.10. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 4	63
Resim 4.11. Göçme sonrası, deney elemanı 4	64
Resim 4.12. Sol kesme açıklığı ana kesme çatlağı (kiriş diğer yüzü), deney elemanı 4	65
Resim 4.13. CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması, deney elemanı 4	65
Resim 4.14. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 5	70

Resim	Sayfa
Resim 4.15. Göçme sonrası, deney elemanı 5	71
Resim 4.16. Beton basınç bölgesinin ezilmesi, deney elemanı 5.....	72
Resim 4.17. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 6	78
Resim 4.18. Göçme sonrası, deney elemanı 6	79
Resim 4.19. Beton basınç bölgesinin ezilmesi, deney elemanı 6.....	80
Resim 4.20. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 7	86
Resim 4.21. Göçme sonrası, deney elemanı 7	87
Resim 4.22. Beton basınç bölgesinin ezilmesi, deney elemanı 7.....	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simge	Açıklama
a	Tekil yükün mesnete olan uzaklığı
A_v	Kayma donatısı kesit alanı
A_c	Beton en kesit alanı
b_f	CFRP şerit genişliği (<i>fib</i>)
b_w	Kiriş altı kesit genişliği
d	Kiriş faydalı yüksekliği
d_f	Kiriş yan yüzünde CFRP şerit yapışma uzunluğu
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
N_u	Beton eksenel kuvveti
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

Simge**Açıklama**

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
ρ	Boyuna donatı oranı
ρ_l	Boyuna donatı oranı
ρ_w	Kesme donatısı oranı
δ_{2net}	Kiriş orta noktası düşey net deplasmanı
δ_1	Sol mesnet çökmeleri
δ_2	Kiriş orta noktası düşey deplasmanı
δ_3	Sağ mesnet çökmeleri
Φ	Çatlak açısı
α	Kiriş eksenini ile CFRP şerit yapıştırılma açısı

Kısaltmalar**Açıklama**

ACI	American Concrete Institute
BDÖ	Birim Deformasyon Ölçer
CFRP	Karbon Lif Donatılı Polimer
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EC2	Eurocode-2
Eş.	Eşitlik
<i>fib</i>	Fédération Internationale du Béton (Federation for Structural Concrete)
LVDT	Lineer Variable Differential Transformer
TS 500	Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

1. GİRİŞ

Yapılarda, uygulama kolaylığı, mimari çözümlerinin fazlalığı ve uygulama maliyetleri bakımından genellikle tercih edilen yapısal sistemler betonarme taşıyıcı sistemlerdir. Betonarme kompozit bir malzemedir. Betonarmenin bu özelliğinden dolayı betonarme taşıyıcı sistemlerin kullanıldığı yapılarda bazı zafiyetler meydana gelebilmektedir. Bu zafiyetlerin genel sebepleri kötü projelendirme, kötü işçilik, yetersiz dayanımına sahip malzeme kullanımı, gerekli donatı kullanılmaması ve uygulama hataları olarak sıralanabilir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin kullanıldığı yapılarda elemanlar eğilme, eksenel kuvvetler, burulma ve kesme kuvvetlerinin etkisi altında kalmaktadır. Betonarme yapılar genellikle eksenel etkiler altında taşıyıcı görevlerini yerine getirirler. Eğilme etkisi altında kalan bir elemanın, betonarme yapılarda istenilen sünek davranış gösterebilmektedir. Ancak kesme kuvvetlerinin oluşturduğu asal çekme gerilmeleri betonun çekme kuvveti dayanımının düşüklüğü sebebi ile gevrek bir davranış gösterip ani göçme moduna götürür. Ani göçme modu istenmeyen bir durumdur. Kesme kuvvetleri tarafından oluşan asal çekme gerilmeleri betonarme elemanlarda, beton ve kesme donatıları tarafından karşılanmaktadır. Betonun çekme dayanımı düşük olduğundan kesme donatısı daha büyük önem taşımaktadır, bu sebepten mevcut yönetmeliklerin tamamı kesme donatısı bulundurmaya mecbur tutmaktadır. Kesme donatısı olarak etriyeler, pilyeler, veya hasır donatılar ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilir.

Kayma gerilmelerinden dolayı oluşan asal çekme gerilmelerini karşılayacak kesme donatılarının eleman üzerindeki yerleşimi ve dayanımı elemanın bu gerilmeler altındaki davranışını belirlemektedir. Genellikle kesme donatısı olarak kullanılan etriyeler boyuna eğilme donatısına dik olarak yerleştirilen donatılardır. Etriyelerin eleman üzerinde yerleşimi, asal eğik çatlakların etriyelerle kesişim sayısı asal çekme gerilmelerini karşılaması ile etkilidir. Yeterli kesme donatısı bulunan bir kesitte eğik çatlaklar belirli bir sayıda kılcal olarak ilerlerken eleman daha sünek bir davranış göstermektedir. Sünek eğilme davranışı gösteren bir eleman yük taşıma

kapasitesinde büyük düşmeler göstermemekte ve deformasyon yapabilme yetisi göstermektedir.

Her ne kadar mevcut yönetmelikler kirişlerde ve kolonlarda kesme donatısı bulundurma zorunluluğu olsa da, mevcut yapıların kesme kuvveti taşıma kapasiteleri uygulama ve projelendirmedeki hatalarından dolayı, elemanlar eğilme kapasitesine ulaşmadan eğik çekme kırılması sonucu göçmektedirler. Pratikte kesme donatısı yetersizliği nedeni ile birçok durumda kesme hasarlı betonarme kirişlerle karşılaşmaktadır. Yeterli kesme donatısı bulunmayan kirişlerde kesme dayanımının artırılması, güçlendirilmesi veya hasarlı kirişlerin rehabilitasyonu için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler kirişlerin kesitlerini artırarak betonarme manto yapılması, çelik şeritler ve plakaların gövdeye ankrajlanması veya epoksi ile yüzeye yapıştırılması, kirişlere dıştan kelepçe yerleştirmesi ve karbon lif donatılı polimerlerin (CFRP) epoksi ile yüzeye yapıştırılması sayılabilir. Bu yöntemler arasında betonarme manto yöntemi kesit boyutlarının artması, imalat sorunlarının bulunması, güçlendirme veya onarım yapılacak yapı mahallinin imalat süresince kullanımının zorluğu, yeni imla edilmiş beton katmanı ile mevcut betonun arasında aderans problemlerinin bulunması ve yapıya önemli sayılabilecek ilave yükler getirmesi gibi problemler teşkil etmektedir. Çelik şeritler ve plakaların yapısal rehabilitasyonlarda kullanılmasının asıl sorunları plakaların uygulama yapılan mahalde hazırlığının zorluğu, detay problemleri ve uygulanan kiriş üzerinde kohezyon ihtimalinin bulunmasıdır. Karbon lif donatılı polimerlerin kullanılması ile yapıya ilave yükler getirmemekte, her türlü yüzeye uygulanabilmekte ve kohezyon tehlikesi bulunmamaktadır.

Betonda basit kesme durumunda, asal çekme gerilmeleri kayma gerilmelerine eşittir. Betonun çekme dayanımı kesme dayanımından küçük olduğundan göçme çekme dayanımının aşılmasından dolayı oluşacaktır. Betonda oluşan asal çekme gerilmeleri ile kesme gerilmeleri eşit olduğundan kesme gerilmelerinin etkidiği yüzeyle 45°'lik açı yapan düzlemde gelişmekte ve oluşan çatlaklar asal çekme gerilmelerine dik yönde gelişmektedir. Kayma gerilmelerinin ve çatlakların 45°'lik düzlemde oluşmasından dolayı çatlaklara dik yönde yerleştirilen diyagonal elemanlar eğik

çekme gerilmelerini daha fazla karşılamaktadır. Çelik şeritlerin ve dıştan uygulanan kelepçeleme yönteminin kirişlere diyagonal olarak uygulanmasında çok büyük imalat zorlukları ortaya çıkartmaktadır. Karbon fiber polimer liflerin kirişlere diyagonal olarak kirişlere uygulanması diğer yöntemlere göre daha kolaydır.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Kesme dayanımı yeterli olmayan hasar görmüş kirişlerin onarılmasına yönelik karbon lif donatılı polimerler son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Köprü kirişleri gibi basit mesnetlerin üzerine yerleşen yetersiz kesme kapasiteli kirişlerin, kesme kapasitelerini, çeşitli değişkenlere bağlı olarak artırılması, uygulama yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmada amaçlanmıştır.

Çalışmada 7 adet 1/2 ölçekli, 4000 mm uzunluğunda T kesitli, tablalı 7 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Deney elemanlarının hepsi yetersiz kesme donatılı olarak tasarlanmıştır. Deney elemanlarında sünek eğilme davranışının gelişmesi için gerekli kesme donatısı miktarının 1/4'üne sahip üretilmiştir ($A_{swe} / A_{swr}=1/4$). Deney elemanlarında bir tanesi referans deney elemanı olarak test edilmiştir. Diğer deney elemanlarına, test edilen referans deney elemanının kesme kuvveti taşıma kapasitesinin yaklaşık %80'ine kadar yüke maruz bırakılıp hasar verdirilmiştir. Hasar verdirme işleminden sonra kiriş gövdesine diyagonal uygulanan karbon lif donatılı polimerler ile onarılmıştır. Kirişlerin 3 tanesi kiriş yüzeyine diyagonal yerleştirilen CFRP şeritlerin ankrajsız olarak, 3 tanesi kiriş yüzeyine diyagonal yerleştirilen CFRP şeritlerin kirişlerin gövdesine dik ve gövde tabla kesişimi yatayla 60° yapacak şekilde ankrajlı olarak tasarlanmış, üretilmiş ve deneyleri yapılmıştır. Deney parametreleri diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafeler ($s_f = 125$ mm, 150 mm ve 200 mm) ve ankrajlardır.

Deneyisel çalışmanın sonucunda, elemanların deneylerde gözlenen davranışlar ve elde edilen veriler ışığında kirişlerin dayanımı, rijitliği, sünekliği ve göçme modları deney parametrelerine göre irdelenmiş ve tartışılmıştır.

Konuyla İlgili Geçmişteki Çalışmalar

Trianafillou, 1998 yılında yayınlanmış olduğu bu çalışmada 11 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Deney elemanlarından iki tanesi güçlendirilmemiş referans elemanlarıdır. Deney elemanları 1000 mm boyunda, 70 mm eninde ve 110 mm yüksekliğinde üretilmiştir. Deney elemanlarına 4 nokta yüklemesi uygulanmıştır. Deney elemanlarında kesme donatısı kullanılmamıştır. Kiriş yüzeyinde CFRP şerit aralıkları ve düzenlemesi deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Bütün deneylerde diagonal çatlaklar oluşuktan sonra CFRP şeritler kiriş yüzeyinden soyulmuş ve eğik çekme kırılması sonucu kirişler göçmüştür. Kiriş kesme dayanımları ortalama % 65 ve % 95 arasında artmıştır. CFRP şeritler eğik çatlaklara dik yönde uygulandıkça etkinliğinin arttığı tespit edilmiştir [21].

Khalifa ve Nanni, 1999 yılında yapmış oldukları bu çalışmada 6 adet T kesitli kirişlerin kesme kapasitelerini artırmak için karbon donatılı lifli polimerlerle değişik konfigürasyonlarda güçlendirilmesini incelemişlerdir. CFRP miktarı ve dağılıma, sarmalanma şekli, çift doğrultulu ve tek doğrultulu CFRP ile güçlendirme ve ankraj kullanımı araştırılmıştır. Kirişlerin kesme açıklığında kesme donatısı bulunmamaktadır. Deney elemanlarına dört nokta yüklemesi yapılmış, a/d oranı 3 seçilmiştir. Kiriş taşıma kapasitesi değişik güçlendirme uygulamaları sonrası %145 artış sağlanmıştır. Deney elemanlarına uygulanan ankrajların kirişin göçme modunu değiştirdiği, iki yana ayrı-ayrı yapıştırılan şeritlerin, U şeritlerden daha az yük taşıdığı saptanmıştır. Deneylerde iki eleman arasında %40 daha fazla CFRP kullanılmasına rağmen aynı taşıma gücü elde edildiği, bu da optimum bir CFRP kullanımının yeterli olduğunu göstermektedir. Ayrıca kiriş eksenine paralel yapıştırılan şeritlerin kesme kapasitesine etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir [14].

Täljsten ve Elfgren, 2000 yılında yayınladıkları bu çalışmada, 500x180 mm dikdörtgen kesitli geometriye sahip sekiz adet kiriş denenmiştir. 4500 mm uzunluğunda üç kiriş referans elemanıdır. Referans elemanlardan ikisi hasar verilmiş sonra onarılmış ve tekrar test edilerek kapasiteleri değerlendirilmiştir. Tüm elemanlarda CFRP şeritler yatayla 45° ve 135° açıyla uygulanmış, yalnız bir deney

elemanında 45° ve 135° de iki yönlü üst üste yapıştırılmıştır. Bunun dışında sadece bir kiriş 45° 'lik şeritlerle güçlendirilmiştir. Diğer kirişler liflerin çalışma doğrultusunda yatayla 45° lik açı yapacak şekilde yapıştırılmış ve tüm yüzeyleri kaplanmıştır. Elemanlara dört nokta yüklemesi uygulanmış ve deneyler sonucunda 3 farklı göçme şekli oluşmuştur. Bu göçme şekilleri karbon fiber liflerin çekme kopması, beton basınç bölgesinin ezilmesi, CFRP'nin beton yüzeyinden soyularak göçmesidir. Test sonuçlarına göre, CFRP ile kesmeye karşı güçlendirmenin ve onarmanın başarılı bir yöntem olduğu, özellikle 45° olarak uygulanan kirişlerde % 300'e kadar kiriş kesme kapasitesinde artış olabileceği, ağır hasarlı kirişlerin bile % 100 oranında kesme kapasitesinin artırılabilceği gözlenmiştir [19].

Raghu ve diğerleri 2000 yılında ASCE yapı kongresinde yayınlamış oldukları bu çalışmada, 1970 yılında yapılmış Malcom Bliss Hastanesinin depremde hasar görmüş T kesitli betonarme kirişlerin karbon lif donatılı polimerlerle kesitlerin dışından güçlendirilmesini, hasarlı kirişlerin onarılmasını ve kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılmasını amaçlamışlardır. CFRP şeritlerin kirişlerin tüm yüzeyi kaplayacak şekilde ankrajlı ve ankrajsız olarak uygulanmasının kesme kapasitesindeki artış incelenmiştir. Test edilen kirişler denge altı çekme donatısına sahip kirişlerin uzunluğu 2640 mm'dir. İki kiriş referans deney elemanı olarak test edilmiş, diğer güçlendirme ve onarım yapılan kirişlere ise ankrajlı ve ankrajsız olarak CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Ayrıca pozitif moment bölgesinde 100 mm genişliğinde, negatif moment bölgesine 510 mm genişliğinde şerit yapıştırılmıştır. Diğer bir deney grubunda ise kullanılan CFRP şeritler 2 kat olarak aynı koşullarda kirişlere uygulanmıştır. Deneyler sonucunda; U şeklinde güçlendirilmiş ve onarılmış betonarme kirişlerin beton yüzeyi ile daha iyi kenetlendiği için başarılı olduğu, kirişlerin kesme dayanımlarının uygulama yöntemine göre %11 ile %34 arasında artış görülmüştür. Şeritlerin ankrajsız ve ankrajlı olmasından bağımsız, CFRP şeritlerin çift kat uygulamasının katkısının sınırlığı olduğu görülmüştür. Ankrajlı uygulanan şeritler ankrajsız uygulananlara göre %17 daha fazla kesme kuvveti taşıdığı, çift katman uygulanan şeritlerin ise tek katman şeklinde uygulananlara göre %4 kesme kuvveti kapasitesinde artış görülmüştür [18].

Khalifa ve Nanni, 2002 yılında yayınlanan çalışmalarında kesme kapasitesi düşük olan 12 adet dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin CFRP şeritlerle güçlendirildikten sonra, kesme performansı ve göçme modları incelenmiştir. Çalışmadaki değişkenler kullanılan kesme donatısı miktarı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve kullanılan CFRP şeritlerin genişliğidir. Uzunluğu 3050 mm, ölçüleri 150 mm x 305 mm olan kirişlere dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Tüm kirişlerin bir tarafı tam etriyeli, öteki tarafı eksik etriyeli yada etriyesizdir. Deney elemanları $a/d=3$, ve $a/d=4$ olmak üzere ikili gruplara ayrılmıştır. Her bir seriden bir örnek referans elemanı test edilmiştir. 50 mm ve 75 mm genişliğinde CFRP şeritlerle güçlendirilen iki ayrı deney elemanlarının kesme kapasitelerinde büyük bir fark olmadığı görülmüştür. Aynı a/d oranına sahip iki kirişin, farklı kesme donatısı içermesine rağmen taşıdıkları kesme kuvvetlerinin çok yakın olduğu ve sünekliğin aynı olduğu gözlenmiştir. ($a/d=4$) ve ($a/d=3$) olan gruplardaki CFRP şeritlerin kesme kapasitesine katkısı a/d oranı azaldıkça azalmaktadır. CFRP ile güçlendirilen kirişlerde a/d oranının etkin olduğu, kullanılan CFRP miktarının, gereken miktarın üzerinde olması durumunda, kirişin kesme kapasitesine belirgin bir katkı sağlamadığı gözlenmiştir [15].

Diagana ve diğerleri tarafından 2003 yılında yapılan çalışmada dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Yetersiz kesme donatılı üretilen betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi için kiriş yüzeyine 4 farklı şekilde CFRP şeritler yapıştırılmıştır. dıştan bağlanmış karbon fiber şeritler 4 farklı konfigürasyonla kullanılır. Deneysel program 2 referans kirişi ile 8 güçlendirilmiş kirişten oluşmaktadır. CFRP şeritler düşey düzleme paralel olarak ve yatay düzlemle 45° 'lik açı yapacak şekilde kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır. Çalışmada diyagonal ve düşey yapıştırılan CFRP şeritlerin kesme kapasitelerine etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçları ışığında CFRP şeritlerin betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılmasına etki olarak şerit aralığı, kaplama şekli ve uygulanan şeritin düzlem açısı etkili olmaktadır. CFRP şeritlerin kullanılması kesmeye karşı dayanımı arttırmıştır. U formunda 45° lik düzlemde eğik çatlaklara dik kullanılan CFRP şeritler en fazla kesme dayanımını göstermiştir [8].

Täljsten, 2003 yılında yaptığı bu çalışmada, bir tanesi referans elemanı olmak üzere yedi adet 500x180 mm kesitlerinde 4000 mm uzunluğunda betonarme kirişlerini

kesmeye karşı güçlendirmiş ve test etmiştir. Deney elemanları değişik kalınlıklarda ve açılarda karbon lif donatılı polimerlerle (CFRP) kiriş yüzeyine yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deney elemanlarına dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Ayrıca kirişlerin kesme açıklıklarında kesme donatısı bulunmamaktadır. Testlerden elde edilen veriler ışığında kirişlere uygulanan CFRP şeritlerin mümkün olduğunca eğik çatlaklara dik yönde yapıştırılması öngörülmektedir. Deneylerde gözlenen bir başka sonuç ise et kalınlığının inceliği, kullanılan CFRP'lerin kapasite kullanımı açısından daha uygun olduğunu göstermektedir [20].

Akyüz ve Özdemir, 2004 yılında yaptıkları çalışmada ankrajların aksenal çekme deneyleri sonucu yük taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Bu amaçla; beton basınç dayanımı, ankraj derinliği, ankraj çapı ve ankraj etrafına sarılan CFRP şeridin genişliği deney parametreleri olarak belirlenmiştir. 2 adet 4000 mm uzunluğunda, 28 günlük beton basınç dayanımı 16 Mpa ve 20 Mpa, çekme donatısı olmayan kirişler deneylerde kullanılmıştır. Ankrajların çapları 12 mm ve 14 mm olarak belirlenmiştir. Ankraj donatısı etrafına sarılan CFRP şeritlerinin genişlikleri 80, 120 ve 160 mm'dir. Ankrajların batma derinlikleri 70, 100 ve 150 mm olarak belirlenmiştir. Ankraj için kullanılan betonarme çeliği çapı 10 mm'dir. Yapılan deneyler sonucunda ankraj demiri etrafına sarılan şeritlerinin genişliği arttıkça, ankrajın taşıdığı aksenal yükünde arttığı görülmüştür. Uygulanan ankrajların batma derinliklerinde maksimum taşıma yükü 100 mm'de elde edilmiştir. Ankraj çapı arttıkça taşınan yük de artış göstermiştir. 20 Mpa ve 16 Mpa olarak üretilen kirişlerde denenen ankrajların kapasiteleri arasında çok büyük bir fark olmadığı tespit edilmiştir [4].

Barros ve Dias 2006 yılında Betonarme kirişlerin kesmeye ve eğilmeye karşı güçlendirmesi ve onarılması için EBR (Externally Bonded Reinforcement) ve NSM (Near Surface Method) metotları kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. EBR yöntemi CFRP laminelerin kiriş yüzeyine yapıştırma sureti ile uygulanması, NSM metodu ise CFRP lamineler kullanılarak şerit genişliğinde ve kesme donatısına kadar oyuklar açılarak kirişe epoksi ile yapıştırılmasıdır. NSM metodunun uygulama amacı CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmasının engellenmesinin amaçlanmasıdır. Deneylerde dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Kullanılan CFRP laminelerin genişliği 10 mm ve 25

mm'dir. Deneylerde CFRP şeritler yatay eksenle 90° ve yatayla 45° ve 135° açıyla uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan bir diğer değişken ise boyuna donatı oranının kesme kapasitesi üzerindeki etkileridir. Deneyler sonucunda EBR ve NSM yöntemlerinin betonarme kirişler üzerinde eğilme ve kesme kapasitelerindeki artış karşılaştırılmıştır. Eğilme etkisi altında NSM yönteminin daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Kesme etkisi altında NSM yönteminin uygulanabilirliğinin daha kolay ve hızlı olduğu gözlenmiş, taşıma kapasitesinin EBR yönteminde %54, NSM ile güçlendirilen kirişlerde %83 artış gözlenmiştir. NSM ile güçlendirilen kirişlerin aynı yük altında %9 daha fazla deplasman yapabildiği gözlenmiştir. Deneyler sonucunda kirişler ACI ve fib'e göre analitik olarak hesaplanan deplasman değerinden %2 ve %8 daha fazla kesme dayanımı elde edilmiştir [6].

Anıl, 2006 yılında yaptığı çalışmasında CFRP şeritlerle kesmeye karşıya güçlendirilmiş 6 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Deneysel çalışmada T kesitli kirişler tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deneysel çalışmanın değişkenleri uygulanan CFRP şeritlerin genişliği, şeritlerin yüzeylere uygulanma şekilleri ve şerit uçlarına uygulanan ankrajlar olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda karbon polimer donatılı liflerin kirişe dış yüzeyden epoksi ile uygulanması durumunda kesme dayanımı bakımından yetersiz olan kirişlerin güçlendirildiği görülmüştür. Epoksi ile birlikte kesme açıklığı boyunca kiriş yüzeyine uygulanan CFRP şeritlerin kesmeye karşı güçlendirmede etkili olduğu gözlenmiştir [5].

Kim ve diğerleri 2006 yılında yayınlanan çalışmalarında karbon lif donatılı polimer malzemelerle kesmeye karşı yapılan kiriş güçlendirmeleri için, plastik model ve kafes model adında 2 farklı analitik yöntem önermişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalarla ve önerdikleri analitik yöntemlerle kıyaslamışlardır. Kirişin kesmeye karşı güçlendirilmesinde önemli parametreler; kullanılan karbon lif donatılı polimerlerin malzeme dayanımı, CFRP'nin kiriş yüzeyine yapıştırılma sıklığı ve CFRP ile kiriş yüzeyi yapışma dayanımıdır [15].

Francesca ve diğerleri 2007 yılında yaptıkları bu çalışmada CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesi için hazırlanmış farklı ankraj çözümlerinin etkisinin

belirlenmesi 14 deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanları T kesitli olarak üretilmiştir. Deney elemanlarının karşılıklı iki kenarı üzerine 100 mm genişlikli karbon donatılı polimer lifler uygulanmıştır. 6 deney elemanına CFRP şeritler tüm yüzey boyunca uygulanmıştır. Diğer 8 deney elemanına CFRP 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 tip 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. Deney elemanları, analitik denklemlerle hesaplanan maksimum yüke erişmeden CFRP şeritlerde soyulma oluşmuştur. Test edilen ankraj sistemlerinde en iyi sonuç, CFRP şeritlere uygulanan fan ankrajların kiriş göçme mekanizmasını eğilmeye götürmesi ile elde edilmiştir. CFRP şeritlerin L şeklinde ankrajsız ve ankrajlı olduğu durumlarda CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulduğu gözlenmiştir [11].

Galal ve Sekar, 2007 yılında yapmış oldukları bu çalışmada, 8 adet 1/3 ölçekli, ters T kesitli prekast köprü kirişleri dört nokta yüklemesi ile test edilmiştir. Yapılan çalışmanın amacı, CFRP şeritler ve ankrajlar kullanılarak yapılan güçlendirme tekniğinin etkinliğinin araştırılmasıdır. Ters T şeklindeki köprü kirişlerinin başlık ve gövdesinde oluşabilecek sünek olmayan göçme davranışının engellenmesine çalışılmıştır. Deneyler sonucunda deney elemanları için sünek davranış elde edilebilmiştir. Deney elemanlarının Süneklik oranları 4 kat, kesme dayanımı %20 artmıştır. Ankraj kullanılan deney elemanlarında CFRP şeritlerin kiriş yüzünde yapıştırıldıkları düzlemde tutunabildiği, ankraj kullanılmayan deney elemanlarına göre daha iyi performans gösterdiğini gözlenmiştir [12].

Jayaprakash ve diğerlerinin 2007 yılında yaptıkları çalışmada, 2980 mm boyunda, 120x340 mm dikdörtgen kesitli 16 adet betonarme kirişte çift yönlü çalışan CFRP şeritlerin kirişlerin kesme kapasitelerine katkısı araştırılmıştır. Çalışmada toplam 16 kiriş test edilmiştir. Kirişlerin 4 tanesi referans elemanıdır. 6 kirişe hasar verilip CFRP ile onarılmış, 6 kirişe ise herhangi bir hasar verilmeden CFRP ile güçlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan değişkenler boyuna çekme donatısı oranı, kesme açıklığının etkili kiriş yüksekliğine oranı (a/d), CFRP şeritlerin eksenleri arası mesafe, CFRP şeritlerin sayısı ve CFRP şeritlerin yüzeye yapıştırma şeklidir. CFRP şeritler yüzeye yatay düzlemle 90° ve yatay düzlem 45° , 135° yapacak biçimde yapıştırılmıştır. 90° açı yapan CFRP şeritler kesit düzlemin de U biçimde, 45° açı yapan CFRP şeritler kesit düzleminde L biçiminde uygulanmıştır. Tüm kirişler basit mesnetli olarak test edilmiştir. Deneyler sonucunda CFRP şeritlerin kesme donatısı gibi çalıştığı, CFRP şeritler sayesinde eğik çatlakların sayısının sınırlandığı görülmüştür. Güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitelerinde %11 ile %139 arasında artış gözlenmiştir. CFRP şeritlerin uygulanması, CFRP' nin tüm kiriş yüzeyine yapıştırılmasından ekonomik olması ile birlikte güvenilir olduğu ortaya konulmuştur. Boyuna çekme donatısı oranı %56 arttırıldığında güçlendirilen kirişlerin kesme kapasiteleri %76 oranında artış göstermiştir. a/d oranı 4 olan kirişlerde, a/d oranı 2.5 olan kirişlere göre %83 daha fazla kesme dayanımı göstermiştir. CFRP şeritlerin merkezleri arasındaki mesafelerin azalması ile rijitlik artmıştır. Yüzeye yapıştırılan 45° lik CFRP şeritlerin, 90° ile yapıştırılan CFRP şeritlere göre eğik çatlakları daha fazla sınırladığı ve kesme kapasitesinde % 42 daha fazla artış sağladığı gözlenmiştir. Deneyler sonucunda yapıştırma tekniği ve uygulama kalitesinin sonucu etkilediği görülmüştür [13].

2. DENEY ELEMANLARI

2.1. Genel

Mevcut yönetmeliklerin tamamı kirişlerde kesme donatısı bulundurmayı zorunlu tutsa da, donatısız kirişleri incelemek kesme kuvveti etkisi altında kirişlerin davranışının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Basit mesnetli bir kirişte, tekil yükleme altında göçme durumunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi, uygulanan tekil yükün kiriş mesnedine olan mesafesinin (a), kiriş faydalı yüksekliğine (d) oranıdır. Yapılan deneysel araştırmalar bu oranın, dört grupta toplanabileceğini göstermektedir.

a/d oranının 7'den büyük olduğu durumlarda, kirişte eğik çatlaklar oluşmamaktadır. Asal eğik çatlakların oluşmamasından dolayı kesme kuvvetleri kirişin göçmesinde etkili olmaz. Kesme açıklığının büyüklüğünden dolayı kirişi eğilme kapasitesine ulaştıran kesme kuvvetinin mertebesi düşük düzeyde kalmakta ve büyük eğilme momentleri oluşmaktadır. Kirişte eğilme çatlakları oluşmakta, kiriş çekme donatısı akmakta ve kiriş göçme modu sünek olup eğilme etkisinden olmaktadır. Bu durumdan dolayı kiriş büyük deformasyon yapabilme yetisi göstermektedir.

a/d oranının 3'ten büyük 7'den küçük olduğu durumlarda, önce kiriş eksenine dik yönde eğilme çatlakları meydana gelecek, yük miktarı arttıkça kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlayacaktır. Uzama esnasında eğilme çatlaklarından bir veya birkaçı asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşecektir. Asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan bu çatlaklar tarafsız eksene ulaştığı anda tam olarak eğik çatlama durumu oluşacaktır. Eğik çatlamanın tam olarak oluştuğu durumda çekme donatısındaki birim uzama miktarında ani bir büyüme ve sıçrama gözlenir. Sıçramanın nedeni gerilme uyumu olarak açıklanabilir. Ani gerilme artışının olmasından dolayı eğik çatlakla mesnet arasında donatıya paralel olarak aderans çatlakları oluşmaya başlar. Bu andan sonra eğik çatlak kiriş üst seviyesine ve mesnet bölgesine doğru hızla ilerlemeye başlar. Aderans çatlaklarının

bulunduğu kiriş alt bölgesinde çekme donatısı ile beton arasında kenetleme zayıflar. Bu tür kırılma “gerçek eğik çekme kırılması” olarak adlandırılır.

a/d oranının 1,5’ten büyük 3’ten küçük olduğu durumlarda noktasal yükün oluşturduğu bölgedeki basınç gerilmeleri, eğik çekme gerilmesinin gelişmesine engel olmaktadır. Eğik çatlak, kiriş üst bölgesine yükün bulunduğu bölgeye ve çekme donatısına kadar ilerledikten sonra daha fazla gelişmez ve mesnet bölgesindeki basınç gerilmeleri göçmenin olmasını engeller. Genel olarak eğik çatlağın bu şekilde oluşması gerçek eğik çekme kırılması olarak tanımlansa da kiriş aniden kırılmaz ve yük taşımaya devam eder. Bu aşamada beton sanki bir basınç çubuğu gibi çalışarak kiriş üzerindeki yük gerilmeler yönünde mesnede aktarılır. Bu durum eğilme ve gergili kemer etkisi ile oluşmaktadır. Kemerlenme, çekme donatısının gergi görevi yapması, betonun ise asal basınç gerilmelerini karşılaması ile oluşur. Eğik çatlağın ilerlemesinin durmasından sonra yük artımıyla basınç bölgesindeki beton ezilmekte ve artık kiriş yük taşıyamamaktadır. Bu durum gerçek çekme kırılması değil, kesme-ezilme kırılması olarak adlandırılır. Kesme-ezilme kırılması ani bir kırılma değildir.

Kesme açıklığının çok küçük ve a/d oranının 1,5’ten küçük olduğu durumlarda, kiriş tekil yük etkisi altında eğik çatlak oluşumunu tamamladıktan sonra eğilme önemini kaybederek kiriş tamamen gergili kemer etkisi gösterir. Bu esnada çekme donatısı, gergi görevini yerine getirirken, mesnet bölgesinden yükün bulunduğu bölgeye kadar kemer etkisi yaratır. Yük böylece eğilme etkisi ile değil doğrudan, oluşan basınç çubuğunun sayesinde mesnede aktarılır. Kirişteki çekme donatısında gerilme sabit kalırken, mesnede yük bölgesindeki basınç gerilmeleri bir parabol düzlemde aktarılır. Çekme donatısında gerilme sabit kaldığından bu bölgede kenetlenme oluşmaz. Kesme açıklığının çok küçük olduğu durumlarda, donatı kırılma gerçekleşmeden akar ve bu durumda iki farklı göçme şekli oluşabilir. İlk olarak yükleme bölgesindeki gerilmeler nedeni ile betonun ezilmesi, diğer göçme şekli ise basınç gerilmelerinin aktarılması sırasında çekme donatısında oluşan yüksek gerilmeler nedeniyle mesnet bölgesinde aderansın yok olmasıdır.

Bu kırılma türleri, tekil yükleme altında basit mesnetlenmiş bir kirişte basit bir yükleme için detaylandırılmıştır. Aynı koşullar kirişler üzerinde yayılı yükleme için de a/d oranı genişletilebilir. Yükün kiriş mesnedine uzaklığının faydalı yüksekliğe oranı değil, momentin, kesme kuvvetinin faydalı yükseklikle çarpımının oranı ($M/V.d$) olarak ifade edilebilir [9].

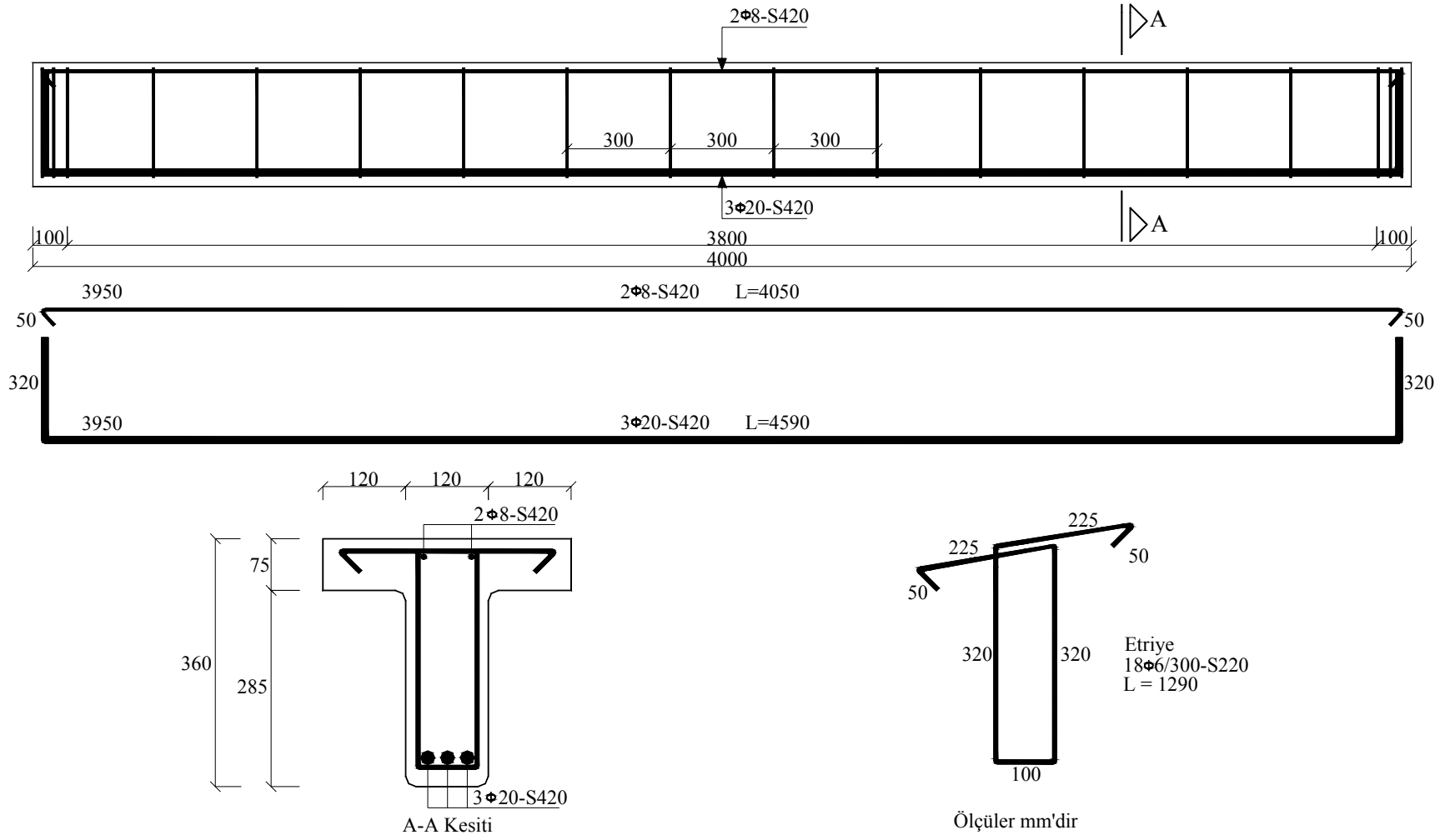
Eğik çekme gerilmeleri kiriş tarafsız ekseninde yatayla 45° açı yapacak şekilde oluşmaktadır. Bu deneysel çalışmada hasarlı ve yetersiz kesme donatılı kirişlerin rehabilitasyonu, eğik çekme gerilmelerine dik olacak şekilde diyagonal olarak uygulanan CFRP şeritlerle sağlanmıştır. Elemanlarda eğik çekme gerilmelerinin etkisi ile gerçek eğik çekme kırılması durumu oluşması için a/d oranı 5 olarak seçilmiştir.

2.2. Deney Elemanları

Deney elemanları Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel çalışmada tasarlanan elemanların geometrik boyutlarının belirlenmesinde yapı mekaniği laboratuvarının fiziksel koşulları, yükleme ve ölçüm sistemlerinin kapasiteleri sınırlayıcı etken olmuştur.

Kirişler taşıyıcı sistem karakteri olarak düşey taşıyıcı sistemleri birbirine bağlayarak sistemi hiperstatik hale getirmek dışında döşemelerdeki yükleri düşey taşıcılara aktarmasıdır. Yani yapılarda kullanılan kirişlerin birçoğu döşemelerle birlikte çalışmaktadır. Uygulama ve yapısal hesaplamalarda kirişlerin basınç bölgesinin döşemelerle birlikte çalıştığı düşünülerek deneysel elemanlar tablalı kesitli olarak tasarlanmıştır. Elemanlar; 4000 mm uzunluğunda, 120 mm gövde genişliğinde 360 mm kiriş yüksekliği, 360 mm tabla genişliğinde ve 75 mm tabla yüksekliğinde $1/2$ ölçekli olarak tasarlanmıştır. Elemanların gerçek bir eğik çekme kırılması davranışını gösterebilmesi için yükleme mesnetten 1650 mm mesafede uygulanmıştır. Kiriş faydalı yüksekliği 330 mm olduğundan a/d oranı 5'tir.

Deney elemanlarının hepsi aynı malzemelerle özdeş olarak üretilmiştir. Kirişler yaklaşık olarak BS 25 (C 25) betonu ile üretilmiştir. Elemanların tamamında, çekme donatısı olarak 3 adet 20 mm çapında nervürlü betonarme çeliği (S420) kullanılmıştır. Kirişlerde çekme donatısı porsantajı $\rho=0,0263$ 'dür. Bu oran TS-500'de belirtilen dengeli donatı oranı olan $\rho_b=0,03005$ değerinden düşük olup denge altı donatı oranına sahiptir. Basınç donatısı olarak 2 adet 8 mm çapında (S420) nervürlü betonarme çeliği (S420) kullanılmıştır. Kesme donatısı olarak kapalı etriyeler kullanılmıştır. Etriyeleler 300 mm aralıklı 16 adet 6 mm çapında (S220) düz betonarme çeliğinden üretilmiştir. Etriyelelerin $\phi 6/300$ seçilmesindeki asıl neden, deney elemanlarının kesme kapasitelerinin düşük düzeyde kalmasının amaçlanmasıdır. Deney elemanlarının etriye donatısı porsantajı $\rho_w=0.00157$ 'dir. Deney elemanlarında kullanılan donatı detayları Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Deney elemanları donatı detayları

Deneylerde 6 adet kiriş hasar verdirme işleminden sonra karbon lif donatılı polimerler kullanılarak onarım işlemi yapılmıştır. Onarılan kirişlere uygulanan CFRP şeritler 50 mm genişliğinde, 1310 mm uzunluğundadır. CFRP şeritler oluşması muhtemel eğik çekme çatlaklarına dik, kiriş yüzeyine yatayla 45° yapacak şekilde uygulanmıştır. Ayrıca kirişlerin gövdesinin altında 100 mm genişliğinde 250 mm uzunluğunda CFRP parçalar diyagonal uygulanan şeritlerin doğrultusun değiştiği kiriş altına yapıştırılmıştır. Onarılan deney elemanlarının 3 tanesine polimer lifler, diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafeleri (s_f) 125, 150, 200 mm olarak fan ankrajsız uygulanmıştır. Diğer 3 deney elemanında ise diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafeleri (s_f) 125, 150, 200 mm olarak kiriş gövdesine yatay düzlemde ve kiriş tablası ile kiriş gövdesinin birleşim bölgesine yatayla 60° açı yapan 2 adet fan ankraj her bir şerit ucuna uygulanmıştır. Deney elemanlarının özellikleri ve onarım şekilleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007’de ve ACI 440’ta, 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 [2-3]. Yönetmeliklerdeki maksimum eksen genişliği 132,50 mm’dir. *fib*’de verilen şerit aralığı sınırlamaları ACI-440 ve DBYBHY’de verilen değerlerden daha büyüktür [11]. DBYBHY 2007’de CFRP şeritlerin kiriş gövdesine düşey düzlemle paralel olarak yapıştırılması öngörülmektedir. ACI 440 ve *fib*’de ise kiriş gövdesiyle yatayla açı yapabilecek CFRP şeritlerin yapıştırılmasına imkan vermektedir. Bu deneysel çalışmada kiriş gövdesi ile 45° açı yapan CFRP şeritler kiriş gövdesine yapıştırılmıştır. Deneysel çalışmada onarım için seçilen şerit eksen aralığı ($s_f=125$ mm) yönetmelik koşullarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada seçilen diğer iki şerit aralığı (150 mm ve 200 mm) ile onarılan kirişlerde yönetmelik koşulu ile belirlenen şerit aralıkları ile onarılan kirişlerin birbirlerine göre davranışları incelenmiştir. Diyagonal olarak yapıştırılan CFRP şeritlerle onarılan deney elemanlarından deney elemanı 5, deney elemanı 6 ve deney elemanı 7’nin her bir CFRP şeridine iki adet fan ankraj uygulanmıştır. Ankrajlardan bir tanesi CFRP şeritlerin uçlarından yatayla 60° açı yapacak şekilde bir kiriş tablası ile kiriş

gövdesinin birleştiği bölgeye uygulanmıştır. Bu ankraj ile CFRP şeritler uçlarından kirişe sabitlenmiştir. Diğer ankraj ise 50 mm kiriş tablasının altından, kiriş gövdesine yatay düzlemde uygulanmıştır. Şerit ucundaki bu iki ankrajla kiriş tablası altında gelişen kiriş gövdesi ile kiriş tablasını ayıran bölgede çatlakların 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 soyulma durumu araştırılmıştır. DBYBHY 2007’de CFRP şeritlerin kiriş çevresini tamamen sarmasını zorunlu tutmuştur. Ancak uygulamada mevcut döşeme ve donatılardan kaynaklı olarak, CFRP şeritlerin kiriş çevresini sargılamasını çoğu zaman mümkün olmamaktadır. DBYBHY’de bulunan bu koşıldan dolayı yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerin uçları 169 mm uzatılarak tabla altına yapıştırılmıştır.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri

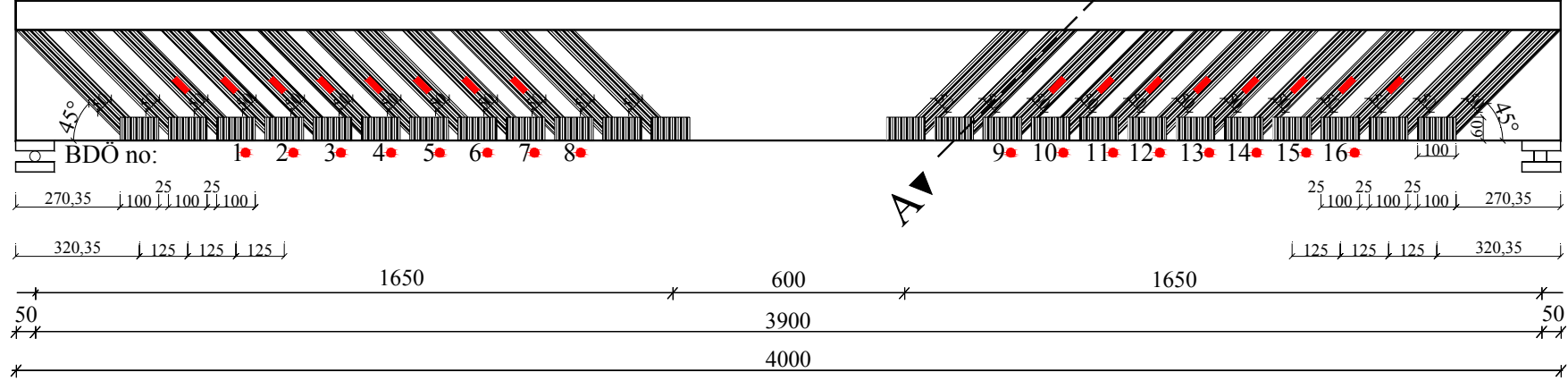
Deney Elemanı No	Etriye		CFRP Şerit Aralığı s_f (mm)	Fan Ankraj
	Çap/Aralık (mm)	Oranı ρ_w		
Deney elemanı 1	6/300	0,00157	-	-
Deney elemanı 2			125	Yok
Deney elemanı 3			150	Yok
Deney elemanı 4			200	Yok
Deney elemanı 5			125	Var
Deney elemanı 6			150	Var
Deney elemanı 7			200	Var

Deney elemanlarında kullanılan CFRP şeritler, ankrajlar ve birim deformasyon ölçerlerin uygulama detayları ve numaraları şekil 2.2 de verilmiştir.

CFRP şerit no:

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫

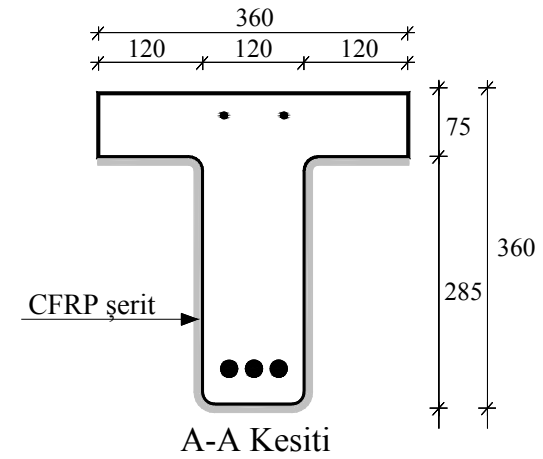
⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔



$w_f = 50 \text{ mm}$, $s_f = 125 \text{ mm}$

■ Birim deformasyon ölçer

Ölçüler mm'dir

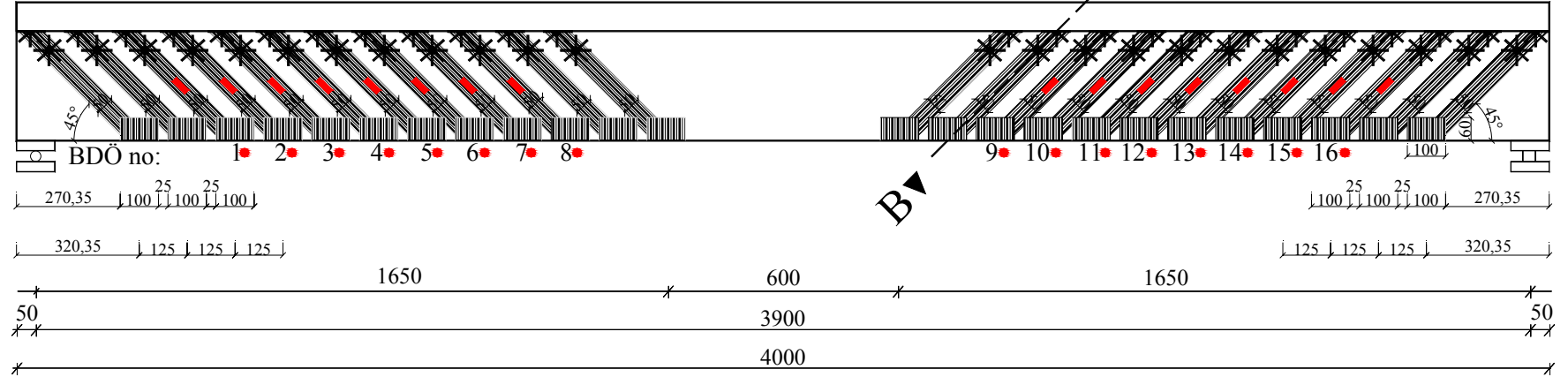


Şekil 2.2. Onarılan deney elemanları, Deney elemanı 2

CFRP şerit no:

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫

⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔

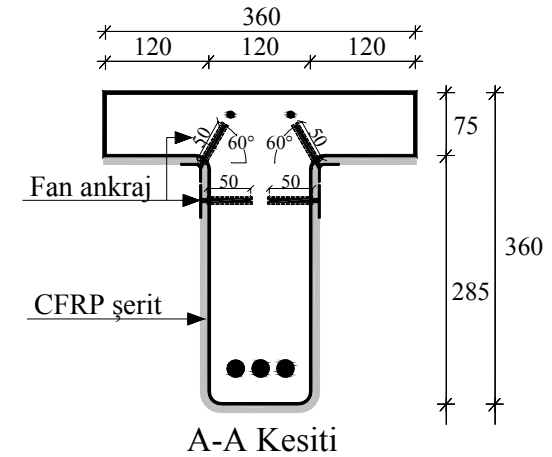


$w_f = 50 \text{ mm}$, $s_f = 125 \text{ mm}$

■ Birim deformasyon ölçer

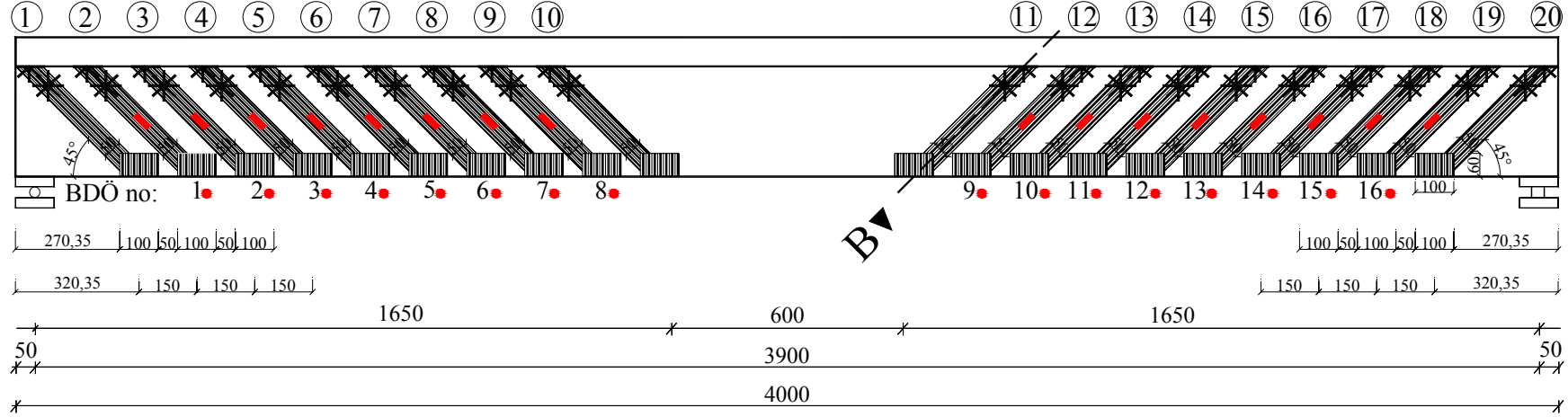
* Fan ankraj

Ölçüler mm'dir



Şekil 2.2. (Devam) Onarılan deney elemanları, Deney elemanı 5

CFRP şerit no:

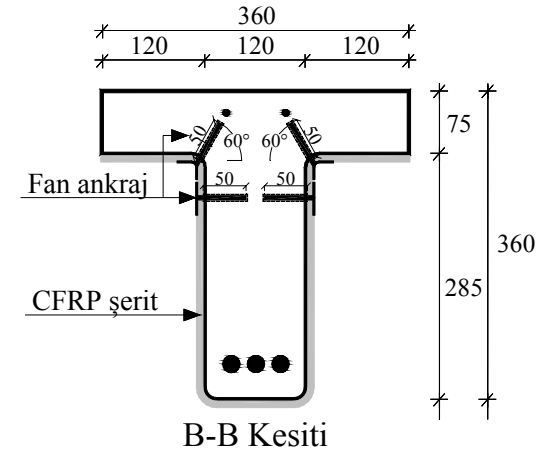


$w_f = 50 \text{ mm}$, $s_f = 150 \text{ mm}$

■ Birim deformasyon ölçer

* Fan ankraj

Ölçüler mm'dir



Şekil 2.2. (Devam) Onarılan deney elemanları, Deney elemanı 6

2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Deneysel çalışmada, deney elemanların davranışlarının tartışılabilmesi için kullanılan bütün malzemelerin birbiri içinde aynı mekanik özelliklerde olması büyük önem arz etmektedir.

Beton

Elemanlar üretilirken tamamının aynı dayanımda olmasına özen gösterilmiştir. Beton kalitesi 28 günlük dayanımı 25 MPa olan BS25 (C25) olarak tasarlanmıştır ve hesaplar bu unsur göz önünde tutularak yapılmıştır. Beton üretimi yapı mekaniği laboratuvarında bulunan 250 dm³'lük beton mikseri ile yapılmıştır. Betonlar, PÇ 32,5 portlant çimentosu, 7 - 15 mm dane çaplı agregası, 0 - 7 mm dane çaplı kum ve içilebilir nitelikte su ile üretilmiştir. Agregası ve kum için elek analizi yapıldıktan sonra karışım 1 m³ beton için ağırlıkça karışım oranları hesaplanmıştır. Su - çimento oranı 0,65 tir. Beton üretiminin bir metreküp karışım için gerekli malzemelerin ağırlık ve oranları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. 1 m³ beton için karışım ağırlıkları ve oranları

Malzeme	Ağırlık (kg)	Ağırlıkça Oran (%)
Çimento (PÇ 32.5)	195,00	8,60
Agregası (7 - 15 mm)	650,00	28,90
Kum (0 - 7 mm)	1107,00	49,20
Su	300,00	13,30
TOPLAM	2252,00	100,00

Kirişler üretilirken 150 mm x 300 mm boyutlarında her bir kiriş için 6'şar adet silindir test numunesi alınmıştır. Silindir test numuneleri ve kiriş elemanları aynı şartlar altında 28 gün küre alınmıştır. 28 günlük kür süresi dolduktan sonrada silindir numuneleri pürüzlü yüzeyine kükürtlü başlık yapıldıktan sonra mekaniği

laboratuvarında test edilmiştir. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları

Deney Elemanı No	Beton Basınç Dayanımları (MPa)
Deney elemanı 1	25,50
Deney elemanı 2	24,20
Deney elemanı 3	24,90
Deney elemanı 4	25,80
Deney elemanı 5	24,80
Deney elemanı 6	25,00
Deney elemanı 7	24,90

Donatı

Elemanlarda kullanılan bütün donatılar Kardemir Demir Çelik Fabrikası tarafından üretilen, bir üretim betonarme çeliğinden seçilmiştir. Donatıların dayanımları için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri T.C. Bayındırlık Bakanlığı tarafından yetkilendirilmiş Pelin Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Ltd. Şti. bünyesinde test edilmiştir. Kullanılan her donatı çapından 3'er adet numune alınarak çekme deneyleri yapılmıştır. Donatıların çekme deneylerinden elde edilen ortalama akma ve kopma dayanımları Çizelge 2.4 de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Donatıların özellikleri

Donatı Çapı ϕ (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı f_{yk} (MPa)	Kopma Dayanımı f_{su} (MPa)
$\phi 6$	S220 (BÇI)	310,00	385,80
$\phi 8$	S420 (BÇIII)	350,00	490,00
$\phi 20$	S420 (BÇIII)	460,00	580,00

CFRP (SikaWrap - 230 C)

Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen, SikaWrap - 230 C karbon lif donatılı polimerlerin çalışma prensibi bakımından tek doğrultuludur. Karbon lif donatılı polimerlerin uygulama alanları; yığma duvarların güçlendirilmesi, betonarme yapısal elemanların güçlendirilmesi ve onarılmasında, yapısal dayanımın artırılmasında kullanılmaktadır. CFRP elemanlar birim ağırlıkları çok küçüktür ve yapıya ek yük getirmemektedir. Yüzey geometrisinden bağımsız olarak bütün yüzeylere uygulanabilir. Uygulama ve hemen kullanabilirlik süresinin kısıltığı, mimari sınırlamaların değişmemesi ve korozyon etkisinin olmaması diğer kullanılma tercihleri olarak gösterilebilir. CFRP lifler için çalışma bünyesinde herhangi bir test yapılmamış ve üretici firmanın verdiği değerler hesap kriterleri olarak çalışmada kullanılmıştır. Karbon lif donatılı polimerlerin özellikleri Çizelge 2.5’te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Karbon lif donatılı polimerlerin özellikleri

Ağırlık	220,00 gr/m ²
Kalınlık	0,12 mm
Çekme Dayanımı	4100 MPa
Elastisite Modülü	231000 MPa
Kopmadaki Uzama	% 1,7
Dokuma Uzunluğu	50,00 m
Dokuma Genişliği	600,00 mm
Lif Yapısı	%99 ana doğrultuda, %1 destekleyici doğrultuda lif

Epoksi

CFRP liflerin yapıştırılmasında Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sikadur-330 iki bileşenli, solventsiz, tiksotropik özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcısı kullanılmıştır. Sikadur – 330, SikaWrap - 230 C malzemesini kiriş yüzeyine yapıştırılmasında kullanılmıştır. İki bileşenli yapıştırıcı (A: Ana reçine, B: Sertleştirici) bileşenlerin homojen bir biçimde karıştırılmasından sonra 40 dakika içinde uygulanması gerekmektedir. Yapıştırıcı 48 saat geçtikten sonra tam dayanım değerine ulaşmaktadır. Uygulanan yüzey kuru, temiz ve en az 1 MPa çekme dayanımına sahip olmalıdır. Uygulanan yüzeyin düzgün olması gerekmektedir. Uygulama toleransı her 300 mm mesafede 2 mm kalınlıkta olmalıdır. Yapıştırıcı kimyasallardan etkilenmemekte fakat yapıda meydana gelebilecek yangın durumunda yüksek sıcaklıklarda yapıştırıcı akışkan bir kıvama gelmektedir. Epoksi'nin özellikleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Epoksi'nin Özellikleri

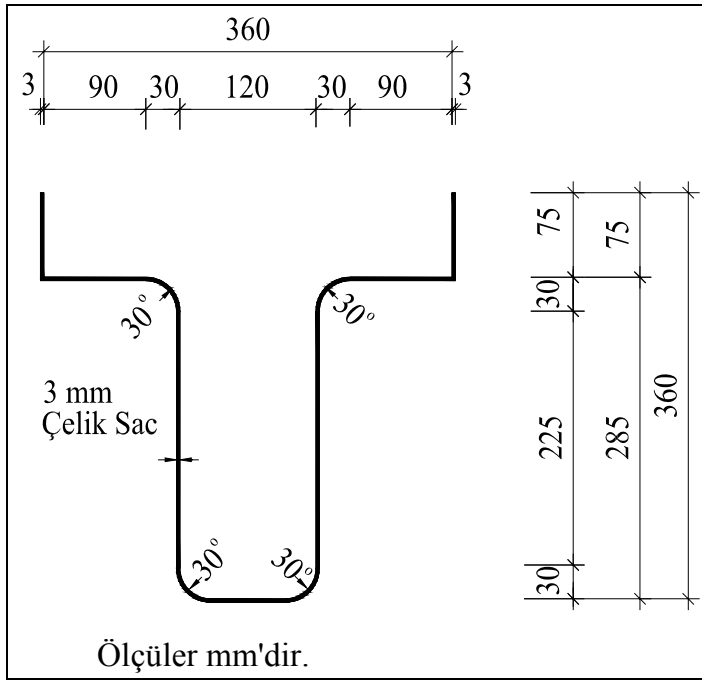
Yoğunluk	1,31 kg/lt
Karışım Oranı	Ana Reçine/Sertleştirici = 4/1
Uygulama Sıcaklığı	min +10°C, max +35°C
Çekme Dayanımı	30 MPa (+23°C de 7 günlük kürden sonra)
Eğilmede Elastisite Modülü	3800 MPa (+23°C de 7 günlük kürden sonra)
Çekmede Elastisite Modülü	4800 MPa (+23°C de 7 günlük kürden sonra)
Kopma Uzaması	%0,9 (+23°C de 7 günlük kürden sonra)
Kullanım Miktarı	0,70 – 1,50 kg/m ²

2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanması

2.4.1. Betonarme kirişlerin hazırlanması

Deney elemanlarının hazırlanmasına donatı kafeslerinin oluşturulması ile başlanmıştır. Kirişlerde çekme donatısı olarak; 3 adet 20 mm çapında S420 nervürlü betonarme çeliği, basınç donatısı olarak; 2 adet 8 mm çapında S420 nervürlü betonarme çeliği ve etriye olarak; 300 mm aralıklı 6 mm çapında S220 düz betonarme çeliği kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan basınç donatıları 3980 mm gövde uzunluğunda olup uçlarına 50 mm boyunda 135° kanca yapılmıştır. Çekme donatıları 3950 mm gövde uzunluğundadır ve 320 mm uzunluğunda 90° kanca yapılmıştır. 20 mm çapındaki donatılar demir bükme makinesi ile bükülüp hazırlanmıştır. Etriyeler laboratuarda hazırlanmış etriye tezgahında üretilmiştir. Etriyelerin uçları 50 mm boyunda 135° kanca bükülerek tek parça kapalı etriye olarak üretilmiştir. Bir etriyenin toplam boyu 1290 mm'dir. Etriyeler 300 mm aralıklarla boyuna donatılara bağ teli kullanılarak bağlanmıştır. Deney elemanlarının üretimi için 3 mm kalınlığında çelik levhalardan T kesitli çelik kalıp yapılmıştır. Kirişin çelik kalıp kesiti Şekil 2.3'de verilmiştir. Çelik kalıbın, kiriş gövdesi ile kiriş tablasın birleşim kesitinde ve kiriş gövdesinin alt kenarlarında, gerilme yığılmalarını azaltmak için 30 mm'lik dairesel form yapılmıştır.

Donatı kafesleri daha önceden temizlenmiş ve yağlanmış çelik kalıba 14 mm'lik pas payları kullanılarak yerleştirilmiştir. Çelik kalıp, kiriş tablasında 4 noktadan çelik profillerle sabitlenerek kalıbın açılması önlenmiştir. Beton segregasyon oluşmayacak şekilde kalıba yerleştirip, beton içinde boşluk kalmaması için yeterli miktarda vibrasyon yapılmıştır. Betonun üst yüzeyi master yardımı ile perdahlanmış ve düz bir yüzey elde edilmeye çalışılmıştır. Beton dökümü Resim 2.1'de verilmiştir. Beton dökümü sırasında her kiriş elemanı için yapılan karışımlardan 6 adet 300 x 150 mm silindir test numunesi alınmış ve kirişlerle aynı fiziksel ortamda kür uygulaması yapılmıştır. 28 gün boyunca kür işlemine devam edilmiştir. 28. günün sonunda silindirler test edilerek betonların basınç dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 2.3. Kiriş çelik kalıp kesiti



Resim 2.1. Beton dökümü tamamlanmış deney elemanı

2.4.2. Deney elemanlarının onarılması

Deney elemanlarının üretilmesinden sonra 28 gün süresi ile kür işlemine tabi tutulan elemanlara ilk olarak kiriş kesme kuvveti taşıma kapasitesinin %80'ine kadar yük uygulanıp hasar verilmiştir. Hasar verilmiş elemanlara sonra onarım yapılmıştır. Elemanların onarılması kiriş yüzeyine olmak üzere kesme çatlaklarına dik yönde yapıştırılacak şekilde 45° ile, bazı kirişlere ise aynı CFRP şeritler ve ankraj yapılarak uygulanmıştır.

CFRP Şeritlerin Hazırlanması ve Uygulanması

CFRP şeritler yapıştırılmadan önce, şeritlerin yerleri işaretlenmiştir. CFRP şeritlerin yapışacağı bölgelerin ince taneli beton yüzeyi temizlenerek granülometrinin görünmesi sağlanmıştır. Kirişler daha sonra basınçlı hava tutularak yüzey tozlardan arındırılmıştır. Kiriş yüzeyinin hazırlanması Resim 2.2'de gösterilmiştir.



Resim 2.2. Kiriş yüzeyinin hazırlanması

CFRP şeritler 50 mm genişliğinde 1310 mm uzunluğunda lif doğrultuları bozulmayacak şekilde kesilip hazırlanmıştır. Şeritlerin yapıştırılacağı bölgelere 1-1,5 mm kalınlığında epoksi sürülmüştür. Kullanılan epoksi (Sikadur-330) 4/1 karışım oranındadır ve her bir karışım işlenebilirlik ve kullanılabilirlik özelliğinin kaybolmaması için 500 gr olarak hazırlanmıştır. Yapıştırıcının yüzeye sürülmesinden sonra CFRP şeritler kiriş kesme açıklıklarına ve kiriş gövdesine 45° lik açı yapacak şekilde yapıştırılmıştır. Şeritleri yapıştırırken önce kiriş tablası ile gövde birleşim bölgesinde şerit tutularak doğrultusu ayarlanmıştır. Kiriş alt bölgesinin orta noktasında CFRP şerit 180° döndürülerek doğrultusu değiştirilmiş, 90° düzleminde değiştirilerek kirişin diğer yüzeyine şerit doğrultusunda yapıştırılmıştır. CFRP şeridin kirişe yapıştırılması Resim 2.3'te verilmiştir. Kiriş gövdesinin altında yüzey değiştirme işlemi yapıldıktan sonra bu bölgede iki katman halinde bir üçgen alan oluşmuştur. CFRP şeridin kiriş altında doğrultu değiştirmesi Resim 2.4'de verilmiştir. Bu bölgede CFRP şeritlerde herhangi bir ayrılmanın olmaması için 100 mm genişliğinde ve 250 mm uzunluğunda CFRP parçalar hazırlanmış ve kiriş altına U biçiminde epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. CFRP parçalar liflerin kesme kuvveti doğrultusu ile paralel olacak şekilde kiriş alt bölgesine yatay düzleme dik olarak yapıştırılmıştır. 100 x 250 mm'lik CFRP parçaların yapıştırılması Resim 2.5'te

verilmiştir. CFRP şeritlerin kirişlere 3 boyutlu şematik uygulama sırası Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



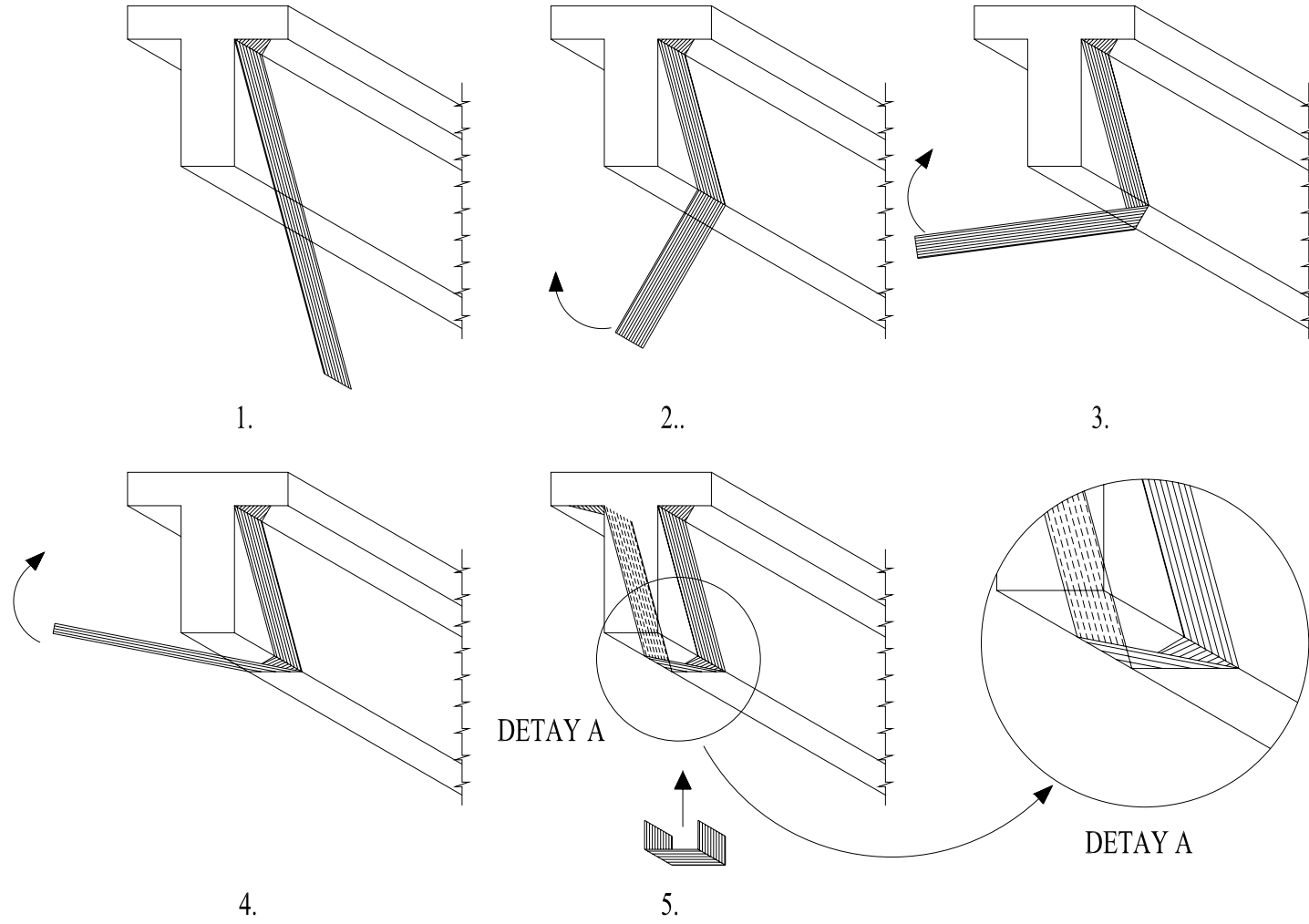
Resim 2.3. CFRP şeritlerin kirişe yapıştırılması



Resim 2.4. CFRP şeridin kiriş altında doğrultu değiştirmesi



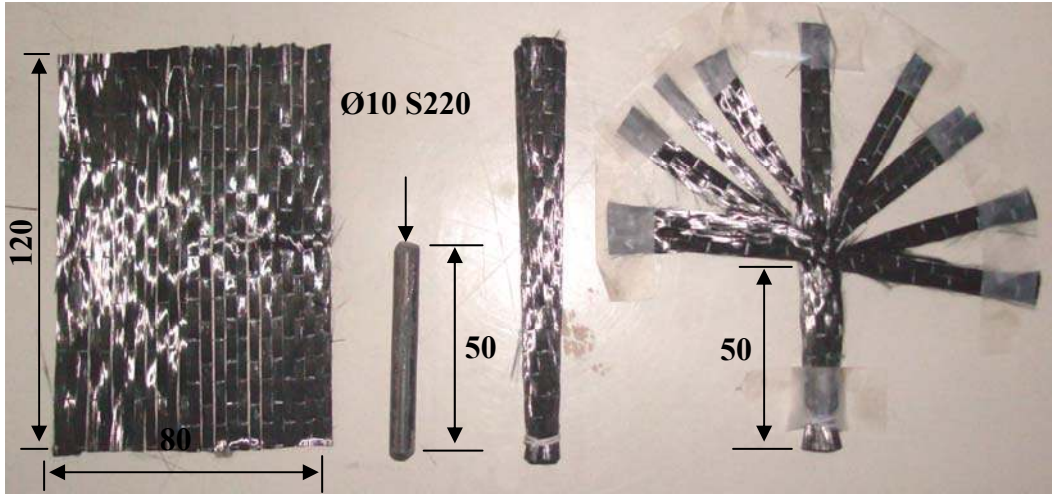
Resim 2.5. 100 x 250 mm'lik CFRP parçaların kiriş altına yapıştırılması



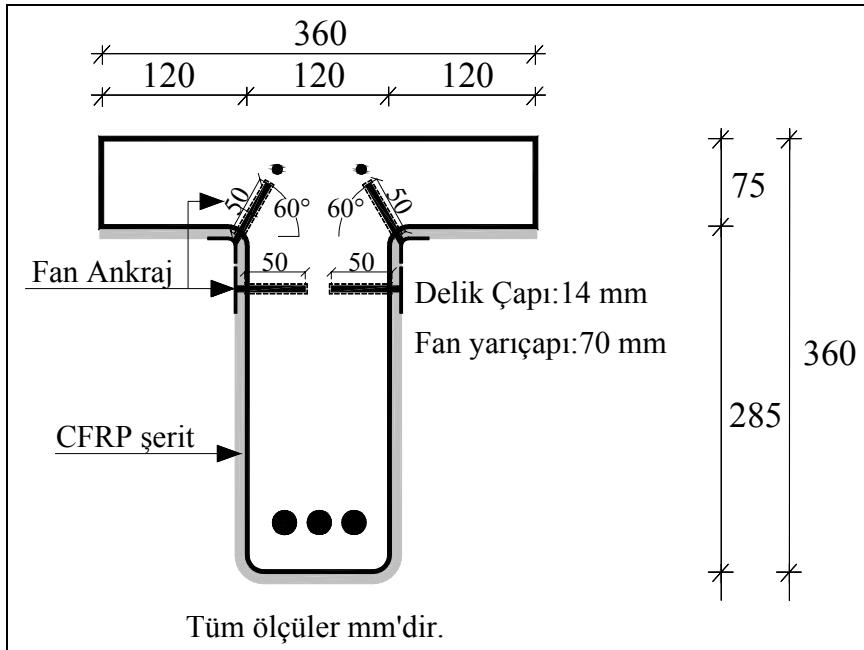
Şekil 2.4. CFRP şeritlerin uygulama adımları

Fan Ankraj Uygulaması

Deney elemanlarından bazılarında (Deney elemanı 5, deney elemanı 6 ve deney elemanı 7) her bir CFRP şeridin ucuna 2'şer adet fan ankraj yapılmıştır. Ankrajlardan bir tanesi kiriş tablasının 50 mm altına kiriş gövdesine dik yönde, diğer ankraj ise kiriş gövdesi ile tablanın birleşim bölgesinde yatayla 60° açı yapacak şekilde uygulanmıştır. Ankrajlarda 10 mm çapında 50 mm uzunluğunda S220 düz donatılar ve 80 mm genişliğinde, 120 mm uzunluğunda CFRP parçalar kullanılmıştır. CFRP lifler ankraj donatısına paralel olacak şekilde, donatı ucundan sıkıca sarılmış, CFRP lifler donatıya tel ile sabitlenmiştir. Fan ankraj detayı Resim 2.6'da verilmiştir. Ankraj delikleri 50 mm derinliğinde olup delik çapı 14 mm'dir. 10 mm çapında ankraj donatısına sarılan CFRP parçalar donatıya sarıldıktan sonraki kalınlığı 2 mm olup, 2 mm kalınlığında yapıştırıcı kullanılmıştır. Hasar verme işlemi tamamlanan kirişlerin yüzeyleri ince taneli beton yüzeyinden temizlenmiş ve 14 mm çapında ankraj delikleri açılmıştır. Ankraj deliklerinin açılmasından sonra kiriş basınçlı hava ile tozlardan arındırılmıştır. Temizlenen kirişlere, CFRP şeritler yatayla 45° olacak şekilde yapıştırılmıştır. Diyagonal olarak yapıştırılan CFRP şeritler yaklaşık 5 dakika beklendikten sonra ankraj deliklerinin bulunduğu bölgedeki düşey liflerin sürekliliği kesilmeden ankraj delikleri açılmıştır. Enjektör yardımı ile epoksi deliklere doldurulmuş ve 50 mm uzunluğundaki ankrajlar, CFRP parçaların sarılma yönünde döndürülerek deliklere yerleştirilmiştir. Delik dışında kalan 70 mm'lik CFRP lifler 7-8 parçaya ayrılarak fan şeklinde diyagonal şeritlere ve kirişe epoksi ile yapıştırılmıştır. Ankraj uygulaması Resim 2.7'de verilmiştir. Ankraj işlemi 1 mm kalınlığında yapıştırıcının son kat olarak ankrajlara ve şeritlere sürülmesi ile tamamlanmıştır. Kiriş kesitinde fan ankraj detayı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Resim 2.6. Fan ankraj detayı



Şekil 2.5. Kiriş kesitinde fan ankraj detayı



(a)



(b)

Resim 2.7. Fan ankraj uygulaması

(a) Fan ankrajların ankraj deliğine yerleştirilmesi

(b) Fan ankrajların açılması

3. LABORATUAR TEKNOLOJİSİ

3.1. Genel

Deneysel çalışmalar Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi bünyesindeki, Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuardaki fiziksel koşullar, çalışmanın boyutlarını belirleyen faktördür. Deneyler 4600 x 2520 mm boyutlarında, 200 kN kapasiteli çelik çerçevede yapılmıştır. Kirişlere simetrik, tek düze basit yükleme yapılmıştır. Elemanlara yükleme, mekanik pompa ve hidrolik krik o ile uygulanmış, ölçümler yük hücresi ve birim deformasyon ölçerler ile elde edilmiştir.

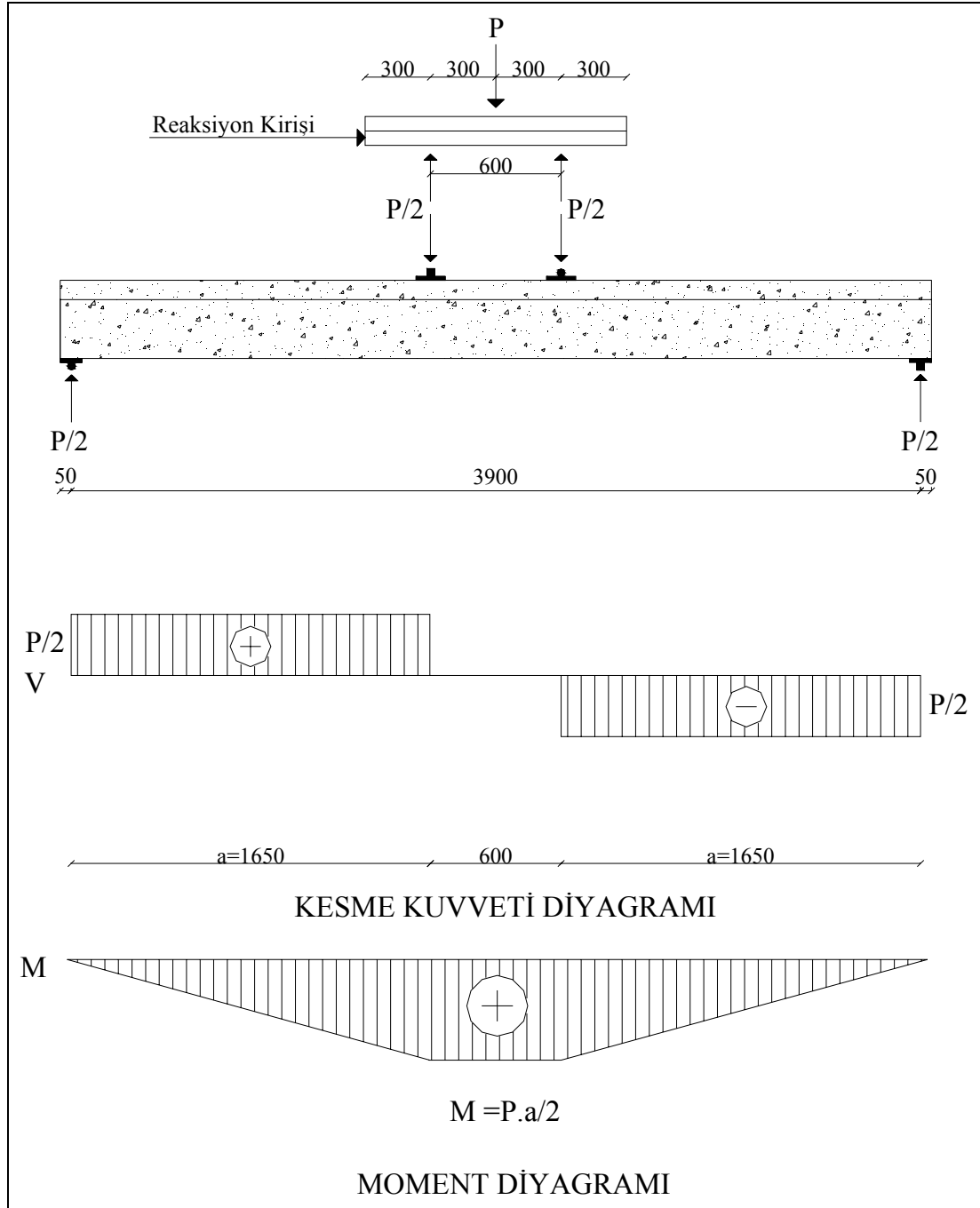
3.2. Yükleme ve Deney Düzen e ğ i

Çelik çerçeve U200 ve U305 çelik profillerinden üretilmiştir. Deney düzene ğ i 2345 mm boyunda 4 adet U305 çelik kolonlardan, 4610 mm boyunda 4 adet U305 çelik kirişlerden ve 800 mm boyunda 4 adet U200 bağlantı kirişlerinden oluşmaktadır.

Reaksiyon kiriş i, boyu 1200 mm olan 4 adet U200 profilden oluşmaktadır. Reaksiyon kiriş i simetrik biçimde mesnet aralığı 600 mm olan basit mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Reaksiyon kiriş inin orta noktasına küresel mesnetle uygulanan P büyüklüğündeki yük mesnetlere P/2 olarak aktarılmaktadır. Deney elemanlarının taşıyabildi ğ i maksimum yük olan göçme yükü bu P/2 büyüklüğündeki yük türüdür. Reaksiyon kiriş inin mesnedi ile kiriş mesnedi arasındaki mesafe 1650 mm'dir. Reaksiyon kiriş i ve kiriş altına, mesnetler ile kiriş arasına 10x100x200 mm çelik plakalar kullanılmış tır. Bunun amacı sabit ve kayar mesnetler ile kiriş arasında bir gerilme yığılmasına izin vermemek ve kiriş te oluşabilecek mesnet göçmesi durumunu engellemektir.

Yükleme Enerpac RRH-10010 (2000 kN ton basınç kapasiteli, maksimum deplasman verebilme yetisi 25,73 cm) yükleme hücresi ile uygulanmıştır. Hidrolik yükleme hücresin ucunda bulunan ve uygulanan yükü ölçmeye yarayan yük ölçme

hücresi bulunmaktadır. Yük ölçme hücresinin içerisinde yüzlerce birim deformasyon ölçer bulunmaktadır ve yük ölçme hücresinin kapasitesi 300 kN'dir. Yükleme, el kontrollü mekanik bir pompa ile uygulanmıştır. Yükleme bütün deneylerde sıfırdan başlayarak artırılmış, hasar verme deneylerinde yükleme belirli bir yük düzeyine kadar uygulanmıştır. Onarılma işlemlerinden sonra yüklemeye sıfırdan başlayarak göçme oluşuncaya kadar devam edilmiştir. Yüklemeden dolayı kirişte oluşan iç kuvvetler Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kirişte oluşan iç kuvvetler

3.3. Ölçüm Düzeni ve Deney Verilerinin Toplanması

Deneysel çalışmanın değerlendirilmesinde en önemli kriterlerden bir tanesi de ölçümlerin maksimum özenle toplanmasıdır. Ölçümler elektronik ortamda yüksek hassasiyette veri ölçer cihazlarla ölçülüp bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

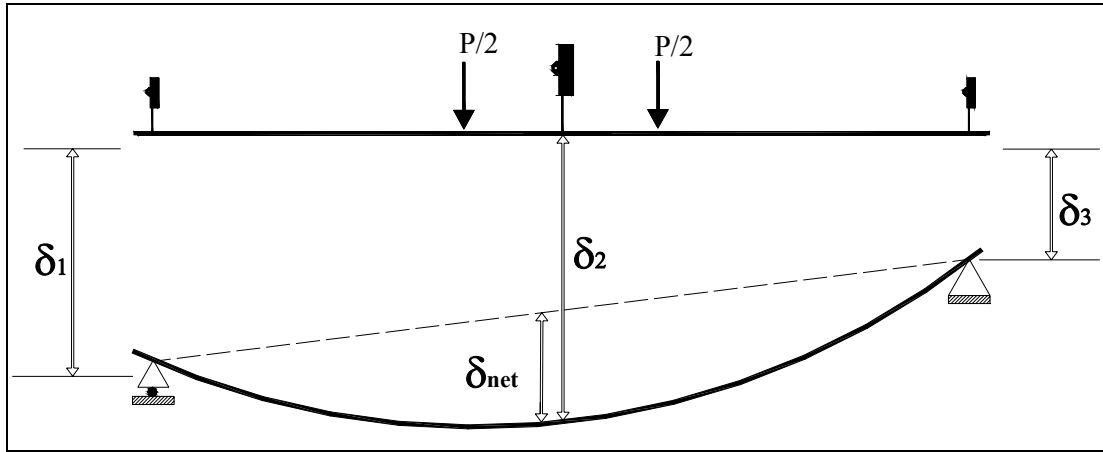
Ölçüm Aletleri ve Yerleşim Düzeni

Deneysel çalışmada deplasman ölçümleri 100×10^{-6} mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilen, doğrusal deplasman ölçerler (LVDT- Linear Variable Displacement Transducer) ve birim deformasyon ölçerlerle (Strain Gage) ölçülüp, bir okuyucu ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Doğrusal deplasman ölçerler ölçüm alınan bölgede, doğrusal yer değiştirmeyi vermektedir. Deneylerde her bir kiriş için 3 adet LVDT kullanılmıştır. LVDT'lerden bir tanesi orta nokta deplasmanını, diğer iki LVDT ise mesnet çökmelerini ölçmektedir. LVDT'lerin yerleşim şeması Şekil 3.2'de verilmiştir. Orta nokta deplasmanını ölçen elektronik doğrusal deplasman ölçer 200 mm kapasiteli 50×10^{-6} mm hassasiyetli olup, kiriş mesnetlerinde bulunan deplasman ölçerler ise 100 mm kapasiteleri 100×10^{-6} mm hassasiyetlidir. Ölçüm alınan bölgelerde LVDT'lerin kirişle temas ettiği yüzeylere cam yapıştırılmış ve deplasman ölçümleri maksimum hassasiyetle alınmaya çalışılmıştır. Birim deformasyon ölçerler sadece onarılan kirişlerin deneylerinde diyagonal yapıştırılan CFRP şeritlerin üzerine lif doğrultusuna paralel olacak şekilde kimyasal yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. CFRP şeritlerinin üzerindeki birim deformasyon ölçerler FLA 10-11 tipinde Tokyo Sokki firması tarafından üretilmiştir. 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. Kirişte oluşan gerilmeler, birim deformasyonlar aracılığı ile veri okuyucuya aktarılmaktadır. Birim deformasyon ölçerler kirişlerin sağ ve sol açıklıklarına eşit sayıda ve özellikle ana kesme çatlağının oluşabileceği bölgelerdeki şeritlere yapıştırılmıştır. 2, 3, 5 ve 6 numaralı deney elemanlarına 16'şar adet, 4 ve 7

δ_2 : Kiriş orta noktası düşey deplasmanı (mm)

δ_{net} : Kiriş orta noktası düşey net deplasmanı (mm)

Kiriş net orta deplasmanı, mesnetlerde oluşan mesnet çökmelerinin ortalamasının ölçülen orta nokta deplasmanından çıkarılması ile elde edilmektedir. Kiriş deformasyon geometrisi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kiriş deformasyon geometrisi

CFRP şeritlerinin birim uzama değerleri Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_o = -\frac{GF \times \epsilon}{4} \cdot \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \frac{\epsilon}{2}} \right) \cdot V_i \cdot \text{GAIN} \quad (3.2)$$

Eşitlikte;

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)

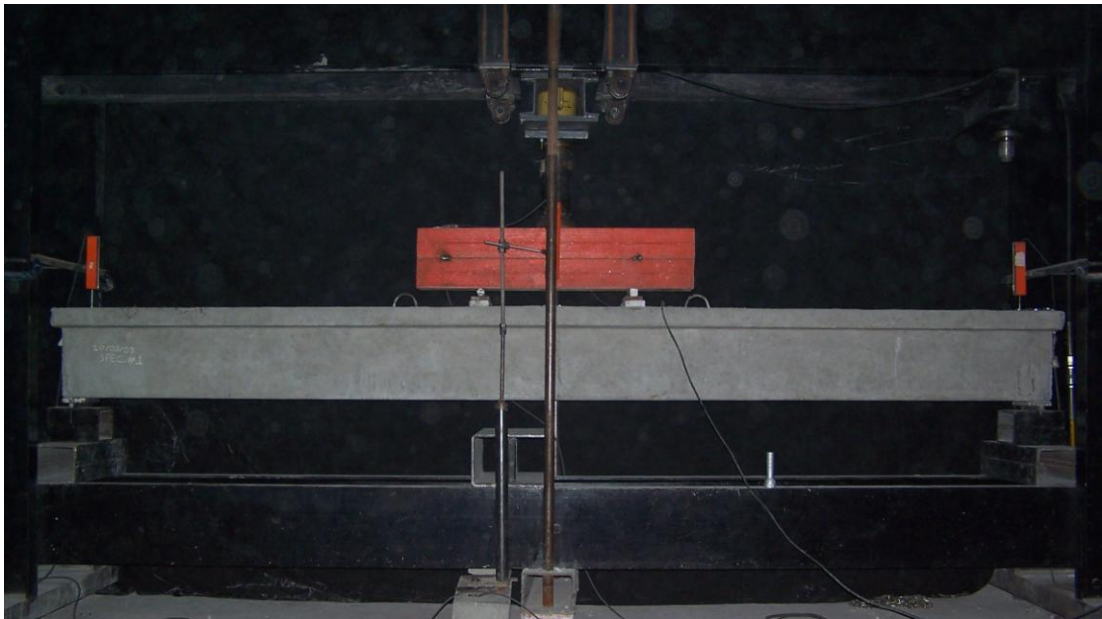
Eşitlikte başlangıç gerilimi (V_i) 5 V, uzama oranı (GF) 2, Kazanç faktörü (GAIN) 410 alınmıştır.

4. DENEYLER

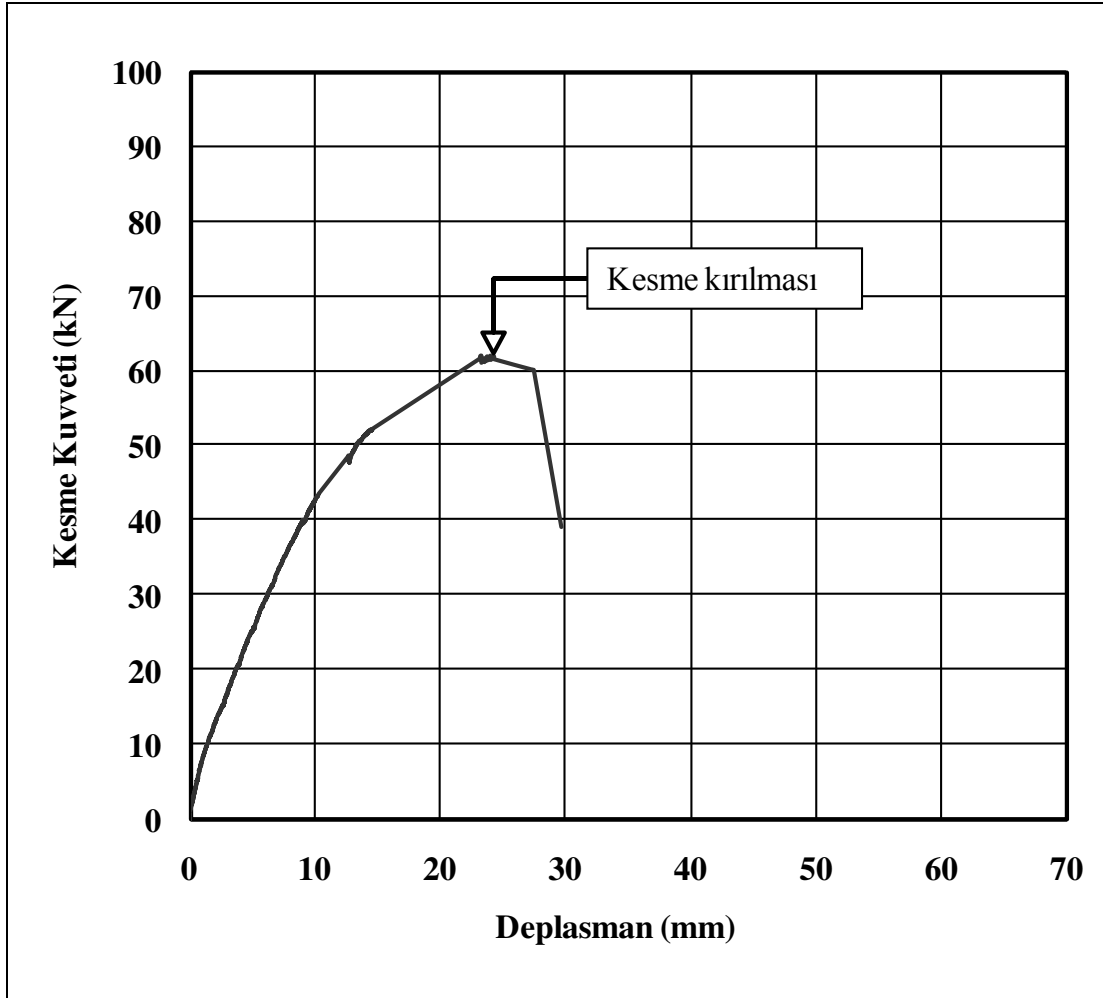
Bu bölümünde deneylerde gözlemlenen davranışlar açıklanmış, deneylerden elde edilen grafikler sunulmuştur. Deney elemanlarının yük-deplasman (yük kesme kuvvetini, deplasman kiriş orta nokta düşey net deplasmanını ifade etmektedir) ilişkileri, yük-birim deformasyon ilişkileri ve göçme modları açıklanmıştır. Referans deney elemanı dışındaki diğer deney elemanlarına kiriş kesme kuvveti kapasitesinin yaklaşık %80'ine kadar yükleme yapıp, deney elemanlarına hasar verdirilmiştir. Hasar verdirilen deney elemanları daha sonra diyagonal CFRP şeritler ve fan ankrajlar kullanılarak farklı konfigürasyonlar ile onarılmıştır. Onarım sonrası yük-deplasman grafiğinin başlangıç noktası, hasar verdirme deneyinde ölçülen kalıcı deplasman değeri olarak düşünülmüş, grafikler buna göre hazırlanmıştır.

4.1. Deney Elemanı 1

Onarılan diğer deney elemanlarına referans olma amacı ile yetersiz kesme donatılı olarak üretilen deney elemanıdır. Deneye hazır eleman Resim 4.1'de, deneyden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.



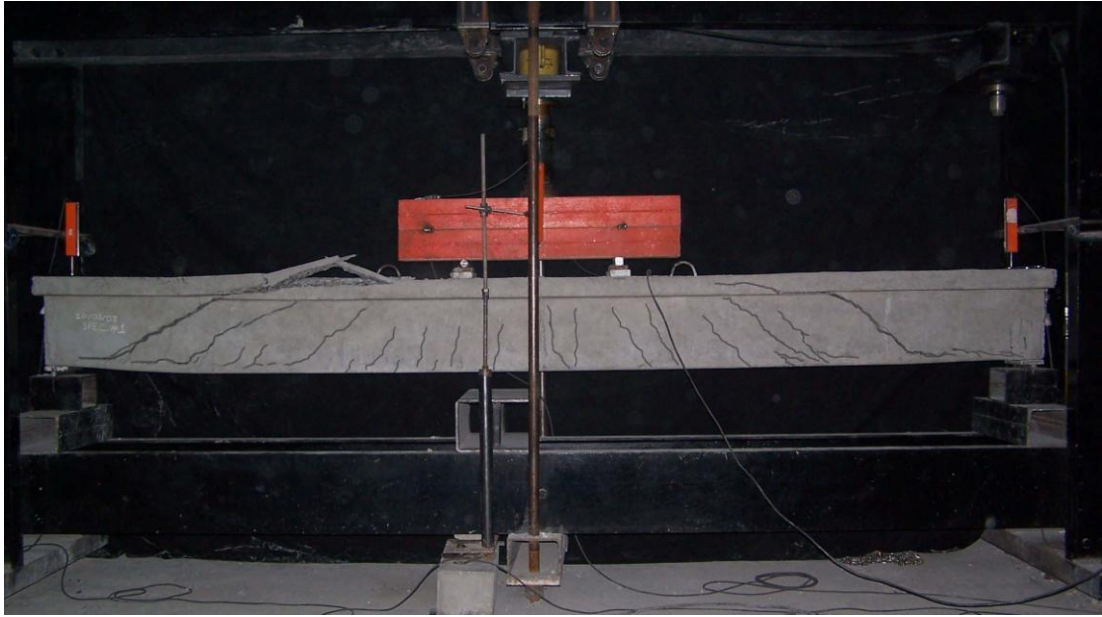
Resim 4.1. Deneye hazır kiriş, deney elemanı 1



Şekil 4.1. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 1

Kirişte ilk eğilme çatlağı sabit moment bölgesinde 8,04 kN yük düzeyinde oluşmuştur. Sol kesme açıklığında ilk eğik çatlak 14,53 kN, sağ kesme açıklığında ilk eğik çatlak 17,00 kN yük düzeyinde görülmüştür. 25,00 kN yük düzeyinde sabit moment bölgesinde eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Sol kesme açıklığında, 40,04 kN yük düzeyinde kirişin gövdesini bütünüyle kesen 45° eğik çatlağın genişlediği görülmüştür. 43,14 kN yük düzeyinde, eğik çatlak genişliği kiriş sağ kesme açıklığında 0,65 mm, sol kesme açıklığında 0,85 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca bu yük düzeyinde sağ kesme açıklığı boyunca, kirişin çekme donatılarının düzleminde aderans çatlağının oluştuğu gözlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde 43,14 kN yük düzeyinde sağ kesme açıklığında eğik çatlağı genişliği 1,00 mm, orta nokta deplasmanı 10,12 mm olarak ölçülmüştür. 58,00 kN yük düzeyinde kirişin sağ

kesme açıklığında çatlaklarının iyice belirginleştiği gözlenmesine rağmen, kiriş 62,07 kN yük düzeyinde 23,99 mm orta nokta deplasmanında sol kesme açıklığından eğik çekme kırılması sonucu göçmüştür. Deney elemanın göçmeden sonraki genel görünüşü Resim 4.2’de, sol kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı detayı Resim 4.3’te verilmiştir.



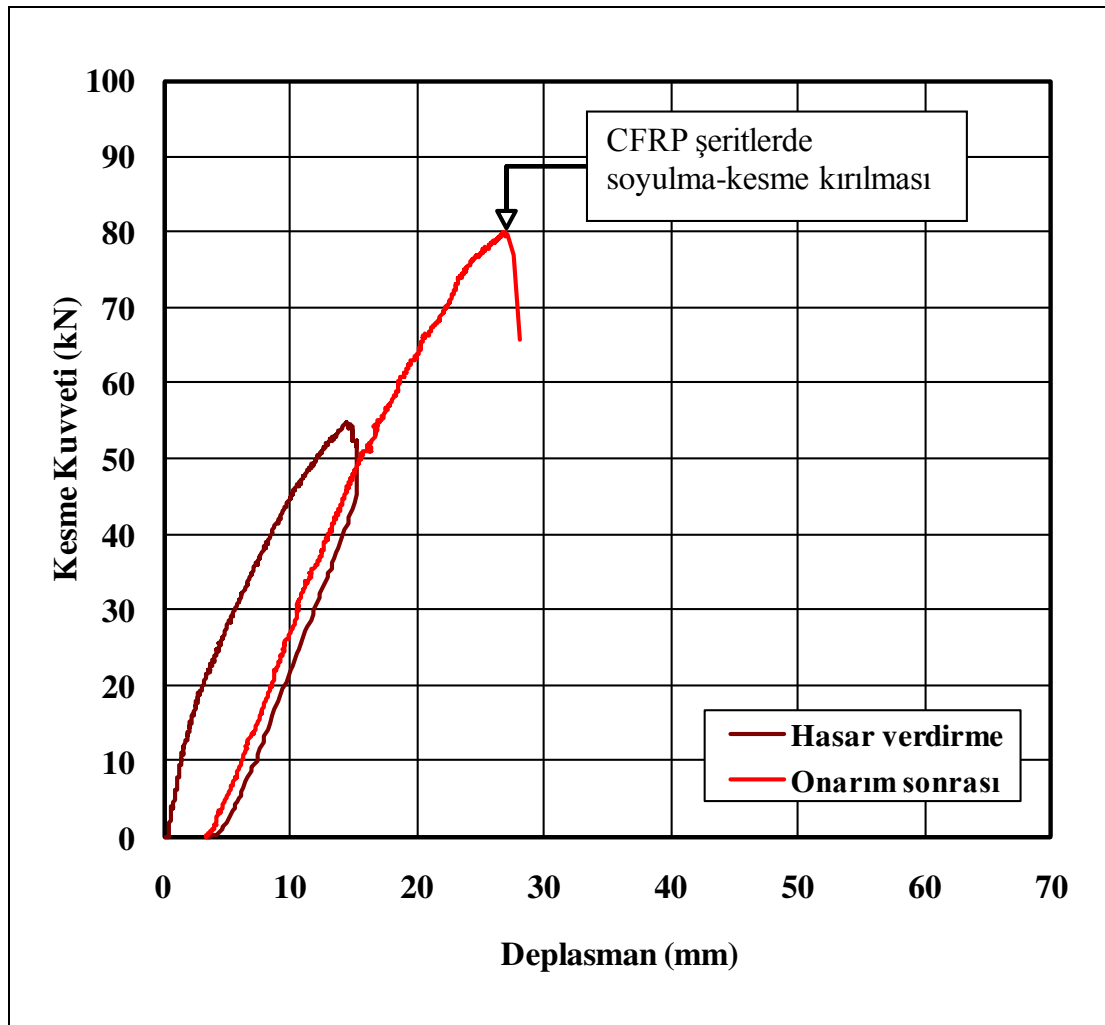
Resim 4.2. Göçmeden sonra deney elemanı, deney elemanı 1



Resim 4.3. Sol kesme açıklığı ana kesme çatlağı, deney elemanı 1

4.2. Deney Elemanı 2

Deney elemanı 2, eksenleri arası 125 mm olan diyagonal CFRP şeritlerle fan ankrajlı onarılan deney elemanıdır. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 4.2’de, yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.3’te verilmiştir.

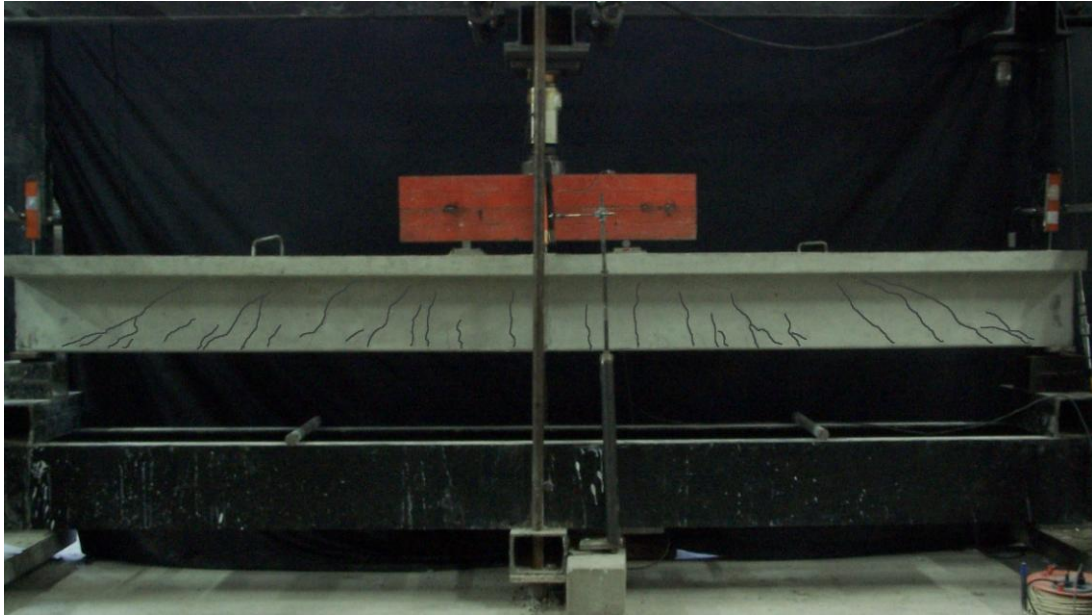


Şekil 4.2. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 2

Hasar Verdirme Deneyi

Yüklemeye başlandıktan sonra 22,61 kN yük düzeyinde 3,64 mm orta nokta deplasmanda, sabit moment bölgesinde ilk eğilme çatlak oluşmuştur. İlk eğik çatlak sol kesme açıklığında 41,14 kN yük düzeyinde 8,75 mm deplasmanda oluşmuştur.

45,84 kN yük düzeyinde 10,31 mm deplasmanda sağ kesme açıklığında ana eğik çatlak meydana gelmiştir. 51,05 kN yük düzeyinde eğik çatlakların sayısında artış ve eğik çatlakların tablaya kadar ulaştığı gözlenmiştir. Eğik çatlaklar bu yük düzeyinden sonra çekme donatısının hizasında mesnet bölgesine doğru aderans çatlaklarına dönüşmüştür. 54,79 kN yük düzeyinde 14,41 mm deplasmanda deneye son verilmiştir. Yük boşaltıldıktan sonraki kalıcı orta noktası deplasmanı 3,24 mm, sol kesme açıklığındaki maksimum çatlak genişliği 1,20 mm, sağ kesme açıklığındaki kesme çatlak genişliği 0,40 mm olarak ölçülmüştür. Kesme hasarı verilen kirişin genel görünüşü Resim 4.4'te verilmiştir.



Resim 4.4 Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 2

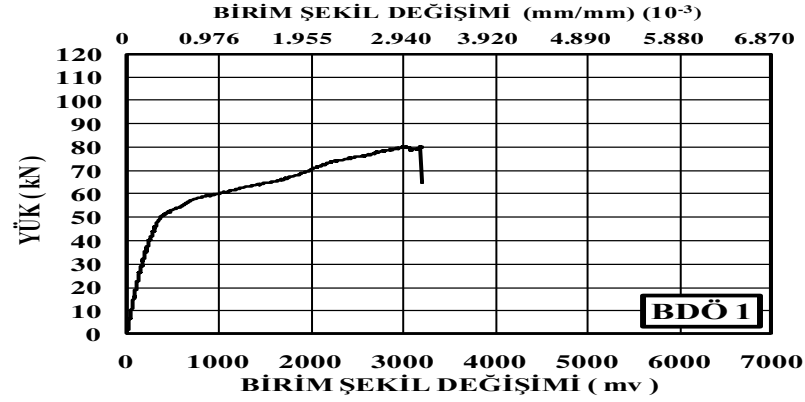
Onarım Sonrası Deneyi

Eksenleri arası yatay mesafe 125 mm olan diyagonal CFRP şeritler ile fan ankrajsız onarılan deney elemanın onarım sonrası deneyinde, 35,24 kN yük düzeyi ve 11,55 mm deplasmanda, sabit moment bölgesinde mevcut eğilme çatlaklarında ilerleme ve yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Bu yük düzeyinden sonra yüklemeye devam edilmiş ve 70,99 kN yük düzeyinde 22,46 mm orta nokta deplasmanında eğilme çatlakları tablaya kadar ulaşmıştır. Sol kesme açıklığında 78,23 kN yük

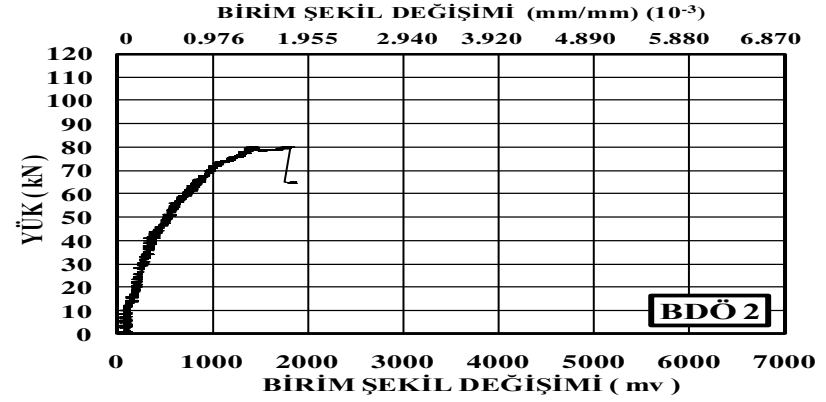
düzeyinde 25,61 mm orta nokta deplasman değerinde maksimum çatlak genişliği 1,40 mm olarak ölçülmüştür. Sol kesme açıklığında bulunan ana kesme çatlakına denk gelen 21 numaralı CFRP şeridin tabla ile birleştiği bölgede kiriş yüzeyinden soyulmaya başladığı gözlenmiştir. 80,08 kN yük düzeyinde 26,85 mm orta nokta deplasmanda kiriş sağ kesme açıklığında eğik çekme kırılması sonucu kiriş göçmüştür. 12 numaralı birim deformasyon ölçerde oluşan maksimum birim deformasyon değeri 0,0049 mm/mm olarak ölçülmüştür. 4, 5, 10, 13 ve 16 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,0040-0,0045 mm/mm arasında değişmiştir. Göçme sonrası kiriş genel görünüşü Resim 4.5'te verilmiştir.



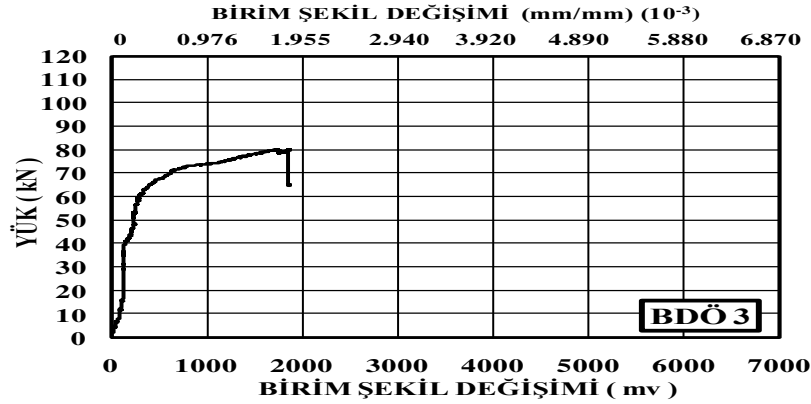
Resim 4.5. Göçmeden sonra, deney elemanı 2



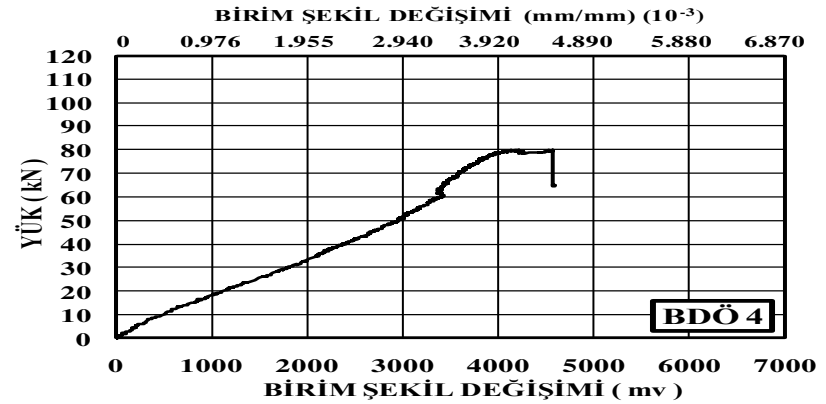
a)



b)



c)

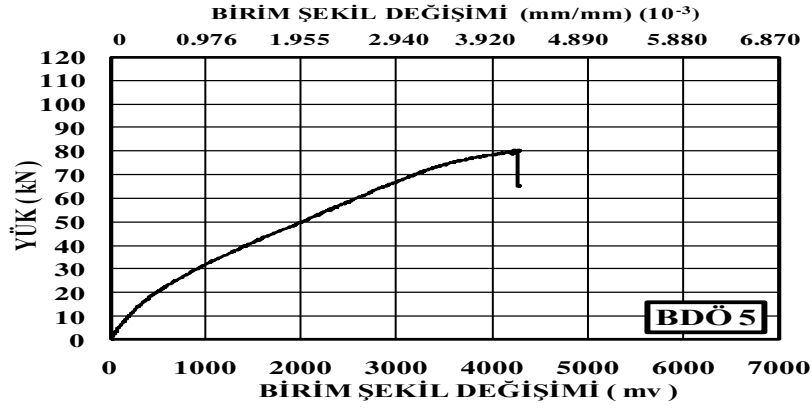


d)

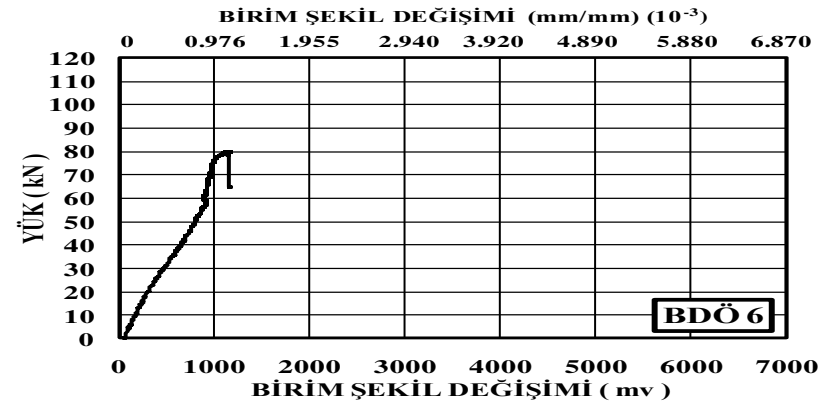
Şekil 4.3 Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11

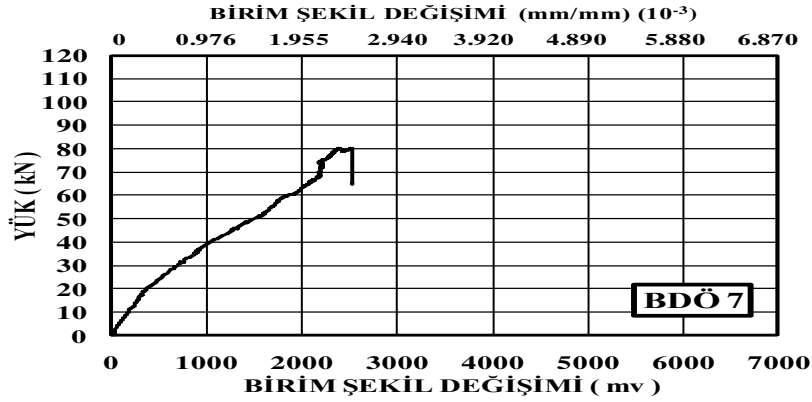
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



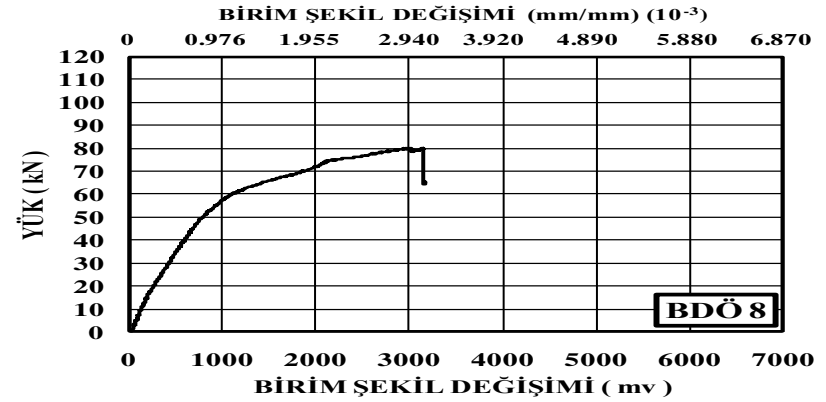
e)



f)



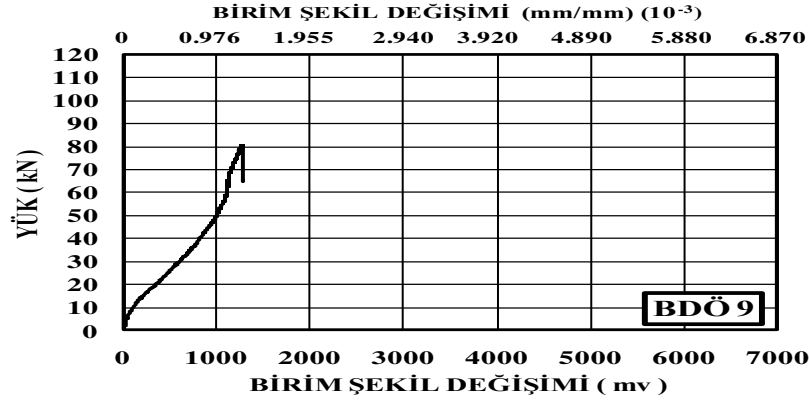
g)



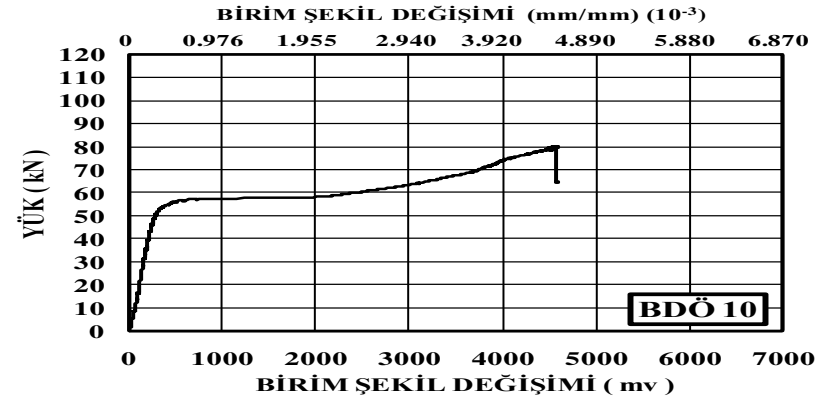
h)

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

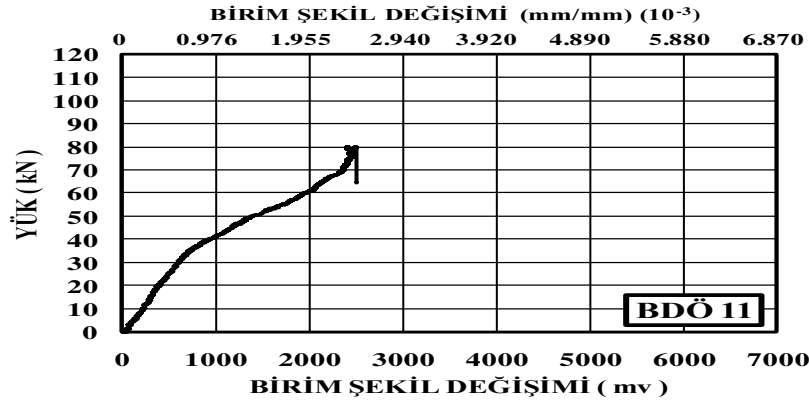
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



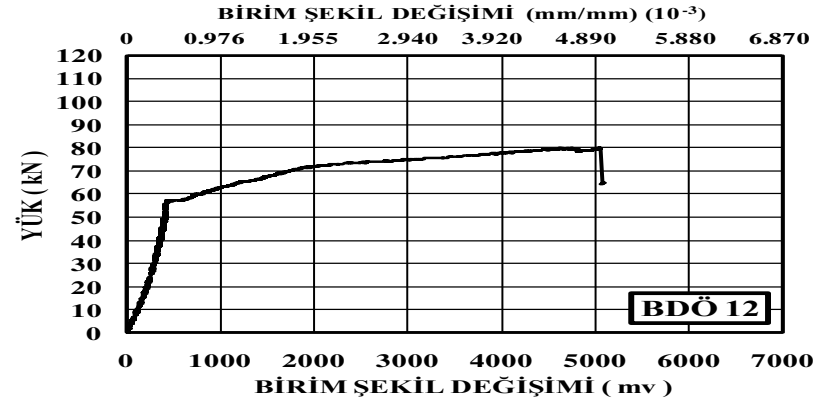
i)



j)



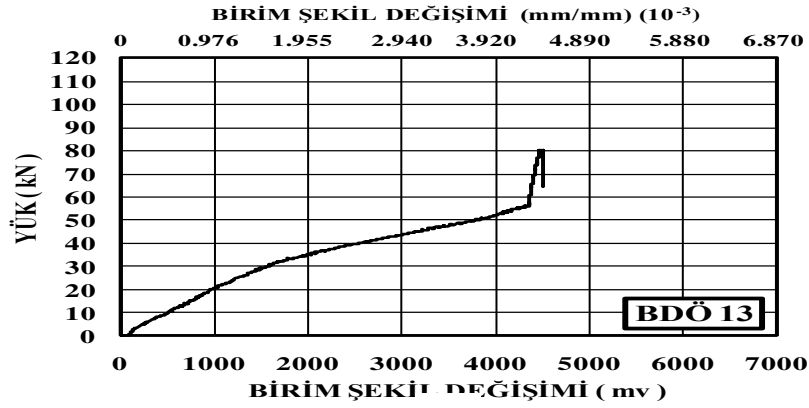
k)



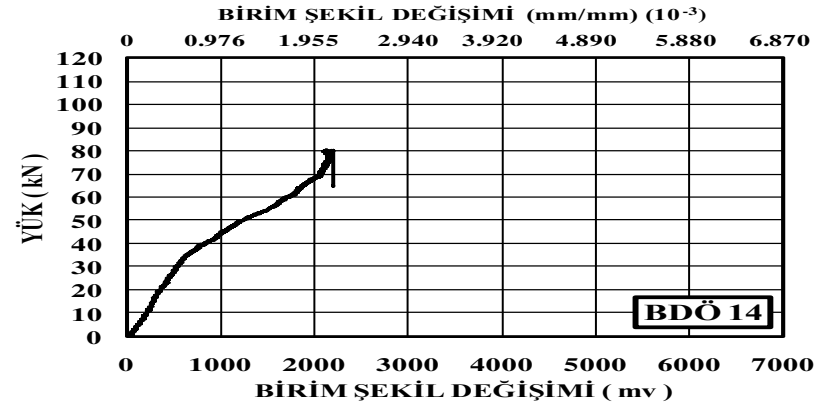
l)

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

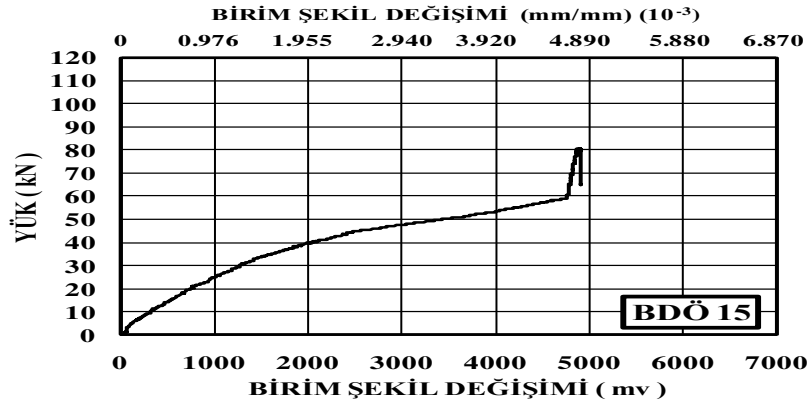
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



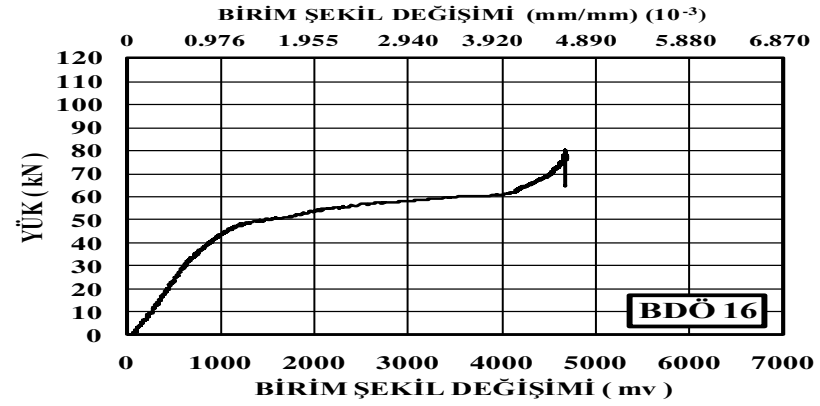
o)



n)



m)



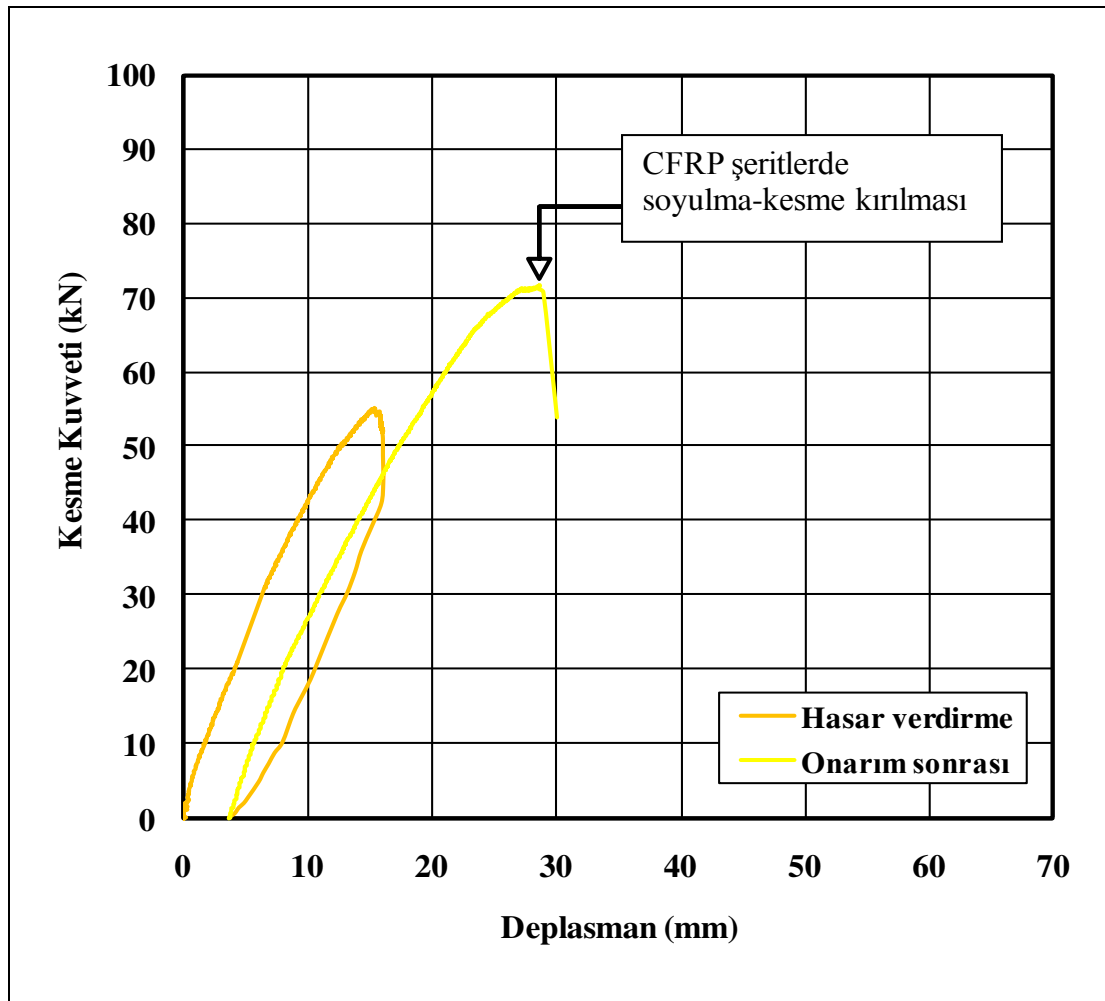
p)

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

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16

4.3. Deney Elemanı 3

Deney Elemanı 3, eksenleri arası yatay mesafe 150 mm olan diyagonal CFRP şeritlerle onarılan fan ankrajsız deney elemanıdır. Deney elemanın yük-deplasman grafiği Şekil 4.4’de, yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.5’te verilmiştir.

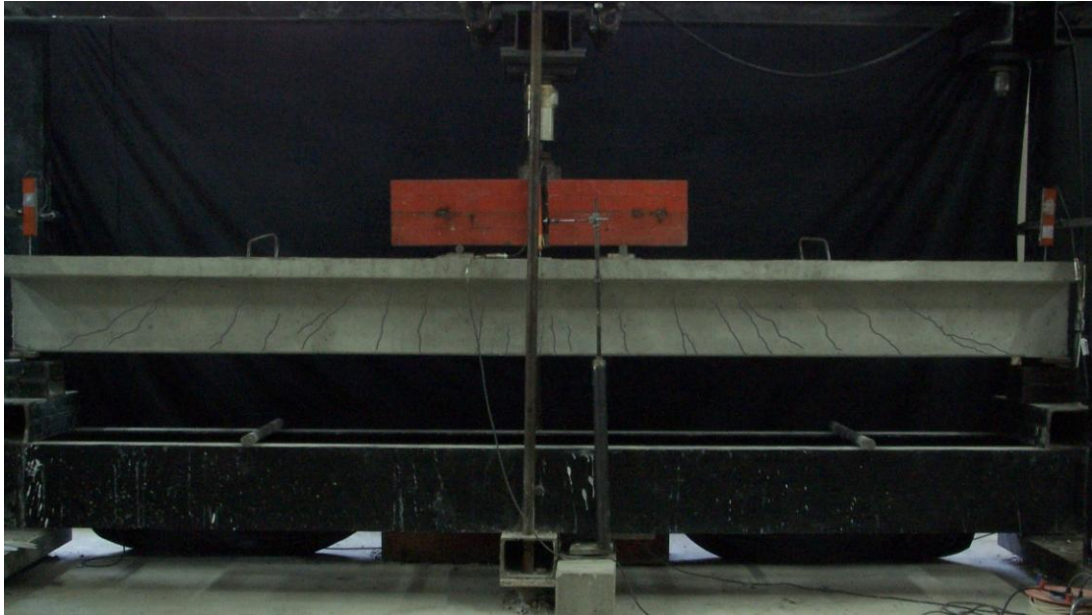


Şekil 4.4. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 3

Hasar Verdirme Deneyi

Hasar verdirme deneyinde ilk eğilme çatlağı sabit moment bölgesinde 20,94 kN yük düzeyinde 4,26 mm orta nokta deplasmanında oluşmuştur. Sol kesme açıklığında ilk eğik çatlak 46,24 kN yükte 10,21 mm deplasmanda, sağ kesme açıklığında ilk eğik

çatlak 47,38 kN yük düzeyinde 11,57 mm kiriş orta nokta deplasmanında oluşmuştur. 55,28 kN yük düzeyinin de 15,33 mm orta nokta deplasmanında eğik çatlaklar aderans çatlaklarına dönüşmüş, tablaya kadar ulaşmış ve deneye bu yük seviyesinde deneye son verilmiştir. Sol kesme açıklığında maksimum eğik çatlak genişliği 1,60 mm, sağ kesme açıklığında maksimum eğik çatlak genişliği 0,70 mm olarak ölçülmüştür. Yük boşaltıldıktan sonra kirişin kalıcı orta nokta deplasmanı 3,61 mm olarak ölçülmüştür. Sol kesme açıklığında maksimum kalıcı eğik çatlak genişliği 1,20 mm, sağ kesme kesme açıklığında maksimum eğik çatlak 0,40 mm'dir. Kesme hasarlı deney elemanı Resim 4.6'da verilmiştir.



Resim 4.6. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 3

Onarım Sonrası Deneyi

Hasar verme deneyinden sonra elemana eksenleri arası yatay mesafesi 150 mm olan diyagonal CFRP şeritlerle onarılmıştır. Kirişinin onarım sonrası deneyinde 35,76 kN yük düzeyine kadar kirişte herhangi bir çatlak oluşumu ve CFRP şeritlerde gerilme artışı gözlenmemiştir. Bu yük düzeyinde 12,74 mm orta nokta deplasmanda 3 numaralı CFRP şeritte gerilme seviyesinde artış gözlenmiştir. 44,56 kN yük düzeyinde 15,75 mm orta nokta deplasmanında sabit moment bölgesinde eğilme

çatlaklarında artış oluşmuştur. 69,00 kN yükte 3 numaralı CFRP şeritteki gerilmeler artmaya devam etmiştir. 71,69 kN yükte 28,61 mm deplasmanda kiriş, sol kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı ile kesişen 6 adet diyagonal CFRP şerit kiriş üst tablası ile birleşim noktasından soyularak eğik çekme kırılması sonucu göçmüştür. CFRP şeritlerin kiriş alt gövdesi ile birleştiği bölgeye yapıştırılan CFRP parçalar aderans çatlaklarının ilerlemesini engellemiştir. 4 numaralı CFRP şeritte deformasyon ölçerde oluşan maksimum birim deformasyon değeri 0,0058 mm/mm olarak ölçülmüştür. 1, 2 ve 4 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,0053-0,056 mm/mm arasında değişmiştir. Diğer birim deformasyon ölçerlerin maksimum birim deformasyon değerleri 0,0009-0,0047 mm/mm arasında değişmiştir. Göçme sonrası deney elemanı Resim 4.7’de verilmiştir. Sol kesme açıklığında oluşan ana kesme çatlağı Resim 4.8’de, sol kesme açıklığında oluşan CFRP şeritlerin soyulması Resim 4.9’da verilmiştir.



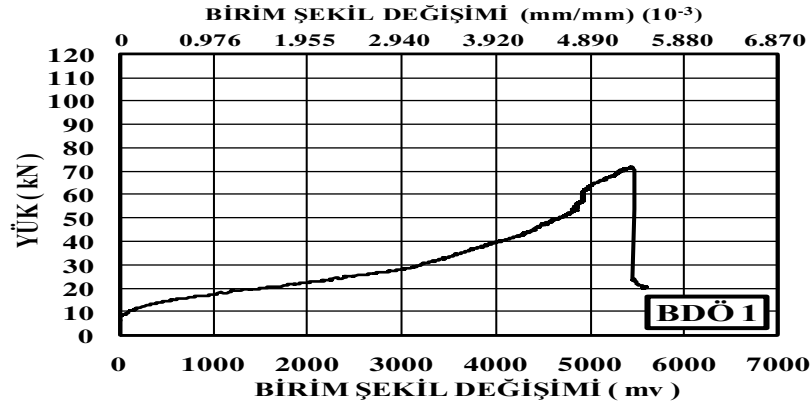
Resim 4.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 3



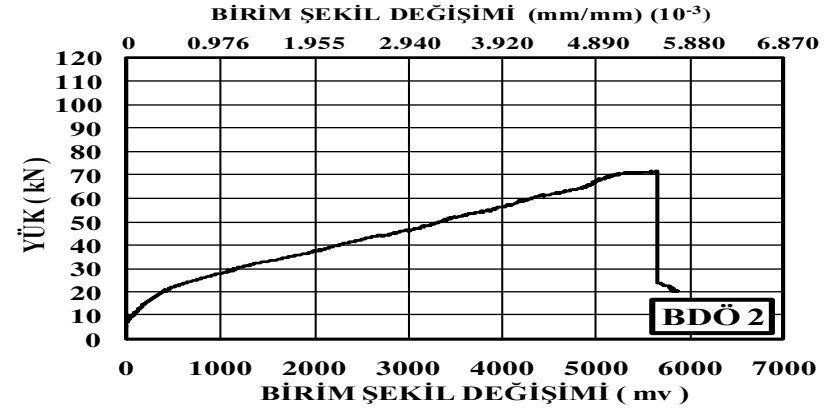
Resim 4.8. Sol kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı, deney elemanı 3



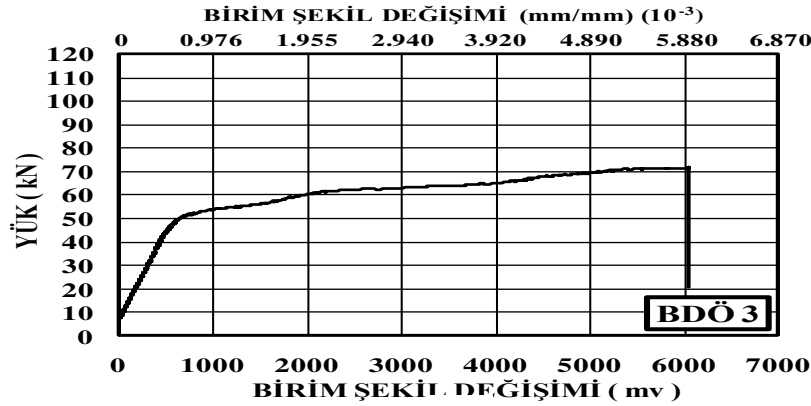
Resim 4.9. CFRP şeritlerde soyulma, deney elemanı 3



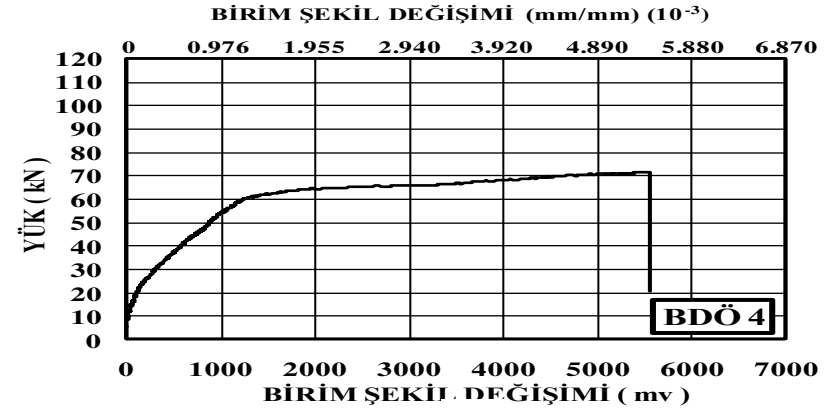
a)



b)



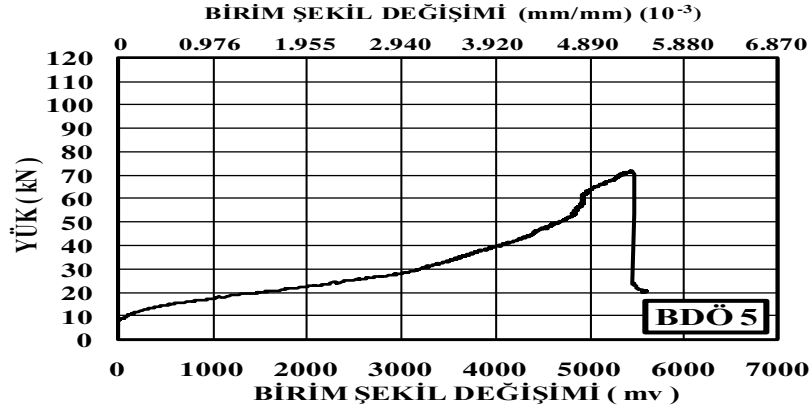
c)



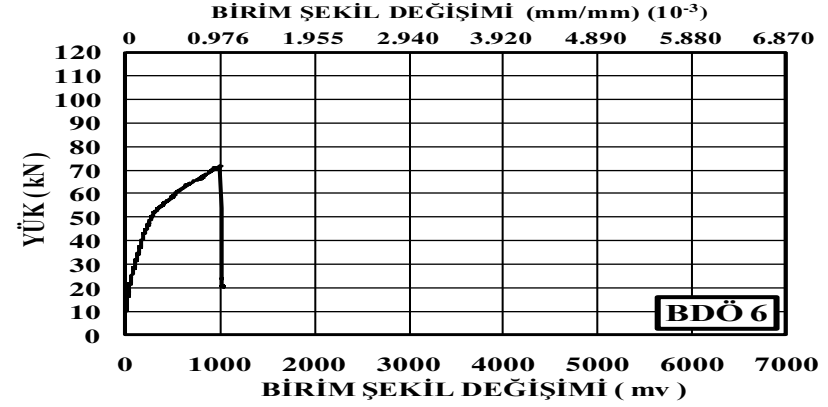
d)

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

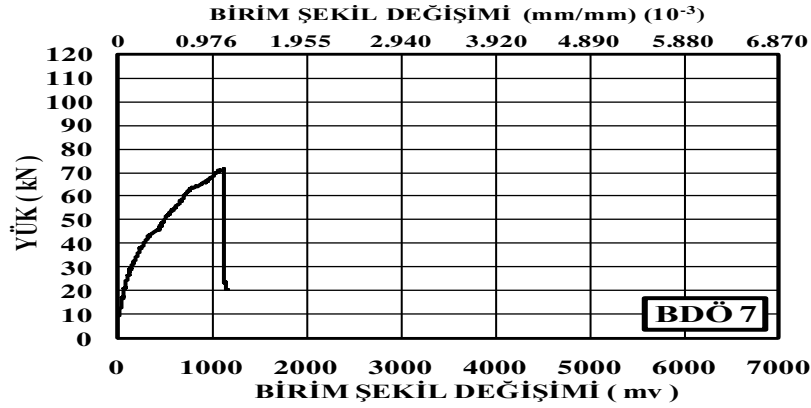
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



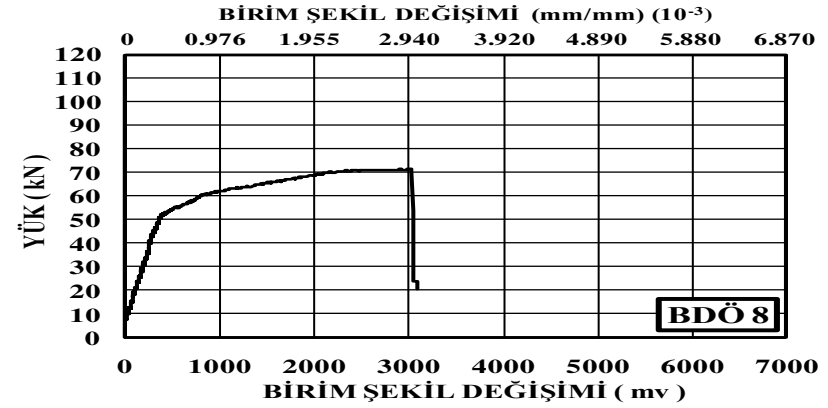
e)



f)



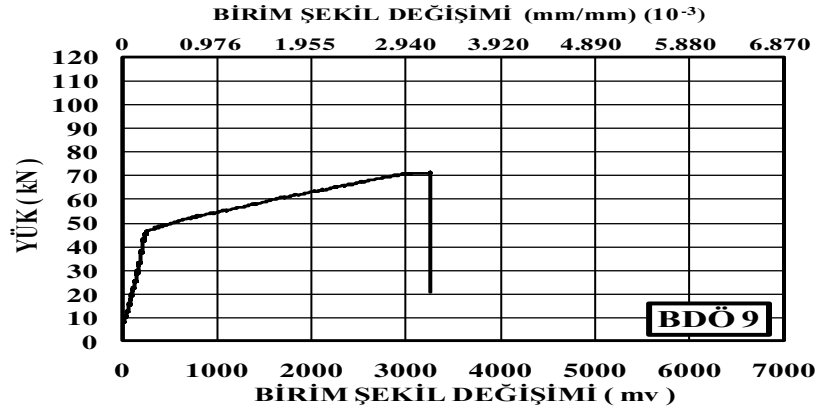
g)



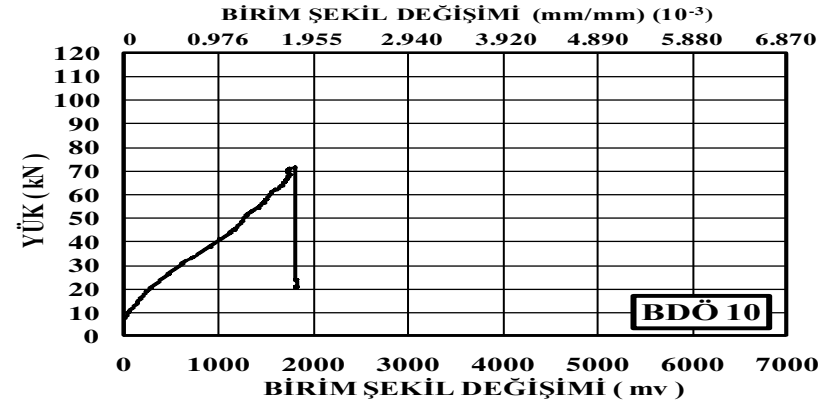
h)

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

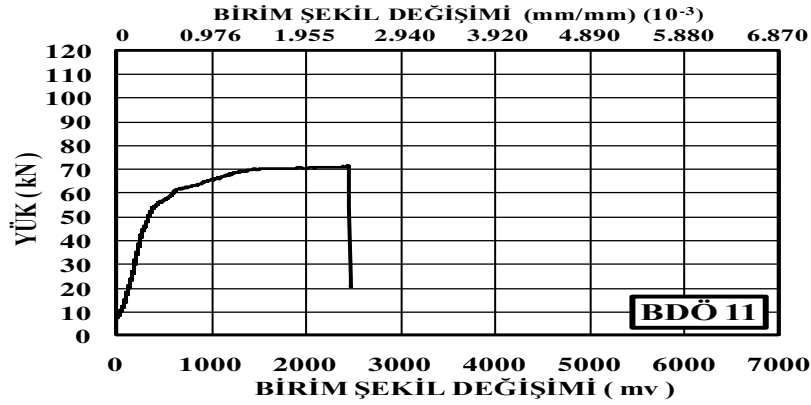
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



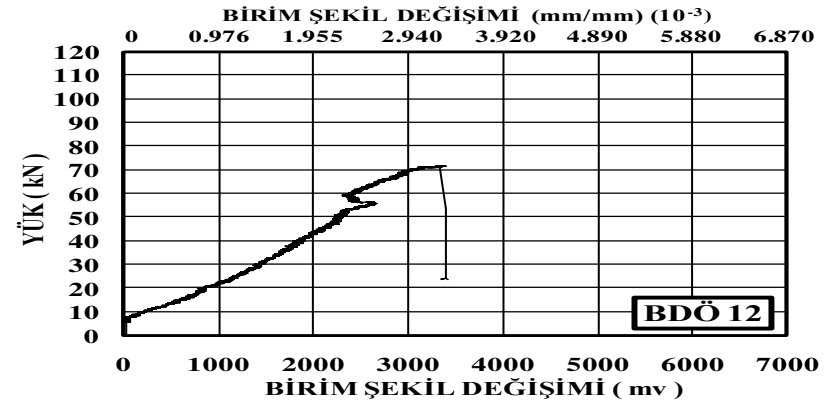
i)



j)



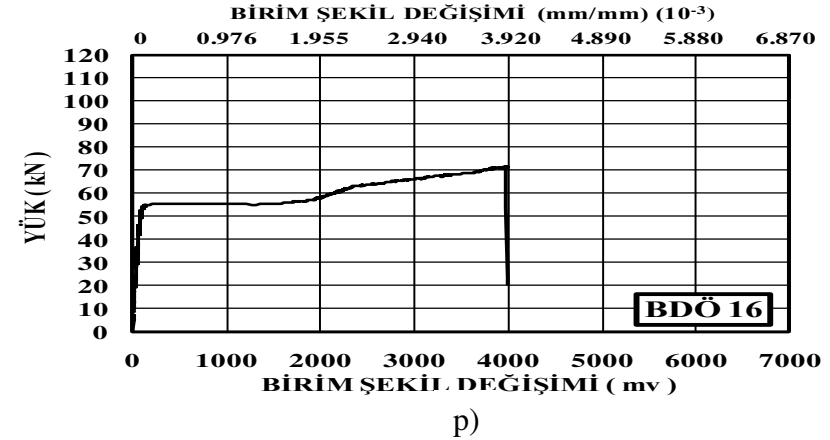
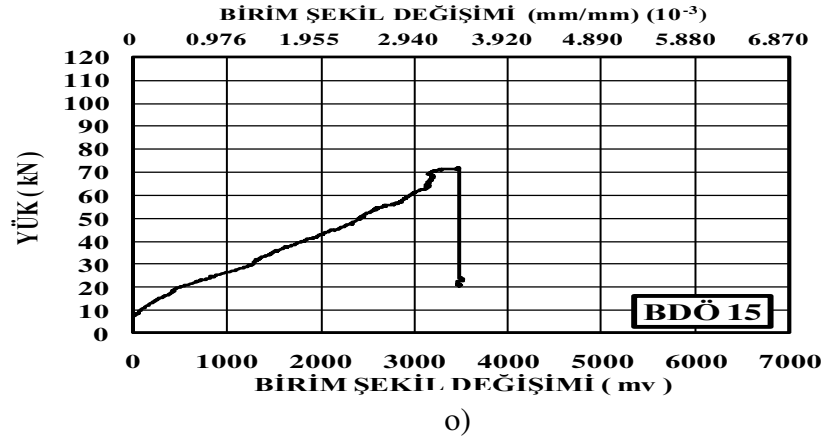
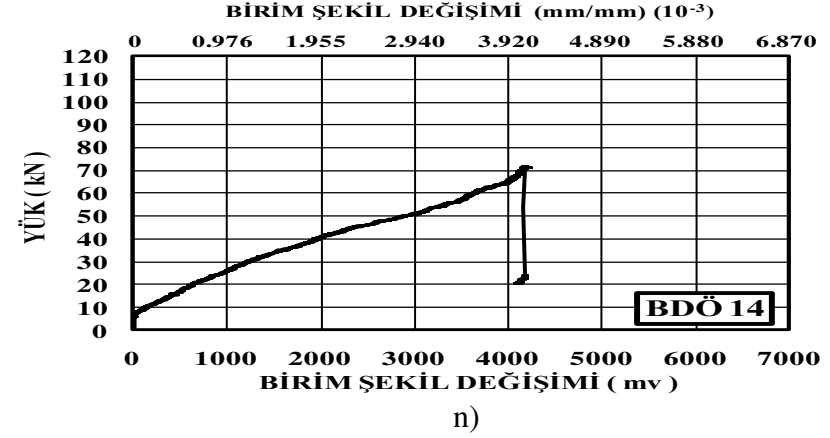
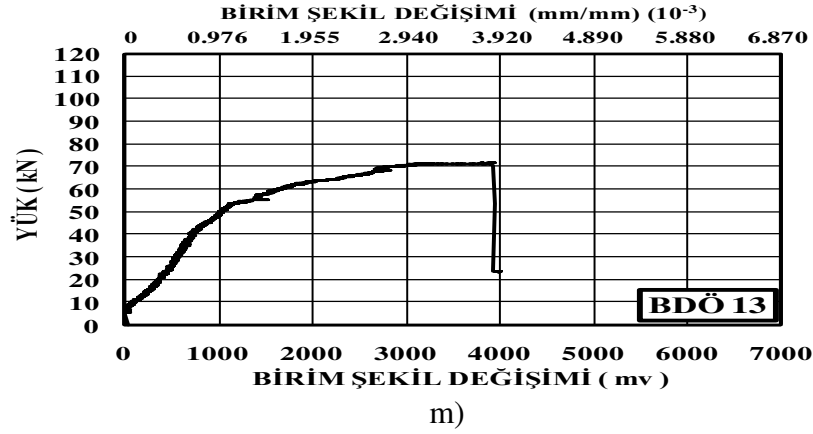
k)



l)

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

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16

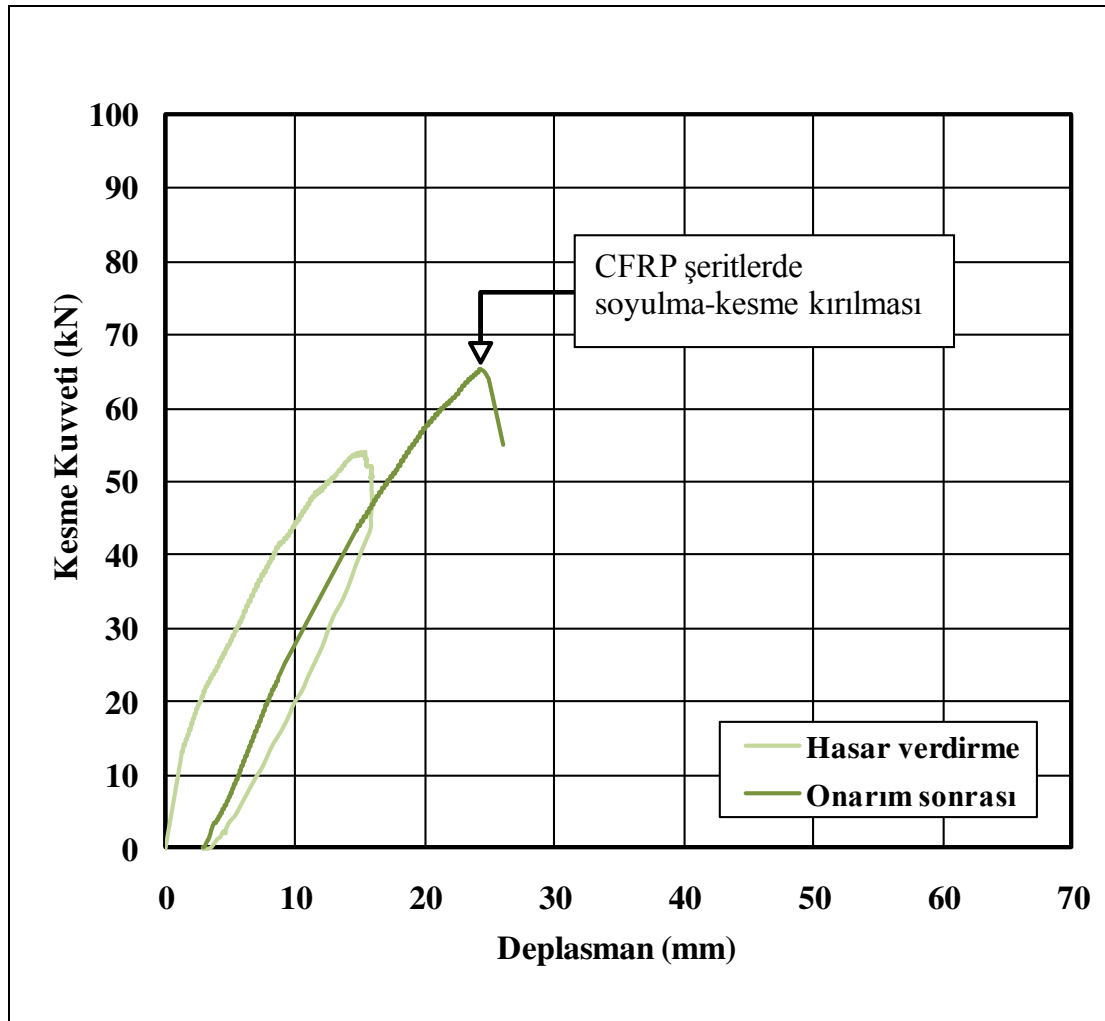


Şekil 4.5 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16

4.4. Deney Elemanı 4

Diyagonal CFRP şeritlerle onarılan, şeritlerin eksenleri arası yatay mesafesi 200 mm olan deney elemanıdır. Elemanına fan ankraj uygulaması yapılmamıştır. Deneylerden elde edilen veriler ışığında yük-deplasman grafiği Şekil 4.6'da, yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.

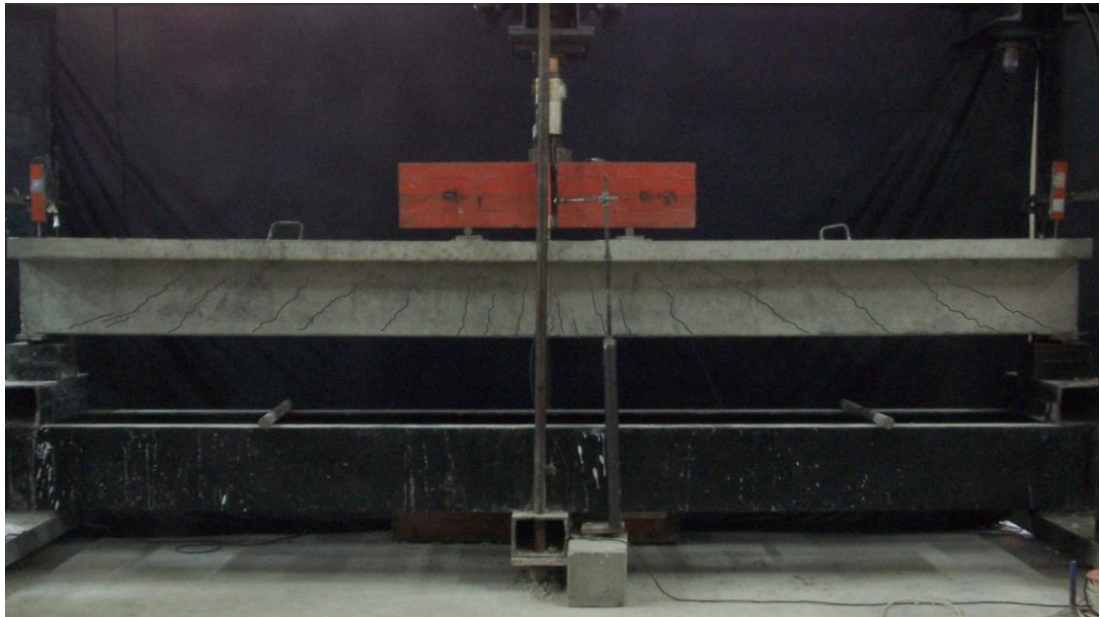


Şekil 4.6. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 4

Hasar Verdirme Deneyi

Hasar verdirme deneyinde ilk eğilme çatlağı 22,01 kN yük düzeyinde 2,74 mm deplasmanda sabit moment bölgesinde kılcal düzeyde görülmüştür. Sağ kesme

açıklığında, 38,96 kN yük düzeyinde 7,97 mm deplasmanda ilk eğik çatlak oluşmuştur. 48,97 kN yük düzeyinde 12,13 mm orta nokta deplasman değerinde sol kesme açıklığında eğik çatlaklar belirgin hale gelmiştir. Bu yük düzeyinden sonra her iki kesme açıklığında da eğik çatlaklar kiriş tablasına kadar ulaşmış ve çekme donatısının hizasında sağ ve sol mesnet bölgelerine doğru aderans çatlağı oluşmuştur. 53,95 kN yük düzeyinde 15,41 mm orta nokta deplasman seviyesinde deney son verilmiştir. Bu yük düzeyinde sol kesme açıklığında maksimum eğik çatlak genişliği 1,40 mm, sağ kesme açıklığında maksimum eğik çatlak genişliği 0,70 mm olarak ölçülmüştür. Yük boşatıldıktan sonra kalıcı deplasman 3,30 mm, kalıcı çatlak genişliği sol kesme açıklığında 1 mm ve sağ kesme açıklığında 0,40 mm'dir. Elemanın kesme hasarı sonrası deney elemanı Resim 4.10'da verilmiştir.



Resim 4.10. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 4

Onarım Sonrası Deneyi

Onarım işlemi tamamlanan deney elemanında, 43,55 kN yük düzeyine kadar kirişte yeni bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. 47,73 kN yük düzeyine erişildikten sonra 2 numaralı birim deformasyon ölçerde gerilme seviyesinde artış gözlenmiştir ve bu CFRP şeridin bulunduğu çatlakta bu yük düzeyindeki çatlak genişliği 1,60 mm

olarak ölçülmüştür. 57,75 kN yük düzeyinde 20,27 mm orta nokta deplasmanında sabit moment bölgesinde eğilme çatlaklarında hızlı bir artış olmuştur. 63,13 kN yük düzeyinde eğilme çatlakları tablaya kadar ulaşmıştır ve bu yük düzeyinden sonra CFRP şeritlerdeki gerilmelerde ani artış oluşup, kiriş 65,37 kN yük düzeyinde, 24,14 mm deplasmanda sol kesme açıklığında eğik çekme kırılması ile kiriş göçmüştür. Sol kesme açıklığında ölçülen en geniş kesme çatlağının olduğu bölgede liflerin kiriş tablası ile birleştiği bölgede beton yüzeyinden soyuldu ve kesmeden göçmüştür. Kiriş alttan yapıştırılan 100 mm x 250 mm'lik CFRP parçaların aderans çatlakların şeritlerin altına girmesini ve gelişmesini engellemiştir. 2 numaralı birim deformasyon ölçerde oluşan maksimum birim deformasyon değeri 0,0058 mm/mm olarak ölçülmüştür. 1 ve 3 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,0055 mm/mm olarak ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde, maksimum birim deformasyon değerleri 0,0032 mm/mm'yi geçmemiştir. Göçme sonrası kiriş deney elemanı Resim 4.11'de verilmiştir. Sol kesme açıklığı ana kesme çatlağı Resim 4.12'de, CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulma Resim 4.13'te verilmiştir.



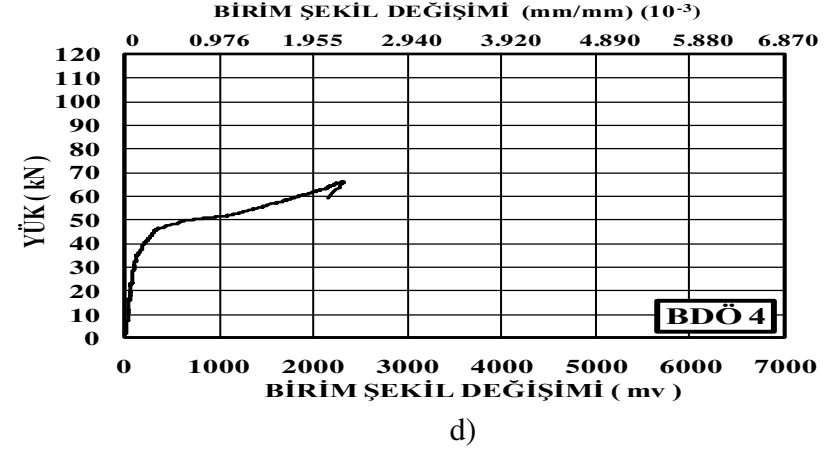
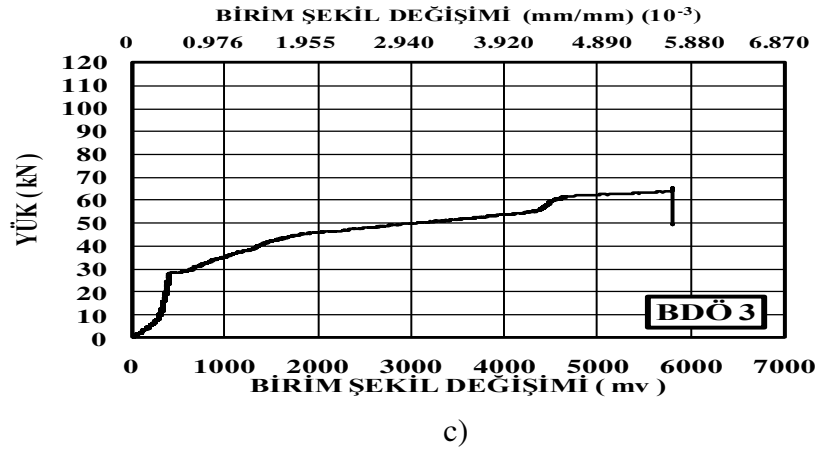
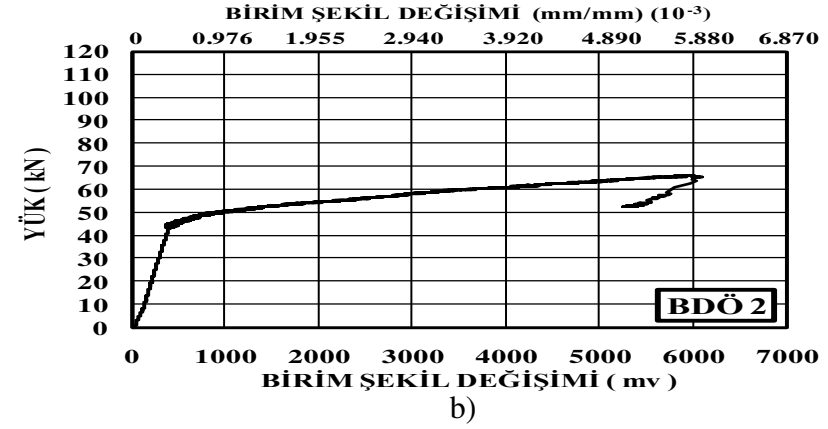
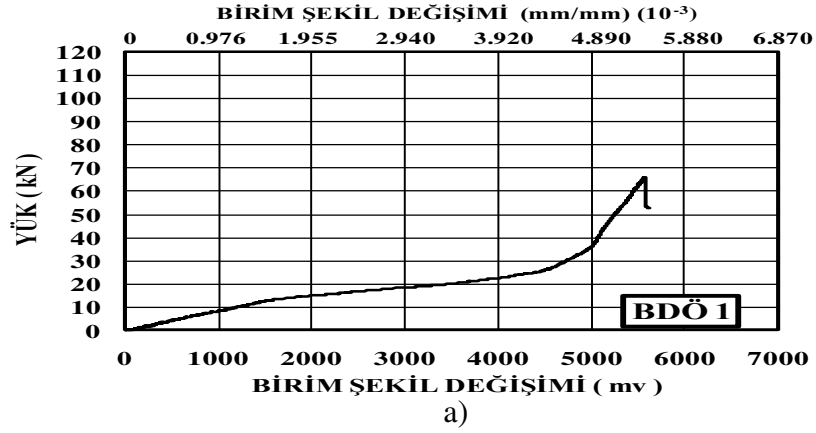
Resim 4.11. Göçme sonrası, deney elemanı 4



Resim 4.12. Sol kesme açıklığı ana kesme çatlağı (kiriş diğer yüzü), deney elemanı 4

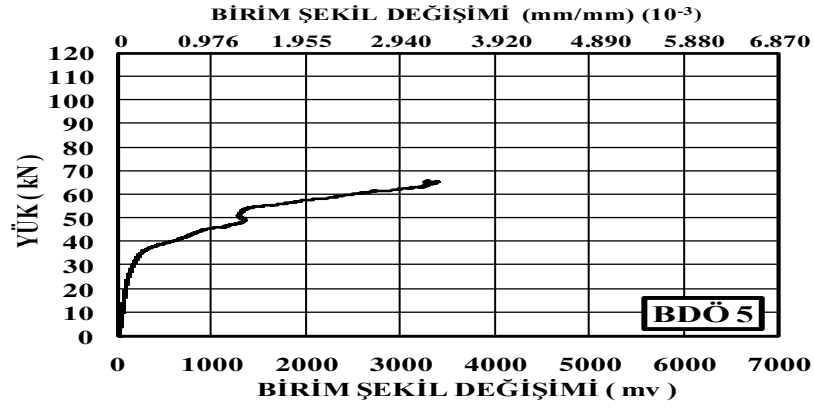


Resim 4.13. CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması, deney elemanı 4

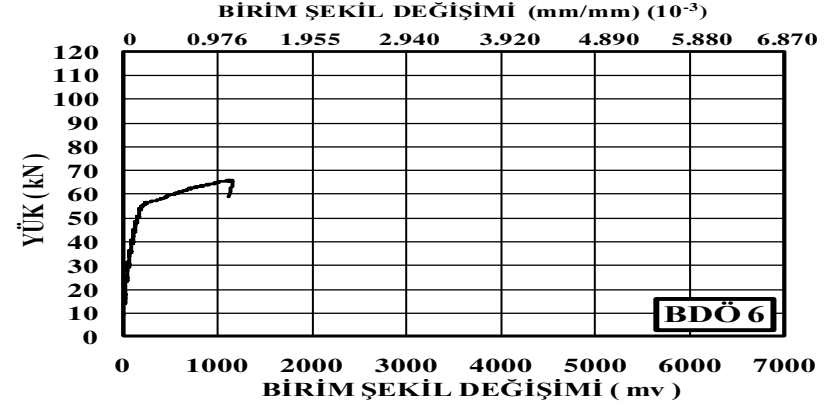


Şekil 4.7. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 4

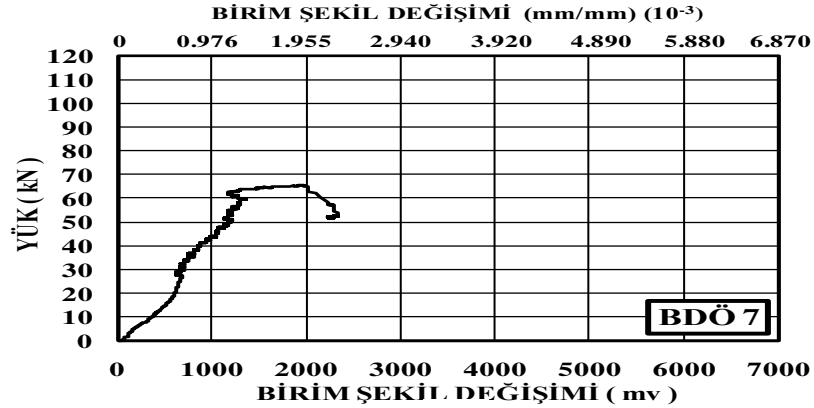
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10



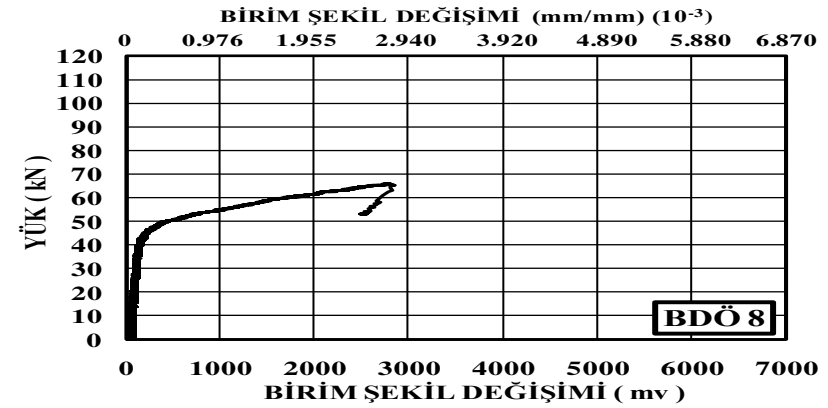
e)



f)



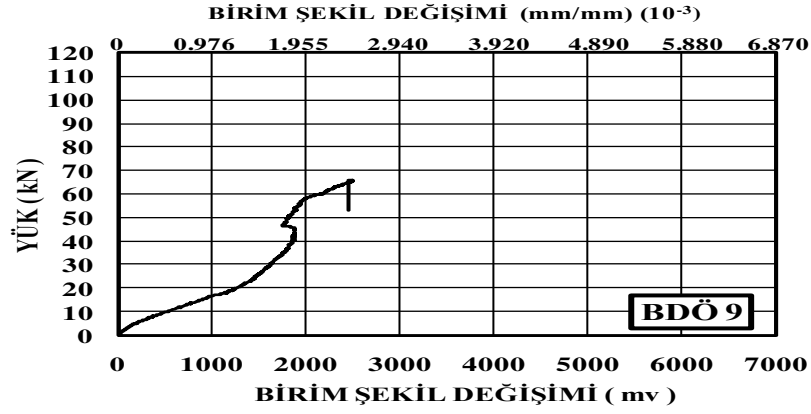
g)



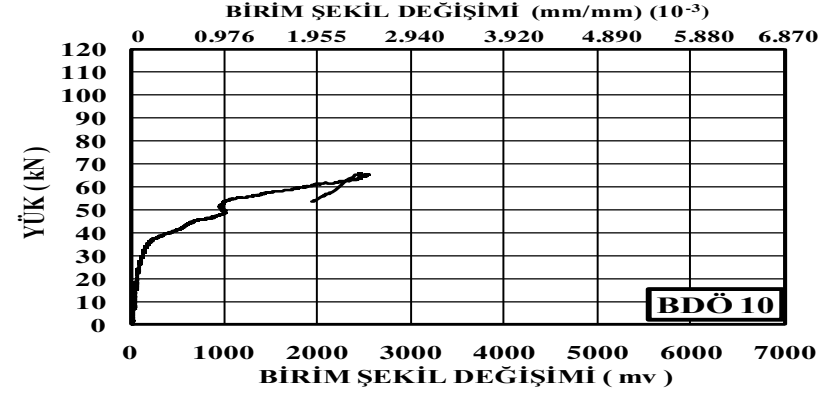
h)

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

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10



i)



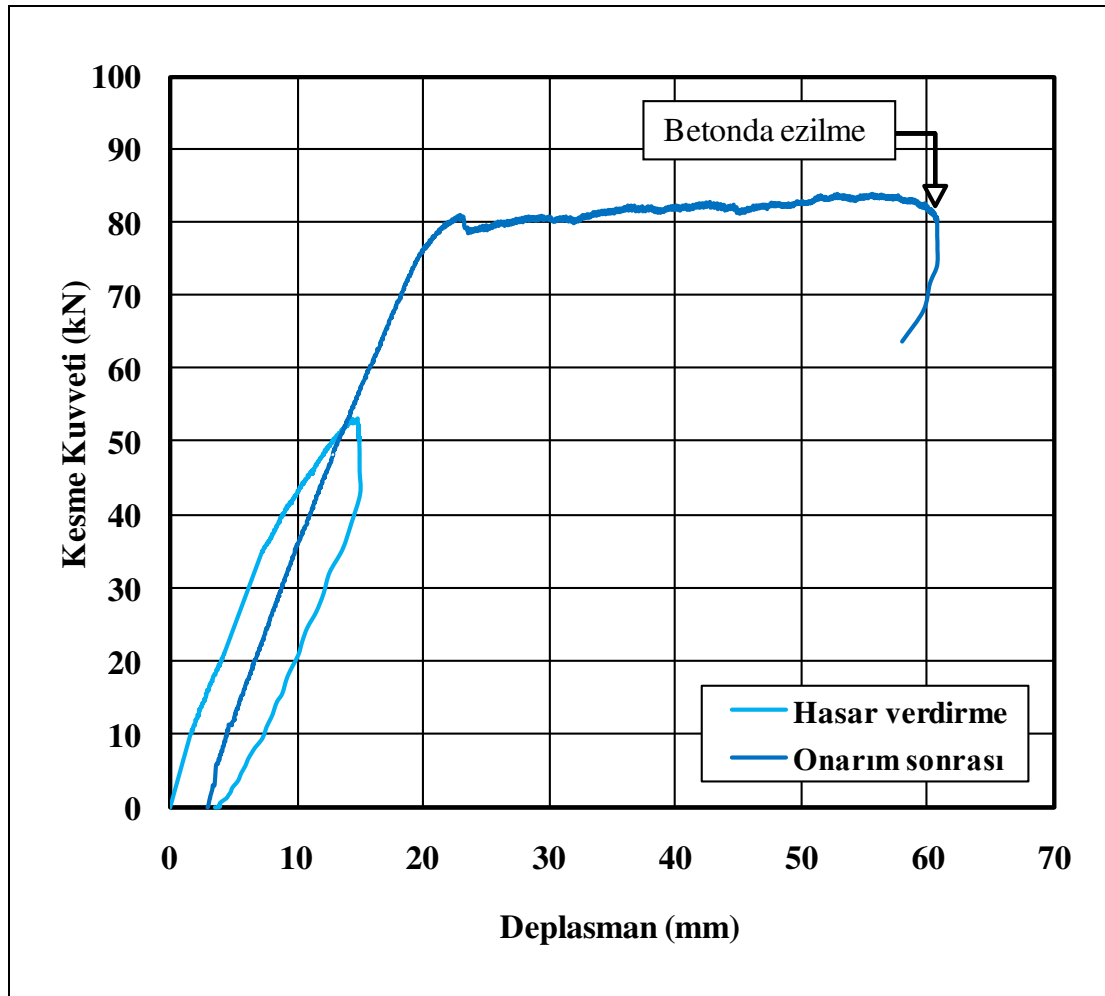
j)

Şekil 4.7 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3,

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10

4.5. Deney Elemanı 5

Eksenleri arası yatay mesafe 125 mm olan diyagonal CFRP şeritlerle ve CFRP şeritlere uygulanan fan ankrajlarla onarılan deney elemanıdır. Deney elemanının yük-deplasman grafiği Şekil 4.8’de, yük-birim deformasyon ilişkileri Şekil 4.9’da verilmiştir.

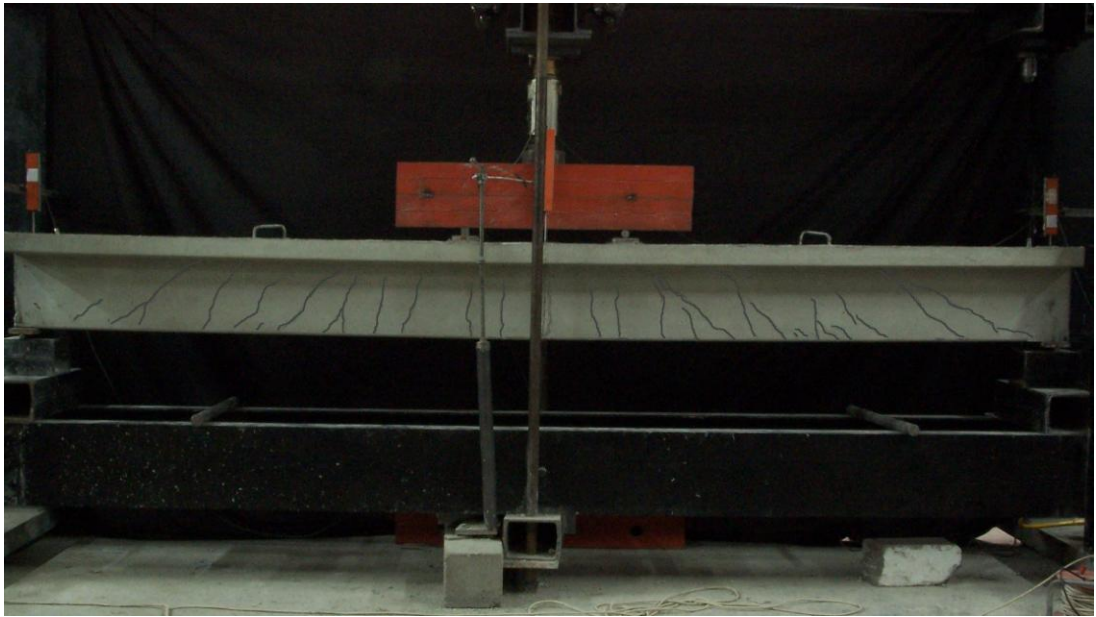


Şekil 4.8. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 5

Hasar Verme Deneyi

Kesme hasar verme deneyinde ilk eğilme çatlağı 16,08 kN yük düzeyinde, 2,93 mm orta nokta deplasmanında oluşmuştur. Yük düzeyinin artmasıyla 24,41 kN yükte 4,59

mm deplasmanda sabit moment bölgesinde eğilme çatlaklarında artış gözlenmiştir. Kirişte ilk eğik çatlak sol kesme açıklığında 33,50 kN yükte, 6,83 mm orta nokta deplasmanında oluşmuştur. 47,03 kN yük düzeyinde 11,12 mm deplasmanda sağ ve sol kesme açıklığında bulunan ana eğik çatlaklarda artış olduğu ve eğik çatlakların tablaya kadar ulaştığı gözlenmiştir. Deneye 53,94 kN yükte, 15,34 mm orta nokta deplasman değerinde deneye son verilmiştir. Maksimum eğik çatlak genişliği sol kesme açıklığında 0,70 mm sağ kesme açıklığında 0,60 mm olarak ölçülmüştür. Deneye son verildikten sonra kalıcı maksimum eğik çatlak genişliği sağ ve sol kesme açıklığında maksimum kalıcı eğik çatlak genişlikleri 0,50 mm, kalıcı orta nokta deplasmanı 2,89 mm'dir. Kesme hasarı sonrası deney elemanı 5 Resim 4.14'de verilmiştir.



Resim 4.14. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 5

Onarım Sonrası Deneyi

Merkezleri arası yatay mesafe 125 mm olarak yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerle, fan ankrajlarla onarılan kirişinin onarım sonrası deneyinde 24,46 kN yük düzeyi 7,66 mm deplasman seviyesine kadar kirişte yeni bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bu yük seviyesinde ölçülen maksimum çatlak genişliği sol kesme açıklığında 1,00

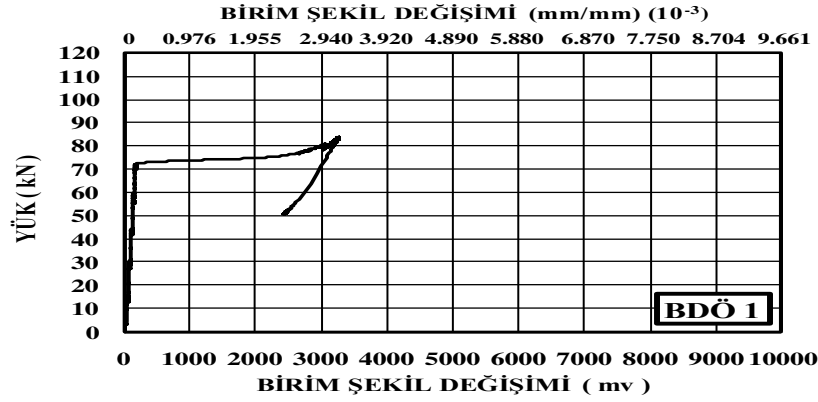
mm'dir. Yüklemeye devam edildiğinde 65,55 kN yük düzeyinde 17,20 mm deplasmanda sabit moment bölgesinde kılcal düzeyde olmak üzere yeni eğilme çatlaklarının oluşumu gözlenmiştir. Bu yük seviyesinden sonra 72,15 kN yük düzeyinde 18,79 mm orta nokta deplasmanında eğilme çatlakları kiriş tablasına kadar ulaşmıştır. Kiriş çekme donatıları, 81,16 kN yük düzeyinde 22,99 mm orta nokta deplasmanında akmıştır. Yüklemeye devam edilmiş ve 80,26 kN yük düzeyinde kiriş 60,74 mm orta nokta deplasmanı yapmıştır. Bu deplasman düzeyinde eğilme çatlakları 1,60 mm ye kadar genişlemiş ve kirişin sabit moment bölgesinde beton ezilerek kiriş göçmüştür. 4 numaralı birim deformasyon ölçerde oluşan maksimum birim deformasyon değeri 0,0082 mm/mm olarak ölçülmüştür. 2, 3, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ve 16 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri 0,0050-0,0080 mm/mm arasında değişmiştir. Elemanın göçme sonrası Resim 4.15'te, beton basınç bölgesinin ezilmesi Resim 4.16'da verilmiştir.



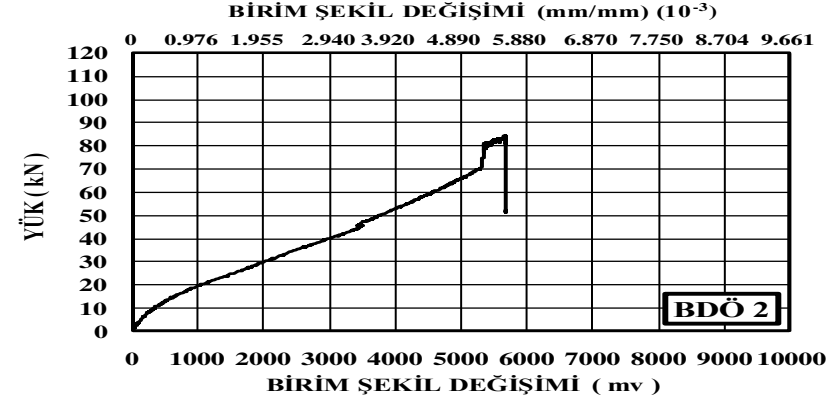
Resim 4.15. Göçme sonrası, deney elemanı 5



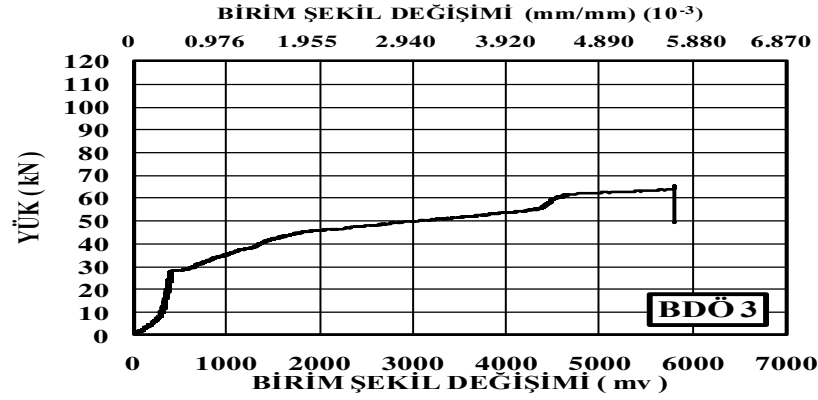
Resim 4.16. Beton basınç bölgesinin ezilmesi, deney elemanı 5



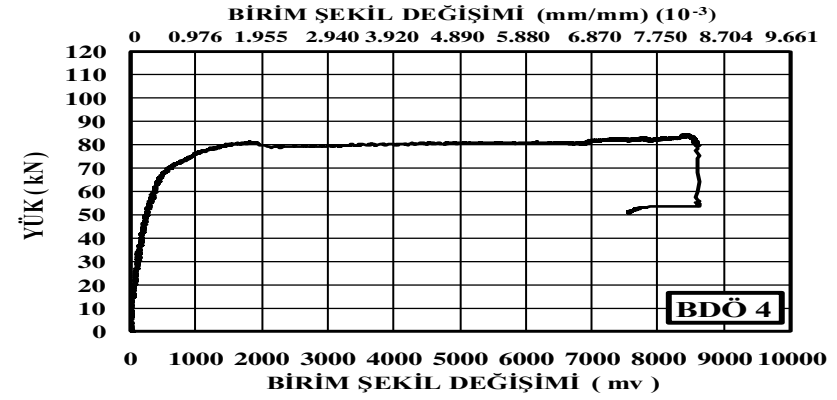
a)



b)



c)

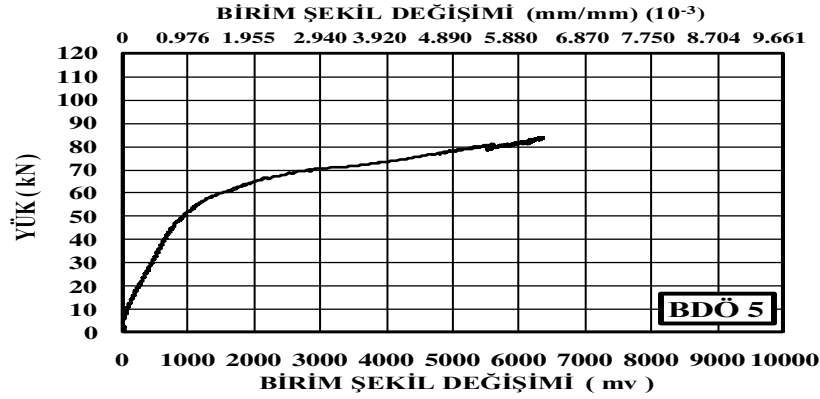


d)

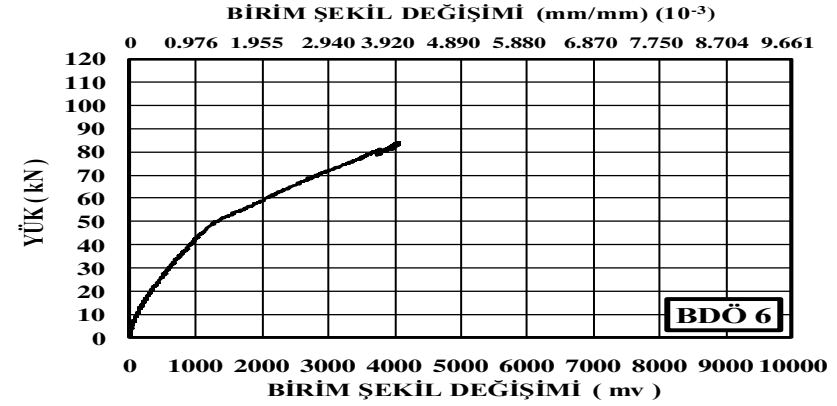
Şekil 4.9. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11

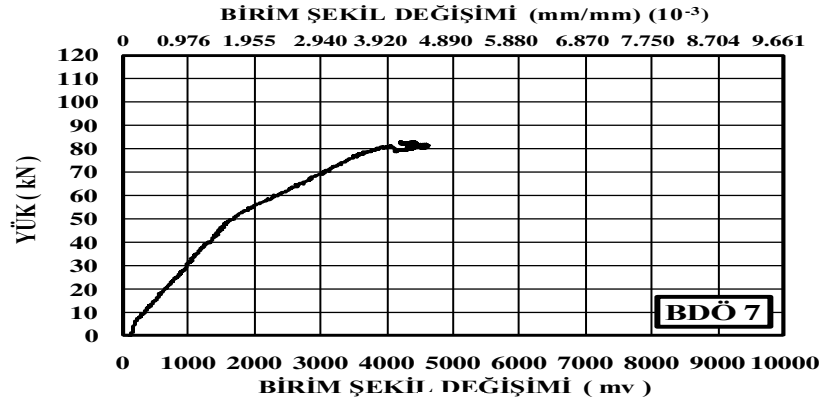
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



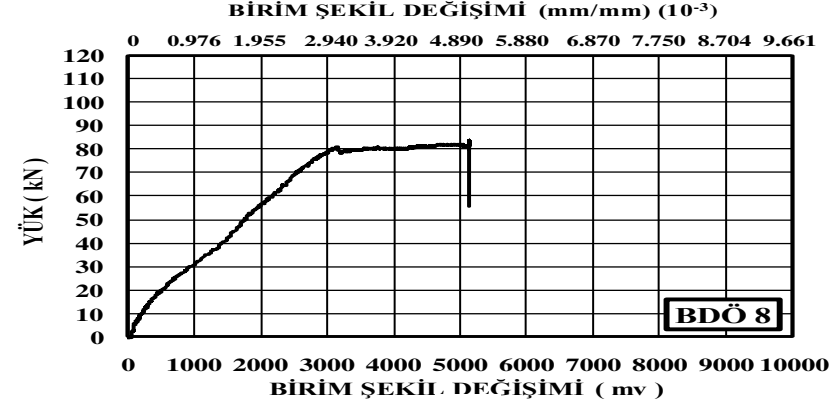
e)



f)



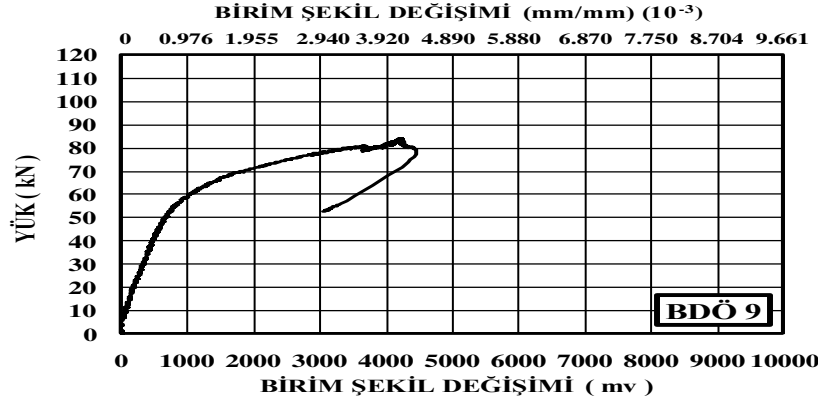
g)



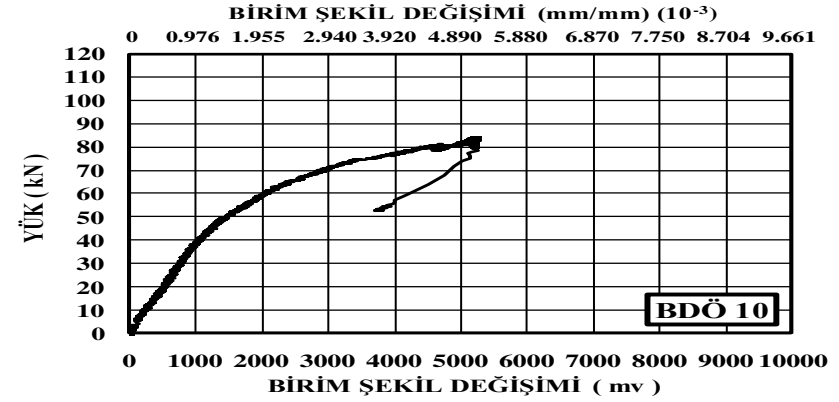
h)

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

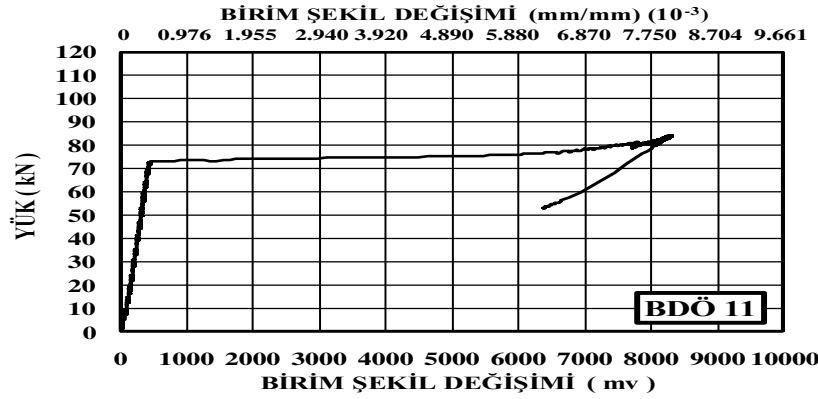
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



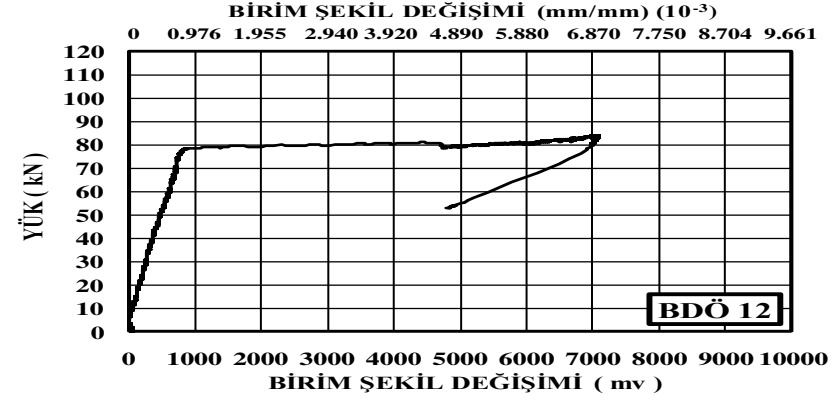
i)



j)



k)

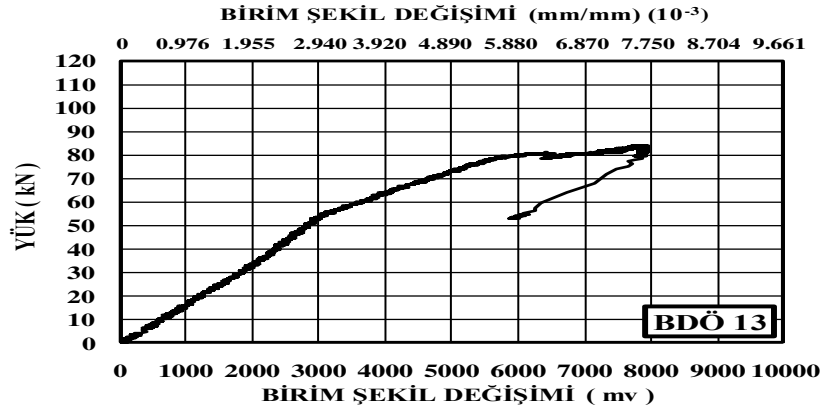


l)

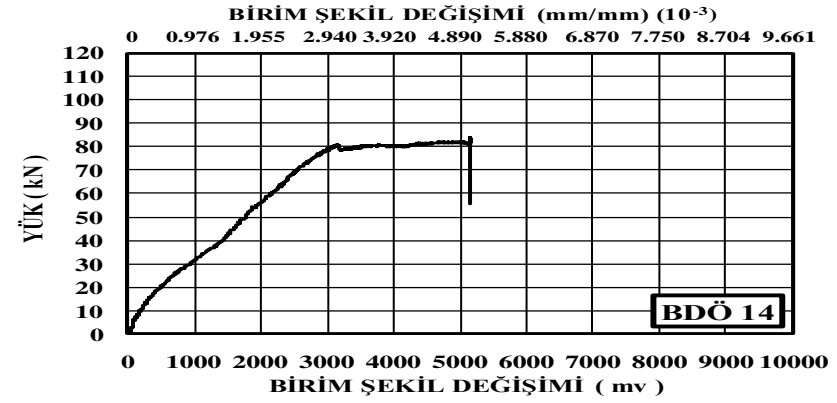
Şekil 4.9 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11

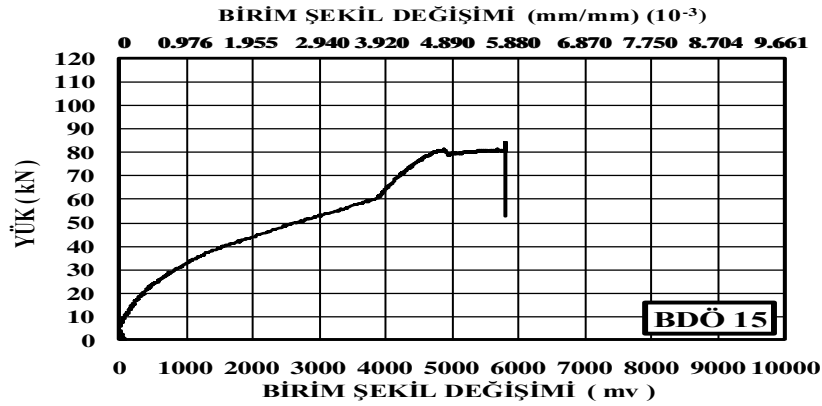
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



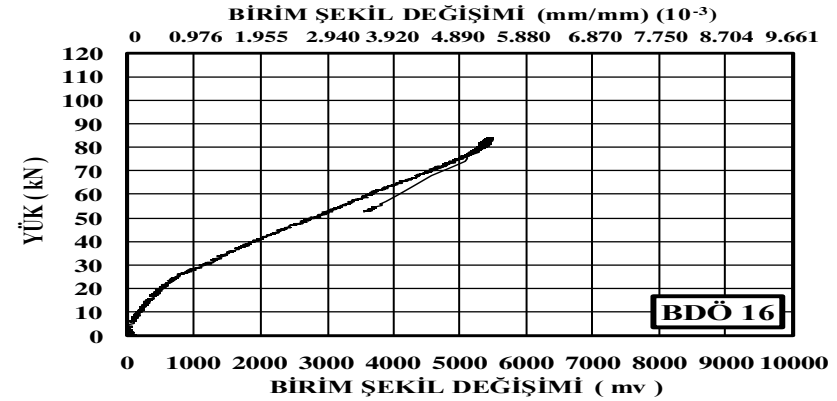
m)



n)



o)



p)

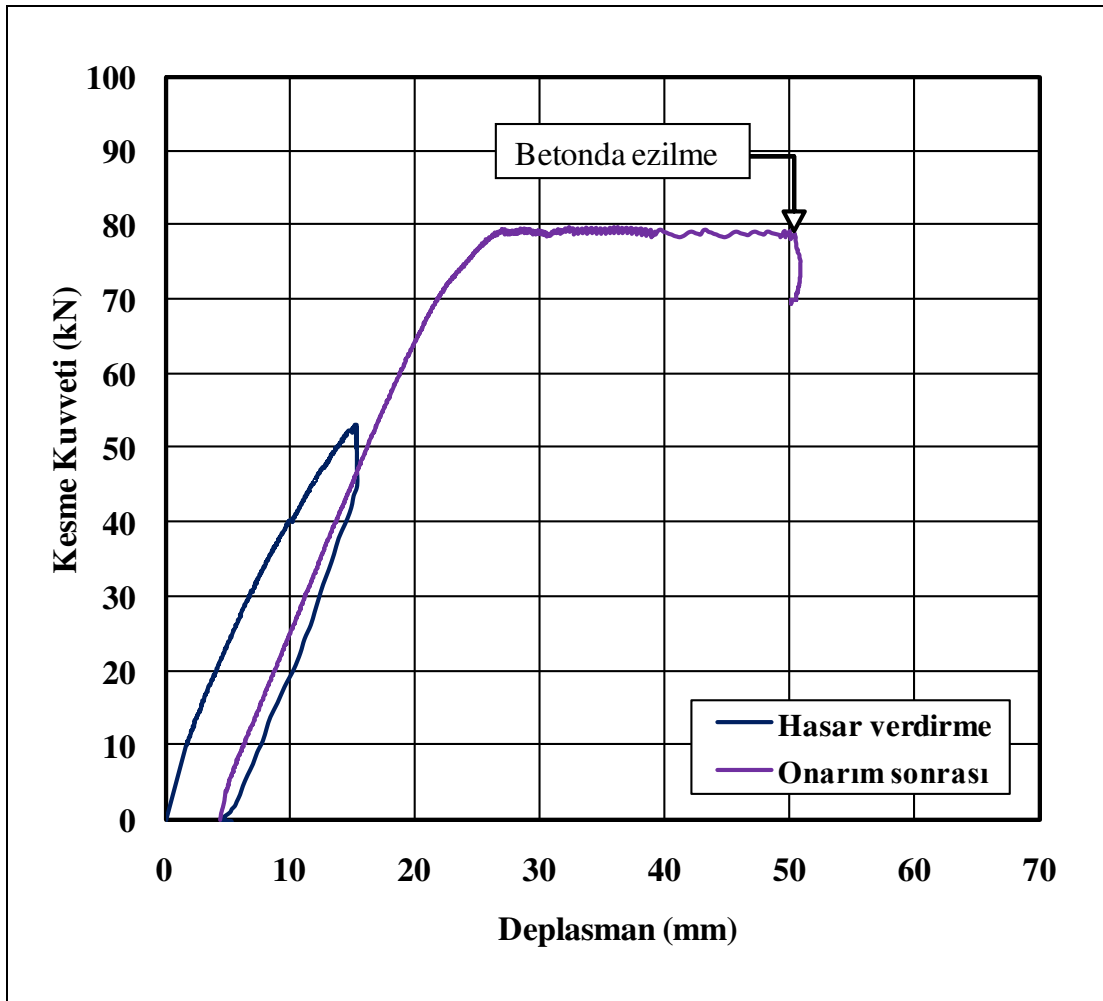
Şekil 4.9 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11

l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16

4.6. Deney Elemanı 6

Deney elemanı 6 eksenleri arası yatay mesafesi 150 mm olarak yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerle ve fan ankrajlarla onarılan deney elemanıdır. Elemanın yük-deplasman grafiği Şekil 4.10'da, yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir.

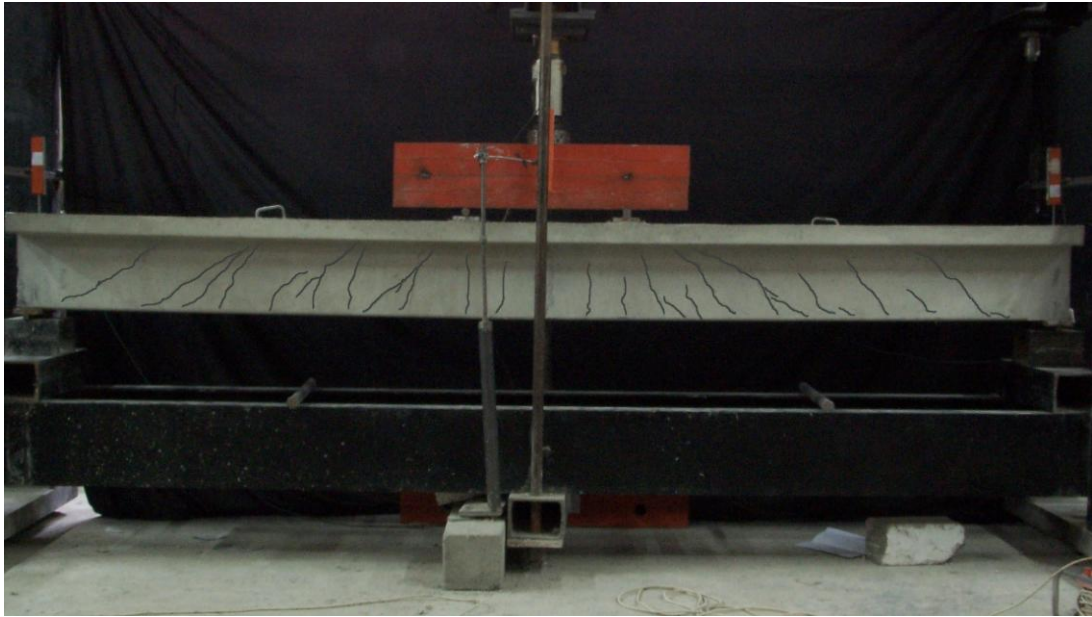


Şekil 4.10. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 6

Hasar Verme Deneyi

Kesme hasarı verme deneyinde ilk eğime çatlağı 18,50 kN yük düzeyinde 3,65 mm deplasmanda sabit moment bölgesinde oluşmuştur. Yüklemeye devam edildiğinde

23,00 kN yükte, 4,91 mm deplasmanda eğilme çatlaklarının arttığı gözlenmiştir. Sağ ve sol kesme açıklığında 30,17 kN yükte 6,72 mm orta nokta deplasman değerinde ilk eğik çatlaklar meydana gelmiştir. Eğik çatlaklar bu yük düzeyinden sonra, 42,57 kN yükte, 10,96 mm deplasmanda tablaya kadar ulaşmıştır. 48,59 kN yük düzeyinde 13,21 mm orta nokta deplasmanında eğik çatlakların ve eğilme çatlaklarında kılcal düzeyde artış ve eğik çatlakların aderans çatlaklarına dönüştüğü gözlenmiştir. 53,06 kN yük düzeyinde 16,60 mm deplasmanda deney son verilmiştir. Yük boşaltılmadan önce maksimum çatlak genişliği sol kesme açıklığında 0,70 mm, sağ kesme açıklığında 0,80 mm olarak ölçülmüştür. Yük boşaltıldıktan sonra kalıcı maksimum çatlak genişliği sol kesme açıklığında 0,40 mm, sağ kesme açıklığında 0,50 mm ye düşmüştür. Kirişin kalıcı orta nokta deplasman değeri 4,41 mm'dir. Kesme hasarı verilmiş deney elemanın genel görünüşü Resim 4.17'de verilmiştir.



Resim 4.17. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 6

Onarım Sonrası Deneyi

Hasar verme işleminden sonra onarımı tamamlanan kirişin onarımdan sonra yapılan deneyinde 40,54 kN yük düzeyine kadar kirişte mevcut çatlaklarda herhangi bir ilerleme gözlenmemiştir. Bu yük düzeyinde sabit moment bölgesinde eğilme

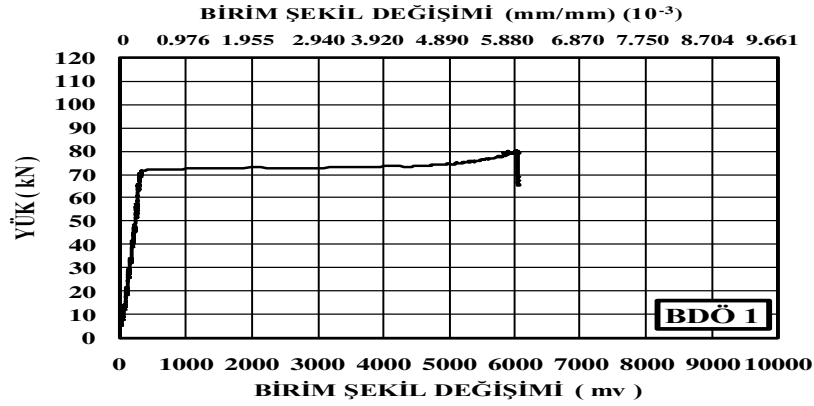
çatlaklarında kılcal düzeyde ilerleme oluşmuştur. 62,46 kN yük düzeyinde 19,49 mm orta nokta deplasmanında eğik çatlaklar kılcal düzeyde kalıp herhangi bir gelişim göstermemiştir. Bu yük düzeyinde sabit moment bölgesinde eğilme çatlaklarında artış gözlenmiştir. 73,92 kN yükte 23,55 mm deplasmanda sabit moment bölgesinde oluşan yeni eğilme çatlaklarının tablaya kadar ulaşmıştır. 79,09 kN yük düzeyinde 26,44 mm orta nokta deplasmanında kiriş çekme donatıları akmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde 79,27 kN yük düzeyinde 49,67 mm orta nokta deplasmanında sabit moment bölgesinde basınç betonu ezilerek ve kiriş sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür. CFRP şeritlere yapılan ankrajlar sayesinde CFRP şeritlerde herhangi bir soyulma olmadığı, aderans çatlaklarının sınırlı kaldığı ve kirişin eğilme kapasitesine ulaştığı gözlenmiştir. 6 ve 15 numaralı birim deformasyon ölçerlerde oluşan maksimum birim deformasyon değeri 0,0083 mm/mm olarak ölçülmüştür. Diğer deformasyon ölçerlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri 0,0049-0,0083 mm/mm arasında değişmiştir. Göçme sonrası kirişin genel görünüşü Resim 4.18’de, beton basınç bölgesindeki ezilme Resim 4.19’da verilmiştir.



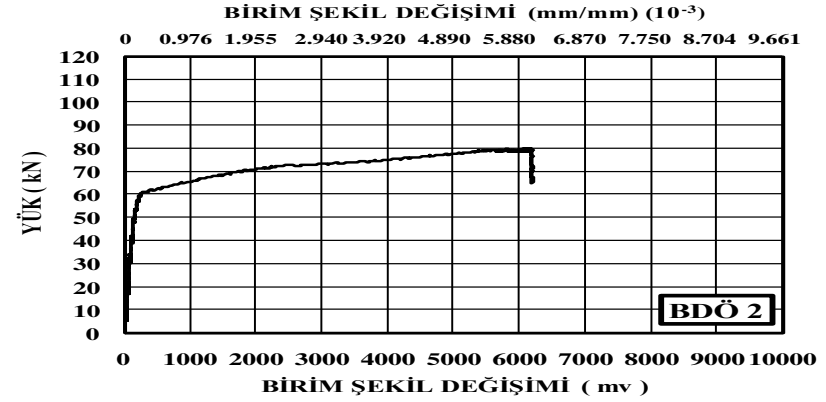
Resim 4.18. Göçme sonrası, deney elemanı 6



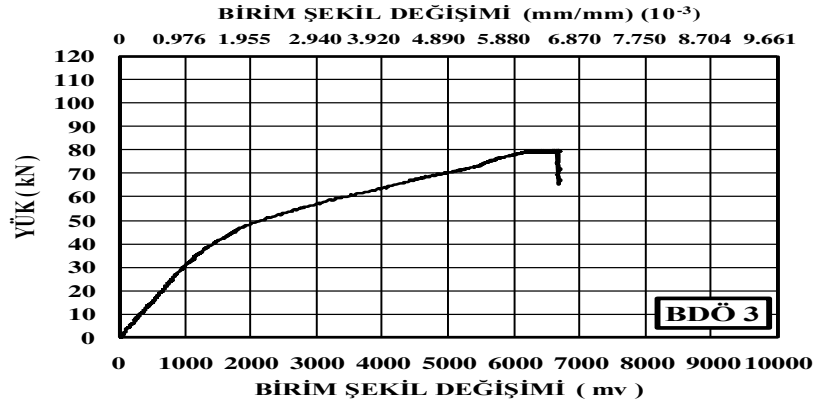
Resim 4.19. Beton basınç bölgesinin ezilmesi, deney elemanı 6



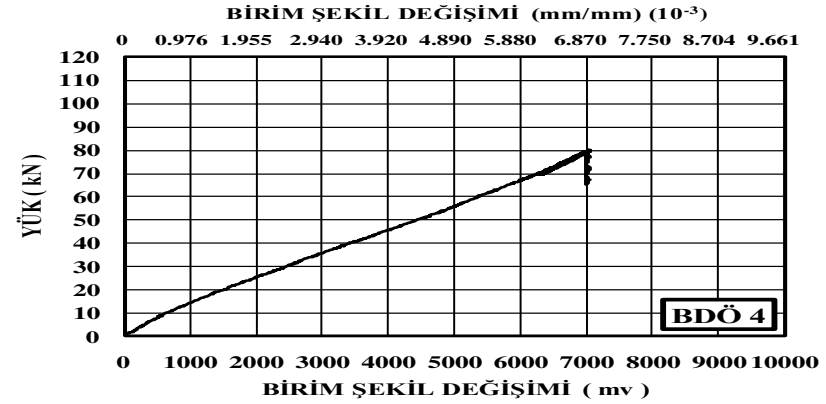
a)



b)



c)

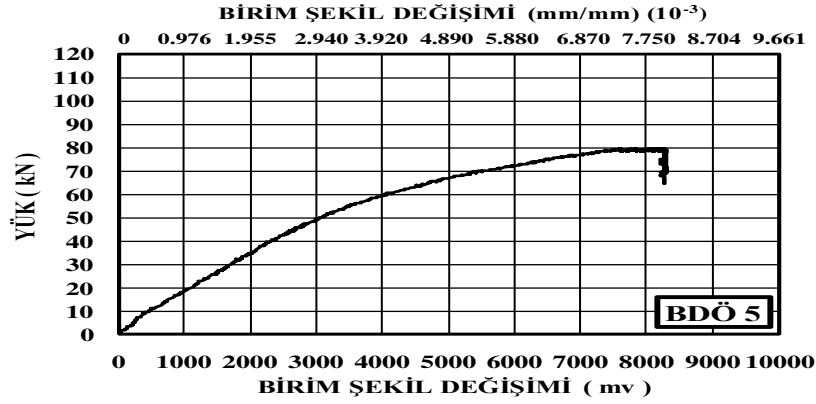


d)

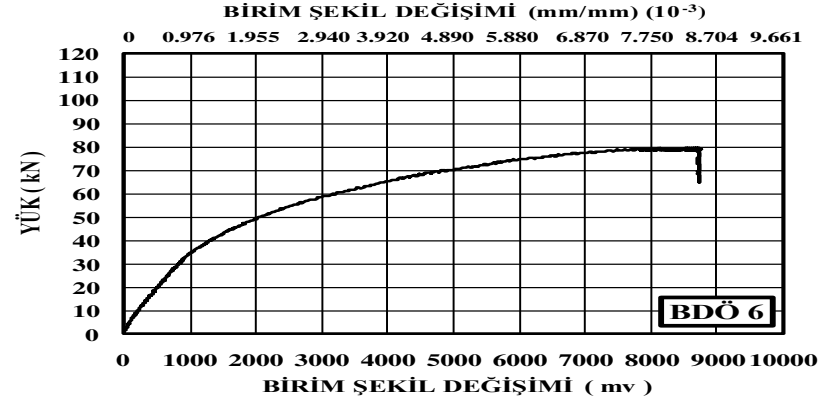
Şekil 4.11. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11

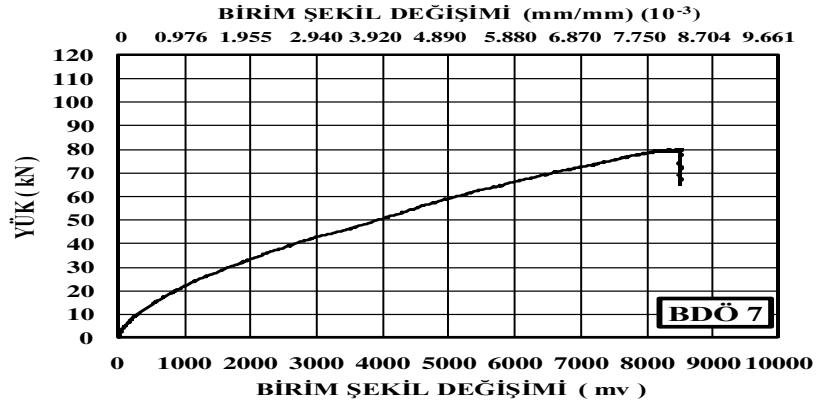
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



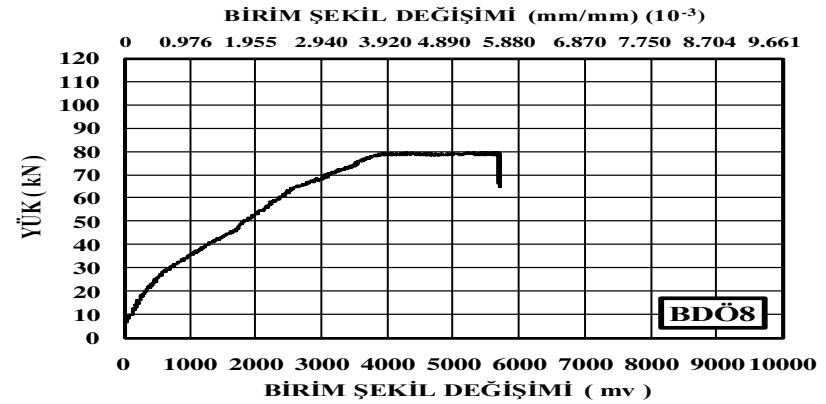
e)



f)



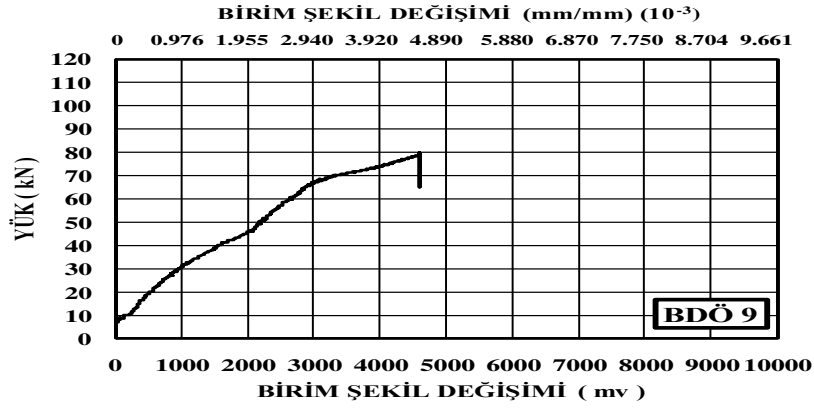
g)



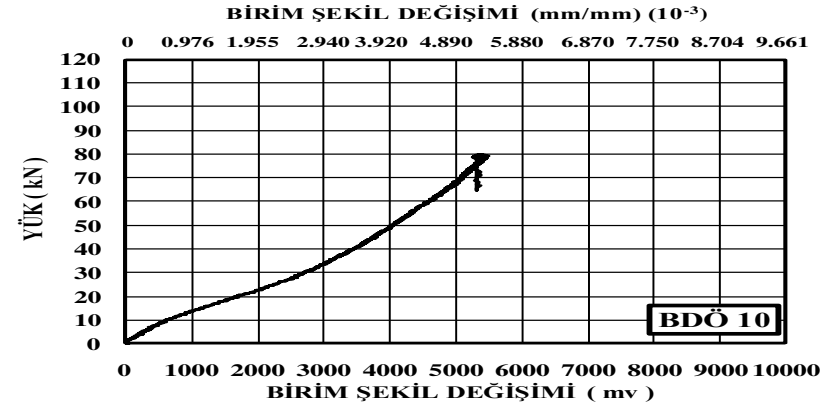
h)

Şekil 4.11 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6

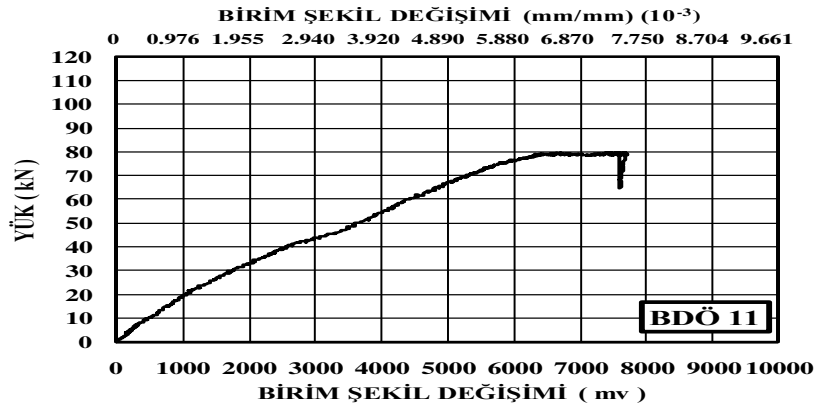
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



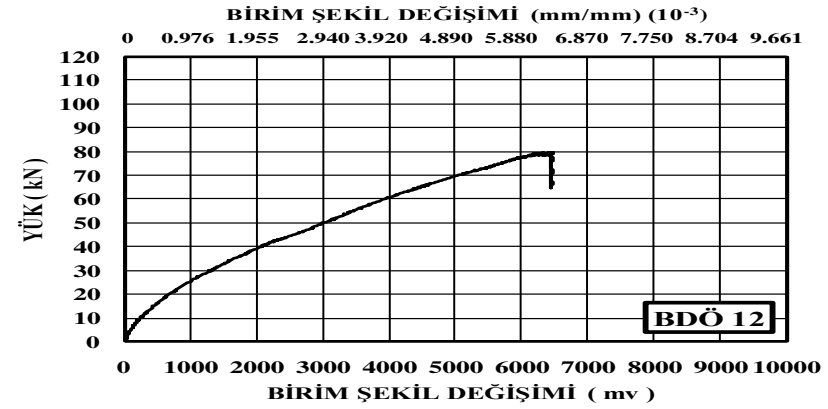
i)



j)



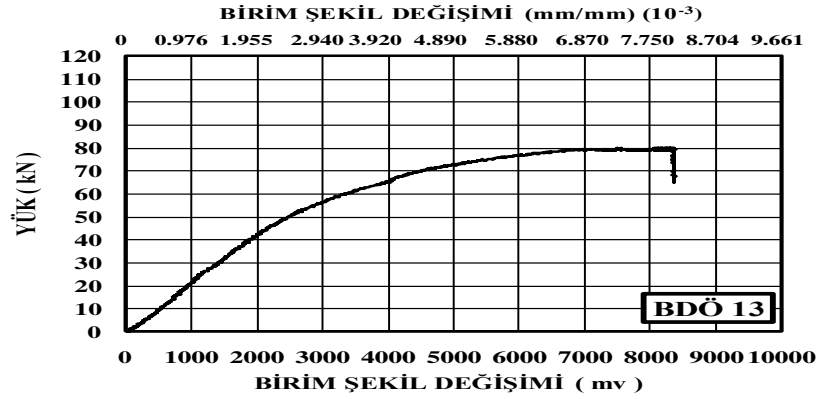
k)



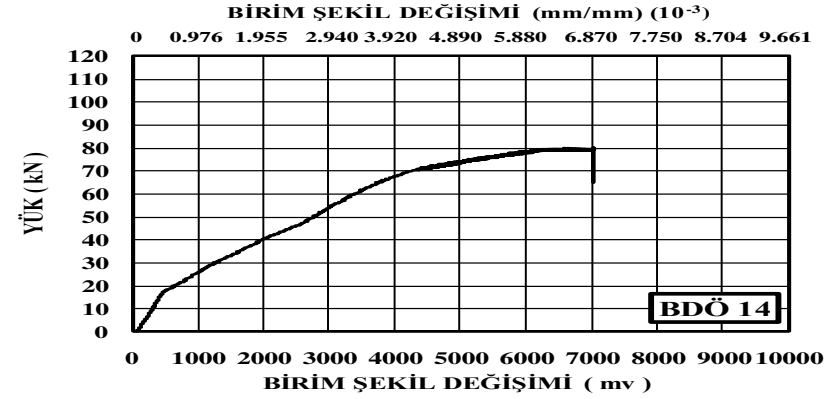
l)

Şekil 4.11 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6

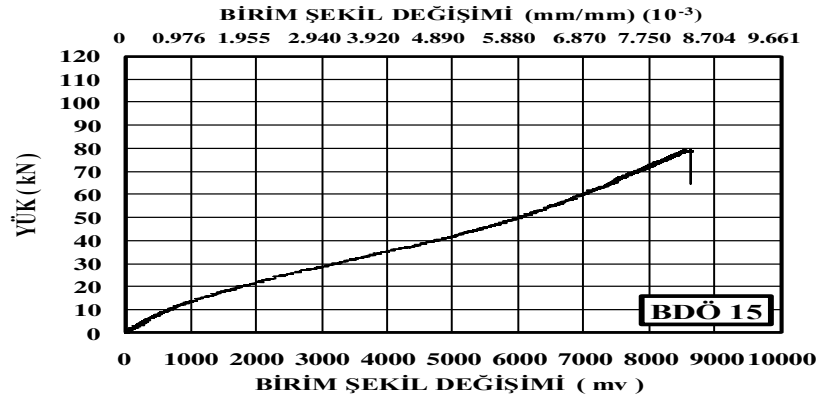
a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16



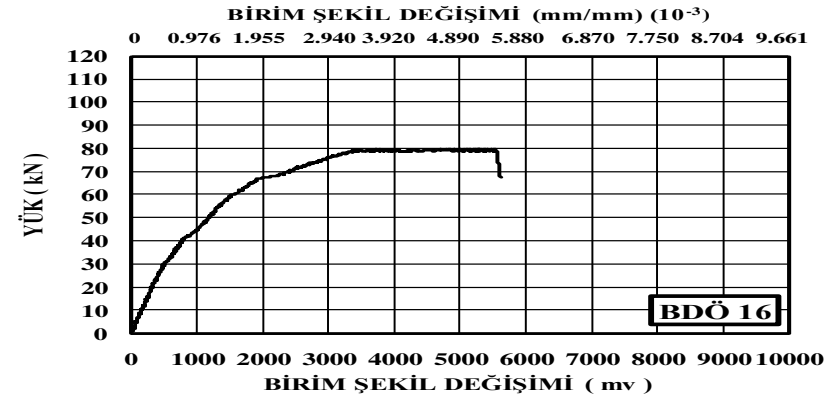
m)



n)



o)



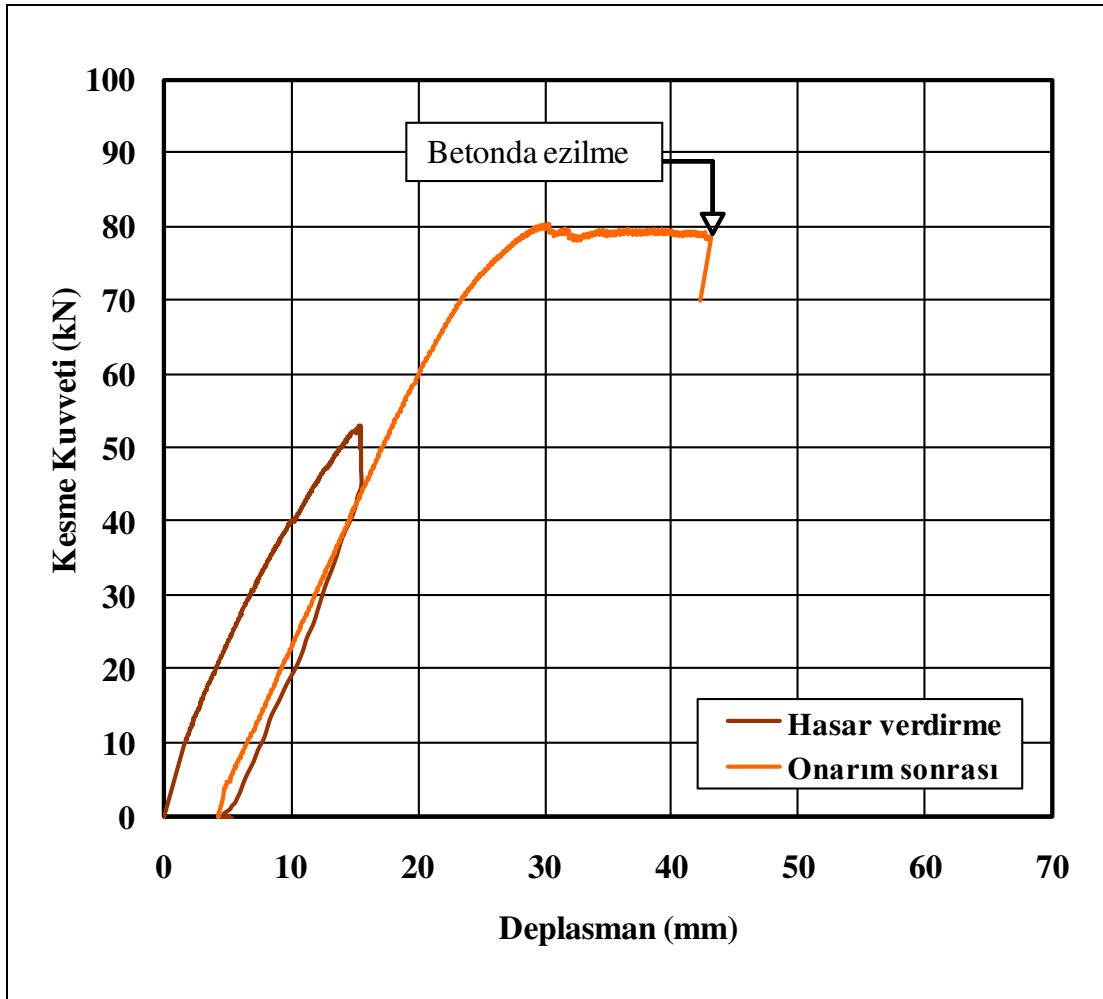
p)

Şekil 4.11 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10, k) BDÖ 11
l) BDÖ 12, m) BDÖ 13, n) BDÖ 14, o) BDÖ 15, p) BDÖ 16

4.7. Deney Elemanı 7

Eksenleri arası yatay mesafe 200 mm olan CFRP şeritlerle ve fan ankrajlarla onarılmış deney elemanıdır. Yük-deplasman grafiği Şekil 4.12’de, yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.13’te verilmiştir.

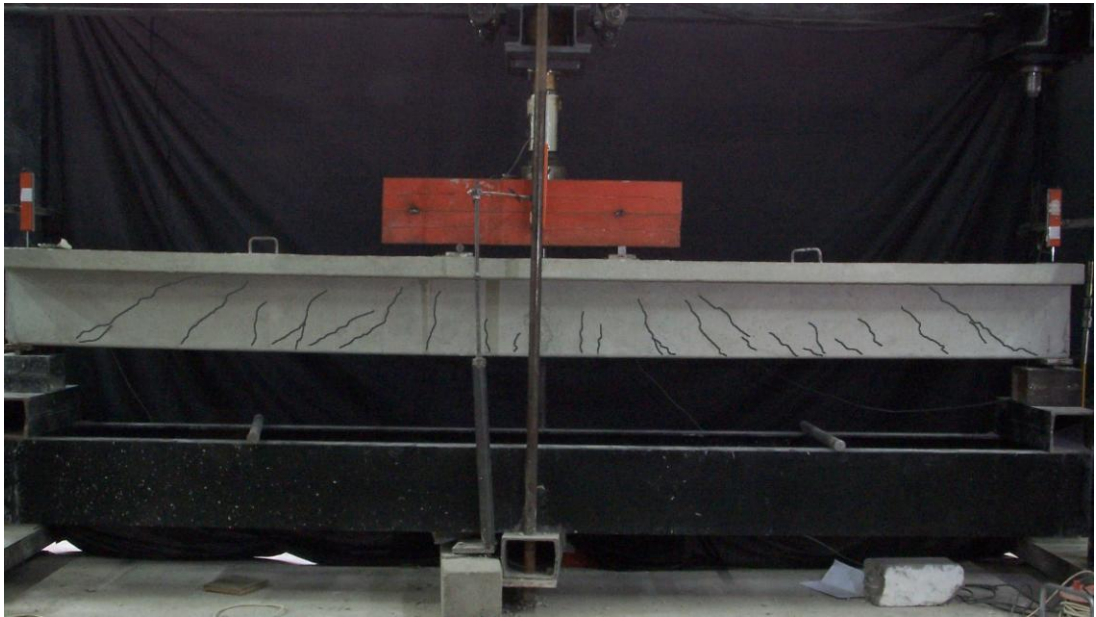


Şekil 4.12. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 7

Hasar Verme Deneyi

Hasar verme deneyinde yüklemeye başlandıktan sonra sabit moment bölgesinde 15,00 kN yükte ve 2,35 mm deplasmanda ilk eğilme çatlaklar kılcal düzeyde oluşmuştur. 23,02 kN yük düzeyinde 4,91 mm orta nokta deplasmanında eğilme

çatlaklarında artış gözlenmiştir. Yüklemeye devam edildikten sonra, ilk eğik çatlak sağ ve sol kesme açıklığında 27,54 kN yükte 6,04 mm deplasmanda gözlenmiştir. Bu yük düzeyinden sonra eğik çatlaklar kiriş tablasına kadar ulaşmıştır. Sol kesme açıklığındaki ana kesme çatlağı çekme donatısı seviyesinde aderans çatlaklarına dönüşmüştür. Sol taraftaki maksimum çatlak genişliği 0,80 mm olarak ölçülmüş ve 53.26 kN yükte 15,37 mm orta nokta deplasmanında deneye son verilmiştir. Yük boşaltıldıktan sonra sol kesme açıklığında ölçülen kalıcı maksimum çatlak genişliği 0,50 mm, sağ kesme açıklığında kalıcı maksimum çatlak genişliği ise 0,30 mm'dir. Kirişin kalıcı orta nokta deplasmanı ise 4,15 mm olarak ölçülmüştür. Kesme hasarı verilmiş deney elemanı Resim 4.20'de verilmiştir.



Resim 4.20. Kesme hasarı sonrası, deney elemanı 7

Onarım Sonrası Deneyi

CFRP şeritlerinin eksenleri arası yatay mesafe 200 mm olan ve fan ankrajlarla onarılan deney elemanının onarım sonrası deneyinde 36,24 kN yük düzeyine kadar kirişte herhangi bir yeni çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bu yük düzeyinde sabit moment bölgesinde yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu ve mevcut eğilme çatlaklarının tablaya kadar ulaştığı gözlenmiştir. 75,00 kN yük düzeyinde sol kesme

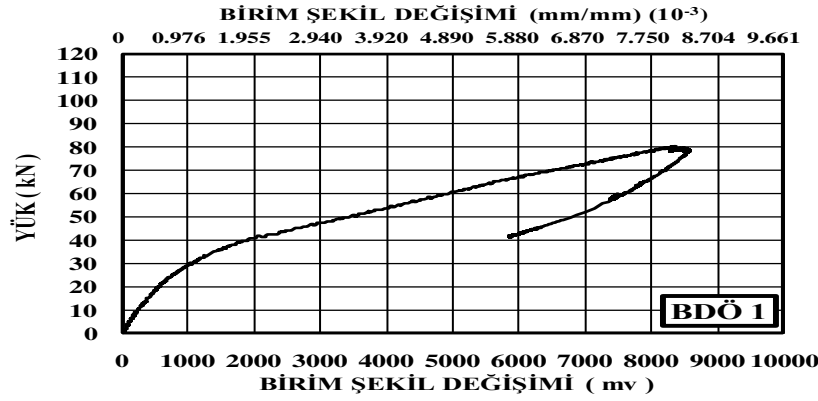
açıklığında ölçülen maksimum çatlak genişliği 1,20 mm'dir. bu yük düzeyinden sonra kiriş çekme donatıları 80,15 kN yük düzeyinde 29,84 mm deplasmanda akmıştır. Yüklemeye devam edilmiş, sol kesme açıklığında 3 - 4 numaralı CFRP şeritleri ve 5 - 6 numaralı CFRP şeritleri kesen yeni eğik çatlaklar olmuştur. Sağ kesme açıklığında ise 11 ile 15 numaralı CFRP şeritlerini kesen yeni eğik çatlaklar oluşmuştur. Yüklemeye devam edilmiş ve 78,64 kN yük düzeyinde, 42,84 mm orta nokta deplasmanında beton basınç bölgesindeki beton ezilerek kiriş sünek eğilme göstererek göçmüştür. 10 numaralı birim deformasyon ölçerde oluşan maksimum birim deformasyon değeri 0,0089 mm/mm olarak ölçülmüştür. Diğer deformasyon ölçerlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri 0,0050-0,0084 mm/mm arasında değişmiştir. Göçme sonrası kiriş Resim 4.21'de, beton basınç bölgesinin ezilmesi Resim 4.22'de verilmiştir.



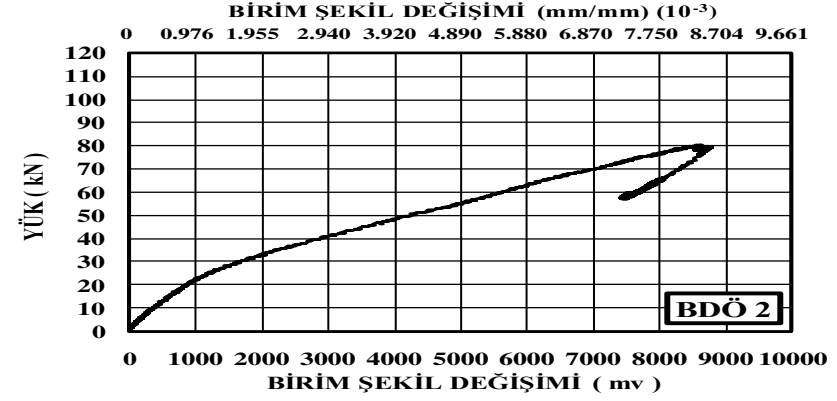
Resim 4.21. Göçme sonrası, deney elemanı 7



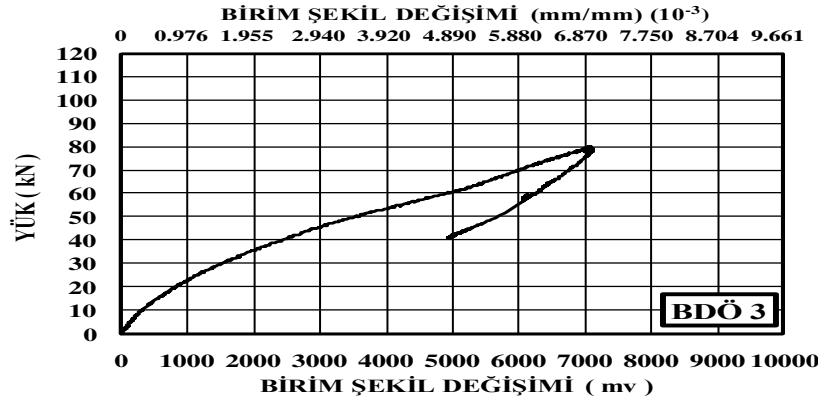
Resim 4.22. Beton basınç bölgesinin ezilmesi, deney elemanı 7



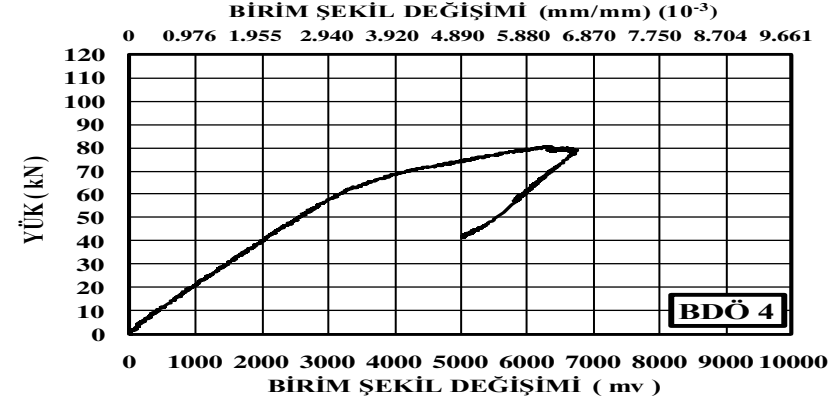
a)



b)



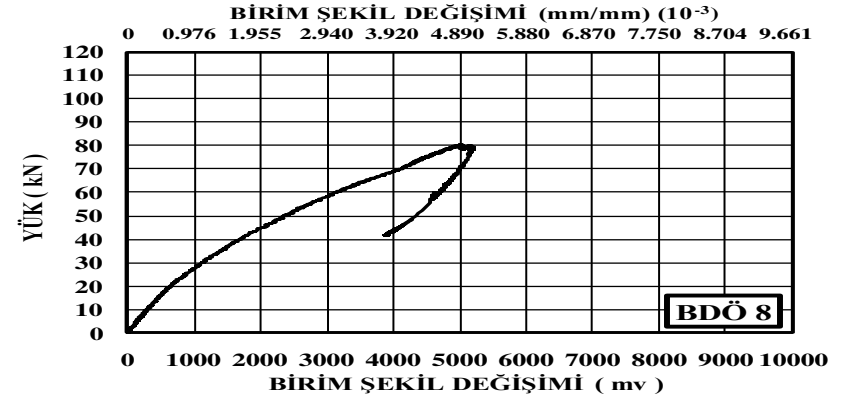
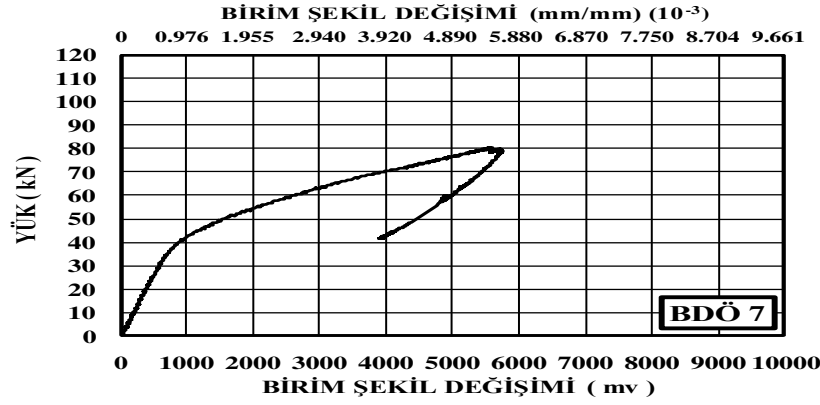
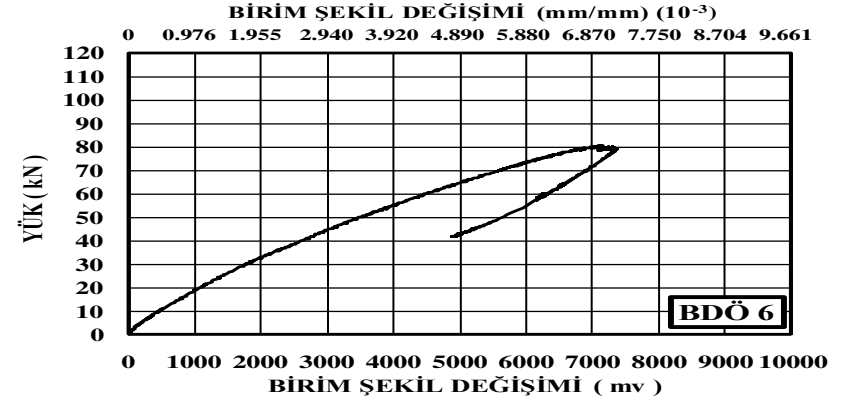
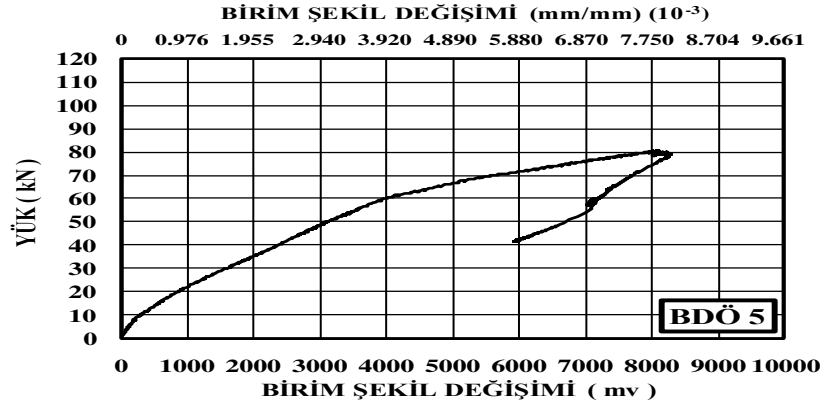
c)



d)

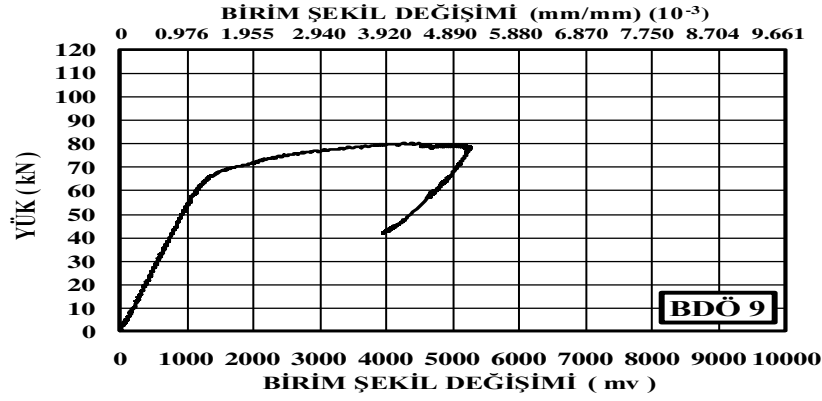
Şekil 4.13. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10

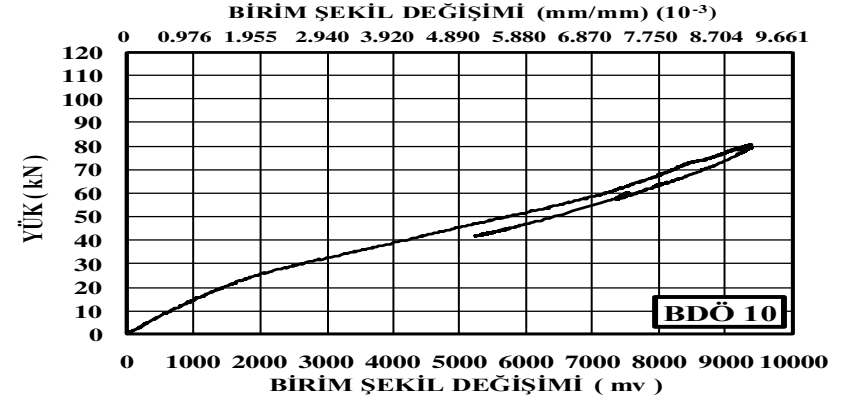


Şekil 4.13 (Devam). Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10



i)



j)

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

a) BDÖ 1, b) BDÖ 2, c) BDÖ 3, d) BDÖ 4, e) BDÖ 5, f) BDÖ 6, g) BDÖ 7, h) BDÖ 8, i) BDÖ 9, j) BDÖ 10

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde deney elemanlarına yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe ve fan ankrajı uygulamasının deney elemanlarının kesme dayanımları, rijitlikleri, süneklikleri ve göçme modları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında, 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 DBYBHY 2007 (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik), TS 500 (Betonarme Elemanların Yapım ve Tasarım Kuralları), ACI 318 (American Concrete Institute), ACI 440 (American Concrete Institute), EC 2 (Eurocode 2) ve *fib* (Fédération International du Béton) yönetmeliklerinde verilen kesme dayanımı eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır [1-3, 7, 10, 22]. Deney elemanlarının Bölüm 4'te detayları ile birlikte anlatılan deney sonuçları Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

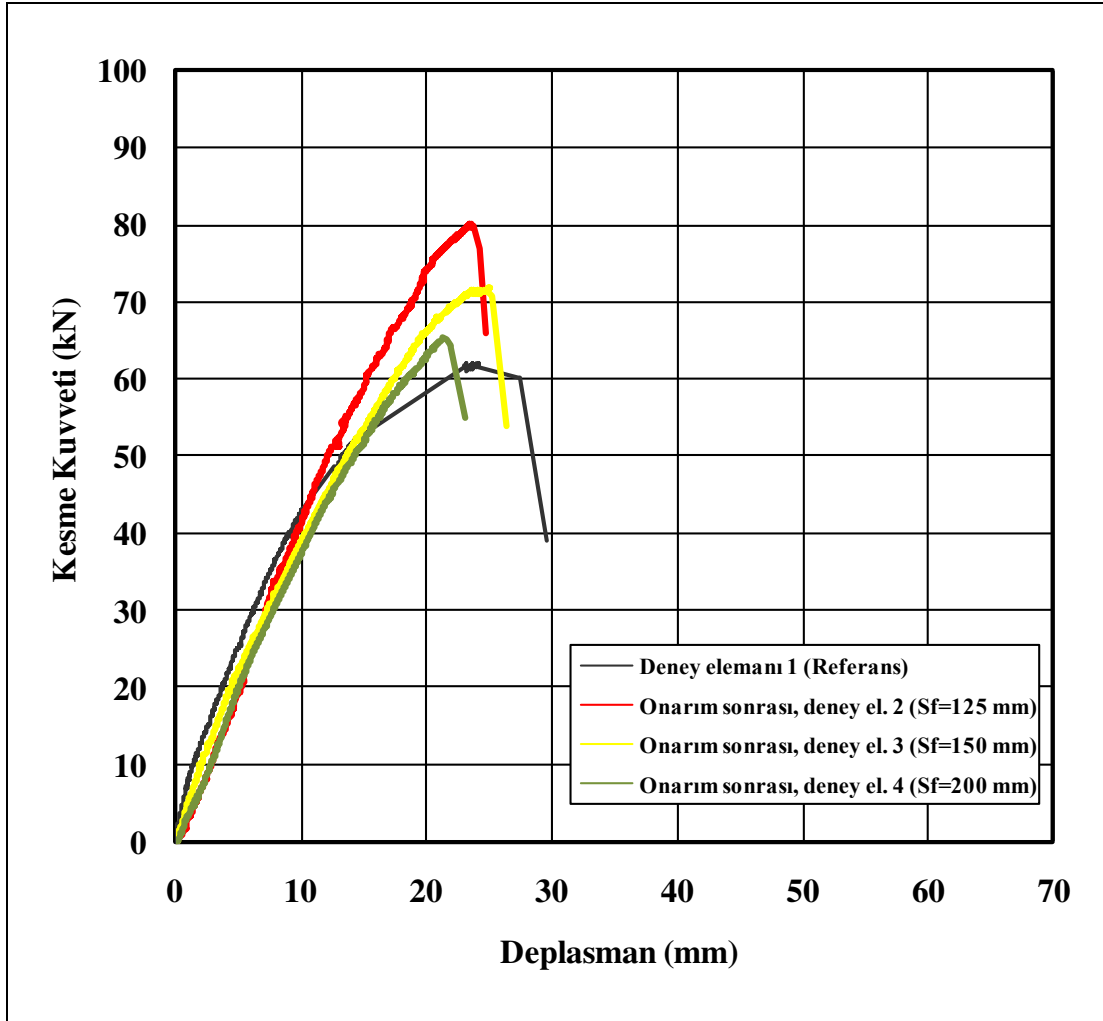
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti

Deney Elemanı No	Hasar Verdirme Deneyleri		Onarım Deneyleri				
	Uygulanan Maksimum Yük (kN)	Uygulanan Maksimum Yükteki Deplasman (mm)	Akma Yükü (kN)	Akma Yükündeki Deplasman (mm)	Göçme Yükü (kN)	Göçme Yükündeki Deplasman (mm)	Göçme Mekanizması
1(Referans)	-	-	-	-	62,07	23,99	Kesme
2 (Onarım)	54,79	14,41	-	-	80,08	26,85	Kesme
3 (Onarım)	55,28	15,33	-	-	71,69	28,61	Kesme
4 (Onarım)	53,95	15,41	-	-	65,37	23,96	Kesme
5 (Onarım)	53,94	13,34	81,16	22,99	80,26	60,74	Eğilme
6 (Onarım)	53,06	16,60	79,09	26,44	79,27	49,67	Eğilme
7 (Onarım)	53,26	15,37	80,15	29,84	78,64	42,84	Eğilme

5.1. Deney Elemanlarının Davranışı

Onarılan deney elemanlarında, diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe ve şerit uçlarında fan ankraj uygulamasının kirişlerin davranışı üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için yük-deplasman grafikleri gruplandırılarak Şekil 5.1-Şekil 5.5'te verilmiştir. Deney elemanlarının davranışları gruplanan bu grafikler yorumlanarak birbirleri ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Onarılan deney elemanlarının (Deney elemanları 2, 3, 4, 5, 6 ve 7) hasar verdirme deneylerinden elde edilen yük – deplasman eğrileri grafiklerden kaldırılmış, onarım sonrası deneylerinden elde edilen yük – deplasman eğrileri orijinden başlatılmıştır. Deney elemanları bu durum çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Ankrajlı diyagonal CFRP şeritler ile onarılan deney elemanları 2, 3 ve 4'ün onarım deneylerine ait yük-deplasman grafikleri referans deney elemanının (deney elemanı 1) yük-deplasman grafiği ile birlikte Şekil 5.1'de verilmiştir. Verilen bu grafikte üç farklı eksenleri arası yatay mesafe ($s_f=125$ mm, 150 mm ve 200 mm) fan ankrajlı CFRP şeritlerle onarılan deney elemanlarının davranışları hem birbirleriyle, hem de referans elemanı ile karşılaştırılmıştır.

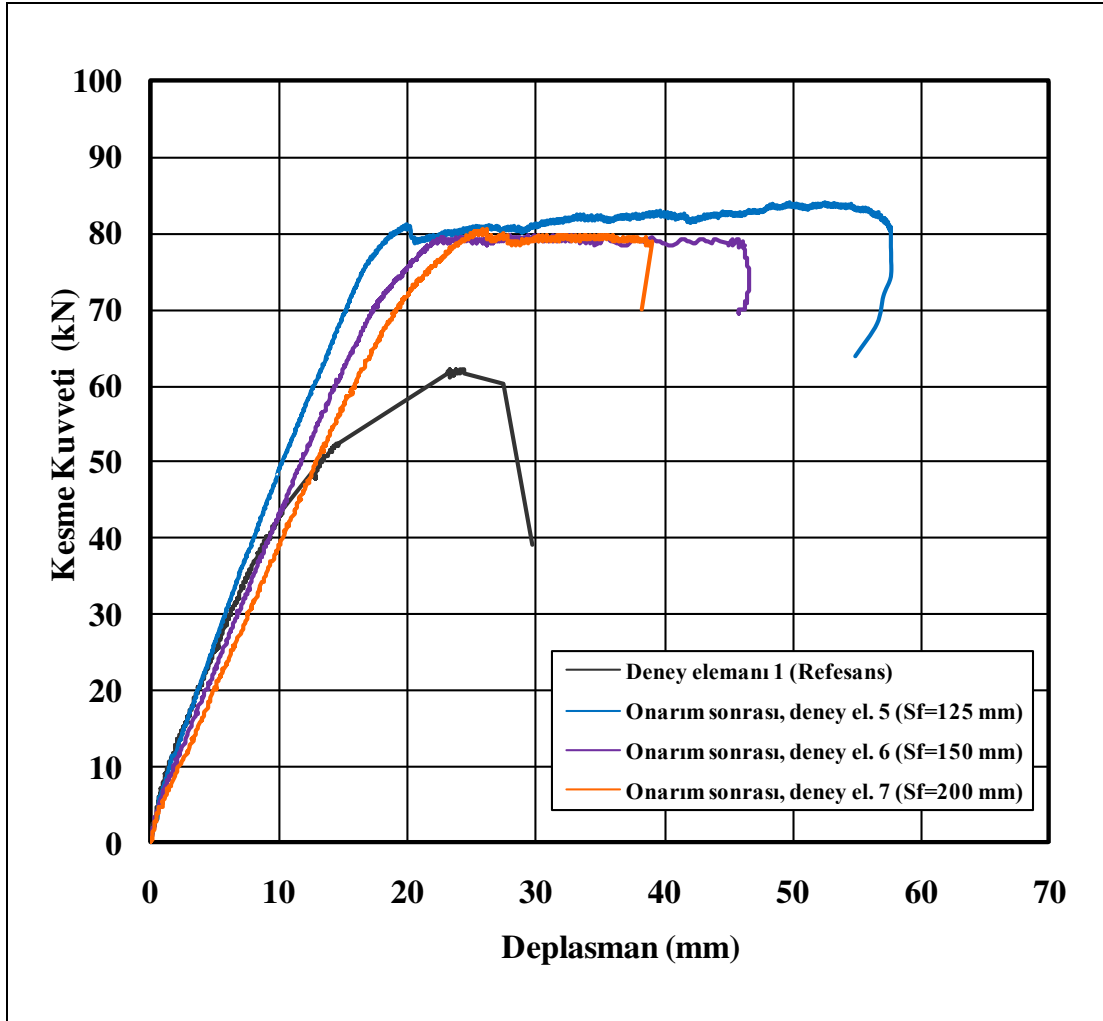


Şekil 5.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3 ve 4
(Ankrajsız şerit aralıklarının karşılaştırılması)

Referans deney elemanı 42,20 kN yük düzeyine kadar aynı rijitlikle deformasyon yapmıştır. Bu yük düzeyinden sonra referans elemanı kesme kuvveti taşıma kapasitesini hızla kaybederek eğik çekme kırılması sonucu göçmüştür. Referans deney elemanının kesme kuvveti taşıma kapasitesi 62,07 kN ve bu yükte ölçülen kiriş orta nokta deplasmanı 23,99 mm'dir. CFRP şeritlerle onarılan deney elemanları şeritlerin kesme çatlaklarının kontrol etmede ki başarıları ölçüsünde bir davranış sergilemişler ve referans deney elemanından daha büyük kesme kuvveti taşıma yetisi göstermişlerdir.

Deney elemanları 2, 3 ve 4, 35 kN yük düzeyine kadar yaklaşık aynı rijitlikte deformasyon yapmışlardır. 35 kN yük düzeyinden sonra deney elemanı 3 ve 4'ün rijitliği, deney elemanı 2'nin rijitliğinden daha fazla azalarak sırası ile 71,69 kN ve 65,37 kN yük düzeylerinde eğik çekme kırılması sonucu göçmüşlerdir. Göçme yük düzeylerinde deney elemanı 3'te 28,61 mm, deney elemanı 4'te 24,14 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Deney elemanı 2 diğer iki ankrajsız deney elemanına göre daha fazla kesme kuvveti taşıyarak 80,08 kN yük düzeyinde 26,85 mm orta nokta deplasmanında eğik çekme kırılması sonucu göçmüştür. Deney elemanı 2, referans elemanının göçme yüküne göre %29,01 daha fazla kesme kuvveti taşımıştır. Diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe arttırıldığında, deney elemanlarının taşıdığı kesme kuvvetleri azalmıştır. Deney elemanı 3'ün taşıdığı kesme kuvveti referans elemanın taşıdığı kuvvete göre %15,49, deney elemanı 4'ün taşıdığı kesme kuvveti ise %5,31 artmıştır.

Fan ankrajsız diyagonal CFRP şeritlerle onarılan deney elemanları yetersiz kesme donatılı kirişlerde kesme dayanımlarını artırmıştır. Elde edilen bu artıma rağmen, fan ankrajsız deney elemanları 2, 3 ve 4 sünek eğilme davranışı sergileyememişlerdir.



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

Diyagonal yapıştırılan CFRP şeritlerin her bir şeridin ucuna fan ankrajla sabitlenerek onarılan deney elemanları 5, 6 ve 7'nin onarım deneylerine ait yük-deplasman grafikleri ve referans elemanın (deney elemanı 1) yük-deplasman grafiği ile birlikte Şekil 5.2'de verilmiştir. Bu grafikte üç farklı eksen aralığında ($s_f=125$ mm, 150 mm ve 200 mm) diyagonal CFRP şeritler ve fan ankrajlarla onarılan deney elemanlarının davranışları hem birbirleriyle, hem de referans elemanı ile mukayese edilmiştir.

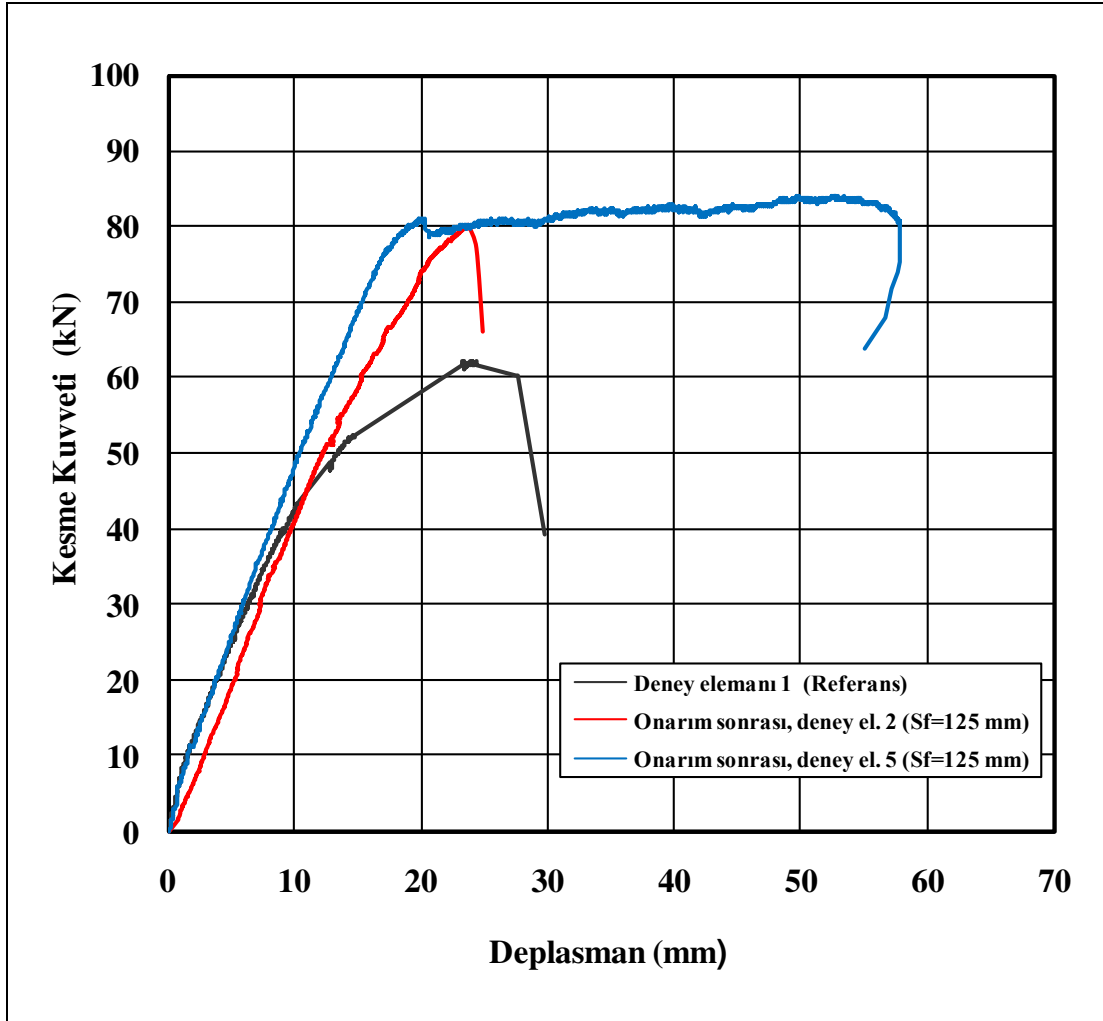
Diyagonal CFRP şeritlerin uçları fan ankrajlarla kirişe sabitlenerek onarılan deney elemanlarının çekme donatıları akma kapasitesine erişmişlerdir. Deney elemanlarının

çekme donatıları akma dayanımına eriştikten sonra, sünek eğilme davranışı sergileyerek beton basınç bölgesinin ezilmesi sonucu göçmüşlerdir.

Deney elemanı 5, deney elemanları 6 ve 7'ye göre daha rijit bir davranış sergileyerek 81,16 kN yük düzeyinde, 22,99 mm orta nokta deplasmanında çekme donatıları akmış sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür. Deney elemanları 6 ve 7'deki eğik çatlaklar etkin iki adet diyagonal CFRP ile kontrol edildiğinden çekme donatıları akma dayanımına erişinceye kadar deney elemanı 5'ten daha fazla orta nokta deplasmanı yapmışlardır. Deney elemanları 6 ve 7 benzer rijitlikle akma yüküne ulaşmışlardır. Deney elemanları 6 ve 7'nin akma yükü değerlerindeki kiriş orta nokta deplasmanları sırası ile 26,44 mm ve 29,84 mm olarak ölçülmüştür.

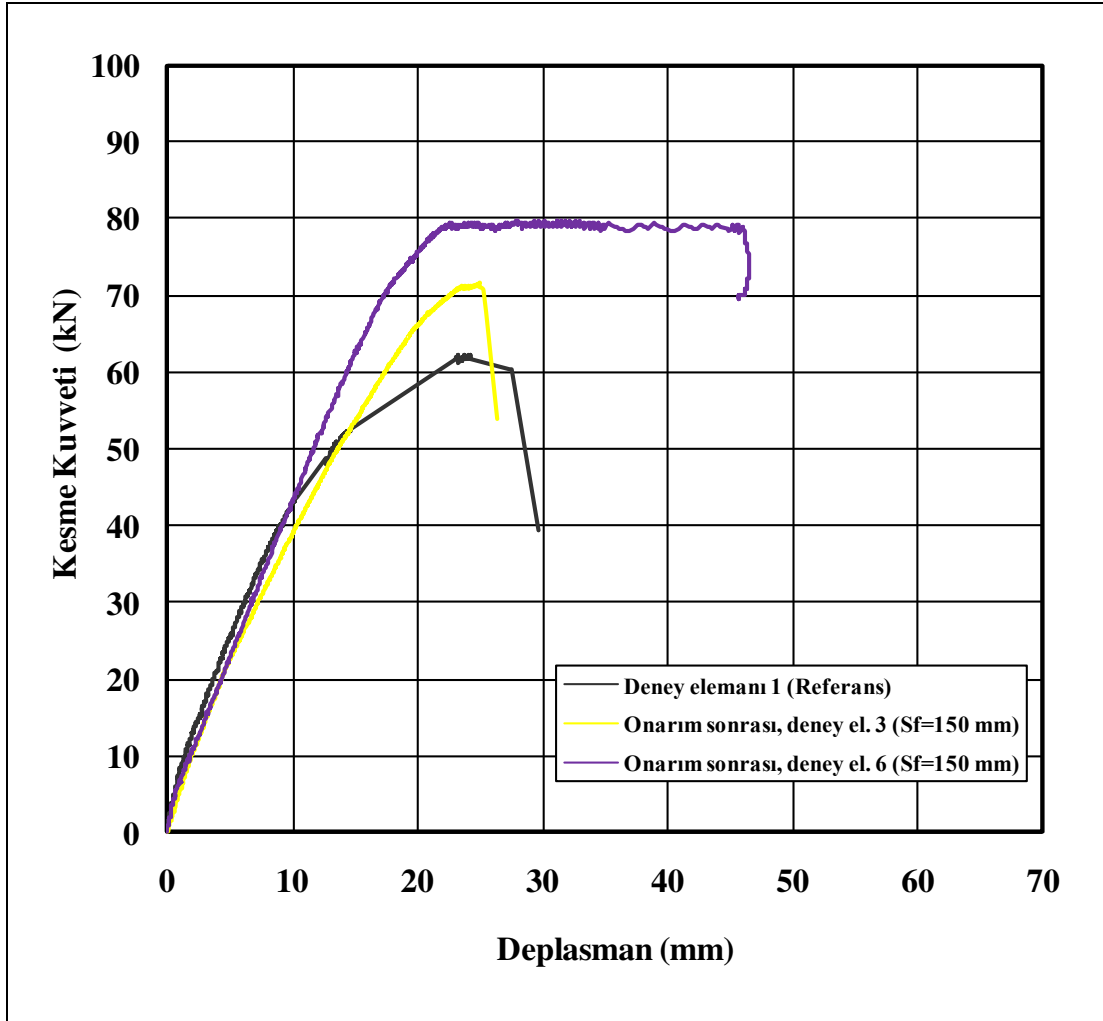
Geliştirilen fan ankrajları diyagonal CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiştir. Göçme yük düzeylerinde deney elemanı 5 60,74 mm, deney elemanı 6 49,67 mm, deney elemanı 7 42,84 mm orta nokta deplasmanı yapmışlardır.

Şekil 5.3'te şerit eksenleri arası yatay mesafe 125 mm olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının (Deney elemanları 2 ve 5) yük-deplasman grafikleri Şekil 5.4'te, şerit eksenleri arası yatay mesafe 150 mm olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının (Deney elemanları 3 ve 6) yük-deplasman grafikleri Şekil 5.5'te, şerit eksenleri arası yatay mesafe 200 mm olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının (Deney elemanları 4 ve 7) yük-deplasman grafikleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Grafiklerde, geliştirilen fan ankrajların kiriş davranışı üzerindeki etkisi diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafeleri aynı olan deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri karşılaştırılarak tartışılmıştır.



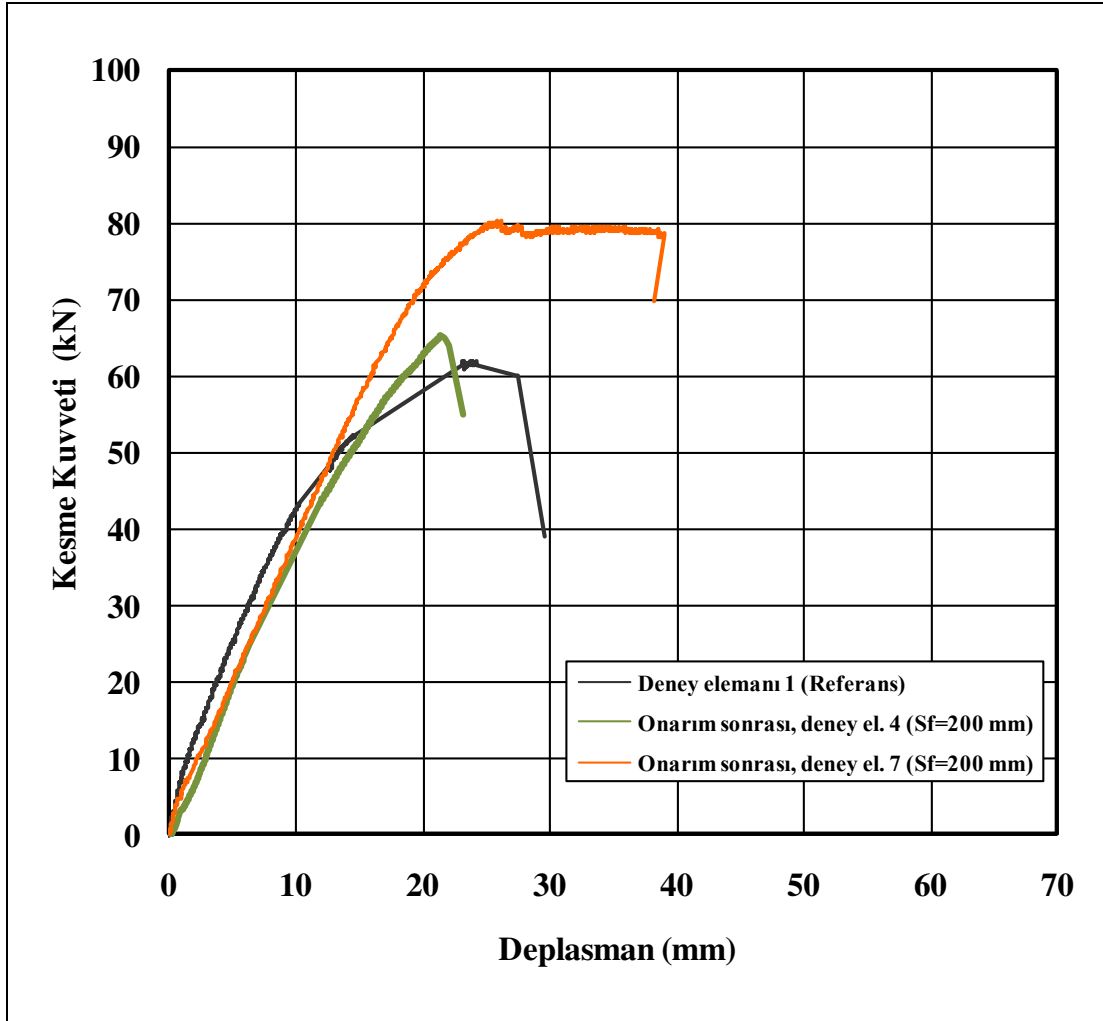
Şekil 5.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2 ve 5
(Ankrajın etkisi)

Deney elemanı 2 80,21 kN yük düzeyinde 29,95 mm orta nokta deplasmanında kiriş sağ kesme açıklığında eğik çekme kırılması sonucu göçmüştür. Geliştirilen fan ankrajları sayesinde deney elemanı 2 ile özdeş şerit eksen aralığına sahip deney elemanı 5, deney elemanı 2'den daha rijit bir davranış sergilemiştir. Deney elemanı 5 81,16 kN yükte 22,99 mm deplasmanda çekme donatılar akmış, 80,26 kN yük düzeyinde 60,74 mm orta nokta deplasman değerinde sünek eğilme davranışı göstererek kiriş göçmüştür. Uygulanan fan ankrajlar sayesinde kiriş eğilme kapasitesini kullanarak sünek eğilme davranışı göstermiştir.



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

Diyagonal CFRP şerit eksenleri arası yatay mesafe deney elemanı 3 ile özdeş olan, deney elemanı 6'da uygulanan fan ankrajlar kiriş kesme dayanımı artırmıştır. Deney elemanı 3 diyagonal CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması sonucu eğik çekme kırılması sonucu göçerken deney elemanı 6 sünek eğilme davranışı sergilemiştir. Fan ankrajlar deney elemanı 6'nın kesme dayanımını deney elemanı 3'ün kesme dayanımına göre %9,17 artırmıştır.



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

Deney elemanı 4, 65,37 kN yük düzeyinde 24,14 mm orta nokta deplasmanında diyagonal CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması sonucu kesmeden göçmüştür. Kullanılan fan ankrajlar sayesinde deney elemanı 7, deney elemanı 4'e göre %20,29 daha fazla kesme kuvveti taşıyarak 78,64 kN yükte 42,84 mm orta nokta deplasmanında sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür.

Uygulama yöntemi olarak tek parça yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerin doğrultusunun değiştiği kiriş altına U biçimde yapıştırılan CFRP parçalar çekme donatılarının bulunduğu düzlemde aderans çatlaklarının gelişmesini engellemiştir.

5.2. Kesme Dayanımı

Deney elemanlarının onarılmasında kullanılan diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafeler ve uygulanan fan ankrajların deney elemanlarının kesme dayanımları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının akma ve göçmede ölçülen kesme dayanımı değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları

Deney Elemanı No	Akma Yükü (kN)	Göçme Yükü (kN)
Deney elemanı 1(Referans)	-	62,07
Deney elemanı 2 (Onarım)	-	80,08
Deney elemanı 3 (Onarım)	-	71,69
Deney elemanı 4 (Onarım)	-	65,37
Deney elemanı 5 (Onarım)	81,16	80,26
Deney elemanı 6 (Onarım)	79,09	79,27
Deney elemanı 7 (Onarım)	80,15	78,64

Betonarme kirişlere yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe kiriş kesme dayanımları üzerinde etkili olmuştur. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin artması ile kirişin taşıyabildiği kesme kuvveti azalmıştır. Deney elemanları 2, 3 ve 4’ün kesme dayanımları referans elemanının kesme dayanımına göre sırasıyla %29,01, %15,49 ve %5,31 oranında artmıştır. Deney elemanı 2, deney elemanı 3 ve 4’e göre daha fazla kesme kuvveti taşımıştır. Bunun nedeni ana kesme çatlağı ile kesişen diyagonal CFRP şerit sayısının daha fazla olmasıdır. Uygulanan fan ankrajlar, yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiştir. CFRP şeritlerin uçları fan ankrajlarla

sabitlenen deney elemanı 5, referans elemanından %29,31 daha fazla kesme kuvveti taşımıştır. Deney elemanları 6 ve 7 ise referans elemanından yaklaşık %26 daha fazla kesme kuvveti taşıma yetisi göstermiştir.

5.3. Rijitlik

Bu bölümde deney elemanlarının rijitlik değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafelerin ve uygulanan fan akrajlarının deney elemanlarının rijitlikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman eğrileri kullanılarak hasar verme başlangıç rijitliği, hasar verme maksimum yük rijitliği, onarım sonrası başlangıç rijitliği, onarım sonrası hasar verme maksimum yükündeki rijitlik, akmadaki rijitlik ve göçmedeki rijitlik olmak üzere altı farklı rijitlik değeri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Rijitlikler elemanların yük deplasman eğrilerinin başlangıç noktası ile göz önünde bulundurulmuş yük değerindeki deplasmanda bulunan noktaları birleştiren doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanında ilk çatlağın olduğu yük düzeyi göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bu değer TS500’de verilen betonun çekme dayanımı için verilen eşitlikten yararlanılarak hesaplanmıştır[22]. Akma ve göçme rijitlikleri ise bu yük düzeylerine karşı gelen noktalar ile yük deplasman eğrisinin başlangıcını birleştiren doğruların eğimi olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarının rijitlikleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney elemanlarının rijitlikleri (kN/mm)

Deney Elemanı No	Hasar Verdirme Başlangıç Rijitliği	Hasar Verdirme Maksimum Yük Rijitliği	Onarım Sonrası Başlangıç Rijitliği	Onarım Sonrası (Hasar Verdirme Maksimum Yük) Rijitliği	Akmada Rijitlik	Göçmede Rijitlik
1	5,43	-	-	-	-	2,67
2	6,57	3,80	3,83	3,27	-	3,39
3	4,97	3,61	4,58	2,87	-	2,86
4	7,57	3,51	4,01	2,88	-	3,07
5	4,98	3,52	5,46	3,77	4,06	1,39
6	4,97	3,19	4,59	3,77	3,59	1,75
7	4,95	3,47	4,02	3,13	3,12	2,03

Deney elemanlarının rijitlikleri diyagonal CFRP şeritlerinin kesme açıklığında oluşan ana kesme çatlağı ile kesişmesi ile kontrol edilmektedir. Deney elemanları 2, 3, 5 ve 6'da bir kesme çatlağı etkin 3 adet diyagonal CFRP şerit ile kontrol edilirken, deney elemanları 4 ve 7'de bir kesme çatlağı etkin 1 adet CFRP şeritle kontrol edilmiştir. Deney elemanı 2'deki CFRP şerit eksen aralığı ve deney elemanları 5, 6 ve 7'deki CFRP şerit uçlarına uygulanan fan türü ankrajlar, eğik çatlakların gelişmesini engellemiş ve kirişlerin büyük deformasyon yapmasını sağlamıştır.

Deney elemanlarının, onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, referans elemanının başlangıç rijitliğine göre ankrajsız deney elemanı 5'te %0,55 oranında artmıştır. Fan ankrajsız deney elemanlarının göçme rijitlikleri, referans deney elemanı göçme rijitliklerine göre deney elemanı 2'de %26,96, deney elmanı 3'te %7,11 ve deney elemanı 4'de %14,98 oranında artmıştır. Fan ankraj uygulanan Deney elemanları 5 ve 6'da %47,94 ve %34,45 oranlarına göçme rijitlikleri, referans elemanı göçme

rijitliğine göre azalmıştır. Deney elemanı 7'nin göçme rijitliği ise referans deney elemanın göçme rijitliğine göre %23,97 oranında azalmıştır.

5.4. Süneklik

Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri kullanılarak deney elemanları için süneklik oranları hesaplanmıştır. Deney elemanlarında süneklik, göçme yükündeki deplasman değerinin akma yükündeki deplasman değerine oranıyla 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	-	23,99	-
2	-	23,61	-
3	-	25,00	-
4	-	21,28	-
5	19,99	57,74	2,89
6	22,03	45,56	2,06
7	25,69	38,69	1,49

Deneylerden elde edilen sonuçlarda deney elemanları 5, 6 ve 7 sünek eğilme davranışı göstermiştir. Fan ankrajlarla onarılan deney elemanlarında diyagonal CFRP şeritler arasındaki yatay mesafe arttıkça deney elemanlarının deplasman süneklik oranları azalmıştır. Deney elemanı 5, deney elemanı 6'ya göre %40,29 oranında, deney elemanı 7'ye göre %93,95 oranında daha fazla süneklik sergilemiştir. Geliştirilen fan ankraj ve diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe, deney elemanlarının deplasman süneklik oranı üzerinde etkili olmuştur. Diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafe arttıkça betonun yaptığı

birim deformasyon değeri artmaktadır. CFRP şerit eksen aralığı büyük olan kirişler büyük orta nokta deplasmanları yapamadan beton basınç bloğundaki ezilme sonucu göçmüşlerdir.

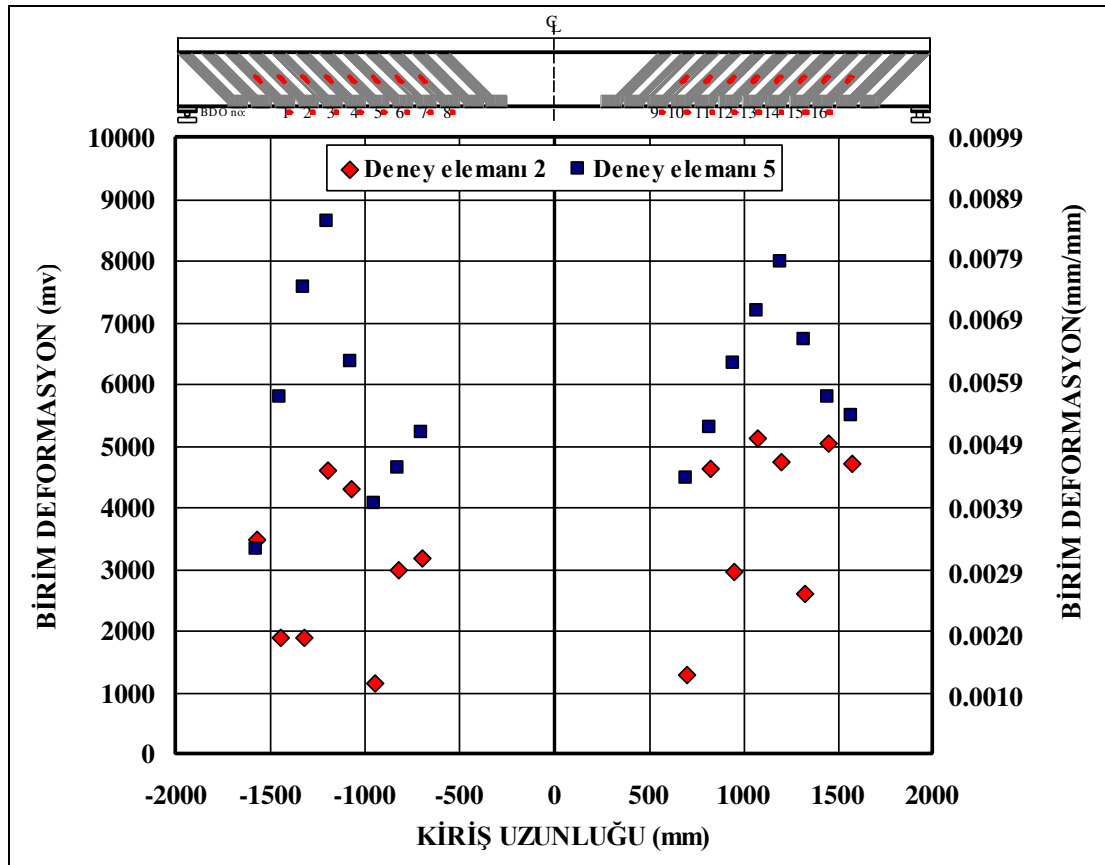
5.5. Şeritlerde Birim Deformasyonlar

Onarılan deney elemanları 2, 3, 5 ve 6'da diyagonal CFRP şeritlerin üzerine 16 adet, deney elemanları 4 ve 7'de diyagonal CFRP şeritlerin üzerine 10 adet birim deformasyon ölçer yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerler CFRP şeritlerin ortasına lif doğrultularına paralel yapıştırılmıştır. CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden alınan maksimum değerler ve deney esnasında birim deformasyon ölçerlerden elde edilen maksimum değerler koyu olarak Çizelge 5.5'de verilmiştir. Deney elemanlarına yapıştırılan diyagonal CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerleri ile geliştirilen fan ankrajların etkisinin tartışılması için CFRP şerit eksen arası yatay mesafeleri özdeş olan deney elemanları gruplandırılarak deney elemanlarının üzerindeki ölçekli dağılımları Şekil 5.6 - 5.8'de verilmiştir.

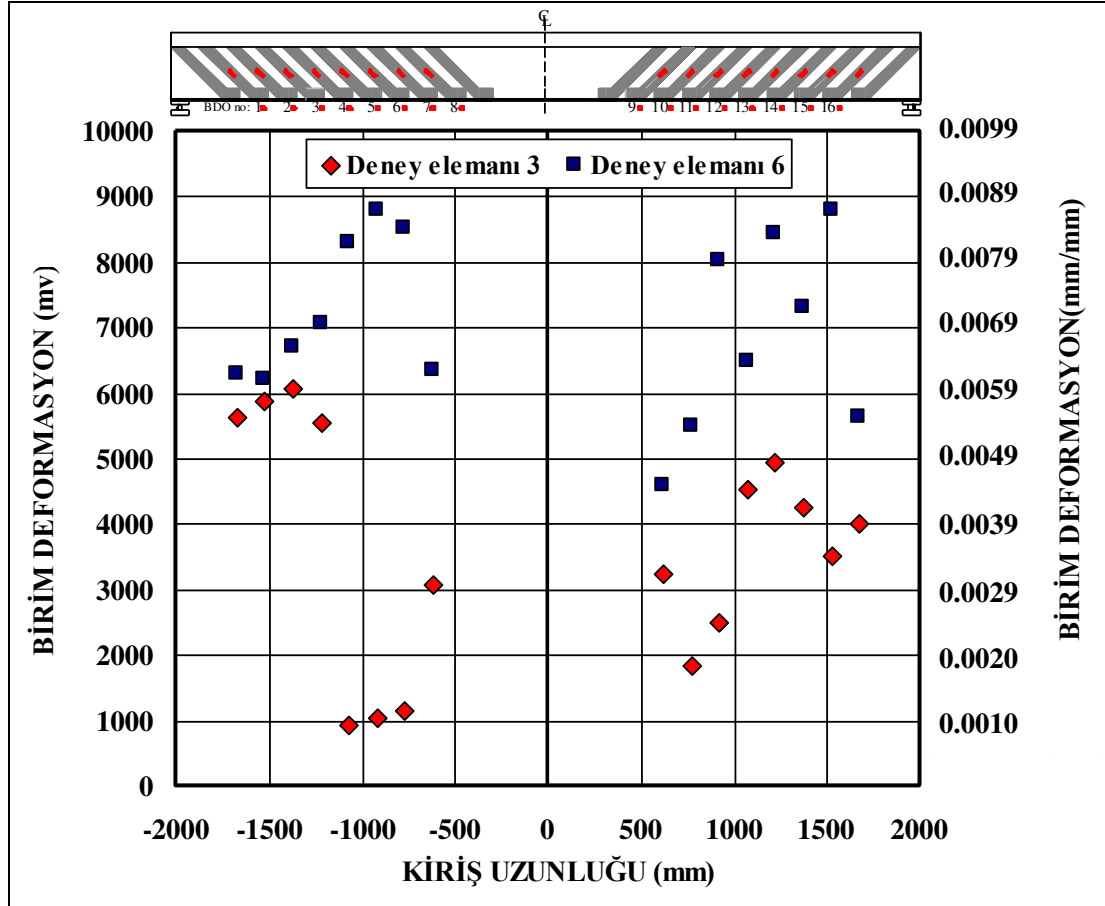
Çizelge 5.5. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri

	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											
	mv	mm/mm	mv	mm/mm	mv	mm/mm	mv	mm/mm	mv	mm/mm	mv	mm/mm
1	3475	0,0033	5630	0,0053	5570	0,0053	3306	0,0031	6280	0,0060	8620	0,0082
2	1880	0,0018	5880	0,0056	6100	0,0058	5789	0,0055	6220	0,0059	8800	0,0084
3	1880	0,0018	6060	0,0058	5800	0,0055	7550	0,0072	6716	0,0064	7140	0,0068
4	4600	0,0044	5560	0,0053	2330	0,0022	8620	0,0082	7063	0,0067	6760	0,0064
5	4290	0,0041	926	0,0009	3400	0,0032	6368	0,0060	8310	0,0079	8240	0,0078
6	1158	0,0011	1042	0,0010	1158	0,0011	4053	0,0038	8780	0,0083	7400	0,0070
7	2980	0,0028	1158	0,0011	2420	0,0023	4631	0,0044	8530	0,0081	5750	0,0055
8	3170	0,0030	3090	0,0029	2860	0,0027	5210	0,0049	6340	0,0060	5220	0,0050
9	1274	0,0012	3250	0,0031	2489	0,0024	4458	0,0042	4600	0,0044	5280	0,0050
10	4640	0,0044	1840	0,0017	2547	0,0024	5291	0,0050	5500	0,0052	9370	0,0089
11	2950	0,0028	2489	0,0024			6330	0,0060	8030	0,0076		
12	5110	0,0049	4530	0,0043			7180	0,0068	6470	0,0061		
13	4749	0,0045	4940	0,0047			7960	0,0076	8440	0,0080		
14	2600	0,0025	4250	0,0040			6716	0,0064	7310	0,0069		
15	5050	0,0048	3530	0,0034			5789	0,0055	8780	0,0083		
16	4700	0,0045	4000	0,0038			5490	0,0052	5630	0,0053		

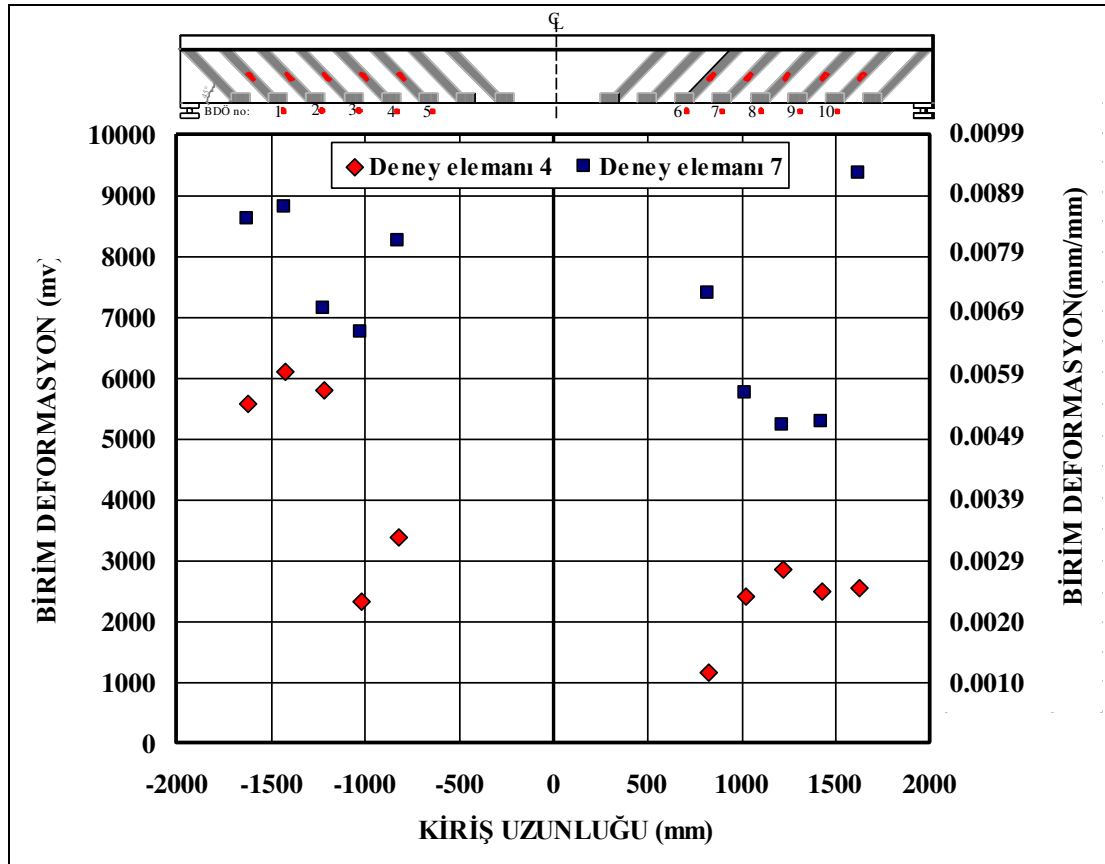
Fan ankrajsız Diyagonal CFRP şeritlerle onarılan deney elemanlarında CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerlerinin ortalaması 0,0055 mm/mm (5757 mv) hesaplanmıştır. Hesaplanan bu birim deformasyon değeri yönetmeliklerde (ACI, DBYBHY) verilen maksimum 0,004 mm/mm değerinden %37,5 daha fazladır. Bu farkın nedeni onarım yapılan deney elemanlarında bulunan mevcut çatlaklardan dolayı CFRP şeritlerin hemen yük almasıdır. Diyagonal CFRP şeritlerin uçlarına uygulanan fan ankrajlı deney elemanlarında maksimum birim deformasyonların ortalama değeri 0,0085 mm/mm (8923 mv) olarak hesaplanmıştır. Uygulanan fan ankrajlı CFRP şeritlerin maksimum birim deformasyon değerinin ortalaması yönetmelik değerinden %112,5 daha fazladır. Geliştirilen fan ankrajlar ve diyagonal CFRP şeritlerin altına yapıştırılan 250 x 100 mm'lik CFRP parçaların kullanılmasıdır.



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)

Diyagonal CFRP şeritler, uygulanan fan ankrajlar ve şeritlerin altına yapıştırılan CFRP parçalar kirişte kesme dayanımının artmasını sağlamıştır. Deneylerde uygulanan fan ankrajlar diyagonal CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiştir. Fan ankrajlar sayesinde kirişlerin sünekliği artmış ve kirişler eğilme kırılması sonucunda göçmüştür. Ankrajlı deney elemanlarında CFRP şeritlerin üzerindeki birim deformasyon ölçerlerden, yönetmeliklerde verilen sınır koşullardan daha büyük değerler elde edilmiştir. Şerit eksenleri arasındaki yatay mesafenin artması diyagonal CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri artmıştır. Bunun sebebi, diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe arttığında deney elemanlarında oluşan eğik çatlaklara karşı gelen etkin diyagonal CFRP şerit sayısı azalmıştır.

5.6. Kirişte Kesme Dayanımı Hesabı

Yetersiz kesme donatılı deney elemanlarının kesme kırılmasından göçmesini engellemek için yapılan diyagonal CFRP şeritlerin kesme dayanımı hesabı ACI 440 komite raporunda ve *fib* verilen eşitlikler kullanılarak yapılmıştır [2, 10]. DBYBHY 2007’de, diyagonal CFRP şeritler kullanılması durumu bulunmamaktadır. ACI 440’ta CFRP şeritlerin diyagonal ve düşey, DBYBHY 2007’de CFRP şeritlerin düşey kullanılması durumları için, CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin (s_f) CFRP şerit genişliği ile kiriş faydalı yüksekliğinin dörtte birinin toplamını ($w_f+d/4$) geçmemesi öngörülmektedir. DBYBHY 2007’de CFRP şeritlerin kirişe dik olarak uygulanması, kiriş çevresinin tamamen sarılması ve en az 200 mm bindirme yapılması koşulu bulunmaktadır. Bu koşullara göre çalışmadaki CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafe 132,5 mm olması gerekmektedir. *fib*’de ise bu değer daha büyüktür. Deney elemanları 2 ve 5’de CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafe 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 deprem yönetmeliğinin dışındaki değerlerde diyagonal CFRP şeritlerin kiriş kesme dayanımına katkısı değerlendirilmiştir. Uygulamada mevcut döşeme ve donatılardan dolayı CFRP şeritlerinin hem düşey hem diyagonal olarak kirişin çevresini tamamen sarması uygulama olarak mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle kirişi tamamen sargılamak yerine şerit uçları yaklaşık 170 mm uzunluğunda bir kısmı kiriş tablasının altına yapıştırılmıştır. Şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemek için deney elemanları 5, 6 ve 7’de diyagonal CFRP şeritlerin uçları fan türü ankrajlar kullanılarak sabitlenmiştir. Deney elemanlarının kesme kuvveti dayanımları hesaplanırken beton ve donatı dayanımları ACI 318, TS500 ve EC2’ye göre hesaplanmıştır. CFRP katkıları ise ACI 440, DBYBHY 2007 ve *fib*’e göre hesaplanmıştır. DBYBHY 2007’de diyagonal yapıştırılan CFRP şeritlerin uygulanması öngörülmemektedir. Bu sebepten dolayı DBYBHY 2007’de bulunan denklemler ACI 440’a göre revize edilip TS 500’deki betonarme kesitin kesme dayanımı ile birlikte değerlendirilmiştir. Deney elemanları ayrıca DBYBHY 2007’de bulunan düşey uygulanan CFRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısına değerlendirilmiştir. Deney elemanları son olarak EC2 ve *fib*’e göre diyagonal CFRP

şeritlerin uygulanmasına göre hesap edilmiştir. Deney elemanlarının kesme dayanımları Eş. 5.1-5.18 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = V_c + V_s + V_f \text{ (N)} \quad (5.1)$$

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 Eş. 5.2-5.6'da verilen eşitliklerle hesaplanmıştır.

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

$$V_c = 0,65 \sqrt{f_{ctd}} \cdot b_w \cdot d \text{ (TS 500)} \quad (5.3)$$

$$f_{ct} = 0,35 \sqrt{f_c} \text{ (ACI 318, TS 500)} \quad (5.4)$$

$$V_c = [0,12 \cdot k \cdot (100 \rho_l \cdot f_c)^{1/3} - 0,15 \cdot N_u / A_c] \cdot b_w \cdot d \text{ (EC 2)} \quad (5.5)$$

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \text{ (EC 2)} \quad (5.6)$$

Eşitliklerde kullanılan terimler aşağıda verilmiştir

V_c : Betonun taşıdığı kesme kuvveti (N)

f_c : Betonun basınç dayanımı (MPa)

f_{ctd} : Betonun çekme dayanımı (MPa)

b_w : Kiriş kesit genişliği (mm)

d : Kiriş faydalı yüksekliği (mm)

ρ_l : Çekme donatısı porsantaj oranı

A_c : En kesit beton alanı (mm²)

N_u : Eksenel kuvvet (N)

Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti Eş. 5.7'de verilmiştir.

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (\text{ACI 318, EC2, TS 500}) \quad (5.7)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V_s : Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti (N)

A_v : Kesme donatısı kesit alanı (mm^2)

f_y : Kesme donatısı akma dayanımı (mm^2)

d : Kiriş faydalı yüksekliği (mm)

s = Etriye aralığı (mm)

CFRP şeritlerinin taşıdığı kesme kuvveti ACI 440'daki eşitlikler Eş. 5.8.-5.15.'te verilmiştir.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (5.8)$$

$$A_{fv} = 2n_f w_f \quad (5.9)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (5.10)$$

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (5.11)$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (5.12)$$

$$L_e = \frac{23,300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (5.13)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{27} \right)^{2/3} \quad (5.14)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (\text{U biçiminde uygulanan CFRP şerit}) \quad (5.15)$$

V_f : CFRP şeritlerin taşıdığı kesme kuvveti (N)

A_{fv} : CFRP şerit enkesit alanı (mm)

f_{fe} : CFRP şerit kopma gerilmesi (MPa)

n_f : Tek yüzdeki CFRP tabaka sayısı

w_f : CFRP şerit genişliği (mm)

E_f : CFRP elastisite modülü (MPa)

ε_f : CFRP birim uzaması

d_f : CFRP şerit yapışma boyu (mm)

s_f : CFRP şerit aralığı (mm)

CFRP şeritlerinin taşıdığı kesme kuvveti DBYBHY 2007'deki eşitlikler Eş. 5.16.'da verilmiştir.

$$V_f = \frac{2n_f t_f w_f E_f \varepsilon_f d}{s_f} \quad (5.16)$$

Eşitliklerde kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V_f : CFRP şeritlerin taşıdığı kesme kuvveti (N)

n_f : Tek yüzdeki CFRP tabaka sayısı

w_f : CFRP şerit genişliği (mm)

t_f : CFRP şerit kalınlığı

α : CFRP şeritlerin yatayla yaptığı açı

E_f : CFRP elastisite modülü (MPa)

ε_f : CFRP birim uzaması

d : Kiriş faydalı yüksekliği (mm)

s_f : CFRP şerit aralığı (mm)

CFRP şeritlerinin taşıdığı kesme kuvveti *fib*'deki eşitlikler Eş. 5.17-5.18.'de verilmiştir.

$$V_f = 0,9\varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot\Phi + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (fib) \quad (5.17)$$

$$\rho_f = \frac{2t_f b_f}{b_w s_f} \quad (5.18)$$

Eşitliklerde kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V_f : CFRP şeritlerin taşıdığı kesme kuvveti (N)

Φ : Çatlak açısı

b_f : CFRP şerit genişliği (mm)

E_{fu} : CFRP elastisite modülü (MPa)

$\varepsilon_{fd,e}$: CFRP birim deformasyon değeri

ρ_f : CFRP şerit pursantaj oranı

α : CFRP şeridin yatay düzlemle yaptığı açı

d : Kiriş faydalı yüksekliği (mm)

s_f : CFRP şerit aralığı (mm)

Hesaplamalarda kesme donatılarının kesit alanları $56,55 \text{ mm}^2$, akma dayanımları 310 Mpa alınmıştır. Betonun kesme kuvvetine katkısı beton basınç dayanımları ile orantılıdır. Deney elemanlarının elde edilen basınç dayanımları hesaplamalarda kullanılmıştır.

CFRP şeritlerin yapabileceği maksimum birim deformasyon değerleri yönetmeliklerle sınırlandırılmıştır. ACI 440 ve DBYBHY 2007’de CFRP şeritleri için izin verilen maksimum birim deformasyon değeri 0,004 mm/mm olarak belirtilmektedir. *fib*’de bu değer 0,0048’e kadar alınabileceği durumları betimlemektedir. ACI 440 komite raporu CFRP şeritlerin hesaplamalarda kullanılabilecek birim deformasyon değerini verdiği eşitliklerle öngörmektedir [Eş.5.11-5.15]. ACI 440’a göre hesaplanan birim deformasyon değeri ortalama 0,0025mm/mm’dir. Analitik hesaplamalar ACI 440 için hem maksimum değer olan 0,004 mm/mm’ye göre hem de yönetmelikle hesaplanan değerlere göre yapılmıştır. DBYBHY 2007’de ve *fib*’e göre yapılan hesaplamalarda birim deformasyon değeri 0,004 mm/mm alınmıştır. CFRP şeritler için elastisite modülü değeri 231000 MPa’dır

CFRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısı hesaplanırken ACI 440, *fib* ve DBYBHY 2007’ye göre farklılıklar bulunmaktadır. ACI 440’ta bulunan d_f kiriş yüzeyine yapışan etkili CFRP yapışma boyunu, DBYBHY 2007’de bulunan d kiriş faydalı yüksekliğini tanımlamaktadır. Analitik hesaplamalar ACI 318 + ACI 440 ($\alpha=45^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.004$), ACI 318 + ACI 440 ($\alpha=40^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.0025$), TS 500 + DBYBHY 2007 ($\alpha=90^\circ$, $d_f=330 \text{ mm}$), TS 500 + ACI 440 ($\alpha=45^\circ$, $d_f=255$) ve EC2 + *fib* durumlarına göre hesaplamalar ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları

No	S _f	Kesme Dayanımı					
		Ölçülen	Hesaplanan				
			Ölçülen / Hesaplanan				
			ACI 318 ACI 440 $\alpha=45^\circ$, d _f =255 $\epsilon=0,004$	ACI 318 ACI 440 $\alpha=45^\circ$, d _f =255 $\epsilon=0,0025$	TS 500 DBYBHY $\alpha=90^\circ$, d _f =330 $\epsilon=0,004$	TS 500 ACI 440 $\alpha=45^\circ$, d _f =255 $\epsilon=0,004$	EC 2 <i>fib</i> $\alpha=45^\circ$ $\epsilon=0,004$
1	-	62,07	52,61	52,61	64,77	64,77	46,07
			1,18	1,18	0,96	0,96	1,34
2	125	80,08	83,74	72,35	92,87	95,59	77,75
			0,96	1,18	0,86	0,84	1,03
3	150	71,69	78,87	69,11	88,63	90,89	72,66
			0,91	1,04	0,81	0,79	0,99
4	200	65,37	72,80	65,44	83,34	85,03	66,29
			0,89	0,99	0,78	0,77	0,98
5	125	80,26	84,14	72,36	93,42	96,13	77,98
			0,95	1,11	0,86	0,83	1,03
6	150	79,27	78,94	69,22	88,72	90,98	72,69
			1,00	1,14	0,89	0,87	1,09
7	200	78,64	72,21	64,88	82,53	84,23	65,95
			1,09	1,21	0,95	0,93	1,19

Ankrajlı deney elemanlarında ölçülen kesme dayanımları ACI 318 + ACI 440 ($\alpha=45^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.004$)'a göre analitik hesaplamalardan ortalama %8, TS 500 + ACI 440 ($\alpha=45^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.004$)'a göre ise %20,33 küçük elde edilmiştir. Ancak ankrajlı deney elemanları için hesaplanan kesme dayanımları ACI 318 + ACI 440 ($\alpha=90^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.0025$)'ta %7 büyük çıkmıştır. TS 500 ve DBYBHY'de belirtilen eşitlikler ışığında yapılan hesaplamalar ise elde edilen deney sonuçlarına göre %12,67 daha büyüktür. Diyagonal CFRP şeritlerin uçlarına uygulanan f_{an} ankrajlı deney elemanlarında ölçülen değerler ise ACI 318 + ACI 440 ($\alpha=45^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.004$)'a göre yapılan hesaplamalardan %1,33 daha büyüktür. Ankrajlı deney elemanlarının TS 500 + ACI 440 ($\alpha=45^\circ$, $d_f=255$, $\varepsilon=0.004$)'a göre hesaplanan kesme kuvveti kapasitesine göre %12,33 daha az kesme kuvveti taşımaktadır. Elde edilen bu farklılıklar ACI 318'de belirtilen beton kesme kuvveti kapasitesinin TS 500'de belirtilen beton kesme kuvveti kapasitesinden daha az sonuç vermesidir. EC2 + *fib* yönetmeliklerine göre, deney elemanları %4,66 daha büyük kesme kuvveti taşımıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada 7 adet yetersiz kesme donatılı deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanı 1 onarım yapılmayan referans elemanıdır. Deney elemanları 2, 3 ve 4 yalnız diyagonal CFRP şeritler ve kiriş altına yapıştırılan CFRP parçalarla onarılmıştır. Deney elemanları 5, 6 ve 7 diyagonal CFRP şeritlerinin uçları geliştirilen fan ankrajlarla kiriş yüzeyine sabitlenerek ve kiriş altına yapıştırılan CFRP parçalarla onarılmıştır. Diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay 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'dir. Deney elemanları 5, 6 ve 7'de her bir CFRP şeridin ucu 2'şer adet fan ankrajla kirişe sabitlenmiştir. Ankrajlar kiriş tablası ile gövde birleşim noktasına yatayla doğrultu ile 60° ve kiriş tablasının 50 mm altına kiriş gövdesi doğrultusunda uygulanmıştır. Testlerde deney elemanlarının kesme dayanımı, rijitlik, süneklik, göçme mekanizmaları ve CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyonlar incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafe 125mm, 150 mm ve 200 mm olarak ankajsız onarılan deney elemanlarında kesme dayanımları artmasına rağmen CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden erken soyulmasıyla kesme kırılmasından dolayı göçmüşlerdir. Referans elemanının kesme dayanımına göre deney elemanları 2, 3 ve 4'ün kesme dayanımları sırasıyla %29,01, %15,49 ve %3,71 oranlarında artmıştır. CFRP şeritlerin uçlarında kullanılan ankrajlarla onarılan deney elemanlarının (deney elemanları 5, 6 ve 7) kesme dayanımları ortalama %27,90 oranında artmıştır. Fan ankrajlı deney elemanları akma yüküne ulaşmış ve büyük deformasyonlar yaparak basınç bölgesindeki betonun ezilmesi sonucu göçmüşlerdir. Fan ankrajları deney elemanlarının göçme modunun değişmesini ve kesme dayanımının artmasını sağlamıştır. Diyagonal CFRP şeritlerle, uygulanan fan türü ankrajlarda kopma gözlenmemiştir.

- Deney elemanlarının, onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, referans elemanın başlangıç rijitliğine göre ankrajsız deney elemanı 5'te %0,55 oranında artmıştır. Fan ankrajsız deney elemanlarının göçme rijitlikleri, referans deney elemanı göçme rijitliklerine göre deney elemanı 2'de %26,96, deney elemanı 3'te %7,11 ve deney elemanı 4'de %14,98 oranında artmıştır. Fan ankraj uygulanan Deney elemanları 5 ve 6'da %47,94 ve %34,45 oranlarına göçme rijitlikleri, referans elemanı göçme rijitliğine göre azalmıştır. Deney elemanı 7'nin göçme rijitliği ise referans deney elemanın göçme rijitliğine göre %23,97 oranında azalmıştır.
- Diyagonal CFRP şeritlerin uçları fan türü ankrajla sabitlenen deney elemanları sünek eğilme davranışı göstermişlerdir. Deney elemanları 5, 6, ve 7'nin süneklik oranları sırasıyla 2,89, 2,06 ve 1,49 olarak hesaplanmıştır. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe süneklik oranı üzerinde etkili olmuştur. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki yatay mesafe arttırıldığında süneklik azalmıştır. Şerit eksen aralığı yatay mesafe 125 mm olan deney elemanı 5, diyagonal CFRP şeritlerin eksenleri arası yatay mesafe 150 mm olan deney elemanı 6'dan %40,29, şerit eksen aralığı yatay mesafe 200 mm olan deney elemanı 7'den ise % 93,95 oranında daha fazla süneklik sergilemiştir. Diyagonal CFRP şeritlere uygulanan fan ankrajlar kirişlerin sünekliğinin artmasını sağlamıştır.
- Fan ankrajsız diyagonal CFRP şeritlerle onarılan deney elemanlarında CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerlerinin ortalaması 0,0055 mm/mm' dir. Bu değer yönetmeliklerde (ACI 440, DBYBHY 2007) verilen maksimum 0,004 mm/mm değerinden %37,5 daha fazladır. Bu farkın nedeni onarım yapılan deney elemanlarında bulunan mevcut çatlaklardan dolayı CFRP şeritlerin hemen yük almasıdır. Diyagonal CFRP şeritlerin uçlarına uygulanan fan ankrajlı deney elemanlarında maksimum birim deformasyonların ortalama değeri 0,0085 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Uygulanan fan ankrajlı CFRP şeritlerin maksimum birim deformasyon değerinin ortalaması yönetmelik değerinden %112,5 daha fazladır.

- CFRP şerit uçları ankrajlı deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları ACI 318, ACI 440, TS 500, DBYBHY 2007, EC2 ve *fib*'de verilen eşitliklere göre hesaplanan değerler göre farklı konfigürasyonlarla değerlendirilmiştir. Ankrajsız deney elemanlarında ölçülen kesme dayanımlarına en yakın hesaplar EC2 + *fib*'de bulunan CFRP şeritlerin diyagonal uygulanması durumunda elde edilmiştir. Ankrajlı deney elemanlarında ise ACI 318 + ACI 440'a ve EC2 + *fib*'e göre diyagonal uygulanan CFRP şeritler için verilen eşitlikler deneysel sonuçlarla örtüşmektedir. Deneysel sonuçlardan elde edilen bilgiler ışığında ölçülen değerler TS 500 ve DBYBHY 2007'de hesaplanan değerlerden ankrajsız elemanlarda ortalama %18,33, ankrajlı deney elemanlarında ise %10,00 daha az dayanım elde edilmiştir. EC2 + *fib* yönetmeliklerinde bulunan CFRP şeritlerin diyagonal uygulanması durumunda, deney elemanları yönetmelikte hesaplanan değere göre %4,66 daha büyük kesme kuvveti taşımıştır.

6.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Köprü kirişleri basit mesnetler üzerine oturan yetersiz kesme donatılı kirişlerin diyagonal CFRP şeritlerle onarılması uygulamada kullanılabilir. Diyagonal CFRP şerit uçlarının sabitlenmesi sünek eğilme davranışının elde edilebilmesi için önem taşımaktadır. Uygulamada hassas işçilik yöntemin başarısı için önemli etkindir. Analitik hesaplamaların güvenli olması için U biçiminde uygulanan diyagonal CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemek için fan ankrajlar uygulanmalıdır. Hesaplamalar ACI 318 + ACI 440 ve EC2 + *fib*'e göre yapılabilir.
- Diyagonal CFRP şerit uçları tek fan ankrajla kirişe sabitlendiği durumlarda performansı belirlenmelidir. CFRP şerit uçlarının tek ankrajla sabitlenmesi uygulamada önemli kolaylıklar sağlayacaktır.

- ACI 440 ve *fib*'de belirtilen ve uygulama kolaylığı sağlayacağı muhtemel olan, sadece kiriş yan yüzlerine uygulanan CFRP şeritlerin performansı incelenmelidir.
- Yöntemin farklı yüksekliklerdeki kirişler üzerinde etkisi araştırılmalıdır.
- Araştırma kapsamında kullanılan onarım tekniğinin, tersinir tekrarlanır yükler altında performanslarının belirlenmesi gerekmektedir.
- Araştırma kapsamında kullanılan onarım tekniğinin, beton dayanımı düşük kirişler üzerindeki etkinliği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99). Detroit: *American Concrete Institute*, 369, (1995).
2. ACI Committee 440. State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, 68, (1996).
3. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007(DBYBHY 2007), *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara, 183, 184, (2007).
4. Akyuz, U., Ozdemir, G., “Mechanical properties of cfrp anchorages”, *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, B.C., Canada August 1-6, 3349 (2004).
5. Anıl Ö,” Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load” *Cement & Concrete Composites*, 638–649 (2006).
6. Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., ”Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams”, *Cement & Concrete Composites*, 28:276–292 (2006).
7. Eurocode No. 2: Design of concrete structures-part 1: General rules and rules for buildings. *Commission of the European Communities*, prEN 1992-1-1 draft, July, 85-89 (2002).
8. Diogana A, Li A., Gedalia B, Delmas Y., “Shear strength effectiveness with CFF strips” *Engineering Structures*, 507–516 (2003).
9. Ersoy, U., Özcebe, G., “Betonarme: temel ilkeler, TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine (1998) göre hesap”, *Evrin Yayınevi*, İstanbul, 20,89,459,463-468 (2007).
10. FIB bulletin No. 14 “Externally Bonded FRP Requirement for RC Structures.” Technical Report, *Fédération International du Béton*, France, 60-63, (2001).
11. Francesca, C., Marisa, P., Stjin, M., Luc, T., “Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets” *ScienceDirect* 429-441 (2008)
12. Galal, K., Sekar, M., “Rehabilitation of RC inverted-T girders using anchored CFRP sheets”, *Composites: Part B* 1-10 (2007).

13. Jayaprakash, J., Samad, A.A.A., Abbasovich, A.A., Ali, A.A.A., “Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips”, *Construction and Building Materials* 46-62 (2007).
14. Khalifa, A., Nanni, A., “Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites”, *Cement & Concrete Composites*, 22:165-174 (2000).
15. 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).
16. Kim, G., Sim, J., Oh, H., “Shear strength of strengthened RC beams with FRPs in shear”, *Construction and Building Materials* 1-10 (2007).
17. Pulak, T., “Betonarme kirişler için bir güçlendirme yöntemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (1996)
18. Raghu, A., Mettemeyer, M. Myers, J.J., and Nanni, A., “An Assessment of In-Situ FRP Shear and Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Joists,”, *ASCE Structures Congress*, Philadelphia, PA, M. Elgaaly, Ed., May 8-10, CD version, 40492-046-005, 8 (2000).
19. Täljsten, B., Elfgren, L., “Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods”, *Composites: Part B*, 31:87–96 (2000).
20. Täljsten, B., “Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets”, *Construction and Building Materials*, 17:15–26 (2003)
21. Trianafillou, Thanasis C., “Shear strengthening of RC beams using epoxy bonded FRP composites”, *ACI Structural Journal*, 95(2), March-April, 107-115 (1998).
22. TS 500, “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 29-31, (2000).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : OCAKLI, Rafet Özgür
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 09.04.1983 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 231 95 83
 Faks : 0 (312) 231 14 22
 e-mail : rafetozgur@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Müh.	2007
Lise	Kocatepe Mimar Kemal Lisesi/Ankara	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-2007	Yön-Su Müh. Müş. Ltd.Şti	İnşaat Mühendisi
2007-2009	Konkan Müh. Müş. Ltd.Şti	İnşaat Mühendisi
2008-2009	Konin Müh. Müş. Ltd.Şti	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce