

**KESME HASARLI BETONARME KİRİŞLERİN CFRP İLE
REHABİLİTASYONU**

Tolga TOPTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2009

ANKARA

Tolga TOPTAŞ tarafından hazırlanan KESME HASARLI BETONARME KİRİŞLERİN CFRP İLE REHABİLİTASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sinan ALTIN

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Hüsnü CAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Sinan ALTIN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Tekin GÜLTOP

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Uğurhan AKYÜZ

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Doç. Dr. Uğur POLAT

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Tarih: 25/05/2009

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.

Tolga TOPTAŞ

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

Tolga TOPTAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mayıs 2009

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, hasar görmüş yetersiz kesme donatılı kirişlerin U biçimli CFRP şeritlerle onarılmasıdır. Bu çalışmada bir tanesi referans olmak üzere toplam yedi adet kiriş test edilmiştir. Kesme hasarı verilmiş altı kirişten üç tanesi sadece CFRP şeritlerle, diğer üç'ünde CFRP şeritlerin uçları ankrajla sabitlenerek onarılmıştır. U biçimli CFRP şerit eksenleri arasında 125 mm, 150 mm ve 200 mm olmak üzere üç aralık kullanılmıştır. Deney elemanlarının davranışları CFRP şeritlerin aralığı ve ankraj uygulaması değişkenleriyle incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları ile kullanılan onarım yönteminin; dayanım, rijitlik ve süneklik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deney sonuçları ankrajlı CFRP şeritlerin betonarme kirişlerin davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Ankrajlı CFRP şeritler kesme hasarlı kirişlerde sünek eğilme davranışının gelişmesini sağlamıştır.

Bilim Kodu : 911.1.145
Anahtar Kelimeler : Betonarme kiriş, onarım, kesme, CFRP şeritler, ankraj
Sayfa Adedi : 107
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Sinan ALTIN

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

(M. Sc. Thesis)

Tolga TOPTAŞ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2009

ABSTRACT

The purpose of this study is to repair shear deficient and damaged reinforced concrete beams with the application of U shaped CFRP straps. In this study, totally seven beams one of which reference specimen were tested. The six beams shear damaged firstly and then, three of them were repaired with only CFRP straps. The remaining three specimens were repaired with the end anchored CFRP straps. Three different spacing between the U sahpe CFRP straps are used such as 125 mm, 150 mm and 200 mm. The behaviors of the specimens were investigated according to CFRP strap spacing, and whether end anchorages were applied or not. According to results of the experiments, the effectiveness of the rehabilitation method on the strength, stiffness and ductility of the specimen were evaluated. The results of experiment indicate that end anchored CFRP straps have an effect on the behavior of reinforced concrete beams. Anchored CFRP straps enable the development of ductile flexural behavior in beams with shear deficiencies.

Science Code	: 911.1.145
Key Words	: Reinforced concrete beam, repair, shear, CFRP straps, anchorage
Page Number	: 107
Adviser	: Prof. Dr. Sinan ALTIN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan, tez danışmanım Prof. Dr. Sinan ALTIN'a teşekkür ederim.

Ayrıca, laboratuvar koşullarında bu deneysel çalışmanın yapılmasında emeği geçen Doç. Dr. Özgür ANIL'a, Yrd. Doç. Dr. M. Emin KARA ve Uzman Faruk OGÜN'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bununla birlikte tüm çalışma boyunca yardım ve katkılarını esirgemeyen İnşaat Mühendisi Rafet Özgür OCAKLI ve İnşaat Mühendisi Çelebi MERTOĞLU'na teşekkür ederim.

Maddi-manevi desteklerini esirgemeyen aileme ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. DENEY ELEMANLARI	12
2.1. Genel.....	12
2.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi	13
2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	19
2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanışı	22
3. LABORATUVAR TEKNOLOJİSİ.....	30
3.1. Yükleme Sistemi ve Deney Düzeneği.....	30
3.2. Ölçüm Düzeneği ve Verilerin Toplanması.....	33
3.2.1. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni	33
3.2.2. Verilerin toplanması	34
4. DENEYLER.....	36
4.1. Deney elemanı 1 (Referans elemanı)	36
4.2. Deney elemanı 2.....	38
4.3. Deney elemanı 3.....	46
4.4. Deney elemanı 4.....	53
4.5. Deney elemanı 5.....	59
4.6. Deney elemanı 6.....	66
4.7. Deney elemanı 7.....	73
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	80
5.1. Deney Elemanlarının Davranışı	82
5.2. Kesme Dayanımı	88

	Sayfa
5.3. Rijitlik.....	89
5.4. Süneklik.....	90
5.5. Şeritlerde Birim Deformasyonlar	91
5.6. Kesme Dayanımı Hesabı.....	96
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	102
6.1. Sonuçlar.....	102
6.2. Öneriler.....	104
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri	18
Çizelge 2.2. Beton karışım oranı	19
Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları	20
Çizelge 2.4. Donatıların özellikleri	20
Çizelge 2.5. CFRP'nin özellikleri	21
Çizelge 2.6. Sikadur 330'un özellikleri	22
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti	81
Çizelge 5.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları	88
Çizelge 5.3. Deney elemanlarında rijitlikler (kN/mm)	89
Çizelge 5.4. Deplasman süneklik oranları	91
Çizelge 5.5. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri	93
Çizelge 5.6. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları	100

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deney elemanlarının donatı şeması	15
Şekil 2.2. Kiriş çelik kalıp kesiti	18
Şekil 2.3. Onarılan deney elemanları	25
Şekil 2.4 Kiriş kesitinde fan ankraj uygulama detayı	29
Şekil 3.1. Tipik bir deney elemanında yükleme ve ölçüm düzeni	31
Şekil 3.2. Deney elemanlarının serbest cisim diyagramı	32
Şekil 3.3. Deney elemanlarının iç kuvvetleri	32
Şekil 4.1. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 1	37
Şekil 4.2. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 2	39
Şekil 4.3. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 2	42
Şekil 4.4. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 3	47
Şekil 4.5. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 3	49
Şekil 4.6. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 4	54
Şekil 4.7. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 4	56
Şekil 4.8. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 5	60
Şekil 4.9. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 5	62
Şekil 4.10. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 6	67
Şekil 4.11. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 6	69
Şekil 4.12. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 7	74
Şekil 4.13. Yük-Birim deformasyon grafikleri, deney elemanı 7	77
Şekil 5.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3 ve 4	82
Şekil 5.2. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 5, 6 ve 7	84
Şekil 5.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2 ve 5	85
Şekil 5.4. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 3 ve 6	86
Şekil 5.5. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 4 ve 7	86
Şekil 5.6. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 2 ve 5 ($s_f=125$ mm)	94
Şekil 5.7. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 3 ve 6 ($s_f=150$ mm)	95

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.8. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyonlar, deney elemanları 4 ve 7 ($s_f=200$ mm)	95
---	----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. CFRP fan ankraj detayları.....	23
Resim 2.2. Kirişte fan ankraj uygulanması	24
Resim 4.1. Göçmeden sonra, deney elemanı 1	38
Resim 4.2. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 2	39
Resim 4.3. Göçmeden sonra, deney elemanı 2	40
Resim 4.4. Göçmeden sonra CFRP şeritte soyulma detayı, deney elemanı 2	41
Resim 4.5. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 3	46
Resim 4.6. Göçmeden sonra CFRP şeritte soyulma detayı, deney elemanı 3	48
Resim 4.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 3	48
Resim 4.8. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 4.....	53
Resim 4.9. Göçmeden sonra CFRP şeritte soyulma detayı, deney elemanı 4	55
Resim 4.10. Göçmeden sonra, deney elemanı 4	55
Resim 4.11. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 5	59
Resim 4.12. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 5	61
Resim 4.13. Göçmeden sonra, deney elemanı 5	61
Resim 4.14. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 6	66
Resim 4.15. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 6	68
Resim 4.16. Göçmeden sonra, deney elemanı 6	68
Resim 4.17. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 7	73
Resim 4.18. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 7	75
Resim 4.19. Göçmeden sonra, deney elemanı 7	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Tekil yükün mesnete olan uzaklığı
A_v	Kayma donatısı kesit alanı
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
V_i	BDÖ’deki başlangıç gerilimi

Simgeler**Açıklama**

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**

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

1. GİRİŞ

Genel Açıklamalar

Beton bilindiği üzere, gevrek bir malzemedir. Basınç gerilmelerine dayanımı yüksek, ancak çekme gerilmelerine karşı düşüktür. Betonarme yapıyı oluşturan elemanlar, eğilmeye ek olarak kesme kuvveti de taşımak durumundadırlar. Betonun kesme dayanımı oldukça yüksek olduğundan, betonarme elemanlarda kesme kırılmasına pek rastlanmaz. Buna karşın, kesme ve normal gerilmelerin neden olduğu asal çekme gerilmeleri, betonun çekme dayanımının düşük olması nedeniyle önemli sorunlar doğurur. Betonun kesme ve basınç dayanımı, çekme dayanımından yüksek olduğundan basit kesme durumunda bile kırılma, asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşur. Asal çekme gerilmeleri, kesme gerilmelerinin etkidiği yüzeye 45°'lik açı yapan bir düzlem üzerinden etkiyeceğinden, kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla meydana gelecektir. Asal çekme gerilmelerinden oluşan bu tür çatlama, “eğik çatlak” olarak adlandırılır [1].

Betonarme elemanlarda oluşan asal çekme gerilmeleri, beton ve uygun kesme donatıları ile karşılanmalıdır. Etriyeler, kullanımlarına göre çeşitli şekillerde bükülüp, boyuna donatıya dik olacak şekilde belirli aralıklarda yerleştirilen donatılardır. Etriye donatısının temel işlevi, betonarme elemanın kesmeden kırılmasını önleyerek eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Yeterli etriyesi bulunan elemanda eğilme davranışı hakim olacak, eğik çatlaklar kılcal düzeyde kalırken göçme, elemanın eğilme kapasitesine erişmesi ile gerçekleşecektir [2].

Kesme donatılı betonarme bir kirişte, asal çekme gerilmelerinin beton eğik çekme dayanımından küçük olduğu düzeylerde, etriyeler herhangi bir gerilme taşımazlar. Fakat beton eğik çekme dayanımının aşılmasıyla gelişen eğik çatlaklar, etriyelerde ani ve büyük gerilme oluşumuna neden olacaktır. Etriyeler de bu eğik çatlakların oluşumuyla etkili olmaya başlayacaklardır. Etriyelerin seyrek yerleştirildiği

durumlarda ise, oluşan eğik çatlak gerekli sayıda etriye ile kesişemeyeceğinden kiriş yeterli dayanımı gösteremeyecektir [2].

Yeterli etriyesi bulunmayan betonarme kirişlerde, kesme dayanımı sağlanamadığından, eğik çatlakların oluşmasıyla eleman gevrek biçimde kırılarak göçecektir. Bu tür kırılmaların önlenmesi için yönetmelikler minimum etriye donatısı sınırlamaları getirmişlerdir. Fakat imalat ve yerleştirme güçlüğü nedeniyle, bir çok yapıda etriye projeye uygun yapılmamakta ve büyük oranda azaltılmaktadır. Bunun sonucu olarak da etriye yetersizliğinden kaynaklanan çok önemli kesme problemleri ile uygulamada sık-sık karşılaşılmaktadır. Pratikte bu kesme donatısı yetersizliği nedeniyle birçok durumda kesme hasarlı betonarme kirişlerle karşılaşılmaktadır. Bu gibi durumlarda betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi için çeşitli teknikler kullanılmaktadır [2]. Kullanılan tekniklerden bazıları; Güçlendirilecek betonarme elemanı yeni bir betonarme katmanla kaplamaktır. Bu yöntemle güçlendirilen elemanlarda başarılı sonuçlar vermiş ancak, eski donatıyla yenisi arasında yapılması gereken bağlantı, betonun yerleştirilmesinde karşılaşılan güçlükler nedeniyle uygulaması kolay olmamaktadır. Ayrıca taşıyıcı sisteme ek yükler getirmesi, deprem anında yapıya gelen kuvvetleri artıracaktır. Bir diğer yöntem ise, çelik levhalar ile betonarme elemanların güçlendirilmesidir. Bu tür uygulamalarda da başarılı sonuçlar elde edilmiştir, ancak betonarme ile çelik farklı elemanlar olup, dıştan uygulanan çelik plakaların, betonarme eleman ile birlikte çalışması, işçilik ve detaylar uygulamanın başarısı için önemlidir. Kullanılan bir diğer yöntem ise Karbon lif donatılı polimerler ile güçlendirmedir. Bu tür malzemelerin; uygulanmalarının kolay oluşu, taşıyıcı sisteme önemli sayılabilecek ilave yükler getirmemesi, korozyona karşı dayanıklı olmaları, priz süresi ve servis yüklerini alma süresinin kısa oluşu gibi nedenlerden dolayı tercih edilmekte ve kullanılmaktadırlar.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, kesme hasarlı betonarme kirişlerin, U biçimli şeritler halinde düzenlenmiş, Karbon lif donatılı polimerler ile (CFRP) onarılarak yenilenmesi

teknğinde etkinliğinin araştırılmasıdır. Bununla birlikte CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmalarını önlemek amacıyla yeni bir fan tipi ankraj türü denenmiştir.

Bu çalışmada 7 adet 1/2 ölçekli, tablalı betonarme kiriş Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında üretilmiş ve test edilmiştir. Kirişlerin hepsi yetersiz kesme donatılı olarak tasarlanmıştır. Betonarme kirişlerde sünek eğilme davranışının gelişmesi için gereken kesme donatısının ancak ¼ oranında etriye bulunmaktadır. Bir deney elemanı referans elemanı olarak test edilmiştir. Diğer 6 eleman, önce test edilerek, kesme hasarı almaları sağlanmıştır. Kesme hasarlı kirişler daha sonra U biçimli CFRP şeritlerle onarılmış ve tekrar test edilmiştir. Test programında CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafeler 125 mm, 150 mm ve 200 mm olmak üzere üç aralık kullanılmıştır. Kesme hasarlı betonarme kirişlerin üçünde CFRP şeritler beton yüzeyine yapıştırılmış, diğer üçünde CFRP şerit uçlarında fan ankraji kullanılmıştır. Onarım sonrası test edilen kirişlerin; rijitlikleri, dayanımları, süneklikleri birbirleri ile karşılaştırılmış ve onarım amaçlı kullanılan bu tekniğin etkinliği araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan değişkenler; kiriş eksenine dik yapıştırılan CFRP şeritlerin aralıkları ve ankrajın etkileridir.

Konuyla İlgili Daha Önceki Çalışmalar

Trianafillou, 1998 yılında yayınlanmış olduğu çalışmasında 11 tane betonarme kiriş test edilmiştir. Bunlardan iki tanesi güçlendirilmemiş referans elemanları olarak tasarlanmıştır. Kirişler 1000 mm boyunda, 70 mm eninde ve 110 mm yüksekliğinde üretilmiştir. Kirişlere 4 nokta yüklemesi yapılmıştır. Kirişlerin üretiminde etriye kullanılmamıştır. Kiriş yüzeyinde CFRP şerit aralıkları ve düzenlemesi deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Bütün deneylerde diagonal çatlaklar oluşuktan sonra şeritler soyulmuş ve gevrek kırılmalar gerçekleşmiştir. Kiriş kesme dayanımları ortalama %65 ve %95 arasında artmıştır. CFRP şeritler eğik çatlaklara dik yönde uygulandıkça etkinliği artmıştır [3].

Khalifa ve Nanni, 1999 yılında yapmış oldukları çalışmada 6 adet T kesitli kirişlerin kesme kapasitelerini artırmak için Karbon lif donatılı polimerlerle (CFRP) değişik konfigürasyonlarda güçlendirilmesini incelemişlerdir. CFRP miktarı ve dağılımı (tüm yüzeyin kaplanması yada şeritler ile), sarmalanma şekli (iki yüzeye ayrı veya U tek parça halinde), çift doğrultulu ve tek doğrultulu CFRP ile güçlendirme ve ankraj kullanımı araştırma konularıdır. Kirişlerin kesme açıklığında hiç etriye bulunmamaktadır. Dört nokta yüklemesi yapılmış, a/d oranı 3 seçilmiştir. Kiriş taşıma kapasitesinde değişik güçlendirme uygulamaları sonrası %145'lere varan artışlar sağlanmıştır, ayrıca, ankraj uygulamasının kirişin göçme modunu değiştirdiği, iki yana ayrı-ayrı yapıştırılan şeritlerin, U şeritlerden daha az yük taşıdığı, yapılan deneylerde iki eleman arasında %40 daha fazla CFRP kullanılmasına rağmen aynı taşıma gücü elde edildiği, bu da optimum bir CFRP kullanımının yeterli olduğunu göstermektedir [4].

Täljsten ve Elfgrén, 1999 yılında yapmış oldukları çalışmada sekiz adet 500x180 mm dikdörtgen kesitli kiriş test edilmiştir. Kirişler 4500 mm uzunluğundadır. Üç adet kiriş kontrol elemanıdır. Kontrol elemanlarından ikisine hasar verilmiş, onarılmış ve tekrar test edilmiştir. Tüm elemanlarda CFRP 45° açıyla uygulanmış, yalnız bir elemanda +45° ve -45° de iki yönlü üst üste yapıştırma yapılmıştır. Bunun dışında sadece bir kiriş 45°'lik şeritlerle güçlendirilmiştir. Diğer kirişler 45° yapıştırma ile tüm yüzeyleri kaplanmıştır. Kirişlere dört nokta yüklemesi uygulanmış ve üç çeşit göçme modu oluşmuştur. Bu göçme modları; Karbon fiber çekme kopması, betonun ezilmesi, CFRP'nin beton yüzeyinden soyularak kirişin göçmesidir. Test sonuçlarına göre, CFRP ile kesmeye karşı güçlendirmenin başarılı bir yöntem olduğu, kiriş kesme kapasitesinde artış oluşturduğu, ayrıca ağır hasarlı kirişlerin bile kesme kapasitelerinin %100 oranında artırılabilceği ortaya konmuştur [5].

Kachlakev ve McCurry, 2000 yılında yapmış oldukları çalışmada kesme dayanımı yetersiz mevcut bir köprüye ait dört adet betonarme kiriş laboratuvar ortamında denenmek üzere, tüm kusurlarıyla birlikte, aslına uygun olarak hazırlanmıştır. Bir tanesi kontrol elemanı, diğer üç'ü CFRP ve GFRP ile değişik konfigürasyonlarda güçlendirilmiştir. CFRP ile kirişlerin eğilme kapasiteleri, GFRP ile de kesme

kapasiteleri artırılmaya çalışılmıştır. Kirişlere dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Köprü 1912 yılında yapılmış ve açıklığı 6100 mm'dir. Yapılan incelemelerde, mevcut 2 kirişin kesme dayanımının %95 oranında yetersiz olduğu, ayrıca diğer bütün kirişlerin %50 oranında boyuna donatısının eksik olduğu görülmüştür. Köprü, tarihi bir değeri olduğu için, mevcut görüntüsü korunmaya çalışılmıştır. Bu yüzden kesit ve görünüşü en az değiştirecek karbon lif donatılı polimer malzemeler kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Sadece çekme bölgesine yapıştırılan CFRP ile kirişin eğilme kapasitesi %31 oranında artırılmıştır. Bununla birlikte CFRP kullanımının kiriş rijitliğini artırdığı, deformasyonları azalttığı görülmüştür. GFRP ile kesmeye karşı yapılan güçlendirmede, GFRP etriye gibi çalışmış, kirişin maksimum orta nokta deplasmanını, kontrol elemanına göre %200 artırmış ve boyuna donatının akmasını sağlamıştır [6].

Raghu ve diğerleri, 2000 yılında sundukları kongre bildirisinde T kesitli kirişlerin karbon lif donatılı polimerlerle, kiriş dış yüzünden güçlendirilmesi, güçlendirilen kirişlerin kesme performansı ve göçme modlarını araştırmışlardır. U sarımlı CFRP şeritlerin tüm yüzeyi kaplayacak şekilde, ankrajlı ve ankrajsız uygulamalarının taşıma gücü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde dıştan sarımlı CFRP şeritlerin dağılımının kirişin kesme kapasitesini arttırmada etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bütün elemanlar kesme kırılması sonucu aniden göçmüştür. U şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerin, agrega kenetlenmesini daha iyi sağladığı için başarılı olduğu, güçlendirilen kirişlerin maksimum kesme dayanımlarının, kullanılan güçlendirme yöntemine göre %11 ile %34 oranında artış gösterdiği, şeritlerin ankrajlı veya ankrajsız uygulanmasına bağlı olmadan, çift kat uygulanmasının kesme kapasitesine büyük bir katkısının olmadığı, tek sarımlı ankrajlı elemanların çift sarımlı ankrajsız deney elemanına göre %17 daha fazla kesme kuvveti taşıdığı görülmüştür [7].

Li ve diğerleri, 2001 yılında yapmış oldukları çalışmada, yetersiz kesme donatılı kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi ve güçlendirme sonrası davranışlarını araştırmışlardır. 14 adet kiriş denenmiş, tekil yük kesme açıklığının 1/3'ünden uygulanmıştır. Kirişin kesme dayanımının; beton basınç dayanımına, etriye akma

dayanımına, boyuna donatıların akma dayanımına, etriye ve boyuna donatı oranına, a/d oranına, kullanılan CFRP dayanımına, kullanılan CFRP miktarına bağlı olduğu bildirilmektedir. Deneysel sonuçlar, kullanılan CFRP miktarı arttıkça CFRP'nin kiriş kesme dayanımına katkısının arttığını göstermektedir. CFRP'nin kiriş kesme kapasitesine katkısının, kullanılan boyuna donatı miktarı ve etriye miktarıyla ilişkili olduğu görülmüştür. Analitik bir formül önermenin; beton, donatı ve CFRP'nin karşılıklı etkileşimlerinin karmaşık olduğu ve sadece süperpozisyonla açıklanamayacağı belirtilmiştir. Ancak, önerilen yaklaşımın, deney sonuçlarına göre kabul edilebilir ve güvenilir olduğu ortaya konmuştur [8].

Khalifa ve Nanni, 2002 yılında yayınlanan çalışmalarında kesme kapasitesi düşük olan 12 adet dikdörtgen kesitli kirişlerin CFRP şeritlerle kiriş dış yüzeyinden güçlendirildikten sonra, kesme performansı ve göçme modları incelenmiştir. Bu deneylerdeki değişkenler; kullanılan etriye miktarı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve CFRP şerit genişliğidir. Açıklığı 3050 mm, ölçüleri 150 mm x 305 mm olan kirişlere dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Tüm kirişlerin bir tarafı tam etriyeli, öteki tarafı eksik etriyeli veya etriyesizdir. Her bir grup kendi içinde $a/d=3$, ve $a/d=4$ olmak üzere ikili gruplara ayrılmıştır. Her bir seriden bir örnek kontrol elemanı olarak seçilmiştir. 50 mm ve 75 mm genişliğinde CFRP şeritlerle güçlendirilen iki ayrı kirişin kesme kapasitelerinde belirgin bir fark olmadığı belirtilmiştir. Aynı a/d oranına sahip iki kirişin, farklı kesme donatısı içermesine rağmen taşıdıkları kesme kuvvetlerinin çok yakın olduğu ve sünekliğin aynı olduğu belirtilmektedir. Bu da CFRP şeritlerin, etriye görevini üstlenebildiğini göstermektedir. ($a/d=4$) 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, optimumun üzerinde olmasının, kirişin kesme kapasitesine belirgin bir katkı sağlamadığı gözlenmiştir [9].

Täljsten, 2003 yılındaki çalışmasında, bir tanesi kontrol elemanı olmak üzere yedi adet 500 x 180 mm kesitinde 4000 mm açıklıklı kirişleri kesmeye karşı, değişik kalınlıklarda ve açılarda karbon lif donatılı polimerin (CFRP) yüzeye yapıştırılması

ile güçlendirmiştir. Kirişlere dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Ayrıca kirişlerin kesme açıklıklarında etriye bulunmamaktadır. Testlerden elde edilen bilgiler sonucunda CFRP şeritler eğer mümkünse kesme çatlaklarına dik yapıştırılmalıdır. Alınan birim deformasyon ölçümleri ile kullanılan et kalınlığı ince CFRP'lerin kapasite kullanımı açısından daha uygun olduğu gözlenmiştir [10].

Akyüz ve Özdemir, 2004 yılında ankrajların direk çekme deneyi sonucu taşıdığı yükleri 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 boyunda, 28 günlük beton basınç dayanımı 16 MPa ve 20 MPa, boyuna donatısı olmayan kirişler testlerde kullanılmıştır. Ankraj çapı 12 mm ve 14 mm olarak belirlenmiştir. Ankraj demiri etrafına sarılan şeritlerinin genişlikleri 80, 120 ve 160 mm olarak seçilmiştir. Ankrajların batma derinlikleri 70, 100 ve 150 mm olarak denenmiştir. Ankraj için kullanılan inşaat demirinin çapı 10 mm'dir. Yapılan deneyler sonucunda ankraj demiri etrafına sarılan şeritlerinin genişliği arttıkça, ankrajın taşıdığı 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 denenilen ankrajların kapasiteleri arasında kayda değer bir farkın olmadığı gözlenmiştir [11].

Bousselham ve Chaallal, 2005 yılında yayınlamış oldukları çalışmada T kesitli, 3000 mm uzunluğundaki 12 adet betonarme kirişin çift doğrultulu CFRP ile güçlendirilmesini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında; kullanılan CFRP miktarı, etriye miktarı ve kiriş tiplerinin (a/d) etkileri araştırılmıştır. Deneylerde kirişlere üç nokta yüklemesi uygulanmıştır. Deney ve gözlemlerin sonucu olarak; etkili yüksekliği (d) büyük (derin) kirişler, etkili yüksekliği küçük (narin) kirişlere oranla daha fazla kesme dayanımı göstermişlerdir, buna karşın narin kirişlerde CFRP'nin kesme kapasitesine katkısı daha çok olmuştur. Deney kontrol elemanlarına kıyasla narin kirişlerin orta nokta deplasmanlarının, derin kirişlere oranla daha çok olduğu görülmüştür. İki kat uygulanan CFRP'nin derin kirişlerde belirgin bir katkı sağlamadığı, narin kirişlerde kesme kapasitesinde büyük artışlar sağladığı

görülmüştür. CFRP ile güçlendirilen kirişlerin deney kontrol elemanlarına göre etriye üzerinden alınan birim deformasyonları daha düşük çıkmıştır, ama özellikle narin kirişlerde etriyelerin yük alarak, akma noktasına geldiği görülmüştür. Çekme yüzüne yapıştırılan CFRP'nin, boyuna donatının aldığı yükü hafiflettiği gözlemlenmiştir. Betonun, içinde bulunan etriye ve dışında tüm yüzeyi saran CFRP'nin katkısıyla daha büyük birim deformasyonlar yapabildiği gözlenmiştir [12].

Bencardino ve diğerleri, 2006 yılında yapmış oldukları çalışmada, içinde etriye bulunmayan betonarme kirişlerin CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmesi araştırılmıştır. Dört nokta yüklemesine göre ankrajlı yada ankrajsız toplam dört kiriş test edilmiştir. Kirişlerin geometrisi 5000 mm uzunlukta ve 140 x 300 mm kesitindedir. Tüm kirişlerin geometrisi ve donatıları özdeştir, ama kesme yükleri farklı noktalara uygulanmıştır. Bunun sonucu olarak kirişlerin yaptığı birim deformasyonlar, yük kapasiteleri ve göçme modları incelenmiştir. Betonarme kirişlerin, CFRP şeritler ile çekme bölgesine yapılan güçlendirmelerin; kesme yüklerini almada zayıf olduğu, göçme modunu değiştirmede yeterli olmadığı görülmüştür. CFRP ile güçlendirilen kirişler, dikkatli bir ankraj sistemiyle güçlendirilirse, kiriş kesme kapasitesinde büyük artışlar görülmekte ve göçme modu gevrekten, sünek hale dönmektedir. Ankraj sisteminin, göçmeden önce, çekme çubuklarının akmasını ve CFRP'nin yüksek birim deformasyonlara ulaşmasını sağladığı ortaya konmuştur [13].

Barros ve Dias, 2006 yılında yapmış oldukları çalışmada, o güne kadar betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi yüzeysel yapıştırma yöntemiyle EBR (Externally Bonded Reinforcement) yapılmaktadır. Bu yöntemle yüzeysel soyulmalar, kullanılan CFRP'lerin maksimum birim deformasyon ve taşıma kapasitelerine ulaşmadan kirişlerin göçmelerine neden olmaktadır. Bu çalışmada etriyesiz kirişlerin güçlendirilmesinde, EBR (Externally Bonded Reinforcement) yerine NSM (Near Surface Method) yöntemi denenmiştir. Bu yöntemde, kiriş yan yüzlerine yapıştırılacak CFRP lamine genişliğinde ve 12 mm derinliğinde oyuklar açılmakta ve CFRP lamineler bu oyuklara yüzeye yakın bir şekilde epoksi ile uygulanmaktadır. Dört nokta yüklemesi yapılmış olup, uygulanan lamine et

kalınlıkları 10 mm ve 25 mm'dir. Yapılan deneylerde kirişler 45° ve 90° NSM metoduyla CFRP lamine uygulaması, boyuna donatı oranının kiriş kesme kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak; NSM tekniğinin EBR tekniğinden daha üstün olduğu, bu üstünlüğün yalnızca kirişin kesme kapasitesindeki artışla değil, göçme öncesi deplasman yapabilme kapasitesindeki artışla da sağlandığı görülmüştür. NSM tekniği ile güçlendirilen kirişlerin göçme modlarının EBR ile güçlendirilen kadar gevrek olmadığı gözlemlenmiştir. NSM ile güçlendirilen kirişlerin, etriye ile üretilmiş kirişlerden aynı yük altında %9 daha fazla deplasman yapabildiği gözlemlenmiştir. EBR ile güçlendirme deneyleri sonucunda kirişlerin, ACI ve fib'e göre hesaplanan değerlerden sırasıyla %2 ve %8 daha fazla kesme dayanımı elde ettiği ortaya konmuştur [14].

Barros ve diğerleri, 2006 yılında yapmış oldukları çalışmada NSM ile EBR tekniklerinin 1000 mm boyunda dikdörtgen kesitli (170x120 mm) betonarme kirişlerde kesme ve eğilmeye karşı güçlendirilmelerini iki grup deneysel test serisi ile karşılaştırmışlardır. Deneylerde dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Eğilmeye karşı güçlendirme için; NSM tekniğine göre CFRP laminelerle yapılan deneylerin sonuçları, EBR tekniği kullanılarak CFRP lamineler ve CFRP şeritlerle güçlendirme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda CFRP ile güçlendirme yönteminde, kesmeye karşı kirişlerde büyük dayanım artışı gözlemlenmiştir. NSM ile güçlendirme tekniği, en efektif CFRP ile güçlendirme yöntemi olarak görülmektedir. Bu etkinlik sadece kiriş taşıma kapasitesindeki artışla değil, bununla birlikte kirişin deformasyon kapasitesindeki artışla da gözlenmiştir. Kiriş derinliği arttıkça 45°'lik CFRP laminelerin, dik (90°) olanlara oranla daha efektif olduğu görülmüştür. NSM tekniği ile güçlendirilmiş etriyesiz kirişlere uygulanan maksimum kuvvet ile, etriyeli kirişlere uygulanan maksimum kuvvet birbirlerine çok yakındır. Eğilme güçlendirmesinde NSM'nin, EBR'ye göre daha etkin olduğu görülmüştür, bu etkinlik farklı kirişlerde kullanılan boyuna donatı oranı arttıkça azalmaktadır. NSM ve EBR ile güçlendirme sonrası göçme modları karşılaştırıldığında NSM'nin gevrek, EBR'nin sünek kırılmalara yol açtığı gözlenmiştir [15].

Kim ve diğ erleri, 2006 yılında yayınlanan çalışmalarında karbon fiber malzemelerle kesmeye karşı yapılan kiriş g   lendirmeleri için, plastik ve kafes adında 2 farklı analitik yöntem önermişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışma dışında literatürdeki diğ er çalışmalarla, önerdikleri analitik yöntemleri kıyaslamışlardır. Kirişin kesmeye karşı g   lendirilmesinde önemli parametreler; kullanılan karbon fiber malzeme dayanımı, g   lendirme düzenlemesi (FRP malzemenin kiriş yüzeyine yapıştırılma sıklığı ve düzeni), FRP ile kiriş yüzeyi yapışma dayanımı olarak belirtilmektedir. Ayrıca  nerilen analitik yöntemlerle deney sonuçlarının uyumlu olduğu ortaya konmuştur [16].

Jayaprakash ve diğ erleri, 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada CFRP şeritlerle g   lendirilmiş 16 adet dikdörtgen kesitli kirişin, g   me modu ve kesme kapasiteleri araştırılmıştır. Dört kiriş kontrol elemanı, 6 kiriş onarılmış, 6 kiriş g   lendirilmiştir. Deney değişkenleri; Boyuna donatı oranı, a/d açıklığı, CFRP şeritlerin arasındaki açıklık miktarı ve kiriş yüzeyine yerleştirilmesidir. Tüm kirişler basit mesnetli olarak test edilmiştir. G   lendirilen kirişlerin kesme dayanımlarında %11 ile %139 oranında artış oluşmuştur. CFRP şeritlerin kullanılması, tüm yüzeye uygulanmasına g  re daha ekonomik olduğu g  r lm ş, bununla birlikte şerit kullanımının g  venilir olduğu belirtilmektedir. Ayrıca kiriş dış yüzeyine yapıştırılmış CFRP şeritlerin etriye gibi çalıştıkları ve kirişlerin kesme kapasitelerini artırdığı g  zlemlenmiştir. Boyuna donatı oranı arttıka, CFRP şeritlerin kiriş kesme kapasitelerine katkısı azalmaktadır. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafenin, kesme kapasitesine etkisi olduğu belirtilmiştir. 45/135  L şeklinde yapıştırılan CFRP şeritler, 0/90  U şeklinde yapıştırılan şeritlere nazaran kesme kapasitesine %42 daha fazla katkı sağlamıştır. Ayrıca L şeklinde yapıştırılarak g   lendirilen kirişlerde daha az çatlak g  zlemlenmiştir. a/d oranı 4 olan kirişlerin, a/d oranı 2,5 olan kirişlere nazaran %83 daha fazla kesme dayanımı g  zlemlenmiştir [17].

Galal ve Sekar, 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada, 8 adet 1/3 ölçekli, ters T kesitli köprü kirişlerini dört nokta yükleme ile test etmişlerdir. Yapılan  alışmada CFRP kumaşlar ve ankrajlar kullanılarak yapılan g   lendirme tekniğinin etkinliği araştırılmıştır. Ters T şeklindeki köprü kirişlerinin başlık ve g  vdesinde oluşabilecek

sünek olmayan göçme davranışının engellenmesine çalışılmıştır. Deneyler sonucunda istenilen bölgelerde sünek davranış elde edilebilmiş, süneklik 4 kat, kesme dayanımı %20 artmıştır. Ankrajların CFRP kumaşları kiriş yüzünde yapıştırıldıkları yerlerde tutabildiği, ankraj kullanılmayan deney elemanlarına göre ankrajlı deney elemanlarının daha iyi performans gösterdiğini gözlemişlerdir [18].

2. DENEY ELEMANLARI

2.1. Genel

Yetersiz kesme donatılı kirişlerin göçme davranışını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de a/d (a : kiriş kesme açıklığı, d : kiriş faydalı yüksekliği) oranıdır.

a/d oranının 7'den büyük olduğu durumlarda, kiriş eğilmede taşıma gücüne erişebilecektir. Bu tür bir kirişte eğik çatlamlar oluşamayacağından, kırılma üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmayacaktır. Bunun nedeni, kesme açıklığı büyük olduğundan, kirişi eğilme kapasitesine ulaştıran kesme kuvvetinin düşük düzeyde kalmasıdır.

a/d oranının 7'den küçük 3'den büyük olduğu durumlarda, önce kiriş eksenine dik eğilme çatlakları oluşacak, yük arttıkça kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlayacaktır. Bu uzama sırasında sözü edilen çatlaklardan biri veya birkaçı asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşmeye başlayacaktır. Bu aşamada, çekme donatısındaki birim uzamada ani bir sıçrama gözlenir. Bu sıçrama, eğik çatlamanın neden olduğu bir gerilme uyumunu gösterir. Eğik çatlama donatıda ani bir gerilme artışına neden olduğundan, donatıya paralel aderans çatlakları oluşmaya başlar. Donatıya paralel gelişen aderans çatlakları o kısımda kenetlenmenin zayıfladığını gösterir. Yük biraz artırıldığında, eğik çatlaklar kirişin alt ve üst uçlarında hızla ilerlemeye devam eder ve kiriş kırılır. Bu kırılma son derece ani ve gevrek bir kırılmadır.

a/d oranının 1,5'den büyük 3'ten küçük olduğu durumda kirişte kesme çatlaklarının oluşup ilerlemesi söz konusu olamaz. Çatlakların oluşmasına rağmen kiriş aniden kırılmayacak ve yük taşımaya devam edecektir. Kirişe etkiyen yük asal basınç gerilmeleri yönünde mesnete aktarılır. Yük ve mesnet arasında bir basınç çubuğu oluşur. Bu duruma ulaşan kirişte eğilmenin yanı sıra gergili kemer davranışı da gözlemlenir.

a/d oranı 1,5'den daha küçük kirişlerde, eğik çekme çatlaklarının gelişmesine noktasal yükün oluşturduğu yerel basınç gerilmeleri engel olur. Bu nedenle, yüke yakın yerlerde eğik çatlak artık ilerleyemez, mesnet bölgesindeki yerel basınç gerilmeleri de donatı boyunca gözlenmesi beklenen aderans çatlaklarının oluşumunu önler. Sonuçta donatı gerilmelerinde sıçramaya ve gerilme uyumuna neden olan eğik çatlamanın oluşmasına rağmen kiriş aniden kırılmaz ve yük taşımaya devam eder. Bu aşamada yük, asal basınç gerilmeleri yönünde mesnete aktarılır. Bu yük aktarımı yapılırken yük ve mesnet arasında adeta bir basınç çubuğu oluşur. Bu duruma erişildiğinde, eğilmenin yanı sıra bir gergili kemer davranışı gözlenmeye başlanır. Çekme donatısı gergi görevini yüklenirken, asal basınç gerilmeleri yönündeki beton da kemer gövdesini oluşturur. Artan yük altında, yükleme noktası altındaki beton, basınç dayanımına ulaşarak ezilmeye başlar. Bu aşamaya ulaşıldığında, kiriş artık yük taşıma yeteneğini yitirir. Eğik-çekme kırılmasında kırılma yükü, eğik çatlak oluştuğu yükle aynı iken, kesme-ezilme olarak adlandırılan bu tür kırılmada, kırılma yükü çatlama yükünden büyüktür.

Kesme açıklığının 1'den küçük olduğu durumlarda, eğik çatlak oluşuktan sonra eğilme önemini kaybeder ve kiriş artık tamamen bir gergili kemer gibi davranır. Artık yükün mesnede aktarılması, eğilme ile değil, doğrudan basınç çubuğu aracılığı ile sağlanır [1].

Bu bölümde üretilen deney elemanları ve kesme hasarlı kirişler için geliştirilen onarım tekniğinin detayları verilmiştir. Geliştirilen deneysel çalışmada kesme hasarlı kirişlerin kesme dayanımı gereksinimi CFRP şeritlerle sağlanmıştır. Deney elemanlarının boyutları ve yükleme şekli, kirişlerin eğik çekme kırılması etkisinde kalmalarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Deney elemanları a/d oranı 5 olan simetrik iki tekil kuvvet altında test edilmiştir.

2.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi

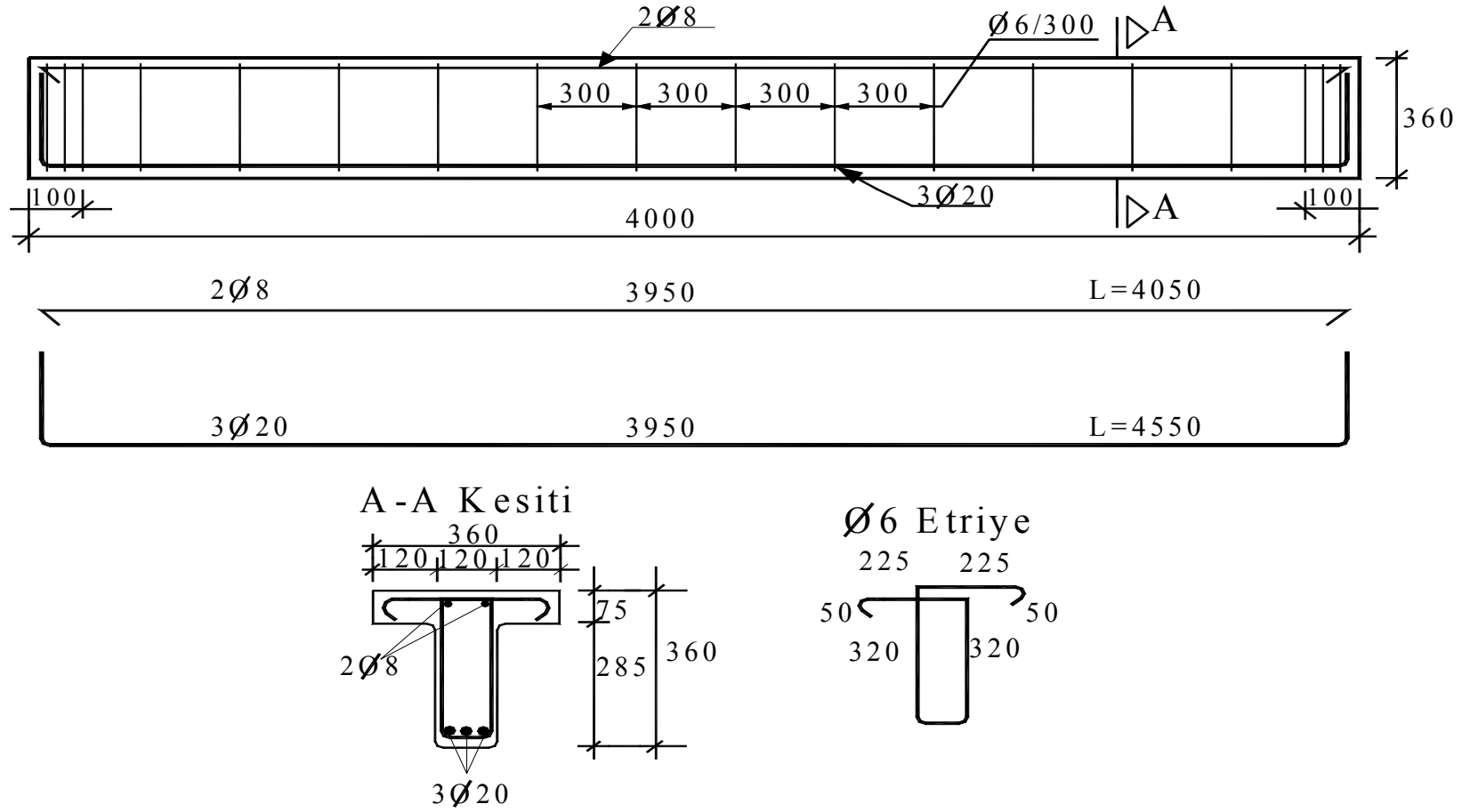
Kirişler Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında 120 x 360 mm en kesitinde ve 4000 mm boyunda, 1/2 ölçekli üretilmişlerdir. Bununla birlikte kirişler tablalı

olarak üretilmiştir. Çünkü, normalde de kirişlerin bir kısmı döşemenin içinde kalmakta ve döşemeyle birlikte çalışmaktadır.

Üretilen kirişlerin hepsinde aynı boyuna donatılar kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak 3 adet 20 mm çapında nervürlü donatı uçlarından 90°, 300 mm boyunda bükülerek yerleştirilmiştir. Montaj donatısı olarak kiriş üstüne yerleştirilen 2 adet 8 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Kesme donatıları 6 mm çapında, düz donatı olarak seçilmiştir. Kirişlerde boyuna donatı oranı $\rho=0,0263$ 'dür ve TS-500'de verilen dengeli donatı oranından ($\rho=0,03005$) küçüktür [19].

Deney programında yedi adet kiriş üretilmiştir. Deney elemanlarından bir tanesi referans kirişidir. Deney elemanları yetersiz kesme donatılı olup ($\emptyset 6/300$ mm) gerçek eğik çekme kırılması davranışının gösterilebilmesi için kesme dayanımı düşük olarak tasarlanmıştır. Mesnetlerde lokal kırılmaların önlenmesi amacıyla 3 adet kesme donatısı, kiriş uçlarındaki 100 mm'lik bölgeye 33 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Deney elemanlarının kesme donatısı oranı $\rho_w=0,00157$ 'dir. Deney elemanlarının donatı şeması Şekil 2.1'de verilmiştir.

Deney elemanlarının kesme dayanımları, 25 MPa beton basınç dayanımı için, yaklaşık 50 kN olarak tasarlanmıştır. Yetersiz kesme donatılı bu kirişlerin onarıldıktan sonra beklenen sünek eğilme davranışı altında eğilme kapasitesinde taşıyabileceği kesme kuvveti yaklaşık 110 kN olarak hedeflenmiştir.



Tüm ölçüler mm'dir.

Şekil 2.1. Deney elemanlarının donatı şeması

Deney elemanları üretilirken ilk olarak kirişlerin donatı kafesleri oluşturulmuştur. Etriyeler, laboratuarda bulunan etriye kalıbı kullanılarak hazırlanmıştır. Tüm kirişlerde etriyeler; 300 mm aralıklarla, altta 3 adet 20 mm çapında nervürlü çekme donatısına, üstte 2 adet 8 mm çapında nervürlü montaj donatısına bağ teli ile bağlanmıştır.

Çelik kalıp temizlenip yağlandıktan sonra, donatı kafesinin pas payları yerleştirilmiştir. Donatı kafesi kalıba yerleştirilmiş ve beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Betonun kalıba boşluksuz olarak yerleşmesi ve segregasyonun önlenmesi için vibratör kullanılmıştır. Beton döküldükten sonra, kalıp çelik profillerle sıkıştırılmıştır. Betonun öngörülen dayanımını kazanması için deney elemanları 28 gün kürde bekletilmiştir. Deney elemanlarına kesme hasarı verilip daha sonra onarımına başlanmıştır.

Onarım uygulaması için 50 mm genişliğinde, 930 mm uzunluğunda CFRP şeritler kullanılmıştır. ACI-440 ve DBYBHY yönetmeliklerinde, 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 [20, 21]. Yönetmeliklerdeki bu koşula göre kullanılabilecek maksimum şerit aralığı 132,5 mm'dir. *fib*'de verilen şerit aralığı sınırlamaları ACI-440 ve DBYBHY'de verilen değerden daha büyüktür [24]. Bu deneysel çalışmada onarım için seçilen ilk şerit aralığı ACI-440 ve DBYBHY'de verilen koşullarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Şerit eksenleri arasındaki aralık 125 mm olan deney elemanında 45°'lik bir kesme çatlağı en fazla etkin 2 adet CFRP şerit ile kontrol edilmektedir. Çalışmada seçilen diğer iki şerit eksen aralığı (150 mm ve 200 mm) ile onarılan kirişlerle, yönetmelik koşulları ile belirlenen şerit eksen aralığı ile onarılan kirişin birbirlerine göre davranışları incelenmiştir. Şerit eksen aralıklarının kesme hasarlı deney elemanlarının kesme dayanımlarının gereksinimine katkıları araştırılmıştır. Deney elemanları 2, 3 ve 4'de U biçimli CFRP şeritler kiriş gövdesini sargılayacak biçimde ve şerit eksenleri arasındaki mesafeler sırasıyla 125 mm, 150 mm ve 200 mm olacak şekilde yapıştırılmıştır. Deney elemanları 5, 6 ve 7'de sırasıyla 125 mm, 150 mm ve 200 mm aralıklı U biçimli CFRP şeritler, uçlarına

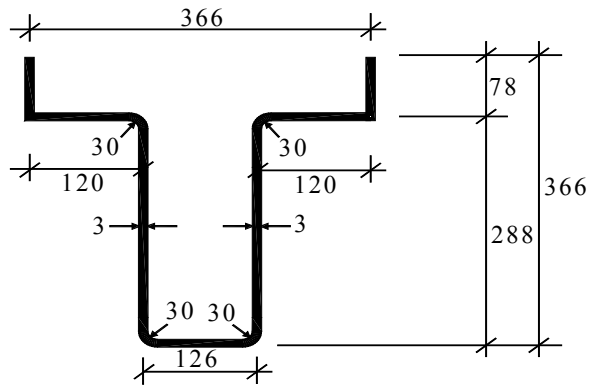
ikişer adet fan ankrajı ile kirişe sabitlenmiştir. Ankrajların biri kiriş tablası ile gövdesinin birleştiği noktaya yatayla 60° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Diğer ankraj kiriş tablasının 50 mm altına, kiriş gövdesine yatay doğrultuda yerleştirilmiştir. Şerit ucundaki bu iki ankrajla kiriş tablası altında gelişen kiriş gövdesi ile kiriş tablasını ayıran kesme çatlaklarının kontrol edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca kiriş gövdesinde gelişen eğik kesme çatlaklarının kontrol edilmesi de bu ankrajlarla sağlanmıştır. Yatayla 60° açı yapan ankrajın düşey bileşeni, CFRP şeritlerde oluşan kesme kuvvetinden dolayı kiriş yüzeyinden erken soyulmayı engellemiştir. Ankrajlarla, kiriş gövdesi ile kiriş tablası birleşiminde gerilme yığılmasını azaltılarak, şeritlerin kiriş yüzeyinden erken soyulması engellenmiştir. DBYBHY’de CFRP şeritlerin kiriş çevresini tamamen sarması zorunlu tutulmuştur [21]. Ancak uygulamada mevcut döşeme ve donatıların CFRP şeritlerin kiriş çevresini sargılamasını çoğu zaman imkansız hale getirmektedir. Buna ilave olarak onarım uygulamasını çok zahmetli bir duruma getirmektedir. Bu nedenle CFRP şeritlerin kirişleri tamamen sargılaması yerine, şerit uçları ankrajlarla sabitlenmiştir. Şeridin ankrajdan sonra kalan 120 mm uzunluğundaki kısmı kiriş tablasına yapıştırılmıştır. Üretilen deney elemanlarının özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri

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

Çelik Kalıp

Deney elemanlarının üretimi için 3 mm kalınlığında çelik levhadan kalıp yapılmıştır. Çelik levhalar T kiriş kesiti şeklinde bükülmüştür. Deney elemanlarında kiriş gövdesinin alt köşelerine ve tabla birleşim kesitlerinde gerilme yığılımlarının önlenmesi için kalıba 30 mm yarıçapında dairesel formlar verilmiştir. Çelik kalıp kesiti detayları Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Tüm ölçüler mm'dir.

Şekil 2.2. Kiriş çelik kalıp kesiti

2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan malzemelerin karakteristik değerlerinin bilinmesi, üretilen kirişlerin benzer özellikte olabilmesi için gereklidir. Üretilen tüm kiriş elemanlarında beton basınç dayanımları standart silindir testi, donatıların akma ve kopma dayanımları yapılan çekme testleri ile test edilmiştir. CFRP şeritlerle ilgili bir test yapılmamış olup, üreticinin verdiği karakteristik değerler aynen alınmıştır.

Beton

Üretilen beton dayanımının tüm deney elemanlarında aynı olması hedeflenmiştir. Beton karışım oranı Çizelge 2.2’de verilmiştir. Kiriş betonu dökümünde alınan 300 x 150 mm boyutlarında standart silindir numuneleri deneyin yapıldığı gün test edilmiştir. Test numunelerinin ortalama basınç dayanımları her deney elemanı için Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Beton karışım oranı

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

Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları

Deney Elemanı No	f_c (MPa)
1	24,8
2	24,3
3	24,6
4	25,3
5	25,1
6	24,9
7	25,5

Donatılar

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan donatıların çekme deneyi sonucunda elde edilen özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Donatıların özellikleri

Donatı Çapı (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)
6	S220	310.0	385.8
8	S420	318.2	425.2
20	S420	475.0	610.2

CFRP

SikaWrap-230 C tek doğrultulu karbon lif donatılı polimerlerdir. CFRP; kolon ve kirişlerin güçlendirilmesi ve sünekliğinin arttırılması, yapısal elemanların yük taşıma kapasitelerinin arttırılması, tasarım veya imalat kusurlarının iyileştirilmesi, mevcut standartlara uyum için onarım ve güçlendirmelerde kullanılmaktadır. Deney elemanlarının onarılmasında kullanılan CFRP'nin özellikleri Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. CFRP'nin özellikleri

Çekme dayanımı:	4100 MPa
Elastisite Modülü:	231000 MPa
Kopma uzaması:	%1,7
Kalınlık:	0,12 mm
Yoğunluk:	$1,78 \times 10^{-6} \text{ (g/m}^3\text{)}$
Birim Alan Ağırlığı:	$220 \pm 10 \text{ (g/m}^2\text{)}$

Epoksi (Sikadur 330)

CFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması için epoksi kullanılmıştır. Sikadur-330 iki bileşenli, epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcısıdır. Kullanılan epoksinin özellikleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Sikadur 330'un özellikleri

Çekme Dayanımı:	30 MPa (+23°C'de 7 günlük)
Elastisite Modülü:	Çekme: 4500 MPa (+23°C'de 7 günlük)
Kopma Uzaması:	%0,9 (+23°C'de 7 günlük)
Sarfiyat:	0,7 – 1,5 kg/m ²
Ağırlık:	220 gr/m ²

Epoksi uygulama yapılacak beton yüzeyi; temiz, kuru ve sağlam olmalıdır. Yüzeydeki kalıp izleri 0,5 mm'den daha büyük olmamalıdır. Köşelere 30 mm çapında dairesel form verilmelidir.

2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanışı

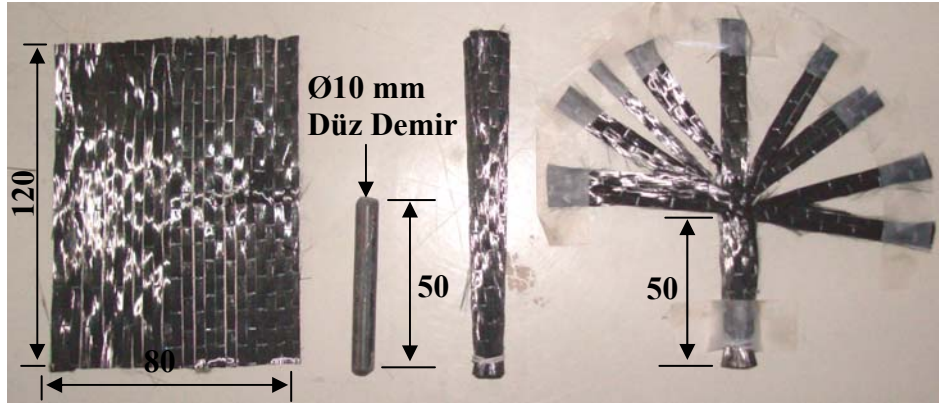
Deney elemanlarında onarım

CFRP şeritler yapıştırılmadan önce, kiriş yüzeyi hazırlıklarına başlanmıştır. CFRP şeritlerin yapıştırılacağı yüzeylerde beton şerbeti temizlenmiş ve beton granülometrisinin görünmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu yüzeyler basınçlı havayla tozlardan arındırılmıştır.

CFRP şeritler, kirişlere yüzeyden yapıştırılarak uygulanmıştır. Şeritlerin yapıştırılma uygulamasına başlanmadan önce iki bileşenli epoksi, dörde bir oranında karıştırılıp, yüzeye 1-1,5 mm kalınlığında sürülmüştür. Şeritler, bindirme yapılmadan, tekparça halinde, tablanın altından başlayıp, kiriş altı ve yan yüzleri arada boşluk kalmayacak şekilde yapıştırılmıştır. İyi bir yapışmanın sağlanabilmesi için CFRP şeritlerin epoksiye doyurulması sağlanmıştır. Yapıştırma sırasında lif doğrultusunun bozulmaması için özen gösterilmiştir.

Fan ankrajların hazırlanmasında 50 mm boyunda 10 mm çapında düz inşaat demiri kullanılmıştır. Ankraj demirinin etrafına 80 mm genişliğinde, 120 mm uzunluğunda CFRP parçaları sarılmış ve ince tellerle bağlanarak birbirlerine tutturulmuştur. Fan

ankraj parçalarının genişliği 10 mm, kiriş yüzüne yapıştırılan uzunluğu 70 mm'dir. Ankraj deliği çapı 14 mm'dir. Her bir şerit için dört adet ankraj deliği, kirişin her yüzüne ikişer tane olmak üzere açılmıştır. CFRP fan ankrajın detayları Resim 2.1'de verilmiştir.

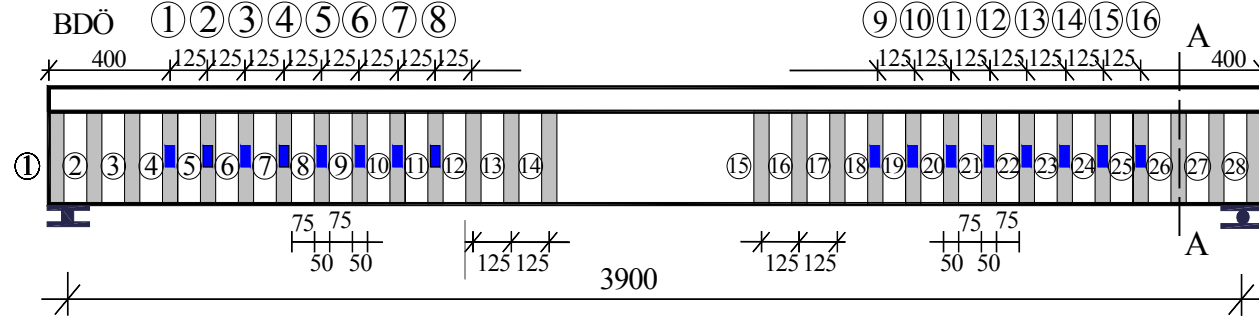


Resim 2.1. CFRP fan ankraj detayları

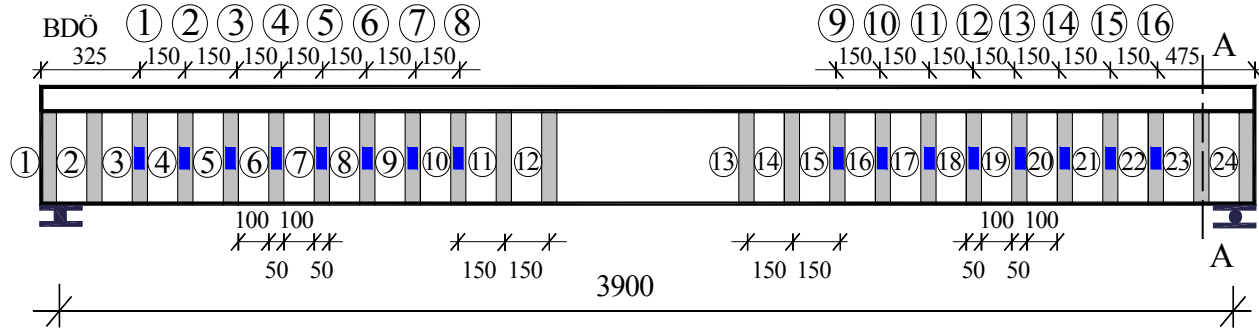
Onarım yapılırken önce CFRP şeritler kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır. Daha sonra ankraj deliklerinin olduğu yerler açılmıştır. Açılan bu deliklere epoksi enjekte edilmiştir. Daha sonra ankrajlar epoksi dolu deliklere 50 mm derinliğinde yerleştirilmiş ve ankrajların uçlarında kalan 70 mm boyunda karbon fiber şeritler fan şeklinde açılmıştır. Deney elemanlarında fan ankrajın uygulanması Resim 2.2'de verilmiştir. Onarılan deney elemanları Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Ayrıca ankraj uygulama detayı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



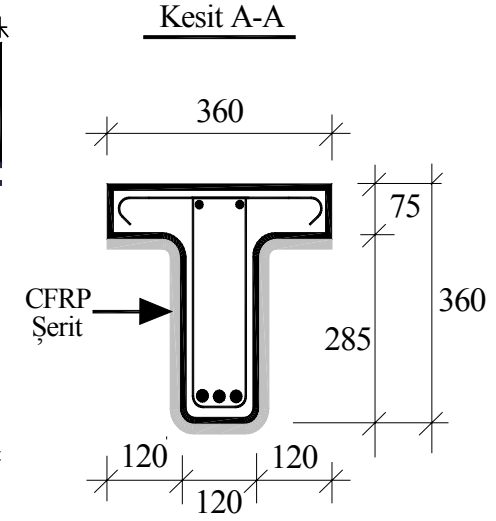
Resim 2.2. Kirişte fan ankraj uygulanması



Deney elemanı 2, $w_f=50$ mm, $s_f=125$ mm



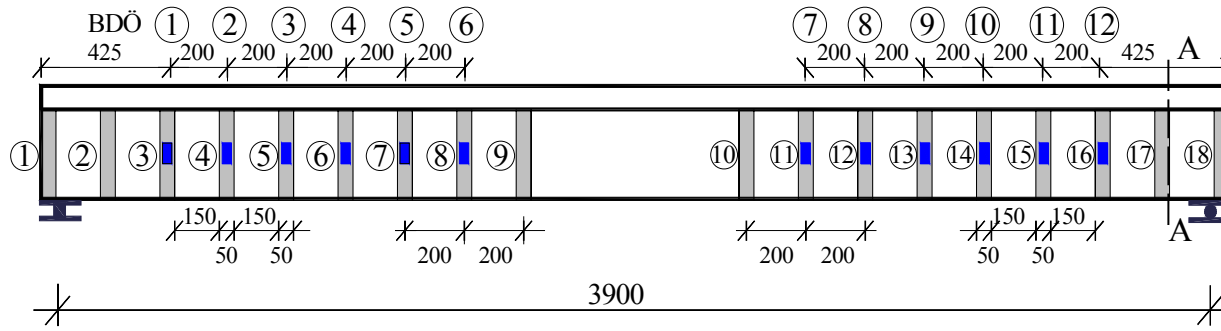
Deney elemanı 3, $w_f=50$ mm, $s_f=150$ mm



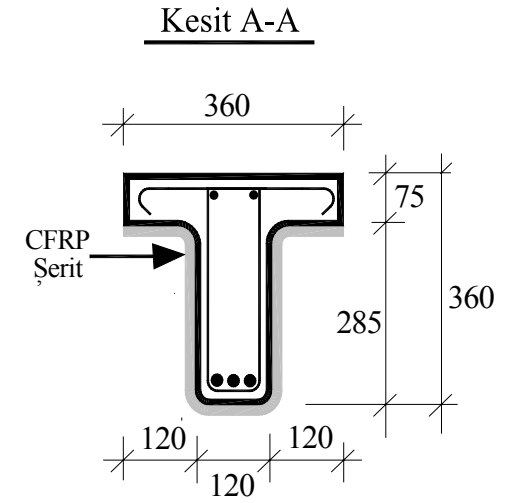
Tüm ölçüler mm'dir.

■ Birim Deformasyon Ölçer (BDÖ)

Şekil 2.3. Onarılan deney elemanları



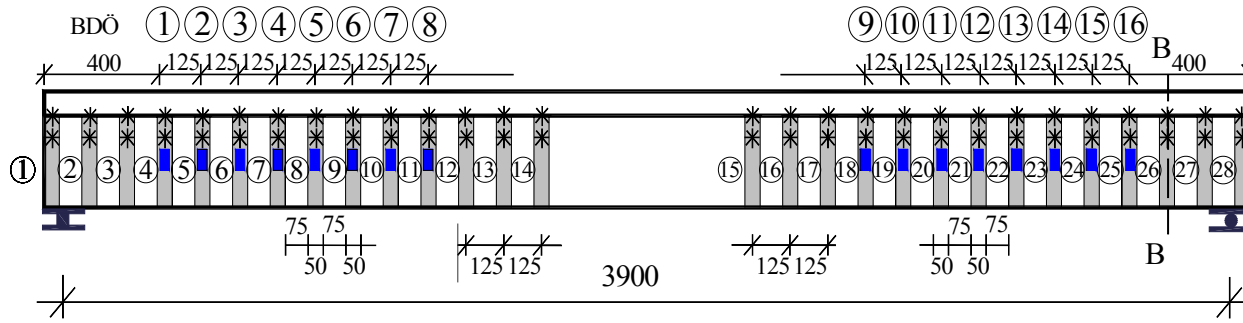
Deney Elemanı 4, $w_f=50$ mm, $s_f=200$ mm



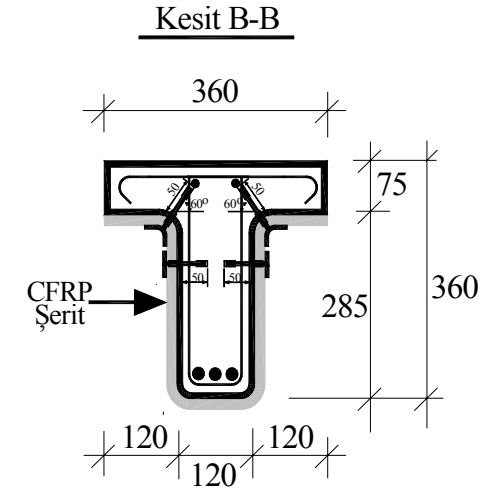
Tüm ölçüler mm'dir.

■ Birim Deformasyon Ölçer (BDÖ)

Şekil 2.3 (Devam) Onarılan deney elemanları



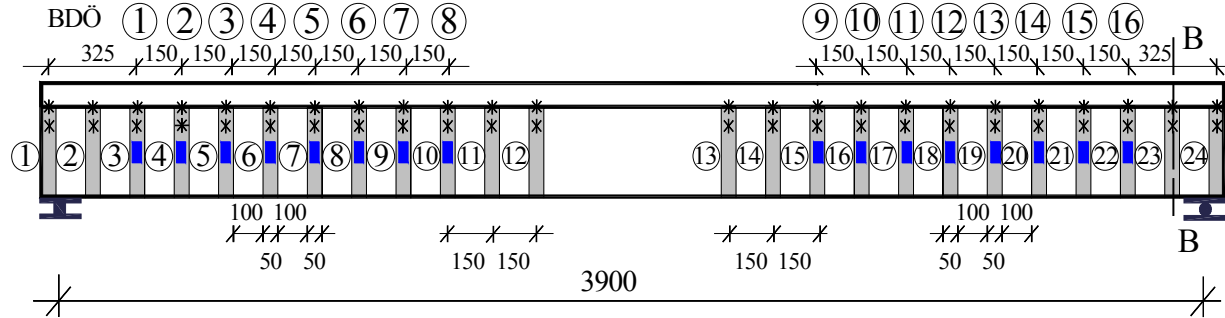
Deney elemanı 5, wf=50 mm, sf=125 mm



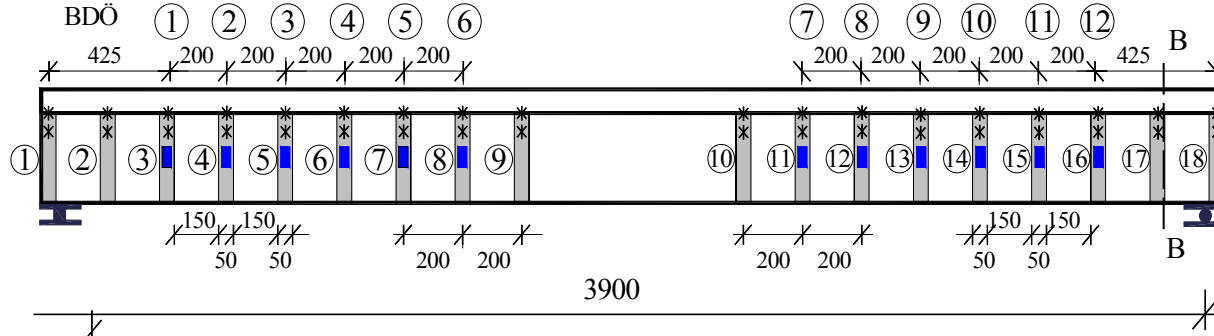
Tüm ölçüler mm'dir.

■ Birim Deformasyon Ölçer (BDÖ)
* Ankraj

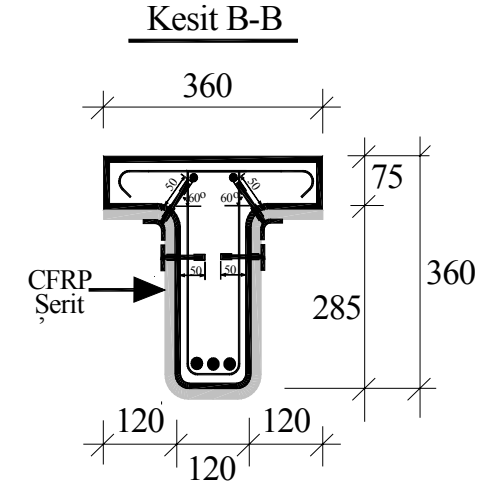
Şekil 2.3 (Devam) Onarılan deney elemanları



Deney elemanı 6, $w_f=50$ mm, $s_f=150$ mm



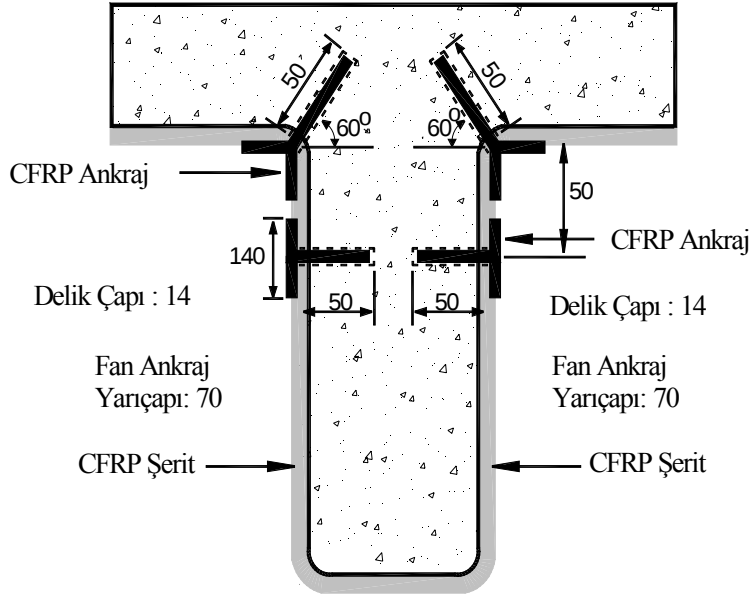
Deney elemanı 7, $w_f=50$ mm, $s_f=200$ mm



Tüm ölçüler mm'dir.

■ Birim Deformasyon Ölçer (BDÖ)
* Ankraj

Şekil 2.3 (Devam) Onarılan deney elemanları



Tüm Ölçüler mm'dir.

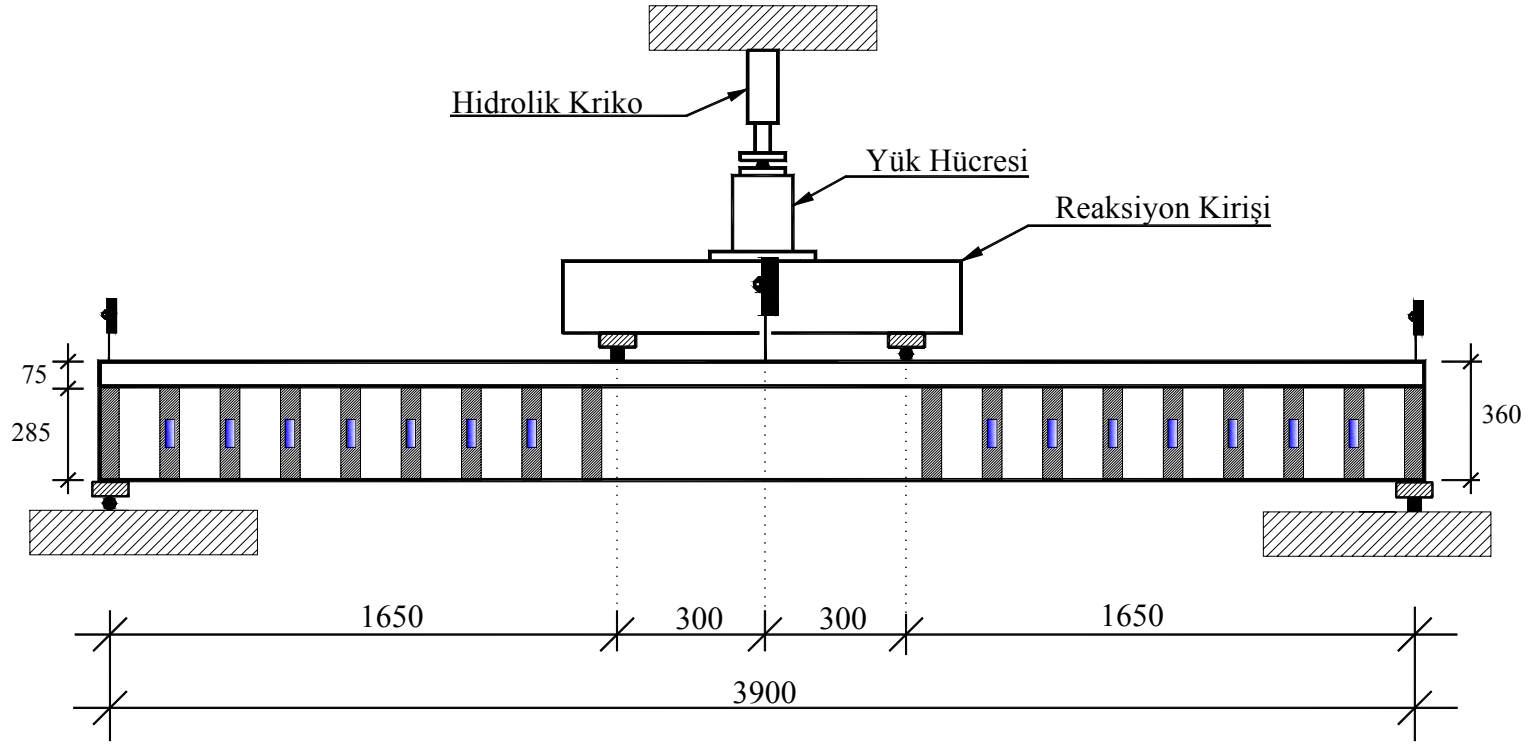
Şekil 2.4 Kiriş kesitinde fan ankraj uygulama detayı

3. LABORATUVAR TEKNOLOJİSİ

3.1. Yükleme Sistemi ve Deney Düzenegi

Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Kirişlerin yüklemesi, 4600 x 2520 mm boyutlarında, 200 kN kapasiteli deney çerçevesinde yapılmıştır. Deney elemanı, yükleme çerçevesine, basit mesnetler üzerinde yerleştirilmiştir. Deney elemanlarının tablası üzerine, kutu kesitli reaksiyon kirişi basit mesnet koşullarında mesnetlenmiştir. Reaksiyon kirişi 600 mm açıklıklı olup, üzerindeki hidrolik krikodan aldığı yükü deney elemanlarına aktarması amacıyla kullanılmıştır. Reaksiyon kirişine tatbik edilen P büyüklüğündeki yükün mesnet reaksiyonları, deney elemanlarına $P/2$ büyüklüğünde ve birbirine eşit iki tekil yük halinde etmiştir. Deney elemanlarının taşıyabildiği maksimum yük olan göçme yükü bu $P/2$ büyüklüğündeki yüküdür. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yük hücresi reaksiyon kirişinin ortasına yerleştirilmiştir.

Deney elemanlarının yüklenmesinde, 600 kN kapasiteli bir hidrolik krikoya bağlı el kontrollü pompa kullanılmıştır. Uygulanan yükün seviyesi hidrolik krikonun altına yerleştirilen 400 kN kapasiteli bir yük ölçme hücresi (Load Cell) ile ölçülmüştür.



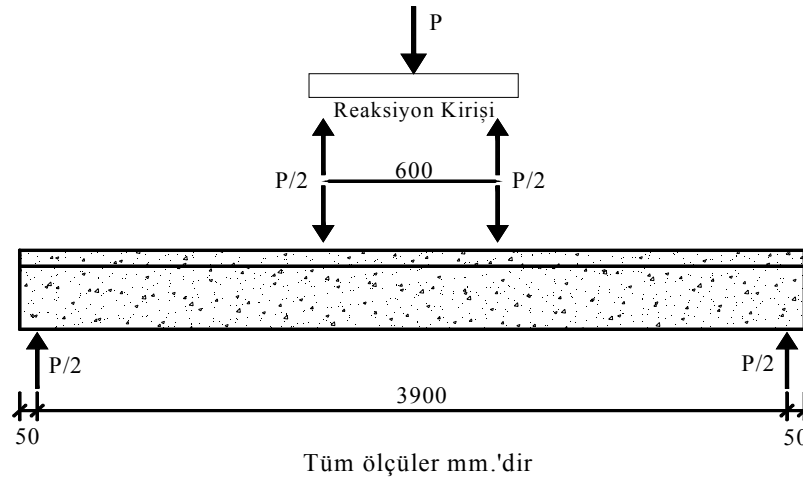
Tüm ölçüler mm'dir

— LVDT

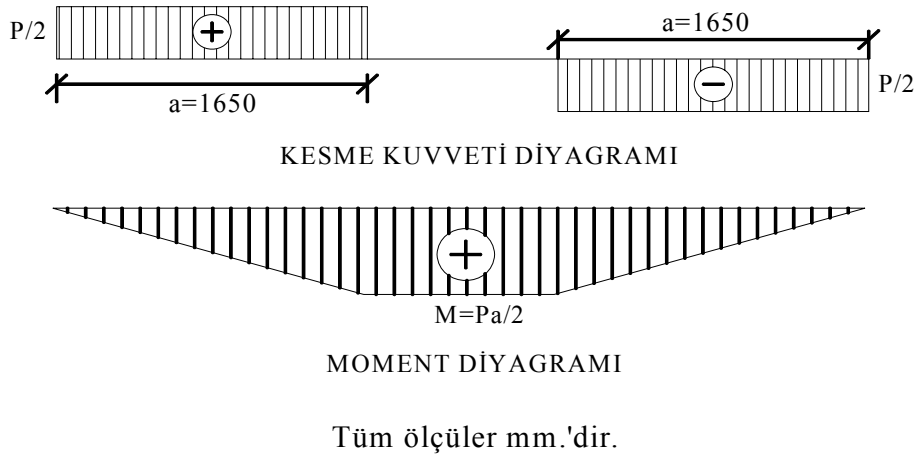
■ BDÖ

Şekil 3.1. Tipik bir deney elemanında yükleme ve ölçüm düzeni

Yükleme tekniğini gösteren serbest cisim diyagramı Şekil 3.2’de, deney elemanlarının iç kuvvetleri Şekil 3.3’de verilmiştir. Deney elemanı, tekil kuvvetler arasında sabit moment etkisi altında eğilmeye zorlanırken, kesme açıklığında momentle birlikte sabit kesme kuvveti etkisi altında bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Deney elemanlarının serbest cisim diyagramı



Şekil 3.3. Deney elemanlarının iç kuvvetleri

3.2. Ölçüm Düzeneği ve Verilerin Toplanması

3.2.1. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni

Bu deneysel çalışmada ötelenme ölçümleri elektronik deplasman ölçüm aletleri (LVDT)'ler ile, birim şekil değişimleri ise birim deformasyon ölçer (BDÖ)'ler ile ölçülmüştür.

Deneylerde sağ mesnet çökmesi, sol mesnet çökmesi ve kiriş orta nokta deplasmanını ölçmek üzere üç adet LVDT kullanılmıştır. Sağ ve sol tarafta kullanılan LVDT'ler kiriş uçlarından 50 mm içerde, kiriş tablası üzerine yerleştirilmiştir.

Kirişin orta noktasının net deplasmanı, sağ ve sol mesnet üzerinde ölçülen deplasmanlar göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Orta nokta deplasmanını ölçen LVDT 200 mm kapasiteli, 50×10^{-6} mm hassasiyetli olup, sağ ve sol mesnet çökmelerini ölçen LVDT'ler 100 mm kapasiteli, 100×10^{-6} mm hassasiyetlidir.

CFRP şeritlerle onarılan altı kirişte de birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. 200 mm aralıklarla onarılan kirişlerde 12 adet, 125 mm ve 150 mm aralıklarla onarılan kirişlerde ise 16 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır.

CFRP şeritlerin birim deformasyonlarını ölçmek için, Tokyo Sokki firmasının ürettiği FLA 10-11 tipi BDÖ'ler kullanılmıştır. BDÖ'ler bir taşıyıcı üzerinde bulunan birbirine paralel bağlantılı tellerden oluşmuştur. Kullanılan BDÖ'lerin direnci 120 ohm'dur. BDÖ'lerin en önemli parametresi uzama oranıdır (GF). Uzama oranı, birim deformasyon ölçerin birim uzamada gösterdiği direnç değişimidir. Birim deformasyon ölçerler 0,01 mm/mm ölçüm kapasitesine sahiptirler.

3.2.2. Verilerin toplanması

Düşey deplasmanın ölçülmesi

Tüm deney elemanlarında düşey deplasmanın ölçülmesi için LVDT'ler kullanılmıştır. Kiriş yüzeyi pürüzlü olduğundan, sağlıklı veri alabilmek için LVDT'lerin altına düzgünce kesilmiş cam parçaları konulmuş ve tek bir düzlemden veri alınması sağlanmıştır.

Deney elemanlarının orta noktasının net deplasmanı, mesnet çökmeleri dolayısıyla oluşan deplasmanın orta noktadan ölçülen toplam deplasmandan çıkartılması sonucunda hesaplanmıştır. Hesaplama için kullanılan Eş. 3.1'de verilmiştir.

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

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

δ_{2net} : Kiriş orta noktası düşey net deplasmanı (mm)

δ_2 : Kiriş orta noktası düşey deplasmanı (mm)

δ_1, δ_3 : Sol ve Sağ mesnet çökmeleri (mm)

Birim deformasyon ölçümü

BDÖ'ler kirişin ön yüzünde kesme hasarı sonucunda oluşmuş eğik çatlakların üzerine gelen CFRP şeritler üzerine yapıştırılmıştır. CFRP şeritlerin uzamasıyla doğru orantılı olarak birim deformasyon ölçerde uzamıştır. BDÖ'ler üzerindeki tellerinde aynı şekilde uzunluğu değişmiş ve direnci uzamaya orantılı olarak değişmiştir. BDÖ'lerden alınan değerler veri toplayıcısı ile bilgisayara aktararak yük-birim deformasyon grafikleri çizilmiştir.

CFRP şeritlerinin birim uzama değerleri Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V_o :Birim deformasyonda ölçülen gerilim değişimi (volt)

V_i :Birim deformasyon ölçerdeki başlangıç gerilimi (volt)

GF :Uzama oranı

$GAIN$:Kazanç faktörü

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

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

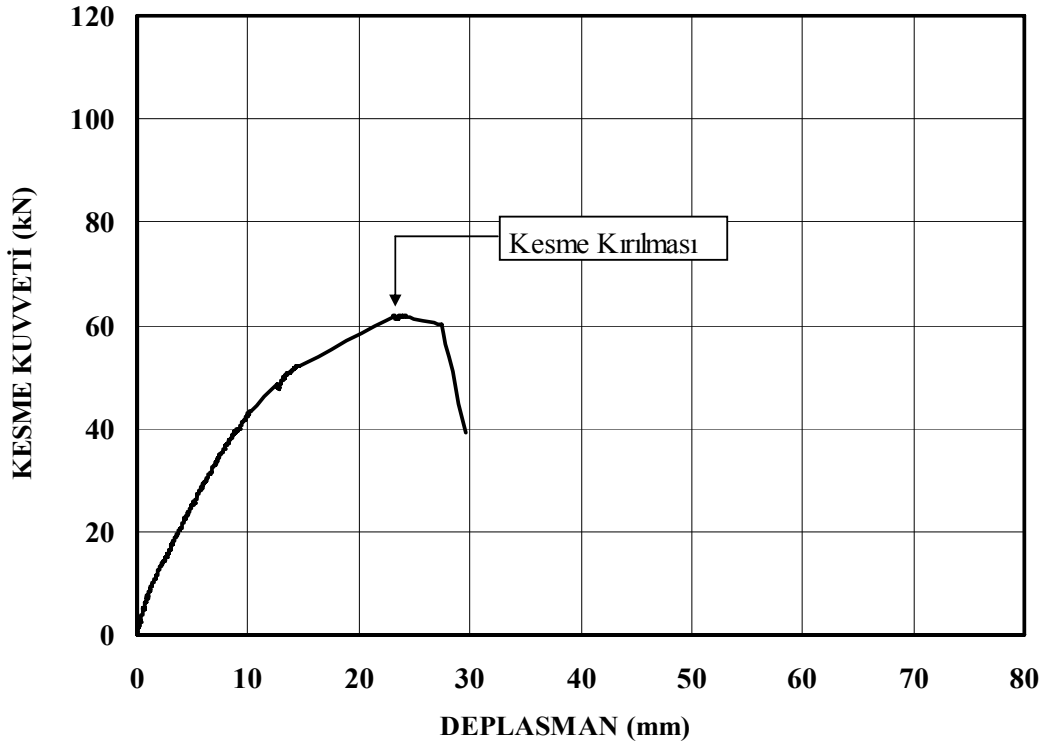
4. DENEYLER

Bu bölümde deneyler sırasında kirişlerde gözlenen davranışlar ve deney sonucu elde edilen ilgili grafikler sunulmuştur. Yük hücresinden ve LVDT'lerden alınan veriler ile yük-deplasman (yük kesme kuvvetini, deplasman kiriş orta noktasındaki net deplasmanı ifade etmektedir) grafikleri oluşturulmuştur. Birim deformasyon ölçerler ve yük hücresinden alınan değerler kullanılarak yük-birim deformasyon (yük kesme kuvvetini ifade etmektedir) grafikleri oluşturulmuştur. Tüm deney elemanları tekdüze yüklemeler altında test edilmiştir.

Referans elemanı dışında diğer deney elemanları 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'nin testleri iki aşamada yapılmıştır. Onarım sonrası yük-deplasman grafiğinin başlangıç noktası, hasar verdirme deneyinde yük kaldırıldıktan sonra ölçülen son kalıcı deplasman değeri olarak düşünülmüş, grafikler buna göre çizilmiştir. İlk aşamada deney elemanları kesme göçmesi öncesine kadar yüklenmiş, kesme çatlaklarının gelişmesi sağlanmıştır. Bu deney elemanları, kesmeden göçen Referans deney elemanının kesme kapasitesinin yaklaşık %80-85'i (50-53 kN) kadar bir yük ile yüklenmiştir. Bu testlerde deney elemanlarında ölçülen maksimum kesme çatlağı genişliği 1,5-2,0 mm olarak ölçülmüştür. Daha sonra yükleme boşaltılarak deney elemanları CFRP şeritler ile onarılmış, sonra göçme meydana gelene kadar yüklenmiş ve testler sonuçlandırılmıştır.

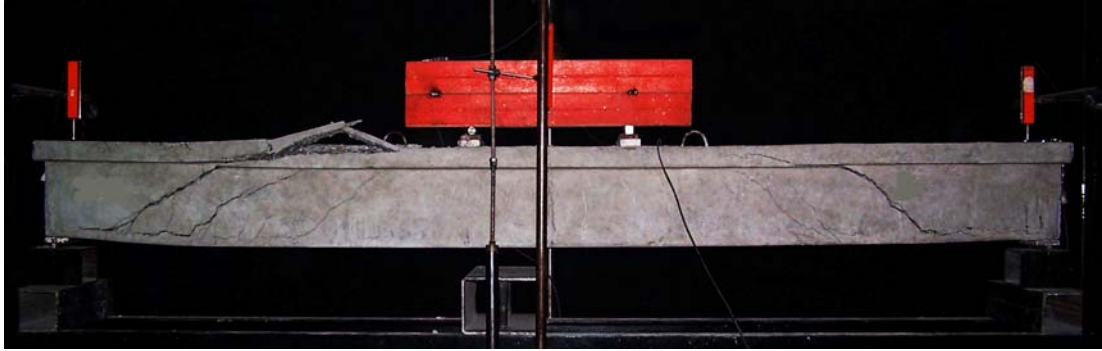
4.1. Deney elemanı 1 (Referans elemanı)

Yetersiz kesme donatılı referans deney elemanından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 1

Kirişte ilk eğilme çatlağı, sabit moment bölgesinde 18 kN yük düzeyinde oluşmuştur. Sol kesme açıklığında ilk eğik çatlak 22,5 kN, sağ kesme açıklığında ilk eğik çatlak 25 kN yük düzeyinde oluşmuştur. 35 kN yük düzeyinde sabit moment bölgesinde eğilme çatlaklarının sayısında artış olduğu gözlemlenmiştir. Sol kesme açıklığında, 40 kN yük düzeyinde kirişin gövdesini bütünüyle kesen eğik çatlak genişlemiştir. 43 kN yük düzeyinde, kiriş sağ kesme açıklığında maksimum eğik çatlak genişliği 0,65 mm, sol kesme açıklığında ise 0,85 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca bu yük düzeyinde sağ kesme açıklığında aderans çatlağının oluştuğu gözlemlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde, sağ kesme açıklığında kesme çatlağı genişliği 1 mm, orta nokta deplasmanı 10,3 mm olarak ölçülmüştür. 58 kN yük düzeyinde kirişin sağ tarafında kesme çatlaklarının iyice belirginleştiği gözlemlenmiştir. Kirişin sağ kesme açıklığından göçmesi beklenirken, kiriş 62,07 kN yük düzeyinde ve ölçülen 23,99 mm deplasmanda sol kesme açıklığından kesme kırılması sonucu göçmüştür. Deney elemanının göçmeden sonraki görünüşü Resim 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. Göçmeden sonra, deney elemanı 1

4.2. Deney elemanı 2

Eksenleri arasında 125 mm mesafe olan ankrajsız CFRP şeritlerle onarılmış yetersiz kesme donatılı deney elemanıdır.

Hasar verdirme deneyi

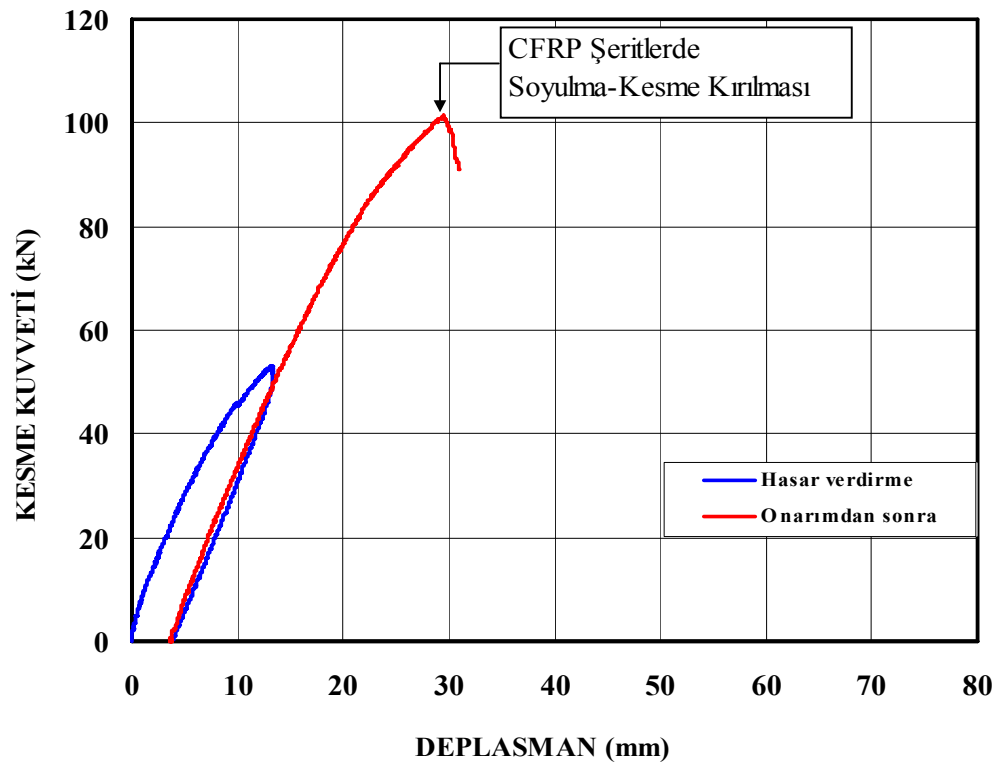
Kirişte ilk eğik çatlak 20 kN yük düzeyinde sağ kesme açıklığında gözlemlenmiştir. 30 kN yük mertebesine gelindiğinde ise, her iki kesme açıklığında eğik çatlakların simetrik olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. 42,5 kN yük düzeyinde eğik çatlaklar kiriş tablasına kadar ulaşmıştır. 44 kN yük düzeyinde ve ölçülen 9,3 mm deplasmanda maksimum eğik çatlak genişliği 0,7 mm olarak ölçülmüştür. 50 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarının aderans çatlaklarına dönüşmeye başladığı gözlemlenmiştir. 52,5 kN yük düzeyi ve ölçülen 14,1 mm deplasmanda sol kesme açıklığında 0,4 mm, sağ kesme açıklığında 1,5 mm eğik çatlak genişliği ölçülmüştür. Bu aşamadan sonra deneye son verilmiştir. Orta nokta kalıcı deplasmanı 3,65 mm, kalıcı maksimum kesme çatlağı genişliği sağ açıklıkta 1,0 mm olarak ölçülmüştür. Kirişte oluşan kesme çatlakları Resim 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.2. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 2

Onarım sonrası deney

Deney elemanının orta noktasından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 2

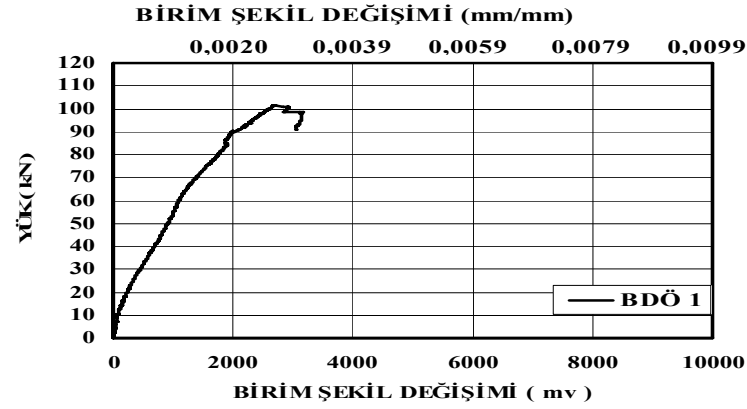
Hasar verme düzeyindeki deplasmana ulaşıldığı anda ölçülen maksimum eğik çatlak genişliği 1,0 mm'dir. 93 kN yük düzeyinde maksimum orta nokta deplasmanı 25,6 mm olarak ölçülmüştür. 101,34 kN yük düzeyinde ve ölçülen 29,54 mm deplasmanda, sağ kesme açıklığındaki 16, 17, 18, 19, 20, 21, ve 22 numaralı CFRP şeritlerin tabla-kiriş birleşim yerinden başlayarak, beton yüzeyinden soyulmasıyla kiriş göçmüştür. Göçmeden sonra deney elemanının görünüşü Resim 4.3'de verilmiştir. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulma detayı Resim 4.4'de verilmiştir. Kiriş göçmeden önce ölçülen en büyük birim deformasyon 11 numaralı BDÖ'den alınan 0,0049 mm/mm değeridir. 11 numaralı birim deformasyon ölçerin yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.3(k)'da verilmiştir. Ayrıca 1, 2 ve ana kesme çatlaklarının üzerinde bulunan 10, 12, 13 ve 14 numaralı BDÖ'lerde 0,0030 mm/mm ile 0,0047 mm/mm arasında birim deformasyon değerleri ölçülmüştür. Deney elemanından alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.3'de verilmiştir.



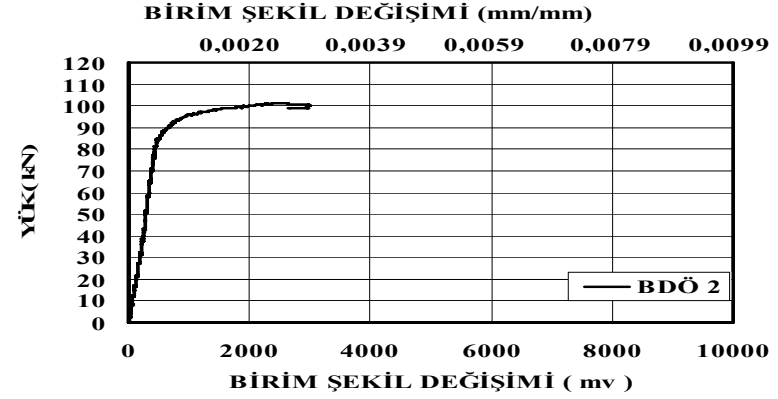
Resim 4.3. Göçmeden sonra, deney elemanı 2



Resim 4.4. Göçmeden sonra CFRP şeritte soyulma detayı, deney elemanı 2



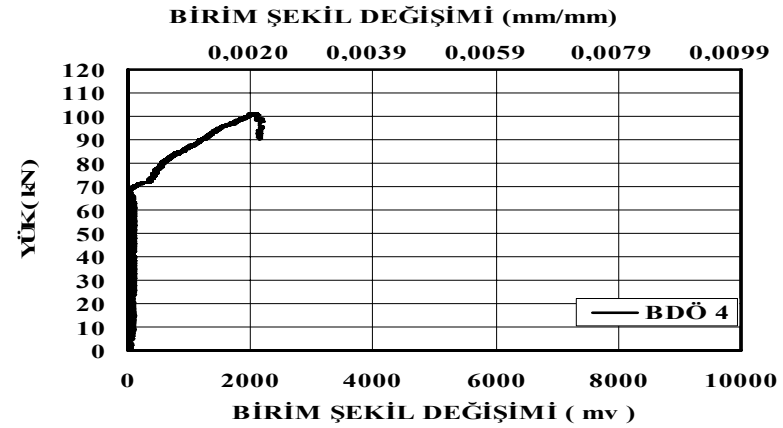
a



b



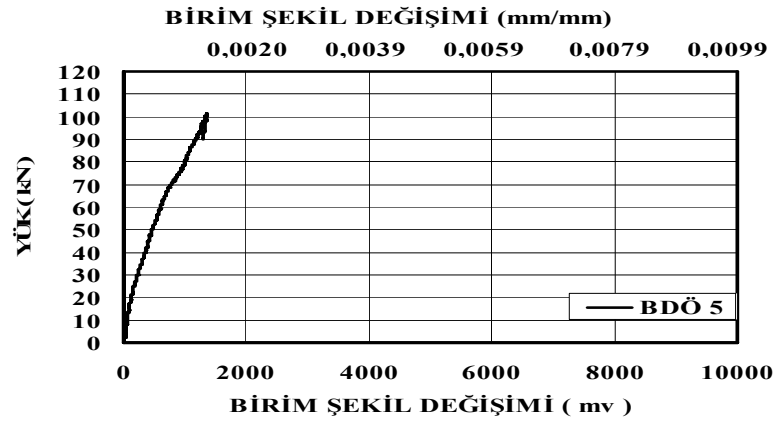
c



d

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

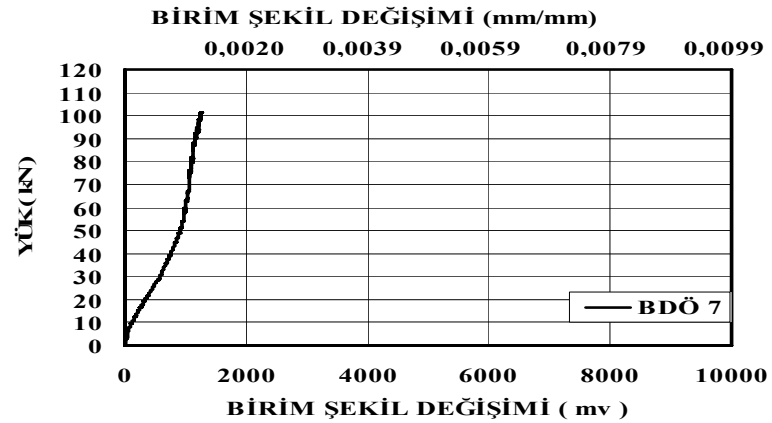
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



e



f



g



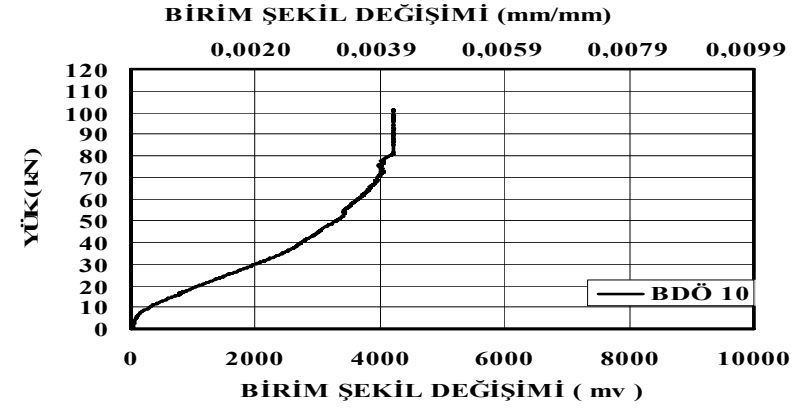
h

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

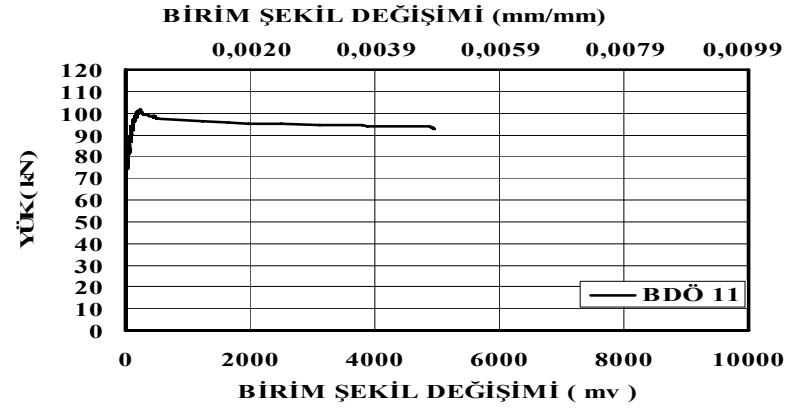
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



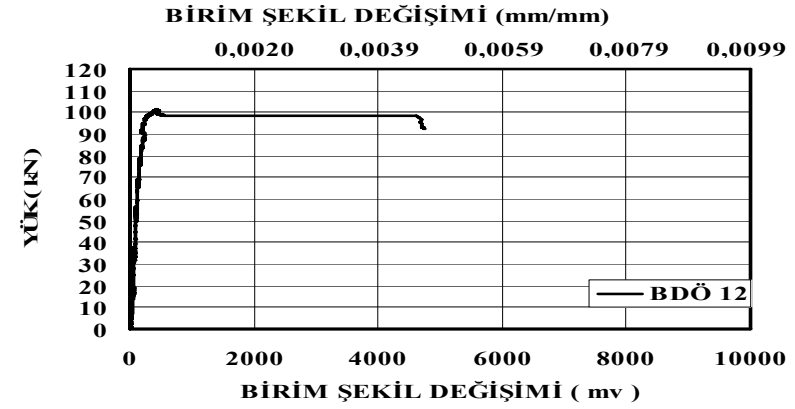
1



j



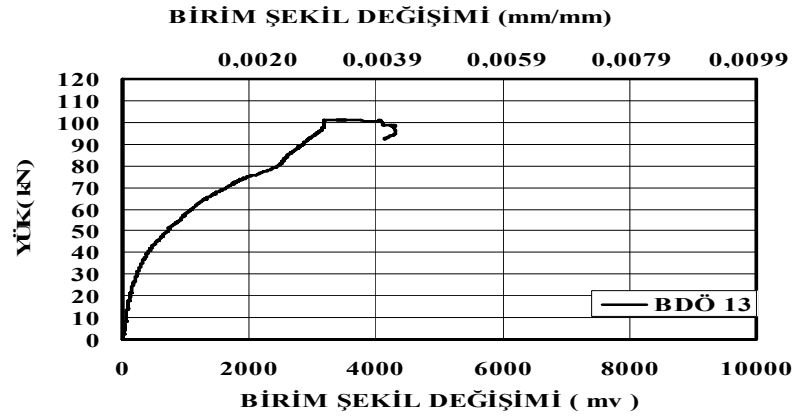
k



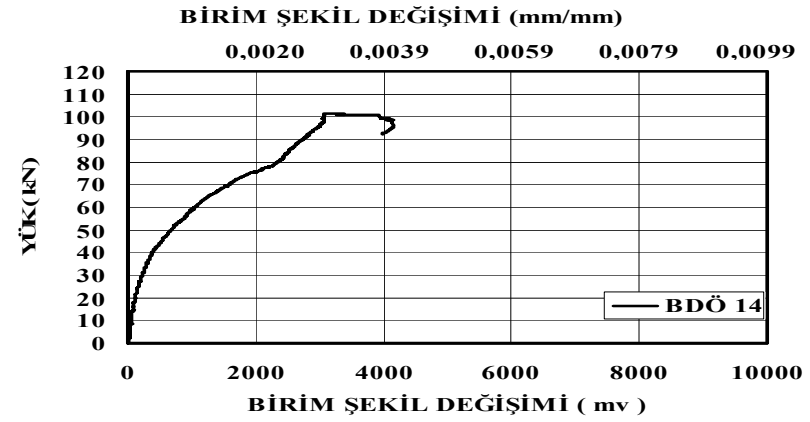
l

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

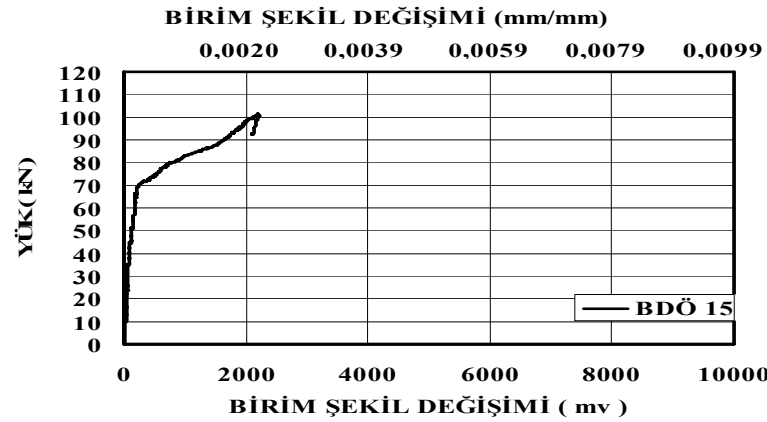
ı) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10, k) Birim deformasyon ölçer 11, l) Birim deformasyon ölçer 12



m)



n)



o)



p)

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

m) Birim deformasyon ölçer 13, n) Birim deformasyon ölçer 14, o) Birim deformasyon ölçer 15, p) Birim deformasyon ölçer 16

4.3. Deney elemanı 3

Eksenleri arasında 150 mm mesafe olan ankrajsız CFRP şeritlerle onarılmış yetersiz kesme donatılı deney elemanıdır.

Hasar verme deneyi

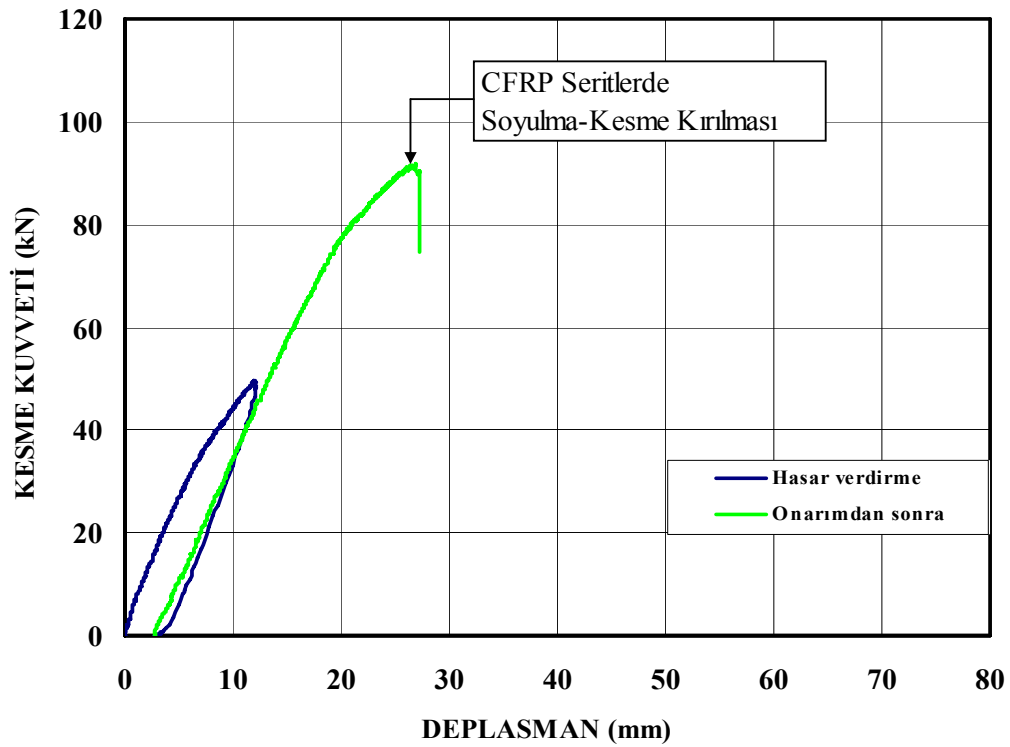
Kirişte ilk eğilme çatlağı 19,5 kN düzeyinde gözlemlenmiştir. 25 kN yük düzeyinde sol kesme açıklığında ilk eğik çatlak gözlemlenmiştir. Sağ kesme açıklığında ise ilk eğik çatlağı 36,5 kN yük düzeyinde gözlemlenmiştir. 40 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarında kılcal düzeyde artışlar gözlemlenmiştir. 45 kN yük düzeyinde sol ana kesme çatlağının, aderans çatlağı belirtileri gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu yük düzeyinde, sol ve sağ kesme açıklıklarında ölçülen maksimum kesme çatlağı genişlikleri sırasıyla 0,7 mm. ve 0,8 mm'dir. 50 kN yük düzeyinde, ölçülen maksimum eğik çatlak genişliği 1,2 mm, maksimum orta nokta deplasmanı 13,4 mm olarak ölçülmüştür. Bu yük düzeyinde hasar verme deneyine son verilmiş, kalıcı deplasman 2,7 mm olarak ölçülmüş, ayrıca kalıcı maksimum kesme çatlağı genişliği 0,7 mm olarak ölçülmüştür. Kirişte oluşan kesme çatlakları Resim 4.5'de verilmiştir.



Resim 4.5. Hasar verme deneyi, deney elemanı 3

Onarım sonrası deney

Deney elemanının orta noktasından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.4’de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 3

Deney başladıktan sonra 37,5 kN yük düzeyine erişildiğinde kiriş orta nokta deplasmanı 10,6 mm ölçülmüştür. 58 kN yük düzeyinde yeni kılcal çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. 3. birim deformasyon ölçerin üzerinde bulunduğu eğik çatlağın genişliği 1,0 mm ölçülmüştür. Her iki kesme açıklığında yeni eğik çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sol kesme açıklığında maksimum eğik çatlak genişliği 1,8 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş 91,96 kN yük düzeyinde ve ölçülen 26,86 mm deplasmanda 17, 18, 19, 20 ve 21 numaralı CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden, tabla-kiriş birleşim yerinden başlayarak soyulduğu gözlemlenmiştir. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması Resim 4.6’da verilmiştir. Göçmeden sonra deney elemanının görünüşü Resim 4.7’de verilmiştir. Kiriş göçme yükünde

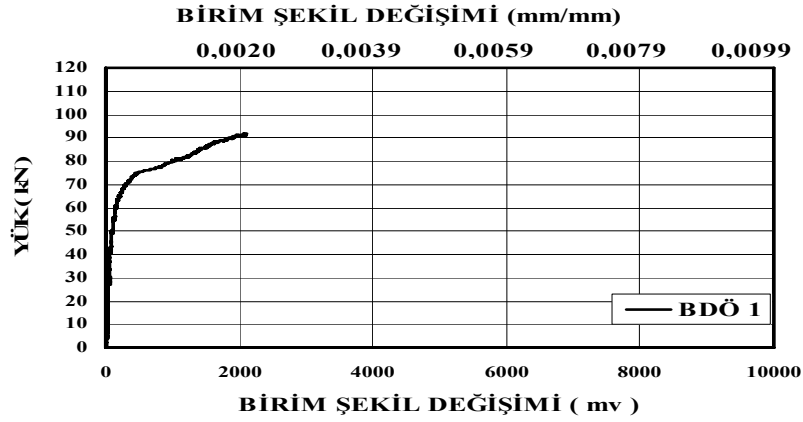
ölçülen en büyük deformasyon 13 numaralı BDÖ'den alınan 0,0052 mm/mm değeridir. 13 numaralı birim deformasyon ölçerin yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.5(m)'de verilmiştir. Deney elemanından alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.5'de verilmiştir.



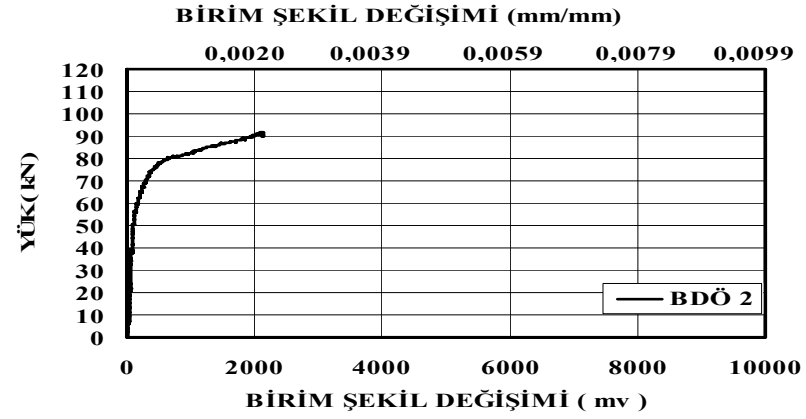
Resim 4.6. Göçmeden sonra CFRP şeritte soyulma detayı, deney elemanı 3



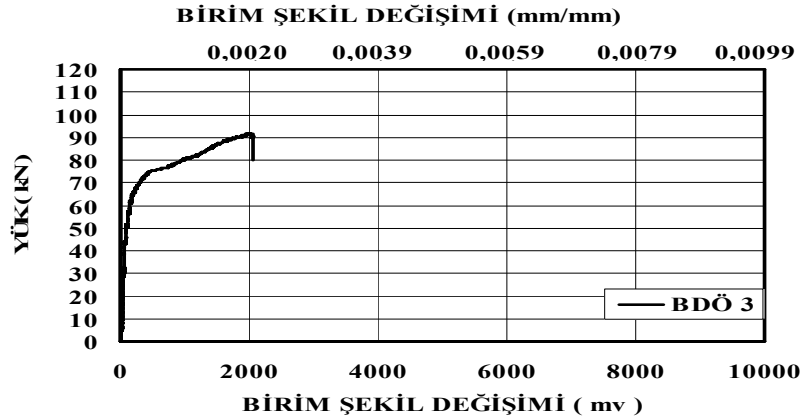
Resim 4.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 3



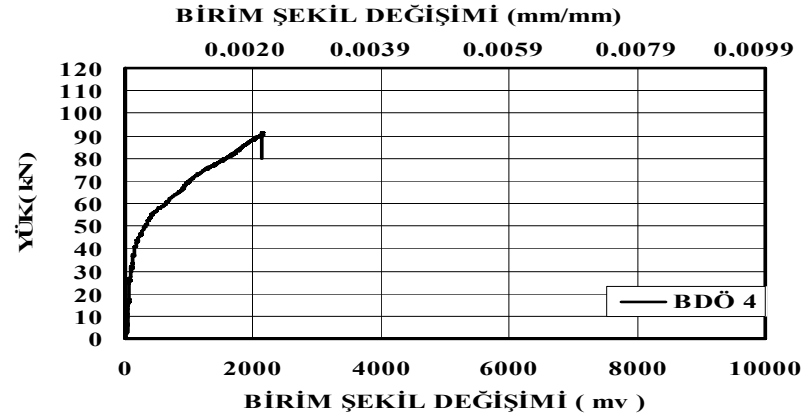
a)



b)



c)



d)

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

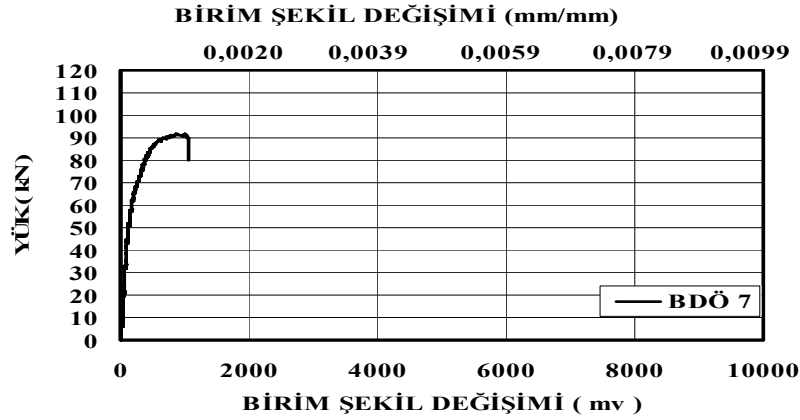
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



e)



f)



g)



h)

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

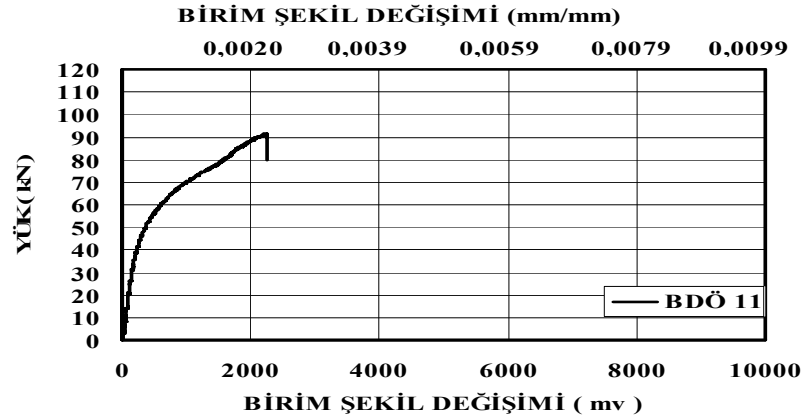
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



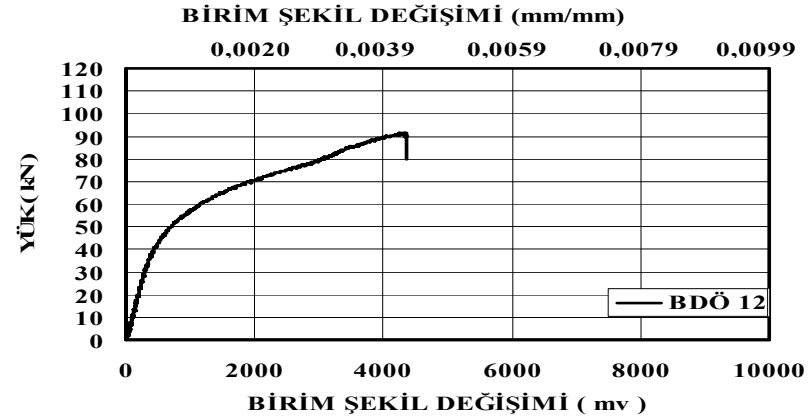
i)



j)



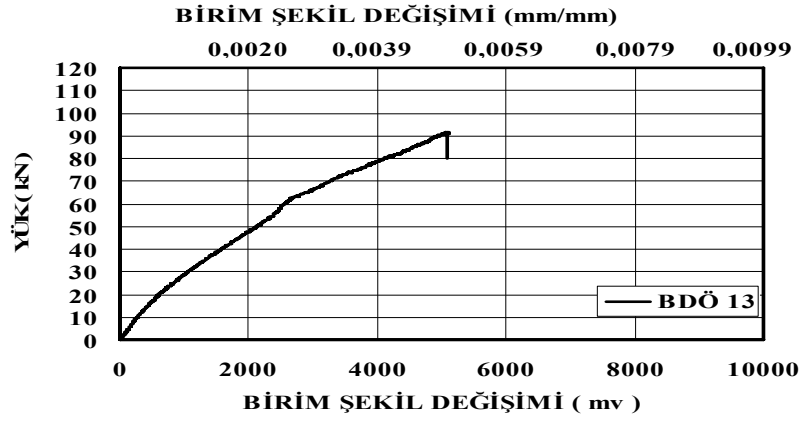
k)



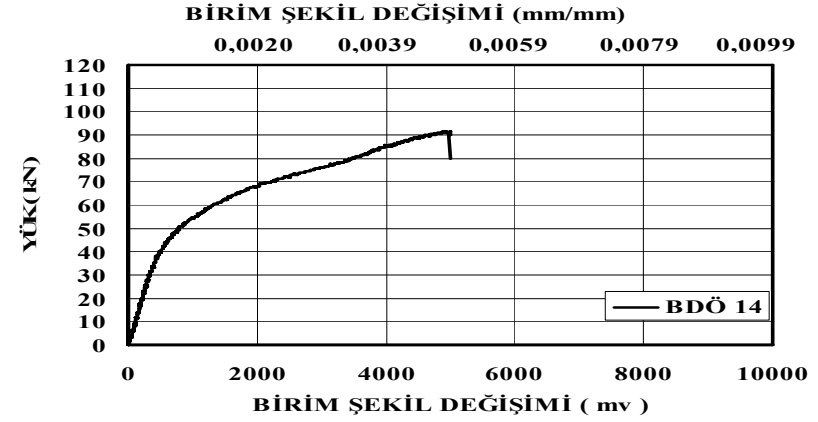
l)

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

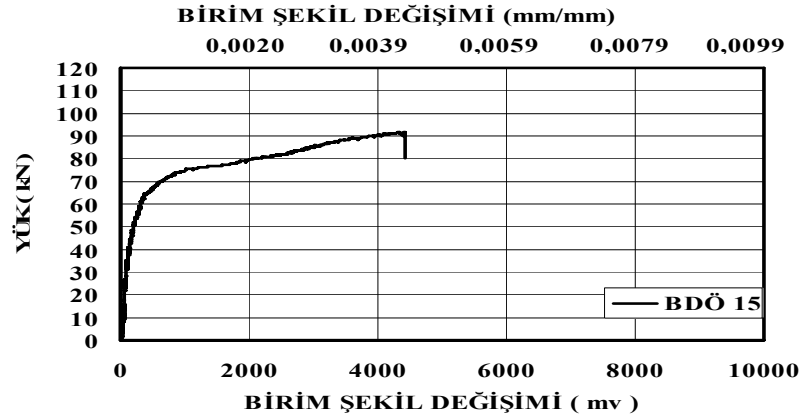
i) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10, k) Birim deformasyon ölçer 11, l) Birim deformasyon ölçer 12



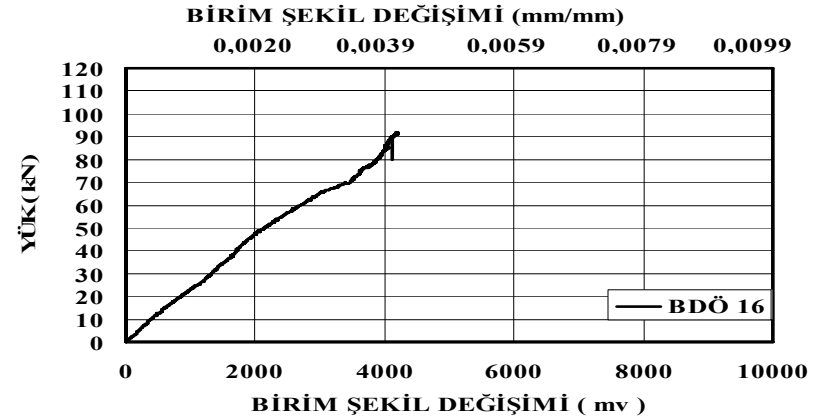
m)



n)



o)



p)

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

m) Birim deformasyon ölçer 13, n) Birim deformasyon ölçer 14, o) Birim deformasyon ölçer 15, p) Birim deformasyon ölçer 16

4.4. Deney elemanı 4

Eksenleri arasında 200 mm mesafe olan ankrajsız CFRP şeritlerle onarılmış yetersiz kesme donatılı deney elemanıdır.

Hasar verme deneyi

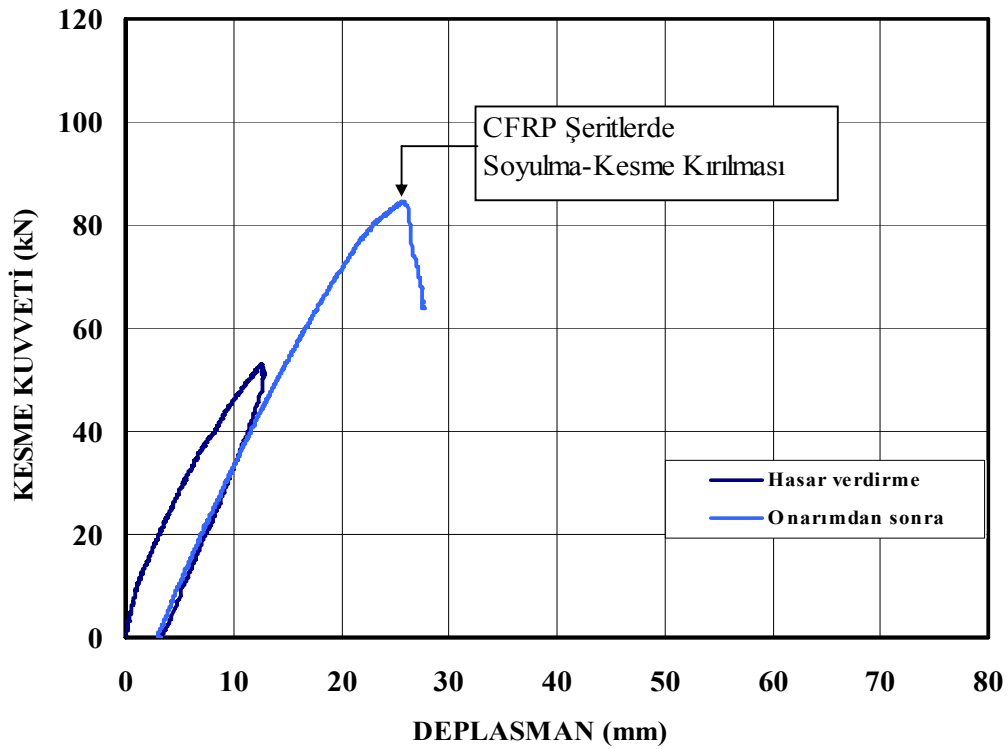
Kirişte ilk eğilme çatlağı, sabit moment bölgesinde 21 kN yük düzeyinde gözlenmiştir. İlk eğik çatlak 32,5 kN yük düzeyinde ve ölçülen 6,1 mm orta nokta deplasmanda gözlemlenmiştir. 36 kN yük düzeyine erişildiğinde kirişin her iki açıklığında eğik çatlaklar gözlemlenmeye başlanmıştır. 43,5 kN yük düzeyinde ve ölçülen 9,2 mm deplasmanda ölçülen maksimum eğik çatlak sol açıklıkta 0,5 mm'dir. Ayrıca bu yük düzeyinde eğik çatlakların aderans çatlaklarıyla birleştiği gözlemlenmiştir. 53,5 kN'da kirişin sağ açıklığında ölçülen maksimum eğik çatlak genişliği 0,9 mm, ölçülen maksimum deplasman 15 mm'dir. Bu yük düzeyinde hasar verme deneyine son verilmiştir. Ölçülen maksimum kalıcı eğik çatlak genişliği 0,4 mm, kalıcı orta nokta deplasmanı 3,1 mm'dir. Kirişte oluşan kesme çatlakları Resim 4.8.'de verilmiştir.



Resim 4.8. Hasar verme deneyi, deney elemanı 4

Onarım sonrası deney

Deney elemanın orta noktasından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.6'da sunulmuştur.

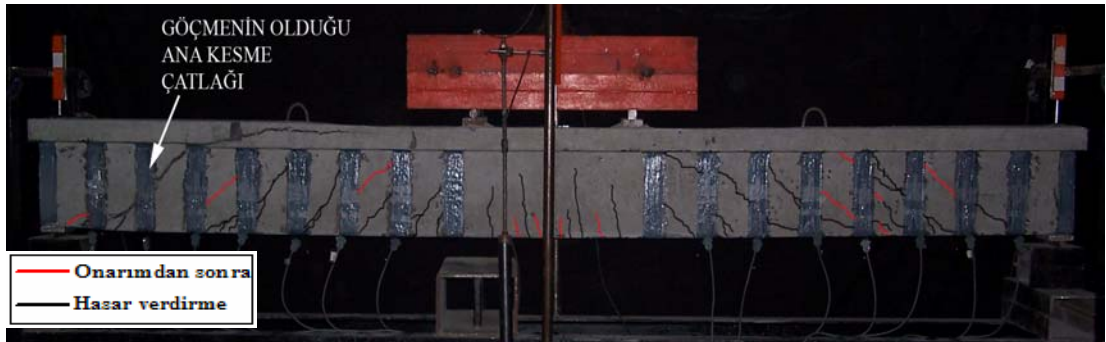


Şekil 4.6. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 4

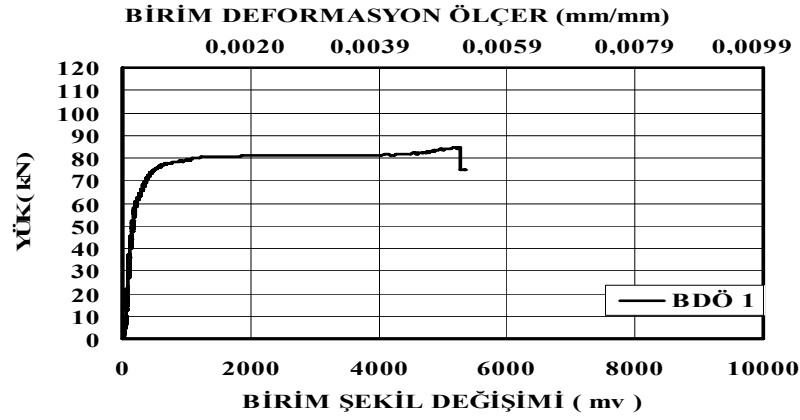
7,5 kN yük düzeyinde orta nokta deplasmanı 4,3 mm olarak ölçülmüştür. 27 kN yük düzeyinden itibaren sol kesme açıklığında bulunan 1 numaralı birim deformasyon ölçer’de büyük artışlar olduğu gözlemlenmiştir. 45 kN yük düzeyinde sol kesme açıklığında ölçülen maksimum çatlak genişliği 0,4 mm’dir. 53 kN’da kiriş orta nokta deplasmanı 14,9 mm’dir. 62,5 kN yük düzeyinde sağ kesme açıklığında ölçülen maksimum çatlak genişliği 0,7 mm’dir. Sol kesme açıklığında 2. CFRP şeridin yüzeyden soyulmaya başladığı gözlemlenmiştir. Kiriş sol kesme açıklığından 2, 3, 4 ve 5 numaralı CFRP şeritlerin, tabla-kiriş birleşim yerinden başlayarak beton yüzeyinden soyulması sonucu 84,65 kN yük düzeyinde ölçülen 25,87 mm deplasmanda kesme kırılması sonucu göçmüştür. CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyinden soyulması Resim 4.9’da verilmiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.10’da verilmiştir. Kiriş göçmeden önce ölçülen en büyük deformasyon 1 numaralı BDÖ’den alınan 0,0054 mm/mm değeridir. 1 numaralı birim deformasyon ölçerin yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.7(a)’da verilmiştir. Deney elemanından alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



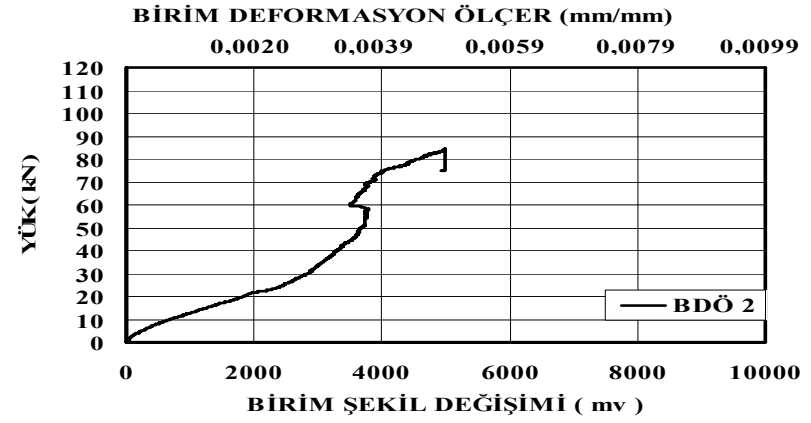
Resim 4.9. Göçmeden sonra CFRP şeritte soyulma detayı, deney elemanı 4



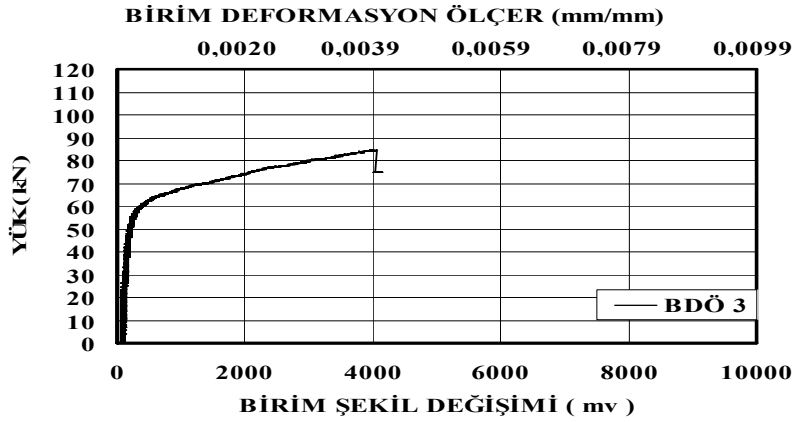
Resim 4.10. Göçmeden sonra, deney elemanı 4



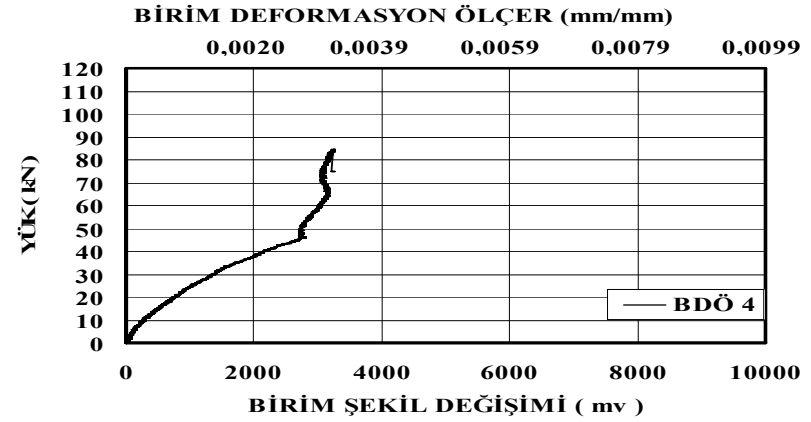
a)



b)



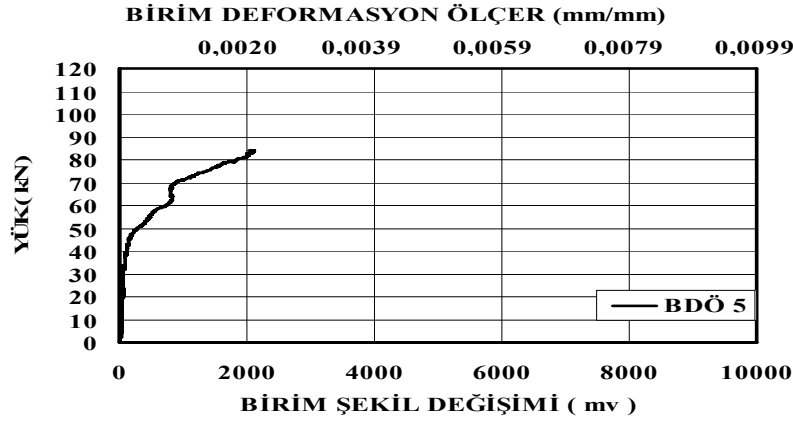
c)



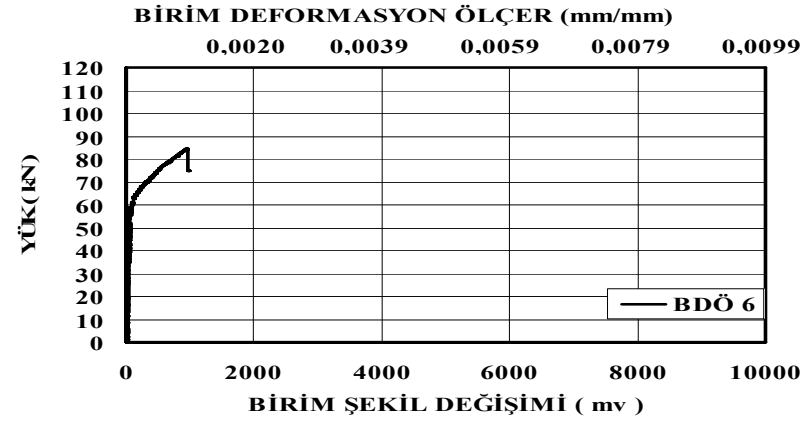
d)

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

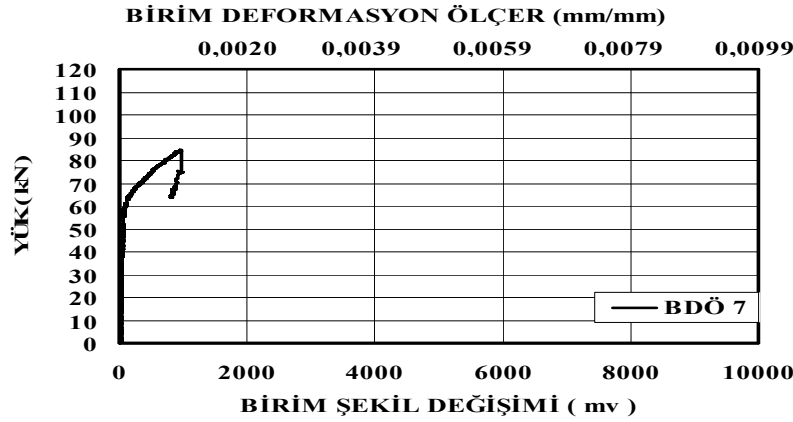
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



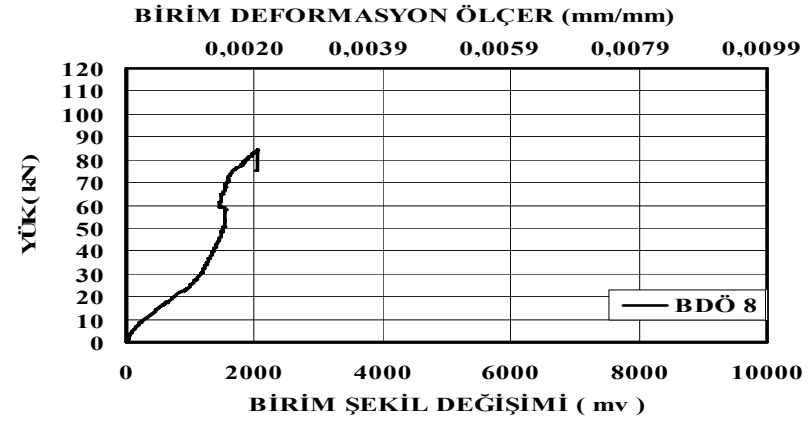
e)



f)



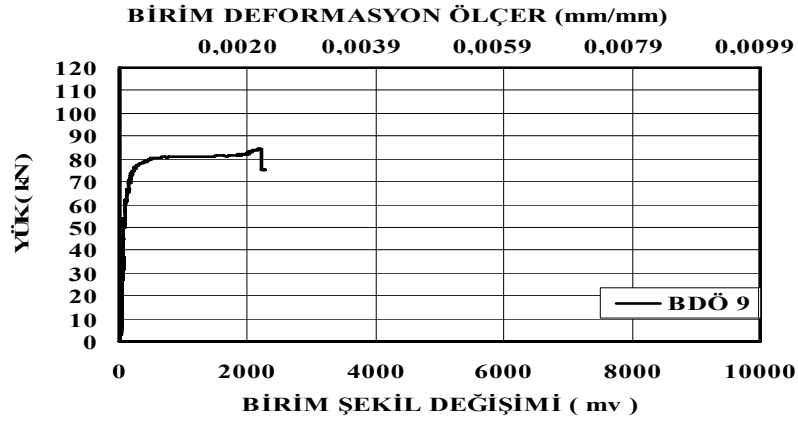
g)



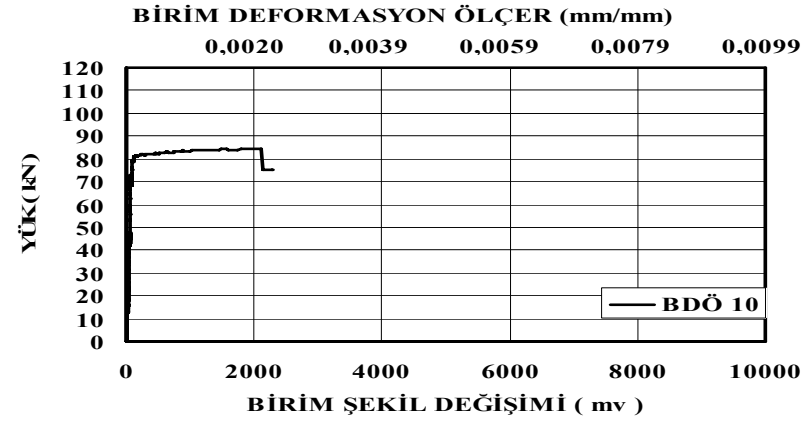
h)

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

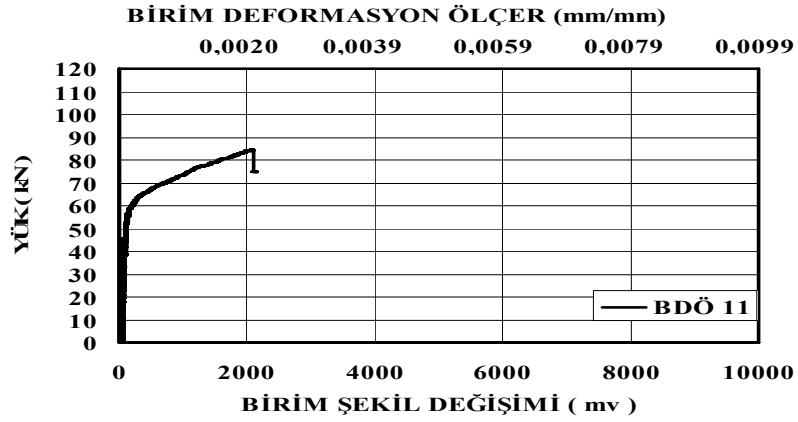
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



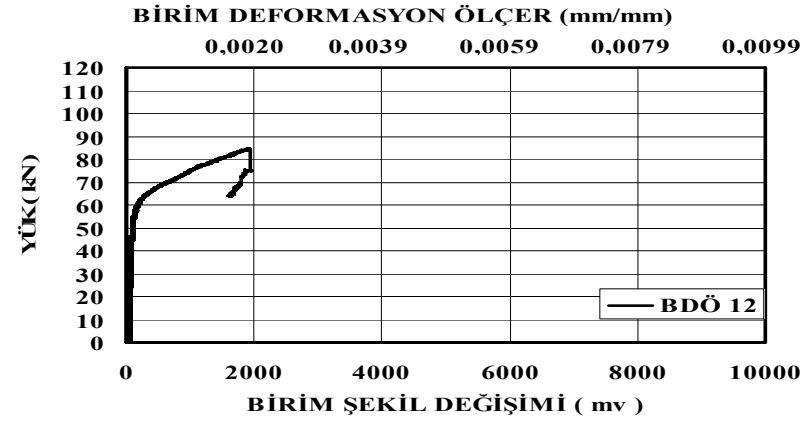
i)



j)



k)



l)

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

i) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10, k) Birim deformasyon ölçer 11, l) Birim deformasyon ölçer 12

4.5. Deney elemanı 5

Eksenleri arasında 125 mm mesafe olan CFRP şeritlerin uçları fan türü ankrajlar kullanılarak onarılmış yetersiz kesme donatılı deney elemanıdır.

Hasar verdirme deneyi

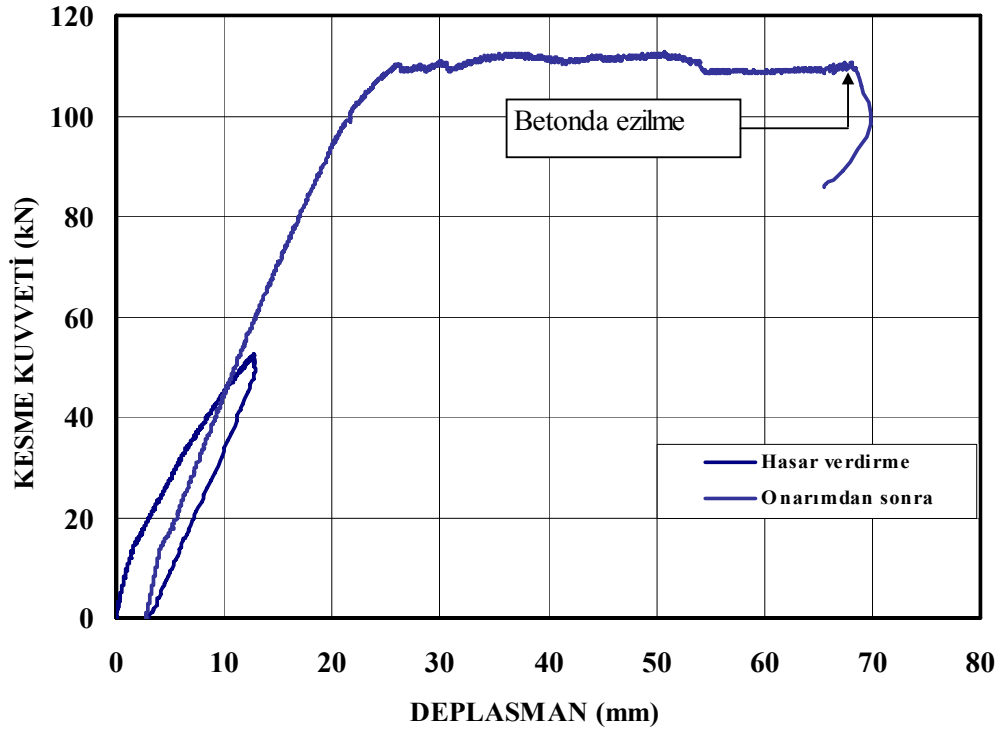
Deney elemanında ilk eğilme çatlağı, 25 kN yük düzeyinde ve ölçülen 4,5 mm orta nokta deplasman değerinde, kiriş ortalarına doğru, sabit moment bölgesinde görülmüştür. 35 kN yük düzeyinde ve ölçülen 8,2 mm deplasmanda, sol ve sağ kesme açıklıklarında kılcal düzeyde ilk eğik çatlaklar oluşmuştur. Eğik çatlaklar tablaya kadar ulaşmış, ayrıca sol kesme açıklığındaki eğik çatlak, aderans çatlağına dönüşmeye başlamıştır. 53 kN yük düzeyinde ve ölçülen 11,5 mm orta nokta deplasmanında hasar verdirme deneyine son verilmiştir. Ölçülen maksimum çatlak genişliği 0,7 mm.'dir. Yük kaldırıldıktan sonra kalıcı orta nokta deplasmanı 2,75 mm, en büyük kalıcı eğik çatlak genişliği 0,4 mm olarak ölçülmüştür. Kirişte oluşan kesme çatlakları Resim 4.11'de verilmiştir.



Resim 4.11. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 5

Onarım sonrası deney

Deney elemanının orta noktasından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.8. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 5

Deneye başladıktan sonra, yeni eğilme çatlakları 60 kN yük düzeyinde ve ölçülen 12,9 mm deplasmanda gözlemlenmeye başlanmıştır. Bu yük düzeyinde ölçülen maksimum çatlak genişliği 1,0 mm'dir. 110,30 kN yük düzeyinde ve ölçülen 27,86 mm deplasmanda, kiriş ana çekme donatıları akma kapasitesine ulaşmıştır. Bu yük düzeyinden sonra sağ ve sol kesme açıklıklarında kesme çatlakları sabit kalırken, yeni eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Eğilme çatlakları tablaya ulaşırken, en büyük eğilme çatlağı genişliği 1,6 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş, 112,66 kN yük düzeyinde ve ölçülen 68,48 mm deplasmanda, sabit moment bölgesinde, tablasındaki beton, basınç gerilmeleri altında ezilerek göçmüştür. Deney elemanının tabla betonundaki ezilme Resim 4.12'de verilmiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.13'de verilmiştir. Deney elemanı sünek eğilme davranışı sergilemiştir. En büyük birim deformasyon 4 numaralı BDÖ'den alınan 0,0084 mm/mm değeridir. 4 numaralı birim deformasyon ölçerin yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.9(d)'de verilmiştir. Sağ kesme açıklığında bulunan ana kesme çatlağının üzerindeki 11, 12, 13 ve 14 numaralı BDÖ'lerde 0,0059 ile 0,0077 mm/mm birim deformasyon

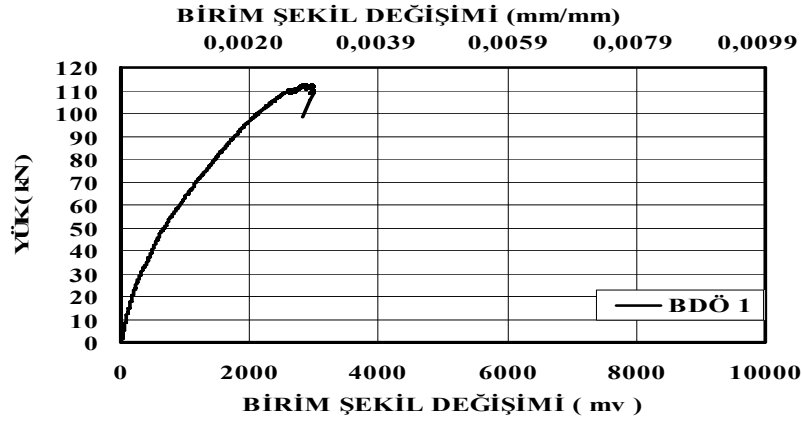
değerleri ölçülmüştür. Deney elemanından alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



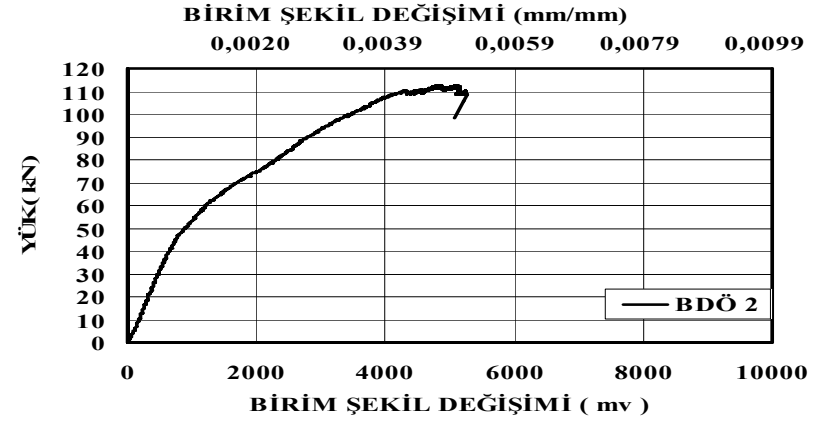
Resim 4.12. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 5



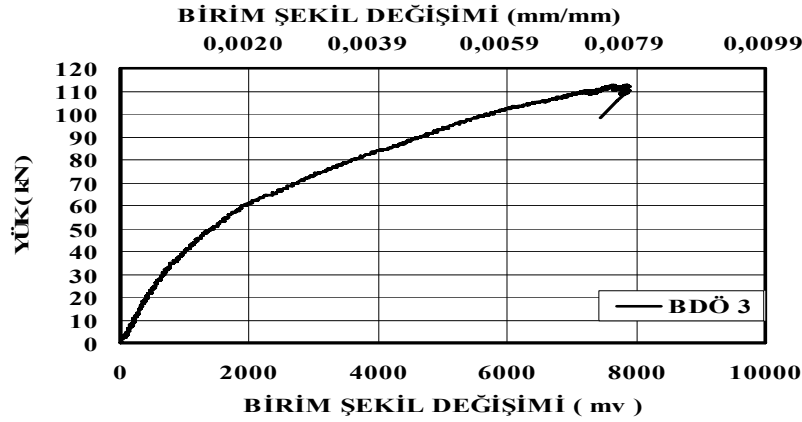
Resim 4.13. Göçmeden sonra, deney elemanı 5



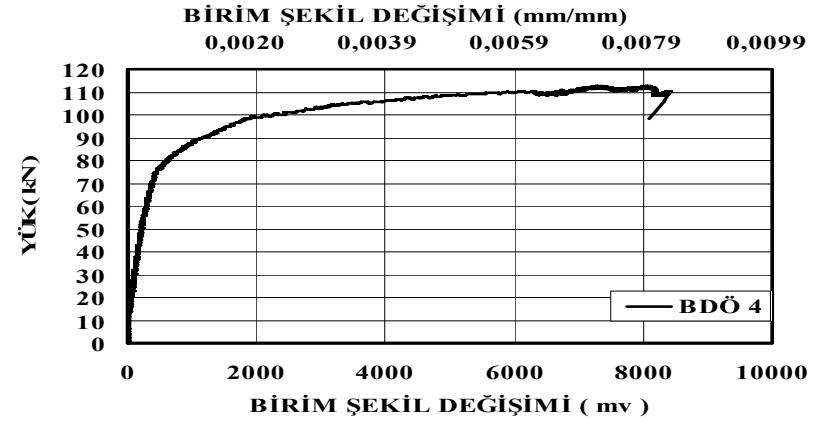
a)



b)



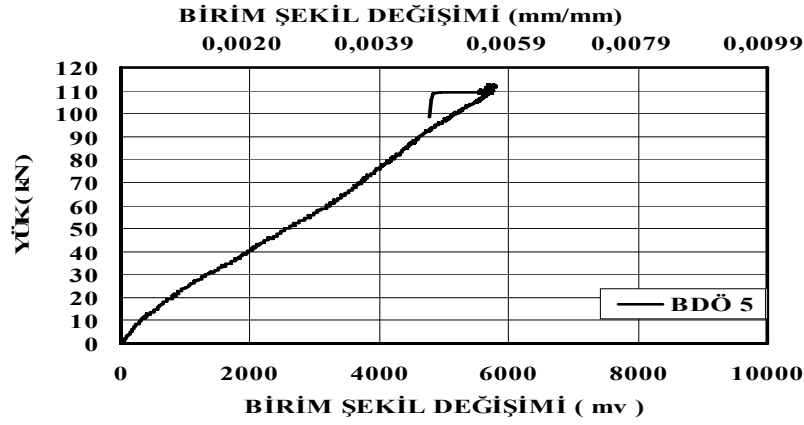
c)



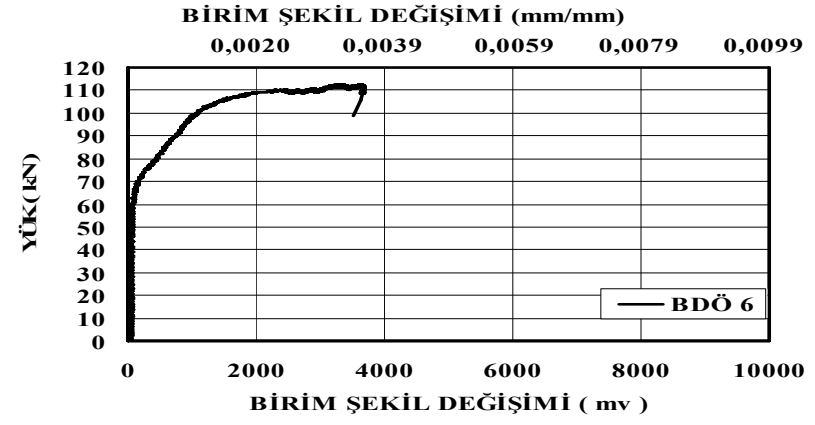
d)

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

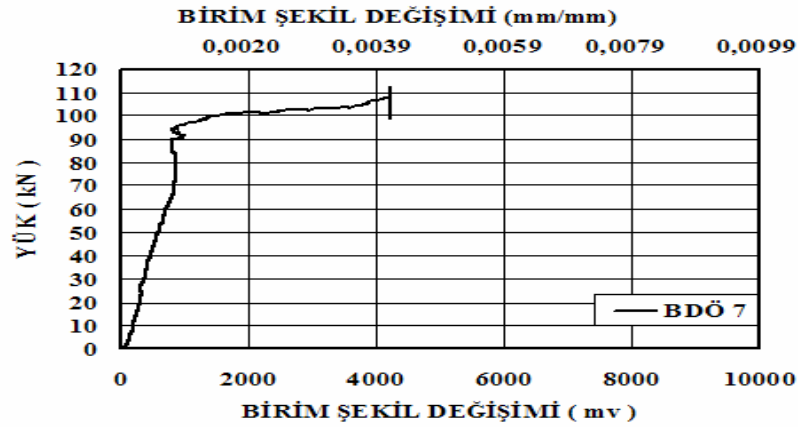
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



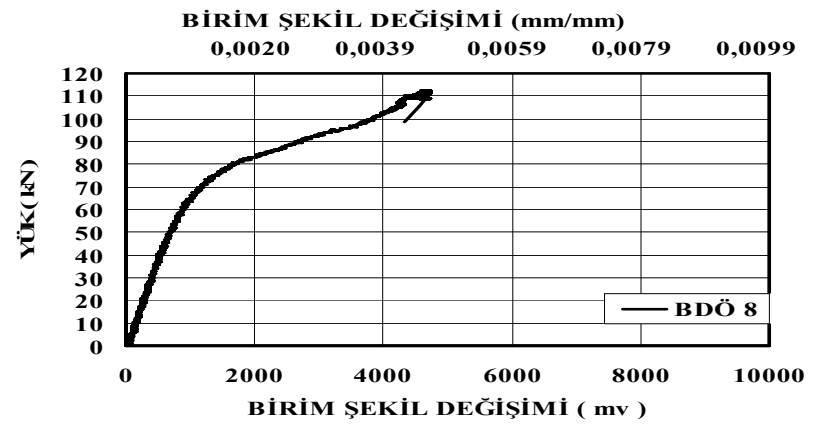
e)



f)



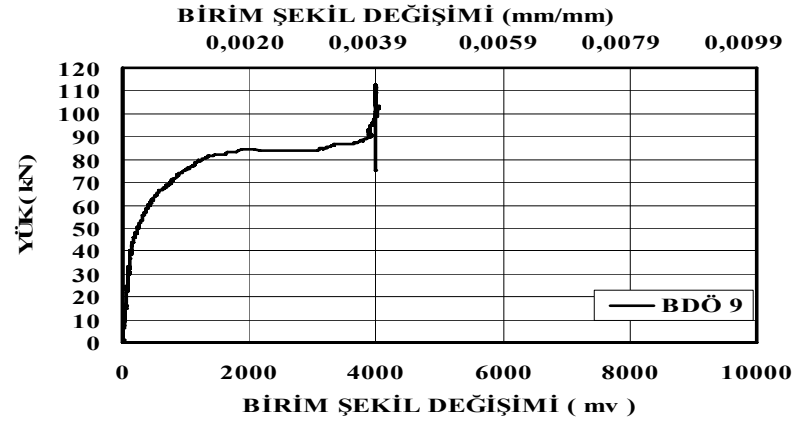
g)



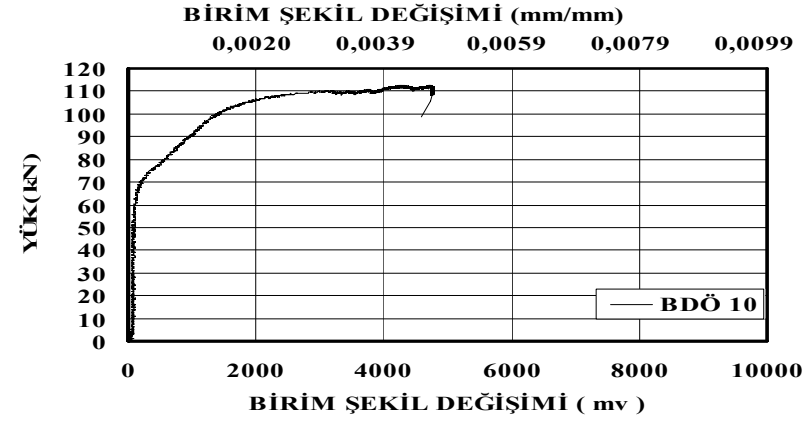
h)

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

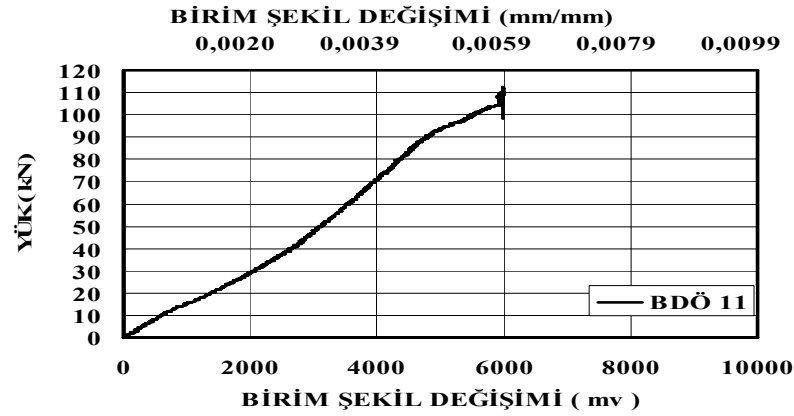
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



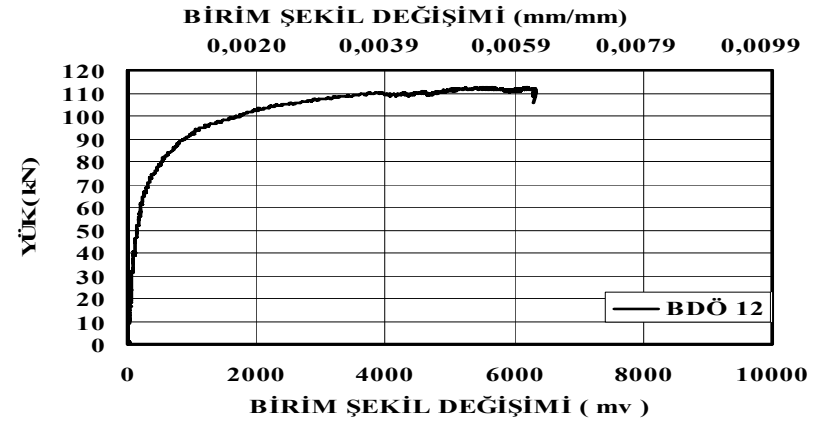
i)



j)



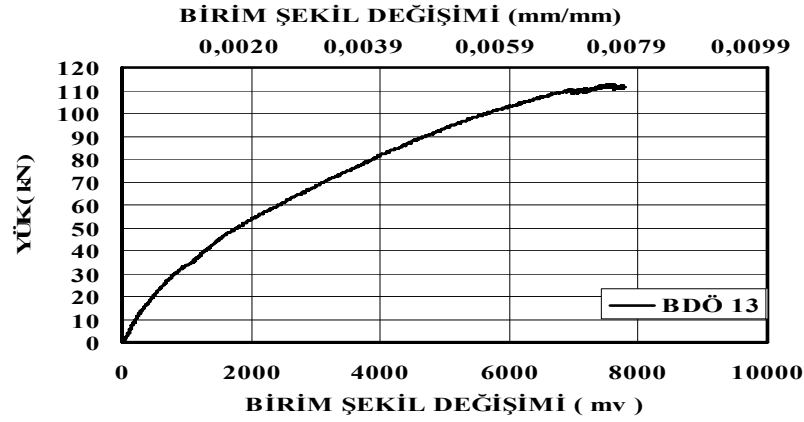
k)



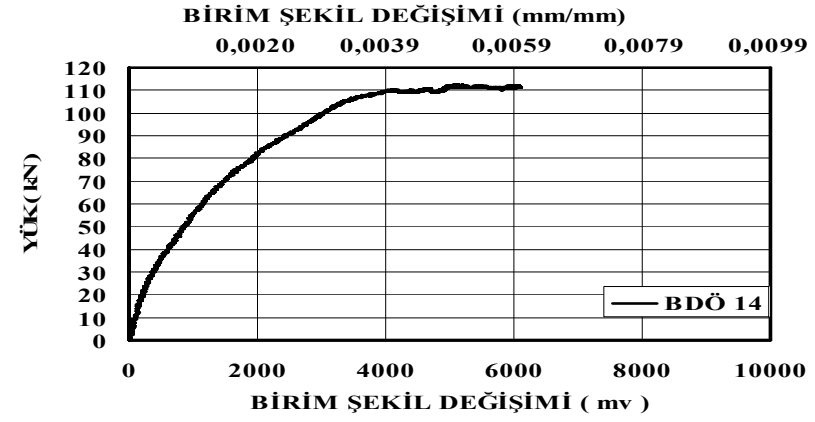
l)

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

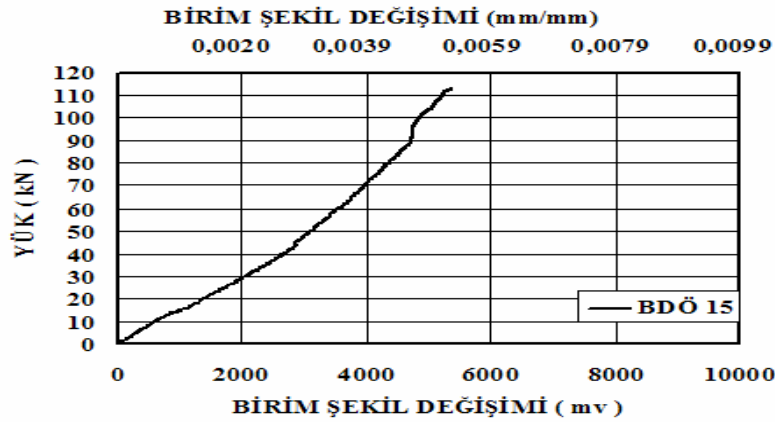
i) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10, k) Birim deformasyon ölçer 11, l) Birim deformasyon ölçer 12



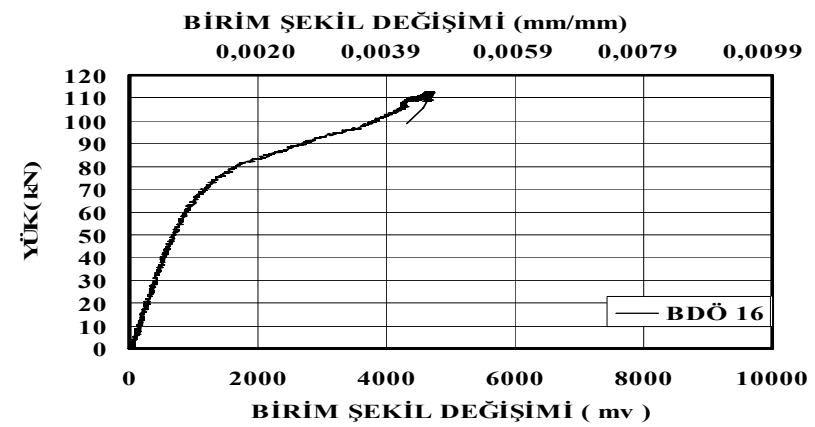
m)



n)



o)



p)

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

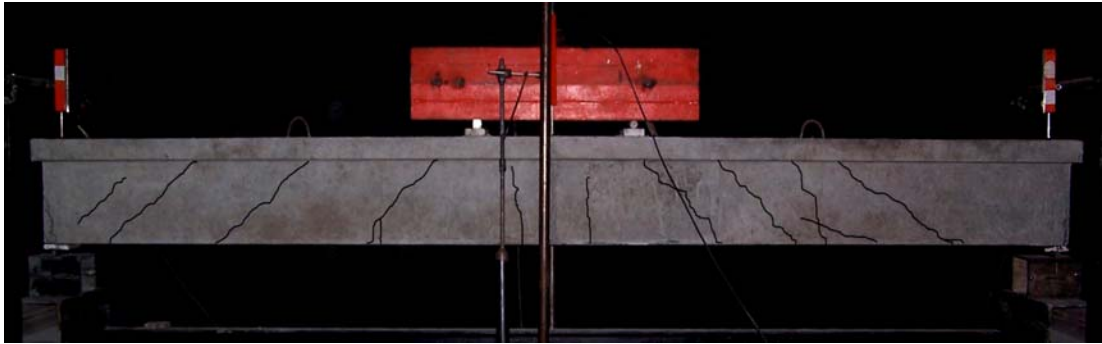
m) Birim deformasyon ölçer 15, n) Birim deformasyon ölçer 16, o) Birim deformasyon ölçer 15, p) Birim deformasyon ölçer 16

4.6. Deney elemanı 6

Eksenleri arasında 150 mm mesafe olan CFRP şeritlerin uçları fan türü ankrajlar kullanılarak onarılmış yetersiz kesme donatılı deney elemanıdır.

Hasar verme deneyi

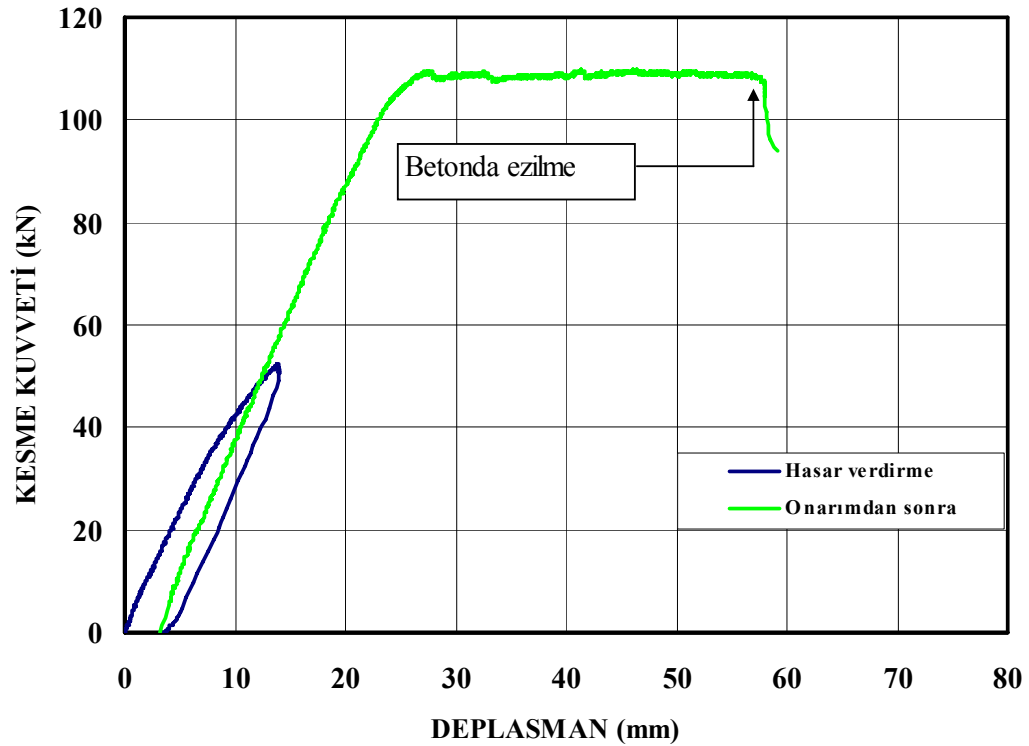
Deney elemanında ilk eğilme çatlağı, 19,5 kN yük düzeyinde ve ölçülen 3,7 mm orta nokta deplasman değerinde, sabit moment bölgesinde görülmüştür. Artan yük ile birlikte eğilme çatlaklarının sayısında da büyük artışlar gözlemlenmiştir. 45 kN yük düzeyinde ve ölçülen 11,6 mm deplasmanda, maksimum eğik çatlak genişliği 0,8 mm olarak sağ kesme açıklığında gözlemlenmiştir. İlerleyen eğik çatlaklar tablaya kadar ulaşmış, ayrıca kesme açıklığındaki eğik çatlaklar, aderans çatlaklarıyla birleşmeye başlamıştır. 52,5 kN yük düzeyinde ve ölçülen 13,8 mm orta nokta deplasmanında hasar verme deneyine son verilmiştir. Ölçülen maksimum çatlak genişliği 1,2 mm'dir. Yük kaldırıldıktan sonra, kalıcı orta nokta deplasmanı 3,3 mm, en büyük kalıcı eğik çatlak genişliği sol tarafta 0,5 mm, sağ tarafta 0,8 mm olarak ölçülmüştür. Kirişte oluşan kesme çatlakları Resim 4.14'de verilmiştir.



Resim 4.14. Hasar verme deneyi, deney elemanı 6

Onarım sonrası deney

Deney elemanı orta noktasından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



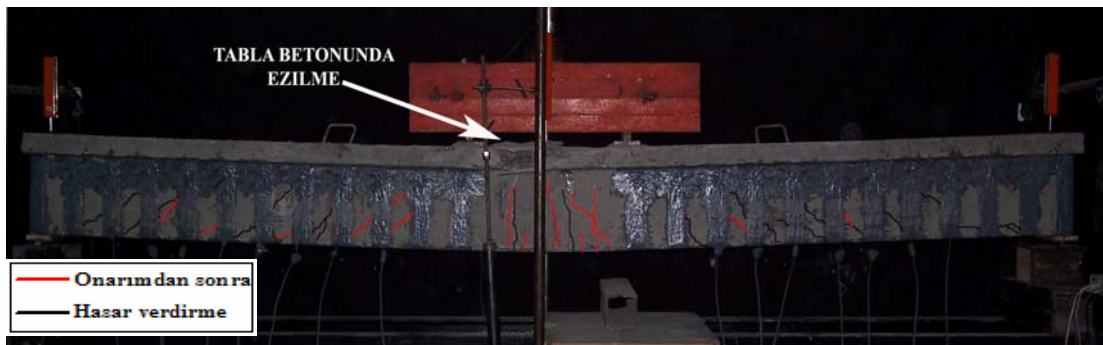
Şekil 4.10. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 6

Hasar verme deneyi yük düzeyine ulaşıldığında orta nokta deplasmanı 13 mm olarak ölçülmüştür. Bu yük düzeyinden itibaren yeni eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Bu yük düzeyinde ölçülen maksimum çatlak genişliği 0,8 mm'dir. 109,78 kN yük düzeyinde ve ölçülen 27,86 mm orta nokta deplasmanında, kiriş ana çekme donatıları akma kapasitesine ulaşmıştır. Bu yük düzeyinden sonra sağ ve sol kesme açıklıklarında kesme çatlakları neredeyse sabit kalırken, yeni eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Eğilme çatlakları tablaya ulaşırken, en büyük eğilme çatlağı genişliği 109,78 kN yük düzeyinde ve ölçülen 42 mm orta nokta deplasman değerinde 1,6 mm olarak ölçülmüştür. Kiriş, 109,78 kN yük düzeyinde ve ölçülen 57,65 mm orta nokta deplasmanında, sabit moment bölgesinde, tablasındaki beton, basınç gerilmeleri altında ezilerek göçmüştür. Deney elemanının tabla betonundaki ezilme Resim 4.15'de verilmiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.16'da verilmiştir. Deney elemanı sünek eğilme davranışı göstermiştir. En büyük birim deformasyonlar 6 ve 14 numaralı BDÖ'lerden sırasıyla 0,0087 mm/mm, 0,0085 mm/mm olarak ölçülmüştür. 6 ve 14 numaralı birim deformasyon ölçerden

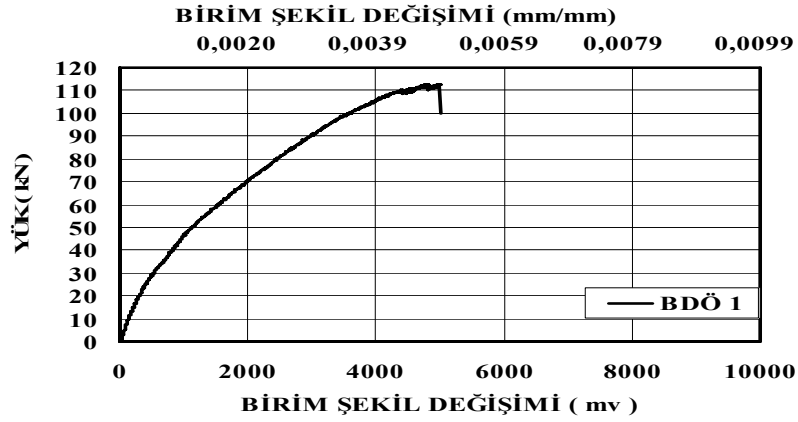
alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.11(f), Şekil 4.11(n)'de verilmiştir. Deney elemanından alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir.



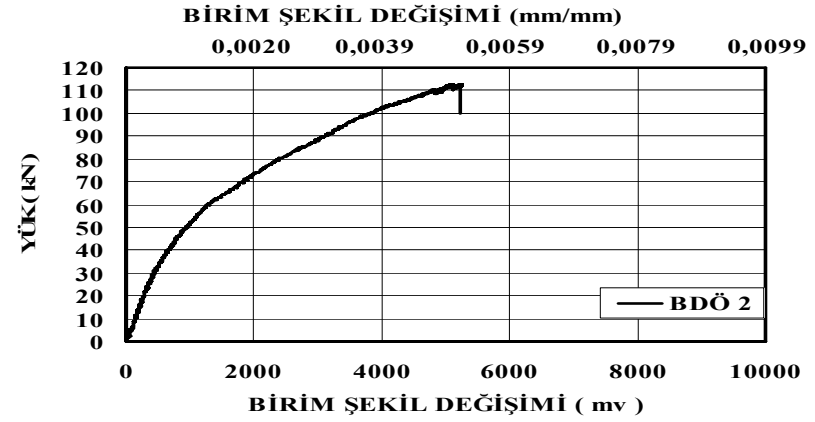
Resim 4.15. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 6



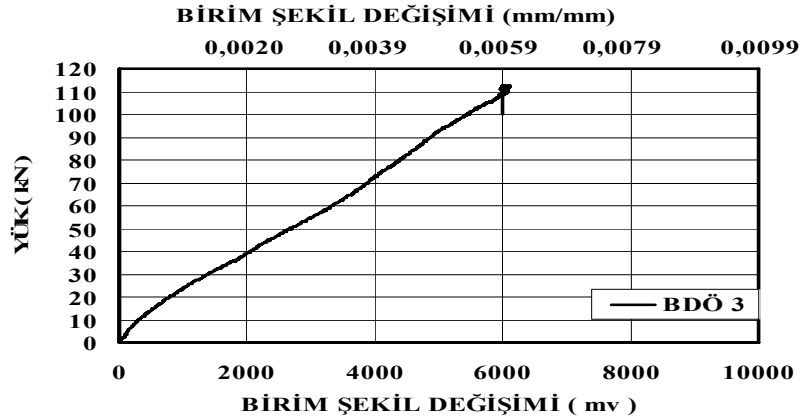
Resim 4.16. Göçmeden sonra, deney elemanı 6



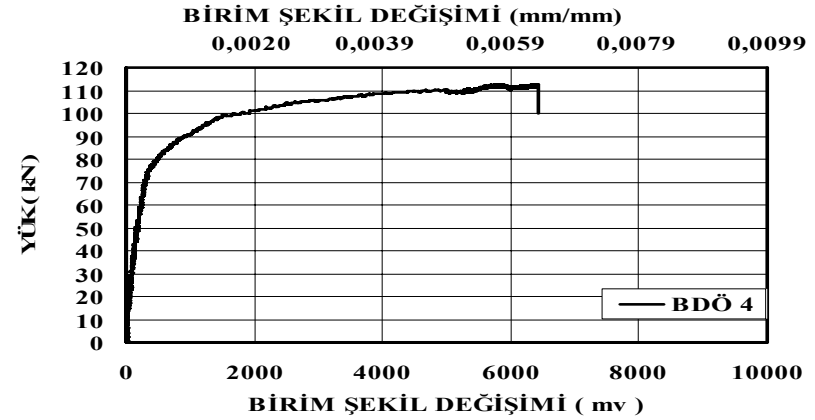
a)



b)



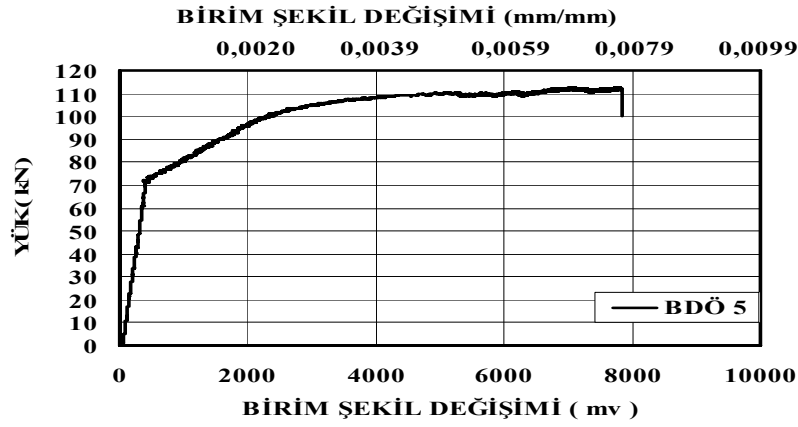
c)



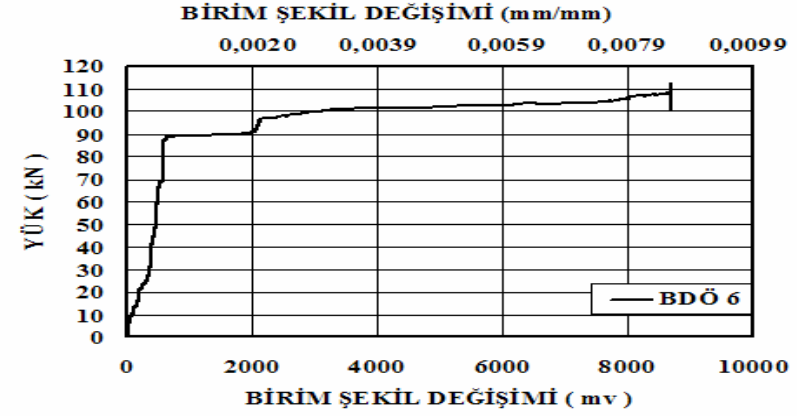
d)

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

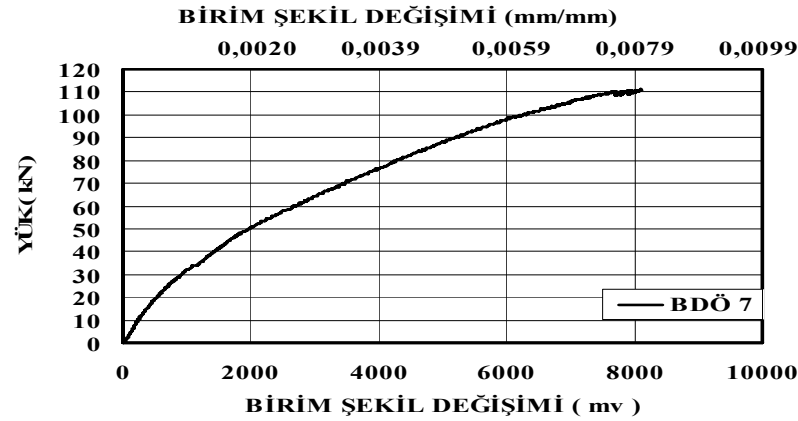
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



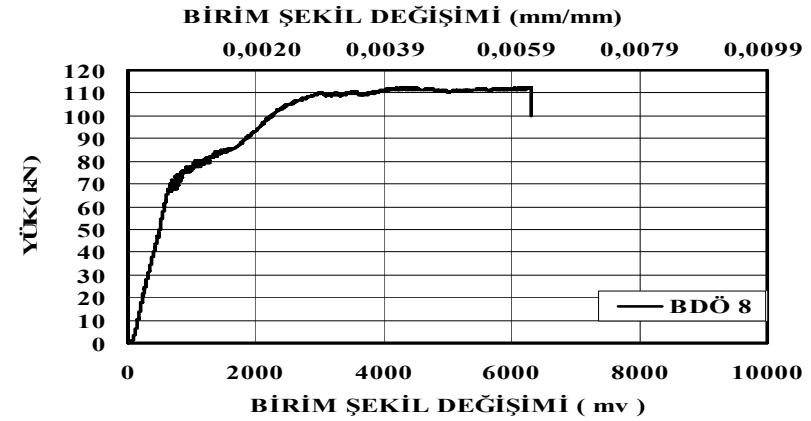
e)



f)



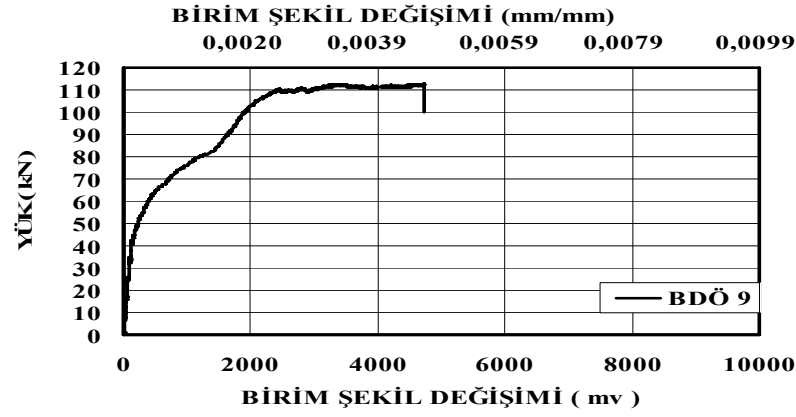
g)



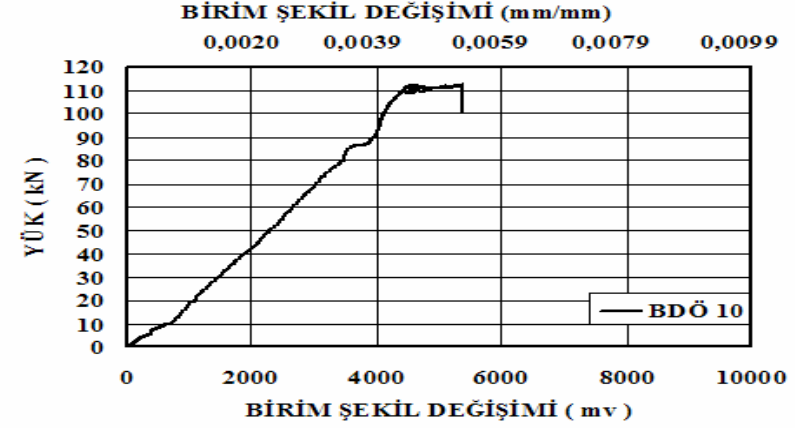
h)

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

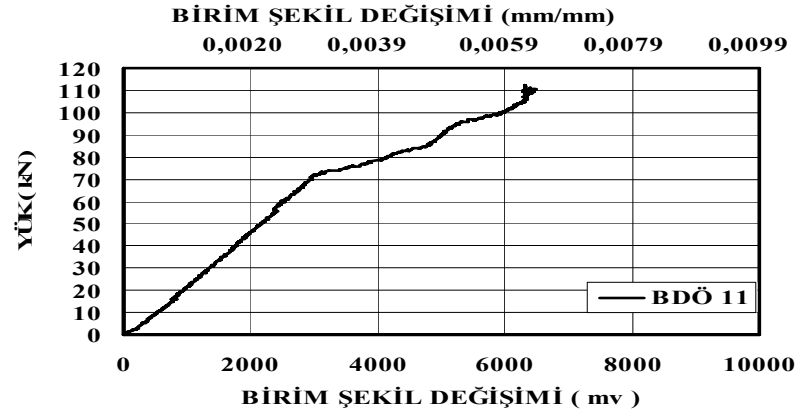
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



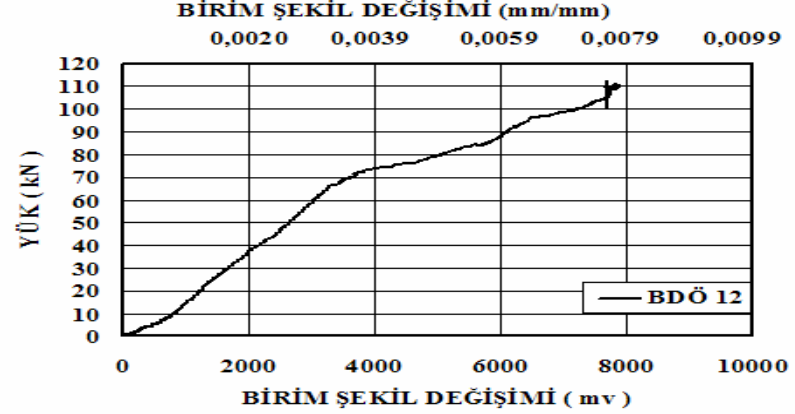
ı)



j)



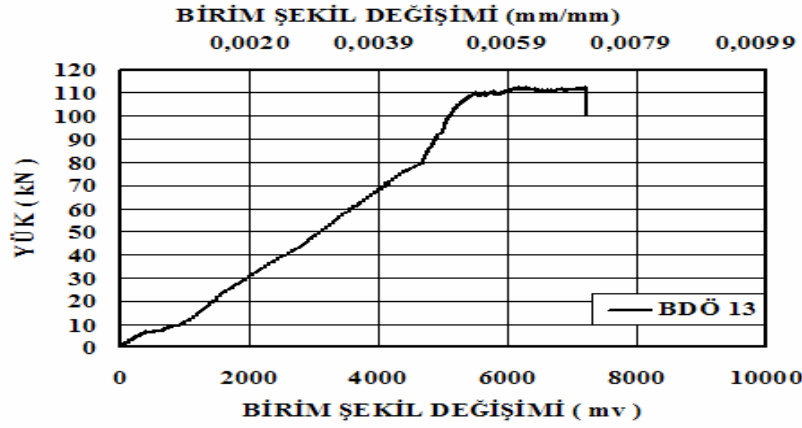
k)



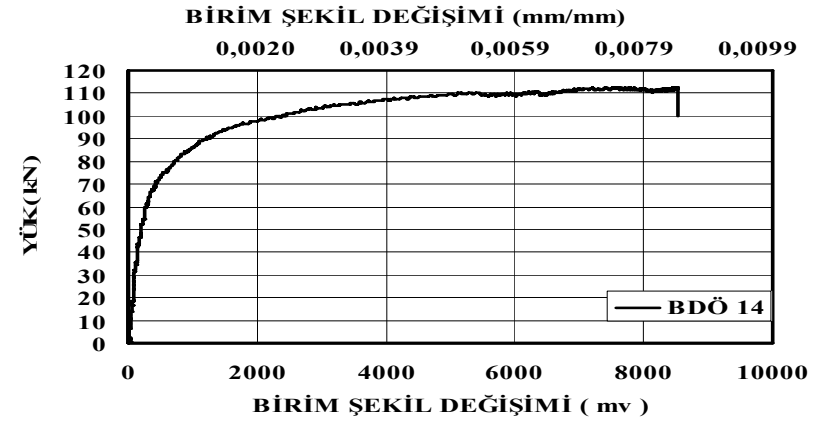
l)

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

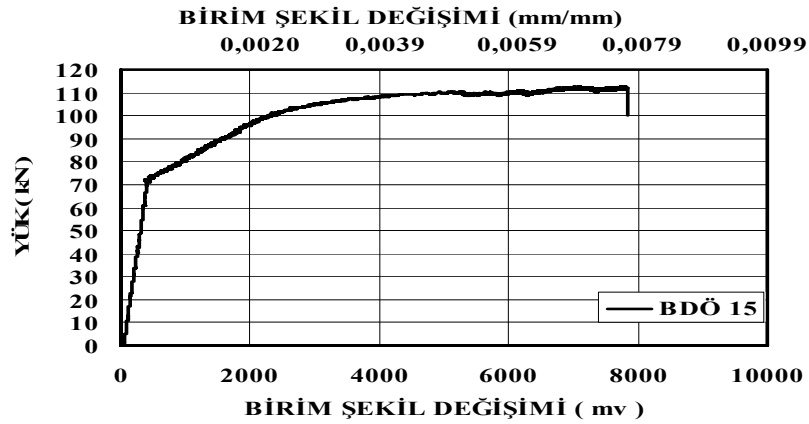
ı) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10, k) Birim deformasyon ölçer 11, l) Birim deformasyon ölçer 12



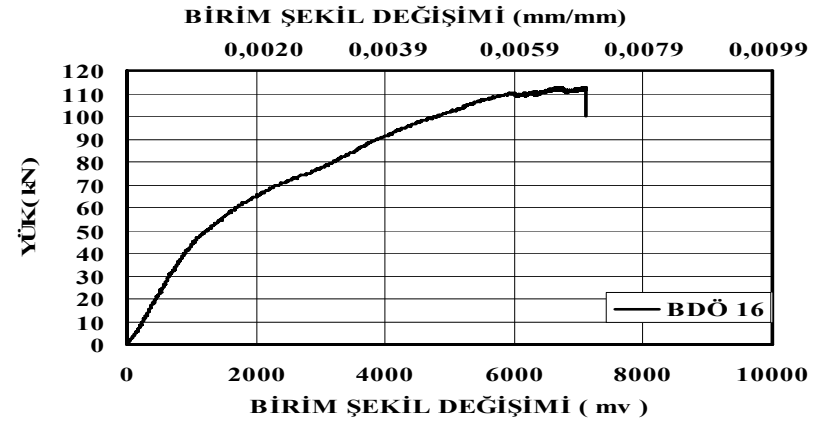
m)



n)



o)



p)

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

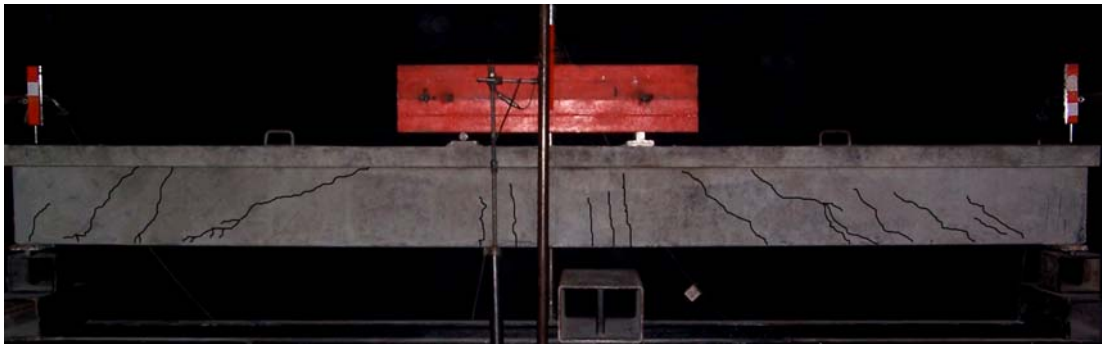
m) Birim deformasyon ölçer 15, n) Birim deformasyon ölçer 16, o) Birim deformasyon ölçer 15, p) Birim deformasyon ölçer 16

4.7. Deney elemanı 7

Eksenleri arasında 200 mm mesafe olan CFRP şeritlerin uçları fan türü ankrajlarla onarılmış yetersiz kesme donatılı deney elemanıdır.

Hasar verdirme deneyi

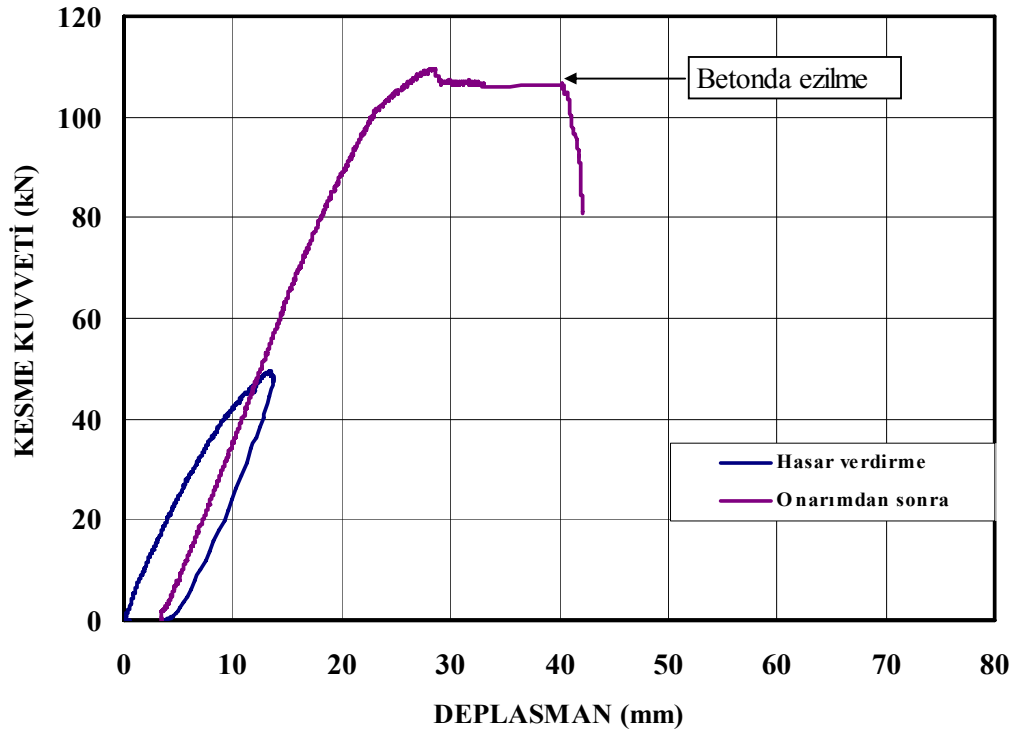
Deney elemanında ilk eğilme çatlağı, 18,5 kN yük düzeyinde ve ölçülen 2,53 mm orta nokta deplasman değerinde, düşey doğrultuda sağ üst mesnete yakın, sabit moment bölgesinde görülmüştür. 30 kN yük düzeyinde ve ölçülen 6,4 mm deplasman değerinde, sol ve sağ kesme açıklıklarında kılcal düzeyde ilk eğilme çatlakları görülmüştür. 45 kN yük düzeyinde ve ölçülen 11,7 mm orta nokta deplasmanda sağ kesme açıklığındaki eğik çatlak genişliği 0,7 mm olarak ölçülmüştür. 51,5 kN yük düzeyinde ve ölçülen 12,9 mm orta nokta deplasmanında hasar verdirme deneyine son verilmiştir. Ölçülen maksimum eğik çatlak genişliği sağ kesme açıklığında 0,9 mm, sol kesme açıklığında 0,7 mm'dir. Yük kaldırıldıktan sonra, kalıcı orta nokta deplasmanı 3,42 mm, en büyük kalıcı eğik çatlak genişliği 0,7 mm ölçülmüştür. Kirişte oluşan kesme çatlakları Resim 4.17'de verilmiştir.



Resim 4.17. Hasar verdirme deneyi, deney elemanı 7

Onarım sonrası deney

Deney elemanının orta noktasından ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.



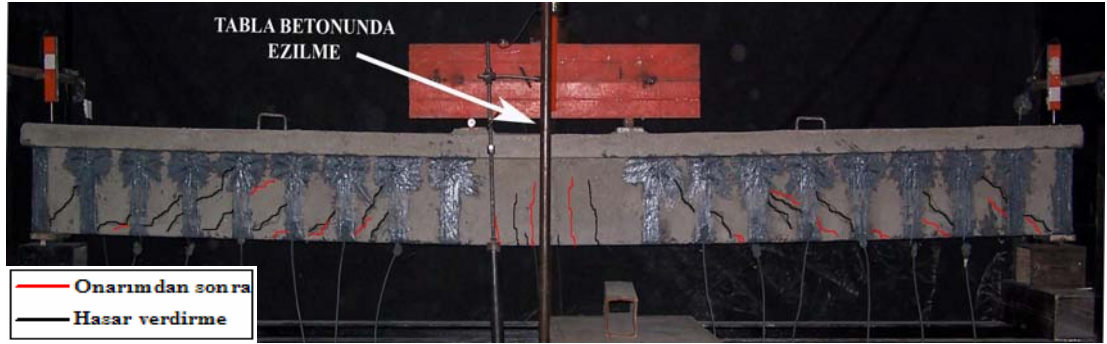
Şekil 4.12. Yük-Deplasman grafiği, deney elemanı 7

Deneye başladıktan sonra, kesme hasarı verdirme deneyi yük düzeyinde 12,9 mm orta nokta deplasman değeri ölçülmüştür. Yeni eğilme çatlakları bu yük düzeyinde oluşmaya başlamıştır. 70 kN yükde ölçülen maksimum çatlak genişliği sol kesme açıklığında 1,4 mm’dir. Bu yük düzeyinden sonra sabit moment bölgesinde yeni eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Kiriş, 109,72 kN yük düzeyinde ve ölçülen 28,65 mm orta nokta deplasmanında, ana çekme donatıları akma kapasitesine ulaşmıştır. Bu yük düzeyinden sonra sağ ve sol kesme açıklıklarında kesme çatlakları neredeyse sabit kalırken, yeni eğilme çatlakları gözlemlenmeye başlanmıştır. Eğilme çatlakları tablaya ulaşırken, en büyük eğilme çatlağı genişliği 1,8 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanı 106 kN yük düzeyinde ve ölçülen 40,46 mm orta nokta deplasmanında, sabit moment bölgesinde, kiriş tablasındaki beton, basınç bloğundaki

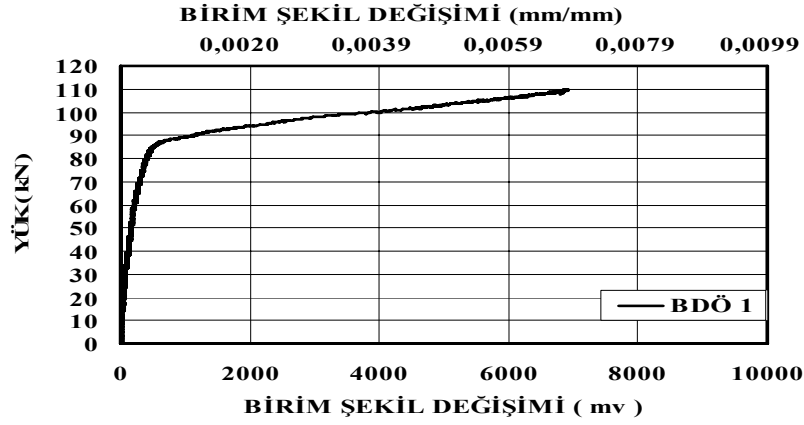
gerilmeler altında ezilerek göçmüştür. Deney elemanının tabla betonunda oluşan beton ezilmesi Resim 4.18’de verilmiştir. Deney elemanı sünek eğilme davranışı göstermiştir. Deney elemanının göçmeden sonra görünüşü Resim 4.19’da verilmiştir. En büyük birim deformasyon 8 numaralı BDÖ’de 0,0089 mm/mm olarak ölçülmüştür. 8 numaralı birim deformasyon ölçerin yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.13(h)’de verilmiştir. 4 ve 9 numaralı birim deformasyon ölçerlerde maksimum birim deformasyon değerleri sırasıyla 0,0085, 0,0086 mm/mm’dir. 4 ve 9 numaralı birim deformasyon ölçerlerin yük-birim deformasyon grafiği Şekil 4.13(d), Şekil 4.13(i)’da verilmiştir. Deney elemanından alınan yük-birim deformasyon grafikleri Şekil 4.13’de verilmiştir.



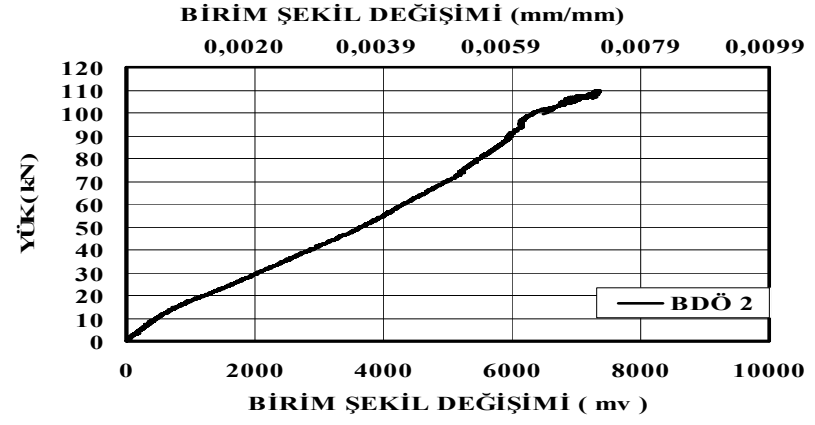
Resim 4.18. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 7



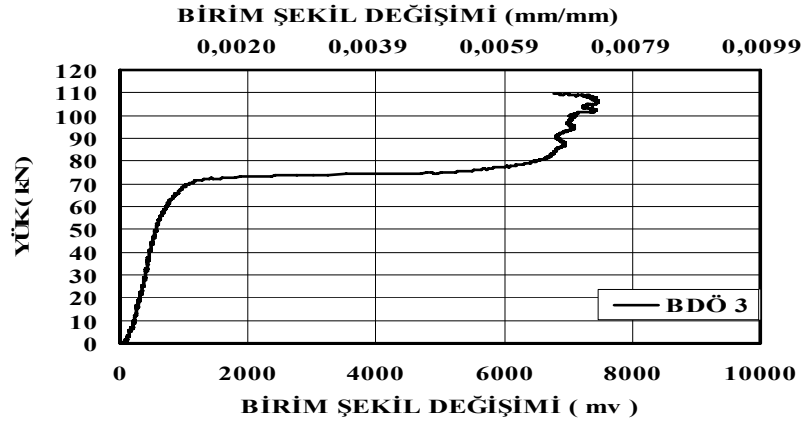
Resim 4.19. Göçmeden sonra, deney elemanı 7



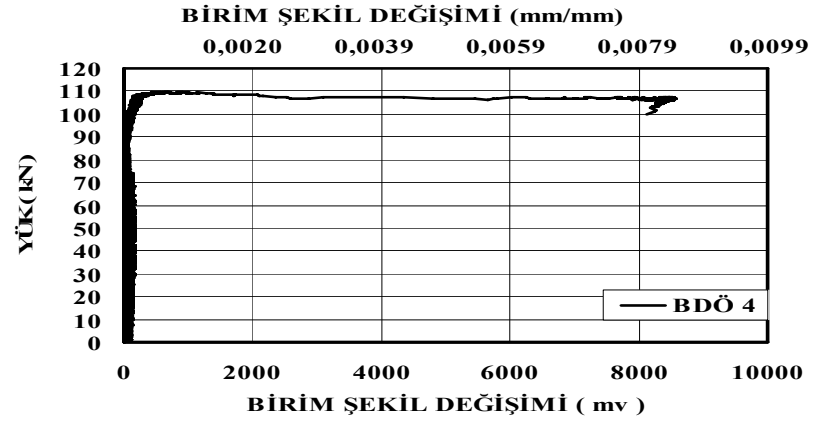
a)



b)



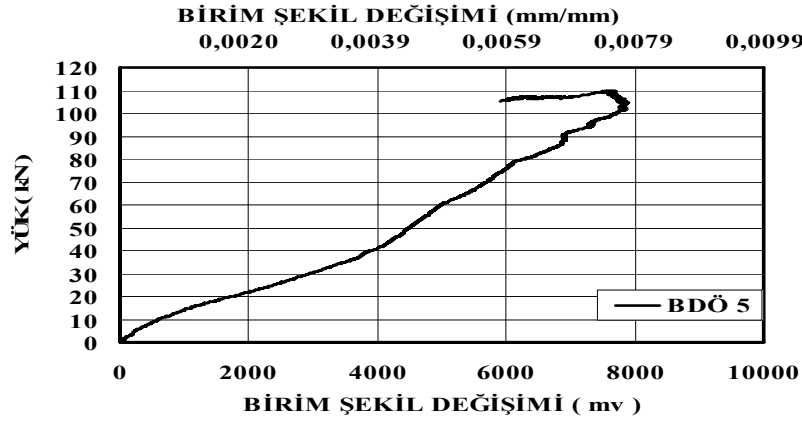
c)



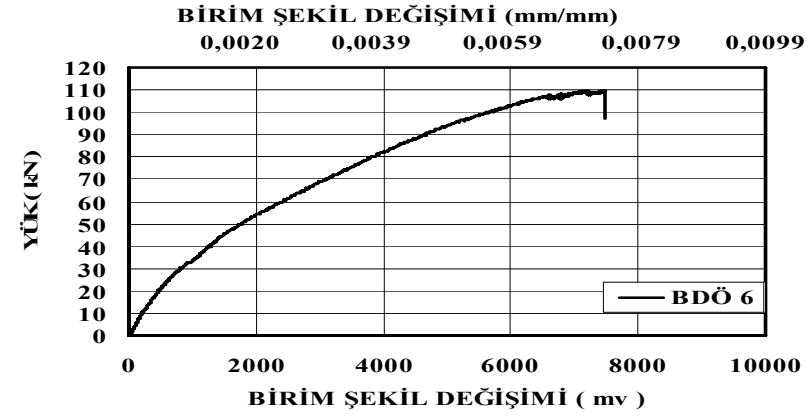
d)

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

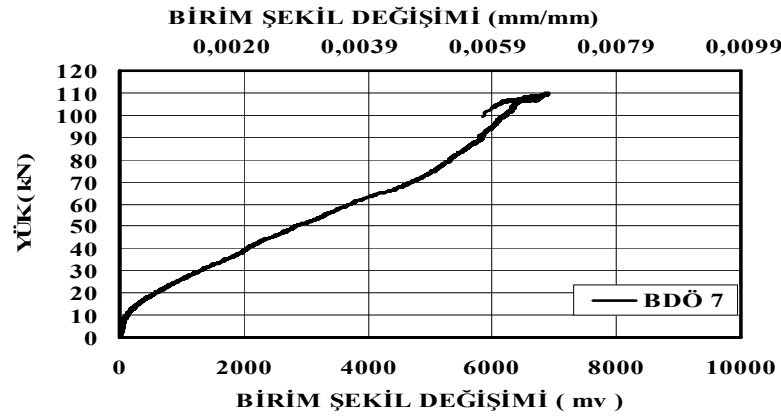
a) Birim deformasyon ölçer 1, b) Birim deformasyon ölçer 2, c) Birim deformasyon ölçer 3, d) Birim deformasyon ölçer 4



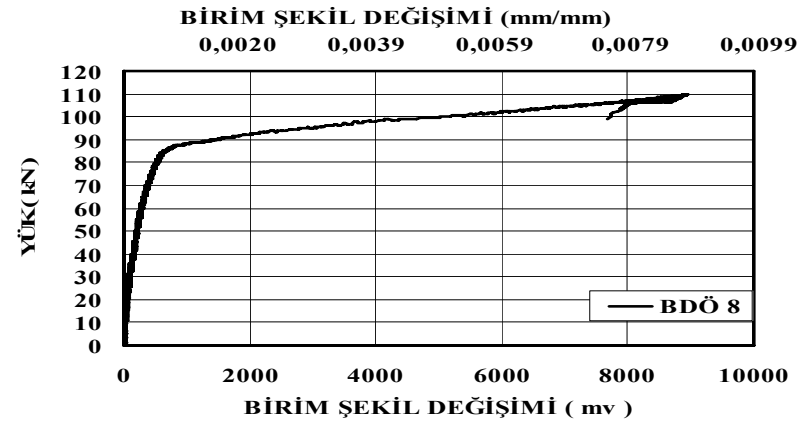
e)



f)



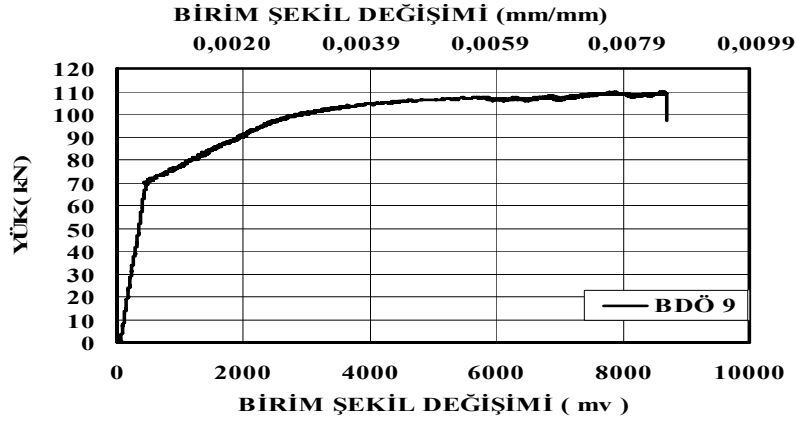
g)



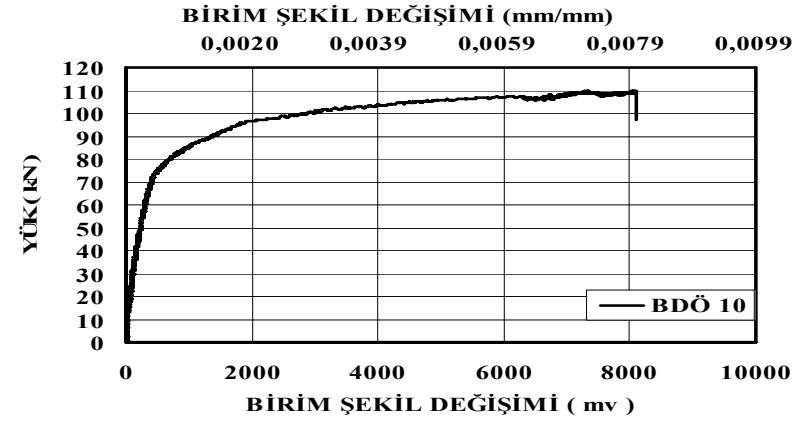
h)

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

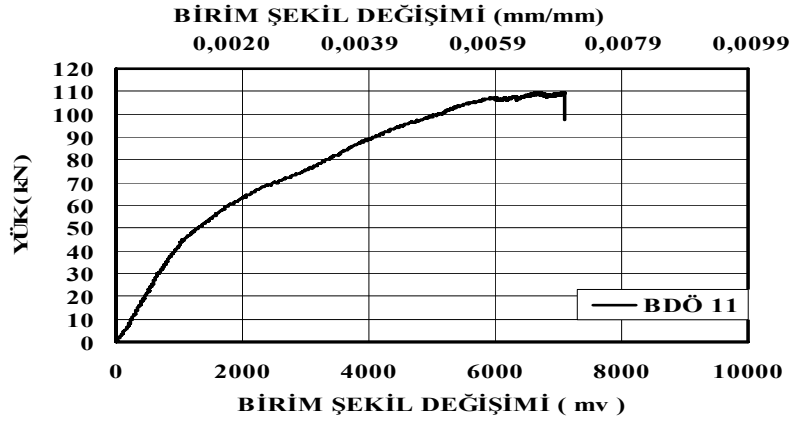
e) Birim deformasyon ölçer 5, f) Birim deformasyon ölçer 6, g) Birim deformasyon ölçer 7, h) Birim deformasyon ölçer 8



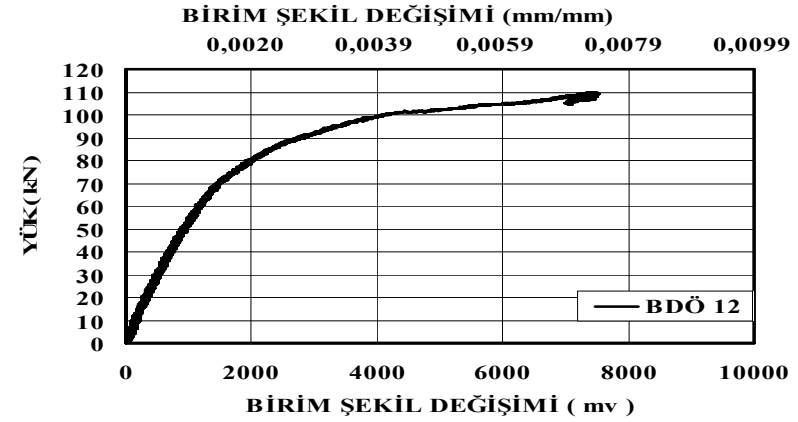
i)



j)



k)



l)

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

ı) Birim deformasyon ölçer 9, j) Birim deformasyon ölçer 10, k) Birim deformasyon ölçer 11, l) Birim deformasyon ölçer 12

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Onarılan deney elemanlarında kullanılan CFRP şerit aralığı ve ankrajın; kesme dayanımları, rijitlikleri, süneklikleri ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman ve CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyon değerleri ile yönetmeliklerde verilen kesme dayanımı eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplama sonuçları karşılaştırmıştır [19-24]. Deney elemanlarının Bölüm 4'te detayları ile verilen test anlatımları test sonuçları olarak Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

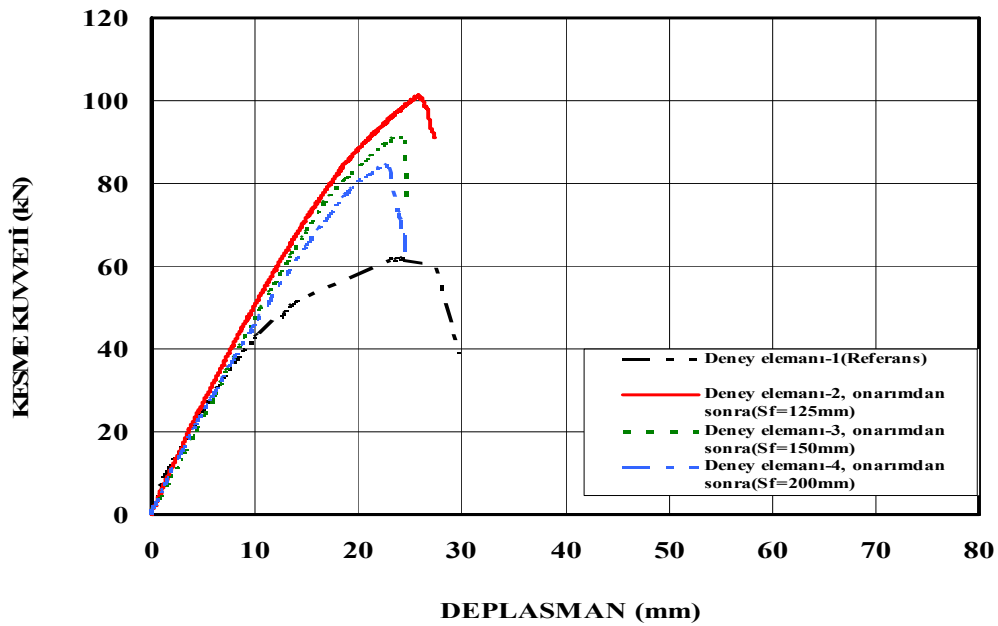
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti

Deney Elemanı No	Hasar Verdirme Deneyleri		Onarım Deneyleri				
	Uygulanan Maksimum Yük (kN)	Uygulanan Maksimum Yükteki Deplasman (mm)	Akma Yüğü (kN)	Akma Yüğündeki Deplasman (mm)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğündeki Deplasman (mm)	Göçme Mekanizması
1(Referans)	-	-	-	-	62,07	23,99	Kesme
2 (Onarım)	53,00	13,36	-	-	101,34	29,54	Kesme
3 (Onarım)	49,53	12,04	-	-	91,69	26,86	Kesme
4 (Onarım)	53,02	12,08	-	-	84,65	25,87	Kesme
5 (Onarım)	52,68	12,82	110,30	27,86	112,66	68,48	Eğilme
6 (Onarım)	52,44	13,97	109,78	27,86	109,78	57,65	Eğilme
7 (Onarım)	49,75	13,74	109,72	28,65	106,00	40,46	Eğilme

5.1. Deney Elemanlarının Davranışı

Onarılan deney elemanlarında, CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe ve şerit uçlarında ankraj uygulamasının kirişlerin davranışı üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için yük-deplasman grafikleri gruplandırılarak Şekil 5.1-5.5'te verilmiştir. Deney elemanlarının davranışları gruplanan bu grafikler yorumlanarak birbirleri ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Deney elemanları 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'nin yük-deplasman eğrileri karşılaştırılırken, hasar verdirme deneylerine ait eğriler kaldırılmış ve eğriler orijinden başlatılmıştır.

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

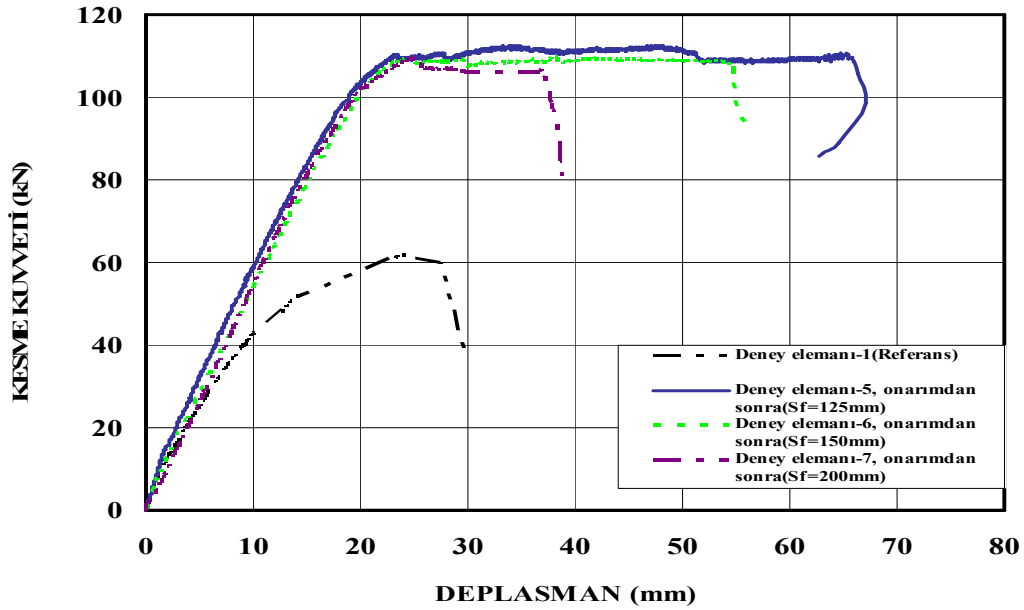


Şekil 5.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3 ve 4
(Ankrajlı şerit aralıklarının karşılaştırılması)

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 kesmeden 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 etmedeki başarıları ölçüsünde bir davranış sergilemişler ve referans deney elemanından daha büyük kesme kapasitesine ulaşmışlardır.

Deney elemanları 2, 3 ve 4 52 kN yük düzeyine kadar yaklaşık aynı rijitlikte deformasyon yapmışlardır. 52 kN'dan sonra deney elemanı 4, deney elemanı 2 ve 3'den daha fazla rijitliği azalarak 84,65 kN yük düzeyinde 25,87 mm deplasmanda göçmüştür. Deney elemanları 2 ve 3 benzer rijitlik sergilemişlerdir. Deney elemanı 2 101,34 kN yük düzeyinde, 29,54 mm orta nokta deplasman değerinde ve deney elemanı 3 91,69 kN yük düzeyi, 26,86 mm orta nokta deplasman değerinde kesme kırılması sonucu göçmüşlerdir. Deney elemanı 2, 3 ve 4'ün göçme yükleri referans deney elemanın göçme yükünden sırasıyla %63, %48 ve %36 daha fazla ölçülmüştür. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe arttırıldığında, deney elemanlarının taşıdığı kesme kuvvetleri azalmıştır.

Ankrajlı CFRP şeritlerle onarılan deney elemanları yetersiz kesme donatılı kirişlerde kesme dayanımlarını artırmasına rağmen sünek eğilme davranışı gelişmesini sağlayamamıştır. Yönetmeliklerdeki eşitlikleri kullanılarak belirlenen CFRP şerit aralığı ($s_f=125$ mm) kirişte sünek eğilme davranışının gelişmesi için yetersiz kalmıştır [20, 21].



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

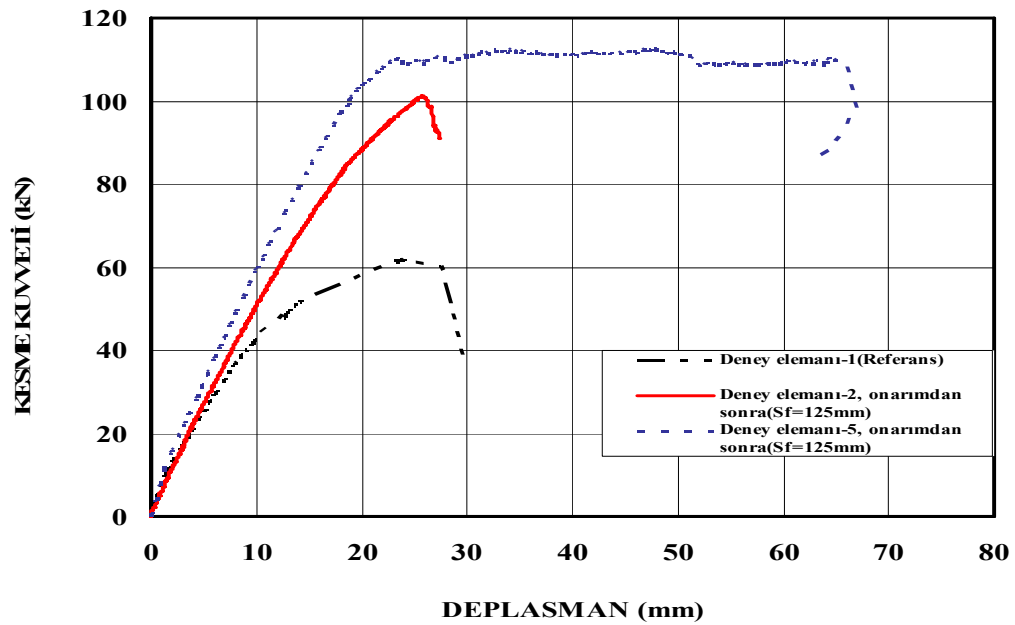
CFRP şerit uçları fan türü ankrajla sabitlenerek onarılan deney elemanları 5, 6 ve 7'nin onarım sonrası deneylerine ait yük-deplasman grafikleri referans elemanın (deney elemanı 1) yük-deplasman grafiği ile birlikte Şekil 5.2'de verilmiştir. Verilen bu grafikte üç farklı aralıkta ($S_f=125$ mm, 150 mm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

CFRP şeritlerin uçları fan ankrajı ile kirişe sabitlenerek onarılan deney elemanlarının çekme donatıları akma kapasitesine erişmişlerdir. Deney elemanlarının çekme donatıları akma dayanımına eriştikten sonra büyük deplasmanlar yapmışlar, sünek eğilme davranışı sergilemişlerdir.

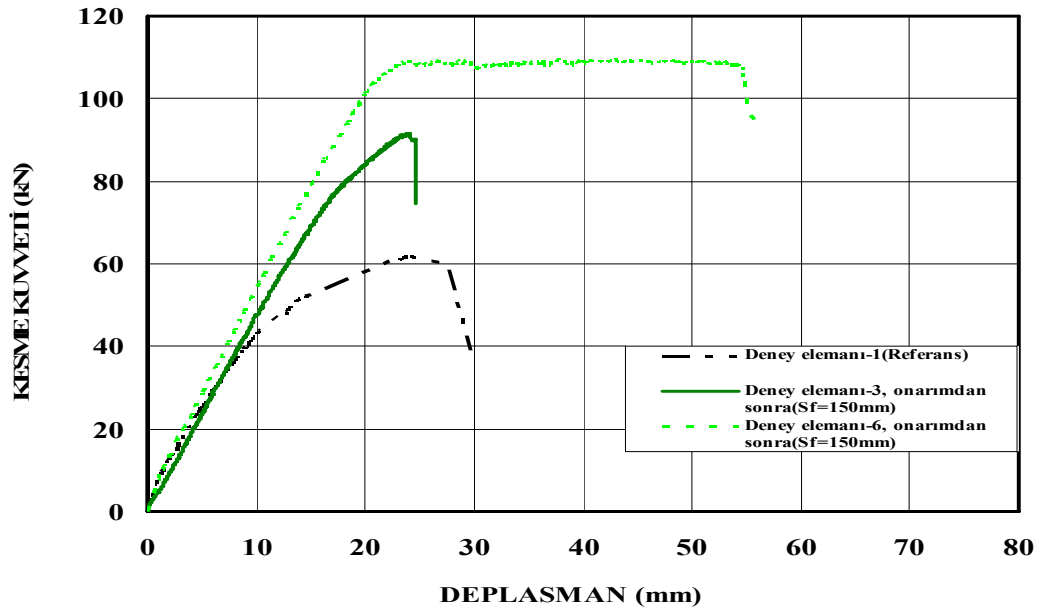
Deney elemanları 5, 6 ve 7 benzer rijitlikle akma yüküne ulaşmışlardır. Deney elemanları 5 ve 6'nın akma yükü değerlerindeki kiriş orta nokta deplasmanları 27,86

mm deney elemanı 7'nin akma yükü değerlerindeki kiriş orta nokta deplasmanı 28,65 mm ölçülmüştür.

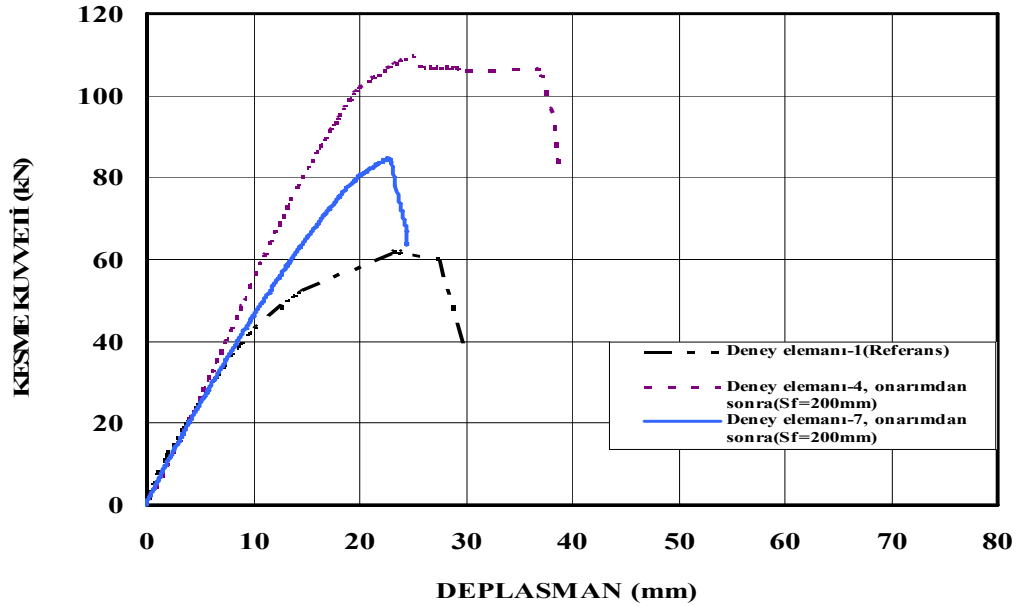
Deney elemanları 5, 6 ve 7'nin çekme donatıları akma yüküne eriştikten sonra sünek eğilme davranışı sergilemişler ve tabla betonlarında oluşan ezilme sonucu göçmüşlerdir. Geliştirilen fan ankrajları CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiştir. Göçme yük düzeylerinde deney elemanı 5 68,48 mm, deney elemanı 6 57,65 mm, deney elemanı 7 40,46 mm orta nokta deplasmanı yapmışlardır.



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



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



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

Şekil 5.3'te şerit eksenleri arasında 125 mm mesafe olan ankrajlı ve ankrajsız deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri, Şekil 5.4'te şerit eksenleri arasında 150 mm

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

Deney elemanı 2 101,34 kN yük düzeyinde 29,54 mm orta nokta deplasman değerinde CFRP şeritlerin kiriş üzerinden soyulması sonucu kesme kırılmasından göçmüştür. Şerit eksenleri arasındaki mesafe deney elemanı 2 ile aynı olan deney elemanı 5'te uygulanan fan ankrajları CFRP şeritlerin kiriş yüzeyden soyulmasını engellemiş ve kiriş çekme donatıları akma yük düzeyine ulaşmıştır. Deney elemanı 5'de uygulanan fan ankrajlar kiriş kesme dayanımını, deney elemanı 2'nin kesme dayanımından yaklaşık %11 artırmıştır. Deney elemanı 5 sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür.

40 kN yük düzeyine kadar deney elemanları 3 ve 6 benzer davranış sergilemişlerdir. Deney elemanı 3'ün rijitliği 40 kN yük düzeyinden itibaren, deney elemanı 6'nın rijitliğinden daha fazla azalarak CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması sonucu kesmeden göçmüştür. Uygulanan fan ankrajlar, deney elemanı 6'nın kesme dayanımını, deney elemanı 3'ün kesme dayanımından %20 oranında artırmış ve deney elemanı 6 sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür.

84,65 kN yük düzeyinde 25,87 mm orta nokta deplasman değerinde deney elemanı 4 CFRP şeritlerin kiriş üzerinden soyulması sonucu kesme kırılmasından göçmüştür. Deney elemanı 7'de uygulanan fan ankrajları CFRP şeritlerin kiriş yüzeyden soyulmasını engellemiş ve kiriş çekme donatıları akma yük düzeyine ulaşmıştır. Deney elemanı 7'de uygulanan fan ankrajlar kiriş kesme dayanımını, deney elemanı 4'ün kesme dayanımından yaklaşık %30 oranında artırmış ve deney elemanı 7 sünek eğilme davranışı sergileyerek göçmüştür.

5.2. Kesme Dayanımı

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

Çizelge 5.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları

Deney Elemanı No	Akma Yüğü (kN)	Göçme Yüğü (kN)
1(Referans)	-	62,07
2 (Onarım)	-	101,34
3 (Onarım)	-	91,69
4 (Onarım)	-	84,65
5 (Onarım)	110,30	112,66
6 (Onarım)	109,78	109,78
7 (Onarım)	109,72	106,00

CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe kiriş kesme dayanımları üzerinde etkili olmuştur. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin artmasıyla, kesme dayanımı azalmıştır. Deney elemanları 2, 3 ve 4’ün kesme dayanımları referans elemanının kesme dayanımına göre sırasıyla %63, %48 ve %36 oranında artmıştır. Uygulanan fan ankrajlar, CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemiş ve kiriş kesme dayanımını artırmıştır. CFRP şeritlerin uçları fan ankrajlarla sabitlenen deney elemanları 5, 6 ve 7’nin kesme dayanımları, referans elemanının kesme dayanımına göre yaklaşık %77 artmıştır

5.3. Rijitlik

Bu bölümde deney elemanlarının rijitlik değerleri (hasar verdirme ve onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, hasar verdirme maksimum yük rijitliği, onarım sonrası hasar verdirme maksimum yük rijitliği, akmada rijitlik, göçmede rijitlik) birbirleriyle karşılaştırılmıştır. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafelerin ve uygulanan fan akrajlarının deney elemanlarının rijitlikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının testlerinden elde edilen yük-deplasman eğrileri kullanılarak hasar verdirme ve onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, hasar verdirme maksimum yük rijitliği, akmada rijitlik, göçmede rijitlik olmak üzere altı farklı rijitlik değeri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Rijitlikler elemanların yük deplasman eğrilerinin başlangıç noktası ile göz önünde bulundurulmuş yük değerine karşı gelen noktaları birleştiren doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanında ilk çatlağın oluştuğu yük düzeyi ve TS 500’de verilen betonun çekme dayanımı için verilen eşitlik göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır [19]. Akma ve göçme rijitlikleri ise bu yük düzeylerine karşı gelen noktalar ile yük deplasman eğrisinin başlangıcını birleştiren doğruların eğimi olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarının rijitlik değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney elemanlarında rijitlikler (kN/mm)

Deney Elemanı No	Hasar Verdirme Başlangıç Rijitliği	Hasar Verdirme Maks.Yük Rijitliği	Onarım Sonrası Başlangıç Rijitliği	Onarım Sonrası Hasar (Verdirme Maks.Yük) Rijitliği	Akmada Rijitlik	Göçmede Rijitlik
1	5,43	-	-	-	-	2,67
2	6,19	4,01	5,60	5,09	-	3,43
3	5,62	4,14	5,49	4,74	-	3,41
4	6,39	4,21	4,95	4,57	-	3,27
5	6,49	4,13	7,09	6,06	3,96	1,65
6	4,81	3,78	6,19	5,44	3,94	1,90
7	5,05	3,67	5,21	5,46	3,83	2,62

Deney elemanları 2, 3, 5 ve 6'da bir kesme çatlağı, etkin 2 adet CFRP şerit ile kontrol edilirken, deney elemanları 4 ve 7'de bir kesme çatlağı, etkin 1 adet CFRP şeritle kontrol edilmiştir.

Onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, referans elemanının başlangıç rijitliğine göre deney elemanı 2, 3, 5 ve 6'da sırasıyla %3, %1, %31, %14 artmış, deney elemanı 4 ve 7'de sırasıyla %9 ve %4 azalmıştır. Hasar verdirme başlangıç rijitliğine göre onarım sonrası başlangıç rijitliği ankrajsız deney elemanlarında azalmış, ankrajlı deney elemanlarında artış göstermiştir. Deney elemanlarının hepsinde; onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, hasar verdirme deneyi maksimum yük rijitliklerine göre artış göstermiştir. Onarımdan sonra hasar verdirme maksimum yük düzeyine erişildiğinde bütün rijitlikler onarım öncesine göre; ankrajsız deney elemanlarında yaklaşık %17, ankrajlı deney elemanlarında %47 oranında artmıştır. Göçme rijitlikleri, referans elemanının göçme rijitliğine göre deney elemanı 2, 3 ve 4'de sırasıyla %29, %28 ve %23 artmış, deney elemanı 5, 6 ve 7'de sırasıyla %38, %29, %2 azalmıştır.

5.4. Süneklik

Genel anlamda süneklik, “dayanımda önemli bir azalma olmadan, büyük deformasyon yapabilme yeteneği” olarak tanımlanabilir. Ayrıca süneklik, plastik deformasyon yapabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir. Testlerden elde edilen yük-deplasman eğrileri kullanılarak deney elemanları için deplasman süneklik oranları hesaplanmıştır. Deney elemanlarında süneklik, göçme yükündeki deplasman değerinin akma yükündeki deplasman değerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Deney elemanlarının deplasman süneklik oranları Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deplasman süneklik oranları

Deney Elemanı No	Akmada Deplasman (mm)	Göçme Deplasmanı (mm)	Süneklik Oranları
1	-	23,99	-
2	-	29,54	-
3	-	26,86	-
4	-	25,87	-
5	27,86	68,48	2,46
6	27,86	57,65	2,07
7	28,65	40,46	1,41

Fan ankrajlarla onarılan deney elemanlarında CFRP şeritler arasındaki mesafe arttıkça deney elemanlarının deplasman süneklik oranları azalmıştır. CFRP şerit aralıkları arttıkça şeritlerin kesme dayanımına katkısı azalmakta, toplam yük paylaşılırken betonarme kiriş daha fazla yük almaktadır. Bu büyük yükler altında kesitin, basınç bloğundaki betonun gerilme dayanımları aşılmıştır. Böylece CFRP şerit eksen aralığı büyük olan kirişler büyük orta nokta deplasmanları yapmadan beton basınç bloğundaki ezilme sonucu göçme oluşmuştur. Süneklik oranları deney elemanı 5'te 2,46, deney elemanı 6'da 2,07 ve deney elemanı 7'de 1,41 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen fan ankraj ve CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe, deney elemanlarının deplasman süneklik oranı üzerinde etkilidir.

5.5. Şeritlerde Birim Deformasyonlar

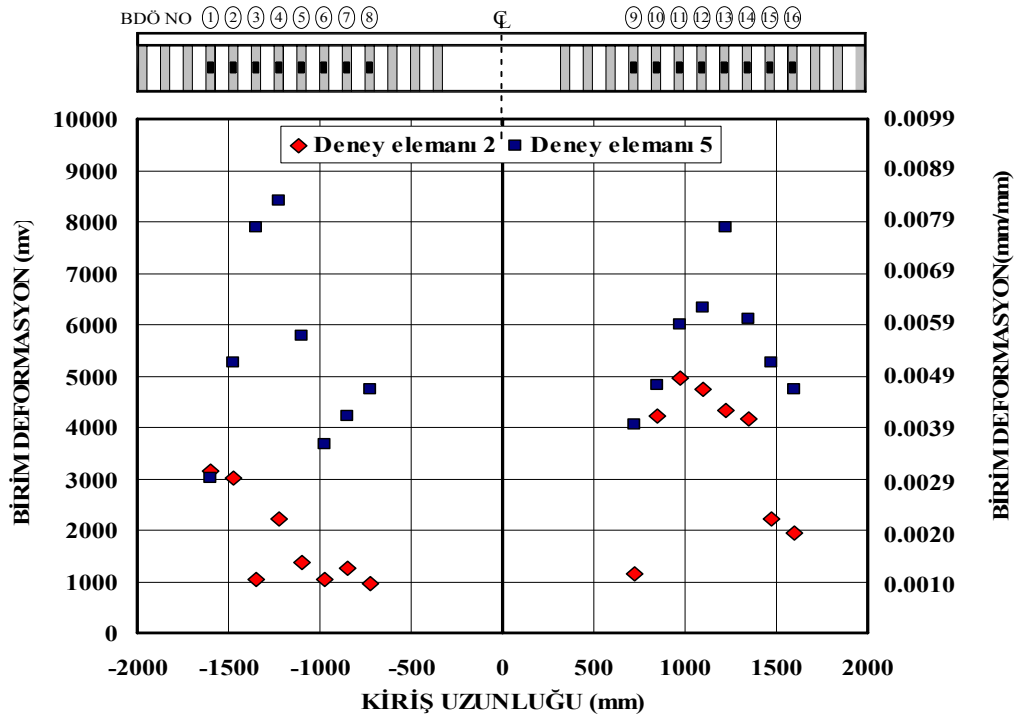
Onarılan deney elemanları 2, 3, 5 ve 6'da CFRP şeritler üzerine 16 adet, deney elemanları 4 ve 7'de CFRP şeritler üzerine 12 adet birim deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden alınan maksimum değerler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Çizelge 5.5'te koyu olarak verilen değerler, her bir deney elemanından alınan maksimum birim deformasyon

değerleridir. CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerleri geliştirilen fan ankrajların etkisinin tartışılması için CFRP şerit eksen araklıkları özdeş olan elemanlar gruplandırılarak deney elemanlarının üzerindeki dağılımları Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.

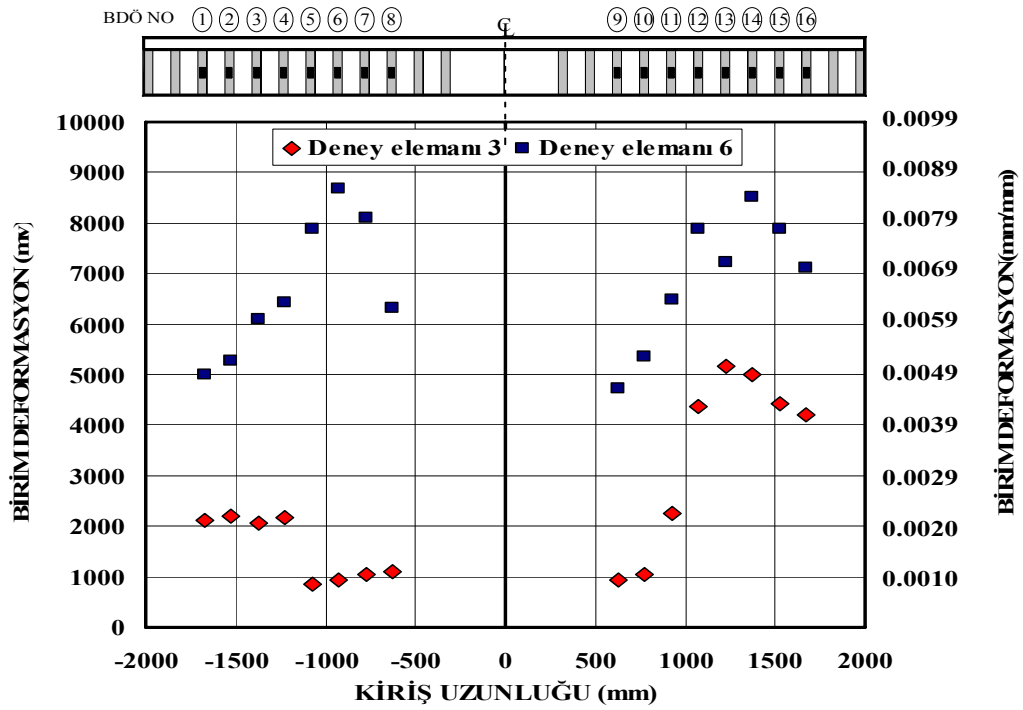
Çizelge 5.5. CFRP şeritlerde ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri

	Deney Elemanı 2	Deney Elemanı 3	Deney Elemanı 4	Deney Elemanı 5	Deney Elemanı 6	Deney Elemanı 7
B.D.Ö	Maksimum Birim Deformasyon Değeri (mm/mm)					
1	0,0032	0,0021	0,0054	0,0030	0,0050	0,0069
2	0,0030	0,0022	0,0050	0,0053	0,0053	0,0074
3	0,0011	0,0021	0,0042	0,0078	0,0061	0,0075
4	0,0022	0,0022	0,0033	0,0084	0,0064	0,0085
5	0,0014	0,0008	0,0021	0,0058	0,0078	0,0078
6	0,0011	0,0009	0,0011	0,0037	0,0087	0,0075
7	0,0013	0,0011	0,0010	0,0042	0,0081	0,0068
8	0,0009	0,0011	0,0021	0,0047	0,0063	0,0089
9	0,0012	0,0009	0,0023	0,0040	0,0047	0,0086
10	0,0042	0,0011	0,0023	0,0048	0,0054	0,0081
11	0,0049	0,0023	0,0022	0,0059	0,0064	0,0071
12	0,0047	0,0044	0,0020	0,0063	0,0078	0,0075
13	0,0043	0,0052	---	0,0077	0,0072	---
14	0,0042	0,0050	---	0,0061	0,0085	---
15	0,0022	0,0044	---	0,0053	0,0078	---
16	0,0019	0,0042	---	0,0047	0,0071	---

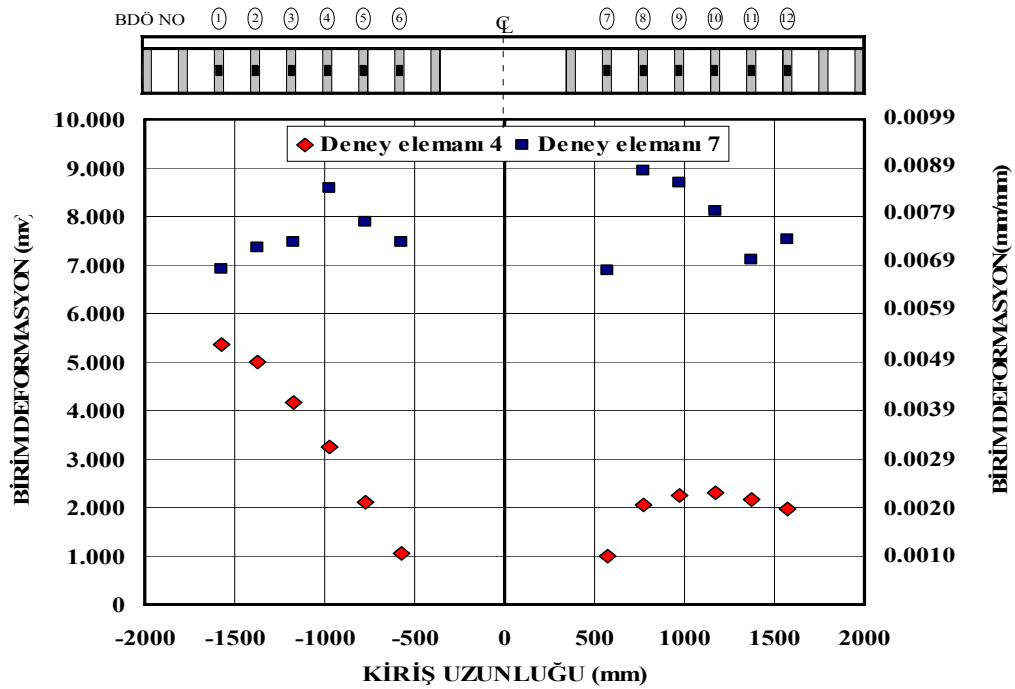
Ankrajlı deney elemanlarında CFRP şeritlerden alınan maksimum birim deformasyon değerlerinin ortalaması 0,0052 mm/mm hesaplanmıştır. ACI-440 ve *fib*'de sırasıyla CFRP şeritlerin birim uzama değeri sınırı 0,004 mm/mm, 0,0048 mm/mm olarak verilmiştir [21, 24]. Ankrajlı deney elemanlarındaki CFRP şeritlerden ölçülen maksimum birim deformasyonların ortalaması yönetmeliklerdeki sınır koşullarına çok yakın değerler çıkmıştır. Ankrajlı elemanlarda ölçülen maksimum birim deformasyon değerlerinin ortalaması 0,0087 mm/mm hesaplanmıştır. Ankrajlı deney elemanlarındaki CFRP şeritlerden ölçülen maksimum birim deformasyonların ortalaması ACI-440 ve *fib*'de sırasıyla sınır koşuldan %118, %81 daha fazla çıkmıştır.



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



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



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

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

5.6. Kesme Dayanımı Hesabı

Yetersiz kesme donatılı deney elemanlarının kesme kırılmasından göçmesini engellemek için yapılan CFRP şeritlerin kesme dayanımı hesabı DBYBHY, ACI-440 ve *fib*,’de verilen eşitlikler kullanılarak yapılmıştır [20, 21, 24]. DBYBHY ve ACI-440, CFRP’nin şeritler halinde kullanılması durumunda şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin (s_f), CFRP şerit genişliği ile kiriş faydalı yüksekliğinin dörtte birinin toplamını ($w_f+d/4$) geçmemesi, DBYBHY’de CFRP şeritlerin kirişin çevresinin tamamen sarılması ve en az 200 mm bindirme yapılması koşulu bulunmaktadır. *fib*’de T kesit için verilen şerit aralığı; kiriş etkili yüksekliğinden tabla genişliği ve şerit genişliğinin yarısının farkından küçük olmalıdır ($s_f < d - h_f - b_f/2$). Bu koşullara göre çalışmadaki maksimum şeritlerin eksen aralığı (ACI-440) 132,5 mm olması gerekmektedir. Deney elemanları 2 ve 5’de bu koşula uygun olarak şerit eksenleri arasında 125 mm belirlenmiştir. Ancak deney elemanları 3 ve 6’da 150 mm, deney elemanları 4 ve 7’de 200 mm şerit eksen aralıkları uygulanarak DBYBHY ve ACI-440 dışındaki değerlerde CFRP şeritlerin kiriş kesme dayanımına katkısı değerlendirilmiştir. Uygulamada mevcut döşeme ve donatılardan dolayı CFRP şeritlerinin kirişin çevresini tamamen sarması zor görünmektedir. Bu nedenle kirişi tamamen sargılamak yerine şerit uçlarının 120 mm uzunluğunda bir kısmı kiriş tablasının altına yapıştırılmıştır. Şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemek için deney elemanları 5, 6 ve 7’de CFRP şerit uçları fan türü ankrajlar kullanılarak

sabitlenmiştir. Deney elemanlarının kesme dayanımları 5.1-5.4 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V = Deney elemanının taşıdığı toplam kesme kuvveti (N)

V_c = Betonun taşıdığı kesme kuvveti (N)

V_s = Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti (N)

V_f = CFRP şeritlerinin taşıdığı kesme kuvveti (N)

Betonun taşıdığı kesme kuvveti Eş. 5.2’de verilmiştir.

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

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$$

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

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

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 = Boyuna donatı oranı

N_u = Beton aksenal kuvveti (MPa)

A_c = Beton en kesit alanı (mm²)

Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti Eş. 5.3'te verilmiştir.

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

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot 0.9d}{s} \quad (\text{N}) \quad (\text{EC2})$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

V_s = Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti (N)

A_v = Kesme donatısı kesit alanı (mm²)

f_y = Kesme donatısı akma dayanımı (MPa)

s = Etriye aralığı (mm)

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

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

$$V_f = \frac{2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot w_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot d_f}{s_f} \quad (\text{N}) \quad (\text{ACI})$$

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

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

Eşitlikte 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)
 E_f = CFRP elastisite modülü (Mpa)
 ε_f = CFRP birim uzaması
 $\varepsilon_{fd,e}$ = CFRP birim deformasyon değeri
 d = Kiriş etkili yüksekliği (mm)
 d_f = Kiriş yan yüzünde CFRP şerit yapışma uzunluğu (mm)
 s_f = CFRP şerit aralığı (mm)
 b_f = CFRP şerit genişliği (mm) (*fib*)
 Φ = Çatlak açısı (derece)
 α = Kiriş eksenini ile CFRP şerit yapıştırılma açısı (derece)
 t_f = CFRP şerit kalınlığı (mm)

Hesaplamalarda kesme donatılarının kesit alanları 56.55 mm^2 , akma dayanımları 310 MPa alınmıştır. CFRP şeritler için elastisite modülü 231000 MPa, maksimum birim uzama 0,004 mm/mm olarak alınmıştır. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Hesaplanan ve ölçülen kesme dayanımları

Deney Elemanı No	S _f (mm)	Kesme Dayanımı (kN)					Ölçülen/Hesaplanan			
		Ölçülen (kN)	Hesaplanan (kN)				DBYBHY & TS 500	ACI 440 & TS 500	ACI 318 & ACI 440	EC2 & <i>fib</i>
			DBYBHY & TS 500	ACI 440 & TS 500	ACI 318 & ACI 440	EC2 & <i>fib</i>				
1	-	62,07	64,14	64,14	52,15	50,25	0,97	0,97	1,19	1,24
2	125	101,34	92,96	86,32	74,43	72,78	1,09	1,17	1,36	1,39
3	150	91,69	88,36	82,81	70,86	69,12	1,04	1,11	1,29	1,33
4	200	84,65	82,89	78,73	66,61	64,69	1,02	1,08	1,27	1,31
5	125	112,66	93,69	87,03	74,97	73,14	1,20	1,29	1,50	1,54
6	150	109,78	88,63	83,08	71,06	69,26	1,24	1,32	1,54	1,59
7	200	106,00	83,07	78,91	66,75	64,78	1,28	1,34	1,59	1,64

Ankrajlı deney elemanlarında ölçülen kesme dayanımları DBYBHY+TS 500, ACI 440+TS 500, ACI 318+ACI 440 ve EC2+*fib*'e göre analitik hesaplamalardan sırasıyla ortalama %5, %12, %31 ve %34 büyük elde edilmiştir. Ankrajlı deney elemanları için ölçülen kesme dayanımları DBYBHY+TS 500, ACI 440+TS 500, ACI 318+ACI 440 ve EC2+*fib*'e göre yapılan analitik hesaplamalardan sırasıyla yaklaşık %24, %32, %56 ve %59 büyük elde edilmiştir. DBYBHY+TS 500 ve ACI 440+TS 500'de verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanan kesme dayanımları ankrajlı CFRP şeritlerle onarılan deney elemanları için ACI 318+ACI 440 ve EC2+*fib*'e göre daha başarılı sonuç vermiştir. Yapılan hesaplamalarda TS 500'de verilen beton kesme dayanımı eşitliği, ACI 318 ve EC2'de verilen eşitliklerden elde edilen sonuçlardan büyük olduğundan, ayrıca TS 500 ve ACI 318'deki eşitliklerden elde edilen etriye dayanımı EC2'den daha büyük olduğundan, deney elemanlarının kesme dayanımları DBYBHY+TS 500 ve ACI 440+TS 500'de, ACI 318+ACI 440 ve EC2+*fib*'e göre daha büyük çıkmıştır [20-24]. Deney elemanlarında kullanılan fan türü ankrajlar, CFRP şeritlerin giriş yüzeyinden soyulmasını önlemiş, şeritlerin büyük deformasyonlar yapmasını, böylece CFRP şeritlerin daha fazla kesme kuvveti taşımasını sağladığı düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada yedi adet yetersiz kesme donatılı deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanı 1 onarım yapılmayan referans elemanıdır. Deney elemanları 2, 3 ve 4 yalnız CFRP şeritler ile onarılmıştır. Deney elemanları 5, 6 ve 7 CFRP şeritlerinin uçları kiriş yüzeyine geliştirilen fan ankrajlarla sabitlenerek onarılmıştır. CFRP şerit eksenleri arasındaki mesafe, deney elemanları 2 ve 5'te 125 mm, deney elemanları 3 ve 6'da 150 mm, deney elemanları 4 ve 7'de 200 mm olarak uygulanmıştır. Deney elemanları 5, 6 ve 7'de CFRP şerit uçları 2 adet fan ankrajla kirişe sabitlenmiştir. Ankrajlar kiriş tablası ile gövde birleşim noktasına yatay doğrultu ile 60^0 ve kiriş tablasından 50 mm mesafede yatay doğrultuda uygulanmıştır. Testlerde deney elemanlarının kesme dayanımı, rijitlik, süneklik, göçme mekanizmaları ve CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyonlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Ankajsız CFRP şeritlerle 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 ortalama %63, %48 ve %36 oranında artmıştır. CFRP şeritlerin uçları fan ankrajı kullanılarak sabitlenen deney elemanlarının göçme modları değişmiş, bu elemanlar da sünek eğilme davranışı gelişmiştir. CFRP şeritlerin uçlarında kullanılan ankrajlarla onarılan deney elemanlarının kesme dayanımları ortalama %77 oranında artmıştır. Deney elemanları akma yükünden sonra göçme yüküne kadar büyük deformasyonlar yaparak basınç bölgesindeki betonun ezilmesi sonucu göçmüştür. CFRP şeritlerle, uygulanan fan türü ankrajlarda kopma gözlemlenmemiştir. Fan türü ankrajlar deney elemanlarının göçme modunun değişmesini ve kesme dayanımının artmasını sağlamıştır.

- Deney elemanlarının hepsinde; onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, hasar verme deneyi maksimum yük rijitliklerine göre artış göstermiştir. Hasar verme başlangıç rijitliğine göre onarım sonrası başlangıç rijitliği ankrajsız deney elemanlarında azalmış, ankrajlı deney elemanlarında artış göstermiştir. Onarım sonrası başlangıç rijitlikleri, referans elemanının başlangıç rijitliğine göre deney elemanı 2, 3, 5 ve 6'da sırasıyla %3, %1, %31, %14 artmış, deney elemanı 4 ve 7'de sırasıyla %9 ve %4 azalmıştır. Onarımdan sonra hasar verme maksimum yük düzeyine erişildiğinde bütün rijitlikler onarım öncesine göre; ankrajsız deney elemanlarında yaklaşık %17, ankrajlı deney elemanlarında %47 oranında artmıştır. Göçme rijitlikleri, referans elemanının göçme rijitliğine göre deney elemanı 2, 3 ve 4'de sırasıyla %29, %28 ve %23 artmış, deney elemanı 5, 6 ve 7'de sırasıyla %38, %29 ve %2 azalmıştır.

- CFRP şeritlerin uçları fan türü ankrajla sabitlenen deney elemanları sünek eğilme davranışı göstermişlerdir. Deney elemanları 5, 6, ve 7'nin süneklik oranları sırasıyla 2,46, 2,07 ve 1,41 olarak hesaplanmıştır. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe süneklik oranı üzerinde etkili olmuştur. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki mesafe arttırıldığında süneklik azalmıştır. Şerit eksen aralığı 125 mm olan deney elemanı, şerit eksen aralığı 150 mm olan deney elemanından %19, şerit eksen aralığı 200 mm olan deney elemanından ise % 75 daha fazla süneklik sergilemiştir.

- Ankrajsız CFRP şeritlerle onarılan deney elemanlarında, CFRP şeritlerin maksimum birim deformasyonları ACI 440'da verilen 0,004 mm/mm, *fib*'de verilen 0,0048 mm sınır koşullarına yakın değerlerde ölçülmüştür [20, 24]. Şerit uçları fan türü ankrajlı deney elemanlarında ölçülen maksimum birim deformasyonlar ACI 440, *fib*'de verilen sınır koşullarından sırasıyla %108, %66 daha fazla elde edilmiştir. Ayrıca, ankrajlı deney elemanlarından elde edilen birim deformasyon ölçümleri, ankrajsız deney elemanlarına göre %73 daha fazla hesaplanmıştır.

- CFRP şerit uçları ankrajlı deney elemanları için ölçülen kesme dayanımları, DBYBHY+TS 500, ACI 440+TS 500, ACI 318+ACI 440 ve EC2+*fib*'e göre yapılan

analitik hesaplamalardan sırasıyla yaklaşık %24, %32, %56 ve %59 büyük elde edilmiştir. [20-24]. Şerit uçlarının ankrajla sabitlenmesi kiriş yüzeyinden erken soyulmayı engellemiş ve ölçülen maksimum birim deformasyon değerinin artmasını sağlamıştır.

6.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Yetersiz kesme donatılı kirişlerin CFRP şeritlerle onarılması uygulamada kullanılabilir. Ankraj kullanılarak CFRP şerit uçlarının sabitlenmesi kirişte sünek eğilme davranışının elde edilebilmesini sağlamıştır.
- Yöntemin farklı yükseklikteki kirişlerde etkinliğinin araştırılması gerekmektedir
- Araştırma kapsamında kullanılan onarım tekniğinin, beton dayanımı düşük kirişler üzerindeki etkinliği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., Özcebe, G., “Betonarme: temel ilkeler, TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine (1998) göre hesap”, *Evrin Yayinevi*, İstanbul, 20,89,459,463-468 (2007)
2. Pulak, T., “ Betonarme kirişler için bir güçlendirme yöntemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (1996)
3. Trianafilou, Thanasis C. “Shear strengthening of RC beams using epoxy bonded FRP composites”, *ACI Structural Journal*, 95(2), March-April, 107-115, (1998).
4. Khalifa, A., Nanni, A., “Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites”, *Cement & Concrete Composites*, 22:165-174 (2000).
5. Täljsten, B., Elfgren, L., “Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods”, *Composites: Part B*, 31:87–96 (2000).
6. Kachlakeva, D., McCurry, D.D. “Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates”, *Composites: Part B* 31, 445-452 (2000)
7. 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 pp., (2000)
8. Li, A., Diagana, C., Delmas, Y., ” CRFP contribution to shear capacity of strengthened RC beams”, *Engineering Structures*, 23:1212–1220 (2001)
9. 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)
10. Täljsten, B., “Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets”, *Construction and Building Materials*, 17:15–26 (2003)
11. Akyuz, U., Ozdemir, G., “Mechanical properties of cfrp anchorages”, *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, B.C., Canada August 1-6, 3349 (2004)
12. Bousselham, A., Chaallal, O., “Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP”, *Composites: Part B* 37: 37–46 (2006)

13. Bencardino, F., Spadea, G., Swamy, R.N., “The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates”, *Construction and Building Materials* (2006).
14. 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)
15. Barros, J.A.O. , Dias, S.J.E., Lima, J.L.T., “Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams”, *Cement & Concrete Composites*, 29:203–217 (2007)
16. Kim, G., Sim, J., Oh, H., “Shear strength of strengthened RC beams with FRPs in shear”, *Construction and Building Materials* (2007)
17. 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* (2007)
18. Galal, K., Sekar, M., “Rehabilitation of RC inverted-T girders using anchored CFRP sheets”, *Composites: Part B* (2007)
19. TS 500, “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 29-31 (2000)
20. ACI Committee 440. State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan; 62 (1996)
21. 2007 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara, 183, 184 (2007)
22. ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99). Detroit: *American Concrete Institute*; 369 (1995)
23. Commission of the European Communities. *Eurocode No. 2: Design of concrete structures—part 1: General rules and rules for buildings. prEN 1992-1-1* draft, July, 89, 85 (2002)
24. FIB bulletin No. 14 “Externally Bonded FRP Requirement for RC Structures.” Technical Report, *Fédération International du Béton (fib)*, France, 62 (2001)

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : TOPTAŞ, Tolga
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 26/02/1981, Ankara
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0 (312) 231 44 81
Faks : 0 (312) 232 05 27
e-mail : ttoptas@gmail.com

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

Lisans

Gazi Üniversitesi/
İnşaat Mühendisliği
Bölümü

2006

Lise

Kalaba Lisesi

1998

**İş Deneyimi
Yıl****Yer****Görev**

2006-2008

Toptaş İnş. Tic. ve
San. Ltd. Şti.

Şantiye Şefi

Yabancı Dil

İngilizce