

**DÜŞÜK DAYANIMLI BETONLA ÜRETİLMİŞ  
T KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİN  
CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

**İsmail Murat CILIZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2007**

**ANKARA**

İsmail Murat CILIZ tarafından hazırlanan DÜŞÜK DAYANIMLI BETONLA ÜRETİLMİŞ T KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL  
Tez Yöneticisi

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

Başkan : Prof. Dr. Hüsnü CAN

Üye : Prof. Dr. M. Emin TUNA

Üye : Prof. Dr. Sinan ALTIN

Üye : Prof. Dr. Tekin GÜLTOP

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

Tarih : 11/04/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

İsmail Murat CILIZ

**DÜŞÜK DAYANIMLI BETONLA ÜRETİLMİŞ  
T KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİN  
CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**İsmail Murat CILIZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Nisan 2007**

**ÖZET**

Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Karbon elyaf takviyeli plastiklerin (CFRP) eleman dışından yapıştırılarak güçlendirilmesi yöntemi son yıllarda araştırma konuları içerisinde yer alan ve başarı kazanan bir tekniktir. Bu çalışma kesme dayanımı yetersiz, düşük beton dayanımlı betonarme kirişlerin dıştan CFRP levha ve şeritlerin yapıştırılarak güçlendirilmesini konu alan deney sonuçlarını sunmaktadır. Düzenlenen deney programında 6 adet T kesitli betonarme kiriş tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada CFRP şeritlerin genişliği, kesme açıklığındaki yerleşim düzeni ve CFRP şeritlerin uçlarına yerleştirilen ankrajlar incelenen değişkenlerdir. Deney sonuçları CFRP elemanlarla yapılan güçlendirmenin kirişlerin dayanım ve rijitliğini önemli oranlarda arttırdığını ortaya koymuştur. CFRP şeritlerin genişlikleri, yerleşim düzenleri ve kullanılan ankrajlar deney elemanlarının sünekliği ve göçme modları üzerinde etkili olmuştur.

**Bilim Kodu : 911.1.144**  
**Anahtar Kelimeler : Betonarme kiriş, kesme, güçlendirme, CFRP, tersinir yükleme, ankraj**  
**Sayfa Adeti : 110**  
**Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL**

**STRENGTHENING OF RC T-BEAMS  
WITH LOW CONCRETE STRENGTH USING CFRP**

**(M. Sc. Thesis)**

**İsmail Murat CILIZ**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**April 2007**

**ABSTRACT**

Various methods improved for strengthening RC beams against shear. Recently, external bonding of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) to RC beams was very popular and successfully technique. This study present test result on strengthening of shear deficient RC beams with low concrete strength by external bonding of CFRP sheet and straps. The experimental program consisted of 6 T-section RC beams. These beams were tested under cyclic loading. The parameters investigated in this study included width of the CFRP straps, arrangements of CFRP strap along the shear span and anchorage technique. The test results show that CFRP members improved the strength and siffness of beams significantly. The failure mode and ductility of specimens change depend on the CFRP strap width, arrangement along the beam and anchorage technique.

**Science Code : 911.1.144**

**Key Words : Reinforced concrete beam, shear, strengthening, CFRP, cyclic load, anchorage**

**Page Number : 110**

**Adviser : Assit. Prof. Dr. Özgür ANIL**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında değerli yardım ve katkılarını esirgemeyen ve bana yol gösteren hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL'a ve çalışmanın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım hocam Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca laboratuvar çalışmalarında yardımlarını ve emeklerini esirgemeyen araştırma görevlisi hocam Sayın Emin KARA ve laboratuvar sorumlusu Sayın Uzm. Faruk OGÜN'e teşekkür ederim.

Yoğun iş temposunda bana gerekli anlayışı gösteren çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Desteklerini her zaman hissettiğim anneme, babama ve ablama sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xiii
SİMGELER KISALTMALAR .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. DENEY ELEMANLARI VE DENEY TEKNİĞİ .....	13
2.1. Genel .....	13
2.2. Deney Elemanları .....	14
2.3. Malzemeler .....	25
2.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi .....	30
2.5. Güçlendirme Tekniği .....	33
2.5.1. CFRP şerit ve levhaların hazırlanması ve beton yüzeye yapıştırılması .....	33
2.5.2. Ankrajların uygulanması .....	34
2.6. Deney Düzeni .....	37
2.6.1. Yükleme düzeni .....	37
2.6.2. Ölçüm aletleri ve ölçüm düzeni .....	40
2.6.3. Ölçümlerin değerlendirilmesi .....	42

	<b>Sayfa</b>
2.7. Deney Yönetimi .....	47
3. DENEYLER .....	48
3.1. Genel .....	48
3.2. Deney Elemanı Kiriş-1 .....	48
3.3. Deney Elemanı Kiriş-2 .....	51
3.4. Deney Elemanı Kiriş-3 .....	56
3.5. Deney Elemanı Kiriş-4 .....	61
3.6. Deney Elemanı Kiriş-5 .....	65
3.7. Deney Elemanı Kiriş-6 .....	70
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	74
4.1. Dayanım ve Davranış .....	74
4.2. Rijitlik .....	83
4.3. Enerji Tüketimi .....	86
4.4. Analitik Çalışma .....	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	99
5.1. Sonuçlar .....	99
5.2. Öneriler .....	102
KAYNAKLAR .....	103
EKLER .....	105
EK-1 Donatı gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri .....	106
ÖZGEÇMİŞ .....	110

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri .....	17
Çizelge 2.2. Ortalama beton basınç dayanımları .....	26
Çizelge 2.3. Beton karışım oranları .....	26
Çizelge 2.4. Donatı özellikleri .....	27
Çizelge 2.5. Sika Wrap 230C Karbon Lifli Dokuma malzeme özellikleri .....	28
Çizelge 2.6. Sikadur 330 malzeme özellikleri .....	29
Çizelge 2.7. Ankraj çeliği kopma deneyi sonuçları .....	29
Çizelge 2.8. Sikadur-31 malzeme özellikleri .....	30
Çizelge 4.1. Deney elemanı dayanımları .....	75
Çizelge 4.2. Deney elemanları rijitlik değerleri (kN/mm) .....	84
Çizelge 4.3. Güçlendirme tekniğinin başlangıç rijitlikleri üzerindeki etkisi .....	85
Çizelge 4.4. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimleri (kN-mm) .....	86
Çizelge 4.5. Analitik ve deneysel yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması .....	98

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deneş elemanları donatı detayı .....	18
Şekil 2.2. Kiriş-2 ( $W_f = 50$ , $S_f = 80$ ) deneş elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi .....	19
Şekil 2.3. Kiriş-3 ( $W_f = 100$ , $S_f = 130$ ) deneş elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi .....	20
Şekil 2.4. Kiriş-4 deneş elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi .....	21
Şekil 2.5. Kiriş-5 deneş elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi .....	22
Şekil 2.6. Kiriş-6 ( $W_f = 100$ , $S_f = 130$ ) deneş elemanı için CFRP yapıştırma düzeni .....	23
Şekil 2.7. Ankraj detayı .....	35
Şekil 2.8. Deneş ve yükleme düzeni .....	39
Şekil 2.9. LVDT yerleşim düzeni .....	41
Şekil 2.10. Kiriş-2 ( $W_f = 50$ , $S_f = 80$ ) için birim deformasyon ölçer yerleşimi .....	44
Şekil 2.11. Kiriş-3 ( $W_f = 100$ , $S_f = 130$ ) için birim deformasyon ölçer yerleşimi .....	45
Şekil 2.12. Kiriş-4 için birim deformasyon ölçer yerleşimi .....	45
Şekil 2.13. Kiriş-5 için birim deformasyon ölçer yerleşimi .....	46
Şekil 2.14 Kiriş-6 ( $W_f = 100$ , $S_f = 130$ ) için birim deformasyon ölçer yerleşimi .....	46
Şekil 2.15 Kullanılan bilgisayar programı ile deneşin izlenmesi .....	47
Şekil 3.1. Kiriş-1 deneş elemanının yük-çevrim grafiğı .....	49
Şekil 3.2. Kiriş-1 deneş elemanının yük-deplasman grafiğı .....	50
Şekil 3.3. Kiriş-2 deneş elemanının yük-çevrim grafiğı .....	52

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.4. Kiriş-2 deney elemanının yük-deplasman grafiği .....	52
Şekil 3.5. Kiriş-2 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri .....	55
Şekil 3.6. Kiriş-3 deney elemanının yük-çevrim grafiği .....	56
Şekil 3.7. Kiriş-3 deney elemanının yük-deplasman grafiği .....	57
Şekil 3.8. Kiriş-3 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri .....	60
Şekil 3.9. Kiriş-4 deney elemanının yük-çevrim grafiği .....	61
Şekil 3.10. Kiriş-4 deney elemanının yük-deplasman grafiği .....	62
Şekil 3.11. Kiriş-4 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri .....	64
Şekil 3.12. Kiriş-5 deney elemanının yük-çevrim grafiği .....	65
Şekil 3.13. Kiriş-5 deney elemanının yük-deplasman grafiği .....	66
Şekil 3.14. Kiriş-5 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri .....	69
Şekil 3.15. Kiriş-6 deney elemanının yük-çevrim grafiği .....	70
Şekil 3.16. Kiriş-6 deney elemanının yük-deplasman grafiği .....	71
Şekil 3.17. Kiriş-6 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri .....	73
Şekil 4.1. Deney elemanlarının zarf eğrileri .....	77
Şekil 4.2. Kiriş-1, 2, 3 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP şerit genişliği) .....	79
Şekil 4.3. Kiriş-1, 4, 5 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP levha yapıştırma düzeni) .....	80
Şekil 4.4. Kiriş-1, 3, 6 deney elemanlarının zarf eğrileri (Ankraj detayı) .....	82
Şekil 4.5. Kiriş-1, 2, 3 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri .....	89

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.6. Kiriş-1, 4, 5 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri .....	90
Şekil 4.7. Kiriş-1, 3, 6 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri .....	92

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Kiriş-1 kontrol elemanı .....	24
Resim 2.2. Kiriş-2 $S_f = 80$ , $W_f = 50$ .....	24
Resim 2.3. Kiriş-3 $S_f = 130$ , $W_f = 100$ .....	24
Resim 2.4. Kiriş-4 $W_f = 1750$ .....	24
Resim 2.5. Kiriş-5 $W_f = 1750$ .....	24
Resim 2.6. Kiriş-6 $S_f = 130$ , $W_f = 100$ .....	24
Resim 2.7. Betonun hazırlanması .....	31
Resim 2.8. Silindir numune alınması .....	32
Resim 2.9. Beton dökümü tamamlanmış deney elemanları .....	32
Resim 2.10. Epoksinin sürülmesi .....	34
Resim 2.11. Ankraj deliklerinin açılması .....	36
Resim 2.12. Kiriş-2 ankraj uygulaması .....	36
Resim 2.13. Deney düzeneğinin genel görünüşü .....	37
Resim 3.1. Göçme sonrası Kiriş-1 deney elemanı .....	50
Resim 3.2. Deney elemanında oluşan iki ana kesme çatlakları .....	51
Resim 3.3. Beton yüzeyden ayrılan CFRP şeritler .....	53
Resim 3.4. Ankraj bölgesinde CFRP şeritlerde oluşan kopmalar .....	54
Resim 3.5. İleri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (61,1 mm) .....	58
Resim 3.6. Kesme çatlaklarından dolayı kopan CFRP şerit .....	58
Resim 3.7. CFRP şeritlerde meydana gelen soyulma ve yırtılmalar .....	59
Resim 3.8. İleri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (51,2 mm) .....	63
Resim 3.9. Göçme sonrası Kiriş-5 deney elemanı .....	67

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.10. İleri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (46,7 mm) .....	68
Resim 3.11. Geri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (50,4 mm) .....	68
Resim 3.12. CFRP şerit altından ilerleyen eğik çatlak .....	72

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>a</b>	Kesme açıklığı
<b>b<sub>w</sub></b>	Kiriş gövde genişliği
<b>d</b>	Kiriş etkili yüksekliği
<b>d<sub>f</sub></b>	Etkili CFRP şerit ve levha uzunluğu
<b>E<sub>f</sub></b>	CFRP elastisite modülü
<b>f<sub>c</sub>'</b>	Beton karakteristik basınç dayanımı
<b>f<sub>fe</sub></b>	CFRP şerit ve levhadaki efektif gerilme
<b>GF</b>	Birim deformasyon faktörü
<b>k<sub>v</sub></b>	Kesme dayanımı için yapıştırma katsayısı
<b>k<sub>1</sub></b>	Beton basınç dayanımına bağlı değişiklik katsayısı
<b>k<sub>2</sub></b>	CFRP yapıştırma düzenine bağlı değişiklik katsayısı
<b>L</b>	Kiriş açıklığı
<b>L<sub>e</sub></b>	CFRP aktif yapıştırma uzunluğu
<b>M<sub>hes</sub></b>	Hesaplanan moment kapasitesi
<b>M<sub>ölç</sub></b>	Deneysel moment kapasitesi
<b>n</b>	CFRP şerit ve levha katman sayısı
<b>S<sub>f</sub></b>	CFRP şerit eksenleri arası mesafe
<b>t<sub>f</sub></b>	CFRP şerit kalınlığı
<b>V</b>	Kiriş kesme kapasitesi
<b>V<sub>c</sub></b>	Beton tarafından taşınan kesme kuvveti
<b>V<sub>hes</sub></b>	Hesaplanan kesme kuvveti kapasitesi
<b>V<sub>f</sub></b>	CFRP elemanlar tarafından taşınan kesme kuvveti
<b>V<sub>i</sub></b>	Birim deformasyon ölçerlere uygulanan gerilme değeri
<b>V<sub>o</sub></b>	Birim deformasyon ölçerlerde okunan mili volt değeri
<b>V<sub>ölç</sub></b>	Deneysel kesme kuvveti kapasitesi

**Simgeler****Açıklama** **$W_f$** 

CFRP şerit genişliği

 **$\varepsilon$** 

Birim deformasyon değeri

 **$\varepsilon_{fe}$** 

CFRP elemanların efektif birim deformasyon değeri

 **$\varepsilon_{fu}$** 

CFRP elemanların dizayn kopma birim deformasyonu

 **$\alpha$** 

CFRP şeritlerin yatayla yaptığı açı

 **$\Phi$** 

Donatı çapı

**Kısaltmalar****Açıklama****ACI**

American Concrete Institute

**CFRP**

Carbon Fiber Reinforced Polymer

**FRP**

Fiber Reinforced Polymer

**LVDT**

Linear Variable Displacement Transducer

## 1.GİRİŞ

Betonarme yapı elemanları eğilme etkisinin yanısıra kesme kuvveti de taşımak durumundadırlar. Betonun çekme dayanımına oranla yüksek olan kesme dayanımından dolayı, betonarme elemanlarda kesme kırılmasına çok fazla rastlanmaz. Ancak kesme gerilmesi ve normal gerilmelerin meydana getirdiği asal çekme gerilmeleri betonun düşük çekme dayanımına sahip olması nedeniyle önemli sorunlar oluşturabilir. Sadece kesme gerilmesinin etkidiği basit kesme durumunda asal gerilmeler kesme gerilmesine eşit olmaktadır. Bu durumda kırılma betonun düşük çekme dayanımı nedeni ile meydana gelecektir. Kesme gerilmesinin etkidiği yüzey ile asal çekme gerilmeleri arasında 45° lik bir açı bulunacağı için, kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde meydana gelen eğik çatlakla oluşacaktır. Kesme gerilmesi ve normal gerilmelerin birlikte etkidiği durumlarda ise eğik çatlağın eğimi, asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlıdır [1]. Asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşan eğik çekme çatlakları çok tehlikelidir ve betonarme yapıyı oluşturan elemanların ani ve gevrek olarak kırılmasına neden olabilirler.

Eğik çekme kırılmasını eğilme davranışından farklı ve daha önemli kılan en önemli özellik ani ve gevrek olarak meydana gelmesidir. Kırılmadan önce belirgin çatlaklar meydana gelmemesinden dolayı tahmin etmek oldukça güçtür. Bu tür kırılmayı önleyebilmek için, kesme dayanımı yeteri kadar kullanılan kesme donatıları ile artırılarak betonarme elemanların eğilme kapasitelerine ulaşmaları sağlanmalıdır.

Betonarme yapı elemanlarında çeşitli sebeplerden dolayı kesme dayanımında sorunlar oluşmaktadır. Bunlar hesap ve yapım sırasında yapılan hatalar, kesme donatısının hatalı detaylandırılması, kötü işçilik, yapının kullanım amacında meydana gelen değişikliklerden ötürü daha büyük servis yüklerinin etkimesi ve kötü çevre şartları nedeniyle kesme donatısı çeliğinin alanının korozyona uğraması olarak sayılabilir.

Güçlendirme, hasar görmemiş bir yapı veya yapı elemanının, onarım ise hasar görmüş bir yapı veya yapı elemanının öngörülen bir güvenlik seviyesine çıkarılması

için yapılan işlemlerdir. Betonarme yapılarda; yapı kullanım amacının değişmesi nedeniyle daha büyük servis yüklerinin etkimesi, donatıların korozyona uğraması, tasarım ve yapım aşamasında yapılan hatalar, gelişen hesap teknikleri ve standartlar sonucunda değişen şartnamelere uyum zorunluluğu ve deprem sonucunda oluşan hasarların giderilmesi amacıyla güçlendirme ve/veya onarım yapılır. Kesme dayanımı yetersiz kirişleri güçlendirmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) uygulamaları, eleman dışından kelepçe uygulamaları, elemanın betonarme katmanlar ile mantolanması, kiriş açıklığını ilave mesnetlerle azaltmak ve çelik levhaların eleman dışından yapıştırılması olarak sayılabilir [2, 3].

Çeşitli kompozit malzemelerin eleman dışından yapıştırılarak güçlendirme yöntemi son yıllarda araştırma konuları içerisinde yer alan ve başarı kazanan bir tekniktir. Çelik levhaların eleman dışından yapıştırılması yönteminde, levhaların korozyona uğrayabilmesi bu tekniğin en büyük dezavantajıdır. Son yıllarda kullanım alanları gittikçe gelişen elyaf takviyeli plastik (FRP) levhalar bu sorunu ortadan kaldırmıştır. Yapılan çalışmalar elyaf takviyeli plastik levhaların, betonarme yapı elemanlarının dıştan güçlendirilmesinde oldukça başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. FRP levhaların korozyona karşı dayanıklı olmaları, yüksek çekme dayanımı ve dayanım/ağırlık oranı, düşük bakım masrafı, manyetik olmaması ve uygulanacak yüzeye kolayca uyum gösterebilmeleri gibi çok önemli avantajları bulunmaktadır [4-6]. Cam, karbon ve aramid takviyeli çeşitleri bulunan elyaf takviyeli plastik (FRP) levhaların yüksek ilk maliyeti bir dezavantaj olarak görülmesine rağmen bakım maliyetlerinin düşüklüğü uzun vadede bu güçlendirme tekniğini ekonomik hale getirmektedir.

Karbon ile takviye edilmiş elyafların örülmesi ile oluşturulan CFRP malzemesi kullanılarak betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirme tekniğinin giderek yaygınlaşmasıyla birlikte CFRP ile güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin dayanımını ve davranışını inceleyen çalışmalarda literatürde daha çok yer bulmaya başlamıştır [2]. Yapılan çalışmalarda CFRP levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarında önemli ölçüde bir artış

olduğu görülmüştür. Beton basınç dayanımı, eğilme ve kesme donatısının akma dayanımı, çekme donatısı oranı, kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı, CFRP levhaların yapıştırma alanı, doğrultusu ve uygulama şekli güçlendirme uygulanmış betonarme kirişin davranışını etkileyen hususlardır. Literatürde bulunan çalışmalarda kesme açıklığına yerleştirilen CFRP elemanların şekilleri, yapıştırma açısı, yerleşim düzeni ve CFRP katman sayısı incelenen değişkenlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde CFRP kullanılması ile gerçekleştirilen güçlendirme yöntemi ile ilgili kurallar ve kesme dayanımı zayıf kirişlerin dayanım ve rijitlik olarak iyi bir performans göstermesi için gerekli olan CFRP yerleşim düzeni ve şekli konusunda önemli sonuçlara ulaşılmıştır [7-10]. Ancak yapılan bu çalışmalarda kirişler monotonik yüklemeler altında test edilmiştir. Depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yüklemeler altında CFRP elemanların performansı konusunda henüz yeteri kadar çalışma yapılmamıştır. Monotonik yüklemeler altında yapılan çalışmalarda elde edilen en önemli sonuçlardan biri de CFRP şeritlerin uç bölgelerinde meydana gelen soyulma sonucunda, güçlendirme uygulanan kirişlerin istenilen süneklik değerlerine ulaşmadan, çekme donatılarının akma dayanımına ulaşmasından hemen önce veya sonra hiçbir süneklik göstermeden göçmeleridir. Bu göçme modunun önlenmesi amacıyla araştırmacılar CFRP şeritlerin uç bölgelerine yerleştirilmek üzere çeşitli düzenlerde ankraj detaylarının geliştirilmesini amaçlamışlardır [9, 11]. Fakat bu konu hakkındaki çalışmalar son derece sınırlı sayıdadır ve tersinir tekrarlanır yüklemeler altında etkili olabilecek bir ankraj detayı literatürde bulunmamaktadır.

### Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma kesme dayanımı yetersiz, düşük beton dayanımlı betonarme kirişlerin dıştan CFRP levha ve şeritler yapıştırılarak güçlendirmesini konu alan deney sonuçlarını sunmaktadır ve çalışmada elemanların tersinir tekrarlanır yükler altında dayanım ve davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Düzenlenen deney programında kesme donatısız biri güçlendirme uygulanmamış kontrol elemanı olmak üzere toplam 6 adet T kesitli betonarme kiriş elemanı modellenerek tasarlanmış ve laboratuvar ortamında üretildikten sonra tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada CFRP şeritlerin genişliği, kesme açıklığındaki yerleşim düzeni

ve CFRP şeritlerin uçlarına yerleştirilen ankrajlar incelenen değişkenlerdir. Kesme dayanımı yetersiz düşük beton dayanımlı kirişlerde sünek eğilme davranışı elde etmek amacıyla CFRP şeritler kesme açıklığına çeşitli genişlik ve düzende epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Deneysel sonuçları ACI-440 Komite Raporu tarafından önerilen analitik metotla karşılaştırılmıştır.

Deneysel elemanlarının hepsinin kesit geometrileri ve boyuna donatıları aynıdır. 1 nolu deneysel elemanına güçlendirme uygulanmamış ve kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer 5 deneysel elemanı ise kesme açıklıklarına yapıştırılan çeşitli düzendeki CFRP şerit ve levhalarla güçlendirilmiştir. Güçlendirme uygulanan deneysel elemanları kontrol elemanı ile karşılaştırılarak güçlendirme yönteminin performansı belirlenmiştir. Deneysel elemanlarının tümünde kesme donatısı kullanılmamıştır.

#### Literatür Araştırması

Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi amacıyla geliştirilen yöntemler karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) uygulamaları, elemanın betonarme katmanlar ile mantolanması, eleman dışından kelepçe uygulamaları ve çelik levhaların epoxy yardımıyla eleman dışından yapıştırılması olarak sayılabilir. Yetersiz kesme kapasiteli betonarme kirişlerin güçlendirilmesine ilişkin literatürde bulunan çalışmalarda genelde CFRP şeritler ve çelik plakalar olmak üzere iki çeşit malzemenin kullanıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda laboratuvar ortamında deneysel olarak, yapılan güçlendirme tekniğinin kesme dayanımına etkisi incelenmiş ve aynı zamanda analitik çalışmalar sonucunda bilgisayar modellemesi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde bulunan karbon elyaf kullanılarak yapılan güçlendirme çalışmalarından bazıları aşağıda kısaca sunulmuştur.

Li, Diagona ve Delmas (2001) tarafından yapılan çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler epoksi ile dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmada 5 adet güçlendirme uygulanmamış kontrol elemanı olmak üzere toplam 14 adet basit mesnetli betonarme kiriş kullanılmıştır. Kirişlerin ortalama basınç dayanımı 38 MPa'dır. Deneysel çalışmada boyuna donatı ve etriye miktarının

güçlendirme üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi için deney numuneleri beş ayrı grupta incelenmiştir. Yükleme giriş açıklığının 1/3 mesafesinden monotonik olarak etki ettirilmiştir. CFRP şeritlerle yapılan güçlendirme girişin sadece 1/3'lük kısmında ve üç ayrı yükseklikte uygulanmıştır. Deneyde boyuna donatı miktarı, etriye aralıkları ve CFRP şeritlerin uygulama miktarı değiştirilerek beş ayrı grupta deney elemanları üretilmiştir. Deney sonucunda CFRP şeritlerin elemanın kesme dayanımına yaptığı katkının çeşitli parametrelerden etkilendiği görülmüştür. CFRP şeritlerin yapıştırılma yüzeyi arttıkça, kesme dayanımına katkısı da artmıştır. Girişte kullanılan boyuna donatı ve etriye miktarının, CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısını etkilediği görülmüştür. Girişte kullanılan etriye miktarı azaltıldığında CFRP şeritlerin kesme kapasitesine katkısının arttığı gözlenmiştir. Deney sonuçları ile analitik sonuçlar karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür [7].

Khalifa ve Nanni (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kesme dayanımı yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme girişler değişik yerleşim düzenindeki CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneysel çalışma 12 adet tam ölçekli basit mesnetli girişten oluşmaktadır. Deney elemanları, kesme açıklığındaki etriye yerleşimine göre iki ana guruba ayrılmıştır. Bu iki ana gurupta kendi içinde kesme açıklığı / faydalı yükseklik oranına göre iki alt guruba ayrılmıştır. Her grup için bir deney elemanına güçlendirme uygulanmamış ve kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer sekiz elemana ise değişik yerleşim düzeninde CFRP şeritlerle güçlendirme uygulanmıştır. Deney sonuçlarında dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirilen girişlerin kesme kapasitesinde %40 ile %138 oranında bir artış sağlanmıştır. Kesme kapasitesindeki artışın kesme açıklığı / faydalı yükseklik oranından etkilendiği gözlenmiştir. Analitik çalışma ile elde edilen kesme dayanımının deneysel sonuçlarla kabul edilebilir düzeyde uyum gösterdiği görülmüştür [8].

Khalifa ve Nanni (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada T kesitli betonarme girişler epoksi ile dıştan yapıştırılan CFRP şeritler ile kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Deneysel çalışma 6 adet tam ölçekli, basit mesnetli T kesitli betonarme girişten oluşmaktadır. Deney numunelerinden birine güçlendirme

uygulanmamış ve kontrol elemanı olarak kullanılmış diğer beş kirişe ise değişik yerleşim düzeni ile CFRP şeritler uygulanarak güçlendirme yapılmıştır. Deneyde fiber doğrultusu kiriş eksenine paralel ve dik ( $0^\circ$  ve  $0^\circ/90^\circ$ ) olacak şekilde iki çeşit CFRP şerit kullanılmıştır. CFRP şeritler deney numunelerine U sargı ve sadece yan yüzeylerine yapıştırılması şeklinde kullanılmıştır. Deney sonuçları dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin kirişin kesme kapasitesini %35 ile %145 oranında arttırdığını göstermiştir. Ayrıca uçları kiriş tablasına ankre edilen U-sargı şeritlerin kesme kapasitesine katkısının, kiriş yan yüzeylerine uygulanan şeritlere göre daha fazla olduğunu göstermiştir [9].

Khalifa, Gustavo, Nanni ve Belarbi (1999) tarafından yapılan çalışmada kesme dayanımı düşük betonarme kirişler dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney programı 9 adet tam ölçekli, iki açıklıklı, dikdörtgen kesitli betonarme kirişten oluşmaktadır. Deney numuneleri donatı miktarı ve beton basınç dayanımlarına göre üç guruba ayrılmıştır. Her guruptan bir kiriş referans kirişi olarak seçilmiş ve güçlendirme uygulanmamıştır. Diğer altı kiriş değişik yerleşim düzenindeki CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney sonucunda dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin kiriş kesme kapasitesini pozitif ve negatif moment bölgelerinin ikisinde de önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Çalışma sonucunda kirişlerin kesme dayanımlarında %22 ila %135 oranında artış meydana gelmiştir. Ayrıca deney sonuçları CFRP şeritlerin kesme kapasitesine katkısının, kesme donatısı bulunmayan kirişlerde daha fazla olduğuna işaret etmektedir [10].

Triantafillou (1998) tarafından yapılan çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere CFRP şeritlerle güçlendirme uygulanmıştır. Deneysel çalışmada 11 adet basit mesnetli dikdörtgen kesitli kiriş kullanılmıştır. Deneyde iki elemana güçlendirme uygulanmamış ve bu kirişler kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer dokuz eleman değişik genişlik ve açıda yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney sonucunda CFRP şeritlerin betonarme kirişlerin kesme dayanımını arttırmada çok etkili olduğu görülmüştür. Kesme dayanımında kontrol kirişlerine göre %45 ile %95 arasında değişen oranlarda artış sağlanmıştır [4].

Raghu, Myers ve Nanni (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada epoksi ile dıştan yapıştırılan CFRP levhalarla güçlendirilen T kesitli betonarme kirişlerin göçme modları ve kesme dayanımları araştırılmıştır. Deney programı 9 adet T-kirişten oluşmaktadır. Deney elemanlarından iki tanesi kontrol elemanı olarak seçilmiştir. Diğer yedi eleman ise değişik düzendeki CFRP levhalar ve uygulanan ankrajlar ile güçlendirilmiştir. İki elemana fiber doğrultusu kiriş eksenine dik olacak şekilde CFRP levhalar U şeklinde yapıştırılmıştır. Geriye kalan deney elemanlarından iki tanesi de aynı şekilde güçlendirilmiş ilave olarak CFRP levhaların uçlarına ankraj uygulaması yapılmıştır. Diğer üç kirişe ise ilave bir katman daha CFRP levha yapıştırılmış ve bu kirişlerden ikisine ankraj uygulanmıştır. Seçilen bu güçlendirme tekniği ile CFRP katman sayısı ile uygulanan ankraj sisteminin kesme dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Deney sonuçlarından dıştan yapıştırılan CFRP levhaların kirişin kesme kapasitesini %11 ile %34 arasında arttırdığı görülmüştür. Tek katman CFRP levha ile iki katman CFRP levha yapıştırılan kirişler karşılaştırıldığında yapıştırılan ikinci katmanın kesme kapasitesinde önemli sayılabilecek bir artışa neden olmadığı görülmüştür. Ayrıca CFRP levhaların uç kısmına uygulanan ankrajların kesme dayanımında önemli bir katkı sağladığı görülmüştür [11].

Taljsten ve Elfgren (2000) tarafından yapılan çalışmada, hazırlanan beton kirişlerin yan yüzeylerine değişik düzende CFRP levha ve şeritler yapıştırılmıştır. Deneysel çalışmanın amacı kirişlerin güçlendirmeden önceki ve sonraki kesme kapasitelerinin ve CFRP levha ve şeritlerin beton yüzeyine uygulanması sırasında kullanılan 3 değişik tekniğin araştırılmasıdır. Deney programı 8 adet dikdörtgen kesitli kirişten oluşmaktadır. Çalışmada 3 kiriş kontrol kirişi olarak kullanılmıştır. Kiriş orta noktasına ve mesnetlerine yerleştirilen 3 adet LVDT ile bu noktalardan deplasman ölçüleri alınmıştır. Güçlendirme uygulanan kirişlerde; fiber lifteki çekme kırılması, betonda meydana gelen basınç kırılması ve CFRP ile beton arasında oluşan bağ kırılması olmak üzere 3 tip kırılma gözlenmiştir. Deney sonucunda dıştan yapıştırılan CFRP levha ve şeritler kirişlerin kesme kapasitesini önemli oranda arttırmıştır.

Kontrol kirişleri ile kıyaslandığında dayanımda maksimum %300'lük bir artış meydana gelmiştir [12].

Taljsten (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada CFRP şeritler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının belirlenmesine yönelik bir analitik çalışma yapılmış ve bu çalışmadan elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Analitik çalışmada CFRP şeritlerin kesme dayanımını hesaplamak için bir formül elde edildikten sonra kirişin nominal kesme dayanımı hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada 7 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş kullanılmıştır. Bu kirişlerden 1 tanesi kontrol kirişi olarak kullanılmış diğer kirişler ise CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Bütün kirişlerde kesme açıklığı boyunca etriye donatısı kullanılmamıştır. Analitik metot ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre betonarme kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için CFRP şeritlerin mümkün olabildiği kadar kesme çatlağına dik olacak şekilde yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir [13].

Norris, Saadatmanesh ve Ehsani (1997) tarafından yapılan deneysel çalışmada 19 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üretilmiştir. Kirişlerden altısında diğer üretilen elemanlara göre daha az kesme donatısı kullanılmıştır. Bu kirişlerden 1 tanesine güçlendirme uygulanmamış ve kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer 5 kiriş ise  $\pm 45^\circ$  ve  $0^\circ/90^\circ$  düzendeki CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Geri kalan 13 elemanda ise daha fazla kesme donatısı kullanılmıştır. Bu elemanlardan 12 adeti  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$  lik CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Yüklemeler kiriş açıklığının  $L/4$  ve  $3L/4$  mesafesinden yapılmıştır. Deney sonucunda dıştan yapııştırılan CFRP şeritler kirişlerin dayanım ve rijitliğini arttırmıştır. Dayanımdaki artışın ve göçme modunun CFRP şeritlerin yerleşim düzeninden doğrudan etkilendiği gözlenmiştir [3].

Sheikh, De Rose ve Mardukhi (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada hasar görmüş yapı elemanlarının FRP elemanlar ile güçlendirme tekniklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla çok katlı bir yapının hasar görmüş döşeme ve kiriş

elemanları laboratuvar ortamında tam ölçekli olarak modellenmiş ve üretilmiştir. Güçlendirme işleminin gerçek durumla aynı şartlarda gerçekleştirilmesi amacı ile deney elemanları yüklemeye tabi tutularak taşıma gücüne ulaşmaları ve hasar görmeleri sağlanmıştır. Deney programında 3 adet betonarme döşeme ve 2 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. Birer deney elemanı kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer elemanlar CFRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme uygulanmayan ilk elemandan alınan sonuçlar değerlendirilerek diğer elemanlardaki CFRP yerleşimi belirlenmiştir. Deney sonuçları CFRP elemanlar ile yapılan güçlendirmenin eğilmede de kesmede olduğu kadar etkili olduğunu göstermiştir. Kesme göçmesinin engellenmesi ve davranışa eğilmenin hakim olması isteniyorsa CFRP elemanların belirli sınırlarda kullanılması gerektiği belirtilmiştir [5].

Gendron, Picard ve Guérin (1999) tarafından yapılan çalışmada fiber kompozitler ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının belirlenmesine yönelik analitik bir metot sunulmuş ve elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için bu metot test edilen bir T-kiriş üzerinde denenmiştir. Çalışmada ilk önce kirişin nominal kesme dayanımı hesaplanmış daha sonra ise kesme dayanımını arttırmak için kullanılan fiber kompozit şeritlerin tasarımı yapılmıştır. Şeritler kirişin yan yüzlerine kiriş yatay eksenine ile açı yapacak şekilde yapıştırıldıktan sonra kiriş test edilmiştir. Çalışma sonucunda, geliştirilen analitik metot test edilen T-kiriş üzerinde denenmiştir [14].

Deniaud ve Cheng (2001) betonarme kirişlerde kesme kuvvetinin taşınmasında beton, kesme donatısı ve dıştan yapıştırılan FRP kompozitler arasındaki etkileşimi deneysel olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Bu amaca yönelik olarak üretilen 8 adet T-kiriş test edilmiştir. T-kirişler; cam lifli polimerler (GFRP) ve karbon lifli polimerler (CFRP) ile güçlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımlarında güçlendirme uygulanmamış kirişlere göre %77,4 ile %117,3 arasında değişen oranlarda bir artışın olduğu belirlenmiştir. Kesme kapasitesindeki artış oranının sadece kullanılan FRP kompozit tipine bağlı olmadığı, kesme donatısı miktarı ile de yakından ilgili

olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar deney elemanları için analitik bir model geliştirmişlerdir. Deney sonuçları ile analitik çalışmadan elde edilen değerlerin uyumlu olduğu gözlenmiştir [15].

Mitsui ve diğerleri (1998), dıştan epoksi ile yapıştırılan CFRP elemanlarla güçlendirilen betonarme kirişlerin, simetrik olmayan yükleme altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma kapsamında 6 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kesmeye karşı CFRP elemanlar ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımları, kontrol elemanına göre 1,3 ile 1,8 kat arasında değişen oranlarda artış göstermiştir. CFRP şeritlerin en uygun yerleşim düzenine göre, kesme dayanımı üzerindeki etkisinin geliştirilebilmesi amacıyla klasik kafes kirişi modeli kullanılarak basit bir analiz gerçekleştirilmiştir [16].

Diagana ve diğerleri (2003), kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin, dıştan yapıştırılan CFRP şeritler ile güçlendirilmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma kapsamında on adet basit mesnetli, dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üretilmiş ve üç noktadan monotonik olarak uygulanan yük altında test edilmiştir. Deney elemanlarının eğilme kapasiteleri kesme kapasitelerine göre yüksek tasarlanmıştır. Çalışmada iki eleman kontrol elemanı olarak kullanılmış diğer sekiz deney elemanı ise CFRP şeritlerin, 'U' şeklinde ve kirişi tam olarak saracak biçimde yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Karbon fiber kumaşlar, güçlendirme uygulanan kirişler üzerine 45° ve 90° lik şeritler halinde değişik aralıklarla yapıştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre dıştan yapıştırılan CFRP şeritler ile yapılan güçlendirme işleminin betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini önemli oranda arttırdığı görülmüştür. Kesme kapasitesindeki artışın CFRP şeritlerin yerleşim düzenine göre değiştiği belirtilmiştir. Betonarme kirişi tamamen saran dikey CFRP şeritlerin, 'U' şeklinde sarılan şeritlere göre, kesme dayanımına iki kat daha fazla katkı yaptığı görülmüştür. Ayrıca 45° lik CFRP şeritlerin, kirişe tam olarak ve 'U' şeklinde sarılması ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımlarının yaklaşık olarak aynı seviyede olduğu görülmüştür [17].

Kachlakev ve diğerkleri (2000), artan trafik yüklerine bağı olarak köprü kirişlerinin güçlendirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlar ve gerçek bir köprü göz önüne alınarak 4 adet model kiriş üretmişlerdir. Kirişlerden 1 adeti kontrol elemanı olarak kullanılmış diğerk 3 deney elemanı ise karbon lifli polimerler (CFRP) ve cam lifli polimerler ile (GFRP) güçlendirilmiştir. Tek doğrultulu CFRP şeritler eğilme kapasitesini arttırmaya yönelik, tek doğrultulu GFRP şeritler ise kesme dayanımını arttırmaya yönelik olarak kirişlerin belirlenen bölgelerine epoksi yardımıyla uygulanmıştır. Kompozitler kullanılarak güçlendirilen kirişlerin davranışının anlaşılabilmesi için gerekli ölçüm düzeneğı kurulmuş, gerilme değerlerinin belirlenebilmesi için 18 adet gerilme ölçer kullanılmıştır. FRP elemanlar ile güçlendirilen model kirişler ile kontrol kirişinin testinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, güçlendirme uygulanan kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde %150 oranında bir artışın olduğu görülmüştür. Artış miktarının kompozit elemanların yerleşim düzeni ve miktarıyla değıştiğı belirtilmiştir [18].

Anıl ve Keleş (2005), tarafından yapılan çalışmada CFRP şeritler ile güçlendirilmiş, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin tersinir tekrarlanır yükler altında davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 6 adet T kesitli betonarme kiriş üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada CFRP şeritlerin genişliğı, kesme açıklığı boyunca yerleşim düzeni ve CFRP şeritlerin uç bölgelerine uygulanan ankrajlar ana değışkenler olarak seçilmiştir. Deney elemanlarından 1 tanesi kesme dayanımı eğilme dayanımından daha yüksek dizayn edilmiş ve kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Kesme dayanımı yetersiz olarak dizayn edilen diğerk 5 deney elemanından birine güçlendirme uygulanmamış geri kalan 4 deney elemanına ise çeşitli düzende dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirme uygulanmıştır. Tüm deney elemanlarının ortalama basınç dayanımı 30 MPa'ın üzerindedir. CFRP şeritler kesme dayanımını arttırmaya yönelik, kirişlerin kesme açıklığı boyunca epoksi ile çeşitli konfigürasyonlarda uygulanmıştır. Deney sonuçları CFRP şeritler ile yapılan güçlendirme tekniğı sonucunda tüm deney elemanlarının dayanım ve rijitliğinde önemli bir artışın olduğunu göstermiştir. Deney elemanlarının davranışını ve

sünekliğini etkileyen en önemli değişkenin CFRP şeritlerin genişliğinin ve yerleşim düzeninin olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçları ile ACI-440 komite raporundaki analitik yaklaşım karşılaştırıldığında analitik çalışmadan elde edilen moment kapasitelerinin deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ortalama %17, kesme dayanımının ise %20 mertebelerinde az olduğu görülmüştür. Deneysel ve analitik değerler arasındaki farkın deneysel çalışmada uygulanan ankraj detayından kaynaklandığını düşünülmektedir ve analitik yaklaşımın, kesme kapasitesine ankraj detayının da etkisini içerecek şekilde geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [2, 19].

## 2. DENEY ELEMANLARI VE DENEY TEKNİĞİ

### 2.1. Genel

Betonarme kirişler sünek eğilme kırılması ve eğik çekme (kesme) kırılması olmak üzere genelde iki şekilde kırılırlar. Eğik çekme kırılması ani ve gevrek bir biçimde oluşmasından ve kırılmadan önce tahmin edilmesinin zorluğundan dolayı büyük bir önem taşımaktadır. Betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerine göre tasarlanmalarının en önemli nedeni budur. Betonarme elemanlarda mutlaka yeteri kadar kesme donatısı kullanılarak, önemli sorunlar meydana getiren eğik çekme gerilmelerine karşı önlem alınmalıdır. Kullanılan kesme donatısının temel işlevi, elemanın kesmeden dolayı kırılmasını önleyerek, eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Yeteri kadar kesme donatısı kullanıldığında eğik çatlakla kesişen kesme donatıları gerilme almaya başlayacak ve çatlağın daha fazla gelişmesine engel olacaktır. Kesme donatısı kullanılmaması veya çok az kullanılması durumunda oluşan eğik çatlak hiçbir kesme donatısı ile kesişmeyeceğinden, çatlak tehlikeli bir şekilde ilerleyecektir.

Kesme etkisindeki betonarme elemanların davranışını etkileyen en önemli özelliklerden biri de kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır ( $a/d$ ). Kesme açıklığı, kesme kuvvetinin sabit olduğu mesnetle yük arasındaki uzaklıktır.  $a/d$  oranına göre aynı özellikteki kirişlerin dayanım ve davranışında farklılıklar oluşabilmektedir.  $a/d$  oranının çok büyük olduğu durumlarda ( $a/d > 7$ ) kiriş eğilmedeki taşıma kapasitesine ulaşabilecektir. Kesme açıklığı büyük olduğu için oluşan kesme kuvveti küçük düzeylerde kalırken büyük eğilme momenti oluşacaktır. Meydana gelen eğilme çatlaklarının büyümesiyle kesit eğilmedeki taşıma kapasitesine ulaşacaktır. Kesme kuvvetinden dolayı oluşan eğik çekme gerilmeleri önemli değerlere ulaşmadığı için kirişte eğik çatlaklar oluşmayacaktır.  $a/d$  oranının yaklaşık olarak 3 ile 7 arasında ( $3 < a/d < 7$ ) olduğu durumlarda, momentin maksimum olduğu bölgelerde kiriş eksenine dik eğilme çatlakları oluşacak, yükün artmasıyla birlikte eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlarken eğik çekme gerilmeleri kiriş gövdesinde önemli değerlere ulaşarak çatlama sebep olacaktır. Göçme,

eğilme çatlaklarının bir veya birkaçının ilerleyerek eğik çatlakla birleşmesiyle meydana gelecektir. Bu göçme oldukça ani ve gevrek bir kırılmadır ve gerçek eğik çekme kırılması olarak adlandırılır. Kesme açıklığının daha da küçülerek  $a/d$  oranının 1,5 ile 3 arasında ( $1,5 < a/d < 3$ ) olması durumunda eğilme çatlakları yüke doğru uzayıp eğik çatlakları oluşturacaktır. Eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç bölgelerinin dikleşmesi ile kemerlenme etkisi ortaya çıkacaktır. Yükün uygulandığı noktada oluşan yerel basınç gerilmeleri eğik çatlakların daha fazla gelişmesine engel olur. Kırılma yükün uygulandığı bölgedeki betonun ezilmesi ile oluşur. Bu durumda kiriş taşıma gücü eğilme kapasitesine yaklaşır. Ezilme nedeniyle göçme  $3 < a/d < 7$  durumundaki gibi ani ve gevrek olmaz. Mesnet ile yük arasındaki açıklığın çok küçük olduğu ( $a/d < 1$ ) durumlarda kirişte kemerlenme etkisi önem kazanır. Eğik çatlakların oluşmasından sonra kirişte eğilme önemini kaybeder ve tam bir gergili kemer davranışı gözlenir. Kesme kuvveti yük ile mesnet arasında oluşan oldukça dik beton basınç çubuklarıyla taşınır. Kırılma gövdedeki betonun basınç gerilmeleri nedeniyle ezilmesi veya basıncın aktarılmasında oluşan donatıdaki yüksek gerilmeler nedeniyle kenetlenmenin ortadan kalkmasıyla oluşur [1, 20].

Deneysel çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle deney elemanları yukarıda özetlenen temel bilgiler ışığında eğik çekme kırılması yaşanacak şekilde modellenmiştir. Daha sonra bu şekilde modellenen deney elemanları CFRP elemanlar ile güçlendirilerek sünek eğilme kırılması şeklinde göçmenin yaşanacağı bir kapasite düzeyine getirilmeye çalışılmıştır.

## 2.2. Deney Elemanları

Deney programında toplam 6 adet T kesitli betonarme kiriş elemanı tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Deney elemanlarının kesit geometrileri ve donatı miktarları özdeştir. Betonarme yapılarda kiriş ve döşemenin birlikte çalıştığı ve tasarımın bu duruma göre yapıldığı göz önünde bulundurularak deney elemanlarının hepsi tablalı kiriş olarak modellenmiştir. Deney elemanlarında boyuna

donatı olarak, alt ve üst kısımda üçer adet  $\Phi 20$  mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Kontrol deney elemanı ve güçlendirme uygulanmış deney elemanları yetersiz kesme dayanımına sahip olmaları için kesme donatısız modellenmişlerdir. Gerçek eğik çekme kırılmasının davranışa hakim olması için kesme açıklığı, faydalı yükseklik oranı ( $a/d$ ) 5 olacak şekilde tek noktadan tersinir tekrarlanır yükleme uygulanmıştır. Deney elemanlarına ait özellikler Çizelge 2.1’de donatı detayları ise Şekil 2.1’de sunulmuştur.

Kiriş-1 deney elemanı güçlendirme uygulanmamış kontrol elemanıdır. Güçlendirme uygulanan deney elemanları Kiriş-1 deney elemanı ile karşılaştırılarak güçlendirme yönteminin performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Eğik çekme kırılmasının davranışa hakim olması için etriye donatısı kullanılmamış ve kesme dayanımı yetersiz modellenmiştir (Resim 2.1).

Kiriş-2 deney elemanı kiriş gövdesi yan ve alt yüzeylerine 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin “U” şeklinde 80 mm aralıklarla yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. 50 mm genişliğindeki her bir şeridin üst ucuna bir adet ankraj yerleştirilerek CFRP şeritler betonarme kirişe sabitlenmiştir. Kiriş bir yüzünde toplam 22 adet ankraj uygulanmıştır (Resim 2.2).

Kiriş-3 deney elemanı 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 130 mm aralıklarla kesme açıklığı boyunca kiriş gövdesi yan ve alt yüzeylerine “U” şeklinde yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. CFRP şeritlerin üst ucuna 2 adet ankraj yan yana gelecek şekilde uygulanarak şeritler betonarme kirişe sabitlenmiştir. Kiriş bir yüzünde toplam 26 adet ankraj uygulanmıştır (Resim 2.3).

Kiriş-4 deney elemanı 2 ve 3 numaralı deney elemanlarından farklı olarak kiriş kesme açıklığı boyunca, kiriş gövdesinin iki yan yüzeyine yapıştırılan CFRP levhalar ile güçlendirilmiştir. Bu deney elemanında CFRP levhanın alt ve üst uçlarına şaşırtmalı olarak 16’ şar adet ankraj yerleştirilmiştir (Resim 2.4).

Kiriş-5 deney elemanına kiriş gövdesi alt ve yan yüzeylerine “U” şeklinde yapıştırılan CFRP levha ile güçlendirme uygulanmıştır. Kiriş-5 deney elemanına kesme açıklığı boyunca kiriş gövdesi üst kenarına 16 adet ankraj uygulanmıştır (Resim 2.5).

Kiriş-6 deney elemanında, 100 mm genişliğinde 130 mm aralıklarla kiriş kesme açıklığına “U” şeklinde yerleştirilen CFRP şeritlerin düzenlemesi Kiriş-3 deney elemanı ile özdeştir. Kiriş-3 deney elemanında CFRP şeritlerin üst uçlarına yerleştirilen ankrajlar, Kiriş-6 deney elemanında uygulanmamıştır. Kiriş-6 ve Kiriş-3 deney elemanlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak geliştirilen ankraj detayının performansının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Deney elemanlarının tümünde etriye donatısı kullanılmamıştır ve ankraj detayları özdeştir.

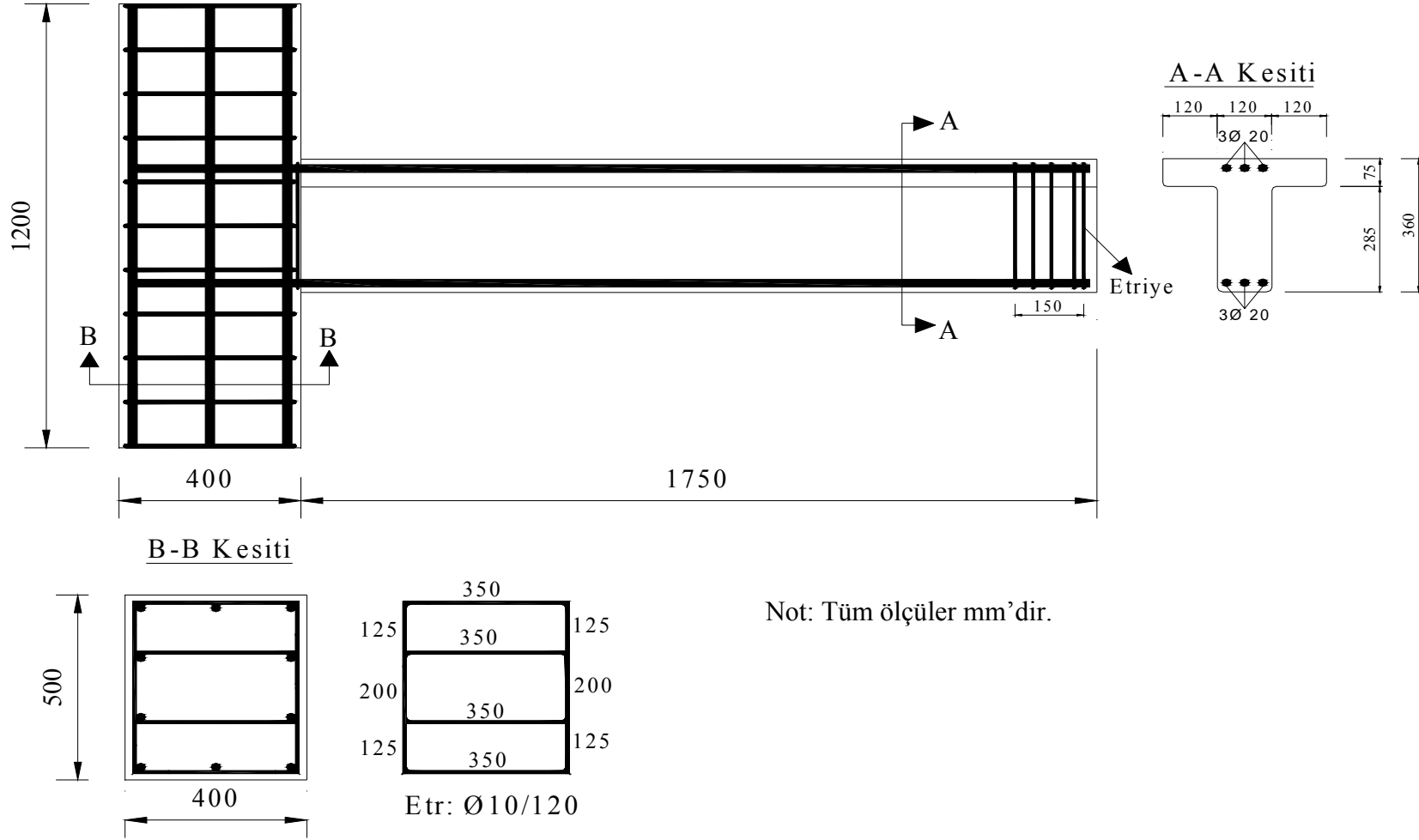
Şekil 2.2 - 2.6’ da deney elemanlarına ait CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri

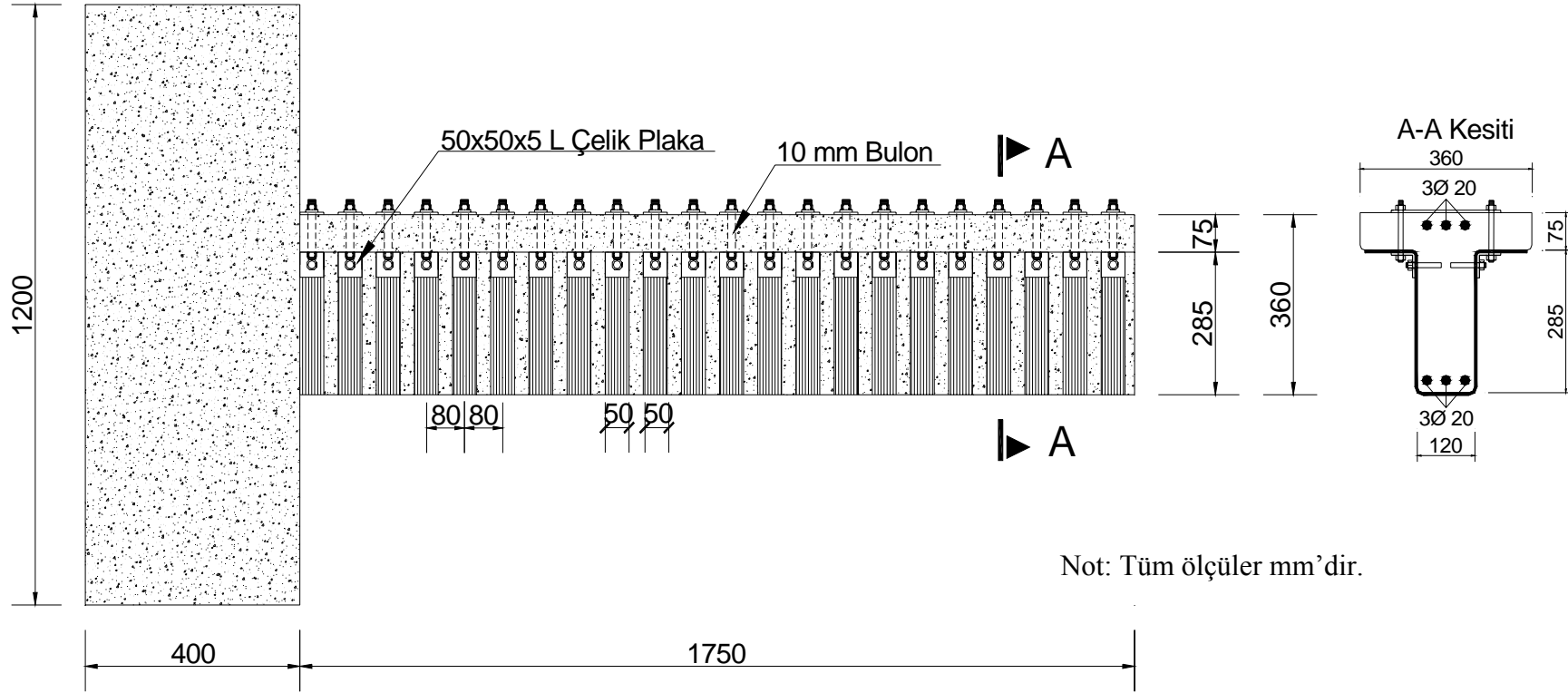
Deney Elemanı	L (mm)	a (mm)	d (mm)	a/d	f <sub>c</sub> (MPa)	Kesme Donatısı	CFRP Eleman Özellikleri				
							Genişlik W <sub>f</sub> (mm)	Yapıştırma Açısı*	Aralık** S <sub>f</sub> (mm)	Ankraj	Yerleşim Düzeni
Kiriş-1 (Kontrol Elemanı)	1750	1675	335	5,0	15,0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Kiriş-2 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5,0	14,0	-----	50	90	80	Var	U Sargı
Kiriş-3 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5,0	14,5	-----	100	90	130	Var	U Sargı
Kiriş-4 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5,0	14,8	-----	1750	90	-----	Var	Yan Yüzeyler
Kiriş-5 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5,0	14,2	-----	1750	90	-----	Var	U Sargı
Kiriş-6 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5,0	14,7	-----	100	90	130	Yok	U Sargı

\*CFRP liflerinin kiriş eksenine ile yaptığı açı (derece)

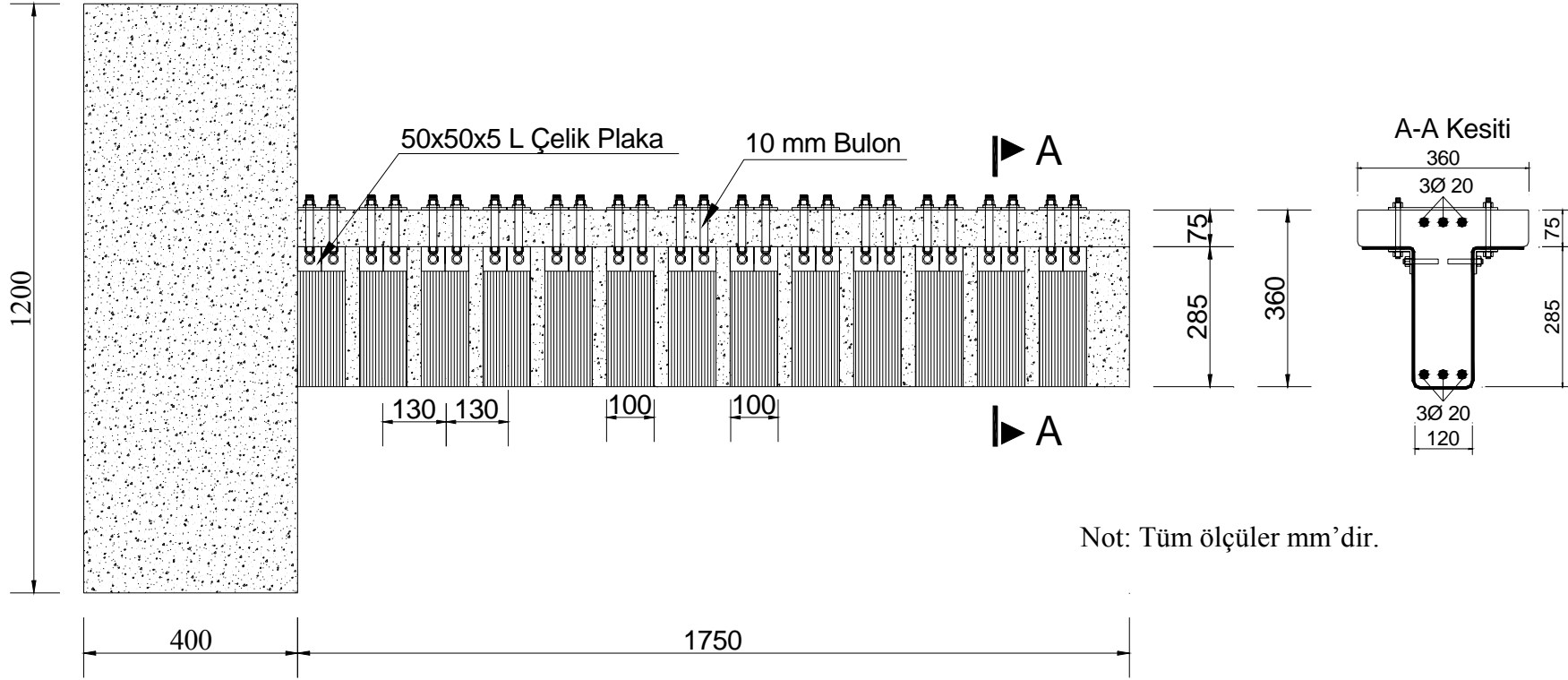
\*\*CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki aralık



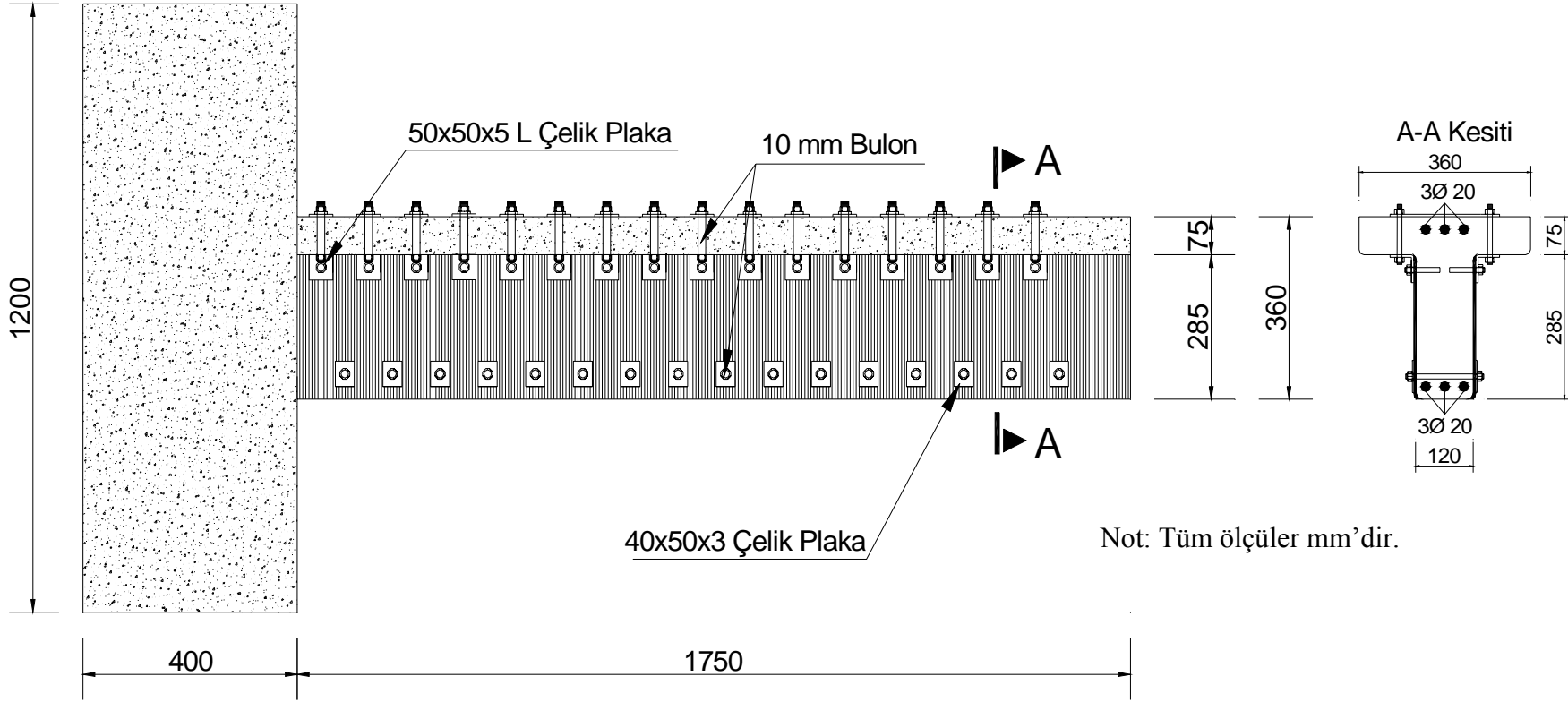
Şekil 2.1. Deney elemanları donatı detayı



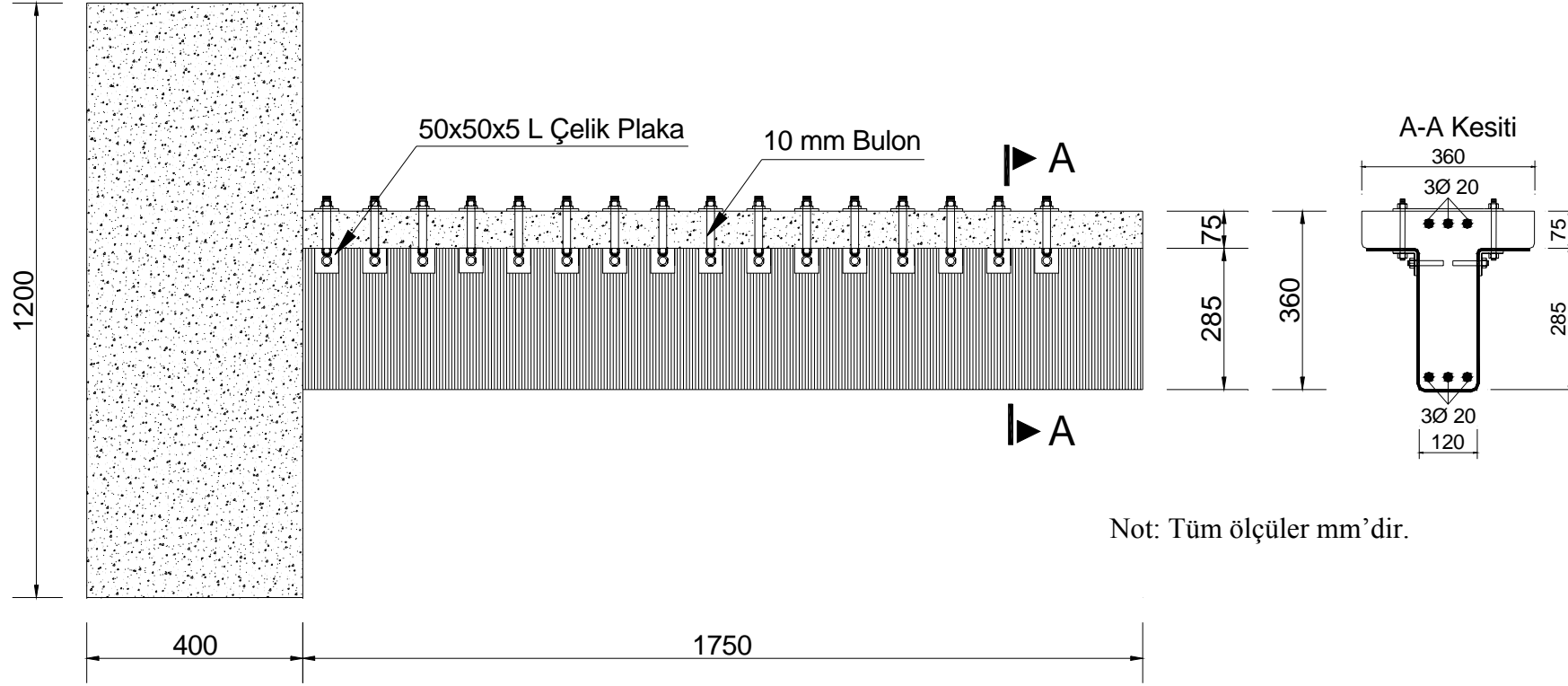
Şekil 2.2. Kiriş-2 ( $W_f = 50$ ,  $S_f = 80$ ) deney elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi



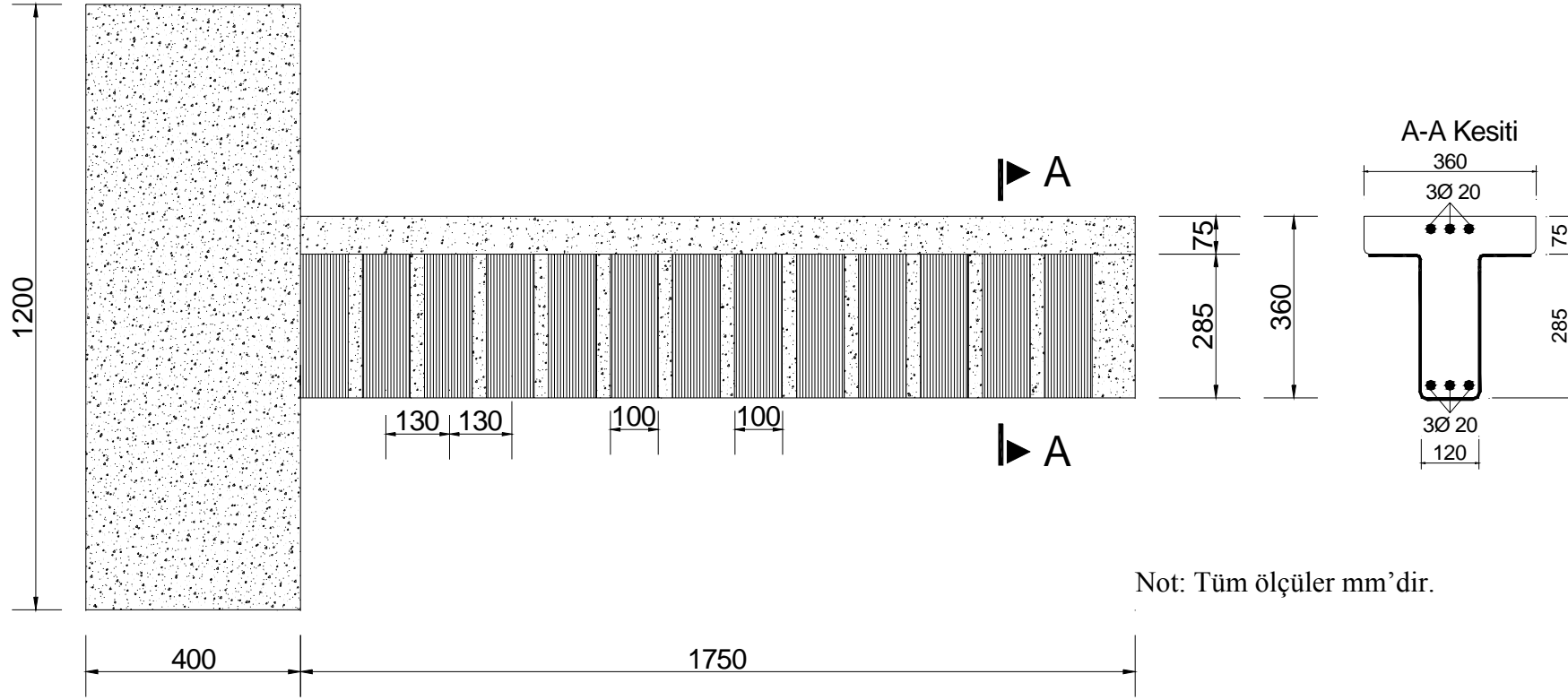
Şekil 2.3. Kiriş-3 ( $W_f = 100$ ,  $S_f = 130$ ) deney elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi



Şekil 2.4. Kiriş-4 deney elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi



Şekil 2.5. Kiriş-5 deney elemanı için CFRP yapıştırma düzeni ve ankraj yerleşimi



Şekil 2.6. Kiriş-6 ( $W_f = 100$ ,  $S_f = 130$ ) deney elemanı için CFRP yapıştırma düzeni



Resim 2.1. Kiriş-1 Kontrol Elemanı [21]



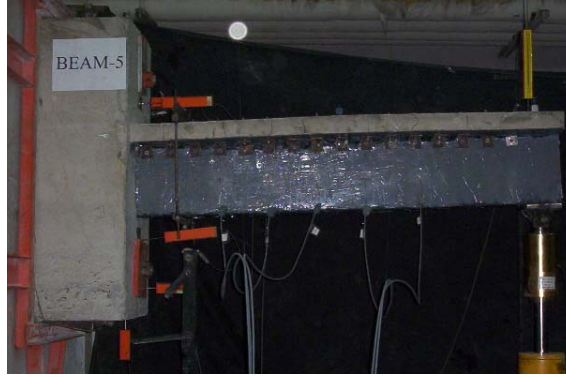
Resim 2.2. Kiriş-2  $S_f = 80$ ,  $W_f = 50$  [21]



Resim 2.3. Kiriş-3  $S_f = 130$ ,  $W_f = 100$  [21]



Resim 2.4. Kiriş-4  $W_f = 1750$  [21]



Resim 2.5. Kiriş-5  $W_f = 1750$  [21]



Resim 2.6. Kiriş-6  $S_f = 130$ ,  $W_f = 100$  [21]

### 2.3. Malzemeler

CFRP elemanlar ile gerçekleştirilen güçlendirme işleminin performansı, kullanılan beton ve donatının mekanik özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Deney sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirileceği ve deneysel çalışmada incelenen değişkenlerin sağlıklı bir biçimde yorumlanabilmesi için tüm deney elemanlarının aynı mekanik özelliklere sahip beton ve donatıdan üretilmesine büyük bir önem verilmiştir. Bu amaçla kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenebilmesi için laboratuvar ortamında çeşitli testler yapılmıştır. Deney elemanlarının imalatı sırasında hazırlanan beton karışımından numuneler alınıp test edilerek beton basınç dayanımları belirlenmiş ve tüm elemanlarda aynı üretimden, bir seferde temin edilen inşaat çeliği kullanılmıştır.

#### Beton

CFRP elemanlar ile güçlendirilmiş kirişler üzerinde yapılan çalışmalar, güçlendirme yönteminden istenilen performansın elde edilmesini engelleyen en önemli nedenlerden birinin, düşük beton dayanımı sebebiyle CFRP elemanların beton yüzeyinden soyulmasından meydana gelen göçme şekli olduğunu göstermiştir. Beton kapasitesi deney elemanlarının dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketimi gibi davranış açısından önemli olan parametreleri önemli derecede etkilemekte ve değiştirmektedir. Bu nedenden ötürü deneysel çalışmada beton basınç dayanımı düşük tutularak güçlendirme yönteminin ve değişkenlerin en kötü durumda sergileyeceği davranışın araştırılması amaçlanmıştır.

Beton karışımında agrega olarak 0-7 mm ve 7-15 mm dane çaplarında iki tip dere malzemesi kullanılmıştır. Beton üretiminde portland çimentosu kullanılmıştır. Deney elemanlarından beton dökümü sırasında alınan 3'er adet silindir numunenin (150 mm x 300 mm) beton basınç dayanımı testlerinden ortalama beton basınç dayanımları belirlenmiştir. Çizelge 2.2'den görüldüğü üzere deney elemanlarının beton basınç dayanımları 15 MPa'dan küçüktür.

Çizelge 2.2. Ortalama beton basınç dayanımları

Deney Elemanı No	1	2	3	4	5	6
Beton Basınç Dayanımı $f_c$ (Mpa)	15,0	14,0	14,5	14,8	14,2	14,7

Deney elemanlarının hazırlanmasında kullanılan 1 m<sup>3</sup> (2430 kg) beton için karışım oranları Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Beton karışım oranları

Malzeme Türü	Portland Çimentosu	Su	Kum (0-7 mm)	Çakıl (7-15 mm)
Ağırlık (kg)	300	180	1229	721

### Donatı

Deneysel çalışmada kullanılan aynı tür donatıların, bütün deney elemanlarında aynı mekanik özelliklere sahip olması için tüm donatılar bir seferde ve aynı üretimden alınmıştır. Deney elemanlarında  $\Phi 20$  ve  $\Phi 10$  mm çapında nervürlü BÇ-III demiri kullanılmıştır. İki donatı türü içinde 3’er numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Bu numunelerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri EK-1 de verilmiştir. Çizelge 2.4’de deney elemanlarına ait donatıların ortalama akma ve kopma dayanımları ile birlikte elastisite modülleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Donatı özellikleri

Donatı Çapı (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü x10 <sup>3</sup> (MPa)
10	S420	304,2	443,1	198
20	S420	520,0	863,8	205

#### CFRP şerit ve levhalar

Deney elemanlarının karbon ile takviye edilmiş elyaflarla güçlendirilmesinde Sika Yapı Kimyasalları firmasına ait SikaWrap 230C ürünü kullanılmıştır. Betonarme elemanların yanında yığma ve ahşap yapı elemanları içinde dışardan uygulanabilen, tek doğrultulu, örülü, karbon lifli, kuru uygulama için güçlendirme malzemesidir. Dokumanın dengeli olması için atkılarla donatılmıştır.

Betonarme, yığma ve ahşap yapılarda eğilme ve kayma dayanımını arttırmak için kullanılan SikaWrap 230C malzemesinin yüzey geometrisi esnekliği ile her türlü yapı elemanında rahatlıkla kullanılabilmesi (kirişler, kolonlar, duvarlar, kazıklar, bacalar), ihtiyaca göre lif doğrultusunun ayarlanabilmesi, kimyasal etkilere ve çevre şartlarına karşı yüksek dayanımı (korozyon riski bulunmamaktadır) gibi önemli avantajları bulunmaktadır. SikaWrap 230C malzemesine ait özellikler Çizelge 2.5'te verilmiştir.

#### Epoksi

CFRP elemanlar ile gerçekleştirilen güçlendirme tekniğinde, CFRP elemanlar beton yüzeyine dıştan yapıştırılarak uygulandıkları için kullanılan yapıştırıcının büyük önemi vardır. Doğru yapıştırıcı malzemesinin kullanılmaması ya da standartlara uygun bir şekilde uygulanmaması durumunda CFRP elemanlar beton yüzeyinden kolayca ayrılacaktır.

Çizelge 2.5. SikaWrap 230C Karbon Lifli Dokuma malzeme özellikleri

Lif Tipi	Yüksek Mukavemetli Karbon Lifleri
Lif Doğrultusu	0°C (tek yönlü). Dokuma, ipliklerin gevşemesini önleyen özel örgü lifleriyle donatılmıştır.
Lif Yapısı	%99 Ana doğrultuda, %1 destekleyici doğrultuda
Dokuma Ağırlığı	220 g/m <sup>2</sup> ± %10
Dokuma Kalınlığı	0,12 mm (karbon liflerin toplam alanı baz alınarak)
Liflerin Çekme Dayanımı	4100 N/mm <sup>2</sup> (nominal)
Liflerin Elastisite Modülü	231000 N/mm <sup>2</sup> (nominal)
Kopmadaki Uzama	%1,7 (nominal)
Dokuma Uzunluğu	≥50mm
Dokuma Genişliği	300/600 mm

Deneysel çalışmada yapıştırıcı olarak Sikadur 330 epoksi harcı kullanılmıştır (Çizelge 2.6). Çeşitli kullanım alanlarına sahip, beton, metal, ağaç ve yapı malzemeleri için çok iyi bir yapıştırıcı olan Sikadur 330 iki bileşenli, yüksek dayanımlı, solventsiz yapıştırma harcıdır.

Uygulaması son derece kolay olan Sikadur 330 epoksi harcı neme karşı dayanıklıdır, yüksek mukavemet değerlerine sahiptir, çevresel etkilere karşı dayanıklıdır, devamlı ve tekrarlanan yükler altında yüksek sünme dayanımı gösteren epoksi beton yüzey ile CFRP elemanlar arasında kuvvetli bir bağ oluşturur.

### Ankraj çeliği

CFRP şeritlerin uç bölgelerinde meydana gelen soyulma sonucu kırıların istenilen süneklik değerlerine ulaşmadan göçmesinin önlenmesi amacıyla, kırılerde CFRP düzenlemesine uygun olarak şerit ve levhaların uç bölgelerinde uygulanmak üzere bir ankraj detayı geliştirilmiştir. Ankraj işleminde  $\Phi 10$  mm çapında sonsuz dişli

malzeme kullanılmıştır. Aynı yerden ve aynı zamanda temin edilen bu malzemeden alınan üçer numune üzerinde kopma dayanımı testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Sikadur 330 malzeme özellikleri

Görünüm	A Bileşeni: beyaz B Bileşeni: gri
Yoğunluk	1,31 kg/l (karışım)
Karışım Oranı	A:B = 4:1
Uygulama Sıcaklığı	+10°C - + 35°C (yüzey ve ortam sıcaklığı)
Çekme Mukavemeti	30 N/mm <sup>2</sup> (+23°C’de 7 gün kür aldıktan sonra)
Eğilmede Elastisite Modülü	3800 N/mm <sup>2</sup> (+23°C’de 7 gün kür aldıktan sonra)

Çizelge 2.7. Ankraj çeliği kopma deneyi sonuçları

Ankraj Çeliği Çapı (mm)	Akma Dayanımı (Mpa)	Kopma Dayanımı (Mpa)
10	275	417

### Ankraj epoksisi

Ankraj çeliklerinin beton içinde sabitlenmesi için yapıştırıcı malzeme olarak Sikadur-31 epoksi harcı kullanılmıştır (Çizelge 2.8). Solventsiz, tiksotropik, iki bileşenden oluşan epoksi reçine ve özel olarak seçilmiş yüksek dayanıma sahip dolgu maddelerinin bir kombinasyonundan oluşmuş yapıştırma ve tamir harcıdır.

Geniş bir kullanım alanına sahip olan Sikadur-31 beton, seramik, harç, taş, sıva, çelik, demir, alüminyum, ahşap, polyester, epoksi ve cam yüzeylerde ince film yapıştırma ve tesviye amaçlı, beton tamirati, çatlak ve yüzey koruma, 5 mm’den büyük geniş çatlak dolgusu ve demir filizi ekimi (ankraj) için kullanılabilir. Son derece pratik bir malzeme olan Sikadur-31 kolay uygulanabilirlik, kuru ve nemli yüzeylerde kullanılabilirliği, yüksek sıcaklıklarda dahi akma yapmadan

uygulanabilirliği, erken dayanım sağlaması, rötre yapmaksızın sertleŖebilmesi, beton ve diğer birçok malzemeye çok iyi derecede yapıŖması, yüksek aşınma ve kimyasal dayanıma sahip olması gibi bir çok avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 2.8. Sikadur-31 malzeme zellikleri

Renk	Gri (A:Beyaz, B:Siyah)
Yoğunluk	1,65 kg/l
KarıŖım Oranı	A:B = 3:1
Uygulama Sıcaklığı	+10°C - +20°C
Basınç Dayanımı	60-70 N/mm <sup>2</sup>
Çekme Dayanımı	15-20 N/mm <sup>2</sup>
eliğe YapıŖma	15 N/mm <sup>2</sup>
Betona YapıŖma	3,0-3,5 N/mm <sup>2</sup>
Eğilme Dayanımı	30-40 N/mm <sup>2</sup>
Elastisite Modülü	4300 N/mm <sup>2</sup>

#### 2.4. Deney Elemanlarının retilmesi

Deneysel alıŖmada test edilen 6 adet T-kesitli betonarme kiriŖin retimi Gazi Üniversitesi İnŖaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniiği Laboratuvarında gerekleŖtirilmiŖtir. Deney programında ilk olarak her eleman için donatı kafesi ve kalıbı hazırlanmıŖ, donatı kafesinin kalıba dikkatli bir Ŗekilde yerleŖtirilmesinden sonra hazırlanan beton karıŖımı kalıplara dklmŖtir. 28 günlük krden sonra deney elemanları üzerinde güçlendirme iŖlemine geilmiŖtir.

alıŖmada elik kalıp kullanılmıŖtır. Beton dökümü esnasında kalıpların açılmasının ve sehim yapmasının önlenebilmesi amacıyla elik profiller kullanılmıŖ ve kalıplar birleŖim bölgelerinden sıkıŖtırılmıŖtır. Betonun kalıba yapıŖmasını önlemek amacıyla kalıp iç yüzeyi yağlandıktan sonra donatı kafesi kalıba yerleŖtirilmiŖtir.

Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan 250 dm<sup>3</sup> kapasiteli betonyer kullanılarak, belirlenen karışım oranındaki (Bkz. Çizelge 2.3) beton üretilmiş ve vibratör kullanılarak kalıp içerisine homojen bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Resim 2.7’de beton üretiminde kullanılan betonyer gösterilmiştir.



Resim 2.7. Betonun hazırlanması [21]

Beton dökümü sırasında her elemandan, beton basınç dayanımının belirlenmesi için 3'er adet silindir (150 mm x 300 mm) numune alınmıştır (Resim 2.8). Deney elemanı ile birlikte silindir numuneler ıslak çuvalla sarılıp 28 gün boyunca küre bırakılmıştır. Resim 2.9'da beton dökümü tamamlanmış deney elemanları görülmektedir.



Resim 2.8. Silindir numune alınması [21]



Resim 2.9. Beton dökümü tamamlanmış deney elemanları [21]

## 2.5. Güçlendirme Tekniği

Güçlendirme tüm elemanlar için aynı adımlar uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 28 günlük kür süresinin sonunda yeterli dayanım kazanan numunelerde güçlendirme işlemine geçilmiştir. CFRP şerit ve levhalar rulolarından belirlenen boyutlarda kesilmiş ve epoksi kullanılarak kiriş kesme açıklığında belirlenen bölgelere yapıştırılmıştır. CFRP elemanların uçlarına uygulanacak ankraj işleminden önce, epoksinin katılaşması ve yeterli dayanımı alması için 15 gün boyunca kür uygulanmıştır.

### 2.5.1. CFRP şerit ve levhaların hazırlanması ve beton yüzeye yapıştırılması

CFRP elemanların beton yüzeye yapıştırılmasından önce pürüzsüz bir yüzey elde etmek ve CFRP eleman ile beton yüzeyi arasında kuvvetli bir bağ elde edebilmek için kiriş yan yüzleri taşlanarak mekanik olarak temizlendikten sonra beton yüzeyinde kalan toz ve gevşek parçacıkları uzaklaştırmak için basınçlı hava kullanılmıştır. Son olarak kiriş yan yüzeyleri ıslak bir süngerle silinmiştir. CFRP şeritlerin kiriş yan yüzeyinde yapıştırılacağı yerler çelik metre ve cetvel yardımıyla çizilerek işaretlenmiştir. CFRP şerit ve levhalar belirlenen boyutlarda özenli bir şekilde, keskin bir makas yardımıyla kesilmiştir.

Yapıştırma işleminde daha önce belirtildiği gibi Sikadur 330 epoksi harcı kullanılmıştır. Epoksi harcı hazırlanırken bileşenler üretici firma tarafından belirtilen oranlarda kullanılmıştır. İlk olarak malzemenin her iki bileşeni kendi kaplarında karıştırılmıştır. A:B = 4:1 oranında olacak şekilde bileşenler kaplarından alınarak başka temiz bir kaba yerleştirilmiş ve hava sürüklemesine izin vermeyecek şekilde üç dakika süresince homojen bir karışım elde edene kadar karıştırılmıştır.

Homojen hale gelene kadar karıştırılan epoksi (Sikadur 330) kiriş yan yüzeylerinde işaretlenen bölgelere 1,5 mm kalınlığında sürülmüştür (Resim 2.10). CFRP şerit ve levhalar bu yüzeylere yerleştirildikten sonra lifleri doğrultusunda el ile basınç

uygulanarak beton yüzeye sürülmüş olan yapıştırıcının emdirilmesi ve hava boşluklarının giderilmesi sağlanmıştır. Son olarak CFRP şerit ve levhaların üstüne 1,5 mm kalınlığında ikinci kat epoksi lifler doğrultusunda sürülerek CFRP elemanların üzerleri kapatılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra deney elemanlarına 15 gün boyunca laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır.

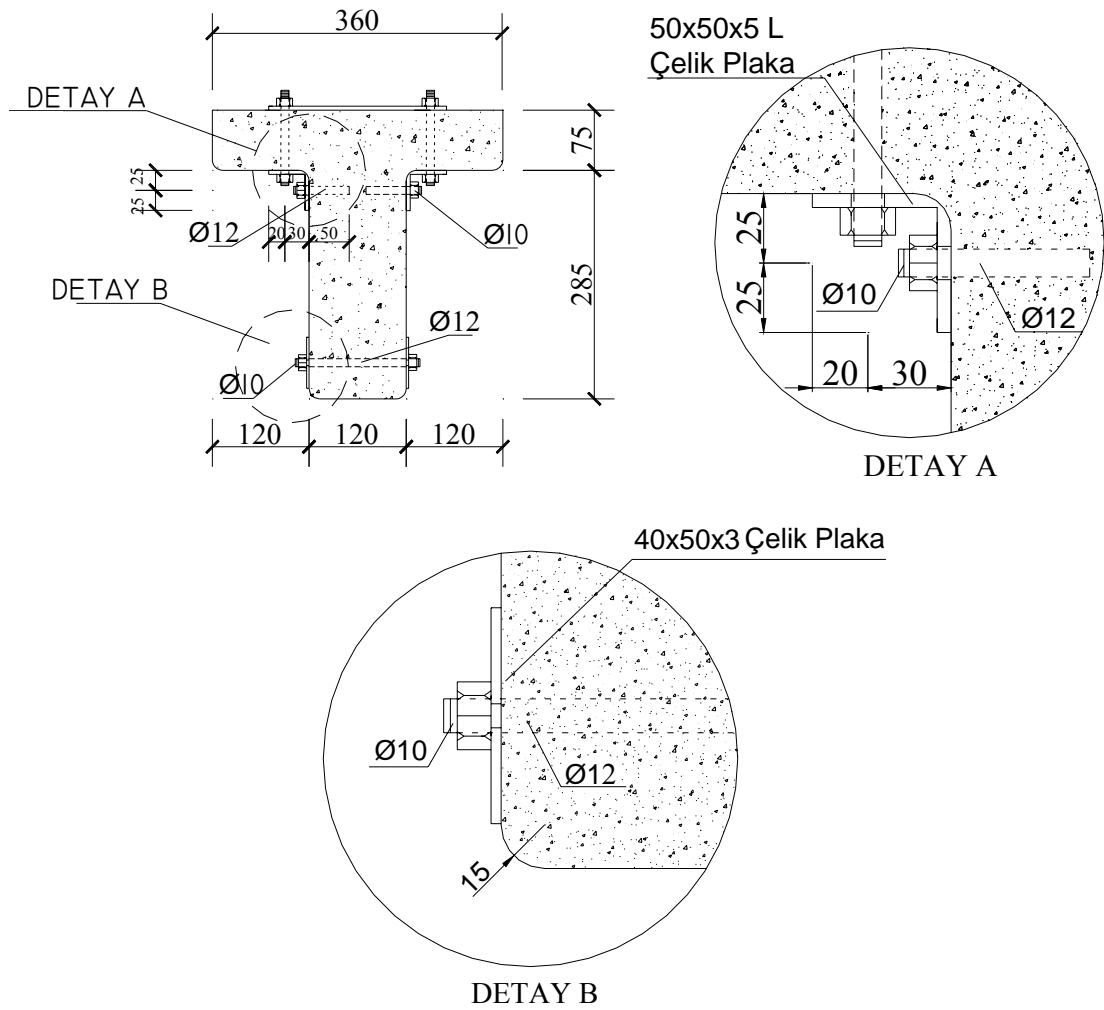


Resim 2.10. Epoksinin sürülmesi [21]

### 2.5.2. Ankrajların uygulanması

Ankraj işleminden önce CFRP elemanların yapıştırılmasında kullanılan epoksi malzemesinin kürünü alması beklenmiştir. Deney elemanları üzerinde ankrajların uygulanacağı noktalar belirlendikten sonra matkapla ankraj delikleri açılmıştır. Kiriş gövdesinin üst kısmına karşılıklı olarak ankraj delikleri açılmış ve bunlara Sikadur-

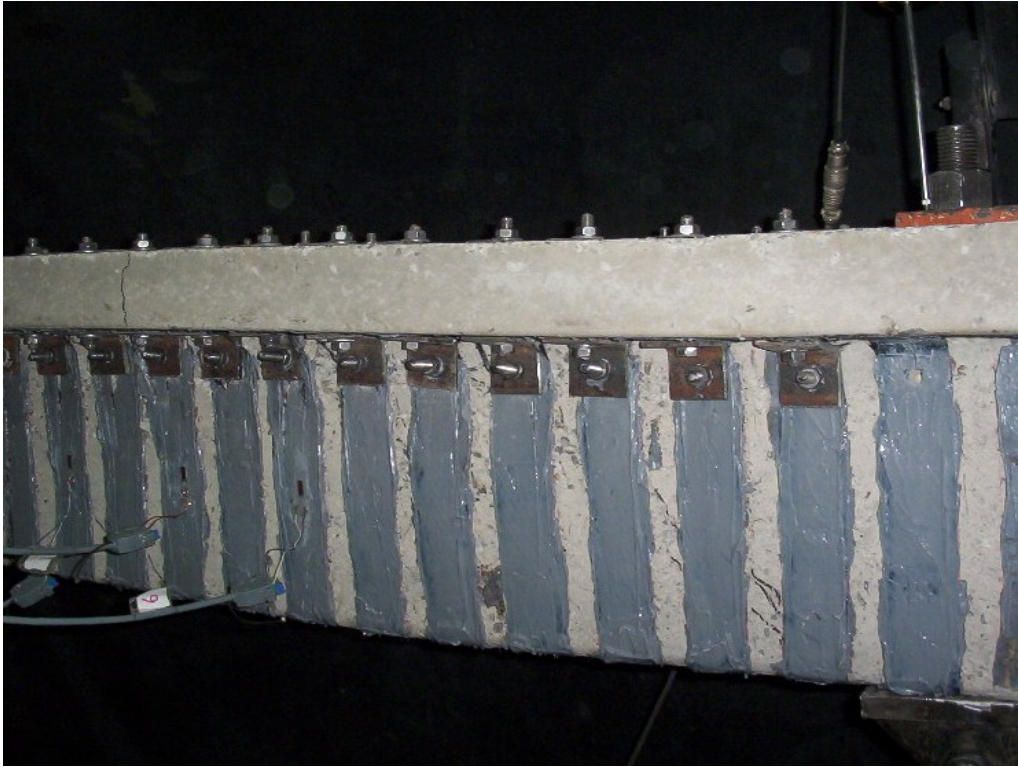
31 Epoksi Harcı ile  $\Phi 10$  mm çapında sonsuz dişli malzemeler yerleştirilmiştir (Resim 2.11, 2.12). Kiriş gövdesi ile tablanın deney esnasında birbirinden ayrılmasını engellemek amacıyla tabla boydan boya delinerek, tabla ile kiriş gövdesi arasında  $50 \times 50 \times 5$  mm'lik korniyer elemanları yerleştirilmiştir. Tabla üstünde açılan deliklere yerleştirilen ankrajlar karşılıklı olacak şekilde  $40 \times 250 \times 3$  mm lik levhalarla birleştirilmiş ve somunlar yardımıyla sıkıca bağlanmışlardır. Kiriş gövdesinin alt kısmında kullanılacak ankrajlar için kiriş gövdesi belirlenen noktalardan delinmiş ve yerleştirilen ankraj malzemesinin kabuk betonunu ezmesini önlemek için 3 mm kalınlığında  $40 \times 50$  mm'lik çelik plakalar yerleştirilmiştir. Pul ve somunlar yardımıyla plaka kirişe sıkıca bağlanmıştır. Şekil 2.7' de ankraj detayı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Ankraj detayı



Resim 2.11. Ankraj deliklerinin açılması [21]

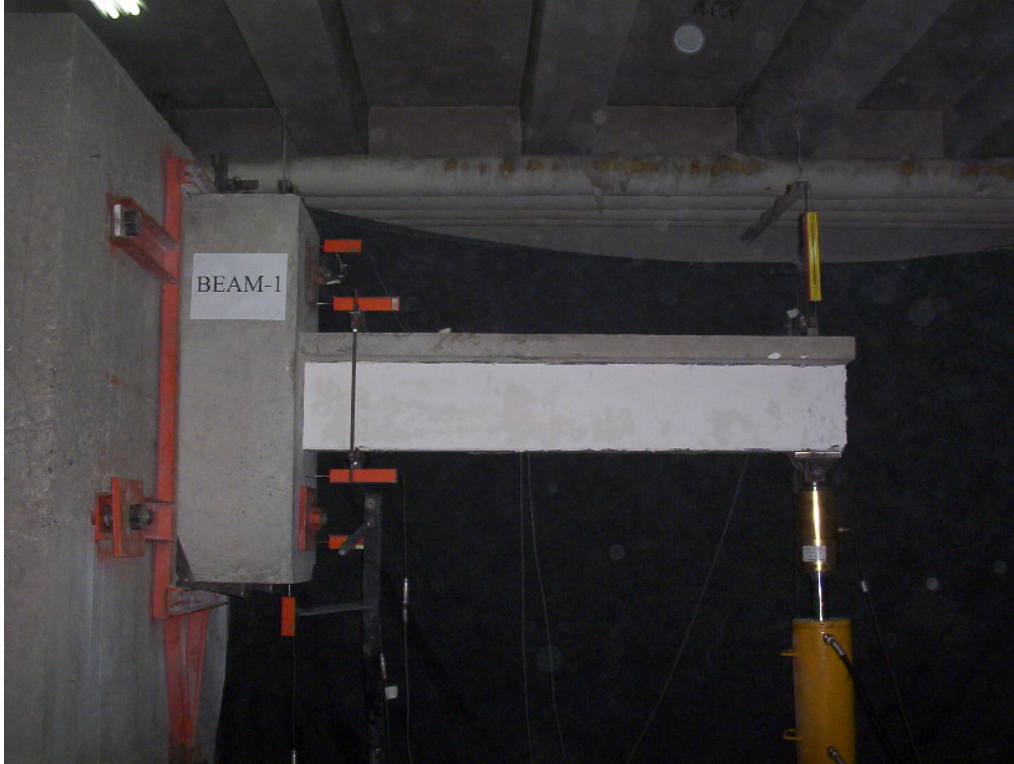


Resim 2.12. Kiriş-2 ankraj uygulaması [21]

## 2.6. Deneý Düzeni

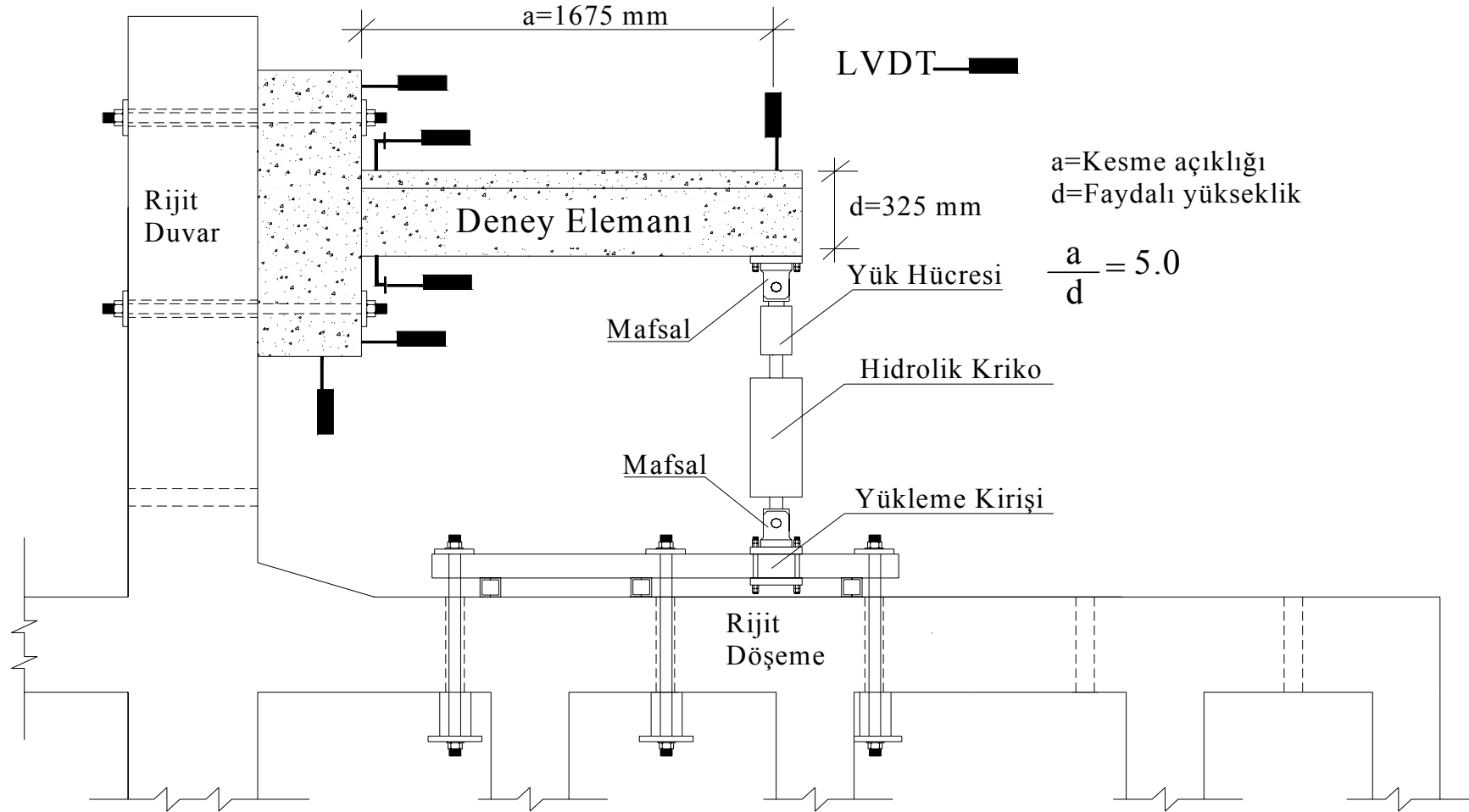
### 2.6.1. Yükleme düzeni

Deneýler Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliđi Bölümü Yapı Mekaniđi Laboratuvarında bulunan rijit deneý platformunda gerçekleştirilmiştir. Deneý platformu rijit döşeme ve yükleme duvarından oluşmaktadır. Deneý elemanları platformun rijit duvarına yüksek dayanımlı çelikten üretilmiş 45 mm çapındaki bulonlar ile ankastre kabul edilecek bir şekilde mesnetlenmiştir. Deneý elemanları deprem yüklerini benzeştiren tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Yükleme kiriş elemanı ile rijit deneý platformunun döşemesi arasına yerleştirilen iki ucu mafsallı bir yükleme kolonu ile gerçekleştirilmiştir. Deneý düzeneđinin görünüşü Resim 2.13’de verilmiştir.



Resim 2.13. Deneý düzeneđinin genel görünüşü [21]

Deneyde yükleme için 600 kN kapasiteli hidrolik krikoya bağlı el kontrollü bir pompa kullanılmıştır. Deney elemanlarına uygulanan yükün şiddeti, reaksiyon kirişi ile hidrolik kriko arasında bulunan 600 kN basınç, 300 kN çekme kapasitesine sahip bir yük ölçme hücresi (loadcell) yardımıyla ölçülmüştür. Deney elemanlarının test edilmesinden önce sıfır okumaları alınmış daha sonra yüklemeye başlanılmıştır. Deney elemanlarına ilk olarak elastik bölgede kalan birkaç yükleme çevrimi uygulanmış daha sonra hesaplarla elde edilen çatlama dayanımlarına göre ilk eğilme çatlağı ve kesme çatlağının meydana gelmesi beklenen değerlerde yükleme çevrimleri uygulanmıştır. Deney elemanlarının göçme noktalarına ulaşmasına kadar yükleme düzenli olarak artırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamındaki tüm deney elemanlarına özdeş bir yükleme programı uygulanmasına özen gösterilmiştir. Ancak doğal olarak, deney elemanlarının farklı kesme kuvveti kapasiteleri olduğu için çatlak oluşumundan sonraki yük adımlarını deney elemanlarının kapasiteleri ve davranışları belirlemiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yükleme ve ölçüm düzeni Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Deney ve yükleme düzeni

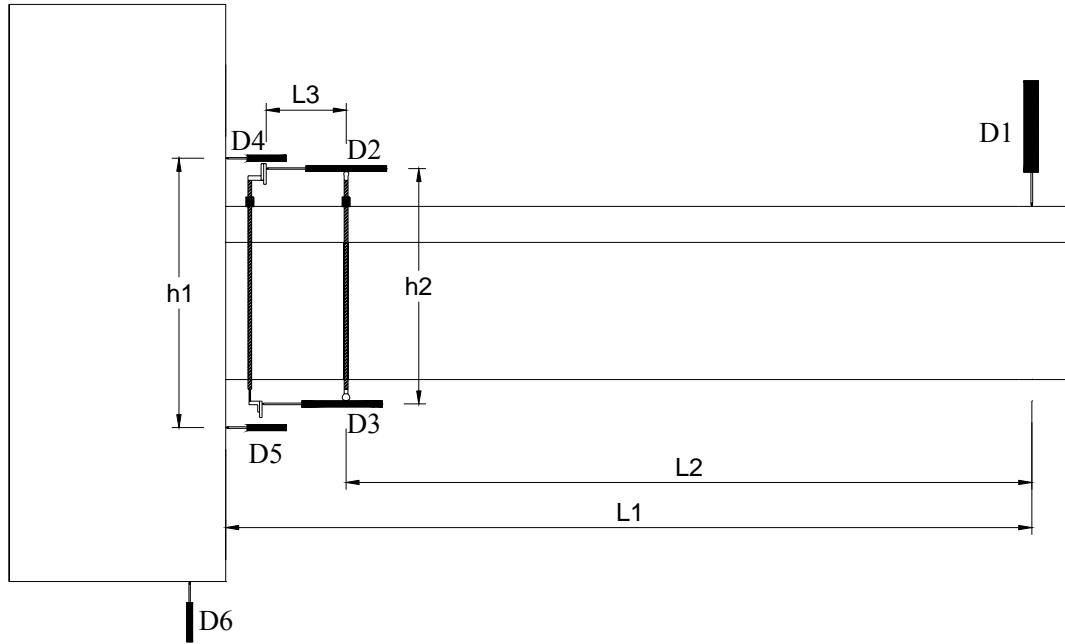
### 2.6.2. Ölçüm aletleri ve ölçüm düzeni

Deneyle esnasında tüm deplasmanlar 0,0001 mm'ye kadar olan değişimleri ölçebilen, elektronik doğrusal deplasman ölçerler (LVDT, Linear Variable Displacement Transducer) ile ölçülmüştür. LVDT'lerden alınan ölçümler bir data toplayıcı aracılığı ile bilgisayara aktarılmıştır. Deneysel çalışmada deplasman ölçümlerinin düzenli bir şekilde takip edilebilmesi, okunan değerlerin bilgisayar hafızasına kaydedilerek ve deplasman-yük grafiğinin çizilerek deneyin kolay bir şekilde izlenebilmesinin sağlanması için bir bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Ölçüm sisteminde, kiriş uç noktası deplasmanı, momentin maksimum olduğu bölgede eğrilik ölçümleri ve rijit kütle hareketleri için toplam 6 adet LVDT kullanılmıştır.

Deneyle sırasında kiriş ucundaki deplasman ile yükün değişimi bilgisayar ekranından grafik olarak takip edilmiştir. Ölçüm sisteminde 6 adet LVDT kullanılmış ve LVDT'lerin yerleşimi moment-eğrilik ilişkisini, kiriş uç deplasmanını, mesnetin rijit dönme ve rijit ötelenme değerlerinin bulunmasına yönelik düzenlenmiştir.

Ölçüm sisteminde kiriş uç deplasmanı ( $D_1$ ), kiriş tablası üzerinde, yükleme kolonu ile aynı düşey doğrultuda dikey olarak yerleştirilen  $50 \times 10^{-6}$  mm hassasiyetinde 200 mm kapasiteli LVDT kullanılarak ölçülmüştür. Sistemde eğrilik ölçüm değerleri ( $D_2$ ,  $D_3$ )  $50 \times 10^{-6}$  mm hassasiyetli 100 mm kapasiteli LVDT'ler kullanılarak elde edilmiştir. Rijit dönme ve rijit ötelenme değerlerinin ( $D_4$ ,  $D_5$ ,  $D_6$ ) elde edilebilmesi için  $100 \times 10^{-6}$  mm hassasiyetine sahip 50 mm kapasiteli LVDT'ler kullanılmıştır. Her deneyden önce LVDT'lerin kalibrasyon ayarları yapılmıştır.

Şekil 2.9' da LVDT'lerin yerleşim düzeni gösterilmiştir. LVDT'lerden alınan veriler kullanılarak deney elemanlarına ait kiriş uç deplasmanı ve eğrilik değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.9. LVDT yerleşim düzeni

- D<sub>1</sub> : Kiriş uç deplasmanı
- D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> : Eğrilik ölçüm değeri
- D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub> : Rijit dönme ölçüm değeri
- D<sub>6</sub> : Rijit ötelenme ölçüm değeri

Deneyler sırasında güçlendirilmiş elemanlarda CFRP şerit ve levhalarda meydana gelen gerilme değişikliklerini izleyebilmek ve hangi bölgelerdeki CFRP elemanların daha büyük gerilmelere maruz kaldığını belirlemek amacıyla kiriş kesme açıklığında birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Deney elemanı 2, 3 ve 6' da 6 adet 4 ve 5 numaralı deney elemanlarında ise 5 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. Birim deformasyonlar CFRP şerit ve levhaların taşıyıcı lifleri doğrultusunda ölçülmüştür. 10 mm uzunluğundaki birim deformasyon ölçerler 120  $\Omega$ ' luk dirence sahiptirler. Yapıştırıldıkları yüzeydeki gerilmeleri elektronik olarak okuyan birim deformasyon ölçerlerden alınan veriler data toplayıcı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Birim deformasyon ölçerler gerilme değerlerinin ölçüleceği noktalara yapıştırılmadan önce bu noktaların bulunduğu CFRP şerit ve levhaların yüzeyleri bir jilet ile dikkatlice kazınarak düzgün ve pürüzsüz bir hale getirilmiştir. Yüzeyin

üstündeki toz ve atık maddeler temizlendikten sonra kuvvetli bir yapıştırıcı kullanılarak birim deformasyon ölçerler CFRP şerit ve levhalara yapıştırılmıştır.

### 2.6.3. Ölçümlerin değerlendirilmesi

#### Kiriş uç deplasmanının hesabı

Kirişlerin düşey doğrultudaki kiriş net uç deplasmanı ( $D_{1net}$ ) hesap edilirken, kirişlerin uç deplasman ölçümleri ( $D_1$ ), rijit ötelenme ( $D_6$ ) ve rijit dönme ( $D_4$ ,  $D_5$ ) ölçüm değerleri kullanılmıştır. Eş. 2.1' de verildiği gibi kiriş uç deplasman değerinden rijit ötelenme ve rijit dönme değerleri çıkartılarak kiriş net uç deplasman değeri bulunmuştur.

$$\text{Rijit Ötelenme} = D_6$$

$$\text{Rijit Dönme} = ((D_4 - D_5) / h_1) \times L_1$$

$$\text{Kiriş net uç deplasmanı } (D_{1net}) = D_1 - \text{Rijit Dönme} - D_6$$

$$= D_1 - ((D_4 - D_5) / h_1) \times L_1 - D_6 \quad (2.1)$$

Eş. 2.1' de kullanılan sembollerin anlamı aşağıda verilmiştir.

$D_{1net}$  : Kiriş net uç deplasmanı

$D_1$  : Kiriş uç deplasmanı

$D_4$  : Üst rijit dönme

$D_5$  : Alt rijit dönme

$D_6$  : Rijit ötelenme

#### Moment-eğrilik ilişkisinin hesabı

Moment değerleri uygulanan yük ve moment kolu çarpılarak hesaplanmıştır. Eğrilik bilindiği üzere birim dönme açısıdır. Kirişlere ait eğrilik ölçümleri için Şekil 2.9' da gösterilen  $D_2$  ve  $D_3$  numaralı LVDT' ler kullanılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak kirişlere ait moment-eğrilik grafiklerinin çizilmesi amaçlanmıştır. Eğrilik ölçümü için ölçüm alınan iki kesit arasındaki dönme açısı radyan cinsinden

bulunmuştur. Bulunan bu açı iki kesit arasındaki mesafeye bölünerek eğrilik hesaplanmıştır. Eş. 2.2' de moment ve eğrilik değerlerini veren denklemler sunulmuştur.

$$\text{Moment} = \text{Yük} \times \text{Moment Kolu} = \text{Yük} \times L_2$$

$$\text{Eğrilik} = ((D_2 - D_3) / h_2) / L_3 \quad (2.2)$$

Eş. 2.2' de kullanılan sembollerin anlamı aşağıda verilmiştir.

$D_2$  : Üst eğrilik ölçümü için kullanılan LVDT

$D_3$  : Alt eğrilik ölçümü için kullanılan LVDT

$h_2$  : LVDT' ler arasındaki mesafe

$L_2$  : Moment kolu

Deney elemanlarında meydana gelen ani göçme nedeniyle eğrilik ölçümleri belli bir noktaya kadar alınabilmiştir. Bu sebepten dolayı çizilmesi ve yorumlanması düşünülen moment-eğrilik grafikleri tez kapsamı dışında bırakılmıştır.

#### Birim deformasyonların hesabı

CFRP şerit ve levhalardan ölçülen birim deformasyonların ölçüm yerleri belirlenirken, kesme çatlaklarının oluşması muhtemel yerler göz önünde bulundurulmuştur. Birim deformasyon değerleri kiriş kesme açıklığında, rijit duvara mesnetlenen bölgeden 300 – 1000 mm uzaklıktaki bir bölgeden alınmıştır. Birim deformasyon ölçerler CFRP şerit ve levhaların taşıyıcı lifleri doğrultusunda yerleştirilmiş ve bu doğrultuda ölçüm yapılmıştır. Birim deformasyon ölçerler tarafından mili volt olarak ölçülen gerilme değerleri Eş. 2.3 kullanılarak birim deformasyonlara çevrilmiştir.

$$V_0 = -\frac{GFx\varepsilon}{4} \left( \frac{1}{1 + \left( GFx \frac{\varepsilon}{2} \right)} \right) x V_i x GAIN \quad (2.3)$$

$V_0$  : Okunan gerilme değeri (mili volt)

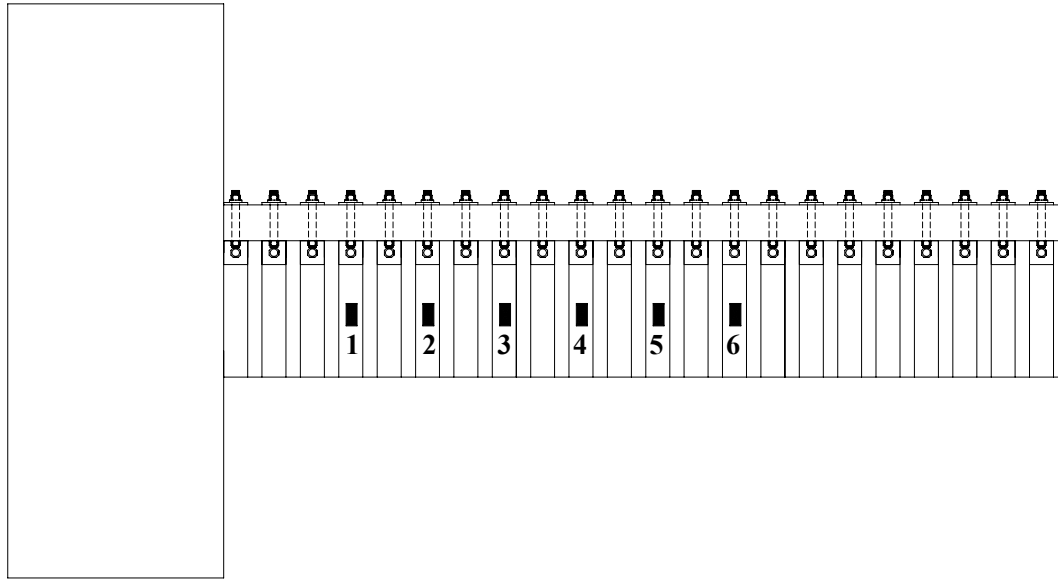
$V_i$  : Uygulanan gerilme değeri

$\varepsilon$  : Birim deformasyon değeri

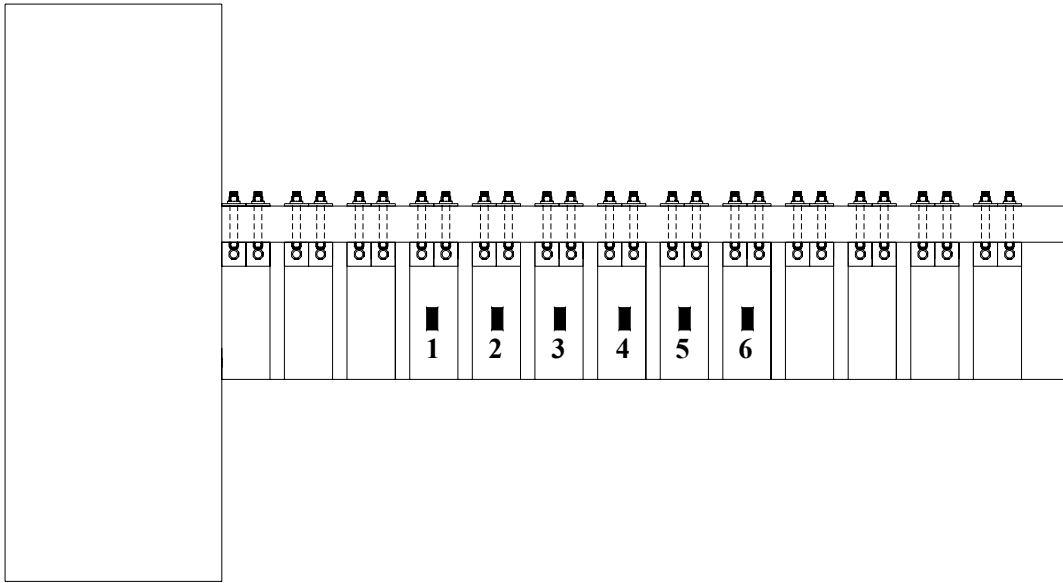
GF : Birim deformasyon faktörü ( = 2 )

GAIN : Kanal kazanç değeri ( = 420 )

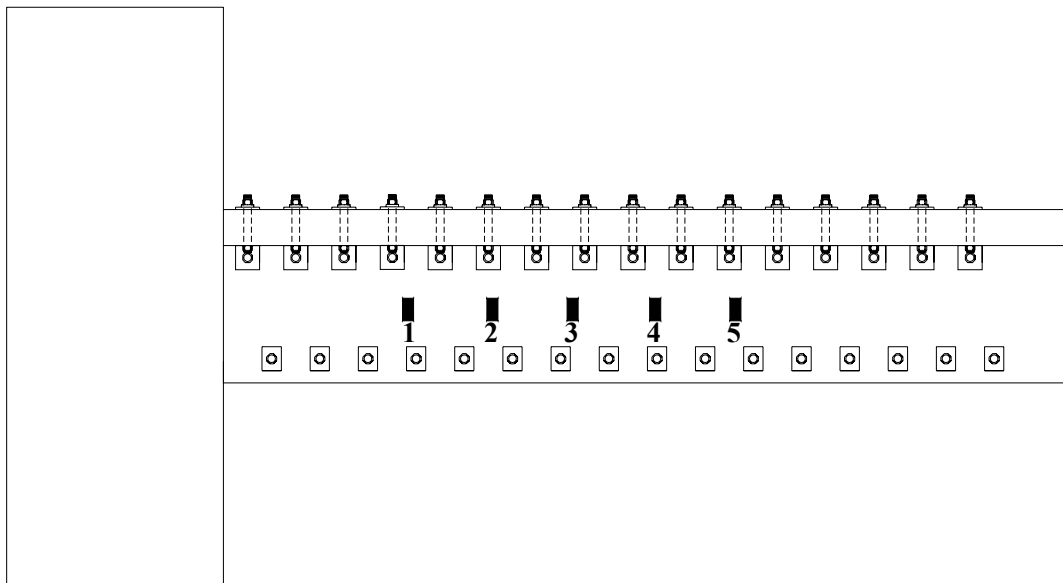
Şekil 2.10 - 2.14'de birim deformasyon ölçerlerin deney elemanları üzerindeki yerleşim düzenleri gösterilmiştir. 2, 3 ve 6 numaralı deney elemanlarında 6 adet, 4 ve 5 numaralı deney elemanlarında ise 5 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır.



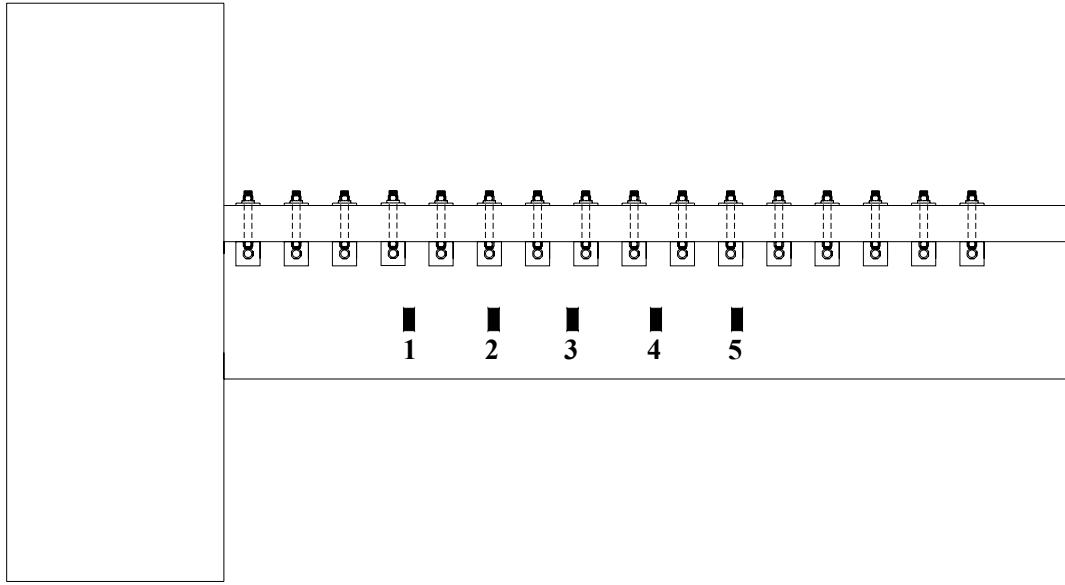
Şekil 2.10. Kiriş-2 ( $W_f = 50$ ,  $S_f = 80$ ) için birim deformasyon ölçer yerleşimi



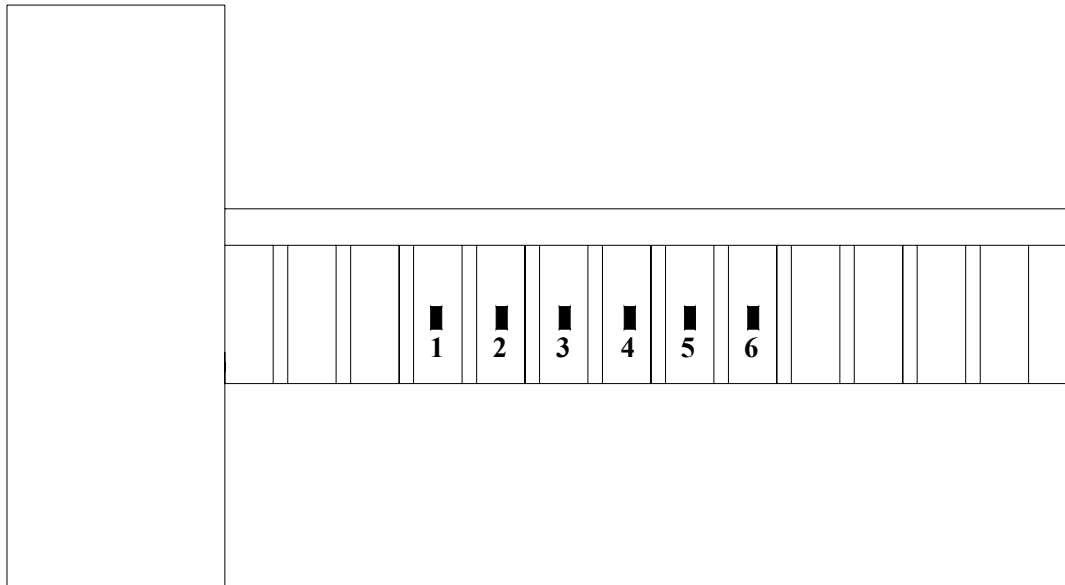
Şekil 2.11. Kiriş-3 ( $W_f = 100$ ,  $S_f = 130$ ) için birim deformasyon ölçer yerleşimi



Şekil 2.12. Kiriş-4 için birim deformasyon ölçer yerleşimi



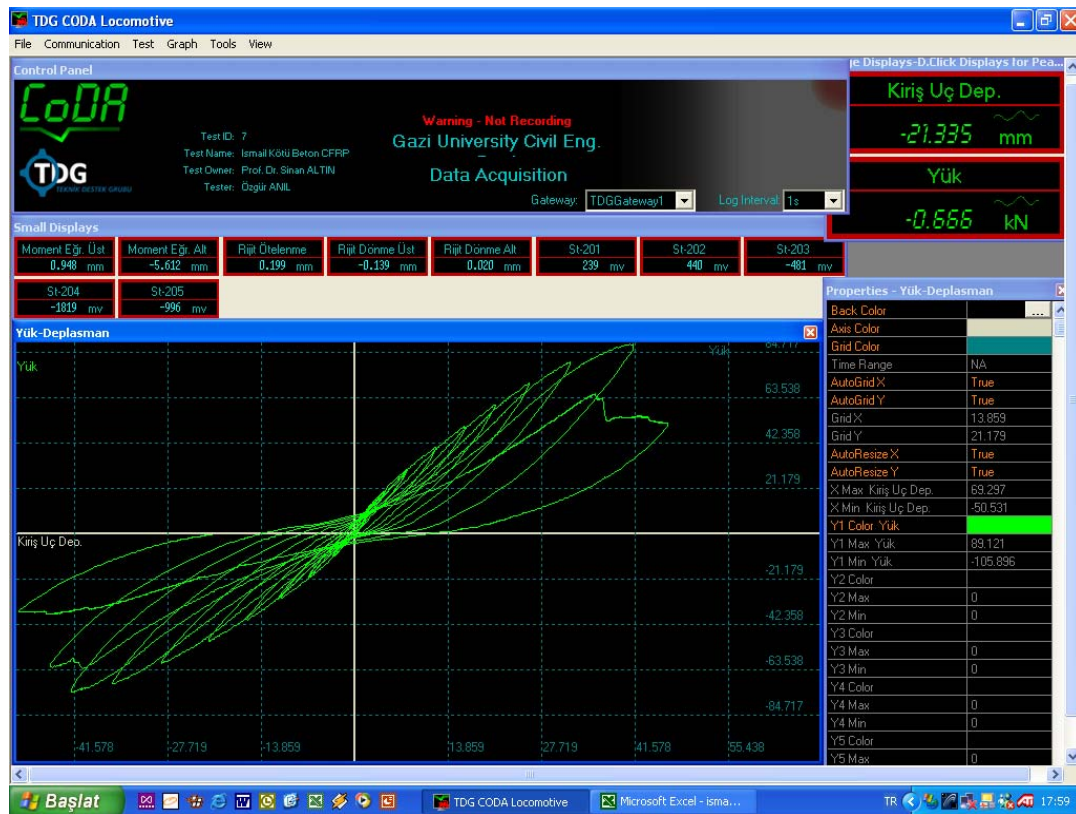
Şekil 2.13. Kiriş-5 için birim deformasyon ölçer yerleşimi



Şekil 2.14. Kiriş-6 ( $W_f = 100$ ,  $S_f = 130$ ) için birim deformasyon ölçer yerleşimi

## 2.7. Deney Yönetimi

Deney elemanlarının test edilmesi sırasında LVDT'ler ve birim deformasyon ölçerlerden alınan okuma değerleri bir tarayıcı/okuyucu tarafından bilgisayara aktarılmış ve hazır bulunan bir bilgisayar programı yardımıyla elde edilen değerler bilgisayardan takip edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Kullanılan bilgisayar programı ile deneyin izlenmesi

Deney elemanlarına yerleştirilen elektronik ölçüm aletlerinin başlangıç okumaları alındıktan sonra yüklemeye başlanmıştır. Yükleme ile birlikte ölçüm aletlerinden alınan değerlerle yük-deplasman grafiği bilgisayar ekranına çizdirilmiş ve göçmeye kadar elemanın davranışı izlenmiştir. Bu sayede deneylerin kontrollü bir biçimde ilerlemesi sağlanmıştır.

### 3. DENEYLER

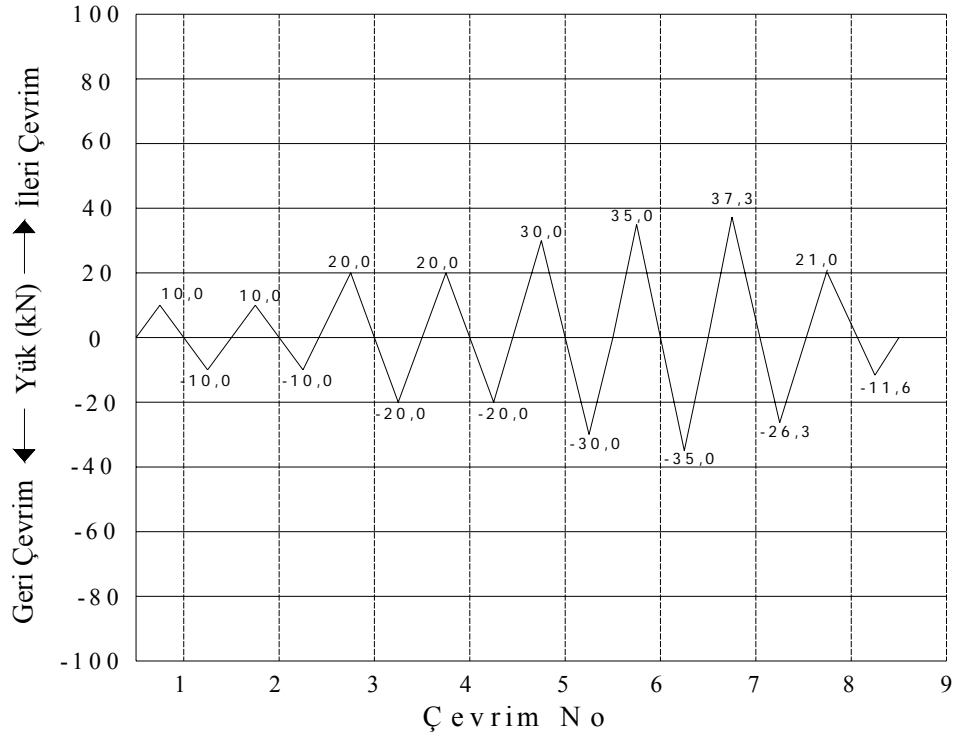
#### 3.1. Genel

Deneysel çalışmada yapılan gözlemler ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Deney elemanlarına elastik sınır içerisinde kalan birkaç yükleme çevrimi uygulanmıştır. Daha sonra yükleme tüm deney elemanları için aynı oranlarda arttırılmıştır. Tüm deney elemanları için özdeş bir yükleme programı uygulanmaya çalışılmış ancak elemanların farklı dayanımlara sahip olması bu düşünceye imkan vermemiştir. Genel olarak 40 kN yük düzeyine kadar her tam yük çevrimi iki defa tekrarlanmıştır. Maksimum yük düzeyinden sonra deneylere deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Çalışmada ilk olarak güçlendirme uygulanmamış kontrol kirişi, daha sonra ise güçlendirilen model kirişler test edilmiştir. Deney elemanlarının göçme anına kadar olan davranışları ve elde edilen deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Deney esnasında her bir deney elemanının çatlak oluşumu, yük-deplasman ilişkisi ve genel davranışı takip edilmiştir.

#### 3.2. Deney Elemanı Kiriş-1

Deneysel programda ilk olarak güçlendirme uygulanmamış Kiriş-1 kontrol deney elemanı test edilmiştir. Kiriş-1 deney elemanına 8 tam yükleme çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Kontrol deney elemanı Kiriş-1'de ilk eğilme çatlakları geri yükleme adımında 15 kN kesme kuvvetinde tablada oluşmuştur. Yükleme devam edilmesiyle birlikte kılcal düzeyde eğilme çatlaklarının sayısı artmış ve tablanın altından ilerleme göstermiştir. Ayrıca bu yük çevriminde kiriş gövdesi ile tabla arasında kılcal düzeyde ayrılma çatlakları oluşmuştur. Kiriş gövdesindeki ilk eğilme çatlakları ileri yönde 20 kN yük düzeyinde meydana gelmiştir. Geri yüklemede 30 kN yük düzeyinde mesnetten yaklaşık 130 mm uzaklıkta, kiriş altından başlayarak yaklaşık 45° eğimle ilerleyen, kiriş tablasına kadar uzanan ilk eğik çatlak oluşmuştur. Yükün arttırılması ile özellikle mesnete yakın bölgede eğik çatlakların sayısında artış meydana gelmiştir.



Şekil 3.1. Kiriş-1 deney elemanının yük-çevrim grafiği

Kiriş-1 kontrol deney elemanı ileri yüklemeye 37,3 kN'da, eğilme kapasitesinin çok altında kesme açıklığında oluşan iki ana kesme çatlağının kiriş gövdesi ve tablasının ara kesitinde birleşmesi sonucunda gevrek kesme kırılması şeklinde göçmüştür (Resim 3.1, 3.2). Göçme anında yükte %37'lik bir azalma meydana gelmiştir. Bu yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 10,8 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanının yük tutamaması nedeniyle yüklemeye durdurularak deney bitirilmiştir. Şekil 3.2'de kirişe ait yük-deplasman grafiği verilmiştir.

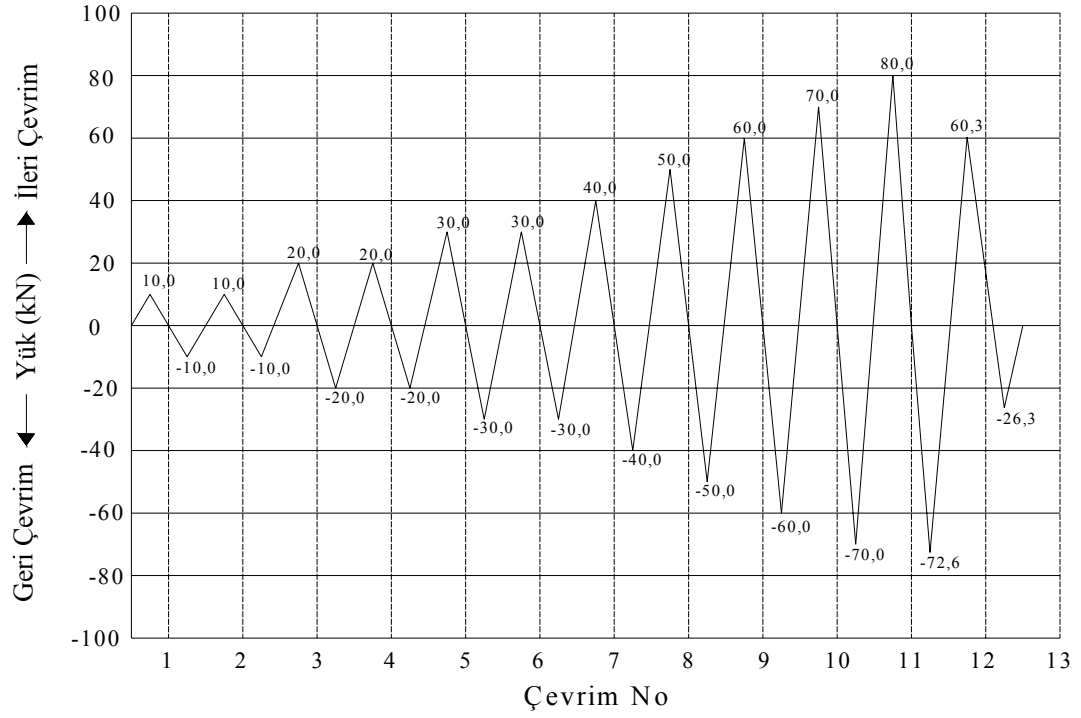




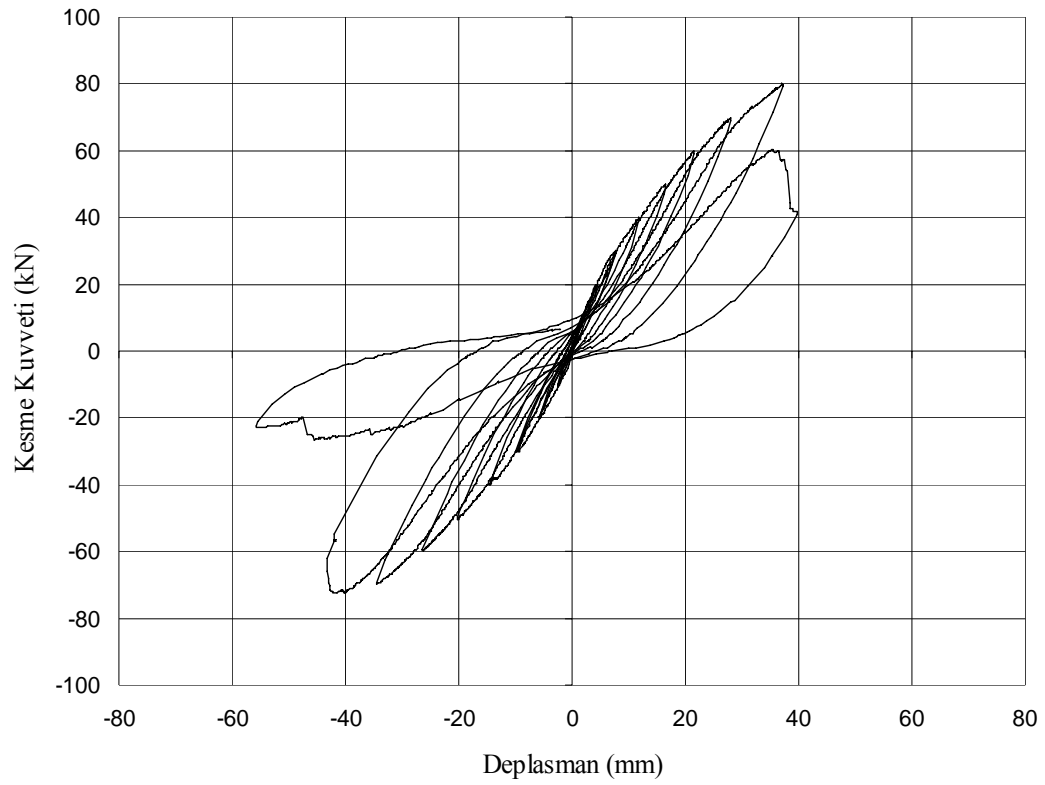
Resim 3.2. Deney elemanında oluşan iki ana kesme çatlağı [21]

### 3.3. Deney Elemanı Kiriş-2

50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 80 mm aralıklarla kiriş gövdesi yan ve alt yüzeylerine “U” şeklinde yapıştırılması ile güçlendirilen Kiriş-2 deney elemanı çalışmada test edilen ikinci model kiriştir. Şekil 3.3’deki yük geçmişi altında test edilen deney elemanına toplam 12 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Şekil 3.4’de kirişe ait yük-deplasman grafiği verilmiştir.



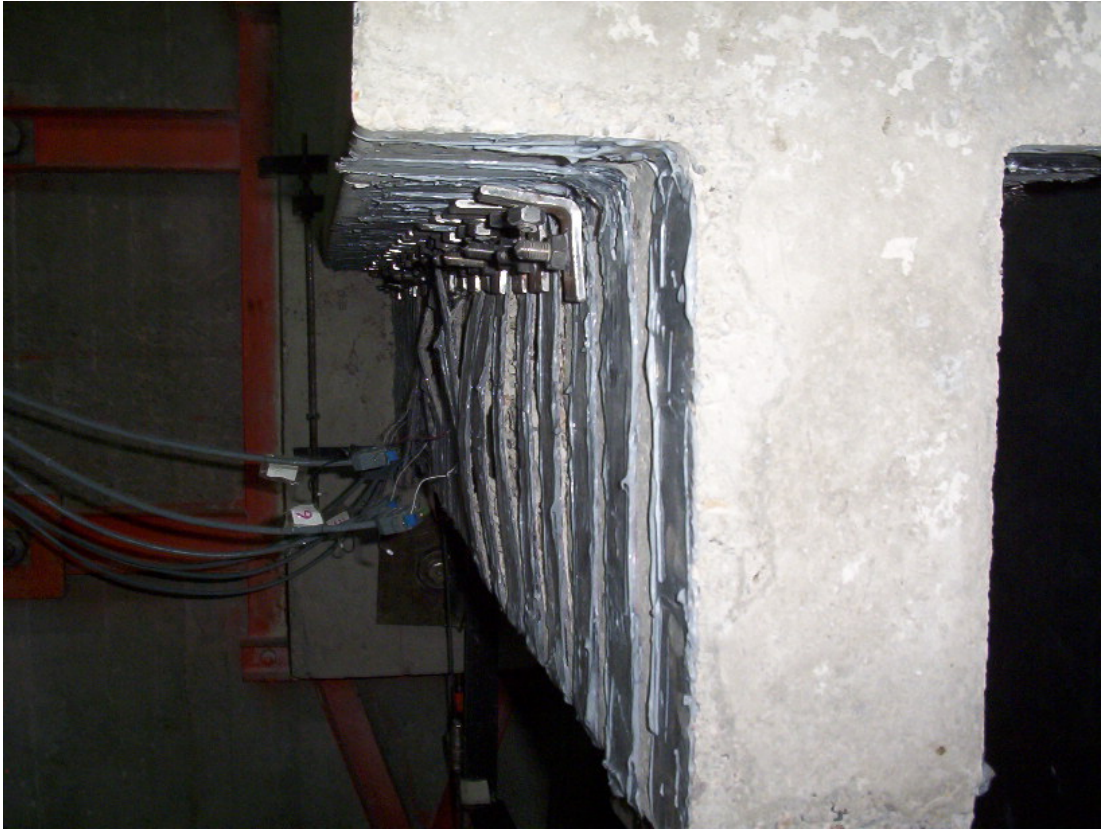
Şekil 3.3. Kiriş-2 deney elemanının yük-çevrim grafiği



Şekil 3.4. Kiriş-2 deney elemanının yük-deplasman grafiği

Kiriş-2 deney elemanında ilk eğilme çatlak 2. çevrimin geri yükleme adımında 10 kN kesme yükü altında tablada oluşmuştur. Aynı yöndeki yüklemenin arttırılması sonucunda eğilme çatlaklarının sayısında artış meydana gelmiş ve oluşan çatlaklar tabla altından ankrajların altına doğru ilerleme göstermiştir. 20 kN yük düzeyinde mesnet ile kiriş arasında 0,2 mm ayrılma çatlak gözlenmiştir. Kiriş-2 deney elemanında ilk eğik çatlak 25 kN yük düzeyinde meydana gelmiştir. 7. çevrimin geri yüklemesinde 40 kN yük düzeyinde eğik çatlakın mesnetten 290 mm uzaklıkta 4. ve 5. CFRP şeritlerin altından geçerek 6. CFRP şeride kadar ilerlediği gözlenmiştir.

İleri yönde yüklemde 80 kN yük değerinde mesnetten 1300 mm uzaklıkta bulunan CFRP şerit, kiriş gövdesinin yarısına kadar betonu soyarak yüzeyden ayrılmıştır. Aynı çevrimin geri yüklemesinde 17, 18 ve 19. CFRP şeritlerin bulunduğu bölgede betonda ezilmeler meydana gelmiş ve CFRP şeritlerde beton yüzeyden ayrılmalar gözlenmiştir. Yükleme 72,6 kN'da sona erdirilmiştir (Resim 3.3).



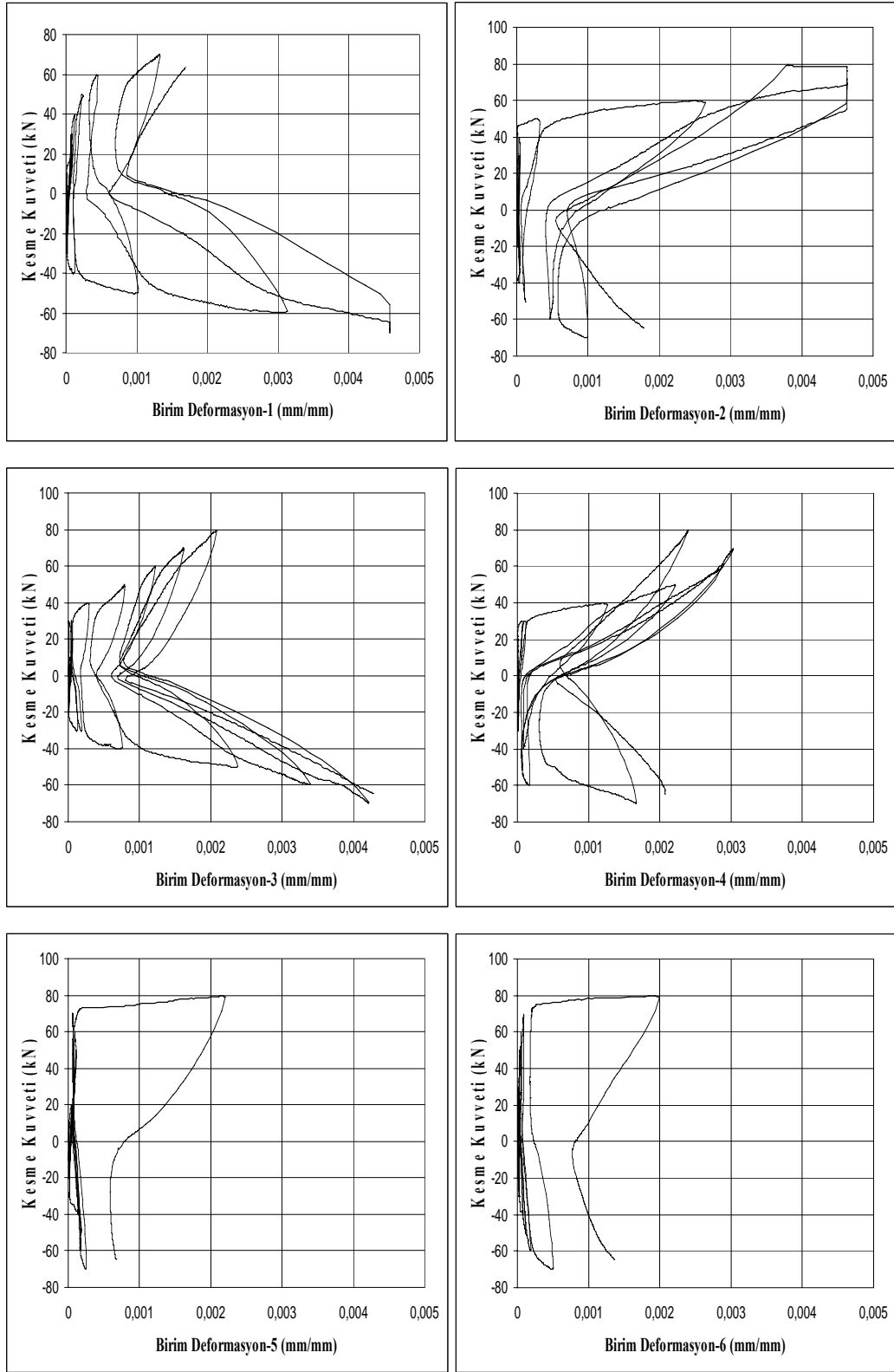
Resim 3.3. Beton yüzeyden ayrılan CFRP şeritler [21]

Kiriş ileri yönde uygulanan 12. çevrimde 60,3 kN yük düzeyinde kesme çatlağı üstünden geçen CFRP şeridi ankrajın olduğu yerden yırtmış ve yük de ani bir azalma meydana gelmiştir (Resim 3.4). Bu noktadan sonra kiriş yük tutmamaya başlamıştır.

Beton basınç dayanımının düşük olmasından dolayı düşük yük düzeyinde meydana gelen kesme çatlakları artan yükleme etkisi ile ilerlemiş ve kesme çatlaklarındaki sürtünme etkisi ile çatlakların olduğu bölgelerdeki betonda ufalanmalar gözlenmiştir. Kiriş-2 deney elemanı CFRP şeritlerin yüzeyden soyulması ve ankraj bölgelerinde meydana gelen CFRP doğrultusundaki kopmalar nedeniyle, çekme donatıları akma dayanımına ulaşmadan kesme kırılması şeklinde göçmüştür. Kiriş-2 deney elemanından ölçülen en büyük birim deformasyon değeri 0,004852 mm/mm' dir. Bu değer ACI-440 komite raporunda [22] öngörülen maksimum değerden %21 daha büyüktür. Şekil 3.5'de CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden elde edilen grafikler verilmiştir.



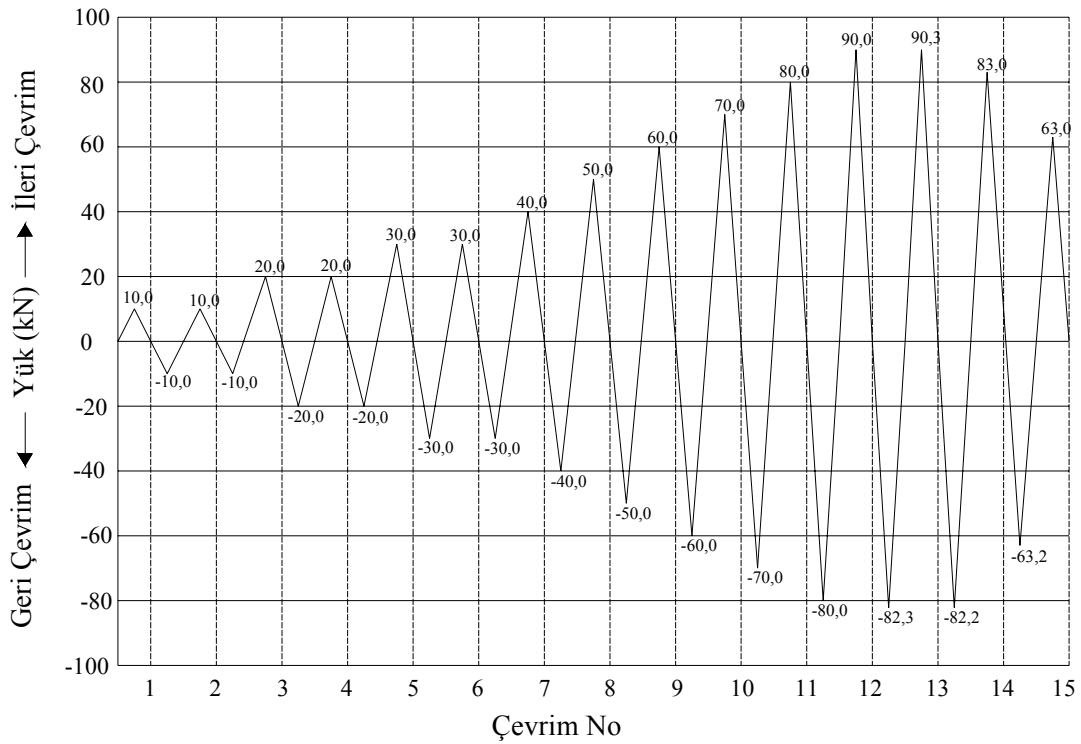
Resim 3.4. Ankraj bölgesinde CFRP şeritlerde oluşan kopmalar [21]



Şekil 3.5. Kiriş-2 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

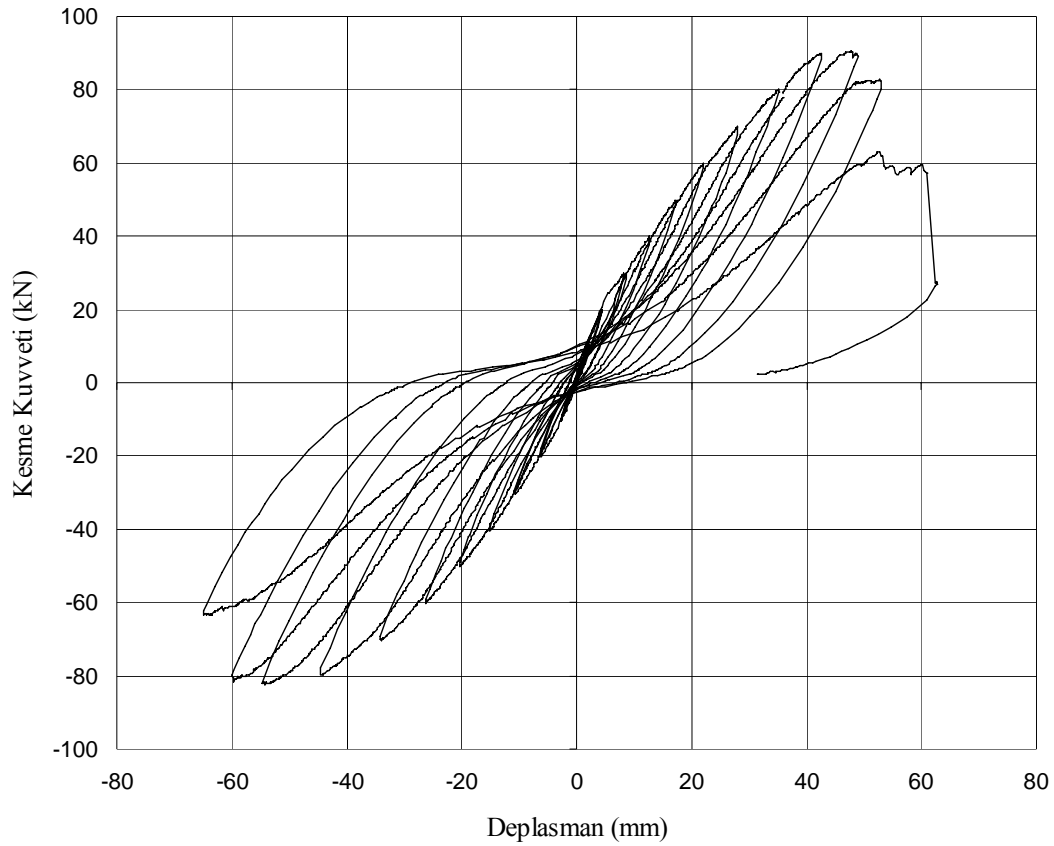
### 3.4. Deneysel Eleman Kiriş-3

Kiriş-3 deney elemanı 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 130 mm aralıklarla kiriş kesme açıklığına “U” şeklinde yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Şekil 3.6’da verilen yük geçmişi altında test edilen deney elemanına 14 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deneysel elemanın yük-deplasman grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir.



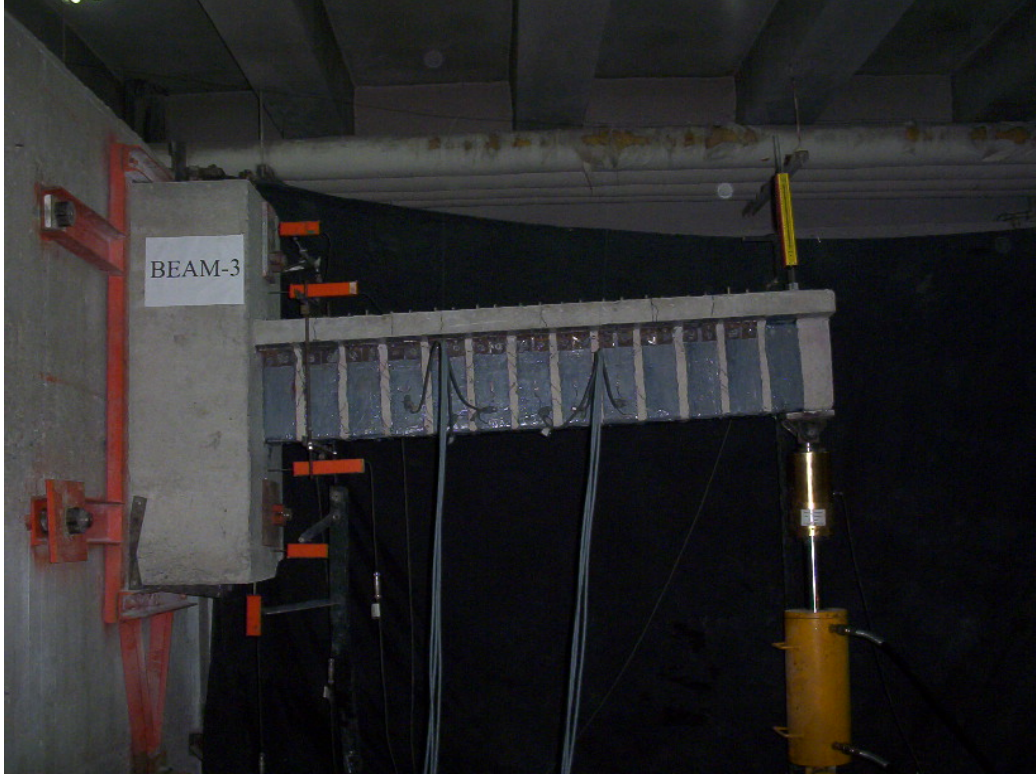
Şekil 3.6. Kiriş-3 deney elemanının yük-çevrim grafiği

Kiriş-3 deney elemanında ilk eğilme çatlağı geri yükleme sırasında 15 kN yük düzeyinde mesnetten 530 mm uzaklıkta tablada meydana gelmiştir. Aynı yöndeki yüklemenin artırılması ile birlikte eğilme çatlaklarının sayısında artış olmuş ve oluşan çatlaklar tabla altından ilerleyerek ankrajlara doğru gelişim göstermiştir. Kirişte ilk eğik çatlak 7. çevrimin geri yüklemesi sırasında 30 kN yük düzeyinde meydana gelmiştir. İleri yüklemede 40 kN yük düzeyinde 9. CFRP şeridin altında eğik çatlak oluşmuş ve bu yük düzeyinde mesnetle kiriş arasında 0,35 mm genişliğinde ayrılma çatlağı gözlenmiştir.



Şekil 3.7. Kiriş-3 deney elemanının yük-deplasman grafiği

İleri yüklemde 60 kN yük düzeyinde 9. CFRP şeridin altında oluşan kesme çatlakları ilerleyerek komşu CFRP şeridin altından geçmiş ve ankraj bölgesine ulaşmıştır. Artan yüklemle birlikte betonda kabarma ve ezilmeler gözlenmiş ve yük 90 kN düzeyinde iken 6, 7 ve 8. CFRP şeritlerde ankraj bölgesinde yırtılmalar meydana gelmiştir. 14. çevrimin ileri yüklem adımında 63 kN yük düzeyinde CFRP şeritlerde beton yüzeyden soyulmalar gözlenmesi ile birlikte yükte bir miktar düşme meydana gelmiş ve kiriş uç deplasmanı 61,1 mm değerindeyken kesme çatlaklarının altından geçtiği 11. CFRP şeridin kiriş gövdesi alt kenarından kopması sonucunda deney elemanı ani olarak göçmüştür (Resim 3.5, 3.6). Göçme anında yükte %52'lik bir azalma meydana gelmiştir. Deney elemanının yük tutamaması üzerine yüklem durdurularak deneye son verilmiştir. Kiriş-3 deney elemanı boyuna donatıları akma dayanımı kapasitelerine çok yaklaşmış ancak kesme çatlaklarının CFRP şeridi koparması sonucunda kesme kırılması şeklinde göçmüştür.



Resim 3.5. İleri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (61,1 mm) [21]



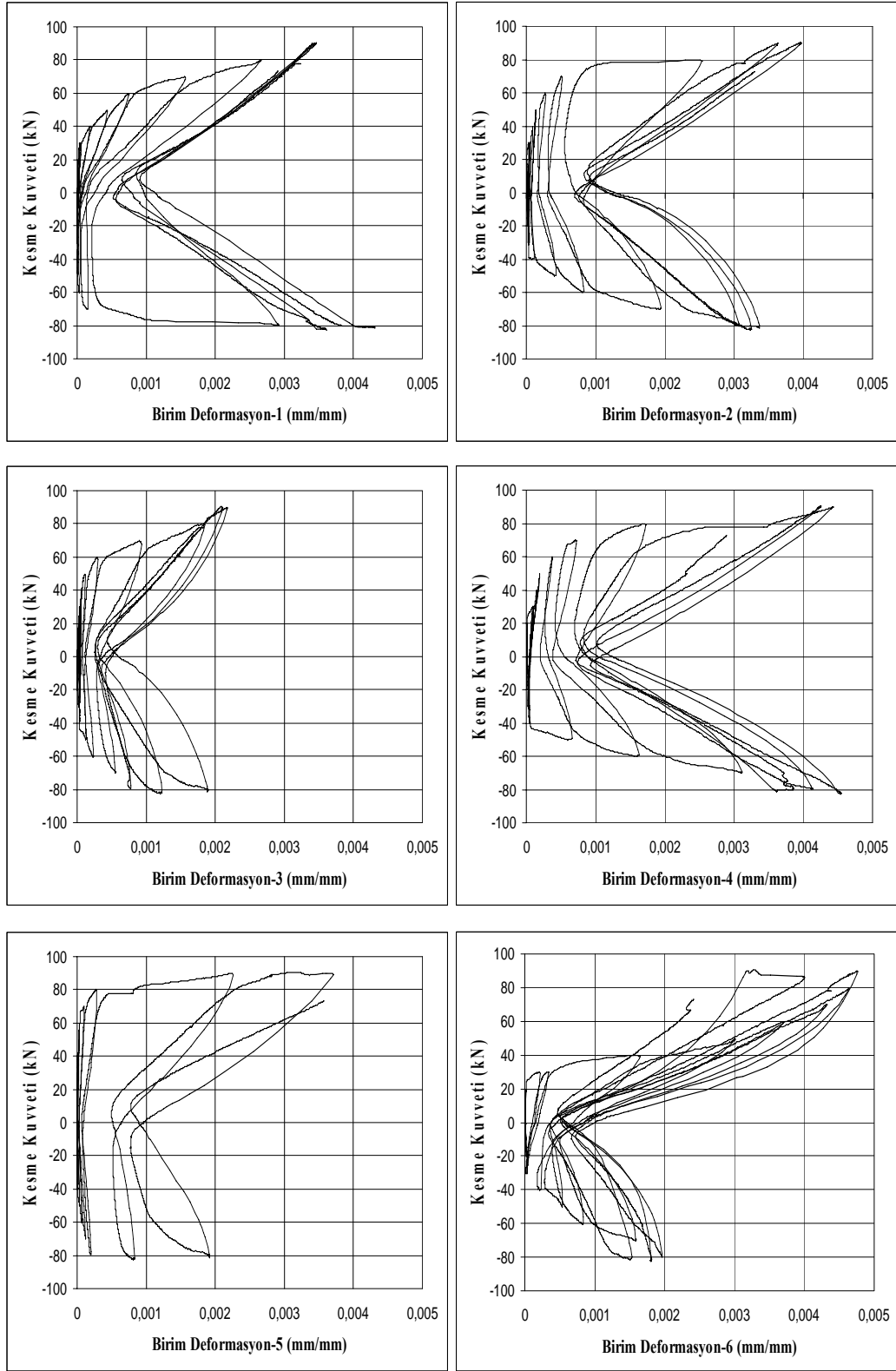
Resim 3.6. Kesme çatlağından dolayı kopan CFRP şerit [21]

Deneý sırasında artan y¼kleme ile geliŒen kesme atlaklarý CFRP Őeritlerin altýndan geerek ilerleme g¼stermiŒ ve beton dayanýmýnÝn d¼Œ¼k olması nedeniyle atlak b¼lgelerinde betonda kabarma ve ezilmeler oluŒması ile birlikte CFRP Őeritlerde beton y¼zeyinden soyulmalar g¼zlenmiŒtir (Resim 3.7).



Resim 3.7. CFRP Őeritlerde meydana gelen soyulma ve yýrtýlmalar [21]

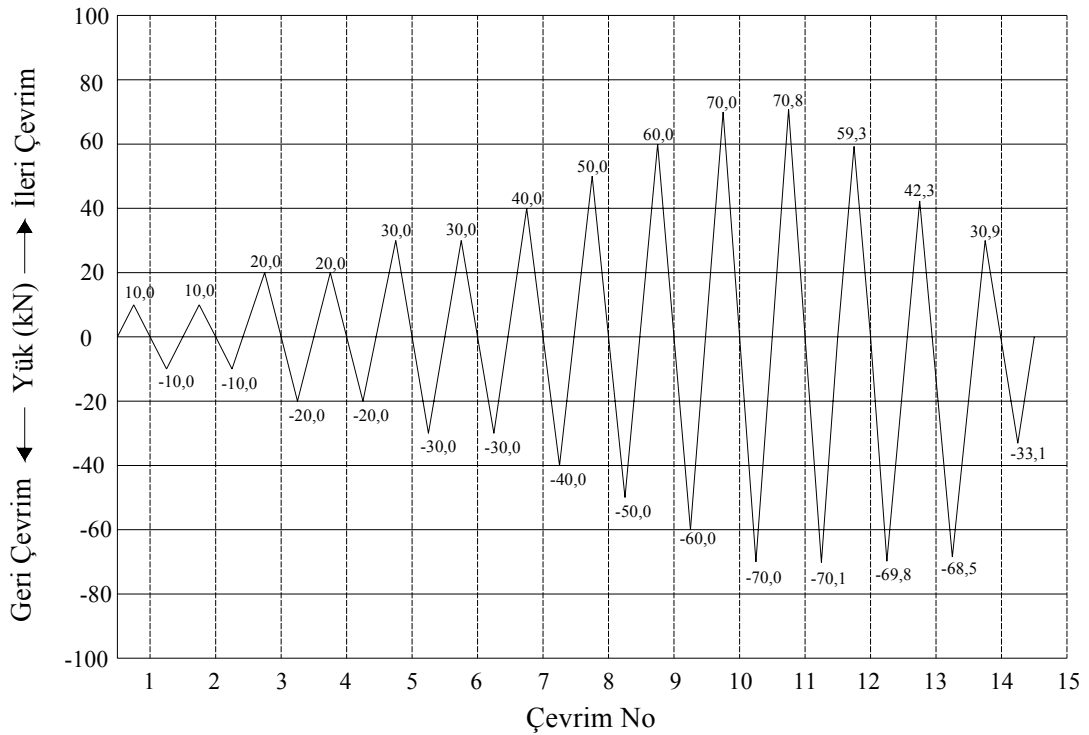
KiriŒ-3 deneý elemanýnda birim deformasyon ¼lerlerden okunan en b¼y¼k birim deformasyon deęeri 0,004778 mm/mm'dir. Bu deęer ACI-440 tarafından ¼ng¼r¼len maksimum birim deformasyon deęerinden %19 daha b¼y¼kt¼r. Őekil 3.8'de CFRP Őeritlerin y¼zerine yapýŒtırýlan birim deformasyon ¼lerlerin grafikleri verilmiŒtir.



Şekil 3.8. Kiriş-3 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

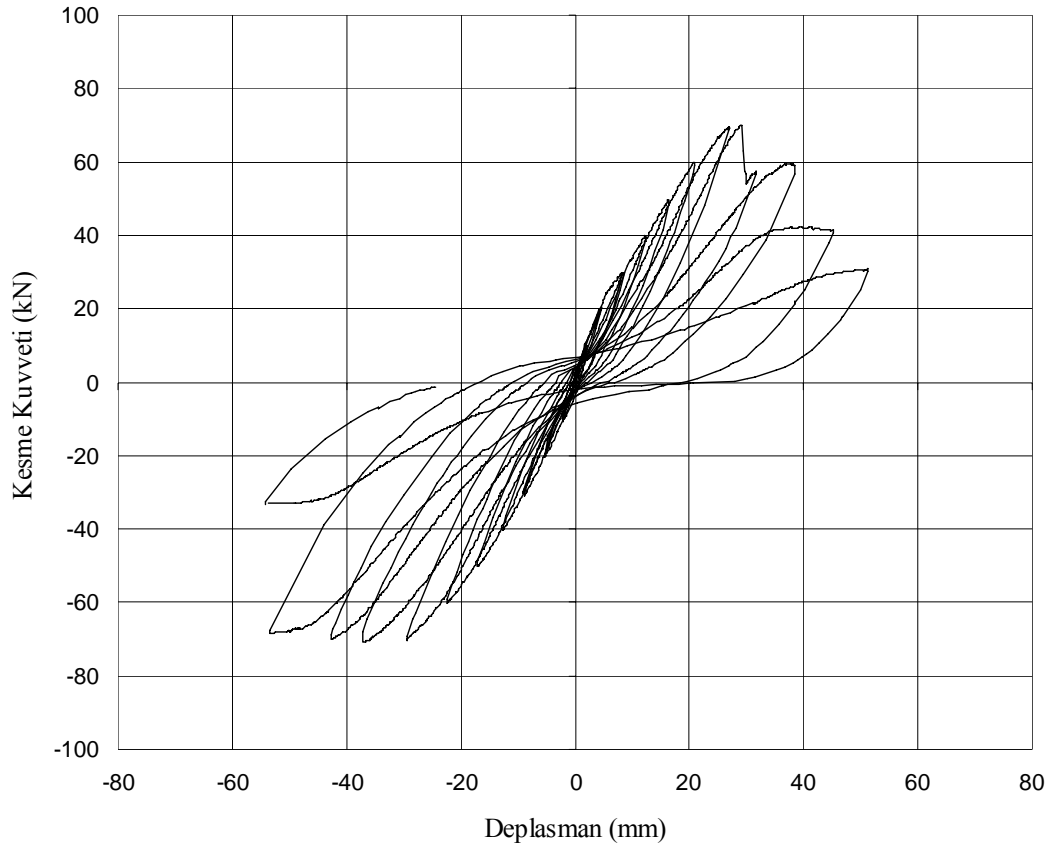
### 3.5. Deney Elemanı Kiriş-4

Kiriş-4 deney elemanı kiriş kesme açıklığı boyunca kiriş gövdesinin iki yan yüzeyine yapıştırılan CFRP levha ile güçlendirilmiştir. Şekil 3.9’da verilen yük geçmişi altında test edilen deney elemanına 14 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait yük-deplasman grafiği Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Kiriş-4 deney elemanının yük-çevrim grafiği

Kiriş-4 deney elemanının kiriş yan yüzleri CFRP levhalar ile tamamen kaplı olduğu için ilk kesme çatlakları deney elemanı yük-deplasman grafiğinde oluşan rijitlik değişiminden gözlenmiştir. Model kirişte ilk eğilme çatlakları 3. çevrimin geri yüklemesi sırasında, mesnetten 300 mm uzaklıkta 15 kN yük düzeyinde tablada oluşmuştur. Aynı çevrimde yük 20 kN düzeyindeyken mesnet ile kiriş arasında 0,1 mm genişliğinde ayrılma çatlakları gözlenmiştir. 5. çevrimin ileri yüklemesinde yük 30 kN’da iken rijitlikte meydana gelen değişim ile birlikte ilk kesme çatlakları oluşmuştur.



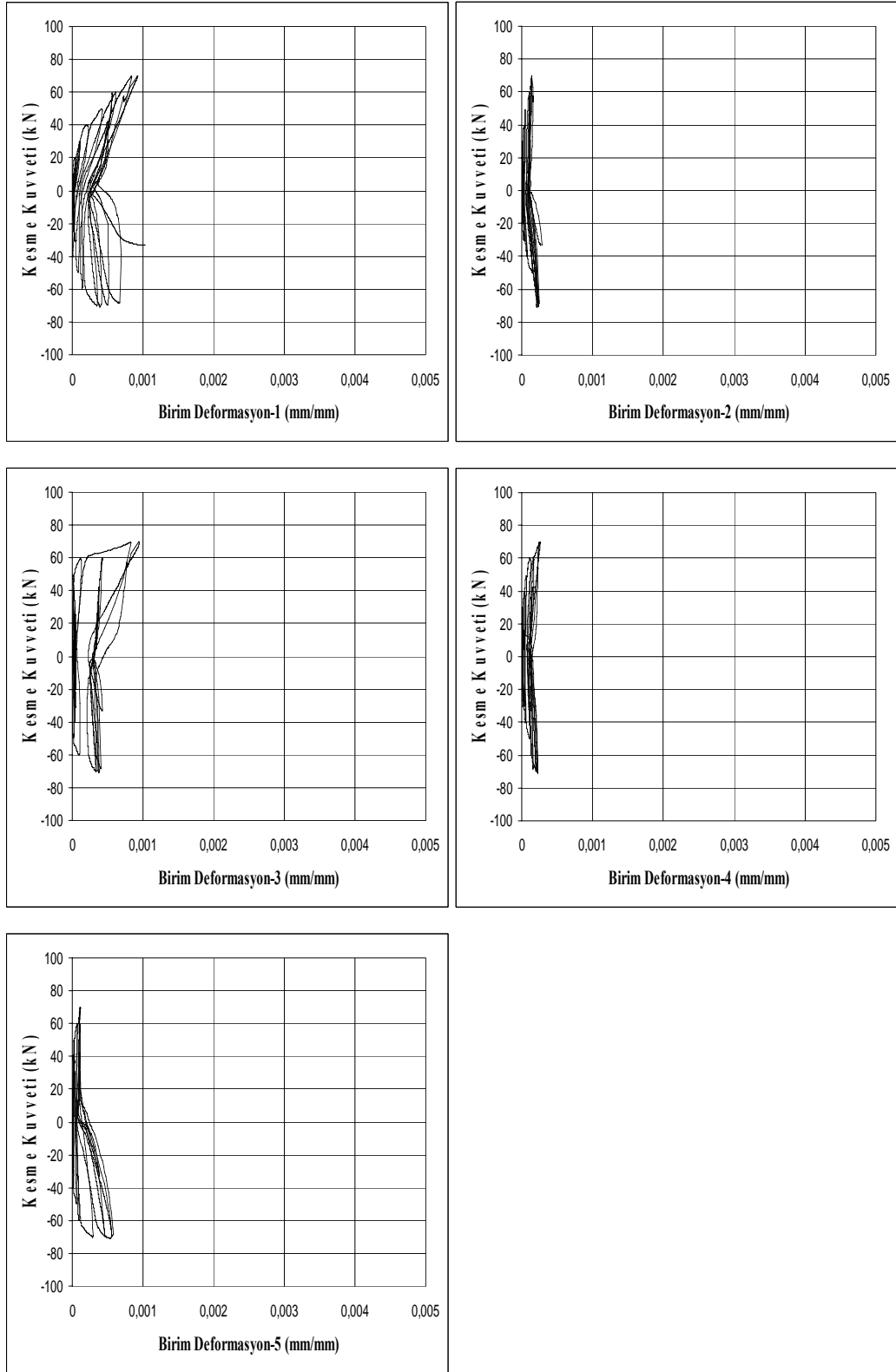
Şekil 3.10. Kiriş-4 deney elemanının yük-deplasman grafiği

Geri yüklemede 30 kN yük düzeyinde tablada oluşan eğilme çatlaklarının tabla altından ankrajların altına doğru gelişim gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca bu yük düzeyinde ayrılma çatlakları 0,2 mm genişliğine ulaşmıştır. Artan yükleme ile birlikte ayrılma çatlaklarının genişliği 1 mm'ye kadar ulaşmıştır. İleri yönde yüklemede 70,8 kN yük düzeyinde CFRP levhanın betonda kabarma meydana gelen bölgelerde deney elemanı yüzeyinden soyulması sonucunda yükte %19'luk bir azalmanın meydana geldiği gözlenmiştir. Bu aşamada kesme çatlakları kiriş eksenine paralel bir şekilde kiriş gövdesi alt kısmında 12. ankraja kadar ilerlemiş ve beton pas payını ayırmıştır. Deney elemanına 3 yük çevrimi daha uygulandıktan sonra üzerinde yük tutamaması nedeniyle yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir. Kiriş-4 deney elemanı, kesme çatlaklarında meydana gelen betondaki kabarma sonucunda CFRP levhanın bu bölgelerde deney elemanı yüzeyinden soyulması sonucunda kesme kırılması davranışı sergileyerek göçmüştür. Deney elemanının kiriş uç deplasmanı son çevrimin ileri yüklemesinde 51,2 mm, geri yüklemede ise 54,2 mm olarak

ölçülmüştür (Resim 3.8). Kiriş-4 deney elemanında ölçülen birim deformasyon değerleri homojen bir dağılım göstermiş ve değerler birbirlerine daha yakın elde edilmiştir. Ölçülen en büyük birim deformasyon 0,001019 değerindedir. Bu değer ACI-440 tarafından öngörülen maksimum değerden %75 daha küçüktür. Birim deformasyon değerinin küçük ölçülmesi, düşük beton dayanımı nedeniyle CFRP levhaların tam performanslarını sergileyemeden beton yüzeyden soyulduğunun bir göstergesidir. Şekil 3.11’de birim deformasyon ölçerlerden elde edilen grafikler sunulmuştur.



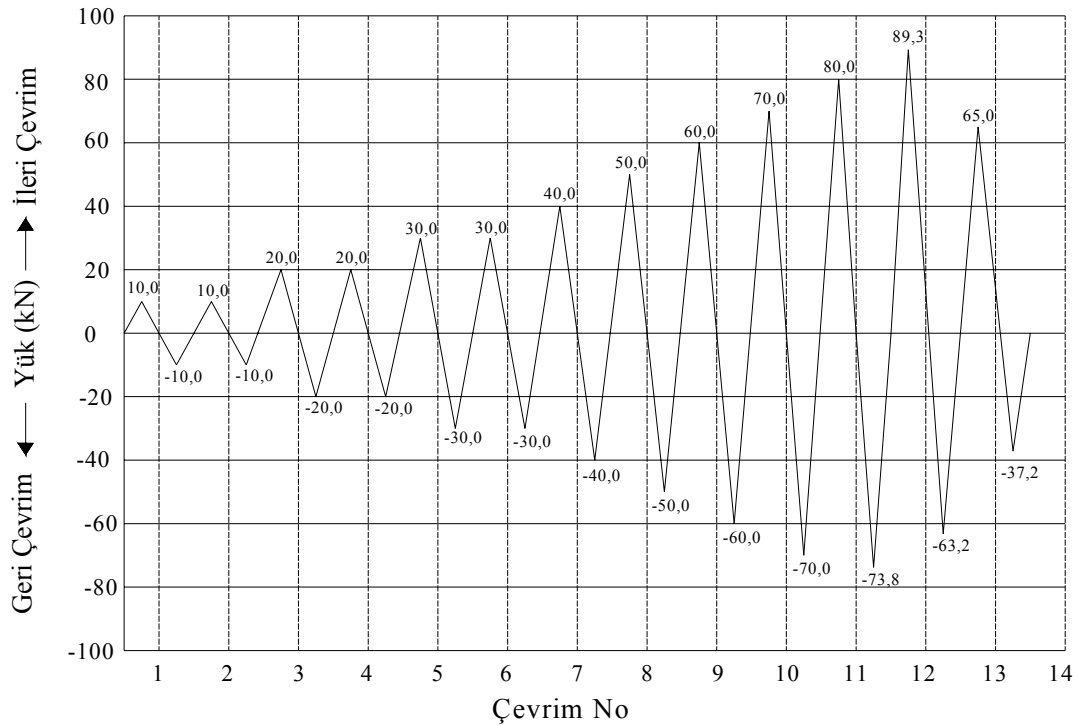
Resim 3.8. İleri yüklemeye maksimum kiriş uç deplasmanı (51,2 mm) [21]



Şekil 3.11. Kiriş-4 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

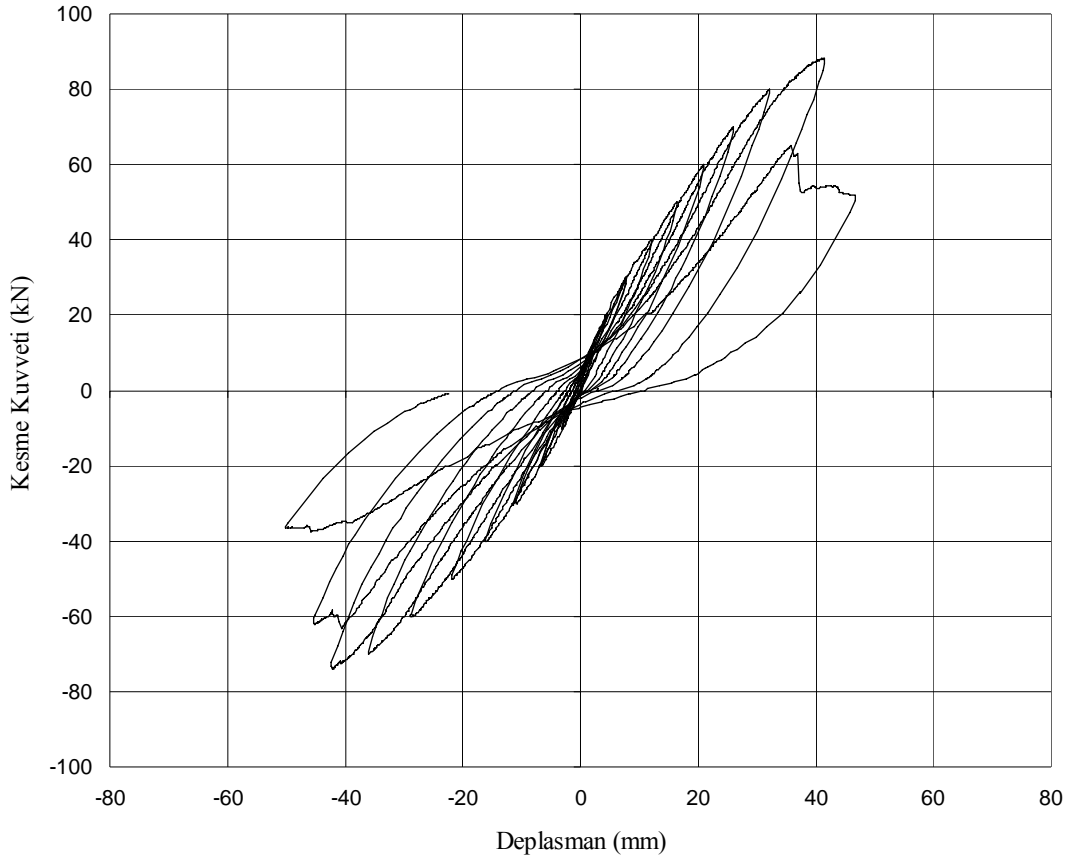
### 3.6. Deneysel Eleman Kiriş-5

Kiriş-5 deneysel elemanı kiriş gövdesi alt ve yan yüzlerine “U” şeklinde yapıştırılan CFRP levha ile güçlendirilmiştir. Deneysel elemanı Şekil 3.12’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. 13 tam yük çevriminin uygulandığı deneysel elemana ait yük-deplasman grafiği Şekil 3.13’de sunulmuştur.



Şekil 3.12. Kiriş-5 deneysel elemanın yük-çevrim grafiği

Kiriş-5 deneysel elemanında kiriş yan yüzleri CFRP levha ile kaplı olduğu için oluşan ilk kesme çatlakları deneysel elemanı yük-deplasman grafiğinde meydana gelen rijitlik değişiminden gözlenmiştir. Kirişte ilk eğilme çatlakları 10 kN yük düzeyinde 1. çevrimin geri yüklemesi sırasında mesnetten 400 mm uzaklıkta tablada oluşmuştur. Yükleme arttırıldıkça eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Deneysel elemanında ilk eğik çatlak geri yükleme yapılırken 25 kN yükte meydana gelmiştir. 30 kN’da mesnet ile kiriş arasında 0,2 mm genişliğinde ayrılma çatlakları gözlenmiştir.



Şekil 3.13. Kiriş-5 deney elemanının yük-deplasman grafiği

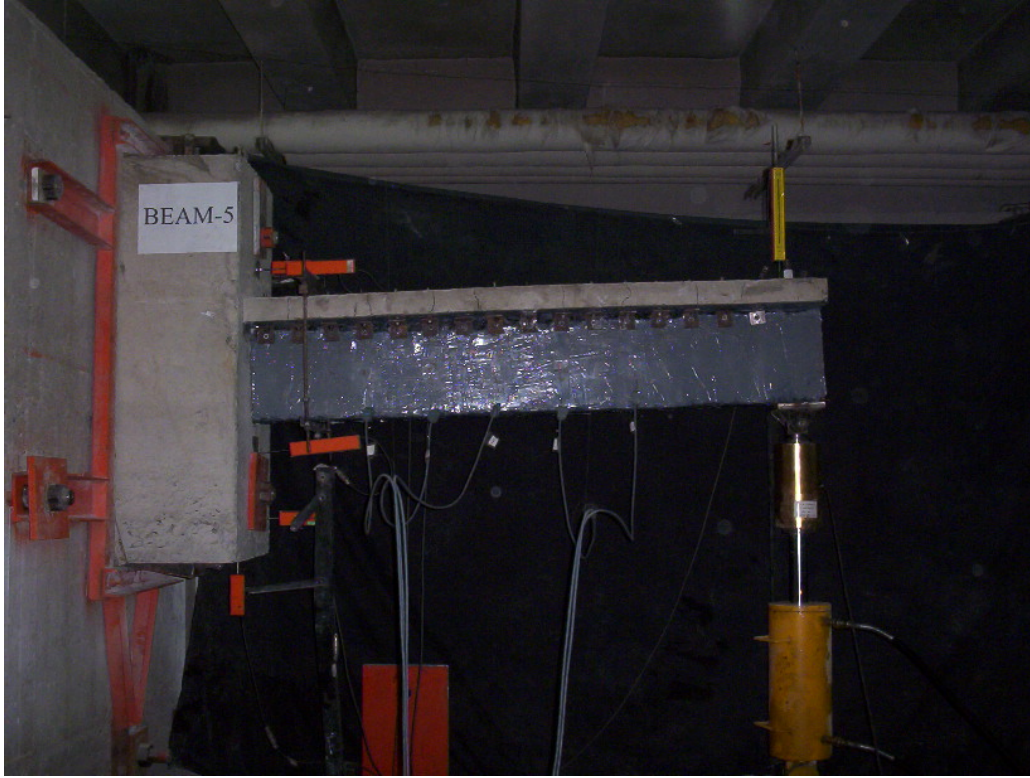
Yükün arttırılması ile birlikte eğik çatlak sayısında artış olmuştur. 70 kN yük düzeyinde ayrılma çatlaklarının genişliği 1 mm'ye ulaşmıştır. Artan yükleme ile birlikte kesme çatlaklarının oluştuğu bölgelerde betonda kabarmaların meydana geldiği ve bu bölgelerde CFRP levhanın soyulduğu gözlenmiştir. Kiriş-5 deney elemanı 12. çevrimin ileri yüklemesinde 89,3 kN yük değerinde, kiriş uç deplasmanı 42 mm seviyesindeyken boyuna donatıları akma dayanımı kapasitelerine çok yakın bir yük düzeyinde kesme çatlaklarının CFRP levhayı kesmesi sonucunda kesme kırılması davranışı göstererek göçmüştür. Ayrıca bu yük seviyesinde tabla ile gövdenin birbirinden ayrılma hareketi içinde olduğu gözlenmiştir. Bu çevrimden sonra deney elemanının yük tutamadığı gözlemlendiği için yükleme durdurularak deneye son verilmiştir. Resim 3.9'da deney elemanının deney sonrası görünümü gösterilmiştir.



Resim 3.9. Göçme sonrası Kiriş-5 deney elemanı [21]

Deney elemanı kiriş uç deplasmanı son çevrimde ileri yüklemde 46,7 mm, geri yüklemde ise 50,4 mm olarak ölçülmüştür (Resim 3.10, 3.11).

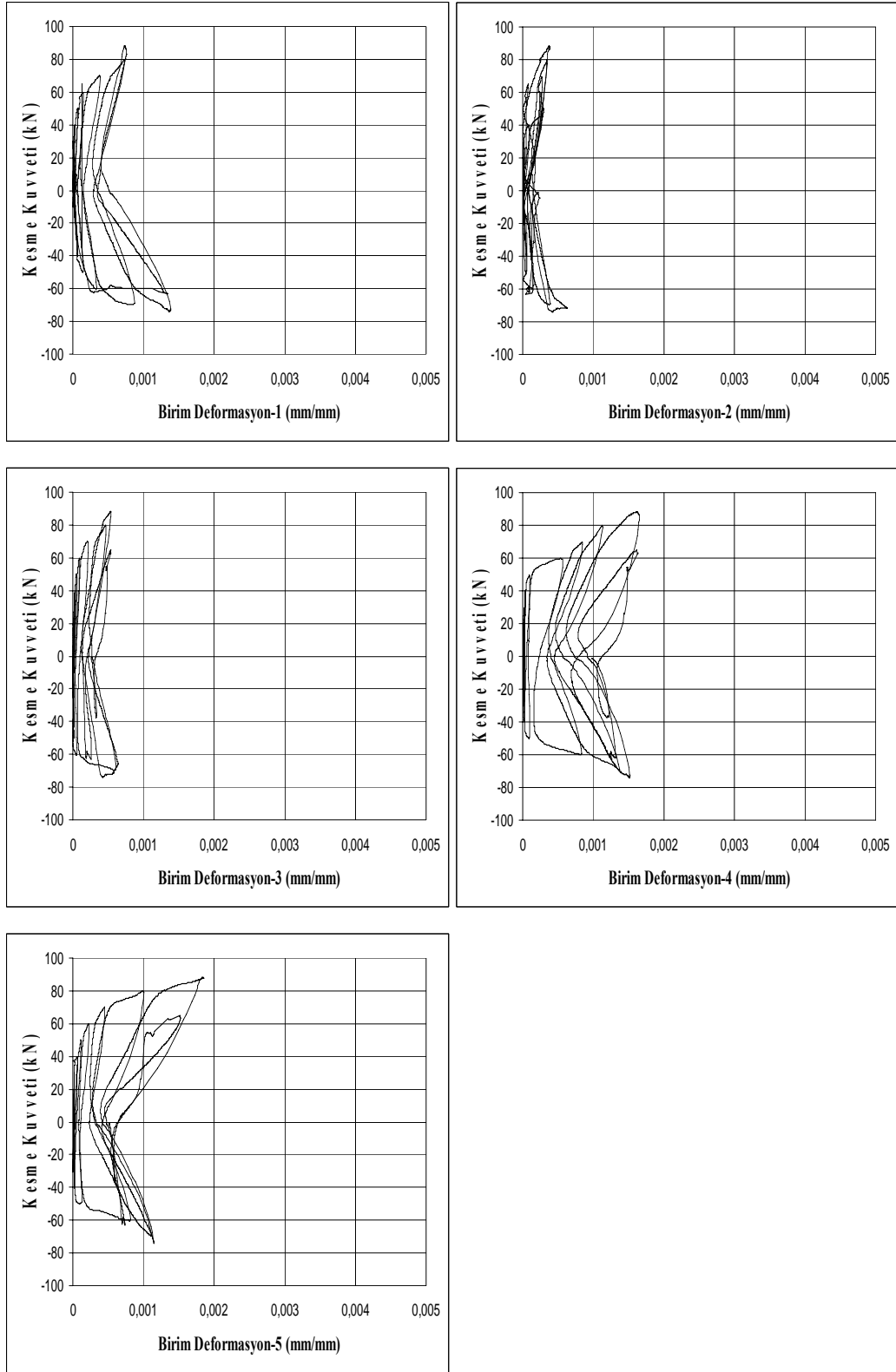
Kiriş-5 deney elemanında birim deformasyon değerleri homojen bir dağılım göstermiş ve elde edilen değerler birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Deney elemanında ölçülen en büyük birim deformasyon 0,001859 mm/mm değerindedir. Bu değer ACI-440 tarafından öngörülen maksimum değerden %54 daha küçüktür. Kiriş-5 deney elemanında birim deformasyon değerlerinin küçük olması beton dayanımının düşük olmasından dolayı CFRP levhanın tüm performansını sergileyemediğinin önemli bir göstergesidir. Şekil 3.14'de birim deformasyon ölçerlerden elde edilen birim deformasyon grafikleri sunulmuştur.



Resim 3.10. İleri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (46,7 mm) [21]



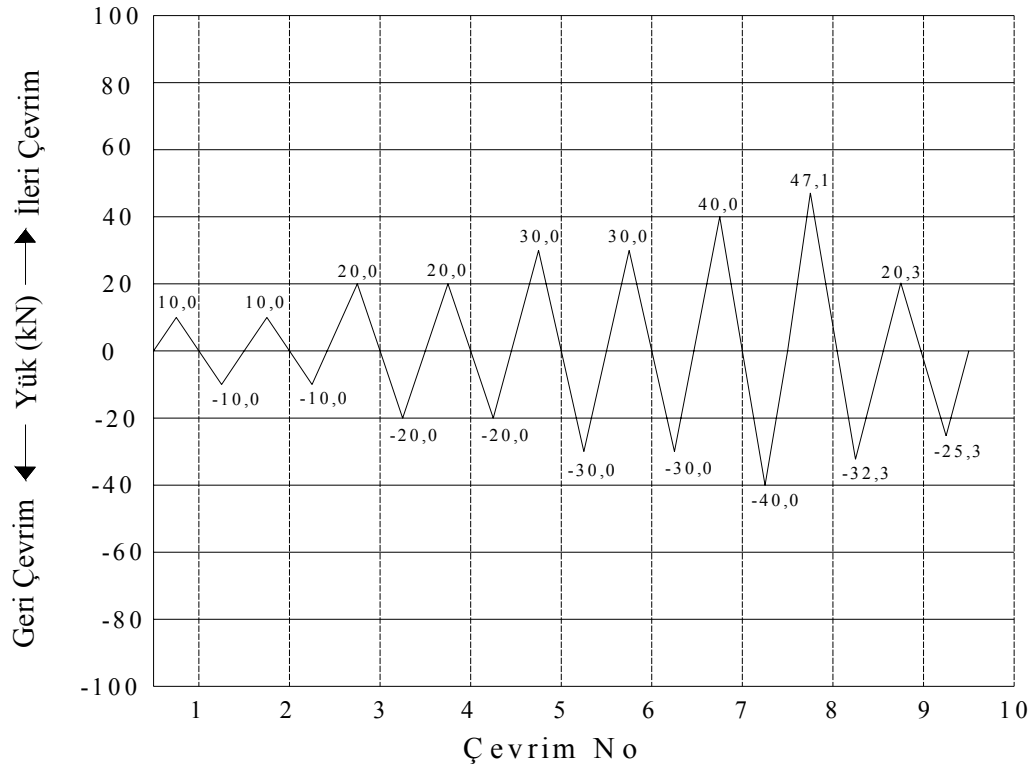
Resim 3.11. Geri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (50,4 mm) [21]



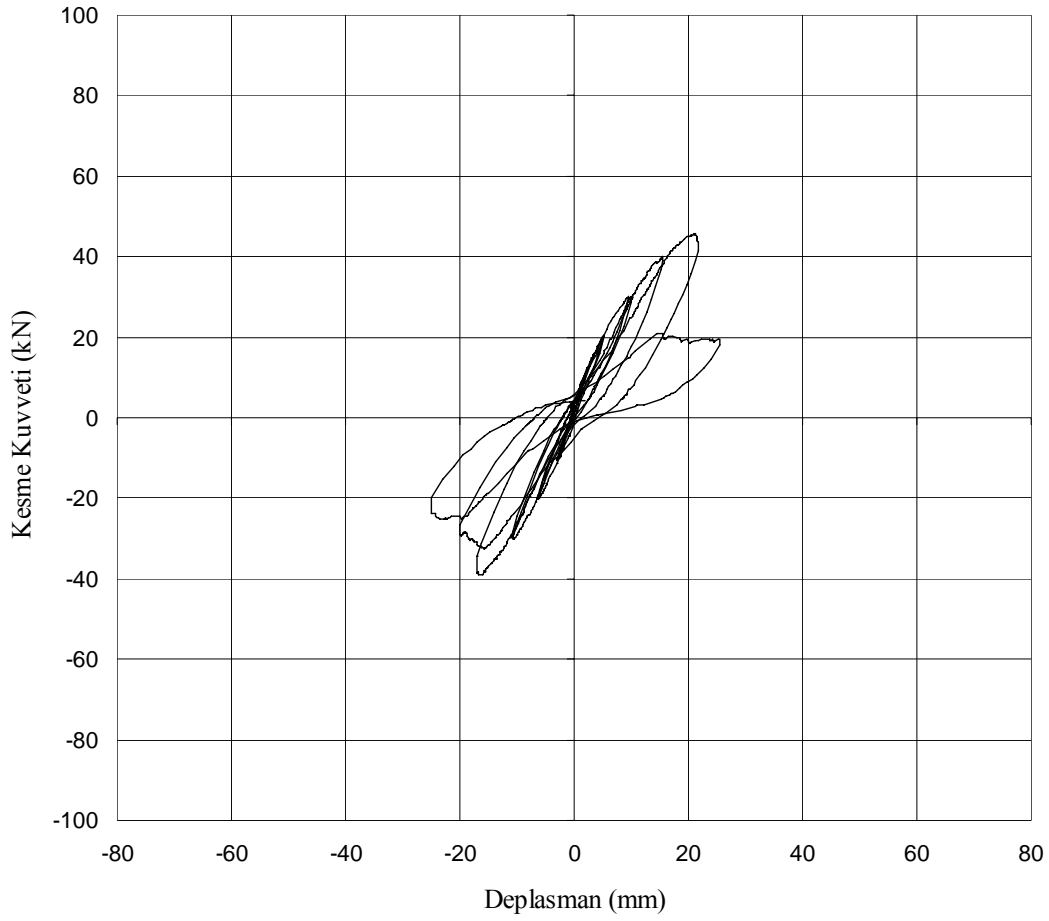
Şekil 3.14. Kiriş-5 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

### 3.7. Deney Elemanı Kiriş-6

Kiriş-6 deney elemanı 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 130 mm aralıklarla kiriş kesme açıklığı boyunca “U” şeklinde yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Kiriş-6 deney elemanında güçlendirme için kullanılan CFRP şeritlerin yerleşim düzeni Kiriş-3 deney elemanı ile özdeştir. Ancak kullanılan ankraj detayının performansının test edilebilmesi amacıyla Kiriş-6 deney elemanında CFRP şeritlerin üst uçlarına ankraj uygulanmamıştır. Şekil 3.15’de gösterilen yük geçmişi altında test edilen deney elemanına 9 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait yük-deplasman grafiği Şekil 3.16’da verilmiştir.



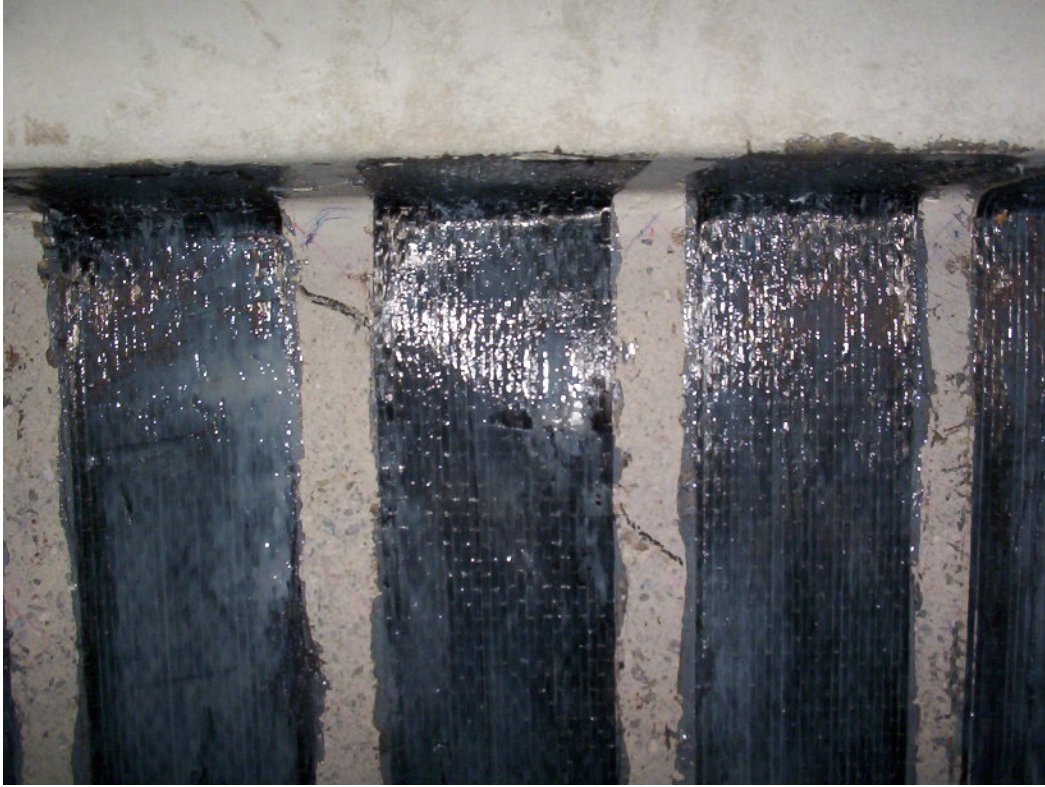
Şekil 3.15. Kiriş-6 deney elemanının yük-çevrim grafiği



Şekil 3.16. Kiriş-6 deney elemanının yük-deplasman grafiği

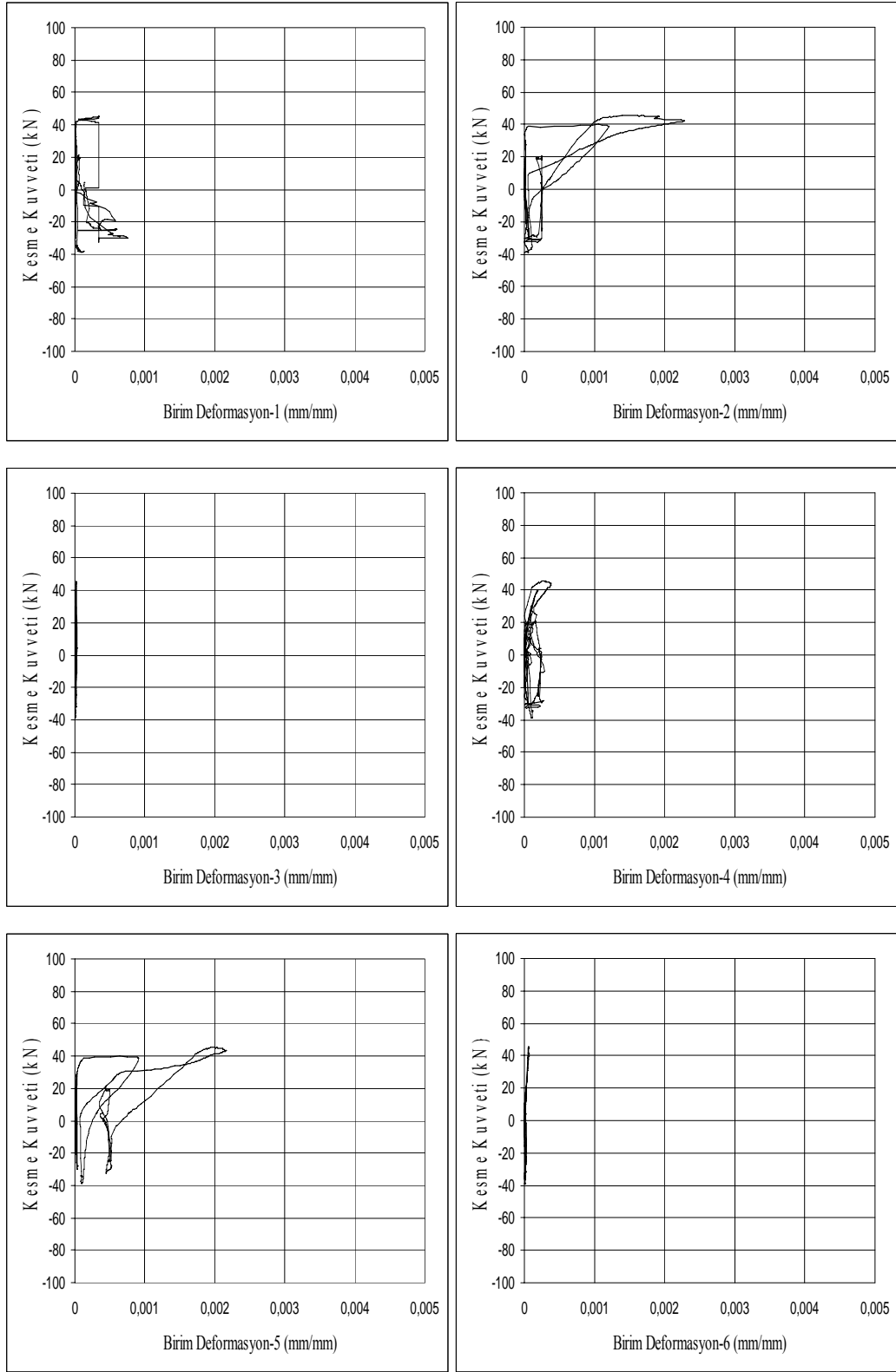
Kiriş-6 deney elemanında ilk eğilme çatlakları 3. çevrimin geri yüklemesi sırasında 15 kN yük düzeyinde mesnetten 550 mm uzaklıkta tablada oluşmuştur. Yükün artırılması ile birlikte eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Kirişte ilk eğik çatlak ileri yüklemeye 30 kN yük değerinde mesnetten 500 mm uzaklıkta 4. ve 5. CFRP şeritler arasında oluşmuştur. Geri yüklemeye 40 kN yük seviyesinde tabladaki eğilme çatlaklarının sayısında artış olmuş ve çatlak genişliği 1 mm'ye ulaşmıştır. Aynı yük seviyesinde 1 ve 2 numaralı birim deformasyon ölçerlerin bulunduğu bölgede eğik çatlak sayısında ani bir artış meydana gelmiştir. İleri yüklemeye 47,1 kN yük düzeyinde 11. CFRP şerit beton yüzeyden ayrılmış ve kesme çatlaklarının kiriş tablası ve gövdesi arasında birleşmesi sonucunda deney elemanı kesme kırılması davranışı sergileyerek göçmüştür. Bu noktadan itibaren deney elemanı yük tutamadığı için deneye son verilmiştir. Deney sırasında CFRP şeritlerin

düşük yük düzeylerinde özellikle tabla ve gövdenin birleşim bölgesinde beton yüzeyden ayrılma davranışı gösterdikleri gözlenmiştir. Resim 3.12’de CFRP şeridin altından ilerleyen kesme çatlakları gösterilmiştir.



Resim 3.12. CFRP şerit altından ilerleyen eğik çatlak [21]

Ankraj kullanılmayan Kiriş-6 deney elemanında ölçülen en büyük birim deformasyon değeri 0,0021 mm/mm olarak ölçülmüştür. Bu değer ACI-440 tarafından öngörülen maksimum birim deformasyon değerinden %46 daha küçüktür. Deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerden elde edilen birim deformasyon grafikleri Şekil 3.17’de sunulmuştur.



Şekil 3.17. Kiriş-6 deney elemanına ait birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

#### **4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Bu bölümde düşük beton dayanımlı kesme dayanımı yetersiz kirişlerin dıştan yapıştırılan CFRP şerit ve levhalarla kesmeye karşı güçlendirme tekniğinin elemanların dayanım, davranış, rijitlik, enerji tüketimi ve göçme modları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel elemanlarının boyuna donatıları akma dayanımına ulaşmadığı için sünek bir davranış sergilememiş dolayısıyla deplasman süneklik oranları hesaplanmamıştır. Dıştan yapıştırılan CFRP şerit ve levhalarla güçlendirilen kirişlerin tersinir tekrarlanır yükler altında gösterdikleri davranışlar referans kirişinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak güçlendirme tekniğinin göstermiş olduğu performans irdelenmiştir.

##### **4.1. Dayanım ve Davranış**

Deneysel elemanlarının tersinir tekrarlanır yükler altındaki davranış ve dayanımlarının değerlendirilmesinde zarf eğrileri kullanılmıştır. Zarf eğrileri her deneysel elemanın yük-deplasman grafiğinde yer alan her çevrimin maksimum noktalarının birleştirilmesiyle elde edilmiştir.

Güçlendirme uygulanan deneysel elemanlarının sergiledikleri dayanım ve davranışta güçlendirme tekniğinde kullanılan CFRP elemanların genişlikleri, kiriş kesme açıklığı boyunca yerleşim düzenleri ve uygulanan ankraj detayı etkili olmuştur. Güçlendirme uygulanmamış Kiriş-1 kontrol deneysel elemanı, CFRP şerit ve levhalarla güçlendirilmiş Kiriş-2, 3, 4, 5 ve 6 deneysel elemanlarına göre sırası ile %53, %59, %48, %58, %21 daha az dayanım sergilemiştir. Deneysel elemanlarının dayanımları ve kontrol elemanı ile karşılaştırmaları Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Kiriş-1 kontrol deneysel elemanı 37,3 kN yük taşıyabilmiş ve eğilme kapasitesinin çok altında kesme kırılması sergileyerek göçmüştür.

Çizelge 4.1. Deney elemanı dayanımları

Deney Elemanı	$V_{ölç.}$ (kN)	$\frac{V_{ölç.}}{V_{ölç.(Kiriş-1)}}$	Göçme Mekanizması
Kiriş-1 (Kontrol)	37,3	1,00	Kesme
Kiriş-2 (Güçlendirilmiş)	80,0	2,14	Kesme
Kiriş-3 (Güçlendirilmiş)	90,3	2,42	Kesme
Kiriş-4 (Güçlendirilmiş)	70,8	1,90	Kesme
Kiriş-5 (Güçlendirilmiş)	89,3	2,39	Kesme
Kiriş-6 (Güçlendirilmiş)	47,1	1,26	Kesme

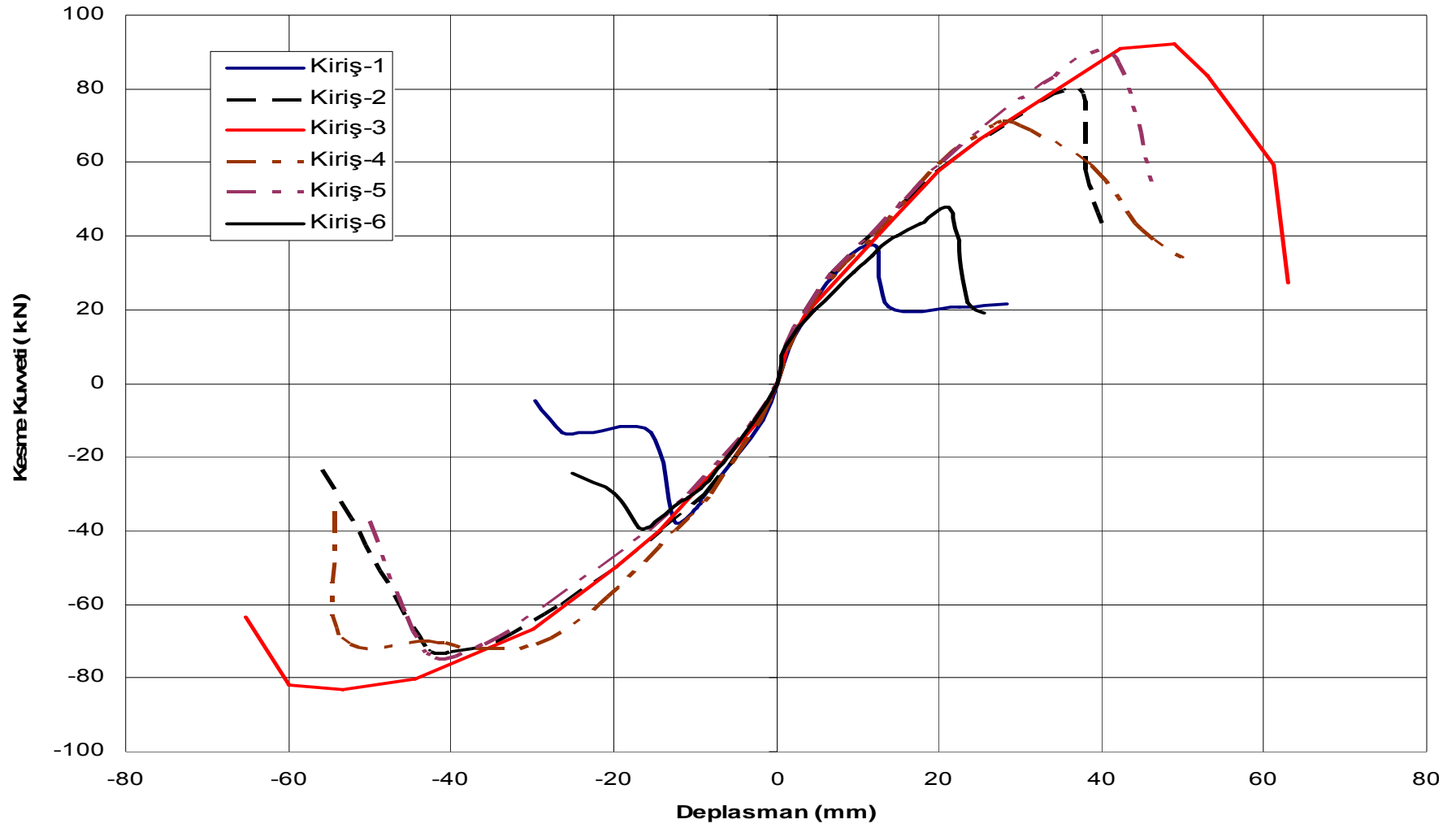
Kiriş-2 deney elemanı 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 80 mm aralıklarla, Kiriş-3 deney elemanı 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 130 mm aralıkla kiriş kesme açıklığı boyunca “U” şeklinde yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Kiriş-2 deney elemanı CFRP şeritlerin beton yüzeyinden soyulması ve ankraj bölgesinde meydana gelen CFRP doğrultusundaki kopmalar sonucunda ani ve gevrek kesme kırılması sonucunda göçmüştür. Kiriş-2 deney elemanı 80 kN yük taşımış ve Kiriş-1 kontrol deney elemanından 2,14 kat daha fazla dayanım göstermiştir. Deneysel çalışmada en büyük dayanım değerine sahip olan Kiriş-3 deney elemanı 90,3 kN yük taşıyabilmiş ve kesme çatlaklarının altından geçtiği CFRP şeritlerden bir tanesinin kiriş gövdesi alt kenarında kopması ile ani olarak göçmüştür. Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre 2,42 kat daha büyük dayanım sergilemiştir.

Kiriş-4 deney elemanı kiriş kesme açıklığı boyunca kiriş gövdesinin iki yan yüzeyine yapıştırılan CFRP levhalar ile güçlendirilmiştir. Kiriş-5 deney elemanı kiriş kesme açıklığı boyunca CFRP levhanın kiriş gövdesi alt ve yan yüzeylerine “U” şeklinde yapıştırılması sonucunda güçlendirilmiştir. Kiriş-4 deney elemanı kesme çatlaklarında meydana gelen betondaki kabarma sonucunda CFRP levhanın bu bölgelerde yüzeyden soyulması ile ani ve gevrek kesme kırılması şeklinde göçmüştür. Kiriş-4 deney elemanı 70,8 kN yük taşıyarak Kiriş-1 kontrol deney elemanından 1,90 kat daha büyük bir dayanım sergilemiştir. Kiriş-5 deney elemanı artan yükleme ile birlikte oluşan kesme çatlaklarının CFRP levhayı kesmesi

sonucunda göçmüştür. 89,3 kN yük taşıyan deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 2,39 kat daha büyük bir dayanım değerine sahiptir.

Kiriş-6 deney elemanı 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 130 mm aralıkla kiriş kesme açıklığı boyunca “U” şeklinde yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Kiriş-3 deney elemanı ile aynı CFRP yerleşim düzenine sahip Kiriş-6 deney elemanında CFRP şeritlerin üst uçlarına ankraj yerleştirilmemiştir. Kiriş-6 ve Kiriş-3 deney elemanlarının karşılaştırılarak geliştirilen ankraj detayının performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Güçlendirme uygulanan deney elemanları içerisinde en küçük dayanım artışına sahip olan Kiriş-6 deney elemanı 47,1 kN yük değerinde kesme kırılması sergileyerek göçmüştür. Deney elemanı, Kiriş-1 kontrol deney elemanından 1,26 kat daha büyük dayanım sergilemiştir. Şekil 4.1’de deney elemanlarının yükleme çevrimlerinin tepe noktalarının birleştirilmesi ile elde edilen zarf eğrileri sunulmuştur.

Güçlendirilmiş deney elemanlarından birim deformasyon ölçerler ile alınan birim deformasyon değerleri incelendiğinde CFRP şeritler ile güçlendirilen Kiriş-2, 3 ve 6 deney elemanlarında ölçülen değerler arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Kesme çatlakının altından geçtiği CFRP şeritlerde ölçülen birim deformasyon değerleri daha büyük ölçülmüştür. CFRP levhalar ile güçlendirme uygulanan Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarında birim deformasyon değerleri birbirlerine daha yakın elde edilmiştir.

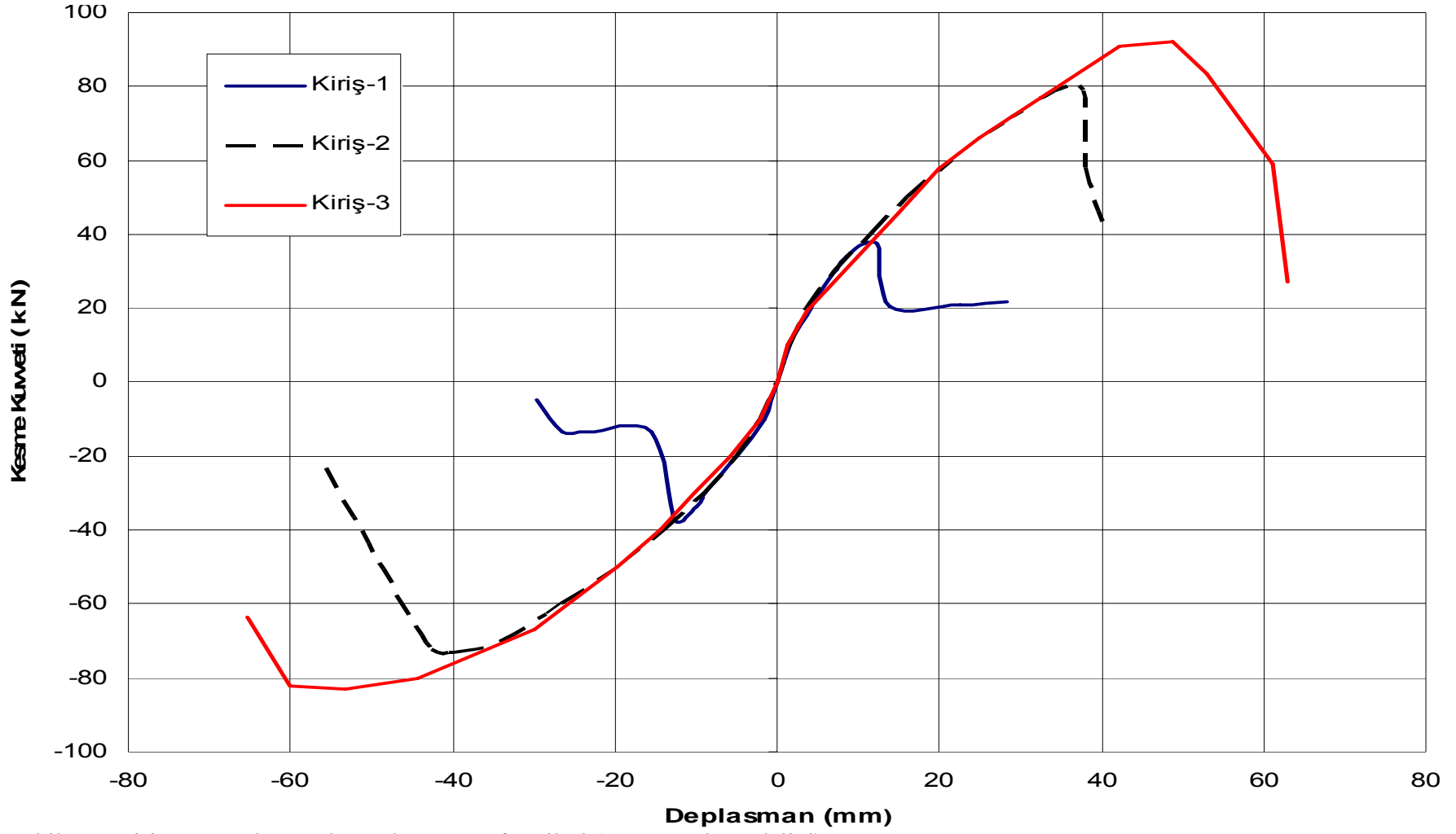


Şekil 4.1. Deney elemanlarının zarf eğrileri

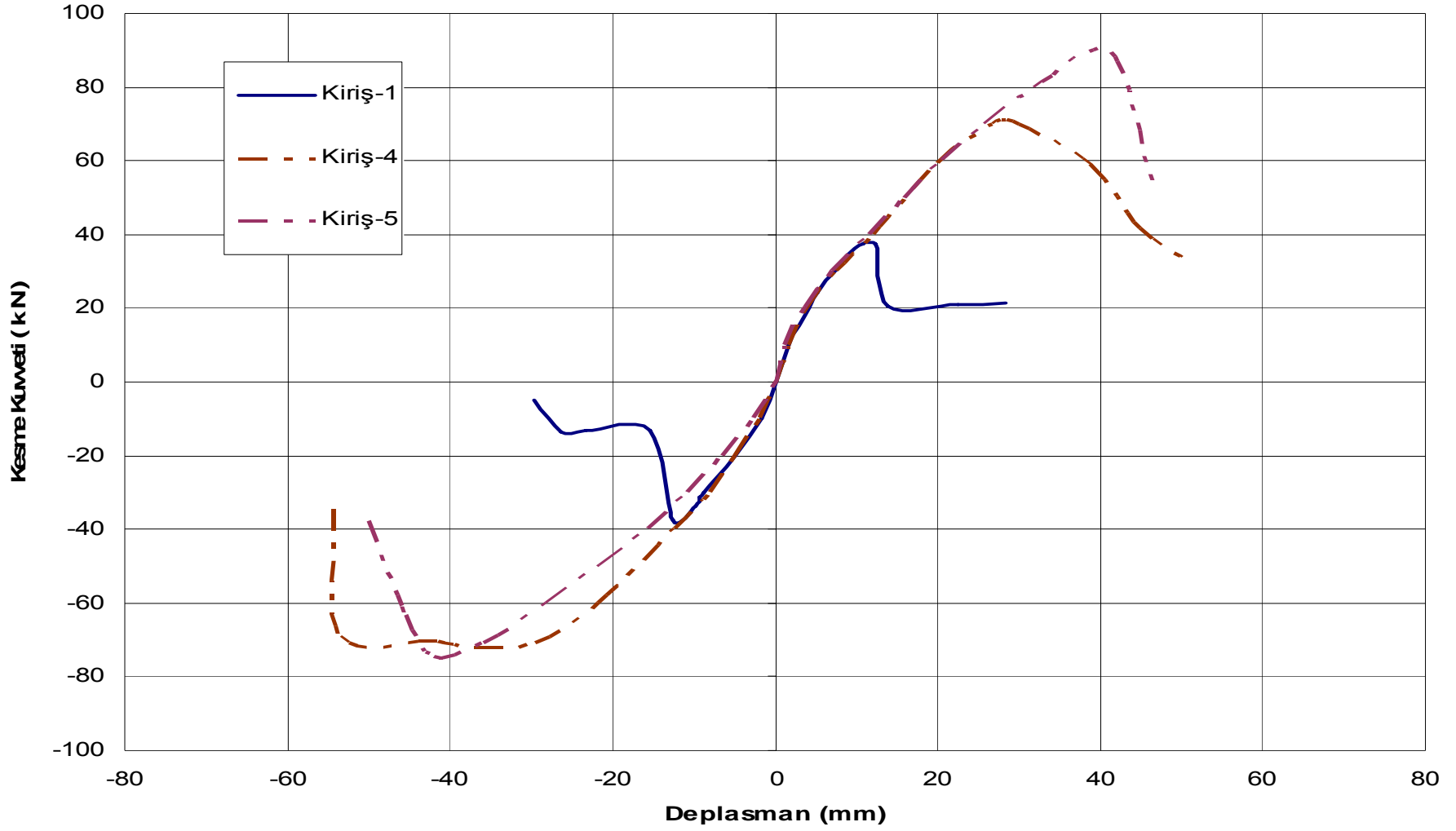
Şekil 4.2’de Kiriş-1, 2 ve 3 deney elemanlarına ait zarf eğrileri verilmiştir. CFRP şerit genişliğinin deney elemanlarının dayanım ve davranış üzerindeki etkileri bu grafik yardımıyla yorumlanmıştır. Kiriş-1 kontrol deney elemanı 37,3 kN, Kiriş-2 deney elemanı 80 kN yük taşıyabilmiştir. Kiriş-2 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre 2,14 kat daha fazla yük taşımıştır. Kiriş-3 deney elemanı 90,3 kN yük taşımıştır. Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre 2,42 kat, Kiriş-2 deney elemanına göre 1,13 kat daha fazla yük taşımıştır. CFRP şerit genişliğinin arttırılması kirişin dayanım ve davranışını etkilemiş ve deney elemanının dayanımında artış meydana getirdiği gözlenmiştir.

Şekil 4.3’de Kiriş-1, 4 ve 5 deney elemanlarına ait zarf eğrileri verilmiştir. Bu grafik yardımıyla CFRP levhaların kiriş gövdesinin iki yan yüzüne ve “U” şeklinde kiriş gövdesi altına yapıştırılmasının deney elemanlarının dayanım ve davranış üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Kiriş-4 deney elemanı 70,8 kN, Kiriş-5 deney elemanı 89,3 kN yük taşımıştır. Kiriş-4 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 1,90 kat daha fazla yük taşımıştır. CFRP levhaların kiriş gövdesi alt ve yan yüzeylerine “U” şeklinde yapıştırıldığı Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 2,39 kat, CFRP levhaların sadece kiriş yan yüzeylerine yapıştırıldığı Kiriş-4 deney elemanından ise 1,26 kat daha fazla dayanım sergilemiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar CFRP levhalar ile güçlendirilen Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarının beton dayanımı düşüklüğünden CFRP şeritler ile güçlendirilen deney elemanlarından çok daha olumsuz etkilendiğini göstermiştir. Düşük beton dayanımı nedeniyle kesme çatlaklarındaki sürtünme etkisi sonucunda çatlak bölgelerinde betonda ezilme ve kabarmalar oluşmuş ve CFRP levhaların daha düşük yük düzeylerinde yüzeyden ayrılmasına neden olarak istenilen performansın gösterilmesini engellemiştir.



Şekil 4.2. Kiriş-1, 2, 3 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP şerit genişliği)

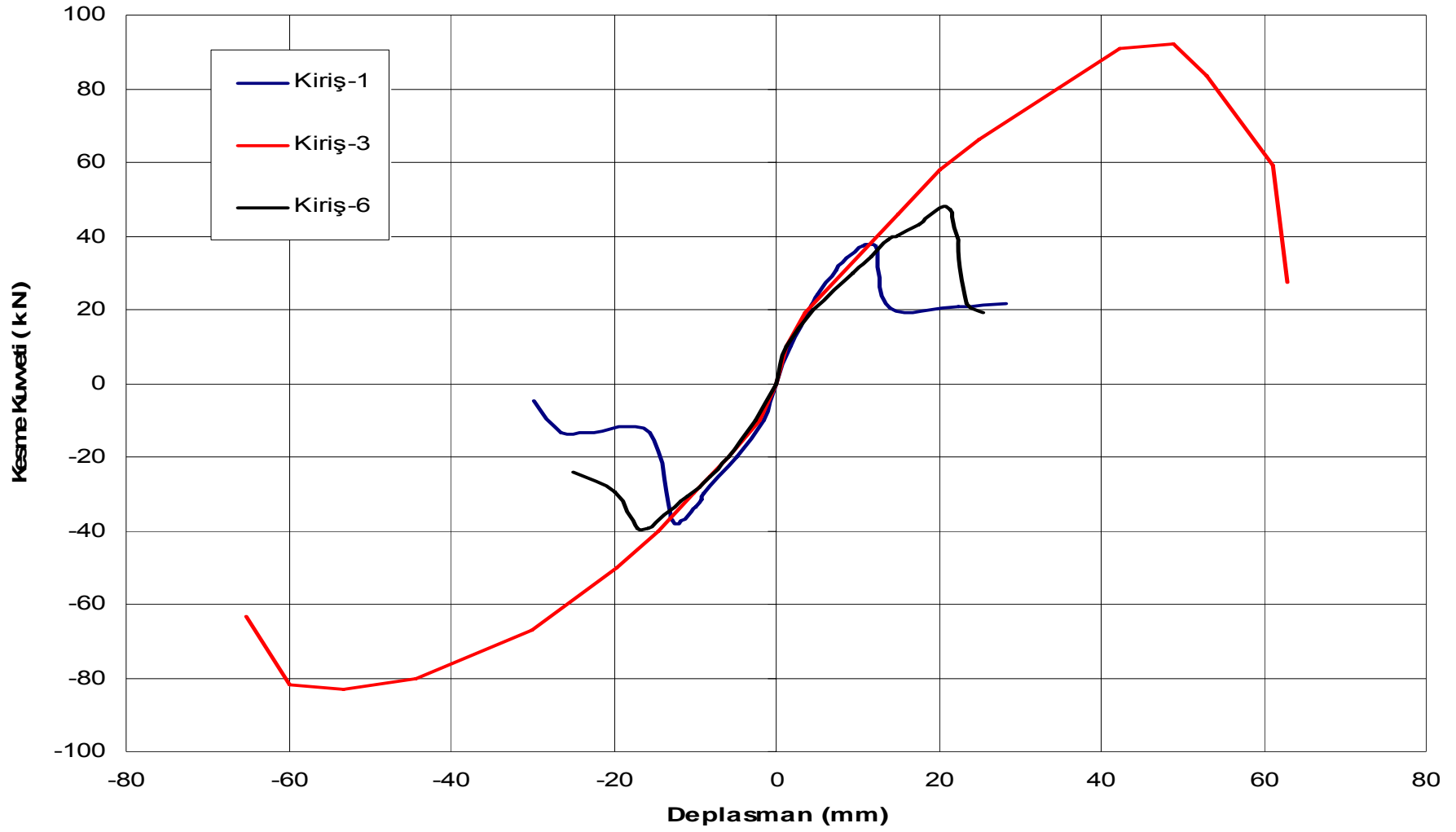


Şekil 4.3. Kiriş-1, 4, 5 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP levha yapıştırma düzeni)

Kiriş-5 deney elemanı, deneysel çalışmada Kiriş-3 deney elemanından sonra en fazla yük taşıyan deney elemanıdır. Elde edilen sonuçlarda CFRP levhaların “U” şeklinde kiriş gövdesinin iki yan yüzüne ve kiriş gövdesi altına yapıştırılmasının elemanların dayanım ve davranışını etkilediğini göstermiştir. Kiriş-5 deney elemanının yük taşıma kapasitesinde Kiriş-4 deney elemanına göre %26’lık bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca Kiriş-5 deney elemanının boyuna donatıları akma dayanımı sınırına çok yaklaşmıştır. Kiriş-4 deney elemanında kiriş gövdesi alt kısmında uygulanan ankraj detayı başarılı bir performans sergileyerek bu bölgede CFRP levhaların uçlarının soyulmasını engellemiştir.

Geri yüklemede Kiriş-4 deney elemanının davranışı Kiriş-5 deney elemanına benzerlik göstermiştir. İleri yüklemede 70,8 kN yük taşıyan Kiriş-4 deney elemanı geri yüklemede 70,1 kN yük taşıyarak, 73,8 kN yük taşıyan Kiriş-5 deney elemanından %5 daha az dayanım sergilemiştir. Kiriş-4 ve 5 deney elemanının kiriş gövdesi üstünde özdeş güçlendirme tekniğine sahip olmasından dolayı geri yüklemede kiriş dayanımları birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Şekil 4.4’de Kiriş-1, 3 ve 6 deney elemanlarına ait zarf eğrileri verilmiştir. Geliştirilen ankraj detayının tersinir tekrarlanır yükleme altındaki performansı bu grafik yardımıyla yorumlanmıştır. 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 130 mm aralıkla kiriş kesme açıklığına “U” şeklinde yapıştırıldığı Kiriş-6 deney elemanının CFRP düzenlemesi Kiriş-3 deney elemanı ile özdeştir. Ancak Kiriş-6 deney elemanında CFRP şeritlerin uç noktalarında uygulanan ankraj detayı kullanılmamıştır. Kiriş-6 deney elemanı 47,1 kN yük taşımıştır. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından %26 daha büyük dayanım sergilemiştir. Grafikte görüldüğü gibi Kiriş-6 deney elemanının davranışı Kiriş-1 kontrol deney elemanına oldukça benzerdir. Ancak bu grafikten elde edilen en önemli sonuç Kiriş-6 ve 3 deney elemanları arasında dayanım ve davranışta gözlenen farktır. Kiriş-6 deney elemanı boyuna donatıları akma dayanımına çok yaklaşan Kiriş-3 deney elemanına göre %48 daha az dayanım sergileyerek kesme kırılmasından dolayı göçmüştür.



Şekil 4.4. Kiriş-1, 3, 6 deney elemanlarının zarf eğrileri (Ankraj detayı)

Elde edilen bu sonuç geliştirilen ankraj detayının tersinir tekrarlanır yükler altında dayanım yönünden oldukça iyi bir performans sergilediğinin bir göstergesidir.

Kiriş-6 deney elemanında ölçülen birim deformasyon değerleri Kiriş-3 deney elemanından elde edilen değerlerden %55 daha küçük ölçülmüştür. Ankraj kullanılan Kiriş-3 deney elemanından elde edilen birim deformasyon değerlerinin Kiriş-6 deney elemanına göre daha büyük olması CFRP şeritlerin daha büyük kesme kuvveti taşıdığını ve ankrajların dayanım üzerindeki olumlu etkisinin önemli bir kanıtıdır.

#### **4.2. Rijitlik**

Deney elemanlarının rijitlikleri deney sonucu elde edilen yük-deplasman grafikleri kullanılarak ilk eğilme çatlağının oluştuğu nokta ve akma noktasında olmak üzere iki farklı noktada hesaplanması düşünülmüştür. Bu noktalardan başlangıç noktasına çizilen doğrunun eğimi rijitlik değerini vermektedir. Başlangıç rijitliği değerleri deney elemanında ilk eğilme çatlağı gözlemlendiği yük değerini başlangıç noktasına birleştiren doğrunun eğimi kullanılarak hesaplanmıştır.

Deneyel çalışmada deney elemanlarının boyuna donatıları akma dayanımına ulaşmadığından dolayı akma rijitliği değerleri hesaplanmamıştır. Deney elemanlarının ileri ve geri çevrimlerde hesaplanan başlangıç rijitliği değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Deney elemanları içerisinde en büyük başlangıç rijitliği değerine Kiriş-6 deney elemanı sahiptir (8,06 kN/mm). Kiriş-1 kontrol deney elemanı ileri çevrimde en küçük başlangıç rijitliğine (5,88 kN/mm) sahiptir. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre 1,37 kat daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. Kiriş-1 kontrol deney elemanı CFRP şerit ve levhalarla güçlendirilmiş Kiriş-2, 3, 4, 5, 6 deney elemanlarına göre ileri çevrimde sırası ile %5, %22, %8, %26, %27 daha az başlangıç rijitliği göstermiştir.

Çizelge 4.2. Deney elemanları rijitlik değerleri (kN/mm)

Deney Elemanı No	Başlangıç	
	İleri Çevrim	Geri Çevrim
1	5,88	4,56
2	6,17	4,72
3	7,52	5,17
4	6,41	5,04
5	7,94	4,89
6	8,06	5,34

Çizelge 4.3’de Kiriş-1 kontrol deney elemanı ile CFRP şerit ve levhalarla güçlendirilmiş deney elemanları arasındaki rijitlik farkı, ileri ve geri yük çevrimleri için ayrı ayrı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre 1,37 kat daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. Kiriş-1 kontrol deney elemanı CFRP şerit ve levhalarla güçlendirilmiş Kiriş-2, 3, 4, 5, 6 deney elemanlarına göre ileri çevrimde sırası ile %5, %22, %8, %26, %27 daha az başlangıç rijitliği göstermiştir.

Geri çevrimde de Kiriş-1 kontrol deney elemanı en küçük başlangıç rijitliği değerine sahiptir (4,56 kN/mm). Geri çevrimde Kiriş-1 kontrol deney elemanı Kiriş-2, 3, 4, 5, 6 deney elemanlarına göre sırası ile %4, %12, %10, %7, %15 daha az rijitlik sergilemiştir. CFRP elemanlar ile güçlendirilen deney elemanları kontrol deney elemanına göre daha büyük rijitlik değerleri sergilemişlerdir.

Çizelge 4.3. Güçlendirme tekniğinin başlangıç rijitlikleri üzerindeki etkisi

Deney Elemanı No	Başlangıç	
	İleri Çevrim	Geri Çevrim
	$\frac{R_{Kiriş-i}}{R_{Kiriş-1}}$	$\frac{R_{Kiriş-i}}{R_{Kiriş-1}}$
1	1,00	1,00
2	1,05	1,04
3	1,28	1,13
4	1,09	1,11
5	1,35	1,07
6	1,37	1,17

CFRP şerit genişliğinin değişken olarak alındığı Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanlarının rijitlikleri incelendiğinde Kiriş-3 deney elemanının Kiriş-2 deney elemanına göre daha büyük başlangıç rijitliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Kiriş-2 deney elemanının başlangıç rijitliği Kiriş-1 deney elemanından ileri çevrimde 1,05 geri çevrimde ise 1,04 kat daha fazladır. İleri yüklemde Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 1,28 kat, Kiriş-2 deney elemanından 1,22 kat daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. Geri çevrimde Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 1,13 kat, Kiriş-2 deney elemanından 1,09 kat daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir.

CFRP levha yapıştırma düzeninin kiriş gövdesi iki yan yüzü ve “U” şeklinde olmak üzere iki farklı şekilde uygulandığı Kiriş-4 ve Kiriş-5 deney elemanlarında ileri çevrimde Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-4 deney elemanından 1,24 kat, geri çevrimde ise Kiriş-4 deney elemanı Kiriş-5 deney elemanından 1,03 kat daha fazla başlangıç rijitliği göstermiştir. Kiriş-4 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre ileri çevrimde 1,09 kat, geri çevrimde ise 1,11 kat daha fazla başlangıç rijitliği

sergilemiştir. Kiriş-5 deney elemanı da Kiriş-1 kontrol deney elemanına göre ileri ve geri çevrimde sırası ile 1,35 ve 1,07 kat daha fazla başlangıç rijitliği göstermiştir.

Kullanılan ankraj detayının performansının incelendiği Kiriş-3 ve Kiriş-6 deney elemanlarında ileri ve geri yük çevrimlerinde Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-3 deney elemanına göre 1,07 ve 1,03 kat daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. İleri çevrimde Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 1,28 kat, Kiriş-6 deney elemanı ise Kiriş-1 deney elemanından 1,37 kat daha fazla başlangıç rijitliği göstermiştir. Geri çevrimde Kiriş-3 ve Kiriş-6 deney elemanları Kiriş-1 kontrol deney elemanından sırası ile 1,13 ve 1,17 kat daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir.

### 4.3. Enerji Tüketimi

Deney elemanlarının enerji tüketimleri uygulanan her yük çevrimi için yük-deplasman grafikleri altında oluşan kapalı alanın hesaplanması sonucunda elde edilmiştir. Enerji tüketim değerleri hesaplanırken her çevrimde tüketilen enerji kümülatif olarak toplanmıştır. Deney elemanlarının enerji tüketim değerleri maksimum yük değerlerinin %75 seviyesine düştüğü yük düzeyine kadar olan çevrimler göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Deney elemanlarına ait enerji tüketim değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimleri (kN-mm)

Deney Elemanı No	Enerji Tüketimi	$E_{Kiriş-X} / E_{Kiriş-1}$
Kiriş-1	1834	1,00
Kiriş-2	10340	5,64
Kiriş-3	23578	12,86
Kiriş-4	14110	7,69
Kiriş-5	14481	7,90
Kiriş-6	3034	1,65

Deney programı içinde en fazla enerjiyi Kiriş-3 deney elemanı tüketmiştir. Kiriş-3 deney elemanı 23578 kN-mm enerji tüketmiştir. Kiriş-1 kontrol deney elemanı deneysel çalışmadaki en az enerji tüketen deney elemanıdır. Kiriş-1 kontrol deney elemanı 1834 kN-mm enerji tüketme kapasitesine ulaşmıştır. Güçlendirme uygulanmış deney elemanları arasında Kiriş-3 deney elemanından sonra en fazla enerji tüketimini CFRP levhalar ile güçlendirilen Kiriş-5 deney elemanı gerçekleştirmiştir. Kiriş-5 deney elemanının enerji tüketim değeri 14481 kN-mm'dir. Diğer deney elemanları Kiriş-2, 4, 6 ise sırası ile 10340, 14110 ve 3034 kN-mm enerji tüketmiştir. Güçlendirilen deney elemanları içerisinde en az enerji tüketimini 3034 kN-mm ile ankraj kullanılmayan Kiriş-6 göstermiştir.

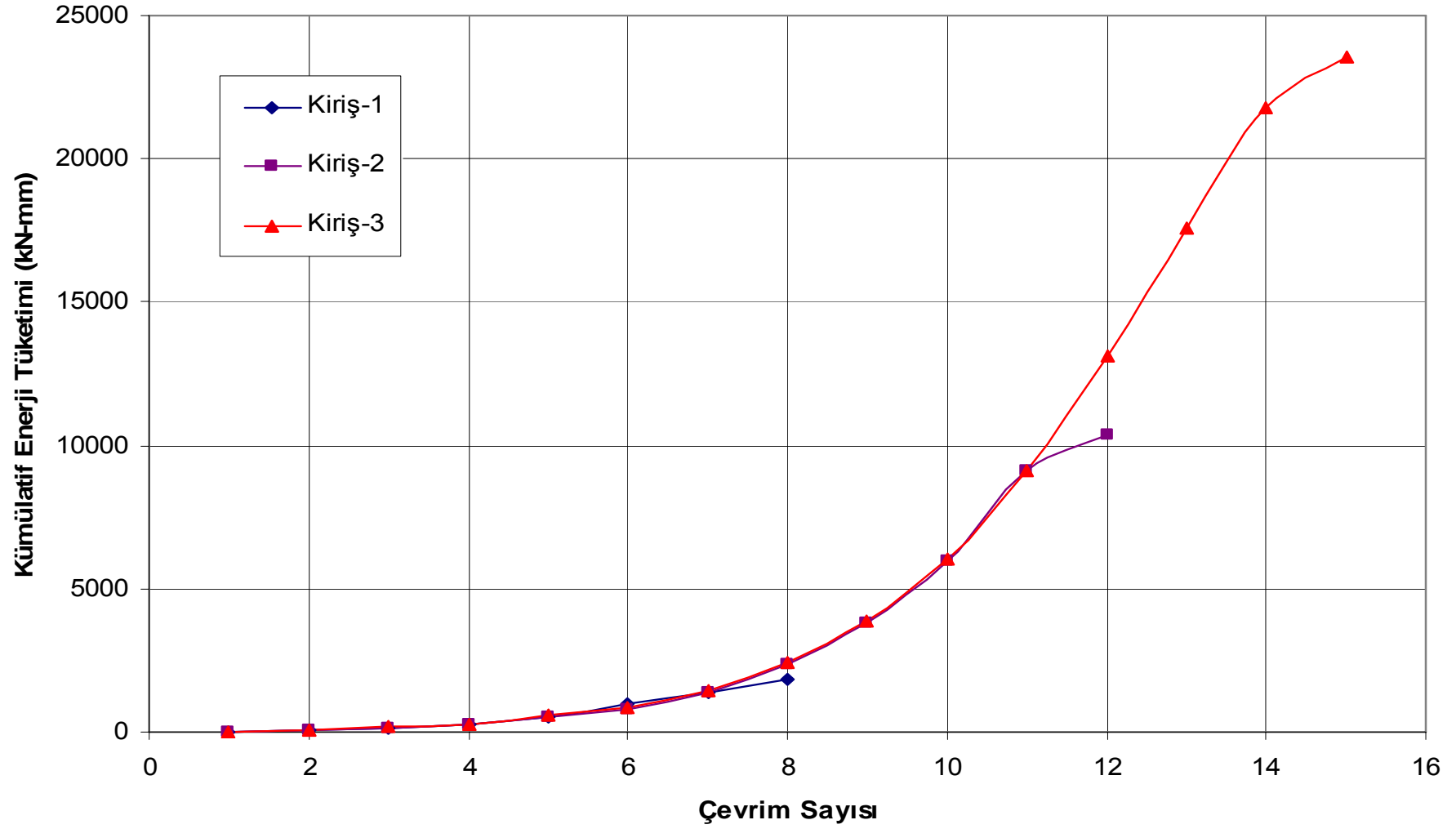
Çizelge 4.4'de deney elemanlarının kümülatif enerji tüketim değerleri ve CFRP şerit ve levhalar ile güçlendirilmiş deney elemanları ile kontrol deney elemanının enerji tüketim değerleri karşılaştırılmıştır.

CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilen deney elemanları içerisinde en büyük enerji tüketimini Kiriş-3 deney elemanı gerçekleştirmiştir. Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 12,86 kat daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilen diğer deney elemanları Kiriş-2 ve Kiriş-6, Kiriş-1 kontrol deney elemanından sırası ile 5,64 ve 1,65 kat daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerle yapılan güçlendirme yöntemi kesme dayanımı yetersiz kirişlerin birikimli enerji tüketim kapasitelerini önemli oranlarda arttırmıştır.

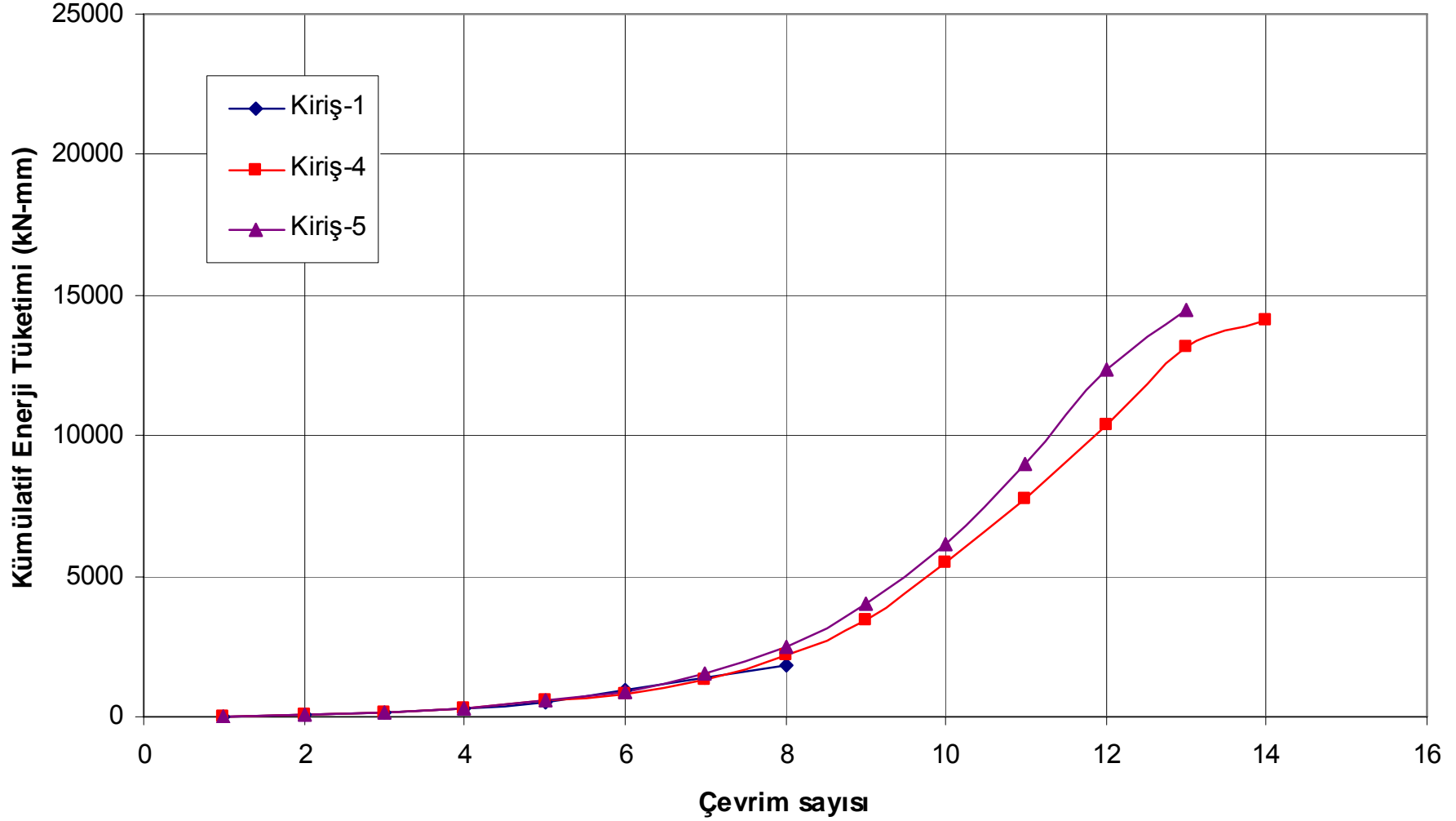
Şekil 4.5'de Kiriş-1, 2, 3 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri verilmiştir. 50 ve 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerle güçlendirilen Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanlarının enerji tüketme kapasitelerinde kontrol elemanına göre önemli bir artış meydana gelmiştir. 23578 kN-mm enerji tüketim değeri ile aynı zamanda deney programındaki en yüksek enerji tüketme kapasitesine sahip olan Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 12,86 kat, 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerle güçlendirilen Kiriş-2 deney elemanından ise 2,28 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Kiriş-2 deney elemanı 10340 kN-mm enerji tüketerek 1834 kN-mm enerji tüketen Kiriş-1 kontrol deney elemanından 5,64 kat daha fazla enerji

tüketmiştir. Güçlendirme tekniğinde CFRP şerit genişliğinin değişmesi deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri üzerinde doğrudan etkili olmuştur. CFRP şerit genişliğinin arttırılması sonucunda deney elemanının tükettiği enerji miktarı da artmıştır. CFRP şerit genişliğinin 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması sonucunda enerji tüketimi %128 artmıştır. İlk çevrimlerde benzer davranış sergileyen deney elemanlarının enerji tüketimleri sınırlı kalmıştır. Kiriş-3 deney elemanının boyuna donatılarının akma dayanımına çok yaklaşması ve taşıma gücüne diğer elemanlara göre daha büyük yük seviyesinde ulaşmasından dolayı Kiriş-3 deney elemanı diğer deney elemanlarından belirgin bir şekilde daha fazla enerji tüketmiştir.

Şekil 4.6'da Kiriş-1, 4, 5 deney elemanlarına ait enerji tüketim grafikleri verilmiştir. Kiriş-4 deney elemanı 14110 kN-mm enerji tüketim değeri ile Kiriş-1 kontrol deney elemanından 7,69 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Kiriş-5 deney elemanı 14481 kN-mm enerji tüketmiş ve Kiriş-1 kontrol deney elemanından 7,90 kat daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP levhalar ile güçlendirilen Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarının enerji tüketimleri oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-4 deney elemanından %3 daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP levhanın kiriş alt yüzünde de devam ettirilmesi ve kiriş gövdesi altında kullanılan ankraj detayı enerji tüketiminde etkili olmuştur.



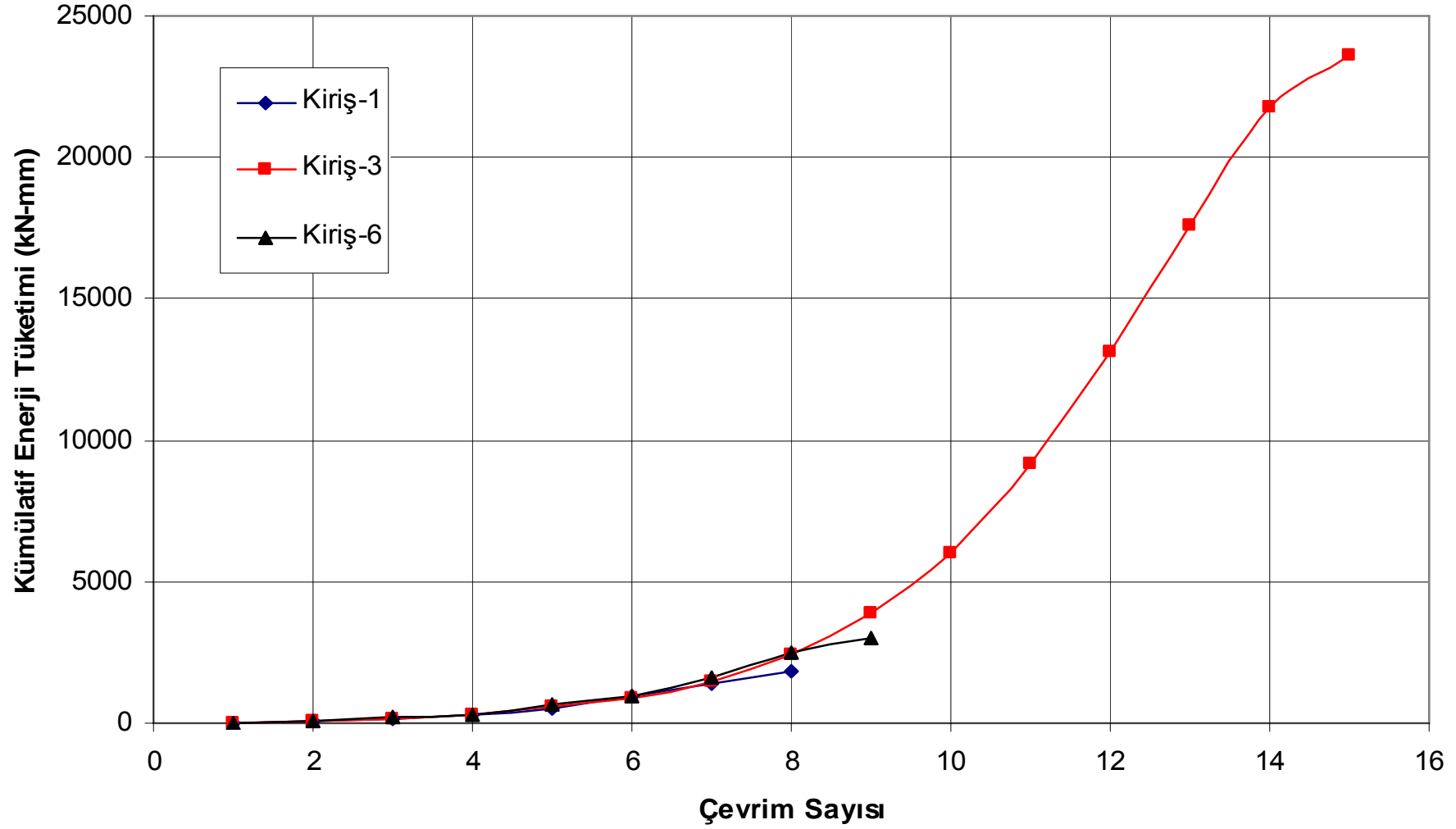
Şekil 4.5. Kiriş-1, 2, 3 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri



Şekil 4.6. Kiriş-1, 4, 5 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri

Şekil 4.7’de Kiriş-1, 3, 6 deney elemanlarına ait enerji tüketim grafikleri verilmiştir. Deneysel çalışmada incelenen önemli değişkenlerden bir tanesi geliştirilen ankraj detayının performansıdır. Kiriş-3 ile özdeş CFRP düzenlemesine sahip olan Kiriş-6 deney elemanında ankraj detayı kullanılmamış ve bu iki deney elemanı birbirleri ve kontrol elemanı ile karşılaştırılarak ankraj detayının performansı incelenmiştir.

Güçlendirilen deney elemanları içerisinde en küçük enerji tüketme kapasitesine Kiriş-6 deney elemanı sahiptir. Davranışı Kiriş-1 kontrol deney elemanına oldukça benzer olan Kiriş-6 deney elemanı 3034 kN-mm enerji tüketerek Kiriş-1 kontrol deney elemanından sadece 1,65 kat daha fazla enerji tüketim kapasitesine ulaşabilmiştir. Kiriş-6 deney elemanından farklı olarak CFRP şerit uçlarına ankraj detayı uygulanan Kiriş-3 deney elemanı deneysel çalışmada en büyük enerji tüketim kapasitesine ulaşmış ve Kiriş-1 kontrol deney elemanından 12,86 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-3 deney elemanının tükettiği enerjinin ancak %13’ünü tüketebilmiştir. Ankraj detayının enerji tüketimi üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Deney elemanı içerisinde sargılama etkisi oluşturarak kiriş tablası ve gövdesini bir arada tutan ankrajlar deney elemanının daha fazla enerji tüketmesini sağlamıştır.



Şekil 4.7. Kiriş-1, 3, 6 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri

#### 4.4. Analitik Çalışma

Deneysel sonuçlardan elde edilen moment ve kesme kuvveti kapasiteleri ve analitik olarak hesaplanan kapasite değerleri bu bölümde karşılaştırılmıştır. Deneysel moment kapasiteleri maksimum kesme kuvveti değerleri kullanılarak hesaplanmış, deney elemanlarının analitik moment kapasiteleri ise her iki yönde hesaplanıp büyük olan değeri seçilerek karşılaştırma deneysel ve analitik maksimum moment değerleri arasında yapılmıştır. Deney elemanlarının tümünde maksimum analitik moment kapasitesi maksimum deneysel moment kapasitesi ile aynı yöndedir. Analitik moment değerleri TS-500-2000 yönetmeliğinde yer alan yaklaşım kullanılarak hesaplanmıştır [23]. Deney elemanlarının her iki yöndeki analitik moment değerleri hesaplanırken betonun taşıdığı kuvvet eşdeğer dikdörtgen blok yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Kesit taşıma gücüne ulaştığında betonun maksimum birim deformasyon değeri  $\epsilon_{cu} = 0,003$  olarak alınmıştır. Kiriş gövdesinin iki tarafına yapıştırılan 0,12 mm kalınlığındaki CFRP şerit ve levhaların moment kapasitesi üzerinde etkisinin olmadığı kabul edilmiştir. Deney elemanlarının analitik kesme kuvveti kapasiteleri hesaplanırken ACI-440 komite raporunda belirtilen yöntem kullanılmıştır [22].

Deney elemanlarında kesme donatısı kullanılmadığı için kesme dayanımı, çatlama betonun ve CFRP şerit ve levhaların kesme dayanımına katkıları toplanarak hesaplanmıştır (Eş. 4.1). Betonun kesme dayanımına katkısı TS-500-2000 yönetmeliğine göre hesaplanmıştır [23].

$$V = V_c + V_f \quad (4.1)$$

Eşitlikte;

$V_c$  : Beton tarafından taşınan kesme kuvveti

$V_f$  : CFRP şerit ve levhalar tarafından taşınan kesme kuvveti

TS-500-2000 yönetmeliğine göre beton tarafından taşınan kesme kuvveti Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0,65 f_{ctd} b_w d \quad (4.2)$$

Eşitlikte;

$f_{ctd}$  : Beton tasarım aksenal çekme dayanımı ( $f_{ctd} = 0,35\sqrt{f_c}$ )

$b_w$  : Kiriş gövde genişliği

$d$  : Kiriş etkili yüksekliği

CFRP şerit ve levhaların kesme dayanımına katkıları hesaplanırken ACI 440 komite raporu temel alınmıştır. CFRP elemanların kesme dayanımına katkıları kiriş geometrisi, yapıştırma düzeni ve beton basınç dayanımından etkilenmektedir. Tüm bu etkiler göz önünde bulundurularak CFRP şerit ve levhaların kesme dayanımına katkıları Eş. 4.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V_f = \frac{2.n.t_f.w_f.f_{fe}(\sin \alpha + \cos \alpha)d_f}{s_f} \quad (4.3)$$

Eşitlikte;

$V_f$  : CFRP şerit ve levhalar tarafından taşınan kesme kuvveti

$n$  : CFRP şerit ve levha katman sayısı

$t_f$  : CFRP şerit kalınlığı

$w_f$  : CFRP şerit genişliği

$f_{fe}$  : CFRP şerit ve levhadaki efektif gerilme

$\alpha$  : CFRP şeritlerin yatayla yaptığı açı

$d_f$  : Etkili CFRP şerit ve levha uzunluğu

$s_f$  : CFRP şerit eksenleri arası mesafe

CFRP elemanlardaki efektif gerilme değeri Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} . E_f \quad (4.4)$$

Eşitlikte;

$\varepsilon_{fe}$  : CFRP şerit ve levhaların efektif birim deformasyon değeri

$E_f$  : CFRP elastisite modülü

Etkili birim deformasyon değeri Eş. 4.5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu} \cdot k_v \quad (4.5)$$

Eşitlikte;

$\varepsilon_{fu}$  : CFRP şerit ve levhaların dizayn kopma birim deformasyon değeri (Sika Wrap 230C için  $\varepsilon_{fu} = \%1,7$ )

$k_v$  : Kesme dayanımı için yapıştırma katsayısı

Kesme dayanımı için yapıştırma katsayısı beton basınç dayanımının, yapıştırma düzeninin ve CFRP elemanların rijitliğinin bir fonksiyonu olarak Eş. 4.6'dan hesaplanmaktadır.

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \quad (4.6)$$

Eşitlikte;

$k_1$  : Beton basınç dayanımına bağlı değişiklik katsayısı

$k_2$  : CFRP yapıştırma düzenine bağlı değişiklik katsayısı

$L_e$  : Efektif CFRP yapıştırma uzunluğu

Eşitlikte kullanılan  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $L_e$  değerleri aşağıda verilen eşitliklere göre hesaplanmıştır.

$$L_e = \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}} \quad (4.7)$$

Eşitlikte;

$n$  : CFRP şerit ve levha katman sayısı

$t_f$  : CFRP şerit kalınlığı

$E_f$  : CFRP elastisite modülü

$$k_1 = \left( \frac{f_c'}{27} \right)^{2/3} \quad (4.8)$$

Eşitlikte;

$f_c$  : Beton basınç dayanımı

$k_2$  katsayısı CFRP elemanların kiriş yan yüzlerine veya “U” şeklinde sargı biçiminde uygulanması durumuna göre iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. Eş. 4.9 CFRP elemanların sadece kiriş yan yüzlerine, Eş. 4.10 ise CFRP elemanların kiriş yan yüzleri ile birlikte gövde altına da yapıştırılarak “U” sargı biçiminde uygulanması durumunda kullanılmaktadır.

$$k_2 = \frac{d_f - 2L_e}{d_f} \quad (4.9)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (4.10)$$

Eşitlikte;

$d_f$  : Etkili CFRP şerit ve levha uzunluğu

$L_e$  : Efektif CFRP yapıştırma uzunluğu

Deney elemanlarının moment kapasiteleri karşılaştırıldığında Kiriş-3 ve 5 deney elemanlarının analitik moment kapasiteleri ölçülen değerlerden ortalama %2 daha büyük hesaplanmıştır. Hesaplanan ve ölçülen kapasite değerlerinin çok yakın olması bu iki deney elemanının boyuna donatılarının akma dayanımı sınırına yaklaştığının bir göstergesidir. Kiriş-2 ve 4 deney elemanlarının ölçülen moment kapasiteleri

hesaplanan kapasite değerlerinden ortalama %17 daha küçüktür. Deneysel çalışmada en düşük dayanım değerlerine sahip olan Kiriş-1 ve 6 deney elemanlarının ölçülen moment kapasiteleri analitik moment kapasitelerinden ortalama %54 daha küçüktür.

CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-2 ve 3 deney elemanlarının analitik kesme kuvveti kapasiteleri deneysel değerlerden daha küçük elde edilmiştir. Kiriş-2 deney elemanının deneysel ve analitik kesme kuvveti kapasiteleri arasında %38, Kiriş-3 deney elemanının ise %41 fark oluşmuştur. Analitik değerlerin deneysel değerlerden daha küçük olmasına CFRP şeritlerin uçlarına uygulanan ankrajların dayanım üzerine yapmış oldukları olumlu etkinin analitik yaklaşımda dikkate alınmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

CFRP levhalarla güçlendirilmiş Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarının analitik kesme kuvveti kapasiteleri deneysel kapasite değerlerinden çok daha büyük elde edilmiştir. Kiriş-4 deney elemanının deneysel kesme kuvveti, analitik kesme kuvveti kapasitesinin %34'ü, Kiriş-5 deney elemanının deneysel kesme kuvveti ise analitik kesme kuvvetinin %32'si kadardır. Aradaki bu farkın CFRP levhaların beton dayanımının düşük olmasından dolayı kesme kuvveti kapasitesine beklenen katkıyı yapamadan çok daha düşük bir yük düzeyinde beton yüzeyinden soyulmaları sonucu deney elemanlarının beklenilenden daha düşük kesme kuvveti değerlerinde göçmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuç CFRP levhalarla güçlendirilen deney elemanlarının beton dayanımının düşüklüğünden önemli oranda etkilendiğini göstermektedir. Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarının CFRP levhalarından ölçülen birim deformasyon değerlerinin çok küçük düzeylerde kalması bu düşüncüyü desteklemektedir.

CFRP şeritlerle güçlendirilen Kiriş-6 deney elemanında ankraj kullanılmamasından ve düşük beton dayanımından dolayı analitik kesme kuvveti kapasitesi deneysel kesme kuvveti kapasitesinden daha büyük elde edilmiştir. Deney elemanlarının analitik çalışmadan elde edilen moment ve kesme kuvveti kapasiteleri ile deneysel çalışmadan elde edilen moment ve kesme kuvveti kapasitelerinin karşılaştırılması Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Analitik ve deneysel yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Deney Elemanı No	Deneysel Değerler			Hesaplanan Değerler		Deneysel / Hesaplanan	
	M <sub>ölç.</sub> (kN-m)	V <sub>ölç.</sub> (kN)	$\frac{V_{ölç.}}{V_{ölç.(Kiriş-1)}}$	M <sub>hes.</sub> (kN-m)	V <sub>hes.</sub> (kN)	M <sub>ölç./M<sub>hes.</sub></sub>	V <sub>ölç./V<sub>hes.</sub></sub>
Kiriş-1 (Kontrol)	62,5	37,3	1,00	152,6	35,4	0,41	1,05
Kiriş -2 (Güçlendirilmiş)	134,0	80,0	2,14	152,4	57,8	0,88	1,38
Kiriş -3 (Güçlendirilmiş)	151,2	90,3	2,42	152,5	64,5	0,99	1,41
Kiriş -4 (Güçlendirilmiş)	118,6	70,8	1,90	152,5	207,5	0,78	0,34
Kiriş -5 (Güçlendirilmiş)	149,6	89,3	2,39	152,5	275,2	0,98	0,32
Kiriş -6 (Güçlendirilmiş)	78,9	47,1	1,26	152,5	65,0	0,52	0,72

Not:

- Deneysel kesme kuvveti değerleri deney elemanlarının maksimum taşıma gücü olarak alınmıştır.
- Deneysel moment kapasiteleri maksimum kesme kuvveti kullanılarak hesaplanmıştır.
- Analitik moment kapasiteleri her iki yönde hesaplanıp karşılaştırma için maksimum olan değer seçilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Dıştan epoksi ile yapıştırılan CFRP elemanlar ile kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi son yıllarda oldukça sık araştırılan ve yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Literatürde bulunan araştırmalarda CFRP elemanlarla güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz kirişlerin monotonik yüklemeler altında test edildiği ve kirişlerin dayanım ve davranışlarının incelendiği görülmüştür. Kesme dayanımı yetersiz kirişlerin tersinir tekrarlanır yükleme altında davranışını inceleyen bir araştırma bulunmamaktadır. Ayrıca CFRP elemanlar ile güçlendirilmiş yetersiz kesme dayanımına sahip düşük beton kapasiteli betonarme kirişlerin dayanım ve davranışını tersinir tekrarlanır yüklemeler altında inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Yapılan araştırmalarda CFRP şeritlerin uç bölgelerinin beton yüzeyinden soyulması sonucu oluşan göçme şeklinin güçlendirme tekniğinin performansını önemli derecede düşürdüğü belirlenmiştir. Bu göçme modunun düşük beton dayanımına sahip kirişlerde daha belirgin bir şekilde olduğu görülmektedir. Güçlendirme tekniğinin performansını olumsuz yönde etkileyen bu göçme modunu önlemek amacıyla CFRP şeritlerin uç bölgelerinde uygulanmak üzere ankraj detayı geliştirilmiştir. Literatürde bu konu ile ilgili çalışmalar son derece sınırlı sayıda bulunmakla birlikte tersinir tekrarlanır yüklemeler altında etkili olabilecek bir ankraj detayı ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiş CFRP elemanlarla güçlendirilmiş düşük beton kapasitesine sahip kirişler ile ilgili deneysel veri eksikliğini gidermek ve tersinir tekrarlanır yükleme altında etkili olabilecek bir ankraj detayı geliştirmek amacıyla deneysel bir çalışma düzenlenmiştir. Düzenlenen deneysel çalışmada 6 adet deney elemanı üretilmiştir. 5 deney elemanına CFRP şerit ve levhalarla güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Güçlendirilen deney elemanlarından ilk 4 tanesinde CFRP şerit ve levhaların beton yüzeyden ayrılmasını engellemek amacıyla ankraj uygulanmış son deney elemanında ise ankraj kullanılmamıştır. Deneysel çalışmada CFRP şeritlerin genişliği, kesme

açıklığındaki yerleşim düzeni ve CFRP şeritlerin uçlarına yerleştirilen ankrajlar incelenen değişkenlerdir. Düzenlenen deneysel çalışmada test edilen deney elemanlarından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Epoksi kullanılarak dıştan yapıştırılan CFRP elemanlarla gerçekleştirilen güçlendirme tekniğinin kesme dayanımı yetersiz düşük beton kapasiteli betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde etkili bir yöntem olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının dayanımları incelendiğinde CFRP elemanlar ile gerçekleştirilen güçlendirme tekniğinin dayanım üzerindeki etkisinin CFRP düzenlemesi, beton dayanımı ve ankrajlanmanın olup olmaması ile yakından ilgili olduğu görülmüştür. Düşük beton dayanımı CFRP elemanların beton yüzeyinden daha kolay soyulmasına neden olmuştur. Deneysel programda güçlendirilen deney elemanları arasında dayanımdaki en düşük artış ankraj kullanılmayan Kiriş-6 deney elemanında gözlenmiştir. Bu deney elemanında dayanımda %26 gibi düşük bir artış meydana gelmiştir. Kiriş-6 deney elemanı ile özdeş CFRP düzenlemesine sahip ve ankraj kullanılan Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol deney elemanından 2,42 kat daha büyük dayanım göstererek iyi bir performans sergilemiştir. Kiriş kesme açıklığı boyunca CFRP levhalar ile güçlendirilen Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarının beton dayanımı düşüklüğünden CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarından çok daha olumsuz etkilendiği görülmüştür. Düşük beton dayanımı nedeniyle kesme çatlaklarında sürtünme etkisi ile çatlak bölgelerinde meydana gelen ezilme ve kabarmalar CFRP levhaların beton yüzeyinden düşük yük seviyelerinde ayrılmasına neden olmuş ve beklenen performansın gösterilmesini engellemiştir. Kiriş-4 ve 5 deney elemanları kontrol elemanından sırasıyla 1,90 ve 2,39 kat daha fazla dayanım sergilemiştir.

Deneysel programda sadece Kiriş-3 ve 5 deney elemanları boyuna donatıları akma dayanımı sınırına çok yakın bir değere ulaşmış ve beklenen performansa yaklaşmıştır. Kiriş-3 ve 5 deney elemanlarının analitik moment kapasiteleri ölçülen değerlerden ortalama %2 daha büyük hesaplanmıştır. Kiriş-1, 2, 4 ve 6 deney

elemanlarının ölçülen moment kapasiteleri hesaplanan kapasite değerlerinden ortalama %35 daha küçüktür.

Uygulanan güçlendirme tekniğinin sünek davranışın gerçekleştirilmesi yönünden etkili olmadığı görülmüştür. Güçlendirilen deney elemanları göçmeden önce beklenen deplasman değerlerine ulaşamamışlardır.

Deney elemanları başlangıç rijitliği bakımından benzer bir davranış sergilemiştir. En düşük başlangıç rijitliğini Kiriş-1 kontrol deney elemanı sergilemiştir. Deneysel çalışmada hiçbir elemanın boyuna donatıları akma dayanımına ulaşamadığından akma noktasındaki rijitlik değerleri hesaplanamamıştır. Düşük beton dayanımı deney elemanlarının rijitliklerini sınırlandırmıştır.

Geliştirilen ankraj detayı tersinir tekrarlanır yükler altında oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Kesme donatısı kullanılmayan deney elemanlarında üst kısımda uygulanan ankraj detayı sargılama etkisi oluşturarak kiriş tablası ve gövdesinin birbirinden ayrılmasını engellemiştir. Aynı zamanda CFRP elemanların uçlarının soyulmasını ve beton yüzeyinden ayrılmasını engellemiştir. CFRP levhalarla güçlendirilen kirişlerin gövde alt kısmında uygulanan ankrajlarda CFRP şeritlerin uçlarının soyulmasını başarılı bir şekilde engellemiştir. Kiriş-3 ve 6 deney elemanları arasındaki dayanım ve davranış farkı ankrajın güçlendirme yönteminin performansına olan pozitif etkisini açıkça göstermektedir.

Deneysel çalışmadan elde edilen kesme kapasitesi değerleri ile ACI-440 komite raporu tarafından önerilen analitik yaklaşımla elde edilen değerler arasında önemli oranlarda farklılıklar olduğu görülmüştür. CFRP levhalarla güçlendirilen Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarının ölçülen kesme kapasiteleri analitik kesme kapasitelerinden ortalama %66 daha küçük elde edilmiştir. Kiriş-2 ve 3 deney elemanlarının ölçülen kesme kapasiteleri analitik değerlerden ortalama %40 daha büyüktür. Düşük beton dayanımı ve kullanılan ankraj detayı gibi parametrelerin ACI-440 komite raporu tarafından önerilen analitik yaklaşımda yer almamasından dolayı analitik ve deneysel değerler arasındaki bu farkın oluştuğu düşünülmektedir.

## 5.2. Öneriler

Gerçekleştirilen çalışma ile tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilen CFRP elemanlarla güçlendirilmiş düşük beton dayanımlı T kesitli betonarme kirişler konusunda literatürdeki deneysel veri eksikliğini gidermeye yönelik bir adım atılmıştır. Konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda deney elemanı sayısı arttırılmalı ve farklı CFRP düzenlemelerinin performansı da tersinir tekrarlanır yüklemeler altında incelenmelidir. Farklı kesme açıklığı faydalı yükseklik oranına sahip kirişler tersinir tekrarlanır yüklemeler altında test edilerek performansları incelenmelidir. Deneysel veri sayısı arttırılmalı ve geliştirilen ankraj detayının kiriş kesme kapasitesine olan katkısının hesaplanabilmesi için analitik yaklaşımlar geliştirilmelidir.

## KAYNAKLAR

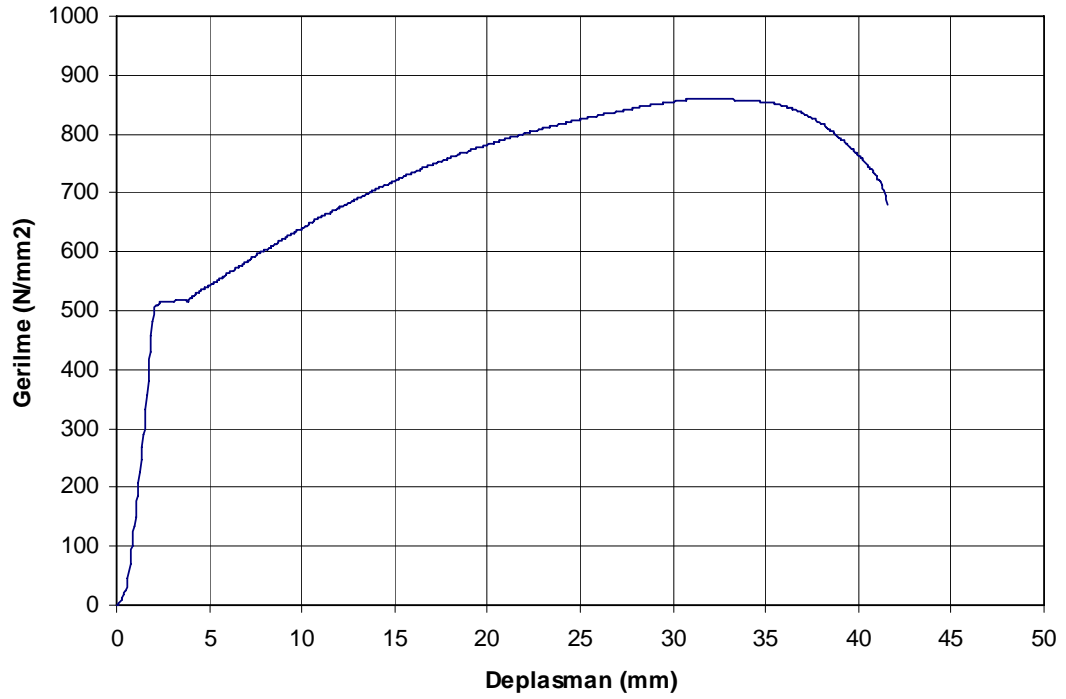
1. Ersoy, U., Özcebe, G., “Betonarme: Temel İlkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap”, *Evrım Yayınevi*, İstanbul, 459-478 (2001).
2. Anıl, Ö., “Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load”, *Cement & Concrete Composites*, 28: 638-649 (2006).
3. Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M., “Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets”, *Journal of Structural Engineering*, 123 (7): 903-911 (1997).
4. Triantafillou, T. C., “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites”, *ACI Structural Journal*, 95 (2): 107-115 (1998).
5. Sheikh, S., DeRose, D. and Mardukhi, J., “Retrofitting of Concrete Structures for Shear and Flexure with Fiber-Reinforced Polymers”, *ACI Structural Journal*, 99 (4): 451-459 (2002).
6. Sharif, A., Al-Sulaimani, G., Basunbul, I., Baluch, M., Ghaleb, B., “Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates”, *ACI Structural Journal*, 91 (2): 160-168 (1994).
7. Li, A., Diagana, C. and Delmas, Y., “CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams”, *Elsevier, Engineering Structures*, 23: 1212-1220 (2001).
8. Khalifa, A. and Nanni, A., “Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites”, *Elsevier, Construction and Building Materials*, 16: 135-146 (2002).
9. Khalifa, A. and Nanni, A., “Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites”, *Elsevier, Cement & Concrete Composites*, 22: 165-174 (2000).
10. Khalifa, A., Tumialan, G., Nanni, A., and Belarbi, A., “Shear Strengthening of Continuous RC Beams Using Externally Bonded CFRP Sheets”, *American Concrete Institute. In: Proceedings of the 4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS4)*, Baltimore, 995-1008 (1999).
11. Raghu, A., Mettemeyer, M., Mayers, J., and Nanni, A., “An Assessment of In-Situ FRP Shear and Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Joists”, *ASCE Structures Congress*, Philadelphia, 1-8. (2000).

12. Täljsten, B. and Elfgren., L., “Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods”, *Elsevier, Composites Part B: Engineering*, 31: 87-96 (2000).
13. Täljsten, B., “Strengthening Concrete Beams for Shear with CFRP Sheets”, *Elsevier, Conctruction and Building Materials*, 17: 15-26 (2003).
14. Gendron, G., Picard, A. and Guérin, M. C., “A theoretical study on shear strengthening of reinforced concrete beams using composite plates”, *Elsevier, Composites Structures*, 45: 303-309 (1999).
15. Deniaud, C., Cheng, J.J.R., “Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets”, *ACI Structural Journal*, 98 (3): 386-394 (2001).
16. Mitsui, Y., Murakami, K., Takeda, K., and Sakai, H., “A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets”, *Composite Interfaces*, 5 (4): 285-295 (1998).
17. Diagana, C., Li, A., Gedalia, B., and Delmas, Y., “Shear strengthening effectiveness with CFF strips”, *Elsevier, Engineering Structures*, 25: 507-516 (2003).
18. Kachlakev, D., McCurry, D.D., “Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates”, *Composites, Part B: engineering*, 31: 445-452 (2000).
19. Keleş, M., “Betonarme Kirişlerde Açılı CFRP Şeritlerin Kesmeye Katkısı”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 64-82 (2005).
20. Celeb, Z., Kumbasar, N., “Betonarme Yapılar”, *İhlas Gazetecilik A.Ş.*, İstanbul, 200-219 (2005).
21. Cılız, İ.M. Arşivinden (2006).
22. ACI, Committee 440 “Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures “, *American Concrete Institute*, Michigan, 5-50, 60-64 (1995).
23. TS 500: “Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 22-24 (2000).

**EKLER**

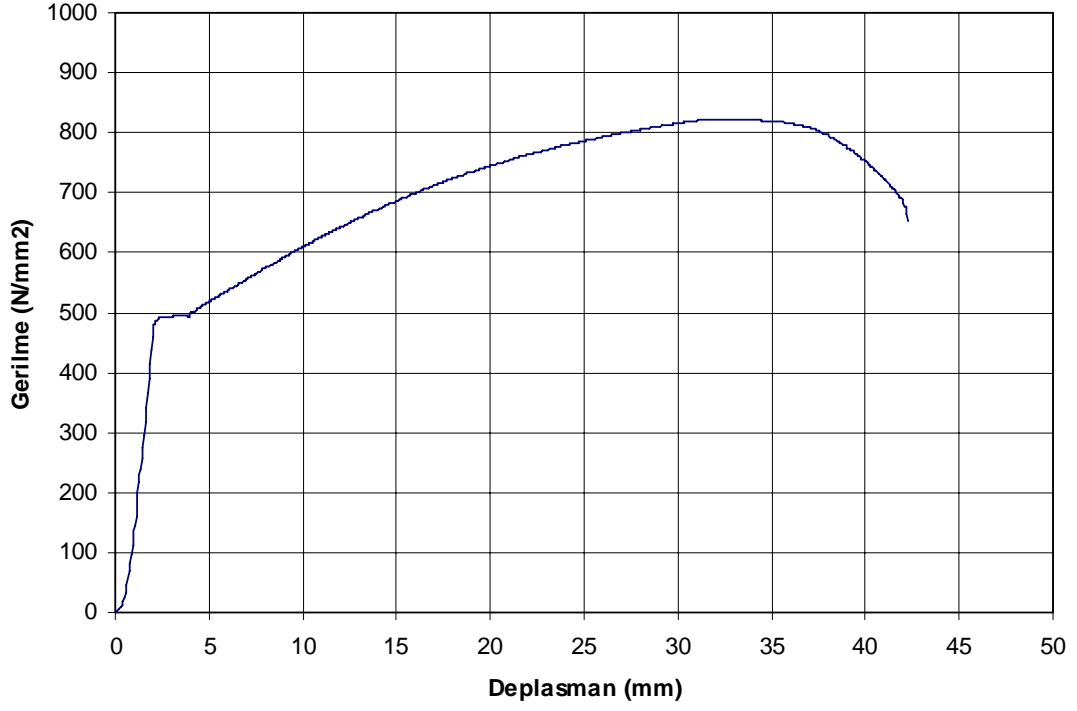
### EK-1 Donatı gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Deneysel programda kullanılan donatıların testleri Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi DARTEC marka bilgisayar kontrollü aksenal çekme makinesi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan  $\Phi 20$  ve  $\Phi 10$  mm çapındaki nervürlü donatılardan üçer adet numune alınmış ve test edilmiştir. Donatıların çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 1.1 – 1.6’da sunulmuştur.

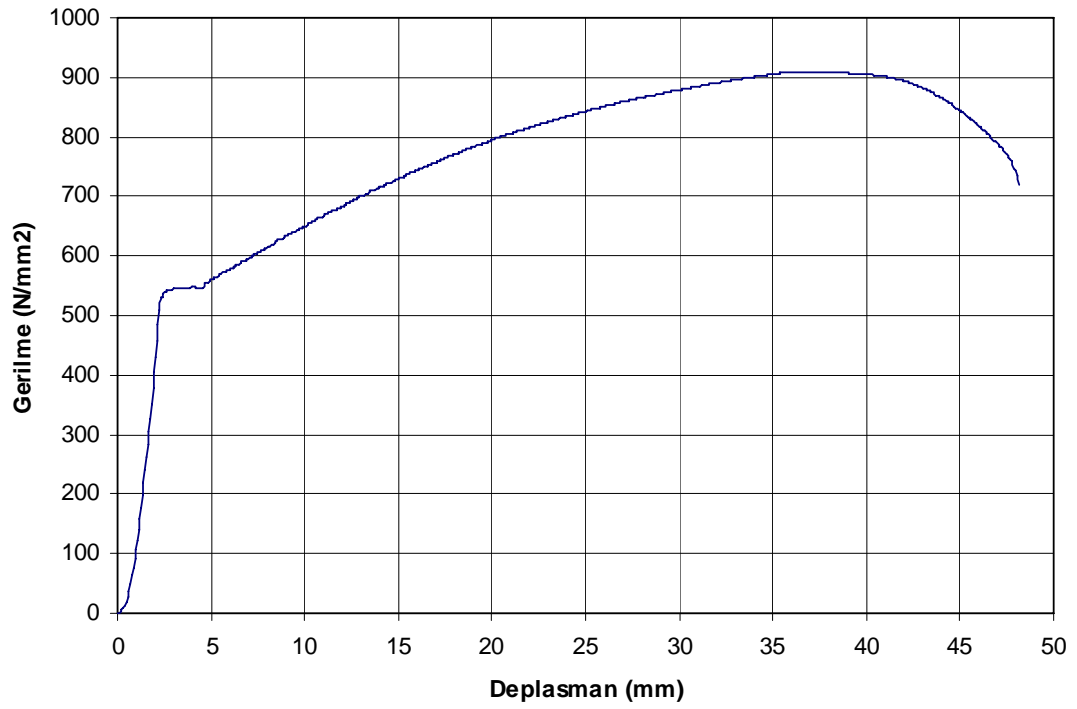


Şekil 1.1. Çekme deneyi sonuçları ( $\Phi 20$ )

EK-1 (Devam) Donatı gerilme-birim şekil değıştirme grafikleri

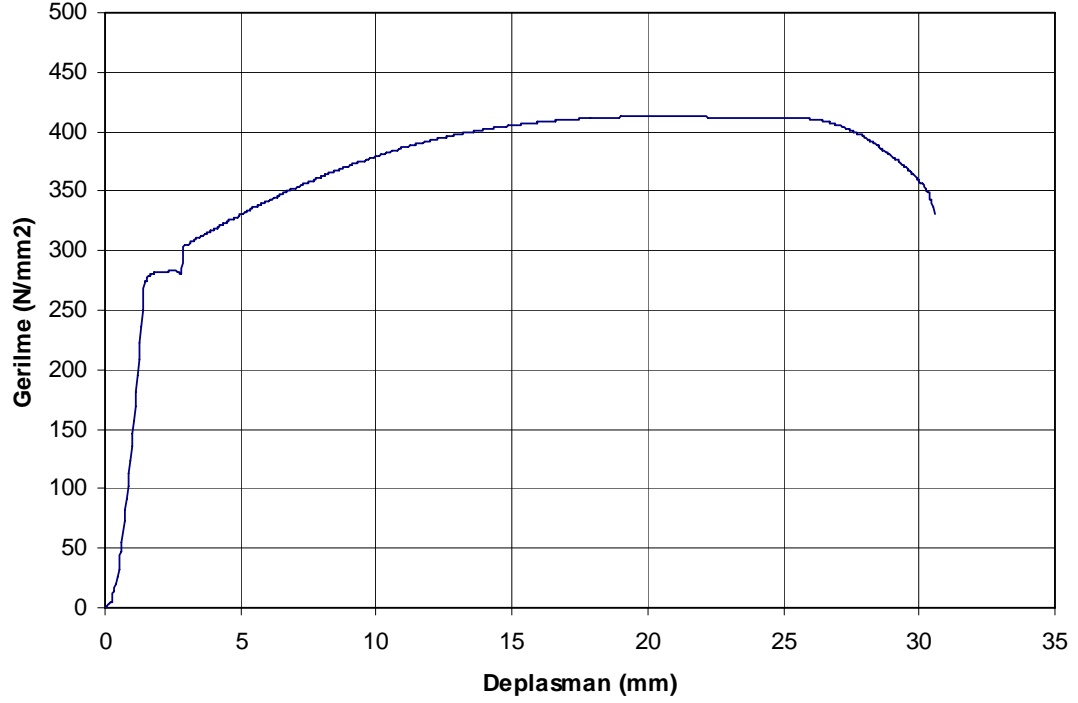


Şekil 1.2. Çekme deneyi sonuçları (Φ20)

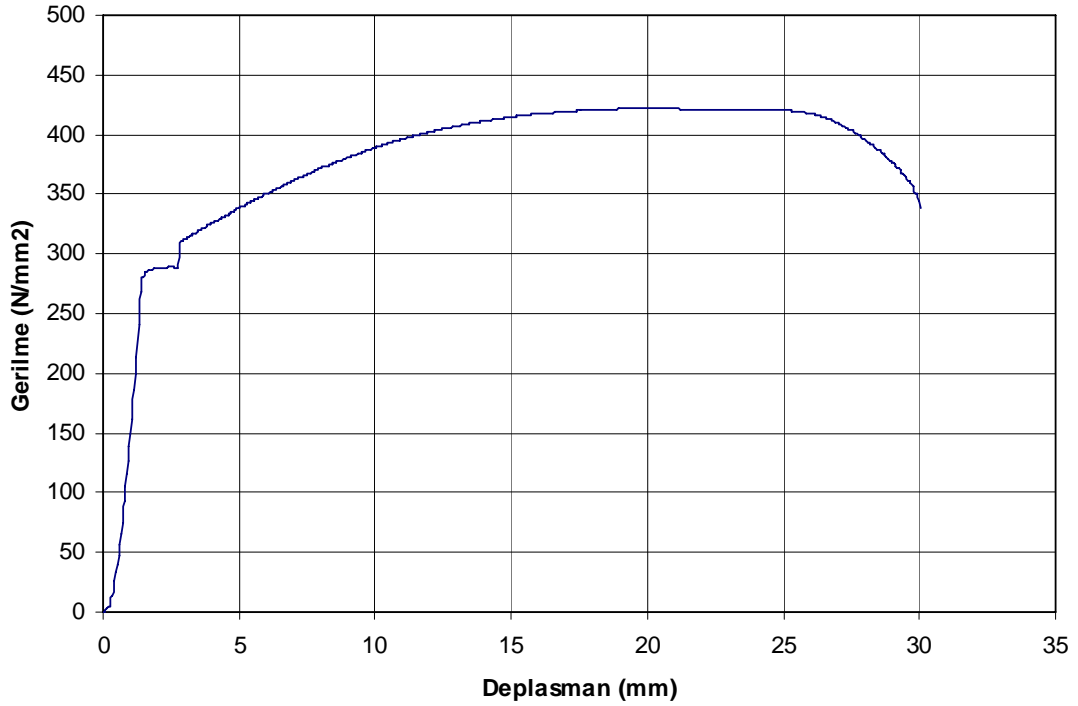


Şekil 1.3. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ20)

## EK-1 (Devam) Donatı gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

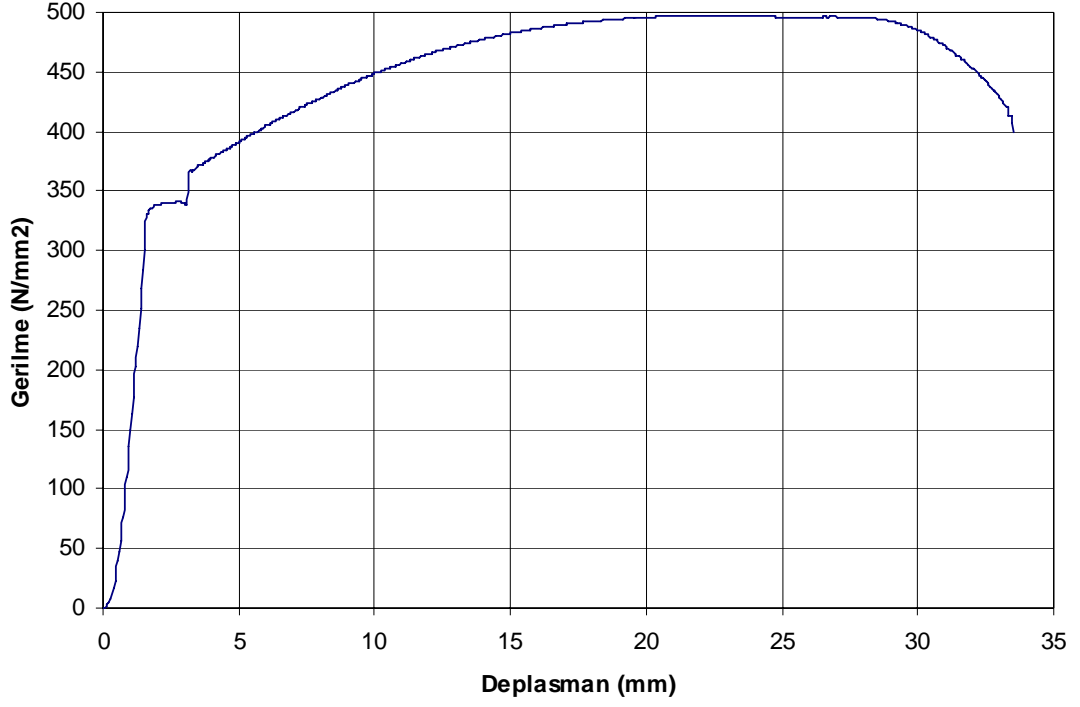


Şekil 1.4. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ10)



Şekil 1.5. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ10)

## EK-1 (Devam) Donatı gerilme-birim şekil değıştirme grafikleri



Şekil 1.6. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ10)

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CILIZ, İsmail Murat  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 05.06.1980 Ankara  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 251 64 14  
e-mail : [muratciliz@hotmail.com](mailto:muratciliz@hotmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2004
Lise	Prof. Dr. Şevket Raşit Hatipoğlu Lisesi	1997

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-	Mescioğlu Mühendislik Tic. LTD.ŞTİ.	Proje Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Futbol, Basketbol, Bilgisayar teknolojileri