

**BETONARME KİRİŞLERDE AÇILI CFRP ŞERİTLERİN
KESMEYE KATKISI**

Mesut KELEŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2005
ANKARA**

Mesut KELEŞ tarafından hazırlanan BETONARME KİRİŞLERDE AÇILI CFRP ŞERİTLERİN KESMEYE KATKISI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunun onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL
Tez Yöneticisi

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

Başkan : Prof. Dr. Sıdık ŞENER

Üye : Prof. Dr. Sinan ALTIN

Üye : Prof. Dr. Haluk ÇELİK

Üye : Doç. Dr. Uğurhan AKYÜZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

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

**BETONARME KİRİŞLERDE AÇILI CFRP ŞERİTLERİN
KESMEYE KATKISI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Mesut KELEŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2005**

ÖZET

Betonarme kirişlerin kesme kuvvetine karşı güçlendirilmesi için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) şeritlerle güçlendirme bu yöntemlerden biridir. Bu çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin tersinir tekrarlanır yükleme altında açılı CFRP şeritlerle kesme dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Düzenlenen deney programında 6 adet T kesitli kiriş test edilmiştir. Deneysel çalışmada açılı CFRP şeritlerin kesme açıklığı boyunca yerleşim düzeni ve CFRP levha genişliği incelenen değişkenlerdir. Deney sonuçları CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerin dayanım ve rijitliğinin önemli oranlarda arttığını göstermiştir. Deney elemanlarının sünekliği ve göçme modları da kullanılan CFRP şeritlerin genişliğine ve yerleşim düzenine göre farklılık göstermiştir.

Bilim Kodu : 911
Anahtar Kelimeler : Betonarme, Kiriş, Güçlendirme, Kesme, CFRP, tersinir yükleme
Sayfa Adedi : 98
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

**IMPROVING SHEAR CAPACITY OF RC BEAMS USING ANGULAR
CFRP STRIPS
(M. Sc. Thesis)**

Mesut KELEŞ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2005**

ABSTRACT

Many methods are improved for strengthening shear capacity of RC beams. One method of the strengthening shear capacity is using angled carbon fibre reinforced polymers (CFRP) strip. This work aims; improving shear capacity of the RC beams with shear deficiency under cyclic load. The experimental program consisted of six T-section beams. The parameters investigated in this study included CFRP strip arrangement in shear span and CFRP strip width. The experimental results show that CFRP strips can increase the strength and stiffness of beams significantly. Test results showed that ductility ratio and failing modes change depend on the CFRP composites width and arrangement.

Science Code : 911

**Key Words : Reinforced Concrete, Beam, Strengthening, Shear, Epoxy, CFRP,
Cyclic Load**

Page Number: 98

Adviser : Asst. Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Özgür ANIL'a, yine çalışmanın her aşamasında emeği ve değerli tecrübelerinden yararlandığım hocam Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN'a, ayrıca laboratuarda çalıştığımız, desteklerini ve emeklerini esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Murat Tanarşlan'a, Sayın Arş. Gör. Gökhan Şakar'a ve laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen araştırma görevlisi hocalarım Sayın Emin Kara, Sayın Yağmur Koprman ve laboratuvar sorumlusu Sayın Uzm. Faruk Ogün'e teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. DENEY ELEMANLARI VE LABORATUVAR TEKNİĞİ	12
2.1. Genel	12
2.2. Modellerin Tasarımı	13
2.3. Malzeme Özellikleri	18
2.3.1. Beton özellikleri	18
2.3.2. Donatı özellikleri	19
2.3.3. CFRP şeritlerin özellikleri.....	20
2.3.4. CFRP şeritlerin yapıştırıcısının özellikleri	21
2.3.5. Ankraj malzemesi özellikleri	21
2.3.6. Ankraj için kullanılan epoksinin özellikleri	23
2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanması	24
2.5. Model Kirişlerin Güçlendirilmesi	25
2.5.1. CFRP şeritleri yapıştırılması	27

Sayfa

2.5.2. Ankrajların hazırlanması	29
3. LABORATUVAR TEKNOLOJİSİ	32
3.1. Genel	32
3.2. Yükleme ve Deney Düzeni	32
3.3. Ölçüm Düzeni ve Veri Toplama	34
3.3.1. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni	34
3.3.2. Veri toplama ve değerlendirilmesi	38
3.4. Deney Yönetimi	40
4. DENEYLER SONUÇLARI	42
4.1. Genel	42
4.2. Deney Elemanı Kiriş-1	42
4.3. Deney Elemanı Kiriş-2	44
4.4. Deney Elemanı Kiriş-3	47
4.5. Deney Elemanı Kiriş-4	52
4.6. Deney Elemanı Kiriş-5	56
4.7. Deney Elemanı Kiriş-6	60
5. DEĞERLENDİRMELER	64
5.1. Dayanım ve Davranış	64
5.2. Rijitlik	71
5.3. Enerji Tüketim Kapasiteleri	75
5.4. Analitik Çalışmalar	82

	Sayfa
5.4.1. Dayanım	82
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	87
6.1. Sonuçlar	87
6.2. Öneriler	89
KAYNAKLAR	90
EKLER	92
EK-1	93
ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elemanların Özellikleri	15
Çizelge 2.2. Beton karışım oranları	18
Çizelge 2.3. Deney Elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları	19
Çizelge 2.4. Donatıların dayanım değerleri	20
Çizelge 2.5. Sika Wrap 160C malzemesi özellikleri	20
Çizelge 2.6. Sikadur 330 malzemesi özellikleri	21
Çizelge 2.7. Ankraj malzemesi dayanım değerleri	22
Çizelge 2.8. Ankraj malzemesi sıyrılma deney sonuçları	22
Çizelge 2.9. Sikadur 31 Epoksi Reçinesi özellikleri	24
Çizelge 5.1. Deney elemanlarının dayanımları	65
Çizelge 5.2. Deney elemanlarının rijitlik değerleri (kN/mm)	73
Çizelge 5.3. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerin rijitliklere etkisi	73
Çizelge 5.4. Deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri	76
Çizelge 5.5. Yönetmelik denklemleri ile hesaplanan yük taşıma kapasitelerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kiriş-1 Kontrol Elemanı	16
Şekil 2.2. Kiriş-2, 3, 4, 5, 6 Yetersiz Kesme Donatılı Deney Elemanı	16
Şekil 2.3. Ankraj Malzemesinin betondan sıyrılma deney düzeneği	23
Şekil 2.4. Ankraj detayı	29
Şekil 2.5. Kiriş-3 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için ankraj şekli	30
Şekil 2.6. Kiriş-4 $W_f = 100$, $S_f = 285$ elemanı için ankraj şekli	30
Şekil 2.7. Kiriş-5 $W_f = 50$, $S_f = 143$ elemanı için ankraj şekli	31
Şekil 2.8. Kiriş-6 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için ankraj şekli	31
Şekil 3.1. Deney Düzeneği	33
Şekil 3.2. Ölçüm Düzeneği	35
Şekil 3.3. Kiriş-3 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri	36
Şekil 3.4. Kiriş-4 $W_f = 100$, $S_f = 285$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri	36
Şekil 3.5. Kiriş-5 $W_f = 50$, $S_f = 143$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri	37
Şekil 3.6. Kiriş-6 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri	37
Şekil 3.7. Deplasman geometrisi	38
Şekil 4.1. Kiriş-1 deney elemanının yük-çevrim grafiği	43
Şekil 4.2. Kiriş-1 deney elemanının yük-deplasman grafiği	43
Şekil 4.3. Kiriş-2 deney elemanının yük-çevrim grafiği	45
Şekil 4.4. Kiriş-2 deney elemanının yük-deplasman grafiği	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Kiriş-3 deney elemanının yük-çevrim grafiği	47
Şekil 4.6. Kiriş-3 deney elemanı için yük-deplasman grafiği	48
Şekil 4.7. Kiriş-3 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri	51
Şekil 4.8. Kiriş-4 deney elemanının yük-çevrim grafiği	52
Şekil 4.9. Kiriş-4 deney elemanı için yük-deplasman grafiği	53
Şekil 4.10. Kiriş-4 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri	55
Şekil 4.11. Kiriş-5 deney elemanının yük-çevrim grafiği	56
Şekil 4.12. Kiriş-5 deney elemanı için yük-deplasman grafiği	57
Şekil 4.13. Kiriş-5 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri	59
Şekil 4.14. Kiriş-6 deney elemanının yük-çevrim grafiği	60
Şekil 4.15. Kiriş-6 deney elemanı için yük-deplasman grafiği	61
Şekil 4.16. Kiriş-6 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri	63
Şekil 5.1. Deney elemanlarının zarf eğrileri	66
Şekil 5.2. Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP şerit genişliği)	68
Şekil 5.3. Kiriş-1, 2, 3 ve 5 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP şerit aralığı)	70
Şekil 5.4. Kiriş-1, 2, 3 ve 6 deney elemanlarının zarf eğrileri (Göçme mekanizmasının önlenmesi)	72
Şekil 5.5. Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanlarının enerji tüketimi grafikleri	79
Şekil 5.6. Kiriş-1, 2, 3 ve 5 deney elemanlarının enerji tüketimi grafikleri	80
Şekil 5.7. Kiriş-1, 2, 3 ve 6 deney elemanlarının enerji tüketimi grafikleri	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kiriş-1 Kontrol Elemanı	17
Resim 2.2. Kiriş-2 Yetersiz Kesme Donatılı Kiriş	17
Resim 2.3. Kiriş-3 $W_f=50$, $S_f=285$, $\beta =45/135^\circ$	17
Resim 2.4. Kiriş-4 $W_f=100$, $S_f=285$, $\beta =45/135^\circ$	17
Resim 2.5. Kiriş-5 $W_f=50$, $S_f=143$, $\beta =45/135^\circ$	17
Resim 2.6. Kiriş-6 $W_f=50$, $S_f=285$, $\beta =45/135^\circ$	17
Resim 2.7. Standart silindir numunenin test edilmesi	19
Resim 2.8. Beton dökümüne hazır deney elemanları	26
Resim 2.9. Beton dökümü	26
Resim 2.10. Epoksinin sürülmesi	28
Resim 2.11. CFRP şeritlerin yapıştırılması	28
Resim 3.1. Kullanılan bilgisayar programı ve deneyin izlenmesi	41
Resim 4.1. Göçme anındaki maksimum kiriş uç deplasmanı (80.7 mm)	44
Resim 4.2. Ana kesme çatlakları	46
Resim 4.3. Yapışma yüzeyinden ayrılan CFRP şerit	49
Resim 4.4. Kesme çatlağı nedeniyle kopan CFRP şerit	50
Resim 4.5. CFRP şeritlerin beton pas payını kaldırması	50
Resim 4.6. Kesme çatlağı ve kesme çatlağından dolayı kopan CFRP şerit	54
Resim 4.7. Kesme çatlağının kiriş altında oluşturduğu boyuna çatlaklar	54
Resim 4.8. Kesme çatlağı ve kesme çatlağından dolayı kopan CFRP şerit	58
Resim 4.9. Kesme çatlağının kiriş altında oluşturduğu boyuna çatlaklar	58

Resim	Sayfa
Resim 4.10. İleri yüklemedeki maksimum kiriş uç deplasmanı (51 mm)	62
Resim 4.11. Geri yüklemede maksimum kiriş uç deplasmanı (56 mm)	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Kesme açıklığı, nokta yükün mesnete olan uzaklığı
A_v	Kesme donatısı kesit alanı
b_w	Kiriş gövde genişliği
d	Kiriş faydalı yüksekliği
d_f	Etkili CFRP şerit uzunluğu
E_f	CFRP'nin elastisite modülü
f_c'	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{fe}	CFRP şeritteki etkili gerilme
f_{yk}	Donatı çeliğinin akma dayanımı
f_{su}	Donatı çeliğinin çekme dayanımı
f_y	Kesme donatısı akma dayanımı
GF	Birim deformasyon faktörü
k_v	Kesme dayanımı için yapııştırma katsayısı
k_1	Betonun basınç dayanımına bağlı değişiklik katsayısı
k_2	CFRP düzenlemesine bağlı değişiklik katsayısı
L	Kiriş açıklığı
L_e	CFRP şeritin aktif yapııştırma uzunluğu
M_{hes}	Hesaplanan moment kapasitesi
$M_{ölç}$	Deneyisel moment kapasitesi
n	CFRP şerit katman sayısı
s	Kesme donatısı aralığı
S_f	CFRP şeritler arası mesafe
t_f	CFRP şerit kalınlığı
V	Kiriş kesme kapasitesi

Simgeler	Açıklama
V_c	Beton tarafından taşınan kesme kuvveti
$V_{hes.}$	Hesaplanan kesme kuvveti kapasitesi
V_i	Birim deformasyon ölçerlere uygulanan gerilim
V_f	CFRP şeritler tarafından taşınan kesme kuvveti
V_o	Birim deformasyon ölçerlerde okunan mili volt değeri
$V_{ölç.}$	Deneyssel kesme kuvveti kapasitesi
V_s	Kesme donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti
W_f	CFRP şerit genişliği
β	CFRP şeridin yerleştirilme açısı
ε	Birim deformasyon değeri
ε_{fe}	CFRP şeritlerin etkili gerilme değeri
ε_{fu}	CFRP'nin dizayn kopma gerilmesi
ρ_w	Kesme donatısı oranı
δ_u	Kirişlerin göçme anındaki deplasman miktarı
δ_y	Kirişlerin akma anındaki deplasman miktarı
ϕ	Donatı çapı

Kısaltmalar	Açıklama
ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Birliği)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Elyaf Takviyeli Plastik)
SG	Strain Gage (Birim Deformasyon Ölçer)

1. GİRİŞ

Betonarme yapı elemanlarına genellikle eğilme momenti ve kesme kuvveti birlikte etkimektedir. Kesme gerilmesi ile normal gerilmelerden oluşan asal çekme gerilmeleri betonun düşük çekme dayanımı nedeniyle önemli sorunlar oluşturabilir. Asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşan eğik çekme çatlakları betonarme yapı elemanlarının ani ve gevrek olarak kırılmasına neden olduğundan oldukça tehlikelidir. Kırılmadan önce belirgin çatlaklar oluşmadığından tahmin etmek oldukça zordur. Bu tür kırılmayı önlemek amacıyla kesme dayanımı etriye gibi kesme donatıları ile artırılarak betonarme elemanların eğilme kapasitelerinin aşılması sonucu kırılması sağlanır.

Betonarme elemanlarda kesme donatısının kullanım amacı gevrek eğik çekme kırılmasını engellemek ve yapının eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Kesme dayanımını olumsuz yönde etkileyen birçok faktör vardır. Bu etkenler hesapta yapılan hatalar, kesme donatısının hatalı detaylandırılması, yapım hataları, zayıf işçilik, kesme donatısı çeliğinin alanının yüksek sıcaklık, yüksek nem, zemin tuzluluğu gibi kötü çevre şartları nedeniyle korozyona uğraması olarak sayılabilir. Kesme kapasitesi düşük kirişlerin güçlendirilmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler tam ve kısmi betonarme manto uygulamak, dışarıdan öngerilme vermek, kiriş açıklığını ilave mesnetlerle azaltmak ve yüksek dayanımlı yapııştırıcılar kullanarak çelik levha veya elyaf takviyeli plastiklerle (FRP) kesme kapasitesini arttırmak olarak sayılabilir.

Güçlendirme işlemi bir yapı veya yapı elemanının öngörülen bir güvenlik düzeyine çıkartmak için yapılan işlemdir. Günümüzde betonarme binaların güçlendirilmesi ve/veya onarılmasını gerektiren birçok neden vardır. Yapı kullanım amacının değişmesi nedeniyle daha büyük yüklerin etkimesi, rötre nedeniyle betondaki çatlaklara dolan suların donatıları korozyona uğratması, tasarım aşamasında veya yapım aşamasında yapılan hatalar, standartların gelişmesi sonucu yeni şartnamelere

uyuma zorunluluğu ve deprem sonucu oluşan hasarların giderilmesi için güçlendirme ve/veya onarım işlemi yapılır.

Yukarıda özetlenen nedenlerle betonarme yapılarda kuvvet dağılımları değişmekte ve elemanların dayanımlarından daha büyük gerilmeler oluşmaktadır. Bu durumda betonarme yapılarda ciddi boyutta hasarlar oluşabilir, hatta yapı kullanılmayacak duruma gelebilir. Güçlendirme ve onarım işlemi bu gerilmelerin türü ve büyüklüğü dikkate alınarak yapılmalıdır.

Son yıllarda epoksi bağlayıcıların gelişmesiyle çelik ve FRP elemanlar ile güçlendirme işlemi önem kazanmıştır. Bu tekniklerden biri olan çelik levhaların betonarme kirişlere yapıştırılması yönteminde çelik levhaların kolayca korozyona uğraması en büyük dezavantajdır. Elyaf takviyeli plastik (FRP) levhalar bu problemi ortadan kaldırmıştır. Elyaf takviyeli plastik levhaların mekanik ve fiziksel özellikleri, çekmeye ve yorulmaya karşı dayanımı çelik levhalara göre oldukça yüksektir. Ayrıca elyaf takviyeli plastik levhaların yüksek dayanım/ağırlık oranı, düşük bakım masrafı, kimyasal etkilere dayanıklılığı, manyetik olmaması, elektriği iletmemesi, uygulanacak yüzeye kolay uyum göstermesi gibi avantajları da vardır. Bununla birlikte elyaf takviyeli plastik (FRP) levhaların en önemli dezavantajı yüksek ilk maliyetidir. Ancak bakım maliyetlerinin düşüklüğü uzun vadede bu malzemeyi ekonomik hale getirmektedir. Elyaf takviyeli plastik (FRP) levhaların cam, karbon ve aramid takviyeli çeşitleri bulunmaktadır.

Günümüzde betonarme kirişlerin dışarıda uygulanan kompozit malzeme ile eğilmeye karşı güçlendirilmesi üzerine birçok araştırma yapılmasına karşı kesme dayanımını arttırmaya yönelik az sayıda araştırma bulunmaktadır. Yapılmış olan çalışmalarda karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) levhaların uygulama şekli, yapıştırma alanı, CFRP levhaların doğrultusu kirişin davranışını etkileyen hususlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda CFRP kullanılarak güçlendirme yöntemi ile ilgili kurallar ve kesme dayanımı

yetersiz kirişlerin dayanım ve rijitlik olarak iyi bir performans sergilemesi için gerekli olan CFRP yerleşim şekli ve düzeni konusunda bazı önemli sonuçlara ulaşılmış ve bu sonuçlar bir rapor haline getirilmiştir. Ancak bu çalışmalarda kirişler monotonik yüklemeler altında test edilmiş olup depreme benzeştiren tersinir tekrarlanır yüklemeler altında CFRP elemanların performansı henüz test edilmemiştir. Monotonik yüklemeler altında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlardan biri de CFRP şeritlerin uç bölgelerinde meydana gelen soyulma sonucu oluşan göçme şeklidir. Meydana gelen bu göçme şekli güçlendirilen kirişlerde istenilen süneklik değerlerine ulaşmasına engel olmakta, güçlendirilen kirişlerin çekme donatıları akma dayanımına ulaşmasından sonra hiçbir süneklik göstermeden göçmesine neden olmaktadır. Bu göçme modunu önlemek için CFRP şeritlerin uç bölgelerine yerleştirmek üzere ankrajların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak bu konudaki çalışmalarda son derece sınırlı sayıda kalmış ve tersinir tekrarlanır yüklemeler altında etkili bir ankraj detayına literatürde rastlanmamıştır.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, kesme donatısı olmayan betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılan açılı CFRP şeritlerle güçlendirilmesi ve elemanların tersinir tekrarlanır yükler altında dayanımın ve davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Deney sonuçları ile analitik sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir adet kesme donatılı, beş adet kesme donatısız eleman olmak üzere toplam altı adet T-kesitli kiriş elemanı modellenerek tasarlanmış ve laboratuvarında üretilmiştir. Açılı CFRP şeritlerin kiriş kesme açıklığı boyunca yerleşim düzeni ve CFRP şerit genişliği incelenen temel değişkenlerdir.

Kesme donatısız olarak üretilen beş elemandan dördü açılı CFRP şeritler yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Bütün kirişlerde geometri ve boyuna donatı aynıdır. Kesme donatısız olarak ifade edilen kirişlere uç bir örneği temsil etmesi amacıyla hiç etriye donatısı yerleştirilmemiştir.

Konuyla İlgili Daha Önceki Çalışmalar

Kesme dayanımı yetersiz kirişlerin güçlendirilmesine ilişkin literatürde bulunan çalışmalarda genelde karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) şeritler ve çelik levhalar olmak üzere iki tür malzeme kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Araştırmaya yönelik olarak yapılan çalışmalarda dıştan güçlendirme tekniğinin kesme dayanımına olan etkisi hem laboratuvar ortamında deneysel olarak hem de bilgisayarda modellenmesi yapılarak incelenmiştir. Karbon elyaf kullanılarak yapılan güçlendirme çalışmalarından bazıları aşağıda kısaca sunulmuştur.

Khalifa ve Nanni (2000) gerçekleştirdikleri çalışmada CFRP şeritleri epoksi malzemesi ile kirişlerin yüzeylerine yapıştırarak kesmeye karşı güçlendirme yapmışlardır. Deney programı 6 tane tam ölçekli, basit mesnetli T-kirişten oluşmaktadır. Bir kiriş kontrol kirişi olarak kullanılmış ve diğer beş kiriş değişik yerleşim düzeni ile CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneyde 0° ve $0^\circ/90^\circ$ ’lik iki çeşit CFRP şerit kullanılmıştır. CFRP şeritler kirişlere U sargı ve sadece yan yüzeylerine yapıştırılması şeklinde kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar CFRP şeritlerin kirişin kesme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir (%35-%145). Ek olarak, en etkili yerleşim düzeninin uçları kiriş tablasına ankre olan U-sargı şeritlerin olduğu ortaya çıkmıştır. Kiriş kenarlarına uygulanan CFRP şeritler U-sargılara göre daha az kesme katkısı sağlamışlardır. ACI ve Eurocode formatına uygun tasarım yöntemleri kirişlerin hesaplanması için önerilmiştir (1).

Khalifa ve Nanni (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kesmeye karşı yetersiz dikdörtgen kirişler CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneysel program 12 adet tam ölçekli basit mesnetli kirişten oluşmaktadır. Deney elemanları etriye kullanılmış veya kullanılmamış elemanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Bu gruplarda kesme açıklığı, etkili derinlik oranına göre ikiye ayrılmıştır. Her grup için bir kontrol kirişi kullanılmış ve diğer sekiz elemanda değişik yerleşim düzenindeki CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarında dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin kirişin kesme kapasitesini %40 ile %138 oranında arttırdığı sonucuna

ulaşılmıştır. CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitesinin, güçlendirilmemiş kirişlerden daha büyük olduğu görülmüş ve kesme kapasitesinin arttırılmasında CFRP şeritlerin kesme açıklığı, etkili derinlik oranından etkilendiği gözlenmiştir. Analitik olarak hesaplanan kesme dayanımı deney sonuçlarına göre kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür (2).

Li, Diagana ve Delmas (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kesmeye karşı yetersiz kirişler epoksi ile yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneyde ondört adet basit mesnetli kiriş kullanılmıştır. Deneyde kullanılan kirişlerin ortalama basınç dayanımı 38 MPa olarak üretilmiştir. Yükleme kirişin 1/3 mesafesinden monotonik olarak etki ettirilmiştir. CFRP şeritlerle yapılan güçlendirilme kirişin sadece 1/3 lük kısmına uygulanmıştır. Deneyde etriye aralıkları ve CFRP şeritlerin yapıştırılma miktarı değiştirilerek çeşitli uyarlamalar yapılmıştır. Deneyler sonucunda CFRP şeritlerin elemanın kesme dayanımına yaptığı katkının kirişte kullanılan boyuna donatı ve etriye miktarından etkilendiği görülmüştür. CFRP şeritlerin yapıştırılma yüzeyi arttıkça CFRP'nin kesme dayanımına katkısı artmıştır. Kirişte kullanılan etriye miktarı azaltıldığında CFRP şeritlerin kesme kapasitesine katkısının arttığı gözlenmiştir. Deney sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında değerlerin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür (3).

Diagana, Li, Gedalio ve Delmas (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kesmeye karşı yetersiz betonarme kirişler karbon fiber kumaşlar yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney on tane basit mesnetli dikdörtgen kirişten oluşmaktadır. Deneyde üç noktadan monotonik olarak yükleme yapılmıştır. Betonarme kirişlerin kesme kuvvetlerinden dolayı göçmesi için eğilme kapasitesi yüksek olarak tasarlanmıştır. İki eleman kontrol elemanı olarak kullanılmış 8 eleman U ve kirişin tam olarak sarılması şeklinde iki gruba ayrılmıştır. Karbon fiber kumaşlar 45° ve 90° derecelik şeritler şeklinde aralıkları değiştirilerek kirişler üzerine yapıştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde yapılan güçlendirme ile betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin önemli oranda arttırıldığı görülmüştür.. Kesme dayanımındaki artışlar epoksi ile yapıştırılan CFRP şeritlerin aralıkları, sarılma şekilleri ve yerleştirme

açılarına bağlı olarak değişmiştir. Betonarme kirişi tam olarak saran dikey CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı U şeklindeki sarılan şeritlere göre iki kat daha fazla olmuştur. Bununla birlikte 45° lik şeritler halinde yapıştırılan kirişlerdeki kesme dayanımındaki artış tam olarak sarılan kiriş ile U şeklinde sarılan kirişlerin kesme dayanımına katkısı yaklaşık olarak aynı düzeyde kalmıştır. Deney sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında aralarında %-14 ile %93 oranında değişim olduğu görülmüştür (4).

Taljsten ve Elfgrén (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada CFRP levhaların ve şeritlerin değişik yöntemlerle beton kirişlerin yan yüzeylerine epoksi ile yapıştırılma uygulanmasını denemişlerdir. Çalışmanın amacı kirişlerin güçlendirilmeden önce ve sonra kesme kapasitelerinin incelenmesi ve uygulamada kullanılan 3 değişik tekniğin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda 8 adet kiriş 4 nokta yüklemesi ile test edilmiştir. Kiriş orta noktasından ve mesnetlerden deplasman ölçüleri alınmıştır. Güçlendirilmiş kirişler; lifteki çekme kırılması, betondaki basınç kırılması ve CFRP kompoziti ve beton arasındaki bağ kırılması olmak üzere 3 şekilde kırılmıştır. Test sonuçlarına göre beton kirişlerin yan yüzeylerine yapıştırılan CFRP levhalarda çok iyi bir kesme güçlendirmesi sağlanmıştır. Dayanımda maksimum %300'lük bir artış olmuştur (5).

Taljsten (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada karbon elyaf takviyeli plastik şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının belirlenmesine yönelik bir analitik çalışma sunulmuş ve bu yöntem test edilmiş dikdörtgen kesitli betonarme kiriş sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak CFRP şeritlerin kesme dayanımını hesaplamak için bir formül oluşturulmuştur. Daha sonra kirişin nominal kesme dayanımı hesaplanmıştır. Analitik yöntem ile test sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Laboratuvar sonuçlarına göre betonarme kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için elyaf takviyeli plastik şeritlerin mümkün olduğunca kesme çatlağına dik şekilde yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir (6).

Chajes, Januszka, Mertz, Thomson ve Finch. (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 12 tane yetersiz donatılı T-kirişten oluşan bir seri, betonarme kirişin kesme

kapasitesini arttırmaya yönelik bir yöntem olan dıştan uygulamalı kompozit dokumaların kullanımının etkilerinin incelenmesi için test edilmiştir. Aramid, E-cam ve grafit liflerinden yapılmış kompozit dokumalar iki bileşenli epoksi ile T-kirişin iki yanına boydan boya yapıştırılmıştır. Kompozit malzemelerin seçilmesindeki amaç bu tür malzemelerin paslanmaz, yalıtkan ve genelde kimyasal maddelere dayanıklı olup manyetik olmamalarıdır. Bu deneysel çalışma Delaware Üniversitesi beton laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Beton T-kirişler ACI Yönetmeliği'ne uygun tasarlanmış ve eğilme donatısı olarak ACI süreklilik şartlarını sağlayan bir adet No.5 Grade 60 çelik donatı kullanılmıştır. Deneyin amacına yönelik olarak istenilen gevrek kırılma modu için kesmeye göre yetersiz tasarım yapılmıştır. Kompozit dokumalar, liflerin her iki yönde eşit miktarda olmak üzere 0° ve 90°'lik açılarla yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Dokumaların kirişlere iyi yapışması için beton yüzey mekanik yoldan aşındırılarak temizlenmiş ve parçacıklar hava püskürtülerek giderilmiştir. İki bileşenli epoksi dokumalara 1.5 mm kalınlığında sürülmüş ve dokumalar kirişlere yapıştırılarak vakum uygulanmıştır. Kirişler eğilmede test edilmiş ve dıştan kesme donatılı sekiz kirişin performansı, dıştan donatısı olmayan dört adet kontrol kirişinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bütün kirişler kesmeden kırılmışlar ve bunlardan kompozit donatılı olanları başarılı bağ özellikleri göstermişlerdir. Dıştan donatılı kirişler için dayanımda % 60 ila % 150 oranında artış sağlanmıştır. Dokuma liflerinin yerleşim şekli kesme dayanımına katkıyı etkilediği ortaya çıkmış ve testlerin hiçbirinde dokumalar betondan ayrılmamıştır. Sonuçta, kompozit dokumaların kesme taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak hesaplanmasında kullanılabilecek analitik yöntemler sunulmuştur (7).

Gendron, Picard ve Guérin (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmada fiber kompozit şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının belirlenmesine yönelik bir analitik yöntem sunulmuş ve bu yöntem test edilen bir T-kiriş üzerinde denenmiştir. İlk olarak kirişin kesme dayanımı hesaplanmış ve daha sonra kesme dayanımını arttıracak şeritlerin tasarımı yapılmıştır. Daha sonra şeritler kirişin yatay eksenine açı yapar şekilde kirişin yan yüzlerine yapıştırılmış ve kiriş

test edilmiştir. Sonuçta, geliştirilen analitik yöntemin uygulaması test edilen T-kiriş üzerinde yapılmıştır (8).

Norris, Saadatmanesh ve Ehsani (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada dikdörtgen kesitli 19 adet deney elemanı üretilmiştir. Bunlardan altısı diğer elemanlardan kısa ve yetersiz kesme donatılı olarak üretilmiş. Bu elemanlardan beş tanesi $\pm 45^\circ$ ve $0^\circ/90^\circ$ geometrideki CFRP şeritlerle güçlendirilmiş bir elemanda kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer 13 eleman daha sık etriye kullanılarak kesme dayanımını arttırılmıştır. Yüklemeler sabit moment ve kirişin ortasında kesme kuvveti yaratmayacak şekilde $L/4$ ve $3L/4$ uzaklıktan yapılmıştır. Bu elemanlardan 12 si 0° , 90° ve $\pm 45^\circ$ 'lik CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilmiştir. CFRP şeritlerin elemanlara yapıştırılmasında iki farklı epoksi kullanılmıştır. Epoksilerden biri inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan epoksi diğeri de kauçuk bazlı bir epoksi olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre CFRP şeritler kirişlerin dayanımlarını ve rijitliklerini arttırmışlardır. Göçme modu ve dayanımındaki artışlar CFRP şeritlerin yerleştirilme şekline bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir (9).

Triantafillou (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yetersiz kesme donatılı betonarme kirişler CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere 11 adet basit mesnetli dikdörtgen kiriş üretilmiştir. Yüklemeler iki noktadan yapılmıştır. Kirişlerin boyutları 70 mm x 110 mm x 1000 mm ve kesme açıklığı da 320 mm dir. Deneyde iki eleman kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer dokuz elemanda genişlik ve açıda CFRP şeritler betonarme kirişler üzerine yapıştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre betonarme kirişlerin kesme dayanımı arttırmak için epoksi ile yapıştırılan CFRP şeritlerin çok etkili olduğu görülmüştür. Kesme dayanımında kontrol kirişlerine göre %45 ile %95 arasında artış sağlanmıştır (10).

Çelik levhalarla ilgili literatürde bulunan bazı analitik ve deneysel çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Adhikary, Mutsuyoshi ve Sano (2000) tarafından yapılan çalışmada epoksiyle yapıştırılmış yatay ve devamlı çelik levhalar kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesi konusunda deneyler gerçekleştirilmiştir. İki adet kontrol kirişi ve on adet yan taraflarına çelik levha yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. Daha sonra bu kirişler iki boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Kullanılan kirişlerin boyutları 150 mm(b) x 200 mm(h) x 2600 mm(l)'dir. Güçlendirme uygulandıktan sonra da kesme göçmesi istenen bölgelerde iç kesme donatısı kullanılmamıştır. Çelik levhalar yapıştırılmadan önce kirişin yüzeyi pürüzlenerek artık tabaka giderilmiş ve sonra fırçalanarak ve asetonla silinerek temizlenmiştir. Çelik levhaların yapışacak yüzleri de taşlanmış ve asetonla temizlenmiştir. Çelik levhalar kirişlerin yan taraflarına betonla arasında 2 mm mesafe kalacak şekilde sabitlenmiş ve aradaki boşluk epoksi ile doldurulmuştur. Epoksi reçine tamamen doldurulduktan sonra levhalar bağlantı yerlerinden sıkılmıştır. Yapılan deneyler ve analizlerle; dıştan bağlı devamlı çelik levhaların betonarme kirişlerin kesme dayanımını geliştirdiği ve eğilme dayanımını ve rijitliğini arttırdığı ispatlanmıştır. Uygulaması kolay olan ve nispeten az bağlantı işleri gerektiren bu yöntemin, kesme ve eğilme davranışının iyileştirilmesi gereken betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde verimli bir şekilde kullanılabileceği gözlenmiştir. Çelik levhalı kirişlerde levha genişliğinin ve kalınlığının artmasıyla kesme dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Güçlendirilen kirişlerde %84'lük bir kesme dayanımı artışı sağlanmıştır (11).

Sharif, Al-Sulaimani, Basunbul, Baluch ve Husain, (1994) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yetersiz kesme dayanımlı ve kesme hasarlı betonarme kirişlerin dıştan bağlı çelik levhalarla güçlendirilmesi ele alınmıştır. Kesme göçmesini engellemek ve sünek davranışı geliştirmek için çelik levhalar değişik tertiplerde kullanılmıştır. 4 değişik tipte levhayla güçlendirme yapılmış olup şerit, U-tipi, kanat tipi ve ceket tipi levhalar iki bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılarak kirişlere yapıştırılmışlardır.

Onarılan bütün kirişlerin dayanımları artmış ve azalan rijitlikler yeniden eski seviyelerine ulaşmıştır. Bunun yanında kesme bölgeleri tamamen örtülü olarak onarılan ve eğilme göçmesi meydana gelen kirişlerin haricinde çoğu kirişte, levhaların ayrılmasıyla göçme ani olmuştur. Bu çalışmadan çıkartılan sonuçlar;

- Kesme hasarlı betonarme kirişler, kritik kesme bölgelerine epoksiyle dıştan yapıştırılan çelik levhalarla etkin bir şekilde onarılmıştır.
- Ceket levhalarla onarılan yani kesme bölgesi tamamen örtülen kirişler en yüksek dayanım artışı ve süneklik gelişimi göstermişlerdir.
- U-tipi, şerit ve kanat tipi levhalarla onarılan kirişler kesme dayanımında artış göstermiş ancak beton kabuğu yırtarak ve ayırarak aniden kırılmışlardır (12).

Balush vd. (1995) zarar görmüş betonarme kirişlerin ve döşemelerin güçlendirilmesi ve onarımı için dıştan bağlı levhaların kullanılmasının evrensel bir geçerlilik kazandığını ama buna rağmen levhanın geometrisi ve diğer parametrelerin kombinasyonunun neden olduğu kesme göçmesinin yani aşırı gevrek kırılma modunun meydana gelme ihtimalinin akıllarda soru işareti bıraktığını belirtmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada ise çekme bölgesinden levhalanmış betonarme kirişlerin tasarımında kullanılmak üzere, etriyelerin verim derecesini de içeren, bir formül önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda 26 adet çeşitli kesitlere, levha kalınlığına, iç donatıya, etriye aralığına, beton dayanımına ve donatı akma dayanımına sahip betonarme kiriş test edilmiştir. Levhalar iki bileşenli epoksi ile kirişin alt çekme bölgesine yapıştırılmışlardır. Kırılma modları eğilme, kesme ve eğilme-kesme olarak tanımlanmıştır. 10 yıllık bir periyot boyunca çoğu araştırmacı grup tarafından gerçekleştirilen deneylere dayanarak, kabuk gerilimi büyüklüğü arttığı için levhalanmamış betonarme kirişlerin dayanımında kullanılan ACI formülüyle levhalanmış betonarme kirişlerin kesme dayanımının güvenli bir şekilde tahmin edilemeyeceği ortaya konmuştur. Kabuk gerilimi varlığında levha yerleşim yerlerinde iki eksenli çekme bölgeleri gelişir ve bu da iç donatı seviyesinde beton kabuğu parçalayan yatay bir çatlağın oluşumuna neden olmaktadır. Yatay çatlak gelişmekte ve dik bir şekilde yükleme noktasına hareket etmektedir. Sonuçta tasarım yaparken levha kalınlığının sınırlandırılması, kesme çatlakları oluşumu sırasında

etrijelerin daha çok çalışmasını sağlamıştır. Yanlış tasarlanan levhalanmış betonarme kirişler, levhalanmamış kirişlerin göçme yükünden daha az bir yük seviyesinde göçebilmektedirler (13).

2. DENEY ELEMANLARI VE LABORATUVAR TEKNİĞİ

2.1. Genel

Betonarme elemanların davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biri kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır (a/d). Kesme açıklığı mesnetle yük arasındaki uzaklıktır. Bu oranın (a/d) alacağı değerler sonucunda aynı özellikteki kirişlerde farklı dayanım, çatlak ve göçme mekanizması görülebilir. a/d oranının çok büyük olduğu ($a/d > 7$) durumda kiriş eğilmede taşıma gücüne ulaştığında asal çekme gerilmeleri düşük düzeyde kalacak ve kirişte eğik çatlaklar oluşmayacaktır. a/d oranının 3 ile 7 ($3 < a/d < 7$) arasında olduğunda maksimum moment bölgesinde kiriş eksenine dik yönde eğilme çatlakları oluşacak, yükün artmasıyla kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları yüke doğru uzamaya başlayacaktır. Oluşan eğilme çatlakları sebebiyle kiriş ani ve gevrek bir şekilde kırılır. a/d oranı 1,5 ile 3 ($1,5 < a/d < 3$) arasında olması durumunda eğilme çatlakları yüke doğru uzayıp eğik çatlakları oluşturacaktır. Yükün bulunduğu bölgede oluşan yerel basınç gerilmeleri eğik çatlakların daha fazla gelişmesine engel olur ve kiriş yük taşımaya devam eder. Yük arttıkça yükleme bölgesindeki beton ezilir ve kiriş artık yük taşıyamaz. Kirişte ($3 < a/d < 7$) durumunda olduğu gibi ani ve gevrek bir kırılma gözlenmez. a/d oranının 1 den ($a/d \leq 1$) küçük olduğu durumda kirişte eğik çatlaklar oluşur ve kiriş bir gergili kemer gibi davranır ve yük oluşan basınç çubuğu ile mesnete aktarılır. Bu durumda göçme gövdedeki basınç gerilmeleri dolayısıyla betonun ezilmesi veya donatıda oluşan yüksek gerilmeler sonucu kenetlenmenin yok olması sonucu meydana gelir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada deney elemanın boyutları ve yükleme şekli eğik çekme gerilmelerinin etkili olduğu davranış türünün elde edilmesi amaçlanarak tasarlanmıştır.

2.2. Modellerin Tasarımı

Betonarme yapılarda kirişlerin döşeme ile beraber çalıştığı ve tüm analizlerin bu yönde yapıldığı göz önüne alınarak deney elemanları tablalı kiriş olarak seçilmiştir. Boyutlar 200x600 mm kesitli betonarme kirişin 3/5 ölçekle küçültülmüş durumuna karşılık gelmektedir. Yükleme, istenilen eğik çekme kırılması davranışının kirişe hakim olması açısından kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) yaklaşık 5 olacak şekilde, tek noktadan tersinir tekrarlanır yükleme olarak uygulanmıştır. Bütün kirişlerde boyuna donatı olarak $\Phi 20$ mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Etriye donatısı olarak $\Phi 6$ mm çapında donatı 75 mm aralıklarla kullanılmıştır. Deney Elemanlarının özellikleri Çizelge 2.1’de özetlenmiştir. Deney elemanlarının donatı detayları da Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de sunulmuştur.

Kiriş-1 deney elemanı kesme dayanımı eğilme dayanımından daha büyük tasarlanmış kontrol elemanıdır. Bu elemanda yeterli miktarda etriye donatısı kullanılarak kiriş kesme dayanımı arttırılmıştır. Bu eleman üzerinde CFRP şeritlerle güçlendirme çalışması yapılmamıştır. (Resim 2.1)

Kiriş-2 deney elemanı kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanmış kontrol elemanıdır. Bu elemanda etriye donatısı kullanılmayarak kesmeden göçmesi amaçlanmıştır. Bu eleman üzerinde de CFRP şeritlerle güçlendirme çalışması yapılmamıştır. (Resim 2.2)

Kiriş-3 deney elemanında etriye donatısı kullanılmayarak betonarme kiriş kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanmıştır. Deney elemanın yan yüzeylerine 50 mm genişliğinde CFRP şeritler 285 mm aralıklarla 45° ve 135° lik açılarla yapıştırılmıştır. CFRP şeritler alt ve üst uçlarından ankrajlar ile betonarme kirişe sabitlenmiştir. Çapraz olarak yerleştirilen CFRP şeritlerin kiriş gövdesi alt ve üst ucunda birleşim bölgelerinde her iki ankraj yan yana gelecek şekilde ankraj düzenlemesi yapılmıştır. Kiriş-3 deney elemanın bir yüzündeki CFRP şeritler alt ve üst uçlarından 12’şer adet ankrajla sabitlenmiştir (Resim 2.3).

Kiriş-4 deney elemanında etriye donatısı kullanılmayarak betonarme kiriş kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanmıştır. Deney elemanın yan yüzeylerine 100 mm genişliğinde CFRP şeritler 285 mm aralıklarla 45° ve 135° lik açılarla yapıştırılmıştır. Çapraz olarak yerleştirilen CFRP şeritler birleşim bölgelerinde üç, tek şerit uçlarına iki adet ankraj gelecek şekilde alt ve üst uçlarından betonarme kirişe sabitlemiştir. Kiriş-4 deney elemanın bir yüzündeki CFRP şeritler alt ve üst uçlarından 19'ar adet ankrajla sabitlenmiştir. (Resim 2.4)

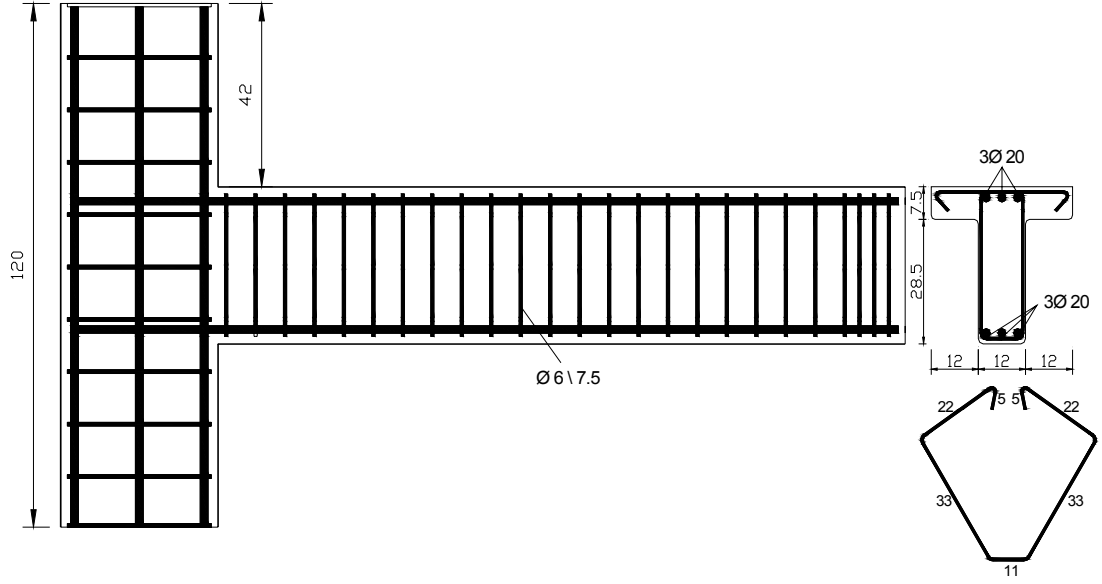
Kiriş-5 deney elemanında etriye donatısı kullanılmayarak betonarme kiriş kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanmıştır. Deney elemanın yan yüzeylerine 50 mm genişliğinde CFRP şeritler 143 mm aralıklarla 45° ve 135° lik açılarla yapıştırılmıştır. Çapraz olarak yerleştirilen CFRP şeritlerin üst uçları birleşim bölgelerinde iki ankraj yan yana, alt uçları da birleşim bölgelerinde bir ankraj gelecek şekilde düzenlenerek betonarme kirişe sabitlenmiştir. Kiriş-5 deney elemanın bir yüzündeki CFRP şeritler üst uçlarından 24, alt uçlarından 12'şer ankrajla kirişe sabitlenmiştir. (Resim 2.5)

Kiriş-6 deney elemanında etriye donatısı kullanılmayarak betonarme kiriş kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanmıştır. Deney elemanı üzerine 50 mm ve 100 mm genişliğinde CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Kiriş 6 deney elemanında çapraz olarak yerleştirilen CFRP şeritlerin düzenlemesi Kiriş-3 deney elemanı ile özdeştir. Kiriş-3 deney elemanının davranışını iyileştirmek ve CFRP şeritlerin birleşerek yapıştıkları kiriş alt bölümündeki kabuk betonundaki soyulma sonucu meydana gelen göçme modunu önlemek amaçlanmıştır. 50 mm genişliğindeki CFRP şeritler 285 mm aralıklarla 45° ve 135° lik açılarla betonarme kirişin sadece yan yüzeylerine, 100 mm kalınlığındaki CFRP şeritler ise 285 mm aralıklarla 90° lik açıyla betonarme kirişin yan yüzeylerine ve tabla altına yapıştırılmıştır. CFRP şeritler alt ve üst uçlarından ankrajlar ile betonarme kirişe sabitlenmiştir. 50 mm genişliğindeki çapraz şeritlerin ve 100 mm genişliğindeki dik şeritlerin birleştiği kiriş gövdesi alt ve üst kenarlarında iki adet ankraj yan yana gelecek şekilde düzenleme yapılmıştır. Kiriş-6 deney elemanın bir yüzündeki CFRP şeritler alt ve üst uçlarından 12'şer adet ankrajla sabitlenmiştir (Resim 2.6).

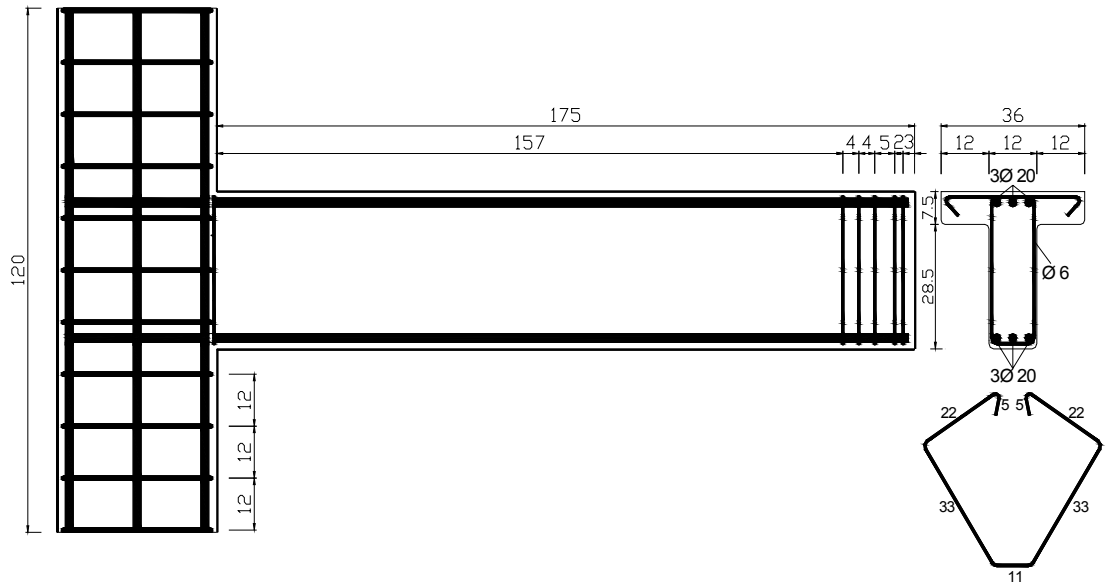
Çizelge 2.1. Elemanların Özellikleri

Deney Elemanı	Deney Elemanı					Güçlendirme Yöntemi				
	L (mm)	a (mm)	d (mm)	a/d	Etriye Donatısı	CFRP Şerit Genişliği (mm)	Yapıştırma Açısı	Yapıştırma Aralığı (mm)	Ankraj Uygulaması	CFRP Şerit Uygulama Yeri
Kiriş-1 (Kontrol Elemanı)	1750	1675	335	5	Var	-----	-----	-----	-----	-----
Kiriş-2 (Kontrol Elemanı)	1750	1675	335	5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Kiriş-3 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5	-----	50	45°-135°	285	Var	Yan Yüzeyler
Kiriş-4 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5	-----	100	45°-135°	285	Var	Yan Yüzeyler
Kiriş-5 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5	-----	50	45°-135°	143	Var	Yan Yüzeyler
Kiriş-6 (Güçlendirilmiş Eleman)	1750	1675	335	5	-----	50/100*	45°-135°/90°*	285	Var	Yan Yüzeyler ve U Sargı*

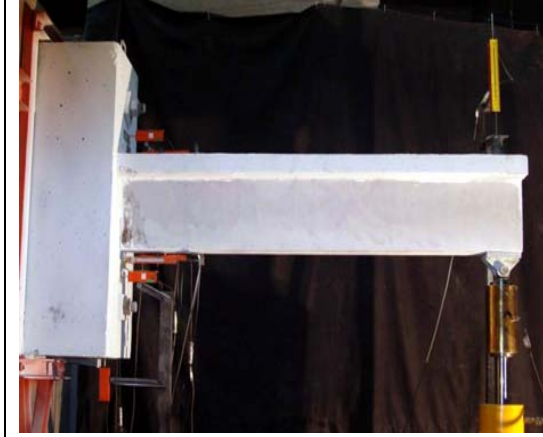
*Çapraz şeritlerin genişliği 50 mm, açısı 45°-135° ve kirişin 2 yüzünde, dik şeritlerin genişliği 100 mm açısı 90° ve U şeklinde sarılı



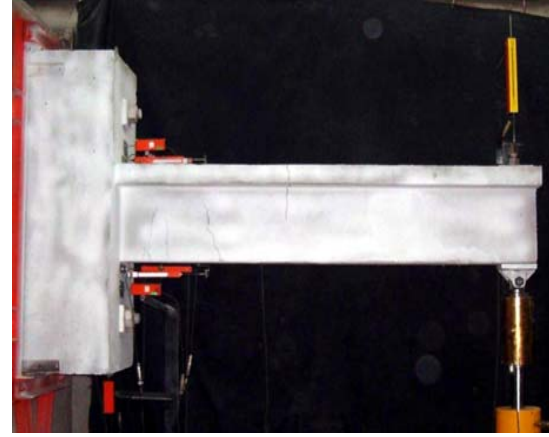
Şekil 2.1. Kiriş-1 Kontrol Elemanı



Şekil 2.2. Kiriş-2, 3, 4, 5, 6 Yetersiz Kesme Donatılı Deney Elemanı



Resim 2.1. Kiriş-1 Kontrol Elemanı



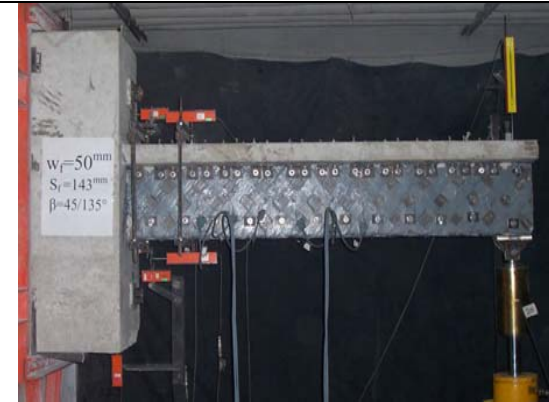
Resim 2.2. Kiriş-2 Yetersiz Kesme Donatılı Kiriş



Resim 2.3. Kiriş-3 $W_f=50$, $S_f=285$, $\beta=45/135^\circ$



Resim 2.4. Kiriş-4 $W_f=100$, $S_f=285$, $\beta=45/135^\circ$



Resim 2.5. Kiriş-5 $W_f=50$, $S_f=143$, $\beta=45/135^\circ$



Resim 2.6. Kiriş-6 $W_f=50$, $S_f=285$, $\beta=45/135^\circ$

2.3. Malzeme Özellikleri

Kirişlerin yapımında kullanılan beton ve donatıların mekanik özellikleri laboratuvarında gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının aynı mekanik özelliklerdeki beton ve donatıdan üretilmesine, deney sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirileceği göz önüne alınarak sağlıklı değerlendirmeler elde etmek için özen gösterilmiştir. Bütün deney elemanlarında aynı anda temin edilen inşaat demiri kullanılmış ve beton dökümü için hazırlanan beton karışımından her defasında numuneler alınıp test edilmiştir.

2.3.1. Beton özellikleri

Deney elemanlarında kullanılan betonun 28 günlük basınç dayanımının tasarım değerleri doğrultusunda 25 MPa olması hedeflenmiştir. Bu hedefe yönelik olarak hazırlanan betonun 1 m³ (2430 kg) için karışım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımları her bir elemandan beton dökümü sırasında alınan 3 adet standart silindir numunenin (150 mm x 300 mm) test edilmesi ile bulunmuştur (Resim 2.7). Deney elemanlarının ortalama basınç dayanımları Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Beton karışım oranları

Malzeme Türü	Ağırlık (kg)
Portland Çimentosu	520
Su	280
Kum (0-7 mm)	650
Çakıl (7-15 mm)	980

Çizelge 2.3. Deney Elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları

Deney Eleman No	Beton Basınç Dayanımı f_c' (MPa)
1	33,00
2	30,40
3	35,60
4	35,80
5	35,20
6	35,00



Resim 2.7. Standart silindir numunenin test edilmesi

2.3.2. Donatı özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan $\Phi 20$ ve $\Phi 10$ mm'lik nervürlü, $\Phi 6$ mm'lik düz donatılardan alınan numuneler test edilmiştir. Her bir donatı türü için üçer numune test edilmiş olup bu numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Ek 1'de verilmiştir. Grafiklerden elde edilen dayanım değerleri ise Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Donatıların dayanım değerleri

Donatı Çapı ϕ (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı f_{yk} (MPa)	Kopma Dayanımı f_{su} (MPa)
6	S220	275,0	417,0
10	S420	304,2	443,1
20	S420	414,0	687,9

2.3.3. CFRP şeritlerin özellikleri

Güçlendirmede CFRP şeritler için Sika Wrap 160C karbon lifli dokuma malzemesi kullanılmıştır (Çizelge 2.5). Sika Wrap 160C betonarme, yığma ve ahşap yapı elemanları için dışarıdan uygulamalı, tek doğrultulu, örülü ve karbon lifli güçlendirme malzemesidir.

Sika Wrap 160C betonarme, yığma ve ahşap yapıların eğilme ve kayma dayanımını arttırmak için kullanılır. Çok hafif bir malzeme olup kompleks şekilli yapılara uygulanabilmektedir (kolonlar, kirişler, bacalar, kazıklar ve duvarlar). Kimyasal ve çevre şartlarına dayanıklıdır. Yüksek dayanımlıdır ve korozyon riski yoktur.

Çizelge 2.5. Sika Wrap 160C malzemesi özellikleri

Sika Wrap 160C Karbon Lifli Dokuma Malzemesi	
Lif Yapısı	%99 Ana doğrultuda,%1 Destekleyici doğrultuda lifli
Ağırlığı	220 gr/m ²
Kalınlığı	0,12 mm
Liflerin Çekme Dayanımı	4100 N/mm ²
Liflerin Elastisite Modülü	231000 N/mm ²
Kopmadaki Uzama	%1.7
Dokuma Uzunluğu	50 m
Dokuma Genişliği	600 mm

2.3.4. CFRP şeritlerin yapıştırıcısının özellikleri

Dıştan uygulanacak CFRP şeritlerin deney elemanlarına yapıştırılmasında Sikadur 330 marka yapıştırıcı kullanılmıştır (Çizelge 2.6). Sikadur 330 iki bileşenli, suya dayanıklı, yüksek dayanımlı solventsiz yapıştırma harcıdır.

Sikadur 330'un birçok kullanım alanı olup beton, taş, metal, ağaç ve yapı malzemeleri için çok iyi bir yapıştırıcı maddedir. Uygulaması kolaydır. Uygulamadan önce, sonra ve kür sonrası neme dayanıklıdır. Yüksek mukavemete sahiptir ve devamlı yükler altında iyi bir sünme dayanımı göstermektedir. Sıcaklık ve aşınma dayanımları yüksek olup darbelere karşı dayanıklıdır. Sika Wrap sistemi ile tamamen uyumludur.

Çizelge 2.6. Sikadur 330 malzemesi özellikleri

Sikadur 330 Doyurma Reçinesi	
Yoğunluk	1,31 kg/l
Karışım Oranı	A:B =4:1
Uygulama Sıcaklığı	" +10 C° - +35 C°
Çekme Mukavementi	30 N/mm ² (+23 C° 7 gün kür aldıktan sonra)
Eğilmede Elastisite Modülü	3800 N/mm ² (+23 C° 7 gün kür aldıktan sonra)

2.3.5. Ankraj malzemesi özellikleri

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada $\Phi 10$ mm'lik sonsuz dişli malzeme kullanılmıştır. Ankraj malzemesinden alınan üçer numune ile kopma dayanımı test edilmiş olup bu testler sonucu elde edilen dayanım değerleri Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Ankraj malzemesi dayanım değerleri

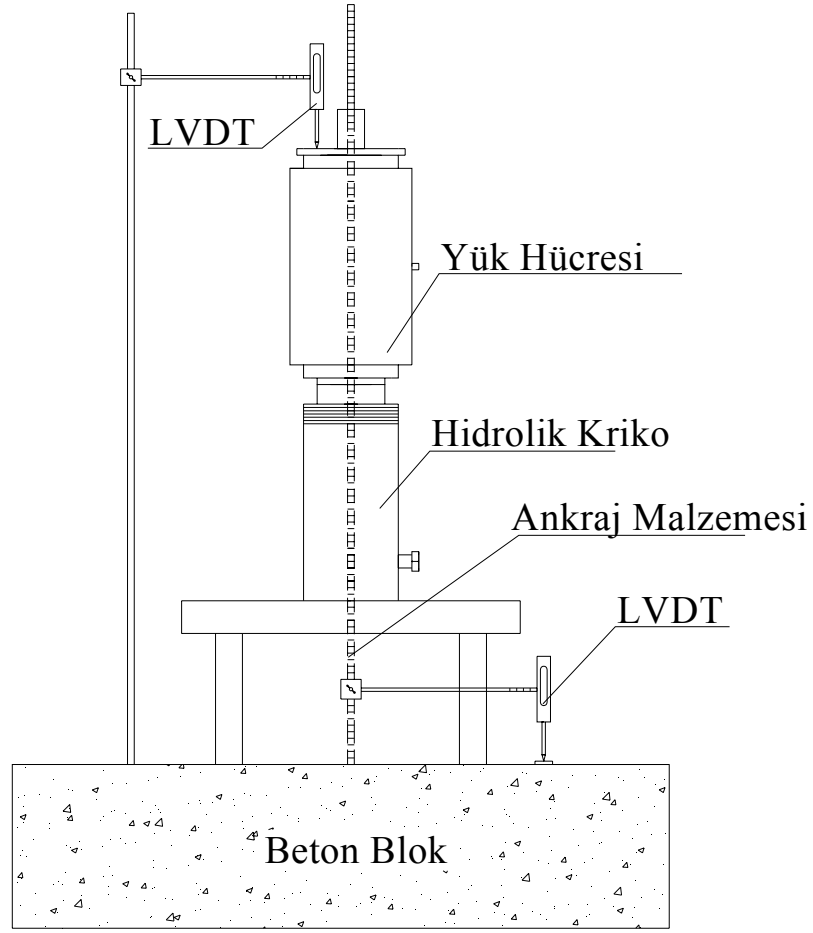
Ankraj Malzemesi	Akma Dayanımı	Kopma Dayanımı
Çapı ϕ (mm)	f_{yk} (MPa)	f_{su} (MPa)
10	275	417

Ayrıca alınan üç adet ankraj malzemesi ile betondan sıyrılma deneyi yapılmıştır. Betondan sıyrılma deneyi için deneyde kullanılan ankraj malzemesi ve aynı basınç dayanımına sahip beton blok kullanılmıştır. Beton blok deneyde olduğu gibi 50 mm delinmiş içerisine basınçlı hava tutularak temizlenmiştir. Deneyde hazırlanan ankraj epoksisi hazırlanarak ankraj malzemesi açılan deliğe yerleştirilmiştir. Ankraj epoksisinin kuruması için bekletilmiştir.

Ankraj epoksisinin sertleşmesinden sonra gerekli deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 2.3). Hazırlanan deney düzeneğinde iki adet 50 mm'lik LVDT ve 600 kN basınç, 300 kN çekme kapasiteli bir yük ölçme hücresi kullanılmıştır. Deney süresince yükleme 300 kN kapasiteli bir hidrolik krikoya bağlı el kontrollü pompa yardımıyla yapılmıştır. Deney sonucunda ankraj malzemesi beton blokta konik şekilli beton parçası ile birlikte sıyrılarak göçmüştür. Deney sonuçları Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Ankraj malzemesi sıyrılma deney sonuçları

Deney No	Yük (kN)	Sıyrılma Şekli
1	31,94	Konik olarak betonun sıyrılması
2	31,94	Konik olarak betonun sıyrılması
3	29,00	Konik olarak betonun sıyrılması



Şekil 2.3. Ankraj Malzemesinin betondan sıyrılma deney düzeneği

2.3.6. Ankraj için kullanılan epoksinin özellikleri

Ankrajların yerleştirilmesi işleminde Sikadur 31 marka epoksi malzeme kullanılmıştır (Çizelge 2.9). Sikadur 31 solventsiz, tiksotropik, 2 bileşenli epoksi reçine ve yüksek dayanımlı dolgu maddelerinin kombinasyonundan oluşmuş yapıştırma ve tamir harcıdır.

Sikadur 31 beton tamiratında, çatlak ve yüzey koruma işleminde, geniş çatlakların dolgusunda, ankraj işlerinde ve beton, taş, seramik, harç, sıva, çelik, demir alüminyum, ahşap, polyester, epoksi ve cam yüzeylerde tesviye amaçlı olarak kullanılabilir.

Çizelge 2.9. Sikadur 31 Epoksi Reçinesi özellikleri

Sikadur 31 Epoksi Reçine	
Yoğunluk	1,65 kg/l
Karışım Oranı	A:B =3:1
Uygulama Sıcaklığı	" +10 C° - +20 C°
Basınç Dayanımı	60-70 N/mm ²
Çekme Dayanımı	15-20 N/mm ²
Yapışma (Çeliğe)	15 N/mm ²
Yapışma (Betona)	3,0-3,5 N/mm ²
Elastisite Modülü	4300 N/mm ²

Sikadur 31'in uygulaması kolay olması, kuru ve nemli yüzeylerde kullanılabilmesi, yüksek sıcaklıklarda akma yapmaması, rötre yapmadan sertleşebilmesi, betona ve diğer malzemelere iyi yapışabilmesi, erken dayanım alması, yüksek aşınma ve kimyasal dayanıma sahip olması gibi avantajları vardır.

2.4. Deney Elemanlarının Hazırlanması

Deney elemanlarının test edilmek üzere hazır hale getirilmesi için gereken tüm işlemler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, her bir eleman için donatı kafesinin ve kalıbın hazırlanması, ardından betonun üretilip dökülmesi ve son olarak da güçlendirme işleminin uygulanıp test aşamasına geçilmesi şeklinde olmaktadır.

İlk olarak elemanların donatı kafesleri detaylarda belirtilen ölçülerde hazırlanmıştır. Boyuna donatı olarak kullanılan $\Phi 20$ mm çapında nervürlü inşaat demirleri tasarlanan boyda kesilip bükülmüştür. $\Phi 6$ mm çapında donatı kullanılarak önceden hazırlanan bükme kalıbı içerisinde gerekli etriye üretimi yapılmıştır. Daha sonra etriyeler üstten ve alttan $\Phi 20$ mm çapındaki kiriş çekme donatısına bağ teli ile bağlanarak donatı kafesleri hazırlanmıştır.

Kalıplar elik malzemeden etirilmiş olup beton dökümü için laboratuvarda hazırlanmıştır. Beton dökümü ve vibrasyonu sırasında kalıpların açılmasını ve deplasman yapmasını engellemek için kalıplar profillerle desteklenerek sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıbın i yüzeyi betonun yapışmasını önlemek amacıyla yağlanmış ve donatı kafesleri paspayı bırakacak şekilde kalıbın içine yerleştirilmiştir (Resim 2.8).

Bütün bu işlemlerden sonra beton dökümü aşamasına gelinmiştir. Laboratuvarda betoniyer yardımıyla hazırlanan beton dikkatli bir vibrasyon ile kalıplara yerleştirilmiştir (Resim 2.9). Betonun yeterli katılığa gelmesi için yaklaşık iki gün beklenmiş ve kalıplar sklmştr. Kirişler ve betondan alınan silindir numuneleri ıslak çuvallarla sarılarak 28 gün boyunca kr yapılmıştır.

2.5. Model Kirişlerin Güçlendirilmesi

Beton dökümü ve kr tamamlanan deney elemanlarının güçlendirme işlemine beton dökümünden 28 gün sonra başlanmıştır. Güçlendirilecek deney elemanları için gerekli olan CFRP şeritler hazırlanmıştır. Sikadur 330 yapıştırıcı malzeme ile deney elemanlarının üzerine yapıştırılmıştır. CFRP şeritlerin yapıştırılmasını sağlayan epoksinin kuruması için 7 günlük kr süresi uygulanmıştır. Daha sonra kirişler üzerine ankrajların yapılması işlemine başlanmıştır.



Resim 2.8. Beton dökümüne hazır deney elemanları



Resim 2.9. Beton dökümü

2.5.1. CFRP şeritlerin yapıştırılması

Önce kiriş yan yüzeyi üzerindeki bölgeler, iyi bir yapışma sağlanması amacı ile yüzeyi taşlanmış ve pürüzsüz hale getirilmiştir. CFRP şeritlerin yapıştırılacağı yerler kiriş üzerinde işaretlenmiştir. Beton yüzeyindeki toz ve artık maddeler basınçlı hava püskürtülerek temizlenmiştir. Ardından bu yüzeyler ıslak süngerle silinerek temizlenmiş ve tekrar hava püskürtme uygulanarak yapışmaya hazır hale getirilmiştir.

Epoksi malzemesinin hazırlamak için Sikadur 330 malzemesinin her iki bileşeni önce kaplarında karıştırılmışlardır. Daha sonra bileşenler A:B = 4:1 oranında alınarak başka bir kaba yerleştirilmişlerdir. Hava sürüklenmesine izin vermeyecek bir şekilde üç dakika boyunca homojen bir karışım elde edinceye kadar karıştırılmıştır.

Hazırlanan epoksi yaklaşık 1,5 mm kalınlığında kiriş üzerinde belirlenen bölgelere sürülmüştür (Resim 2.10). CFRP şeritler bu yüzeylere yerleştirilerek üzerlerine CFRP şeritlerin liflerine paralel şekilde kuvvet uygulanarak CFRP şeritlerin beton yüzeye daha iyi yapışması sağlanmıştır (Resim 2.11). Son aşamada CFRP şeritlerin üzerine bir kat daha 1,5 mm kalınlığında iki bileşenli epoksi sürülmüştür. Test aşamasına kadar epoksi kurumaya bırakılmıştır.

Kesme dayanımı arttırmaya yönelik bu uygulamanın başarılı olması için CFRP şeritlerin kirişe çok iyi bir şekilde yapıştırılması gerekmektedir. CFRP şeritlerin kirişe iyi yapışması için her türlü özen gösterilmiştir



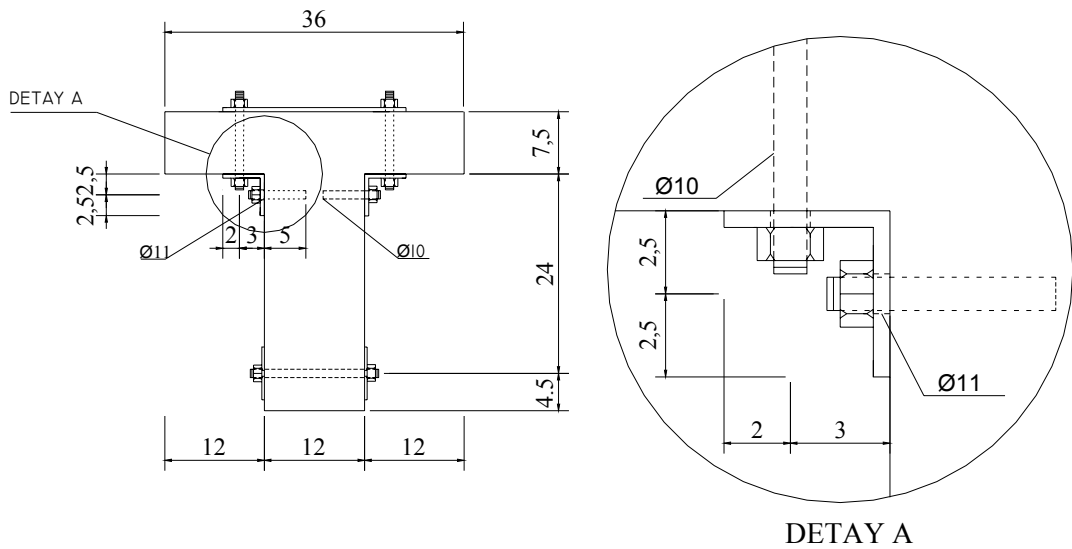
Resim2.10. Epoksinin sürülmesi



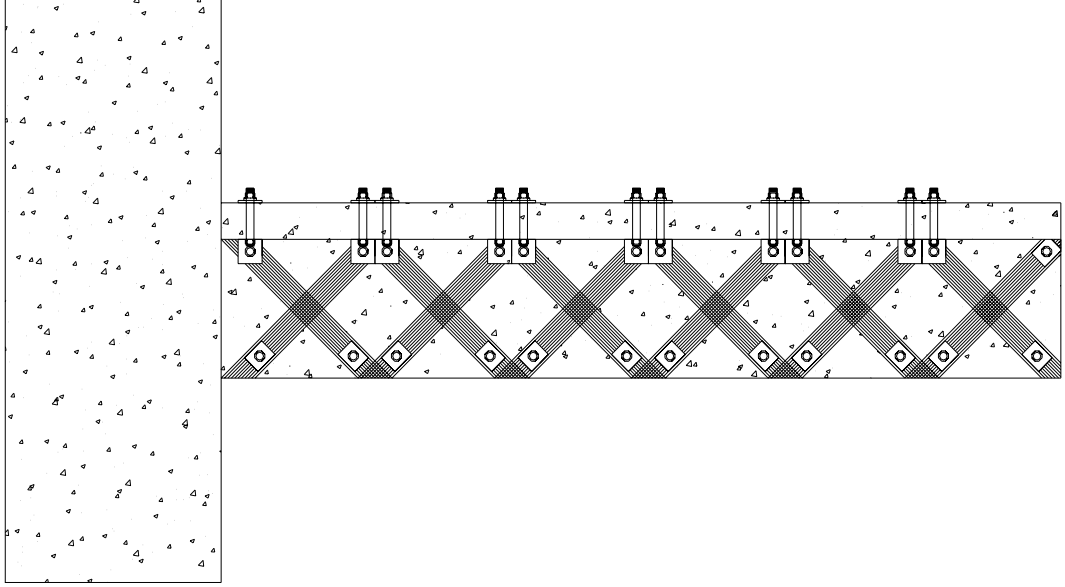
Resim 2.11. CFRP şeritlerin yapıştırılması

2.5.2. Ankrajların hazırlanması

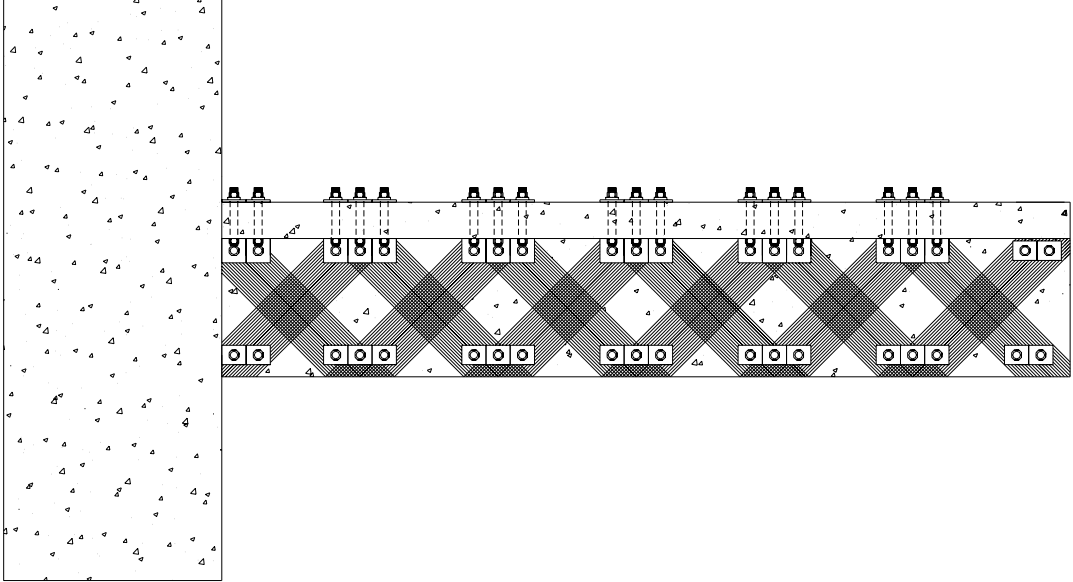
CFRP şeritlerin yapıştırılmasını sağlayan epoksinin kürünü almasından sonra ankrajların hazırlanması işine başlanmıştır. Kirişler üzerinde ankrajların yapılacağı noktalar belirlenmiştir (Şekil 2.5, 2.6, 2.7, 2.8). Matkap yardımı ile belirlenen noktalarda ankraj delikleri açılmıştır. Tabla boydan boya delinerek kullanılacak korniyer eleman ile tablanın kiriş gövdesi ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 2.4). Tabla ile kiriş arasına 50 mm'lik 50-50-5 korniyer yerleştirilmiştir. Tabla üstünde bulunan ankrajlar karşılıklı olarak 3 mm kalınlığında 40x250 mm lik levhalar ile birleştirilmiştir. Açılan deliklere Sikadur 31 Epoksi Reçinesi ile Ø10 luk sonsuz dişli malzemeler yerleştirilmiştir. Kirişin alt kısmındaki ankrajlar için 3 mm kalınlığında 50x40 mm'lik plakalar yerleştirilmiştir. Plakalar üzerine pul ve somunlar yerleştirilerek plakaların CFRP şeritlere tam olarak oturması sağlanmıştır.



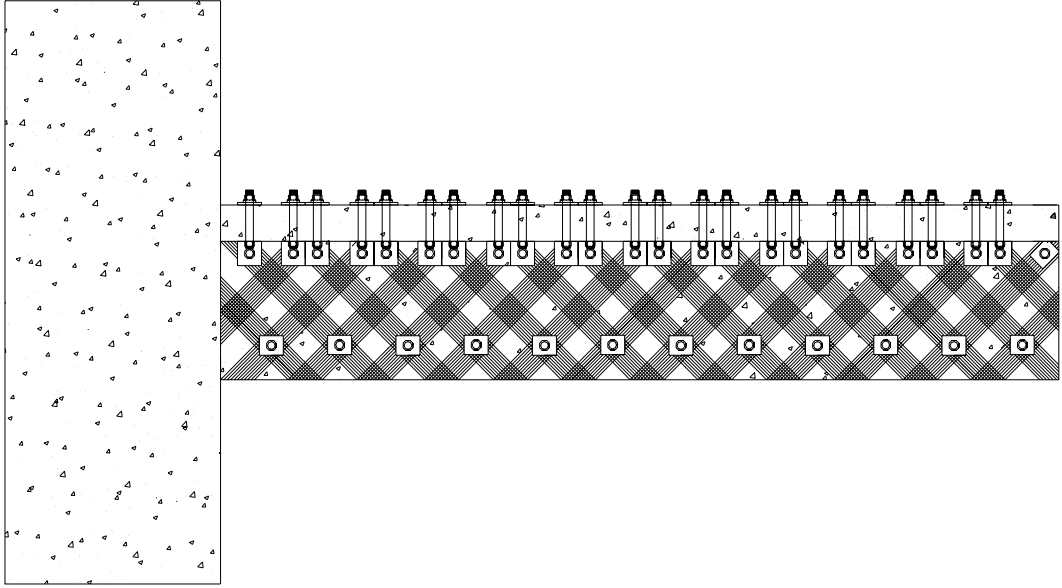
Şekil 2.4. Ankraj detayı



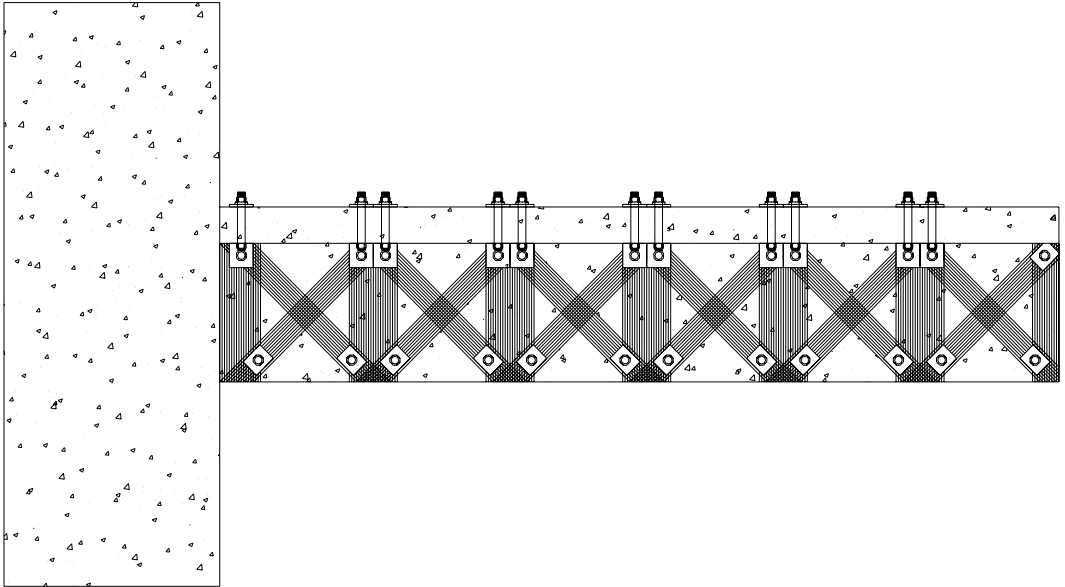
Şekil 2.5. Kiriş-3 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için ankraj şekli



Şekil 2.6. Kiriş-4 $W_f = 100$, $S_f = 285$ elemanı için ankraj şekli



Şekil 2.7. Kiriş-5 $W_f = 50$, $S_f = 143$ elemanı için ankraj şekli



Şekil 2.8. Kiriş-6 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için ankraj şekli

3. LABORATUVAR TEKNOLOJİSİ

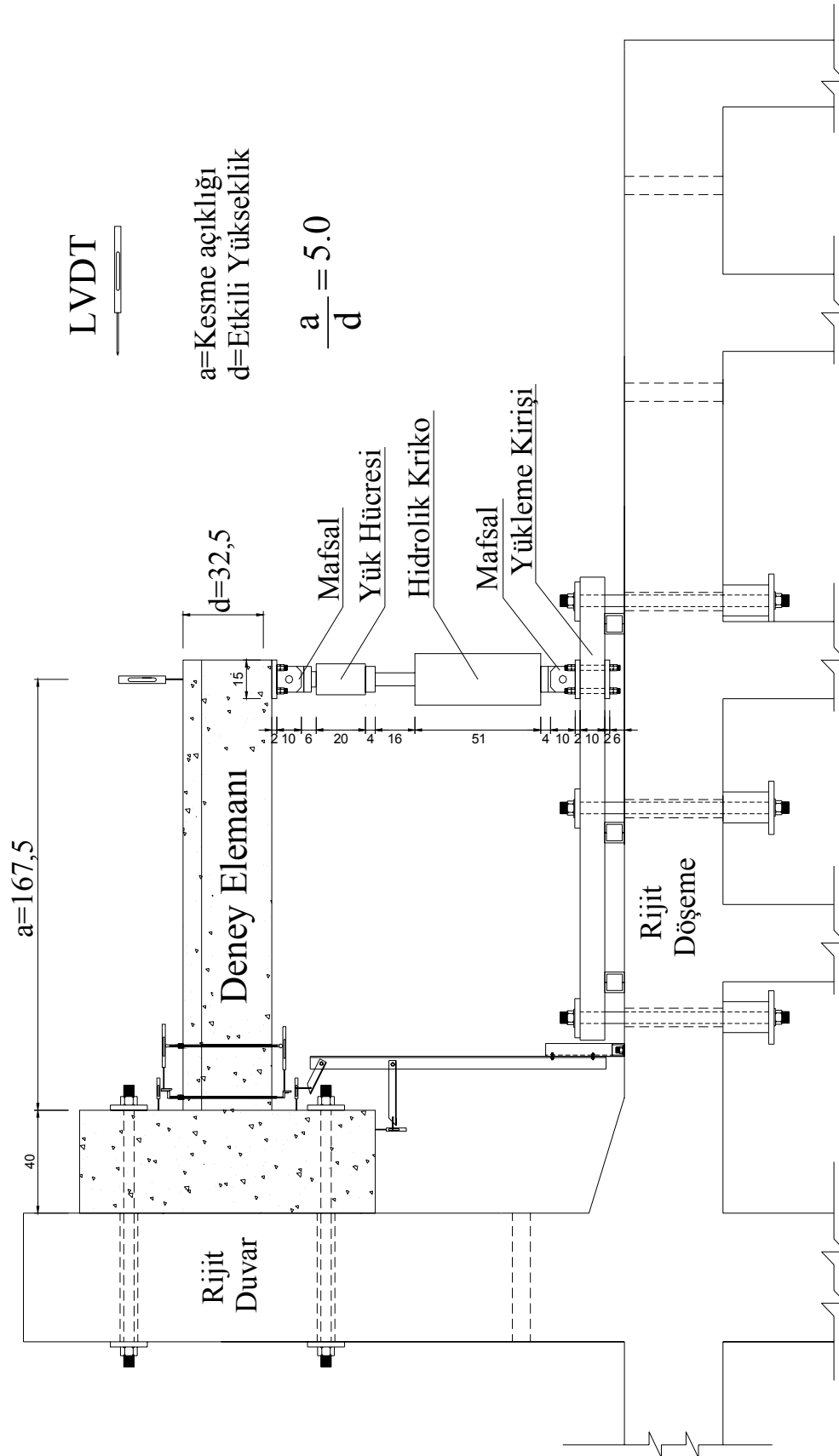
3.1. Genel

Deneysel çalışma programındaki kirişler Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır. Deney elemanlarının testi laboratuvarda bulunan rijit platform üzerinde gerçekleştirmiştir.

3.2. Yükleme ve Deney Düzeni

Üretilen deney elemanları rijit platformun 410 mm kalınlığındaki rijit duvarına 45 mm çapında yüksek dayanımlı çelikten üretilmiş saplamalar ile mesnetlenmiştir. Deney elemanlarına depremi benzeştirecek olan tersinir tekrarlanır yüklemenin uygulanabilmesi için kiriş elemanının alt yüzeyi ile rijit deney platformunun döşemesi arasında iki ucu mafsallı bir yükleme kolunu oluşturulmuştur. Testlerde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.1'de sunulmuştur.

Deney süresince yükleme 600 kN kapasiteli bir hidrolik krikoya bağlı el kontrollü pompa yardımı ile yapılmıştır. Deney elemanları tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Uygulanan yükün şiddeti, hidrolik kriko ile reaksiyon kirişi arasına yerleştirilen 600 kN basınç, 300 kN çekme kapasiteli bir yük ölçme hücresi (load cell) ile ölçülmüştür. Her bir elemanın test edilmesi sırasında sıfır okumaları alınarak yüklemeye başlanmış ve elemanın göçmesinden sonra yük boşaltılmıştır.



Şekil 3.1. Deney Düzenegi

3.3. Ölçüm Düzeni ve Veri Toplama

3.3.1. Ölçüm aletleri ve yerleşim düzeni

Deney elemanlarının test edilmesi sırasında tüm deplasmanlar elektronik doğrusal deplasman okuyucuları (LVDT-Linear Variable Displacement Transducer) ile ölçülmüştür. Bu ölçüm aletleri 0.0001 mm'ye kadar olan deplasman değişimlerini elektronik olarak ölçebilmekte ve ölçümler bir data toplayıcı aracılığı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında deplasman ölçümlerini düzenli olarak takip ederek alınan okumaları bilgisayarın sabit hafızasına yazabilen ve ayrıca istenilen deplasman ölçümünün yüke karşı grafiğini çizerek deneyin takibini kolaylaştıran bir yazılım mevcuttur. Deney elemanlarında 6 adet LVDT kullanılarak deplasman ölçümleri alınmıştır. Deneyler kiriş uç deplasmanının yüke karşı grafiği takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

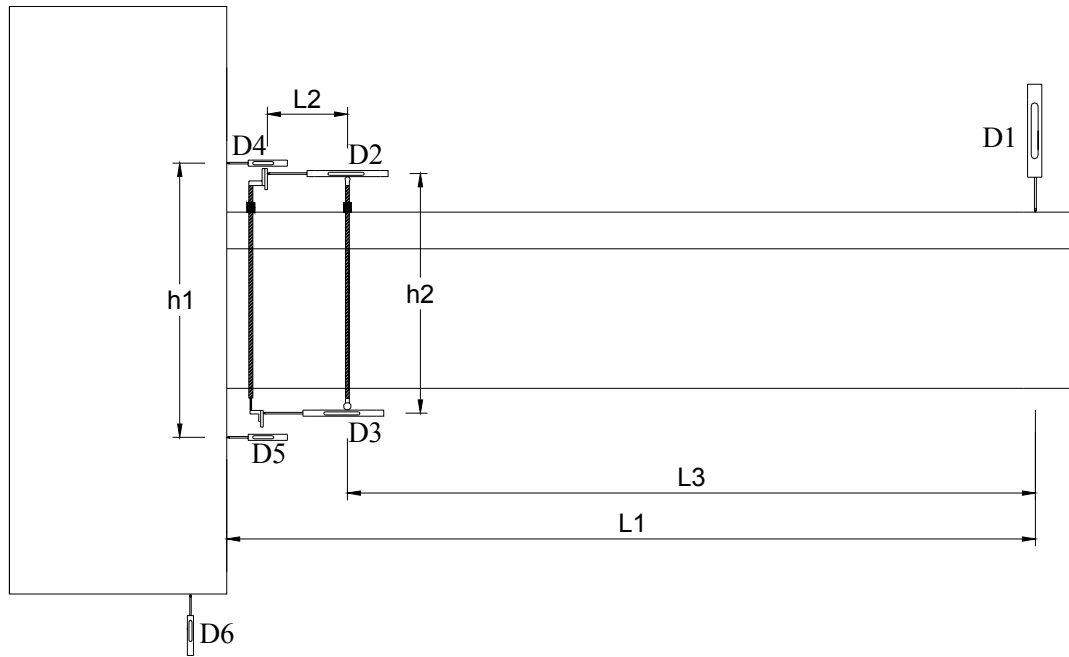
Ölçüm aletlerinin yerleşimi kiriş uç deplasmanını, moment-eğrilik ilişkisini, mesnet kısmının rijit dönme ve rijit ötelenme değerini elde edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.2).

Kirişlerin uç deplasmanı, kiriş tablası üzerinde orta noktaya ve yükleme kolonunun hizasına gelecek şekilde dikey olarak yerleştirilen elektronik doğrusal deplasman okuyucu ile ölçülmüştür. Kiriş uç deplasmanının (D1) ölçümü 200 mm kapasiteli 50×10^{-6} mm hassasiyetli LVDT ile, rijit dönme ve rijit ötelenme ölçüm değerleri (D4, D5, D6) 50 mm kapasiteli 100×10^{-6} mm hassasiyetli LVDT' ler ile ve eğrilik ölçüm değerleri (D2, D3) 100 mm kapasiteli 50×10^{-6} mm hassasiyetli LVDT' lerden elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla kiriş uç deplasmanı ve eğrilik değerleri hesaplanmıştır. LVDT ölçüm aletlerinin yerleşim düzeni Şekil 3.2'te görülmektedir.

Güçlendirme işlemi yapılan elemanlarda kiriş yüzeyinde meydana gelen gerilme değişikliğini ölçen elemanlar kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişlerde CFRP şeritleriyle aynı yönde yerleştirilen 6 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır.

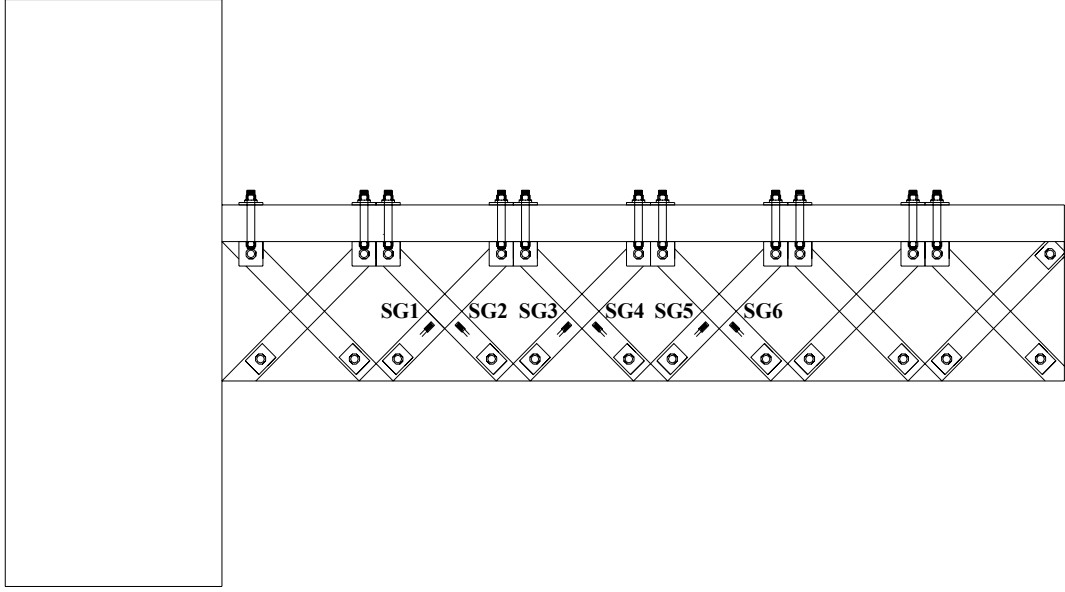
Birim deformasyon ölçerlerin kirişler üzerindeki yerleşimleri Şekil 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6 da verilmiştir. Kullanılan birim deformasyon ölçerler $120\ \Omega$ 'luk ve 10 mm uzunluğundadır. Birim deformasyon ölçerler yüzeyde oluşan gerilmeleri elektronik olarak ölçebilmekte ve ölçümler bir data toplayıcı aracılığı ile bilgisayara aktarılabilmektedir.

Birim deformasyon ölçerler yapıştırılacak noktalar belirlendikten sonra CFRP şeritlerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. Pürüzsüz hale getirilen yüzeyler solventli bir malzeme ile temizlenmiştir. Daha sonra birim deformasyon ölçerler hızlı şekilde kuruyan bir yapıştırıcı yardımı ile yüzeye yapıştırılmıştır. Yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin dirençleri kontrol edilerek çalışıp çalışmadığına bakılmıştır. Birim deformasyon ölçerler data toplayıcıya bağlanarak deneye hazır hale getirilmiştir.

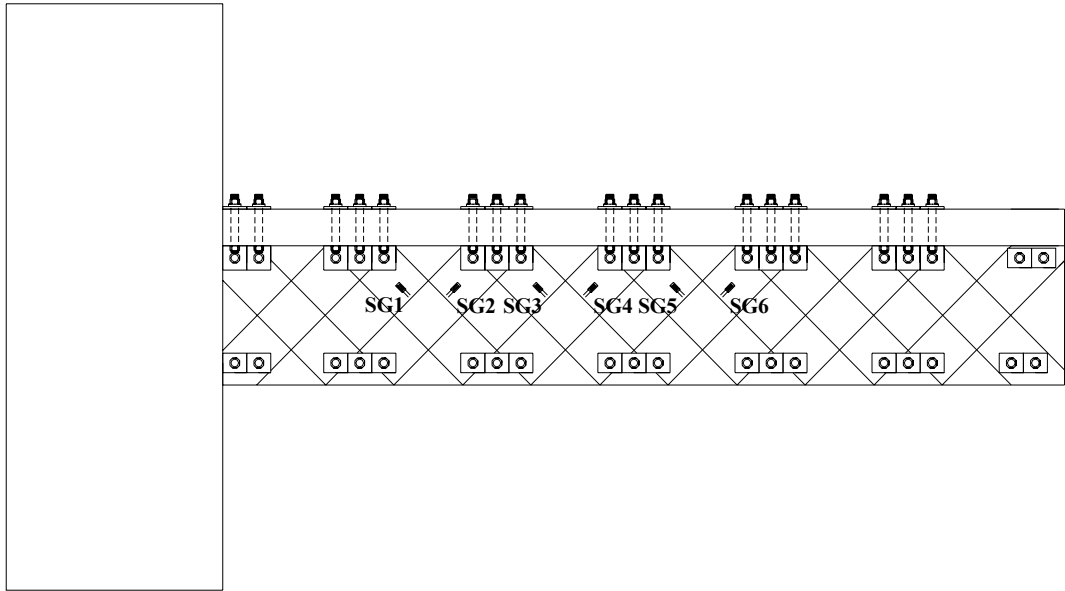


Şekil 3.2. Ölçüm Düzeneği

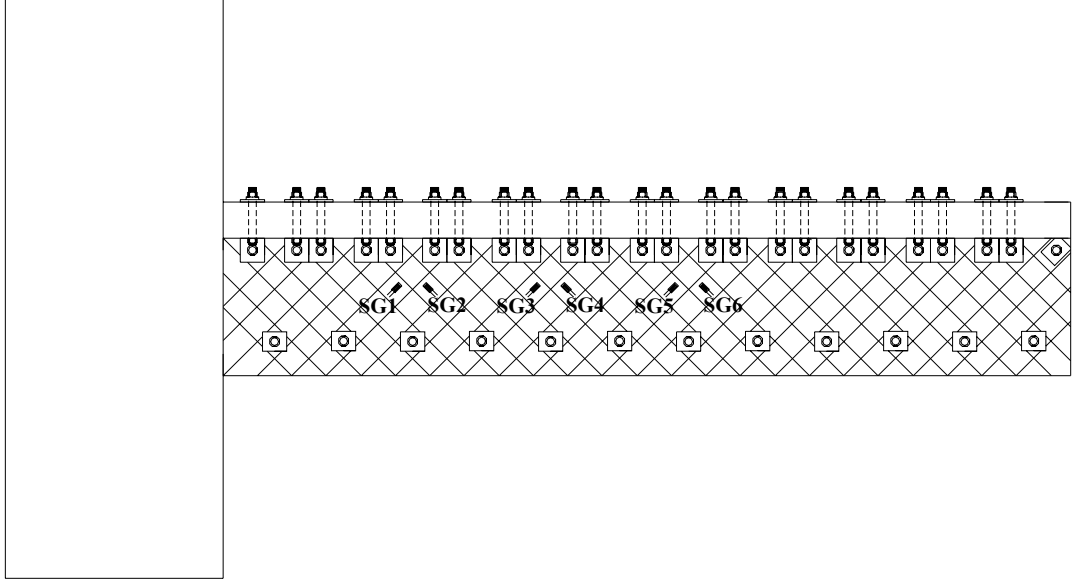
- D1 : Kiriş uç deplasmanı
- D2 ve D3 : Eğrilik ölçümü
- D4 ve D5 : Rijit dönme ölçümü
- D6 : Rijit ötelenme ölçümü



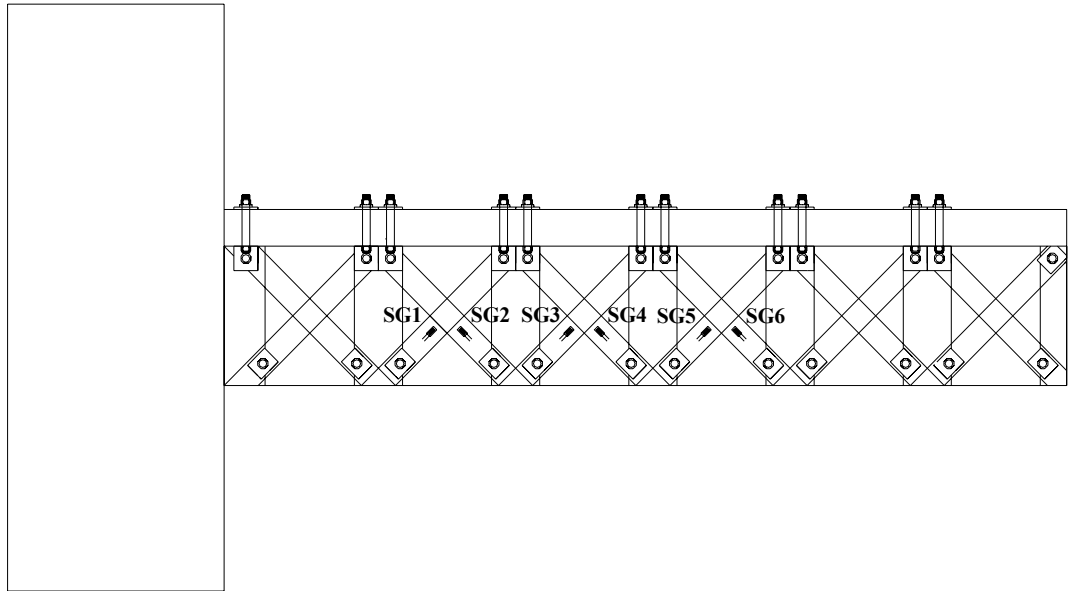
Şekil 3.3. Kiriş-3 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri



Şekil 3.4. Kiriş-4 $W_f = 100$, $S_f = 285$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri



Şekil 3.5. Kiriş-5 $W_f = 50$, $S_f = 143$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri



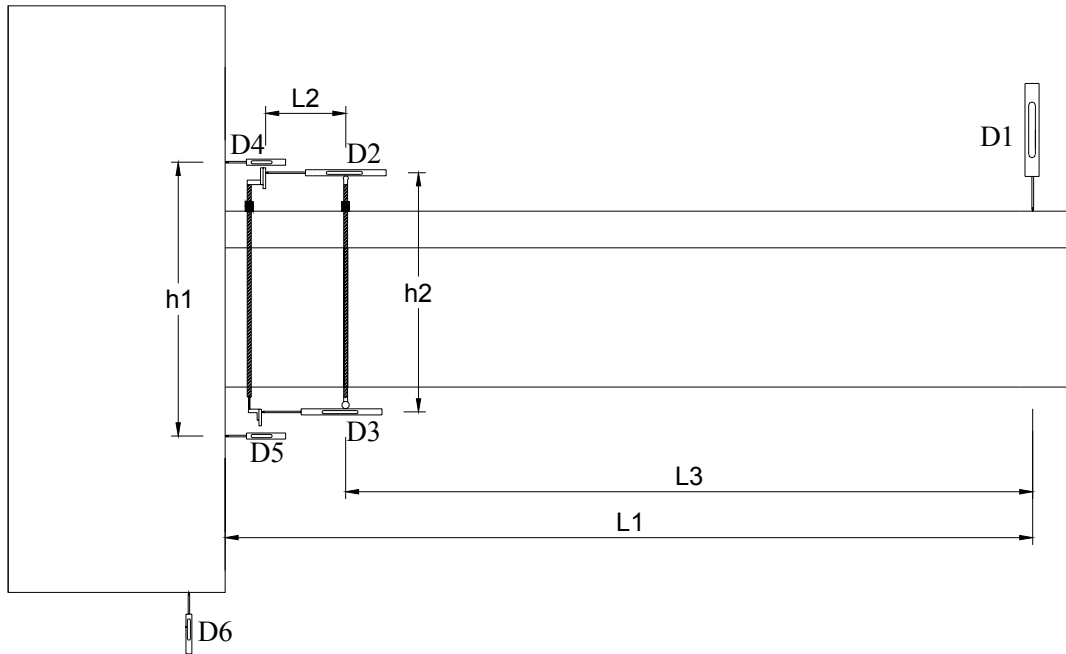
Şekil 3.6. Kiriş-6 $W_f = 50$, $S_f = 285$ elemanı için birim deformasyon ölçer yerleri

3.3.2. Veri toplama ve değerlendirilmesi

Kiriş deplasman ölçümü

Deplasman ölçüm aletleri (LVDT) yardımıyla model kirişlerin belirlenen noktalarından deplasman değerleri ölçülmüş ve bu veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Model kirişlerin uç deplasmanı ($D1$) ve rijit dönme ($D4, D5$) ve rijit ötelenme ($D6$) kullanılarak kiriş net uç deplasmanı ($D1_{net}$) hesaplanmıştır. Kiriş net uç deplasmanı ($D1_{net}$), uç deplasmanından rijit dönme ve rijit ötelenme değerleri çıkartılarak bulunmuştur. Bu ilişki Eş 3.1 ile verilmiştir. Kirişin uç noktasının deplasman hesaplamalarında kullanılan kiriş elemanı deplasman geometrisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Deplasman geometrisi

$$\text{Rijit Dönme} = [(D4 - D5) / h1) . L1]$$

$$\text{Rijit Ötelenme} = D6$$

$$D1_{\text{net}} = D1 - \text{Rijit Dönme} - D6 \quad [3.1]$$

Denklemdede;

D4 : Üst rijit dönme

D5 : Alt rijit dönme

D6 : Rijit ötelenme

D1 : Kiriş uç deplasmanı

D1_{net} : Kiriş net uç deplasmanı

Moment eğrilik ilişkisinin hesaplanması

Model kirişlerin eğrilik ölçüm değerleri D₂ ve D₃ LVDT'lerinden alınmıştır. Bu ölçümler kullanılarak kirişe ait moment eğrilik grafikleri çizilmiştir. Eğrilik ölçümü alınan iki kesit arasındaki dönme açısı radyan olarak bulunduktan sonra iki kesit arasındaki uzunluğa oranlanarak eğrilik hesaplanmıştır. Kirişler üzerinde oluşan moment, yük ve moment kolu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu ilişki Eş. 3.2 ile verilmiştir.

$$\text{Eğrilik} = [(D2 - D3) / h2) / L2] \quad [3.2]$$

$$\text{Moment} = \text{Yük} . L3$$

Denklemdede;

D2 : Üst eğrilik ölçer

D3 : Alt eğrilik ölçer

h2 : Eğrilik ölçerler arası mesafe

L3 : Moment kolu

Deneyler sırasında alınan eğrilik ölçümleri belirli bir noktadan sonra deney elemanlarında yaşanan ani göçme nedeniyle ölçülememiştir. Bu nedenle deney

elemanlarından alınan eğrilik ölçümleri kullanılarak çizilmesi düşünülen moment eğrilik grafikleri ve yorumları tez kapsamında değerlendirilmeye alınmamıştır.

Birim deformasyonların hesaplanması

Birim deformasyon ölçerler kesme çatlaklarının oluşabileceği rijit duvara mesnetlenen bölgeden 300-1000 mm uzaklığındaki bir kısımdan alınmıştır. Birim deformasyonlar CFRP şeritlerin taşıyıcı lifleri doğrultusunda ölçülmüştür. Bilgisayarda deney sırasında CFRP şeritler üzerindeki gerilme değişimleri sürekli olarak takip edilmiş ve bilgisayarın sabit hafızasına kaydedilmiştir. Birim deformasyon ölçerler gerilmeleri mili volt olarak ölçer. Ölçülen değerler Eş. 3.3 yardımı ile birim deformasyonlara çevrilmiştir.

$$V_o = -\frac{GF \times \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \times \frac{\varepsilon}{2}} \right) \times V_i \times GAIN \quad [3.3]$$

V_o : Okunan mili volt değeri

V_i : Uygulanan gerilim

GF : Birim deformasyon faktörü (= 2)

$GAIN$: Kanal kazanç değeri (= 420)

ε : Birim deformasyon değeri

3.4. Deney Yönetimi

Deney elemanlarının test edilmesi sırasında ölçüm aletlerinin okuma değerleri bir tarayıcı/okuyucu tarafından bilgisayara aktarılmış ve hazır bulunan bir bilgisayar programı yardımıyla bu değerler bilgisayardan takip edilmiştir (Resim 3.1).

Model kirişlere elektronik ölçüm aletleri yerleştirildikten sonra yüklemeye başlanmadan ölçüm aletlerinin başlangıç okumaları alınmıştır. Daha sonra yüklemeye birlikte ölçüm aletlerinden gelen değerlerle bilgisayar ekranında çizdirilen yük-deplasman grafiği yardımıyla göçmeye kadar elemanın davranışı izlenmiştir. Böylece deneylerin kontrollü bir biçimde yapılması sağlanmıştır.



Resim 3.1. Kullanılan bilgisayar programı ve deneyin izlenmesi

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Genel

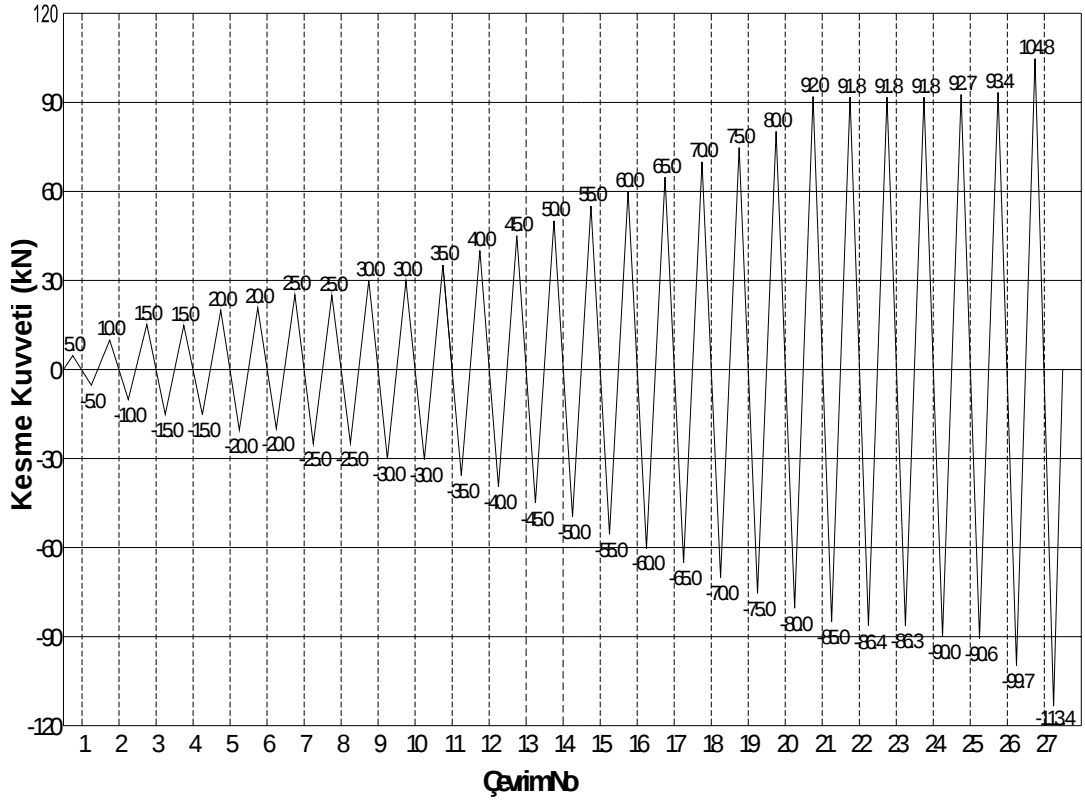
Bu bölümde deney sonuçları ve yapılan gözlemler ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada ilk olarak kontrol kirişleri test edilmiştir. İkinci aşamada güçlendirilen diğer model kirişler test edilmiştir. Deney elemanlarının göçmeye kadar davranışları ve elde edilen deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Her deney elemanı için yük-deplasman grafikleri, çatlak oluşumları ve genel davranışları verilmiştir.

4.2. Deney Elemanı Kiriş-1

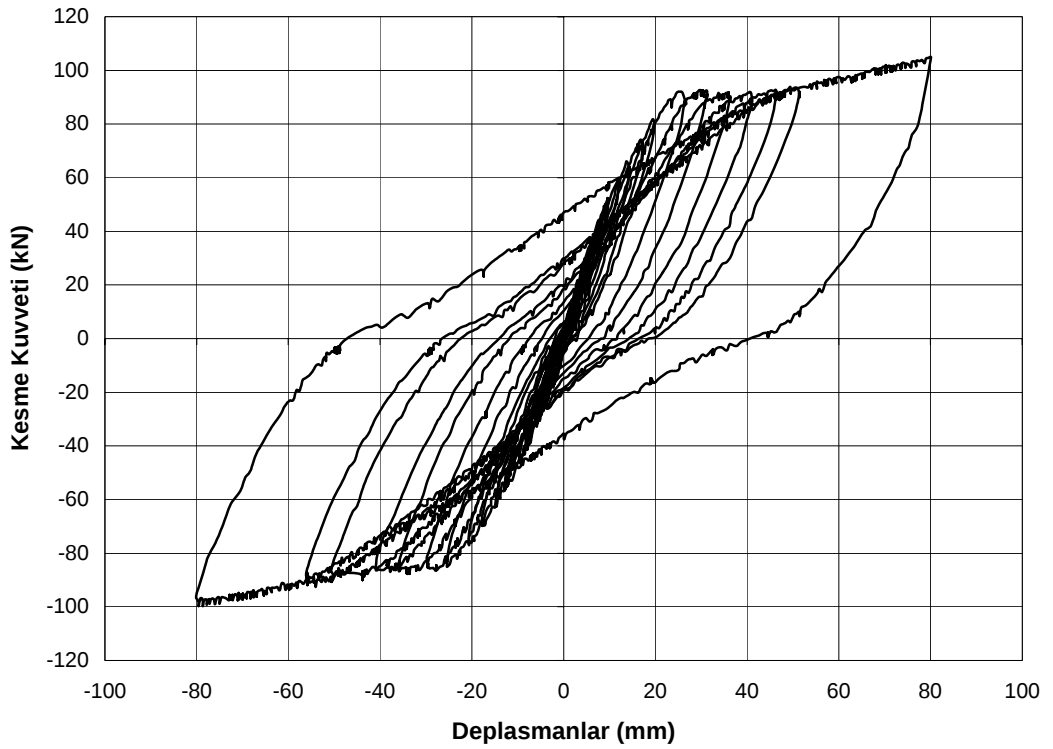
Deneysel programda ilk olarak kontrol elemanı Kiriş-1 test edilmiştir. Bu kirişte yeterli miktarda kesme donatısı kullanılmıştır. Deney Elemanına Şekil 4.1’de verilen yük geçmişi altında test yapılmıştır. Deney elemanına 27 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Şekil 4.2’de kirişin yük-deplasman grafiği verilmiştir.

Kiriş-1’de ilk eğilme çatlakları ileri yönde 25 kN kesme kuvveti altında mesnet kısmından 400 mm uzaklıkta mesnete doğru 45° lik açıyla kiriş gövdesinde oluşmuştur. Yükleme devam edilmesiyle kılcal düzeyde eğilme çatlakları artarak çoğalmıştır. Tabladaki ilk eğilme çatlakları geri yüklemede 30 kN’da gözlenmiştir. İlk eğik çatlak ise geri yüklemede 45 kN yük düzeyinde oluşmuştur. Eğilme çatlakları ileri yüklemede 60 kN’da kiriş tablasına ulaşmıştır.

İleri yüklemede yük 92.3 kN seviyesinde deney elemanı çekme donatılar akmış ve kiriş uç deplasmanı 24,3 mm olarak ölçülmüştür. Geri yüklemede yük 85 kN seviyesinde basınç donatıları da akmıştır. Akmada kiriş uç deplasmanı 25,3 mm olarak ölçülmüştür. Eğilme çatlakları yük 89 kN’da iken 1,5 mm genişliğe ulaşmış olup tabladaki kesme çatlakları bu yük seviyesinde kılcal düzeyde kalmıştır. İleri yüklemede yük 93 kN iken tabladaki eğilme çatlakları 3 mm genişliğe ulaşmıştır.

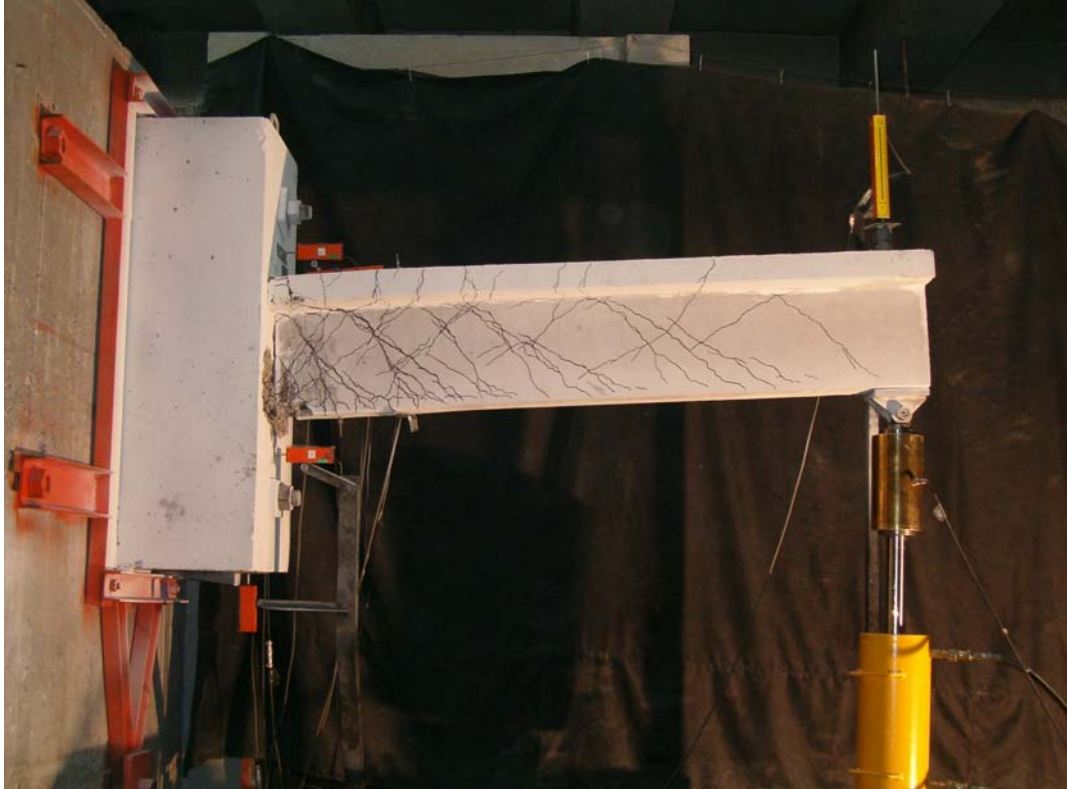


Şekil 4.1. Kiriş-1 deney elemanının yük-çevrim grafiği



Şekil 4.2. Kiriş-1 deney elemanının yük-deplasman grafiği

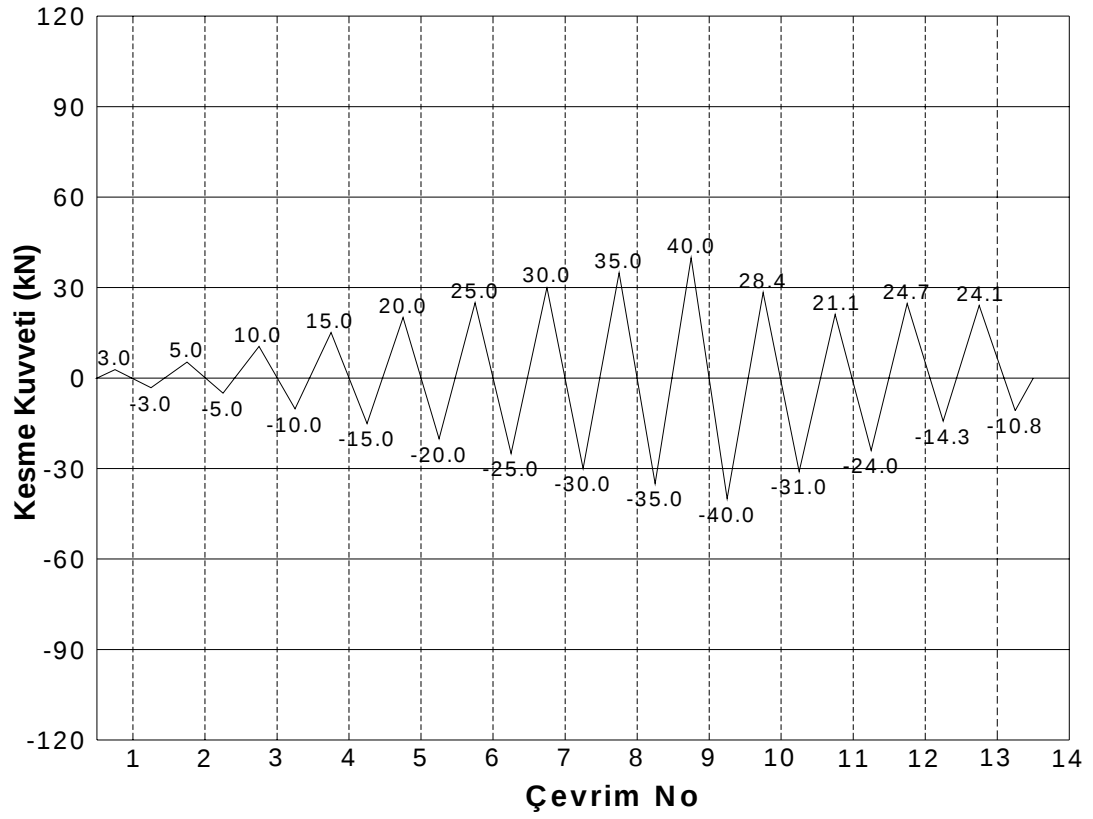
İleri yüklemede yük 104,8 kN'da iken maksimum moment bölgesinde oluşan plastik mafsallaşma sonucunda kiriş göçmüştür. Bu yük düzeyinde kiriş 80,7 mm deplasman yapmıştır (Resim 4.1). Deney elemanı sünek eğilme davranışı sergilemiştir.



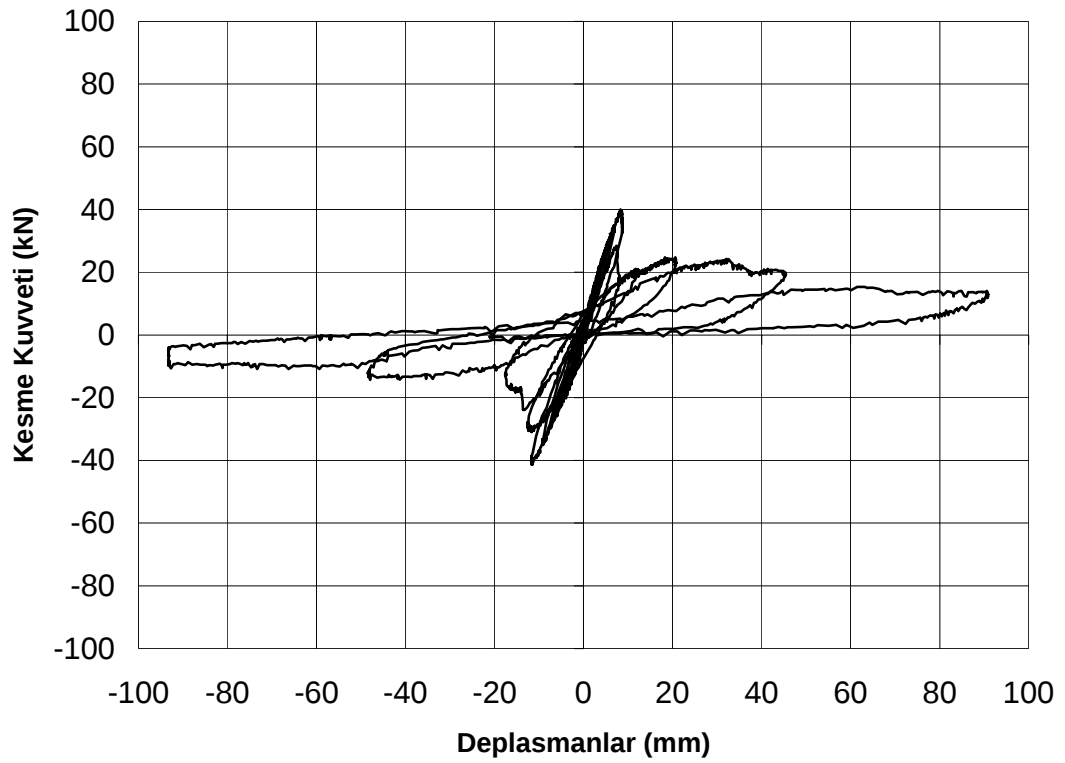
Resim 4.1. Göçme anındaki maksimum kiriş uç deplasmanı (80,7 mm)

4.3. Deney Elemanı Kiriş-2

Test aşamasında ikinci olarak Kiriş-2 deney elemanı kırılmıştır. Bu kiriş kesmeden dolayı göçmesi amaçlandığı için kirişte kesme donatısı kullanılmamıştır. Deney Elemanına Şekil 4.3’de verilen yük geçmişi altında test yapılmıştır. Deney elemanına 13 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Şekil 4.4’de kirişin yük-deplasman grafiği verilmiştir.



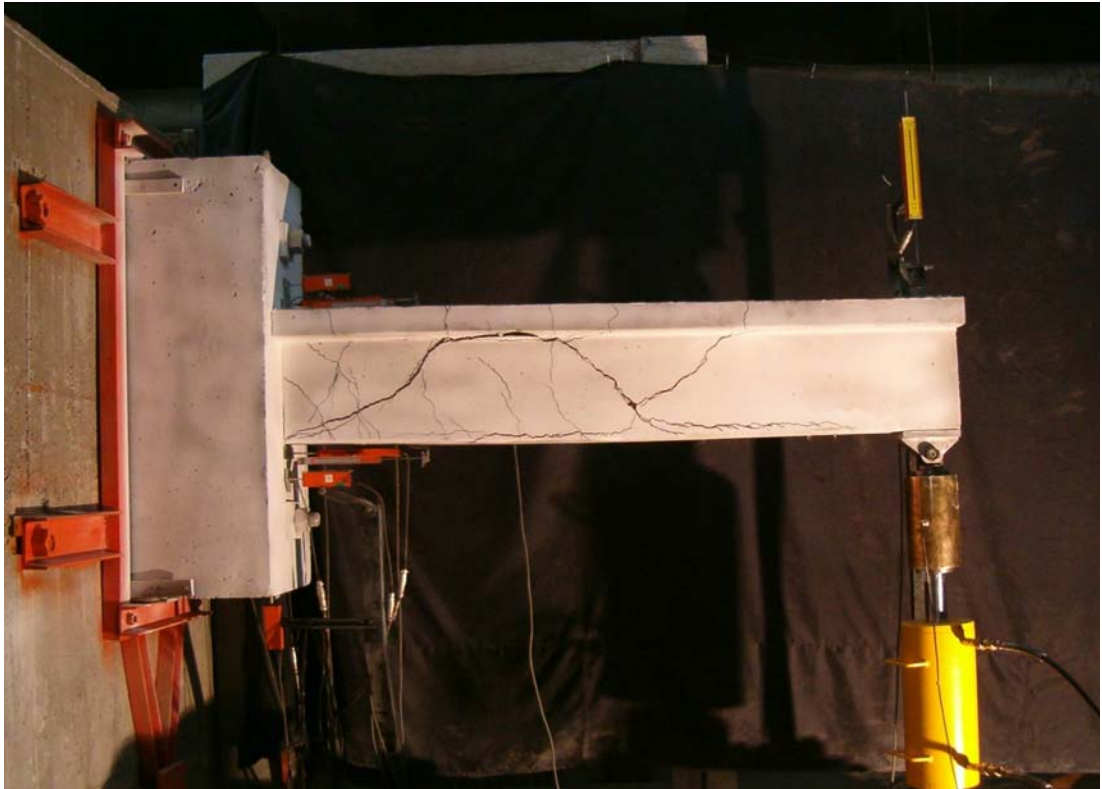
Şekil 4.3. Kiriş-2 deney elemanının yük-çevrim grafiği



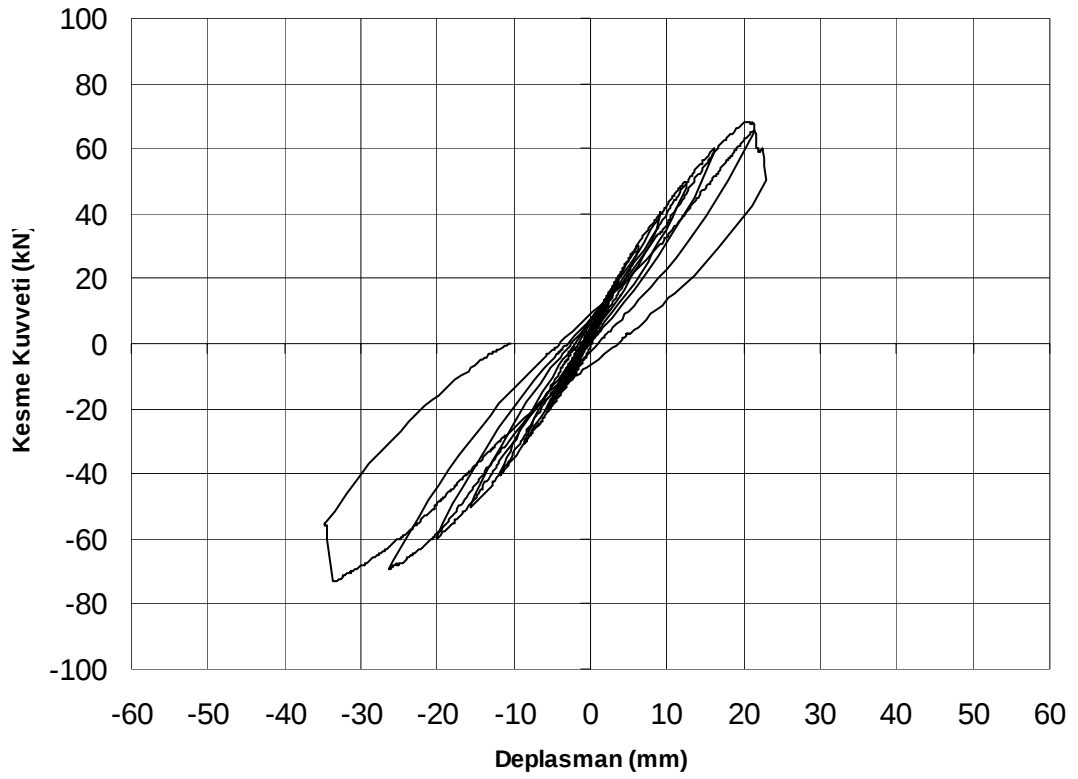
Şekil 4.4. Kiriş-2 deney elemanının yük-deplasman grafiği

Kiriş-2’de ilk eğilme çatlağı ileri yüklemde 25 kN seviyesinde mesnetten 120 mm uzaklıkta kiriş gövdesinin alt kısmında meydana gelmiştir. Kiriş tablasında meydana gelen ilk eğilme çatlağı geri yükleme sırasında 30 kN’da, mesnetten 700 mm uzaklıkta oluşmuştur. Yükleme artıkça eğilme çatlaklarında artış gözlenmiştir. İlk eğik çatlak ileri yüklemde 30 kN seviyesinde mesnetten 950 mm uzaklıkta meydana gelmiştir. Geri yüklemde 35 kN’da mesnetten yaklaşık 100 mm uzaklıkta kiriş altında başlayarak kiriş tablasına kadar yaklaşık 45° eğimle ilerleyen eğik çatlak oluşmuştur. Ana kesme çatlakları Resim 4.2’de verilmiştir.

İleri yüklemde yük 40 kN’da, deplasman 8,37 mm seviyesinde iken deney elemanın alt liflerinden başlayarak kiriş tablasına doğru devam eden yaklaşık 45° eğimli eğik çatlak nedeniyle yükte ani bir düşüş meydana gelmiş ve kesmeden ani olarak göçmüştür. Bu çevrimden sonra kirişin yük tutamaması nedeniyle yükleme durdurularak deneye son verilmiştir.



Resim 4.2. Ana kesme çatlakları



Şekil 4.6. Kiriş-3 deney elemanı için yük-deplasman grafiği

İleri yükleme yapılırken 65,7 kN'da mesnetten 800 mm uzaklıkta bulunan 45° lik CFRP şerit yüzeyden ayrılmıştır (Resim 4.3). CFRP şerit yüzeyden ayrılması ile yükte %10 luk bir azalma yaşanmış ve çevrim sonuçlanmıştır. Geri yönde yükleme ile devam edilmiştir. Geri yönde yük 73,3 kN düzeyindeyken mesnetten 140 mm uzaklıktaki çapraz CFRP şeritlerinden 45° açılı olan şerit birleşim bölgesinden kopmuştur ve yükte % 25'lik bir azalma gözlenmiştir (Resim 4.4). Bu yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 33,71 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanı yük taşıyamaz duruma gelmiş ve çapraz CFRP şeritlerin kiriş alt gövdesinde birleştikleri bölgelerde beton pas payını soyarak kaldırmaları sonucunda deney elemanı göçmüştür (Resim 4.5).



Resim 4.3. Yapışma yüzeyinden ayrılan CFRP şerit

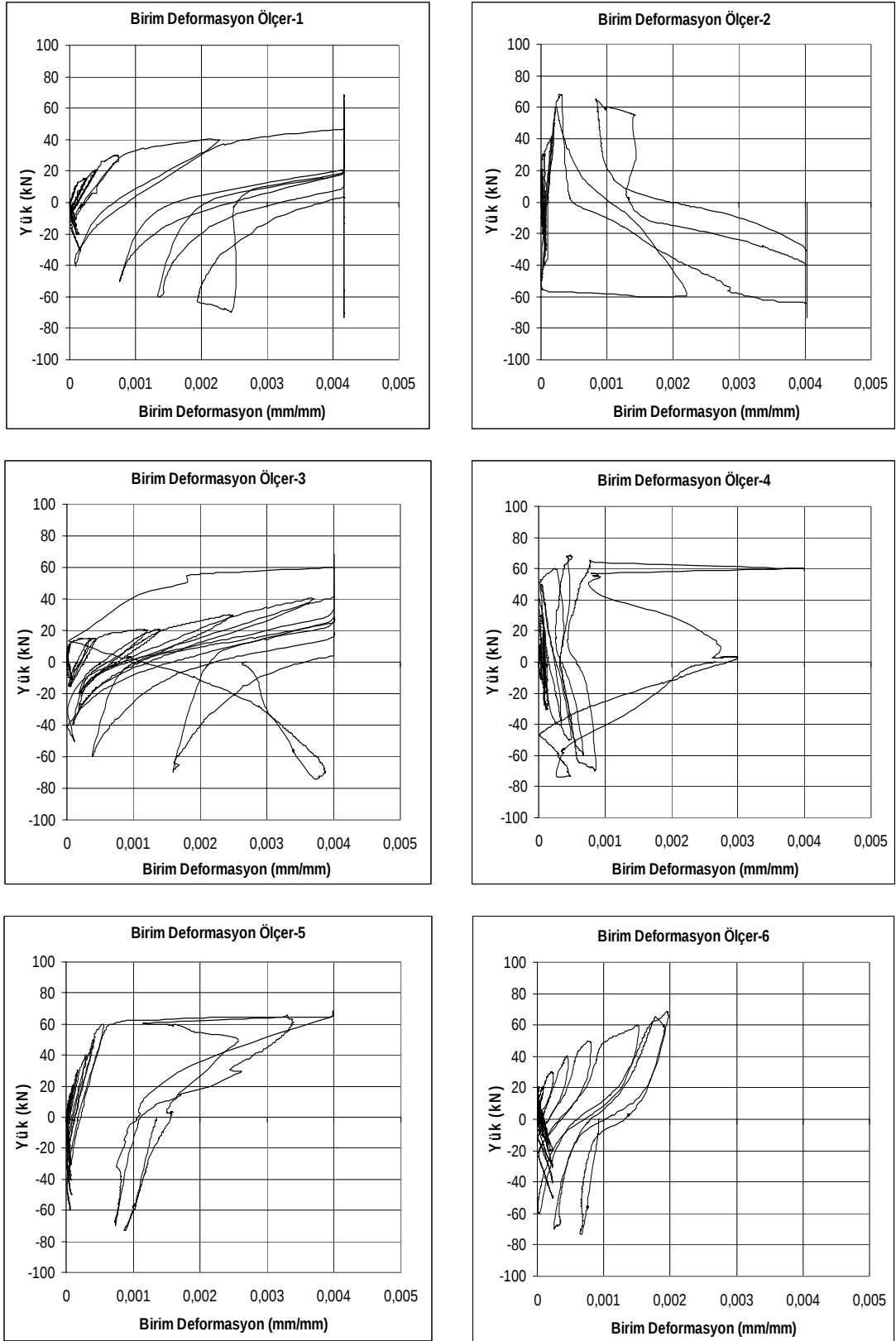
Üst ucu yaklaşık 850 mm de bulunan 45°'lik CFRP şeridin 65 kN'da yüzeyden ayrılması sonucu CFRP şeridin ankrajın altında kalan kısmında CFRP şerit ile aynı yönde bir yırtılma gözlenmiştir. Kullanılan ankrajlar, tablanın kiriş gövdesinden ayrılmasına engel olmuştur. Kiriş-3 deney elemanından ölçülen en büyük birim deformasyon 0,004167 mm/mm değerinde olup ACI-440 komite raporunda öngörülen değerden %4 daha fazladır. Şekil 4.7'de CFRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin grafikleri verilmiştir.



Resim 4.4. Kesme çatlağı nedeniyle kopan CFRP şerit



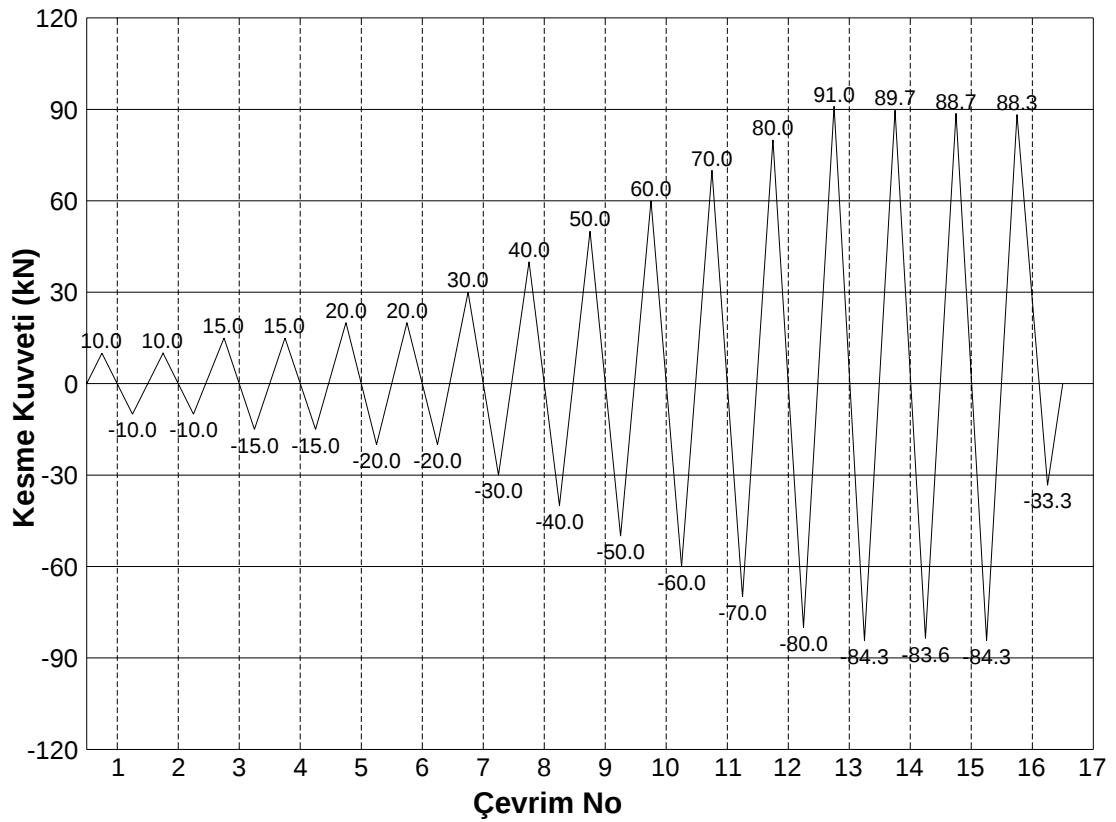
Resim 4.5. CFRP şeritlerin beton pas payını kaldırması

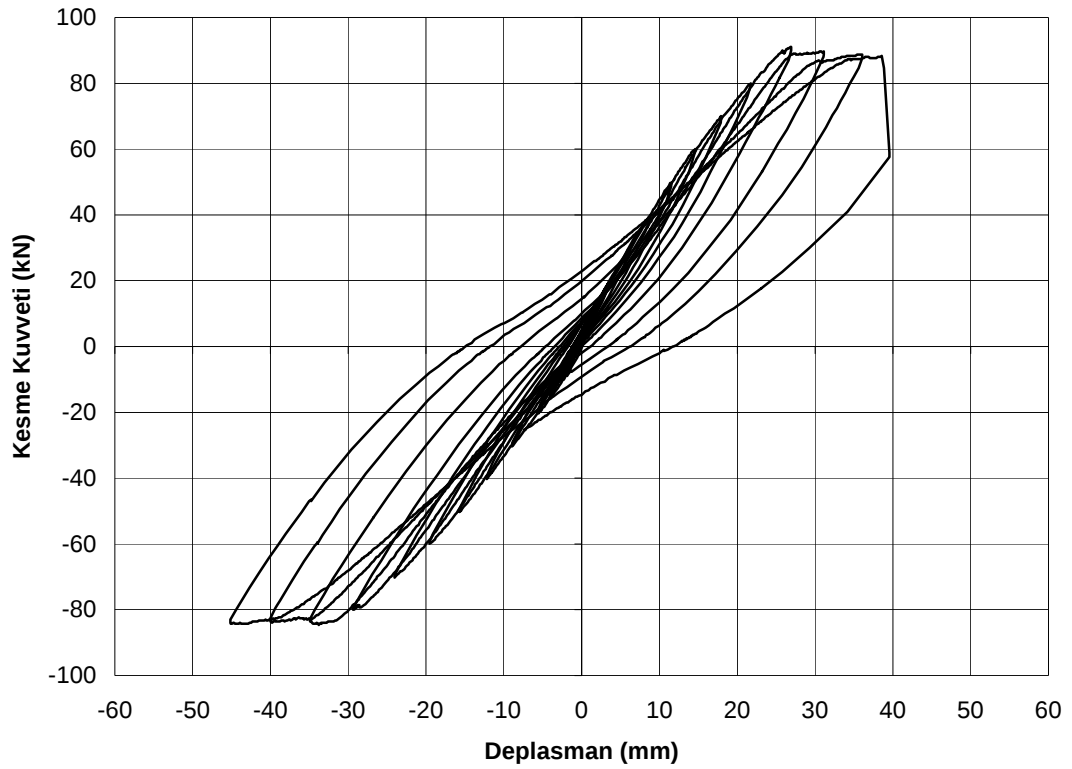


Şekil 4.7. Kiriş-3 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

4.5. Deney Elemanı Kiriş-4

Kiriş-4 deney elemanı 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 285 mm aralıklarla 45° ve 135°'lik açılarla kirişe yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deney Elemanına Şekil 4.8'de verilen yük geçmişi altında test yapılmıştır. Deney elemanına 17 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Şekil 4.9'da kirişin yük-deplasman grafiği verilmiştir.





Şekil 4.9. Kiriş-4 deney elemanı için yük-deplasman grafiği

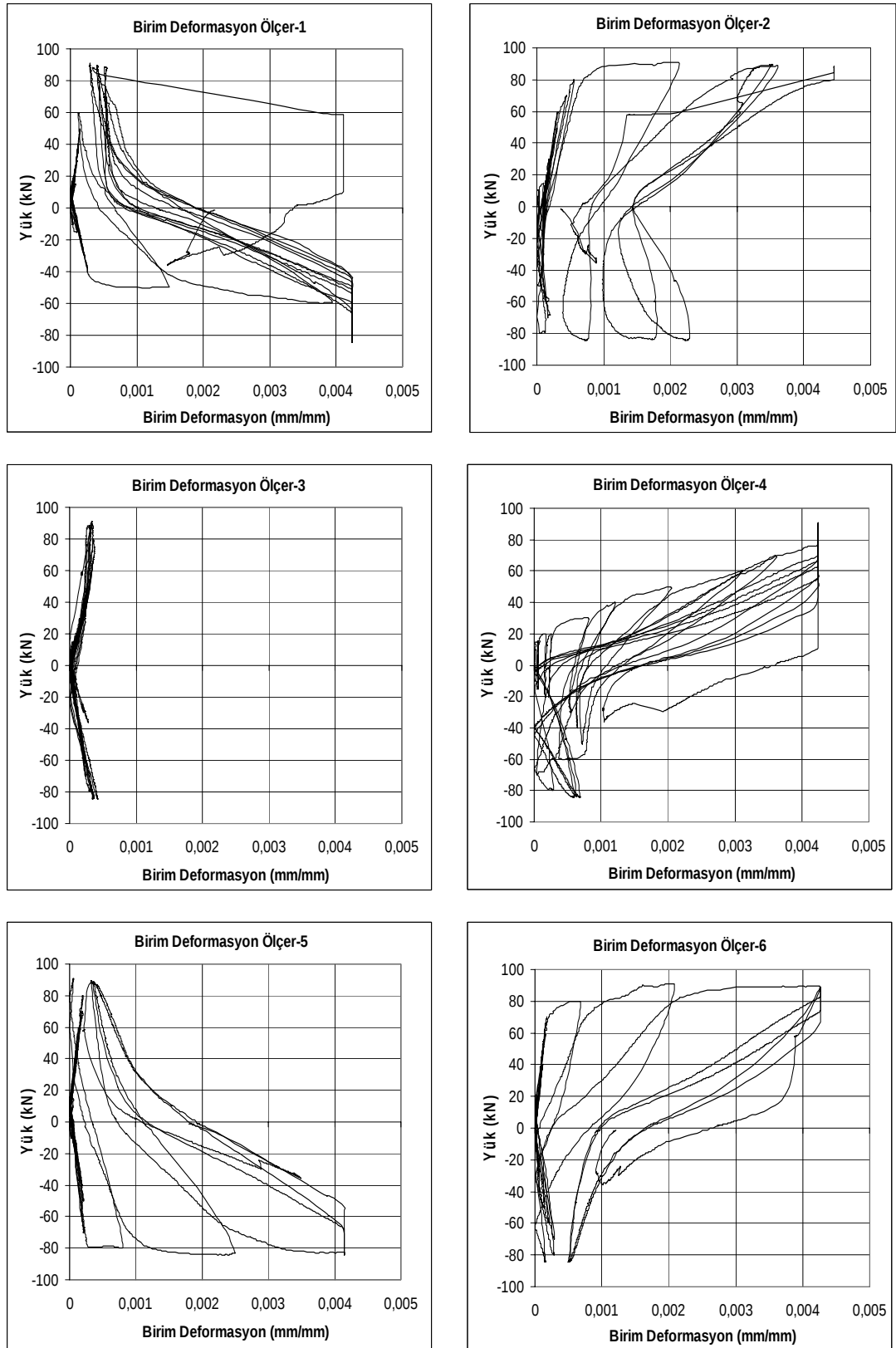
İleri yüklemede yük 91 kN düzeyindeyken deney elemanın çekme donatıları akmış bu noktada deplasman 26,8 mm olarak ölçülmüştür. Daha sonra geri yüklemede yük 84,3 kN düzeyindeyken model kirişin basınç donatıları akmış ve bu noktada kiriş uç deplasmanı 34 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanı 2 tam çevrim daha taşıma gücünü korumuştur. İleri yükleme kiriş uç deplasmanı 40 mm iken meydana gelen mesnetten 210 mm uzaklıktaki ankrajın altından başlayan ve kirişin altına doğru ilerleyen kesme çatlağı nedeniyle deney elemanı göçmüştür. Göçme sırasında yükte %38'lik bir azalma gözlenmiştir. Kesme çatlağı üstünden geçen CFRP şeridi dik bir şekilde kesmiş ve kirişin altında kiriş boyunca boyuna çatlak oluşturmuştur (Resim 4.6, 4.7). Kiriş yük tutamaması nedeniyle yükleme durdurularak deneye son verilmiştir. Kiriş-4 deney elemanında ölçülen en büyük birim deformasyon 0,004454 mm/mm değerine sahiptir. Bu değer analitik olarak öngörülen değerden %11 daha fazladır. Şekil 4.10'da CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin grafikleri verilmiştir.



Resim 4.6. Kesme çatlağı ve kesme çatlağından dolayı kopan CFRP şerit



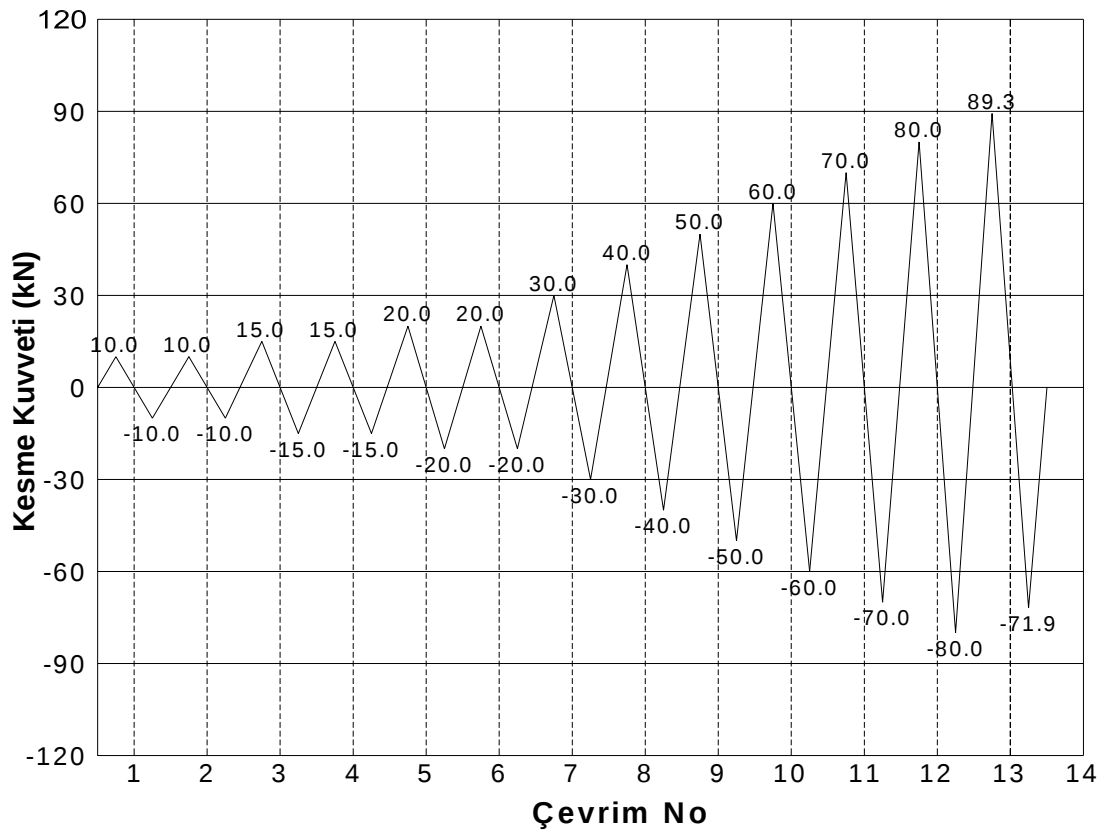
Resim 4.7. Kesme çatlağının kiriş altında oluşturduğu boyuna çatlaklar



Şekil 4.10. Kiriş-4 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

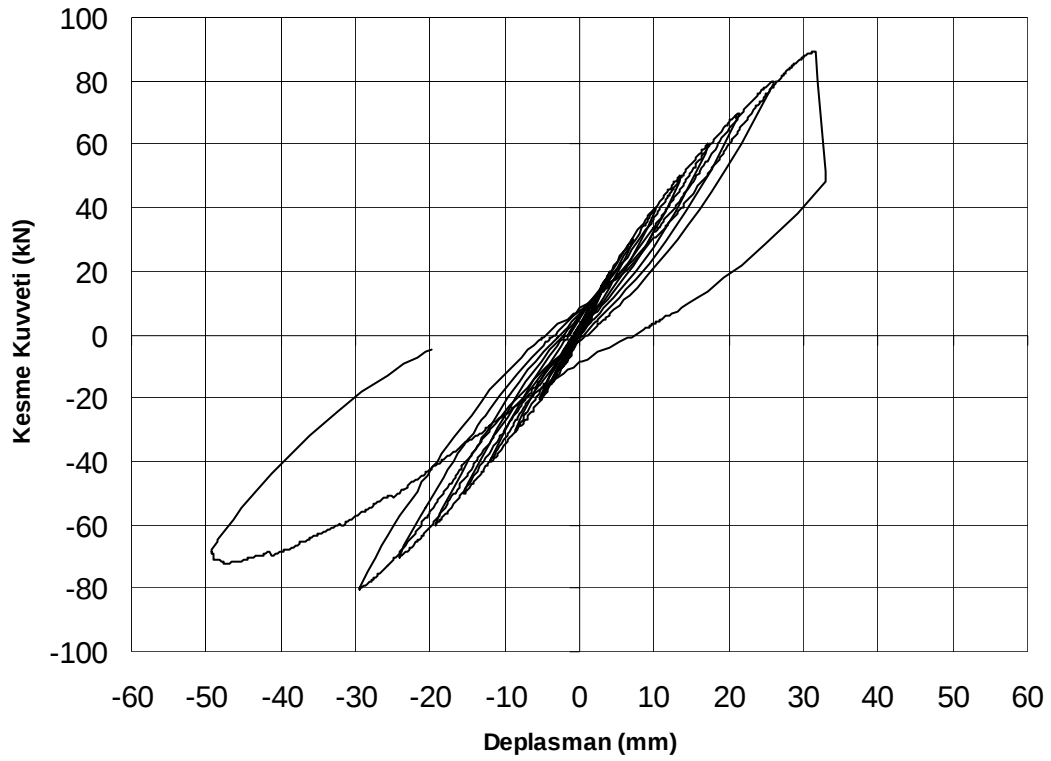
4.6. Deney Elemanı Kiriş-5

Kiriş-5 deney elemanı 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 143 mm aralıklarla 45° ve 135°'lik açılarla kirişe yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deney Elemanına Şekil 4.11'de verilen yük geçmişi altında test yapılmıştır. Deney elemanına 13 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Şekil 4.12'de kirişin yük-deplasman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.11. Kiriş-5 deney elemanının yük-çevrim grafiği

Kirişte ilk eğilme çatlağı 20 kN geri yükleme sırasında mesnetten 700 mm uzaklıkta tablada meydana gelmiştir. Yükleme artıkça eğilme çatlaklarında artış gözlenmiştir. Oluşan çatlaklar tablanın altından ankrajlara doğru ilerleme göstermiştir. 50 kN'da mesnetle kiriş arasındaki ayrılma çatlağı 0,2 mm olarak gözlenmiştir.

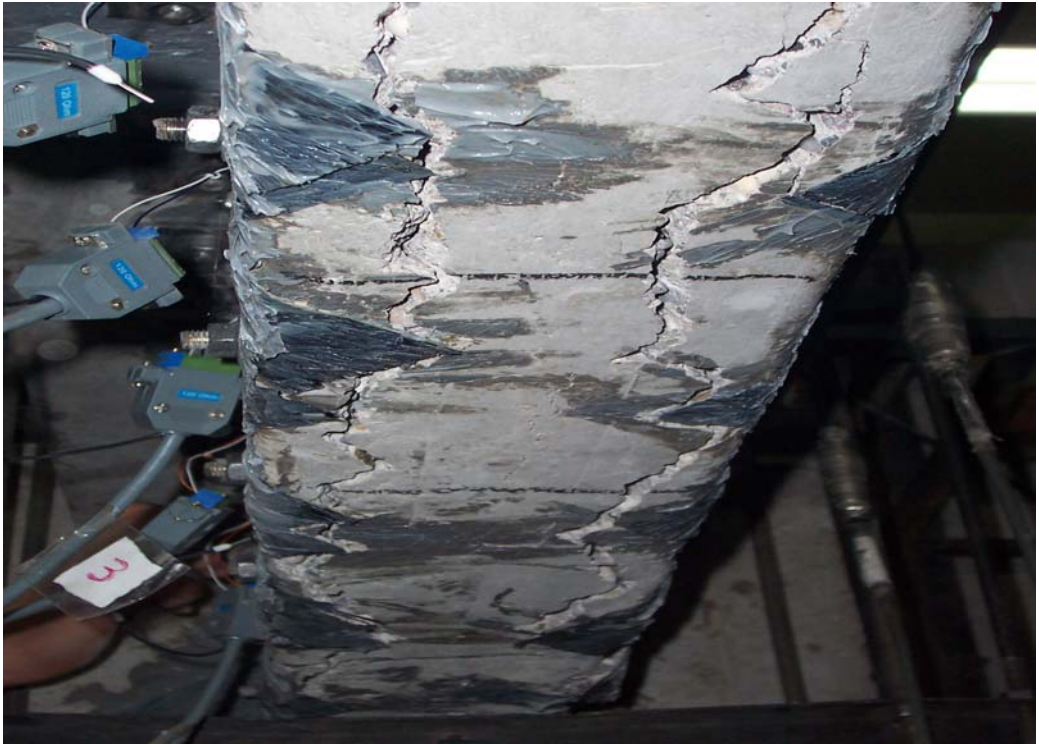


Şekil 4.12. Kiriş-5 deney elemanı için yük-deplasman grafiği

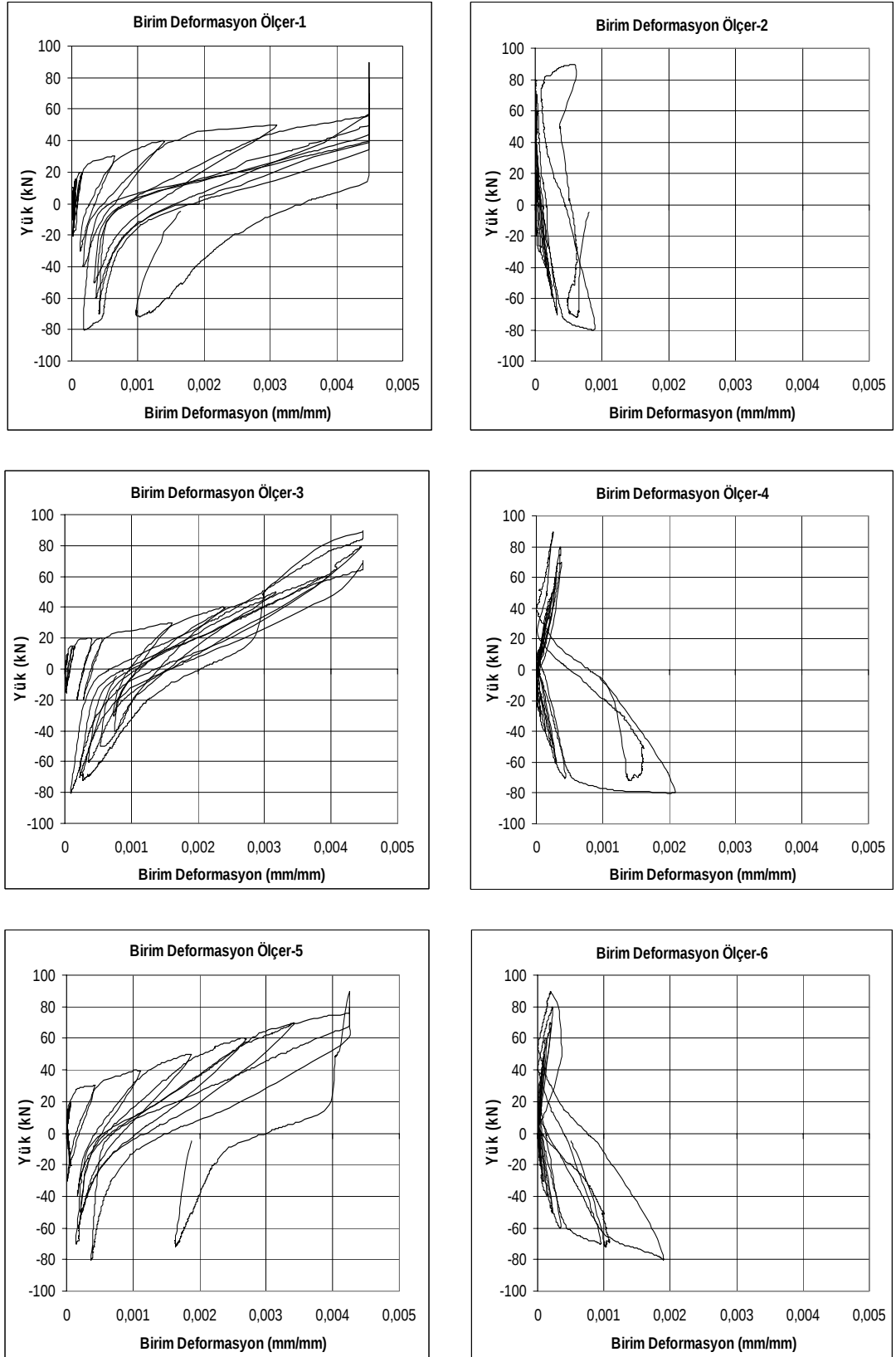
13. çevrimin ileri yüklemesinde 89,3 kN'da kiriş akma dayanımına ulaşmış ve mesnetten 200 mm uzaklıkta 3. ankrajın altından başlayan kesme çatlağı oluşmuştur. Kiriş ani ve gevrek olarak göçmüştür. Göçme sırasında yükte % 45 seviyesinde bir azalma gözlenmiştir. Kesme çatlağının olduğu bölgede 2. çapraz CFRP şeritlerin birleşim bölgesinde 45° eğimli CFRP şerit yırtılmıştır (Resim 4.8). Oluşan kesme çatlağı deney elemanı çapraz CFRP şeritlerin birleşerek yapıştıkları kiriş gövdesinin alt kısmına kadar ilerlemiş ve kiriş eksenine paralel doğrultuda beton pas payını ayırmıştır (Resim 4.9). Kiriş üzerinde yük tutamaması nedeniyle yükleme durdurularak deneye son verilmiştir. Kiriş-5 deney elemanında ölçülen en büyük birim deformasyon 0,004493 mm/mm değerine sahiptir. Bu değer analitik olarak öngörülen değerden %12 daha fazladır. Şekil 4.13'de CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin grafikleri verilmiştir.



Resim 4.8. Kesme çatlağı ve kesme çatlağından dolayı kopan CFRP şerit



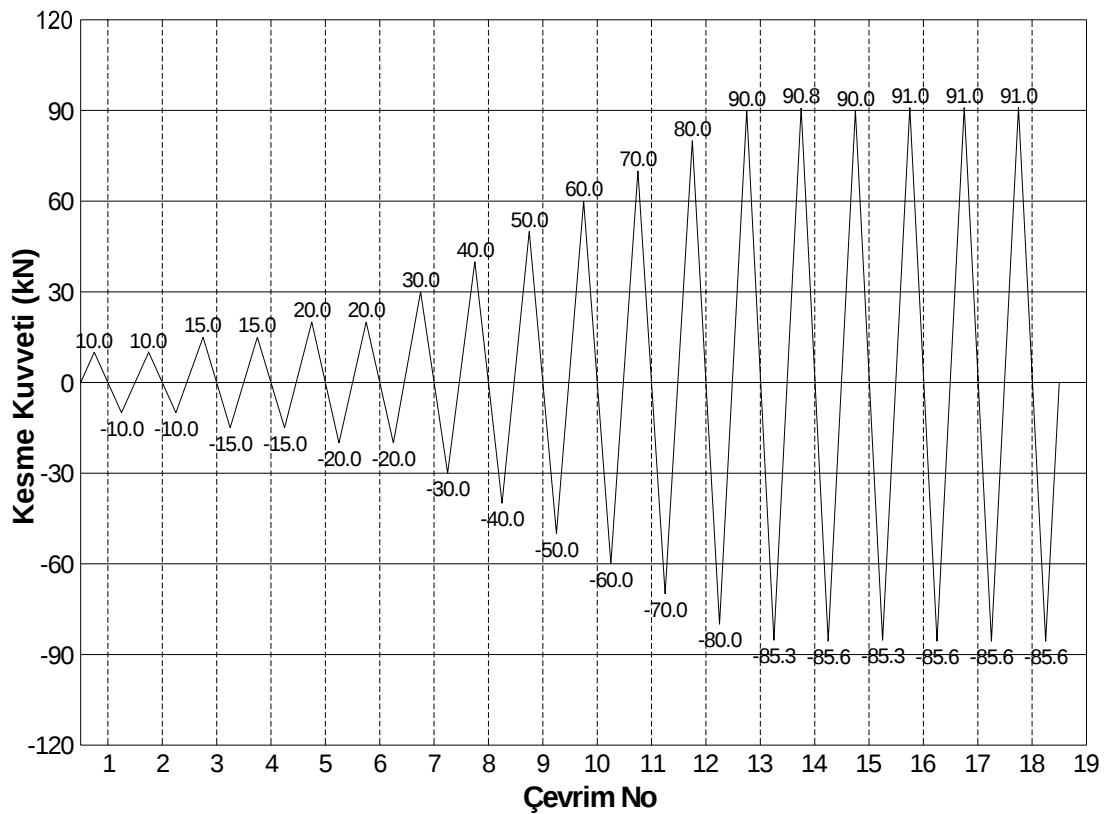
Resim 4.9. Kesme çatlağının kiriş altında oluşturduğu boyuna çatlaklar



Şekil 4.13. Kiriş-5 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

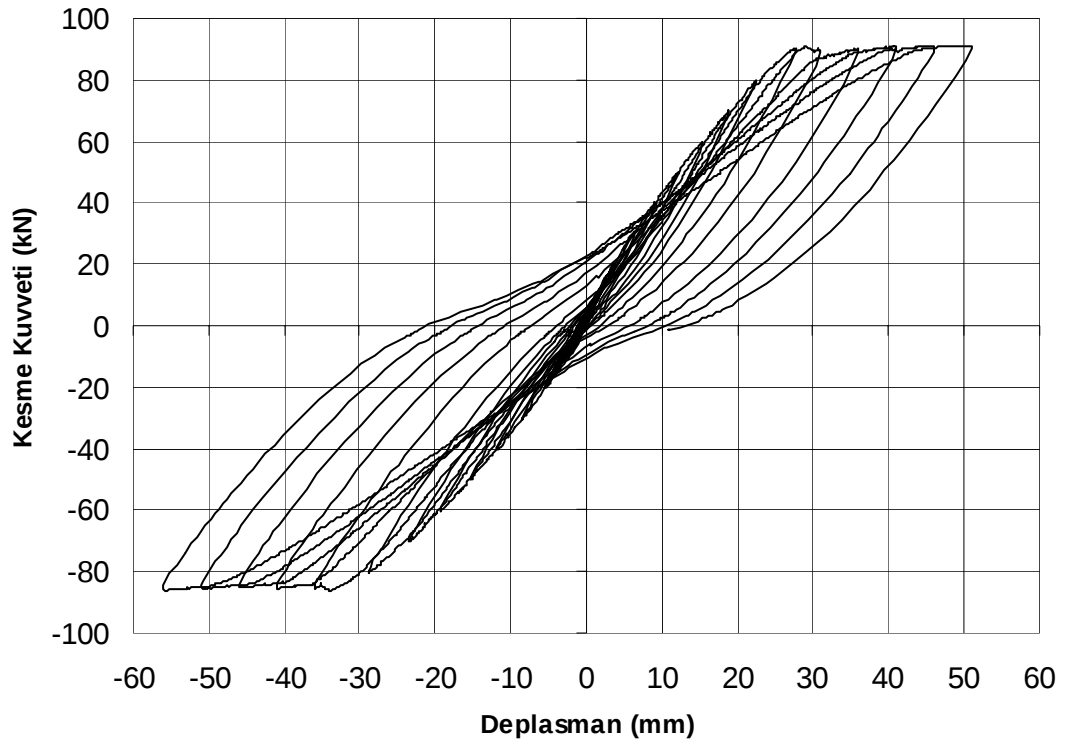
4.7. Deney Elemanı Kiriş-6

Kiriş-6 deney elemanı 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 285 mm aralıklarla çapraz olarak, 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerinde 285 mm aralıklarla 90°'lik açıyla betonarme kirişin yan yüzeylerine ve tabla altına yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. Deney Elemanına Şekil 4.14'de verilen yük geçmişi altında test yapılmıştır. Deney elemanına 18 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Şekil 4.15'de kirişin yük-deplasman grafiği verilmiştir.



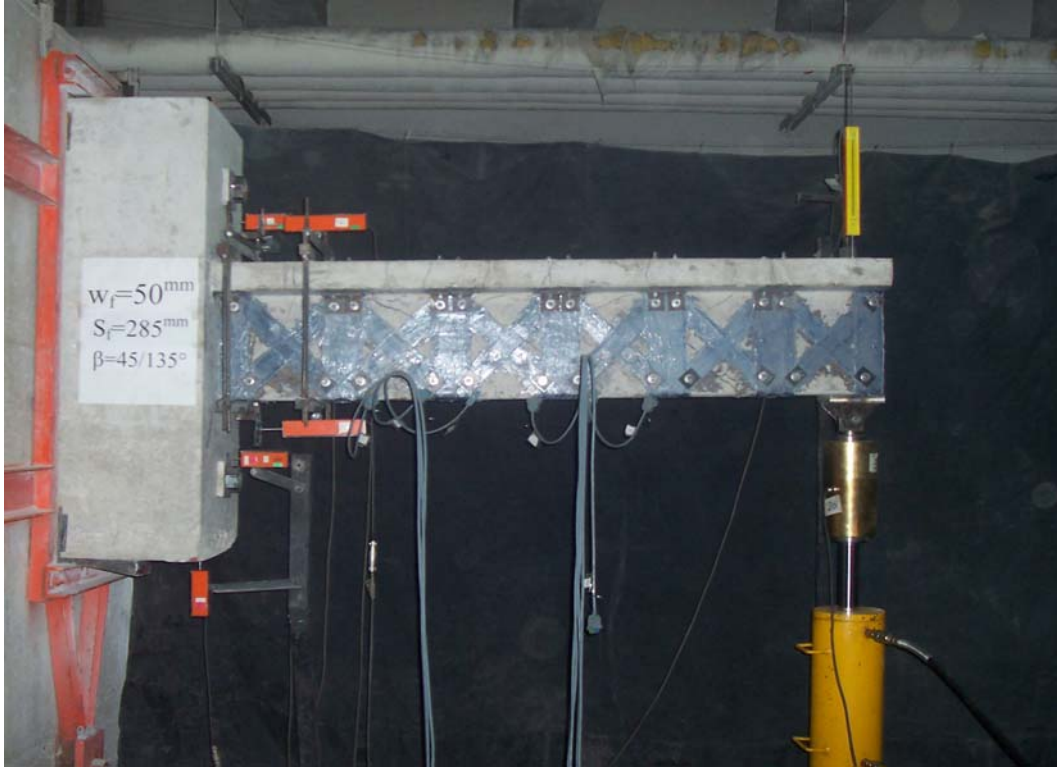
Şekil 4.14. Kiriş-6 deney elemanının yük-çevrim grafiği

Kirişte ilk eğilme çatlağı 20 kN'da geri yükleme sırasında mesnetten 550 mm uzakta tablada meydana gelmiştir. Yükleme artıka eğilme çatlaklarında artış gözlenmiştir. Oluşan çatlaklar tabla altından ankrajların altına doğru ilerleme göstermiştir. Kiriş gövdesinin altındaki ilk eğilme çatlağı 40 kN'da mesnetten yaklaşık 750 mm uzakta 5 ile 6. ankrajlar arasında meydana gelmiştir. İlk eğik çatlak, 60 kN seviyesinde geri yükleme sırasında mesnetten 370 mm uzaklıktaki 3. ankrajın üzerinde oluşmuştur.

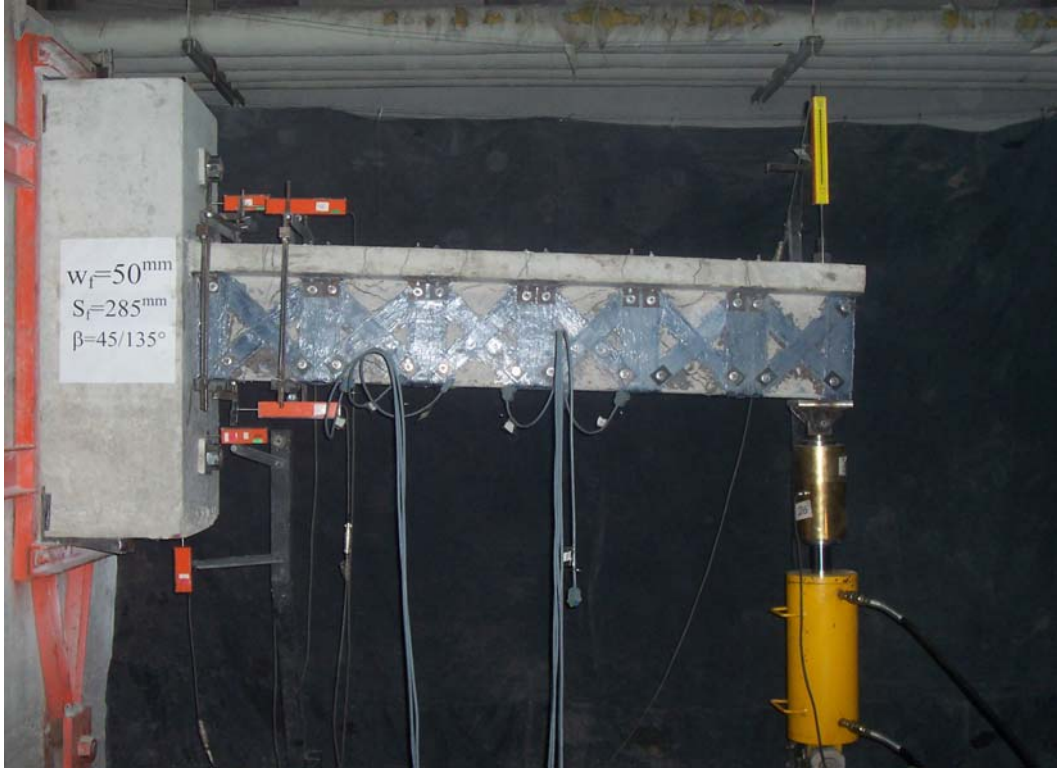


Şekil 4.15. Kiriş-6 deney elemanı için yük-deplasman grafiği

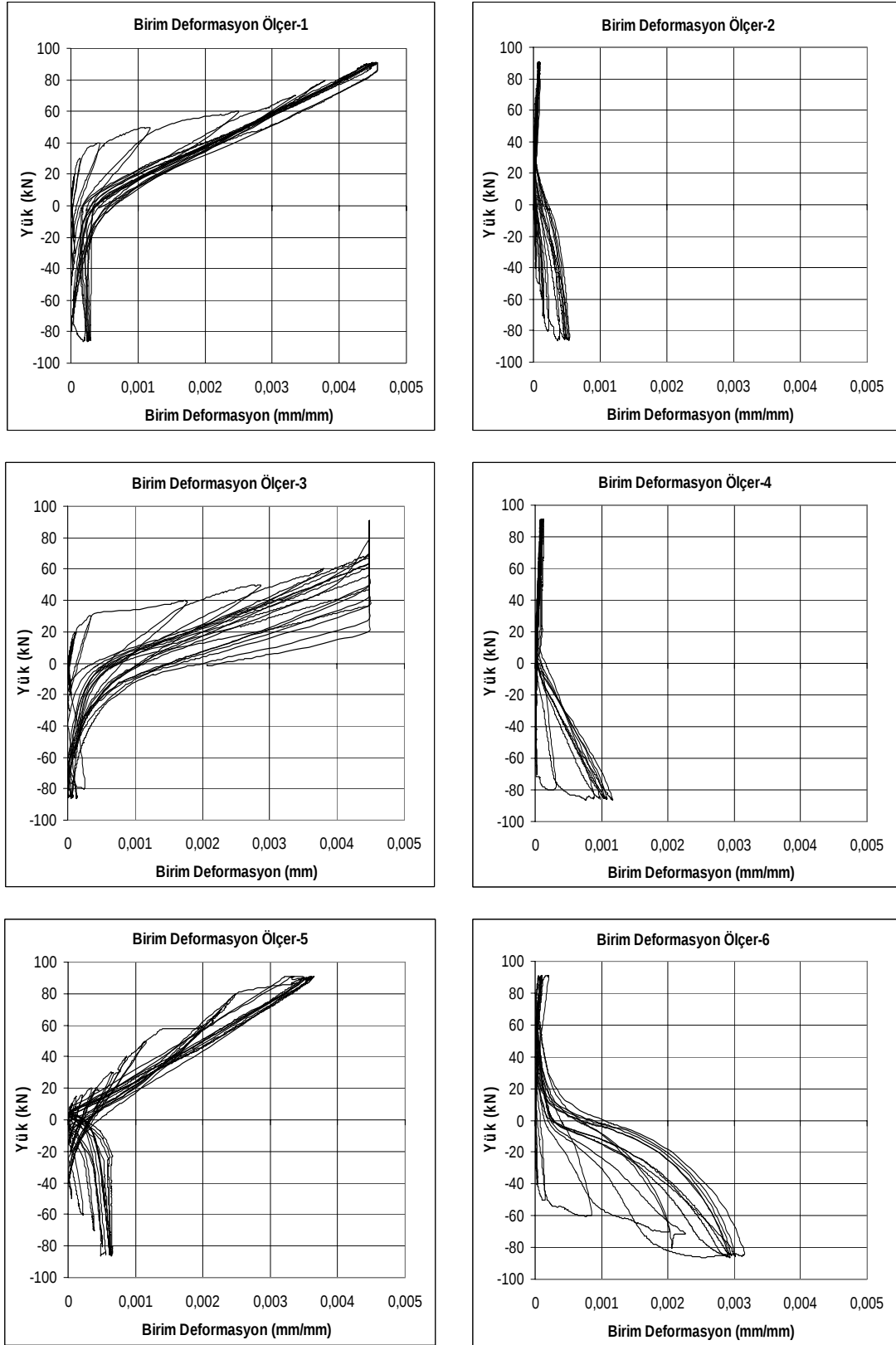
İleri yüklemde 90,8 kN yük düzeyinde çekme donatıları akmış ve bu noktada kiriş uç deplasmanı 26,8 mm olarak ölçülmüştür. Geri yüklemde yük 85,3 kN düzeyindeyken basınç donatıları akmış ve bu noktada kiriş uç deplasmanı 32 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanı mesnet bölgesinde oluşan ayrılma çatlakları tüm kiriş kesitini mesnetten ayırmıştır. Bu bölgede oluşan plastik mafsalları sonucunda deney elemanı sünek bir eğilme davranışı sergilemiştir. Deney elemanı kesme açıklığında hiçbir yeni çatlak gelişimi olmadığı ve CFRP şeritlerden alınan birim deformasyon ölçümlerinde de bir değişim olmadığının gözlenmesi sonucunda bütün deformasyonun plastik mafsalları bölgesinde olduğu kanısına varılmıştır. Akma dayanımına ulaşıldıktan sonra 4 tam çevrim uygulanarak deneye son verilmiştir. Uygulanan son çevrimde kiriş uç deplasmanı ileri yüklemde 51,1 mm, geri yüklemde 56 mm (Resim 4.10, 4.11) olarak ölçülmüştür. Kiriş-6 deney elemanında ölçülen en büyük birim deformasyon 0,004566 mm/mm değerine sahiptir. Bu değer analitik olarak öngörülen değerden %14 daha fazladır. Şekil 4.16'da birim deformasyon ölçerlerin grafikleri verilmiştir.



Resim 4.10. İleri yüklemdeki maksimum kiriş uç deplasmanı (51 mm)



Resim 4.11. Geri yüklemde maksimum kiriş uç deplasmanı (56 mm)



Şekil 4.16. Kiriş-6 deney elemanı üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin grafikleri

5. DEĞERLENDİRMELER

Değerlendirmeler bölümünde, deney elemanlarının testlerinden elde edilen bulgular ışığında kesme dayanımı yetersiz kirişlerin dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirme tekniğinin elemanların davranış, dayanım, rijitlik, süneklik ve enerji tüketimi yönünden etkileri incelenmiştir. Dıştan CFRP şeritler yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerin tersinir tekrarlanır yükler altındaki davranışları, referans kirişleri ile karşılaştırılmış ve kullanılan güçlendirme tekniğinin etkinliği irdelenmiştir.

5.1. Dayanım ve Davranış

Deney elemanlarının dayanımları ve sergiledikleri genel davranış zarf eğrileri incelenerek yorumlanmıştır. Zarf eğrileri deney elemanlarının yük-deplasman grafiklerinden yararlanılarak çizilmiştir. Zarf eğrileri yük-deplasman grafiğinde her çevrimin maksimum yük değerindeki noktaların birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Deney elemanlarının dayanımları karşılaştırılırken beton basınç dayanımları birbirine çok yakın olduğu için bir normalizasyon yapılmamıştır.

Deney elemanlarının dayanımları ve kontrol elemanları ile karşılaştırılmaları Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Kesme dayanımı yeterli olarak tasarlan Kiriş-1 kontrol elemanı kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanan Kiriş-2 deney elemanından 2,23 kat CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-3, 4, 5 ve 6 deney elemanlarından sırası ile 1.24, 1.01, 1.02, 1.02 kat daha fazla dayanım sergilemiştir. Kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanan Kiriş-2 kontrol elemanı CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-3, 4, 5 ve 6 deney elemanlarından sırası ile %44, %55, %54, %54 daha az dayanım sergilemiştir. Şekil 5.1’de deney elemanlarının zarf eğrileri verilmiştir.

Kiriş-1 kontrol elemanı 92,3 kN, Kiriş-2 kontrol elemanı 41,4 kN yük taşıyabilmiştir. Kiriş-3 deney elemanı 50 mm genişliğinde, Kiriş-4 deney elemanı 100 mm

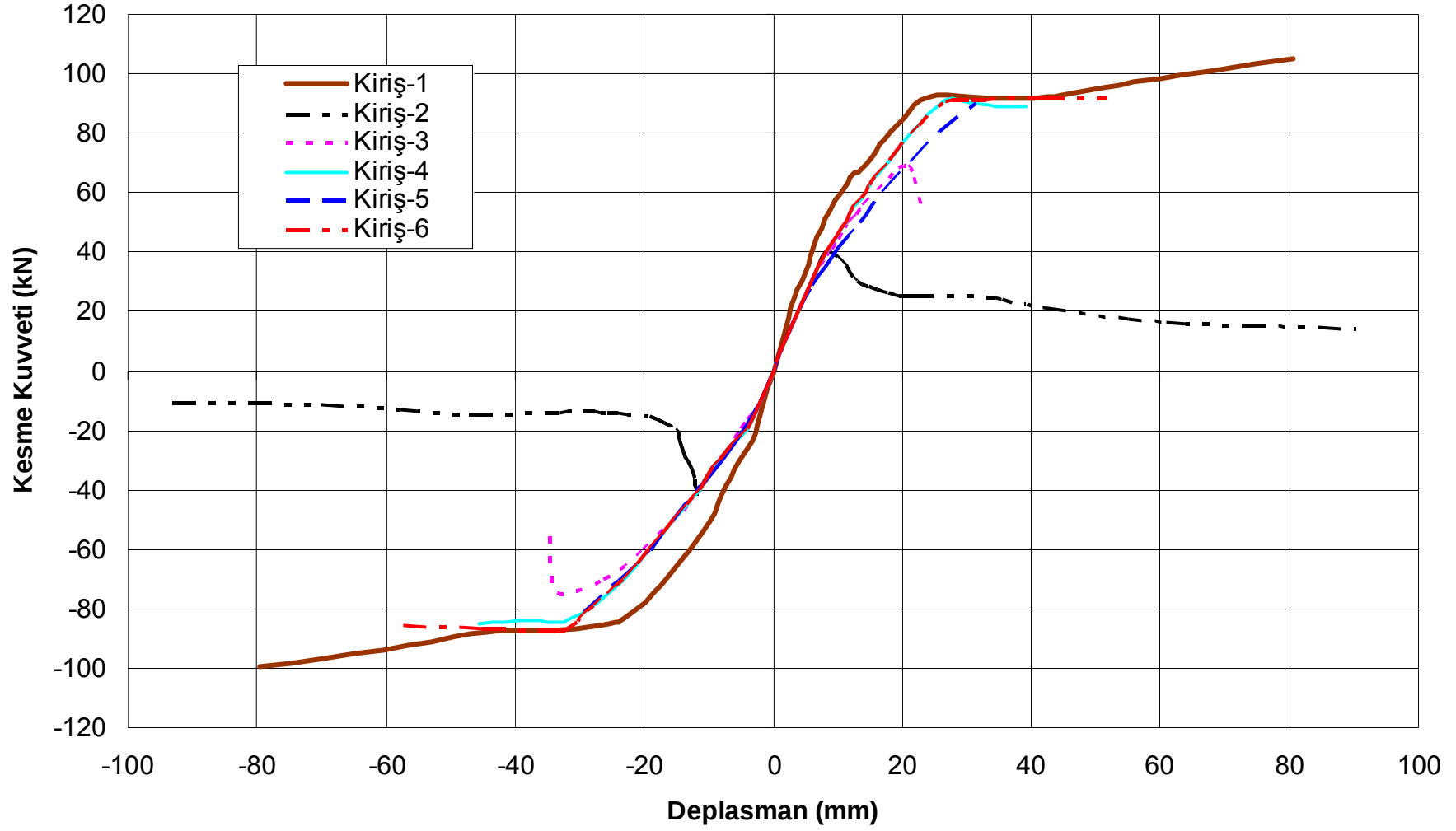
genişliğindeki CFRP şeritlerin 285 mm aralıklarla 45° ve 135° 'lik açılarla yerleştirilmesi ile güçlendirilmiş deney elemanlarıdır. Kiriş-3 deney elemanı 74,3 kN

Çizelge 5.1. Deney elemanlarının dayanımları

Deney Elemanı	M _{ölç.} (kN-m)	V _{ölç.} (kN)	$\frac{V_{ölç.}}{V_{ölç. (Kiriş-1)}}$	$\frac{V_{ölç.}}{V_{ölç. (Kiriş-2)}}$
Kiriş-1 (Kontrol)	154,6	92,3	1,00	2,23
Kiriş-2 (Kontrol)	69,3	41,4	0,45	1,00
Kiriş-3 (Güçlendirilmiş)	124,5	74,3	0,80	1,79
Kiriş-4 (Güçlendirilmiş)	152,6	91,1	0,99	2,20
Kiriş-5 (Güçlendirilmiş)	150,8	90,0	0,98	2,17
Kiriş-6 (Güçlendirilmiş)	152,1	90,8	0,98	2,19

yük taşımış ve Kiriş-1 kontrol elemanından %20 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından 1,79 kat daha fazla dayanım sergilemiştir. Kiriş-3 deney elemanı boyuna donatıları akma dayanımına ulaşmadan ani ve gevrek bir kesme kırılması sonucu göçmüştür. Kiriş-4 deney elemanı ise 91,1 kN yük taşıyarak Kiriş-1 kontrol elemanından %1 daha az, Kiriş-2 deney elemanından 2,2 kat daha fazla dayanım sergilemiştir. Kiriş-4 elemanı, boyuna donatıları aktıktan sonra yük taşımaya devam etmiştir. Yükleme devam ederken deney elemanı ani ve gevrek olarak göçmüştür.

Kiriş-5 deney elemanı 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 143 mm aralıklarla 45° ve 135° 'lik açılarla yerleştirilmesi ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Bu eleman 90 kN yük taşımıştır. Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanından %2 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından 2,17 kat daha fazla dayanım sergilemiştir. Kiriş-5 deney elemanı, boyuna donatıları aktıktan sonra ani ve gevrek olarak göçmüştür. Şekil 5.1'de deney elemanlarının zarf eğrileri verilmiştir.



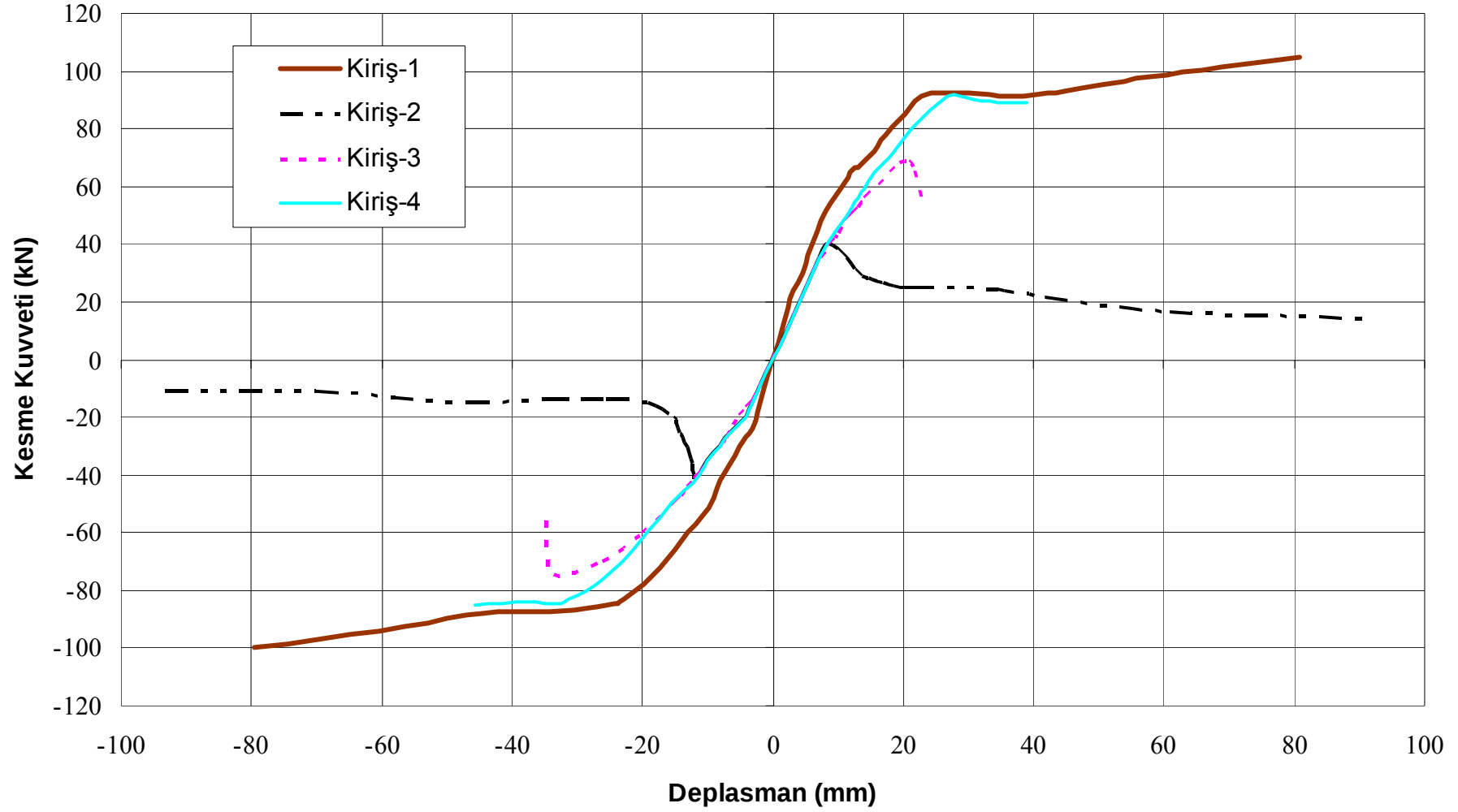
Şekil 5.1. Deney elemanlarının zarf eğrileri

Kiriş-6 deney elemanı 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 45° ve 135° 'lik açılarla, 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 90° 'lik açıyla 285 mm aralıklarla yerleştirilmesi ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Bu eleman 90,8 kN yük taşımıştır. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanından %2 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından 2.19 kat daha fazla yük taşımıştır. Kiriş-6 deney elemanı sünek eğilme davranışı sergilemiştir.

Şekil 5.2'de Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanlarının zarf eğrileri verilmiştir. Bu grafikten CFRP şerit genişliğinin deney elemanlarının dayanım ve davranış üzerine etkileri yorumlanmıştır. Kiriş-1 kontrol elemanı 92,3 kN, Kiriş-2 kontrol elemanı 41,4 kN yük taşıyabilmiştir. Kiriş-1 kontrol elemanı Kiriş-2 kontrol elemanından 2,23 kat daha fazla yük taşımıştır. Grafikte verilen zarf eğrileri incelendiğinde üst sınırı kesme dayanımı yeterli Kiriş-1 kontrol elemanı, alt sınırı kesme dayanımı yetersiz Kiriş-2 kontrol elemanının oluşturduğu görülmektedir. CFRP şeritlerle güçlendirilen Kiriş-3 ve Kiriş-4 deney elemanları kontrol elemanları arasında davranış sergilemiştir.

Kiriş-3 deney elemanı 74,3 kN yük taşımıştır. Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanından %20 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından 1,79 kat daha fazla yük taşımıştır. Kiriş-4 deney elemanı 91,1 kN yük taşıyarak Kiriş-1 kontrol elemanından %1 daha az, Kiriş-2 deney elemanından 2,2 kat daha fazla dayanım sergilemiştir. CFRP şeritlerin genişliğinin artması kiriş dayanımı etkileyerek deney elemanın yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir.

Deney elemanlarının ileri ve geri yüklemede sergilemiş oldukları davranışlar benzerdir. Geri yüklemede Kiriş-1 kontrol elemanı 85 kN yük taşıyarak en büyük dayanımı, Kiriş-2 kontrol elemanı 40 kN yük taşıyarak en düşük dayanımı sergilemiştir. Kiriş-3 ve 4 deney elemanları bu iki deney elemanı arasında davranış sergilemiştir.



Şekil 5.2. Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP şerit genişliği)

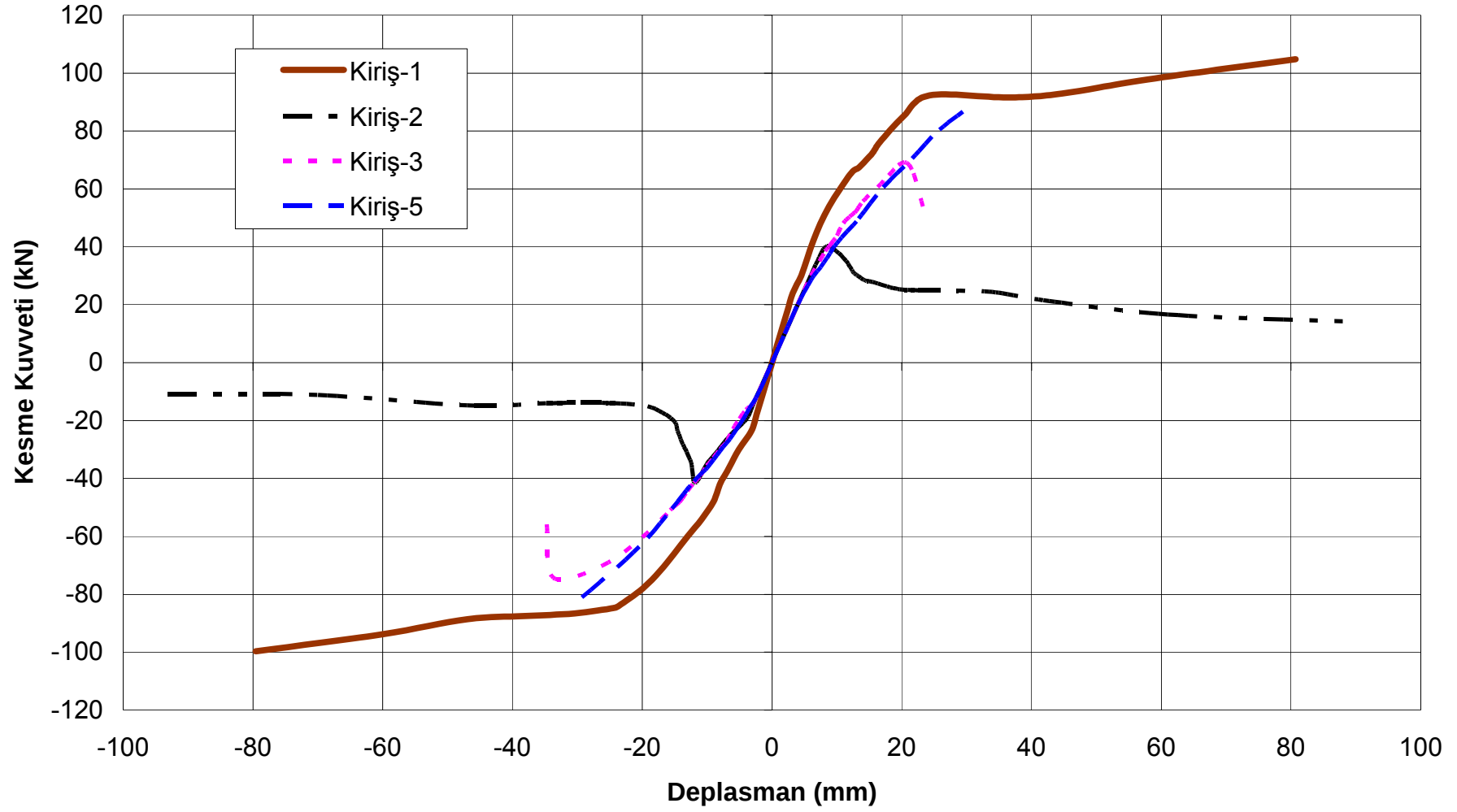
Kiriş-1 kontrol elemanı akma noktasında 24,3 mm deplasman yapmıştır. Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanlarının boyuna donatılarında akma gerçekleşmemiş ve deney elemanları ani ve gevrek kesme kırılması sonucu göçmüştür. Kiriş-4 deney elemanı akma noktasında 26,8 mm deplasman yapmıştır. Elde edilen bu sonuçlar Kiriş-4 deney elemanın Kiriş-1 kontrol elemanına benzer davranış sergilediğini göstermiştir.

Deney elemanlarında ileri yüklemde akma noktasındaki deplasman değerinde görülen davranış geri yükleme için de benzerdir. Kiriş-1 kontrol elemanı geri yüklemde akma noktasında 26,95 mm deplasman yapmıştır. Kiriş-2 kontrol elemanı ve Kiriş-3 deney elemanında akma gerçekleşmemiştir. Kiriş-4 deney elemanı 33,47 mm deplasman yaparak ileri yüklemde 6,67 mm daha fazla deplasmanla akma noktasına ulaşmıştır.

Şekil 5.3’de Kiriş-1, 2, 3 ve 5 deney elemanlarının zarf eğrileri verilmiştir. Bu grafikten CFRP şerit aralıklarının deney elemanlarının davranış ve dayanımı üzerine etkileri yorumlanmıştır. Kiriş-3 deney elemanı 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 285 mm aralıklarla yerleştirilmesi ile güçlendirilmiştir. Kiriş-5 deney elemanı ise 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 143 mm aralıklarla yerleştirilmesi ile güçlendirilmiştir.

Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanından %2 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından 2,17 kat daha fazla yük taşımıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, CFRP şeritler arası mesafenin azalmasının elemanların dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-3 deney elemanında 1,21 kat daha büyük dayanım sergilemiştir. Kiriş-5 deney elemanı geri yüklemde 81,5 kN yük taşımıştır. Kiriş-3 deney elemanın geri yükleme dayanımları ileri yükleme ile benzerdir.

Kiriş-5 deney elemanı ileri yüklemde akma noktasında 31,5 mm deplasman yaparak ulaşmıştır. Geri yüklemde Kiriş-5 deney elemanı akma noktasına ulaşamamış ama göçme noktasından önce 29,3 mm deplasman yaparak ileri yüklemeye benzer deplasman yapmıştır.



Şekil 5.3. Kiriş-1, 2, 3 ve 5 deney elemanlarının zarf eğrileri (CFRP şerit aralığı)

Şekil 5.4’de verilen zarf eğrileri, Kiriş-1, 2, 3 ve 6 deney elemanlarında karşılaşılan göçme mekanizmasını önlenmek için yapılan çalışmanın dayanım ve davranış üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Kiriş-6 deney elemanı, Kiriş-3 deney elemanındaki CFRP düzenlemesine ek olarak 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin 90°’lik açıyla ve 285 mm aralıklarla yerleştirilmesi ile güçlendirilmiştir. Kiriş-6 deney elemanı 90,8 kN yük taşımıştır. Kiriş-3 deney elemanına göre Kiriş-6 deney elemanı %22 daha fazla yük taşımıştır. Görülen bu fark Kiriş-3 deney elemanında oluşan göçme mekanizmasını önlemek için eklenen CFRP şeritlerin dayanım üzerindeki etkisini göstermektedir.

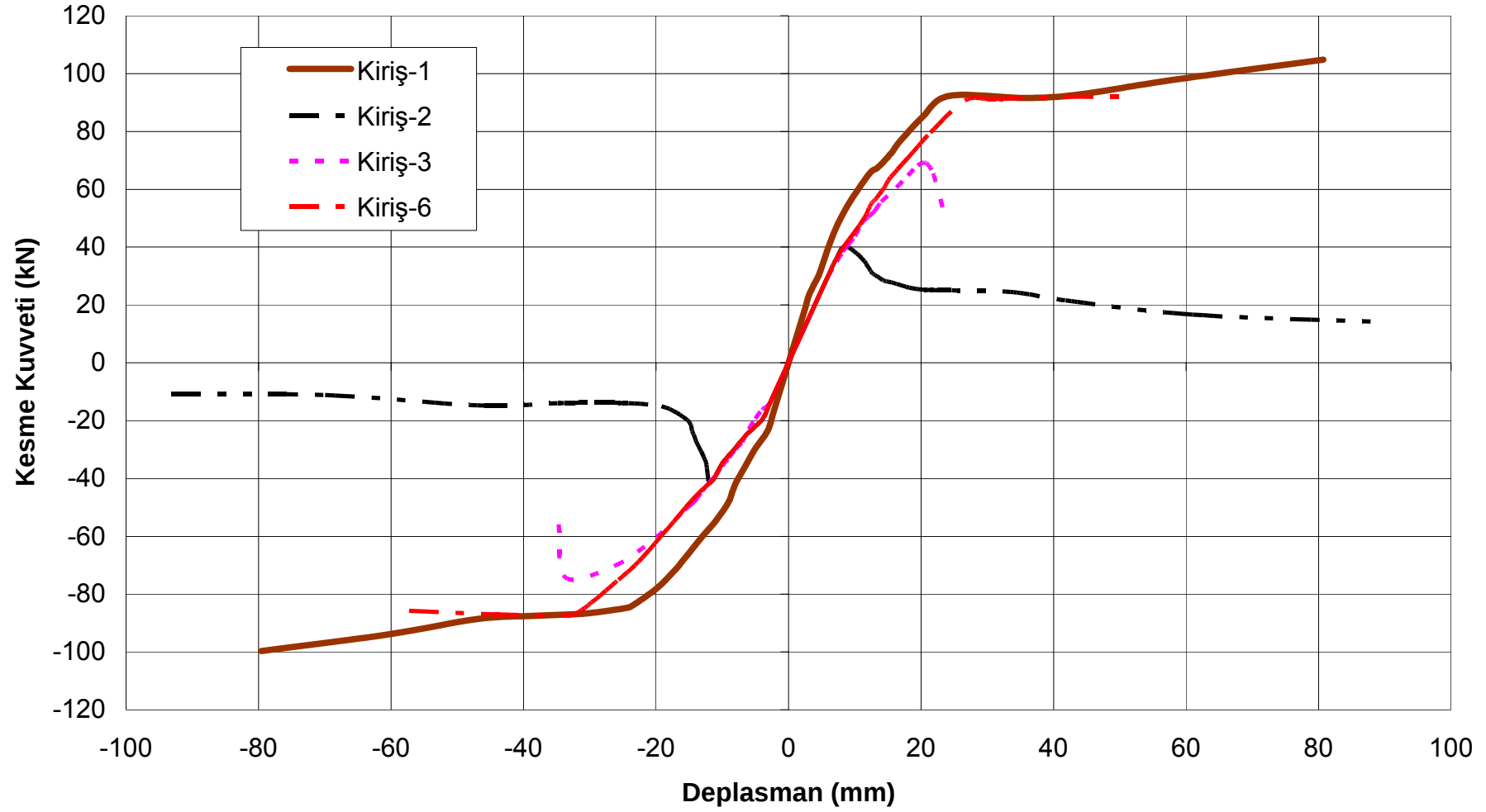
Kiriş-6 deney elemanı, Kiriş-1 kontrol elemanına göre %2 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanına göre 2,19 kat daha fazla yük taşımıştır. Kiriş-6 deney elemanı geri yüklemede ileri yüklemeye benzer dayanım sergilemiştir.

İleri yüklemede akma noktasında Kiriş-6 deney elemanı 26,8 mm deplasman yapmıştır. Kiriş-6 deney elemanı geri yüklemede 32 mm deplasman yapmıştır. Ayrıca Kiriş-6 deney elemanı göçme mekanizması ve sergilediği sünek eğilme davranışı ile Kiriş-1 kontrol elemanının performansına en çok yaklaşan elemandır.

5.2. Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlik değerleri deney sonucu elde edilen yük-deplasman grafikleri kullanılarak iki noktada hesaplanmıştır. Bunlar ilk eğilme çatlağının oluştuğu nokta ve maksimum yük noktalarıdır.

Rijitlik değerleri hesaplanırken bu noktaları orijinle birleştiren doğru çizilmiş ve bu doğruların eğimi hesaplanmıştır. Elde edilen eğim değerleri o noktanın rijitlik değeridir. Deney elemanlarının hesaplanan rijitlik değerleri Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Başlangıç rijitlik değeri, deney elemanında gözlenen ilk eğilme çatlağının geliştiği yük düzeyini orijine birleştiren doğrunun eğimi kullanılarak hesaplanmıştır. Maksimum yükteki rijitlik, deney elemanın maksimum yük seviyesinde ulaştıkları noktayı orijine bağlayan doğrunun eğimidir.



Şekil 5.4 Kiriş-1, 2, 3 ve 6 deney elemanlarının zarf eğrileri (Göçme mekanizmasının önlenmesi)

Çizelge 5.2. Deney elemanlarının rijitlik değerleri (kN/mm)

Deney Elemanı No	İleri Çevrimde Rijitlikler		Geri Çevrimde Rijitlikler	
	Başlangıç Rijitliği	Akma Rijitliği	Başlangıç Rijitliği	Akma Rijitliği
1	6,25	3,80	5,23	3,16
2	4,80	-----	3,95	-----
3	4,80	-----	3,55	-----
4	4,83	3,40	3,44	2,52
5	4,76	2,86	3,96	-----
6	5,49	3,39	4,04	2,65

Rijitlik değerlerinin hesaplandığı iki noktada CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarının kesme dayanımı yeterli olan Kiriş-1 ile kesme dayanımı yetersiz Kiriş-2 kontrol elemanı arasındaki rijitlik farkları, ileri ve geri çevrimler için ayrı ayrı Çizelge 5.3’de sunulmuştur. Kiriş-2 kontrol elemanın boyuna donatılarında akma gerçekleşmediği için diğer kirişlerle karşılaştırılmaları yapılmamıştır.

Çizelge 5.3. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerin rijitliklere etkisi

Deney Elemanı No	İleri Çevrim			Geri Çevrim		
	Başlangıç Rijitliği		Akma Rijitliği	Başlangıç Rijitliği		Akma Rijitliği
	$\frac{R_{Kiriş-X}}{R_{Kiriş-1}}$	$\frac{R_{Kiriş-X}}{R_{Kiriş-2}}$	$\frac{R_{Kiriş-X}}{R_{Kiriş-1}}$	$\frac{R_{Kiriş-X}}{R_{Kiriş-1}}$	$\frac{R_{Kiriş-X}}{R_{Kiriş-2}}$	$\frac{R_{Kiriş-X}}{R_{Kiriş-1}}$
1	1,00	1,30	1,00	1,00	1,32	1,00
2	0,77	1,00	-----*	0,76	1,00	-----*
3	0,77	1,00	-----*	0,68	0,90	-----*
4	0,77	1,01	0,89	0,66	0,87	0,80
5	0,76	0,99	0,75	0,76	1,00	-----*
6	0,88	1,14	0,89	0,77	1,02	0,84

* Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanlarına boyuna donatılarında akma gerçekleşmediği için Kiriş-1 kontrol elemanı ile karşılaştırılmaları yapılmamıştır.

Çizelgeler incelendiğinde Kiriş-1 kontrol elemanı diğer deney elemanlarına göre daha rijit davranmıştır. Diğer deney elemanları birbirleri ile benzer rijitlik göstermişlerdir.

Kiriş-1 kontrol elemanı en büyük başlangıç rijitliğine (6,25 kN/mm) sahip deney elemanıdır. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanından sonra en büyük başlangıç rijitlik (5,49 kN/mm) değerine sahip deney elemanıdır. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanına göre %12 daha az rijitlik sergilenmiştir. Kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanan Kiriş-2 kontrol elemanı, Kiriş-1 kontrol elemanına göre %23 daha az rijit davranış göstermiştir. Kiriş-2 kontrol elemanı 4,80 kN/mm başlangıç rijitliğine sahiptir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-3, 4, 5 deney elemanları Kiriş-1 kontrol elemanına göre sırası ile %23, %23, %24 daha az rijitlik sergilemiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları genel olarak Kiriş-2 kontrol elemanına benzer başlangıç rijitlik davranışı göstermiştir. Sadece Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-2'ye göre 1.14 kat daha fazla rijitlik sergilemiştir.

En büyük akma rijitliğine sahip deney elemanı Kiriş-1'dir (3,80 kN/mm). Kiriş-4 ve Kiriş-6 deney elemanları 3,40 kN/mm ve 3,39 kN/mm akma rijitliğine sahiplerdir ve Kiriş-1 kontrol elemanına göre %11 daha az akma rijitliği sergilemiştir. Kiriş-5 deney elemanı ise Kiriş-1'e göre %25 daha az akma rijitliği göstermiştir. Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanları akma noktaları olmadığı için akma rijitlikleri hesaplanmamıştır. Kiriş-5 deney elemanın geri çevrimde akma noktasına ulaşılmadığı için akma rijitlikleri hesaplanmamıştır.

CFRP şerit genişliğinin değiştiği Kiriş-3 ve Kiriş-4 deney elemanları benzer başlangıç rijitliği göstermiştir. Kiriş-3 ve 4 deney elemanlarının başlangıç rijitliği Kiriş-1 kontrol elemanından %23 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanı ile aynı rijitliği göstermiştir. Geri yüklemede Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanına göre %32 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanına göre %10 daha az başlangıç rijitliği göstermiştir. Kiriş-4 deney elemanı da geri yüklemede Kiriş-1 kontrol elemanına göre %34 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanına göre %13 daha az başlangıç rijitliği sergilemiştir. Kiriş-4 deney elemanı ileri yüklemede akma rijitliği Kiriş-1 kontrol

elemanından %11 daha az, geri yüklemede de %20 daha az rijitlik sergilemiştir. Kiriş-2 ve 3 deney elemanlarının boyuna donatılarında akma gerçekleşmediği için Kiriş-4 deney elemanı ile karşılaştırılmaları yapılmamıştır.

CFRP şerit aralıklarının değişmesine rağmen Kiriş-3 ve 5 deney elemanları ileri yüklemede benzer başlangıç rijitliği sergilemiştir. Geri yüklemede ise Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-3 deney elemanından %11 daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. Kiriş-3 ve 5 deney elemanları ileri yüklemede Kiriş-1 kontrol elemanından %23 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanı ile de benzer başlangıç rijitliği sergilemiştir. Geri yüklemede Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanından %24, Kiriş-2 kontrol elemanı ile de benzer başlangıç rijitliği sergilemiştir. İleri yüklemede Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanında %11 daha az akma rijitliği sergilemiştir. Geri yüklemede Kiriş-5 deney elemanın boyuna donatılarında akma gerçekleşmemiştir.

Deney elemanlarında gözlenen göçme modunu önlemek için güçlendirilen Kiriş-6 deney elemanı ileri ve geri yüklemede Kiriş-3 deney elemanından %14 daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. Kiriş-6 deney elemanın başlangıç rijitliği ileri yüklemede Kiriş-1 kontrol elemanından %12 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından %14 daha fazladır. Geri yüklemede Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1 kontrol elemanında %23 daha az, Kiriş-2 kontrol elemanından ise %2 daha fazla başlangıç rijitliği sergilemiştir. Kiriş-6 deney elemanı ileri yüklemede Kiriş-1 kontrol elemanından %11 daha az geri yüklemede ise %16 daha az akma rijitliği sergilemiştir.

5.3. Enerji Tüketim Kapasiteleri

Deneyisel çalışmada CFRP şeritlerle güçlendirme tekniğinin deney elemanlarının enerji tüketimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Deney elemanlarının enerji tüketimleri yük-deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Her çevrim için yük-deplasman grafiklerinin altındaki alan deney elemanları için hesaplanmıştır. Her deney elemanın tükettiği enerji deney sırasında uygulanan yükleme programı ile doğrudan ilişkilidir. Deney elemanları arasında sağlıklı karşılaştırma yapılabilmesi

için deney elemanlarının yük geçmişleri aynı veya çok benzer olması gerekmektedir. Deney elemanlarında aynı yük geçmişleri kullanılmamıştır. Bu nedenle toplam enerji tüketimi göz önünde bulundurulmuş, bunun değerlendirilmede sağlıklı olacağı düşünülmüştür. Elemanların enerji tüketim değerleri hesaplanırken, maksimum yük değerlerinin %75'ine düştüğü yük düzeyine kadar olan çevrimler göz önüne alınmıştır. Deney elemanlarının tükettiği enerjiler Çizelge 5.4'de sunulmuştur.

Deney programı içerisinde en büyük enerji tüketimine sahip deney elemanı Kiriş-1 dir. Kiriş-1 kontrol elemanı 24187 kN-mm enerji tüketmiştir. En az enerji tüketim değerini kesme dayanımı yetersiz Kiriş-2 kontrol elemanı göstermiştir. Kiriş-2 kontrol elemanı 653 kN-mm enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları içerisinde en fazla enerji tüketimi 16575 kN-mm ile Kiriş-6 göstermiştir. Kiriş-3, 4, 5 deney elemanları sırası ile 2985, 10445 ve 4898 kN-mm enerji tüketmiştir.

Çizelge 5.4. Deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri

Deney Elemanı No	Kümülatif Enerji Tüketimi (kN-mm)	$\frac{E_{\text{Kiriş-X}}}{E_{\text{Kiriş-1}}}$	$\frac{E_{\text{Kiriş-X}}}{E_{\text{Kiriş-2}}}$
Kiriş-1	24187	1,00	37,04
Kiriş-2	653	0,03	1,00
Kiriş-3	2985	0,12	4,57
Kiriş-4	10445	0,43	16,00
Kiriş-5	4898	0,20	7,50
Kiriş-6	16575	0,69	25,38

Çizelge 5.4'de CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları ile kontrol elemanlarının kümülatif enerji tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Bu oransal değerlerde CFRP şeritlerin enerji tüketim kapasitesine olan etkileri gözlenmiştir. Çizelgede kesme dayanımı yeterli Kiriş-1 kontrol elemanına göre enerji

tüketimindeki azalmalar ve kesme dayanımı yetersiz Kiriş-2 kontrol elemanına göre enerji tüketimindeki artışlar gösterilmiştir.

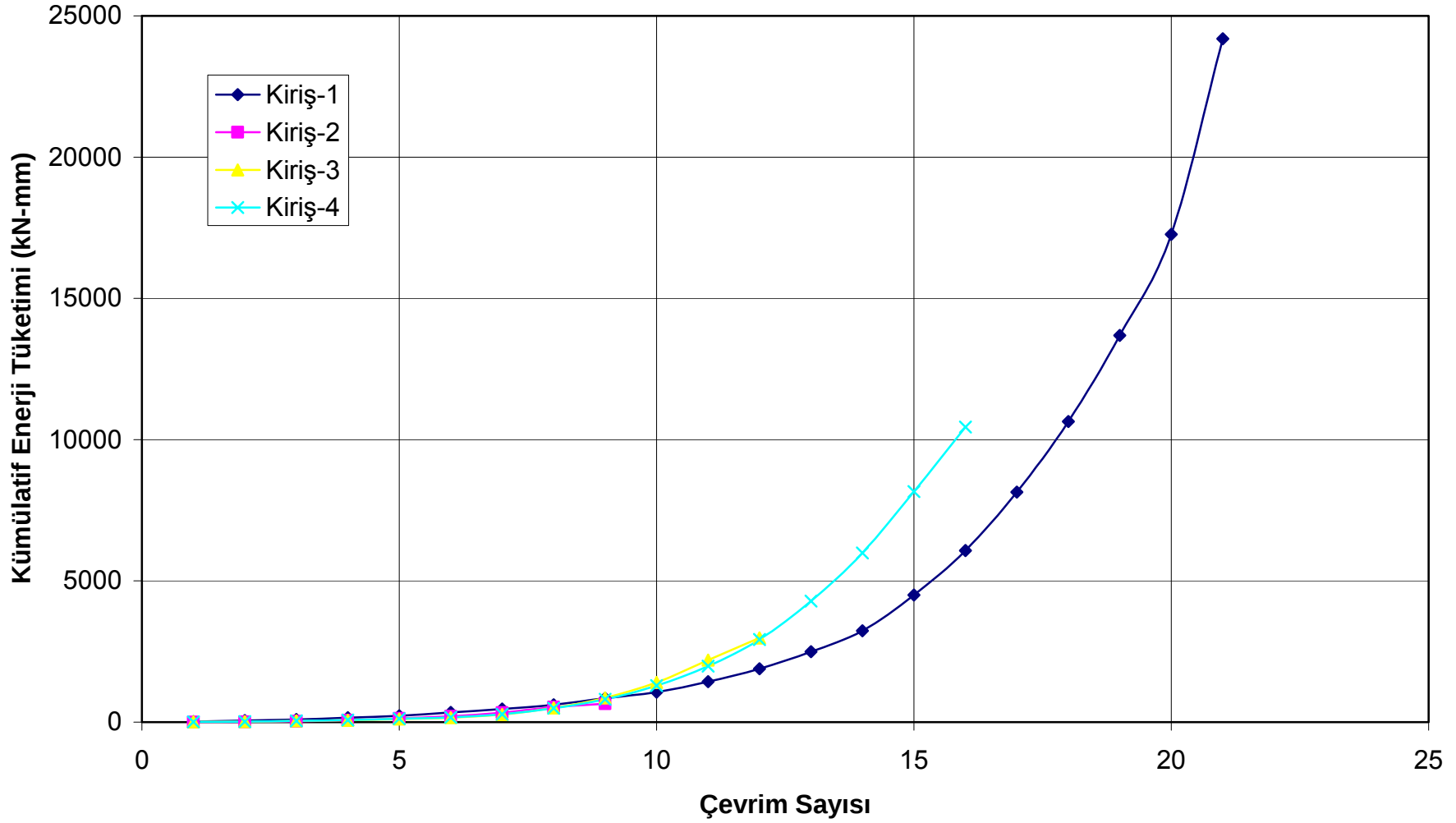
CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları içerisinde Kiriş-1 kontrol elemanına en yakın enerji tüketim değerini Kiriş-6 deney elemanı göstermiştir. Kiriş-6 deney elemanı Kiriş-1'e göre %31 daha az enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarından Kiriş-3, 4, 5 Kiriş-1 kontrol elemanına göre sırasıyla %88, %57, %80 daha az enerji tüketmiştir. Kesme dayanımı yetersiz Kiriş-2 kontrol elemanı Kiriş-1 kontrol elemanının tükettiği enerjinin ancak %3'ünü tüketebilmiştir.

Kiriş-2 kontrol elemanına göre CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları enerji tüketim değerlerini arttırmışlardır. Kiriş-2 kontrol elemanına göre Kiriş-6 deney elemanı 25,38 kat daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-3, 4, 5 deney elemanları Kiriş-2'ye göre sırasıyla 4.57, 16.00, 7.50 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Deney sonuçlarına göre kesme dayanımı yetersiz kirişlerin CFRP şeritlerle güçlendirilmesi ile kirişlerin birikimli enerji tüketimlerinde artış gözlenmiştir.

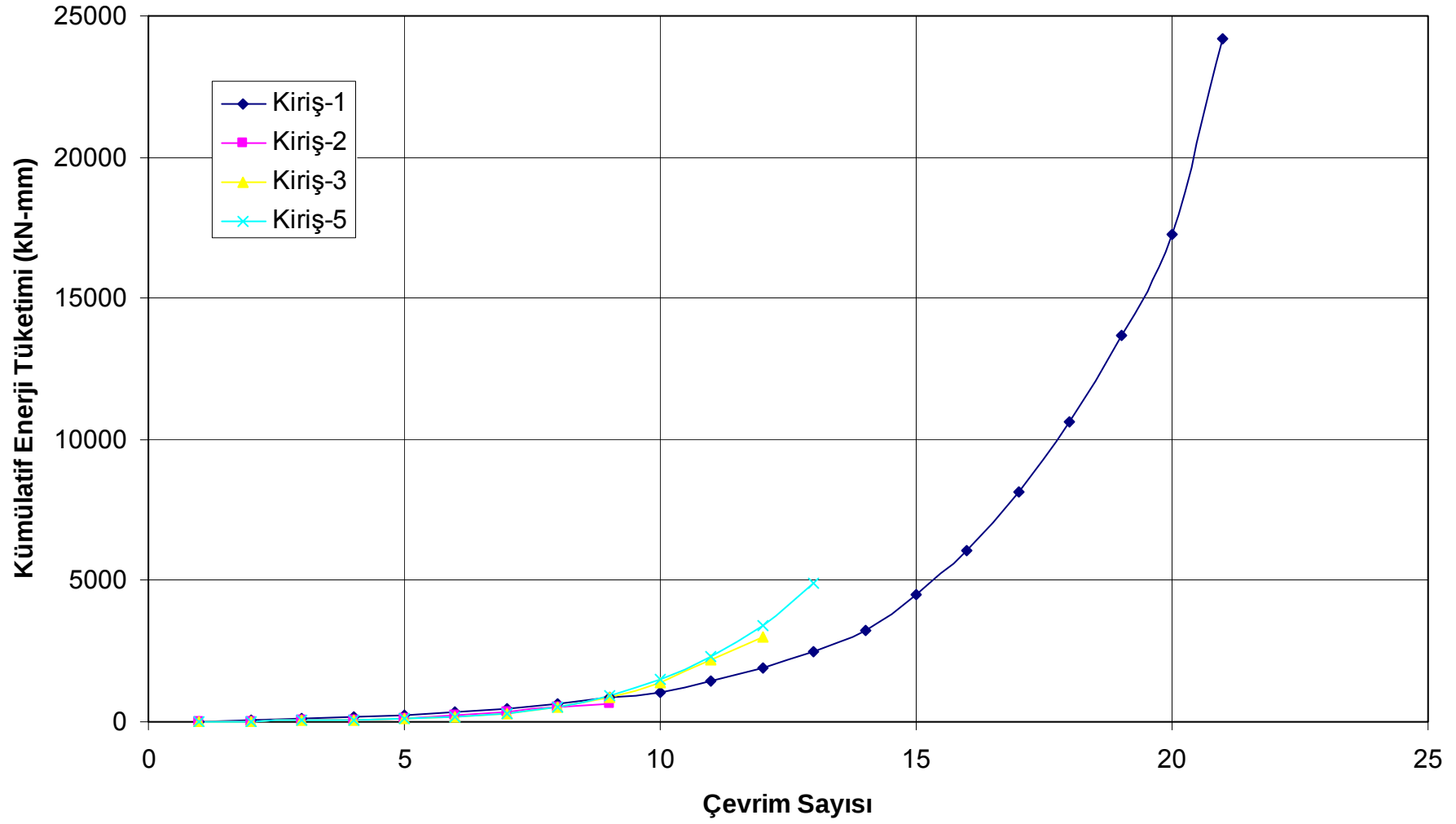
Şekil 5.5'de Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanlarına ait enerji tüketim grafikleri verilmiştir. Grafikte en büyük enerji tüketen deney elemanı Kiriş-1, en az enerji tüketen deney elemanı ise Kiriş-2 olduğu görülmektedir. CFRP şeritlerle güçlendirilen Kiriş-3 ve 4 deney elemanlarının enerji tüketimi bu iki kontrol elemanı arasındadır. Kiriş-1 kontrol elemanı Kiriş-4 deney elemanından 2,32 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Kiriş-4 deney elemanı Kiriş-2 kontrol elemanından 16 kat daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilen Kiriş-4 deney elemanı Kiriş-3 deney elemanından 3,5 kat daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP şerit genişliğinin değişmesi deney elemanlarının enerji tüketimi üzerinde etkili olmuştur. CFRP şerit genişliği artınca deney elemanının tükettiği enerji artmıştır. Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanları başlangıçta uygulanan düşük yük adımlarında benzer davranış sergilemiş ve daha az enerji tüketmiştir. Kiriş-1 kontrol elemanı daha fazla yük taşıdığı ve daha geç taşıma gücüne ulaştığı için diğer deney elemanlarından daha fazla enerji tüketmiştir.

Şekil 5.6’da verilen Kiriş-1, 2, 3 ve 5 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri incelendiğinde Kiriş-5 deney elemanı Kiriş-3 deney elemanından %64 daha fazla enerji tükettiği görülmüştür. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları arasındaki bu fark CFRP şeritler arasındaki mesafenin değişmesinden kaynakladığı sonucunu ortaya koymuştur. Deney elemanlarının enerji tüketimi üzerine CFRP şerit genişliğindeki değişim, CFRP şeritler arasındaki mesafenin değişmesinden daha etkili olduğu görülmüştür.

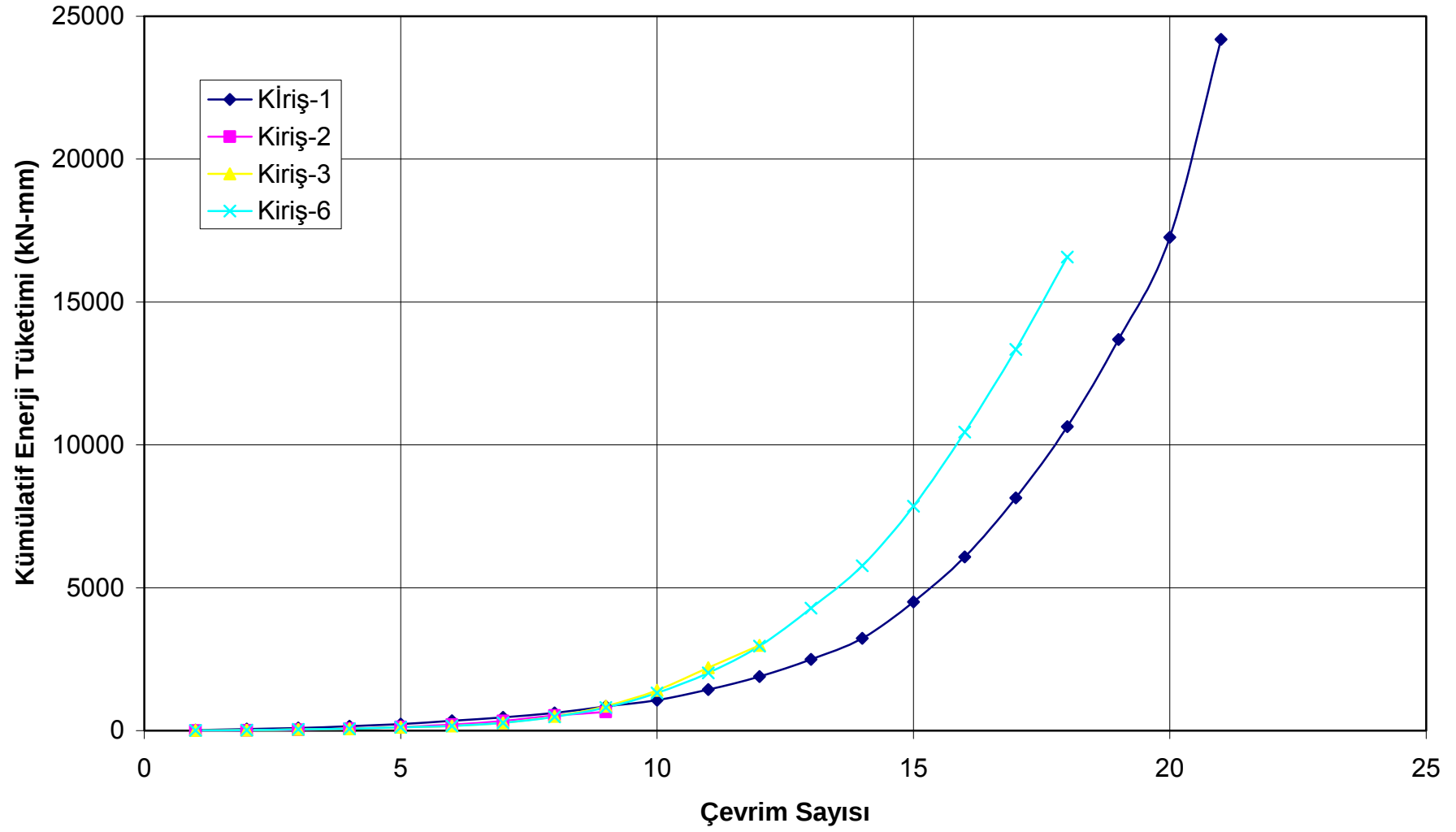
Şekil 5.7’de verilen Kiriş-1, 2, 3 ve 6 deney elemanlarının enerji tüketim grafikleri incelendiğinde deney elemanlarında görülen göçme modunun önlemek için güçlendirilen Kiriş-6 deney elemanın enerji tüketim kapasitesi Kiriş-3 deney elemanından 5,55 kat daha fazladır. Deney elemanlarında gözlenen göçme modunu önlemek için düzenlenen CFRP şerit uygulaması Kiriş-6 deney elemanın enerji tüketiminin artmasına neden olduğu görülmüştür.



Şekil 5.5. Kiriş-1, 2, 3 ve 4 deney elemanlarının enerji tüketimi grafikleri



Şekil 5.6. Kiriş-1, 2, 3 ve 5 deney elemanlarının enerji tüketimi grafikleri



Şekil 5.7. Kiriş-1, 2, 3 ve 6 deney elemanlarının enerji tüketimi grafikleri

5.4. Analitik Çalışmalar

5.4.1. Dayanım

Bu bölümde deney elemanlarının yapılan testler sonucu elde edilen eğilme ve kesme dayanım değerleri, malzemenin karakteristik özellikleri ACI 318–99 ve ACI 440 yönetmeliklerine göre hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Kesit taşıma gücüne erişildiğinde tarafsız eksene en uzak beton basınç lifindeki birim kısalma $\epsilon_{cu} = 0,003$ alınmıştır.

Deney elemanlarının moment kapasitelerinin bulunmasında kiriş gövdesinin iki tarafına yapıştırılan 0,12 mm kalınlığındaki CFRP şeritlerin eğilme kapasitesini değiştirmede kabul edilmiştir. Deney elemanların kesme dayanımı çatlamamış betonun ve kesme donatısının taşıdıkları kesme kuvvetleri ayrı ayrı hesaplanarak bulunmuştur. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarında CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkıları da hesaplanmıştır (Eş. 5.1). Deney elemanlarında betonun kesme donatılarının taşıdığı kesme kuvvetleri ACI 318–99 yönetmeliğine göre hesaplanmıştır (15). Kiriş-1 kontrol deney elemanı hariç güçlendirilen deney elemanlarında kesme donatısı olmadığı için bu elemanlarda kesme kuvvet kapasitesine sadece betonun etkisi hesaplanmıştır.

$$V = V_c + V_s + V_f \quad [5.1]$$

Denklemden;

V_c : Beton tarafından taşınan kesme kuvveti

V_s : Kesme donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti

V_f : CFRP şeritler tarafından taşınan kesme kuvveti

Betonun taşıdığı kesme kuvveti;

$$V_c = 2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad [5.2]$$

Denklemde;

f_c' : Betonun karakteristik basınç dayanımı

b_w : Kiriş gövde genişliği

d : Kiriş faydalı yüksekliği

Kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti;

$$V_s = A_v / s \cdot d \cdot f_y \quad [5.3]$$

Denklemde;

A_v : Kesme donatısı kesit alanı

s : Kesme donatısı aralığı

f_y : Kesme donatısı akma dayanımı

CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-3, 4, 5 ve 6 deney elemanlarında CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkıları ACI 440 yönetmeliği kullanılarak hesaplanmıştır (16). Bu değerler kesme donatısı ve çatlamış betonun taşıdıkları kesme kuvvetlerine eklenerek deney elemanlarının kesme dayanımları bulunmuştur (Eş. 5.4).

$$V_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin\beta + \cos\beta) \cdot d_f}{s_f} \quad [5.4]$$

Denklemde;

V_f : CFRP şeritler tarafından taşınan kesme kuvveti

β : CFRP şeritlerin yatayla yaptığı açı

d_f : Etkili CFRP şerit uzunluğu

s_f : CFRP şeritler arası mesafe

f_{fe} : CFRP şeritteki etkili gerilme

n : CFRP şerit katman sayısı

t_f : CFRP şerit kalınlığı

w_f : CFRP şerit genişliği

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} \cdot E_f \quad [5.5]$$

Denklemde;

ϵ_{fe} : CFRP şeritlerin etkili gerilme değeri

E_f : CFRP'nin elastisite modülü

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{fu} \cdot k_v \quad [5.6]$$

Denklemde;

ϵ_{fu} : CFRP'nin dizayn kopma gerilmesi

k_v : Kesme dayanımı için yapıştırma katsayısı

$$k_v = k_1 \cdot k_2 \cdot L_e / (11900 \cdot \epsilon_{fu}) \quad [5.7]$$

Denklemde;

k_1 : Betonun basınç dayanımına bağlı değişiklik katsayısı

k_2 : CFRP düzenlemesine bağlı değişiklik katsayısı

L_e : CFRP şerittin aktif yapıştırma uzunluğu

Denklemde verilen k_1 , k_2 ve L_e değerlerinin formülleri aşağıda verilmiştir.

$$L_e = 23300 / (n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58} \quad [5.8]$$

$$k_1 = (f_c' / 27)^{2/3} \quad [5.9]$$

k_2 katsayısının denklemleri CFRP şeritlerin uygulama şekline bağlı olarak değişmektedir. CFRP şeritler deney elemanın yan yüzlerine yapıştırıldığında Eş 5.10 denklemi kullanılmaktadır. CFRP şerit uygulaması U sargı şeklindeyse Eş 5.11 denklemi uygulanmaktadır.

$$k_2 = (d_f - L_e) / d_f \quad [5.10]$$

$$k_2 = (d_f - 2 \cdot L_e) / d_f \quad [5.11]$$

Testler sırasında ölçülen ve hesaplanan değerler Çizelge 5.5’de verilmiştir. Ölçülen değerlerle hesaplanan değerlere oranlarının bire yakın olması deney sonuçlarıyla analitik sonuçlarının birbirine uyumlu olduğunu göstermektedir.

Deney elemanlarının analitik moment kapasiteleri deneysel değerlerden Kiriş-2 kontrol elemanı hariç ortalama %17 daha az hesaplanmıştır. Hesaplanan ve ölçülen moment kapasite değerleri arasındaki en büyük fark Kiriş-1 kontrol elemanında %23 olarak meydana gelmiştir. Kiriş-2 kontrol elemanı kesme kapasitesinin aşılması sonucu göçtüğü için bu elemanın moment kapasitesi değerleri arasında uyum bulunmamaktadır.

Hesaplanan ve ölçülen kesme kuvveti kapasite değerleri arasında en büyük fark CFRP şeritlerle güçlendirilmiş Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarında %24 olarak meydana gelmiştir. Kiriş-4 ve 5 deney elemanlarından sonra en büyük fark %22 ile Kiriş-3 deney elemanında görülmüştür. Kiriş-6 deney elemanında hesaplanan değerlerle ölçülen değerler arasında %10’luk fark olmuştur. Kontrol elemanları Kiriş-1 ve Kiriş-2 için hesaplanan ve ölçülen değerler arasında sırasıyla %2 ve %9 fark meydana gelmiştir.

Hesaplanan değerlerin deneysel kapasitelerden daha küçük olmasının nedeni deney elemanlarına uygulanan ankrajlar olduğu düşünülmektedir. Ankrajların kesme kuvveti kapasitesine yapmış olduğu etki analitik denklemler içinde yer almamaktadır. Bu nedenle hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farkın ankrajların kesme kapasitesi üzerindeki olumlu etkisine bağlı olduğu düşünülmektedir. Ancak kesme kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan analitik yaklaşımda ankrajların yaptığı etkinin yansıtılması gerekliliği unutulmamalıdır.

Çizelge 5.5. Yönetmelik denklemleri ile hesaplanan yük taşıma kapasitelerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması

Model Kiriş	Ölçülen Değerler				Hesaplanan Değerler		Ölçülen / Hesaplanan	
	$M_{ölç.}$ (kN-m)	$V_{ölç.}$ (kN)	$\frac{V_{ölç.}}{V_{ölç. (Kiriş-1)}}$	$\frac{V_{ölç.}}{V_{ölç. (Kiriş-2)}}$	$M_{hes.}$ (kN-m)	$V_{hes.}$ (kN)	$M_{ölç.}/M_{hes.}$	$V_{ölç.}/V_{hes.}$
Kiriş-1 (Kontrol)	154,6	92,3	1,00	2,23	125,9	94,4	1,23	0,98
Kiriş-2 (Kontrol)	69,3	41,4	0,45	1,00	125,8	45,3	0,55	0,91
Kiriş-3 (Güçlendirilmiş)	124,5	74,3	0,80	1,79	126,0	61,1	0,99	1,22
Kiriş-4 (Güçlendirilmiş)	152,6	91,1	0,99	2,20	126,0	73,2	1,21	1,24
Kiriş-5 (Güçlendirilmiş)	150,8	90,0	0,98	2,17	126,0	72,4	1,20	1,24
Kiriş-6 (Güçlendirilmiş)	152,1	90,8	0,98	2,19	126,0	82,4	1,21	1,10

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Dıştan epoksiyle yapıştırılan CFRP elemanlarla kesme dayanımı yetersiz kirişlerin güçlendirilmesi son yıllarda oldukça araştırılan bir yöntemdir. Yapılan araştırmalarda CFRP elemanlarla güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz kirişlerin deney sonuçları ve davranışları monotonik yükleme altında elde edilmiştir. Ancak kesme dayanımı yetersiz kirişlerin tersinir tekrarlanır yükleme altında davranışları araştırılmamıştır. Ayrıca CFRP şeritlerin yüzeyden ayrılması sonucu oluşan göçmeyi engelleyecek ankrajların geliştirilmesiyle ilgili çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Güçlendirme tekniğinin performansını düşüren bu göçme modunun önlenmesi amacıyla CFRP şeritlerin uç bölgelerine ankraj uygulaması yapılmıştır. Tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiş CFRP elemanlarla güçlendirilmiş kirişler ile ilgili deneysel veri eksikliğini gidermek amacıyla bu deneysel çalışma düzenlenmiştir. Düzenlenen deneysel çalışmada 6 adet deney elemanı üretilmiştir. 4 deney elemanında CFRP şeritlerle güçlendirme işlemi yapılmıştır. Güçlendirme yapılmış bütün elemanlarda CFRP şeritlerin yüzeyden ayrılmasını engelleyecek ankrajlar yapılmıştır. Açılı CFRP şerit genişliği ve aralığı değiştirilerek deney elemanlarının kesme dayanımının yetersizliği giderilmeye çalışılmıştır. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Dıştan epoksiyle yapıştırılan açılı CFRP şeritlerle yapılan güçlendirmenin kesme donatısı olmayan kirişlerin güçlendirilmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.
- Deneysel programda güçlendirilen Kiriş-3 deney elemanı hariç tüm deney elemanlarının boyuna donatıları akma dayanımına ulaşmış ve kiriş kesme kapasitesinde önemli bir artış meydana gelmiştir. Kiriş-3 deney elemanında bile kesme kapasitesi 1,79 kat artmıştır. Kiriş-4, 5 ve 6 deney elemanlarında

kesme kapasitesindeki artış ortalama 2,19 kat olmuştur. Güçlendirilen deney elemanları dayanım olarak istenilen performansı sergilemişlerdir.

- Deney elemanları Kiriş-1 kontrol elemanı ile benzer rijitlik davranışı sergilemiştir. Güçlendirilen elemanlar içinde en düşük akma rijitliğine sahip olan Kiriş-5, Kiriş-1'den %25 daha az rijitlik sergilemiştir. Kiriş-4 ve Kiriş-6 deney elemanları Kiriş-1 kontrol elemanına göre %11 daha az rijitlik göstererek iyi bir rijit davranışı sergilemiştir. Açılı CFRP şeritler ile güçlendirme kesme dayanımı yetersiz kirişlerin rijitlik davranışlarının iyileştirilmesinde olumlu sonuçlar vermiştir.
- Deney elemanları içinde Kiriş-1 kontrol elemanı en büyük süneklik oranına sahip kiriştir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanları göçme noktasına daha az deplasman yaparak ulaştığı için süneklik oranları Kiriş-1 kontrol elemanına göre daha düşüktür. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişler içinde Kiriş-6 deney elemanı en büyük süneklik oranına sahip deney elemanıdır. CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerin süneklik yönünden istenilen davranışı sergilemediği görülmüştür.
- Geliştirilen ankraj detayı tersinir tekrarlanır yükler altında başarılı performans sergilemiştir. Deney elemanı içinde sargılama etkisi oluşturarak, kiriş tablasını ve gövdesini bir arada tutan kesme donatısı olmamasına rağmen kiriş gövdesi ile tablasının birbirinden ayrılmasını engellemiştir. Ayrıca CFRP şeritlerin yüzeyden ayrılmasını önlemiştir.
- CFRP şeritlerden kiriş gövdesinin alt bölgesine aktarılan çekme kuvveti nedeniyle beton pas payı donatıya kadar ayrılarak Kiriş-3, 4 ve 5 deney elemanlarında göçmeye neden olmuştur. Kiriş alt bölgesinde uygulanan ankraj detayı boyuna donatı üzerine yerleştirildiğinden etriye davranışı sergileyememiştir. Ancak Kiriş-6 deney elemanında geliştirilen CFRP şerit

düzenlemesi ile kiriş alt bölgesinde sargılama yapılarak bu göçme modu önlenmiştir.

- ACI-440 komite raporunda önerilen analitik yaklaşımla hesaplanan kesme kapasiteleri, güçlendirilen deney elemanları deneysel kapasite değerlerinden ortalama %20 daha küçüktür. Deney elemanlarının beklenenden daha fazla dayanım göstermesi geliştirilen ankraj detayı ile CFRP şeritlerin kapasitelerini tam olarak sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.2. Öneriler

Yapılan çalışma tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilen açılı CFRP şeritler ile güçlendirilmiş T kesitli kirişler konusunda literatürdeki deneysel veri eksikliğini gidermeye yönelik bir adım olmuştur. Ancak deney elemanı sayısı arttırılmalı ve açılı şeritlerin yanı sıra farklı CFRP düzenlemelerinin de tersinir tekrarlanır yükleme altındaki performansı araştırılmalıdır. Ayrıca farklı kesme açıklığı faydalı yükseklik oranına sahip kirişlerin tersinir tekrarlanır yükleme altındaki performansı incelenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Khalifa, A. and Nanni, A., "Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites", **Cement & Concrete Composites**, 22: 165-174 (2000).
2. Khalifa, A. and Nanni, A., "Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites", **Construction and Building Materials**, 16: 135-146 (2002).
3. Li, A., Diagana, C. and Delmas, Y., "CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams", **Engineering Structures**, 23: 1212-1220 (2001).
4. Diagana, C., Li, A., Gedalia, B. and Delmas, Y., "Shear strengthening effectiveness with CFF strips", **Engineering Structures**, 25: 507-516 (2003).
5. Täljsten, B. and Elfgren, L., "Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods", **Composites Part B: Engineering**, 31: 87-96 (2000).
6. Täljsten, B., (2003), "Strengthening Concrete Beams for Shear with CFRP Sheets", **Construction and Building Materials**, 17: 15-26 (2003).
7. Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, Jr., T. A. and Finch, Jr., W. W., "Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics", **ACI Structural Journal**, 92 (3): 295-303 (1995).
8. Gendron, G., Picard, A. and Guérin, M. C., "A theoretical study on shear strengthening of reinforced concrete beams using composite plates", **Composites Structures**, 45: 303-309 (1999).
9. Norris, T., Saadatmanesh, H.; and Ehsani, M. R., "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets", **Journal of Structural Engineering**, 123 (7): 903-911 (1997).
10. Triantafillou, T. C., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites", **ACI Structural Journal**, 95 (2): 107-115 (1998).
11. Adhikary, B. B., Mutsuyoshi, H. and Sano, M., "Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis", **Construction and Building Materials**, 14: 237-244 (2000).
12. Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., Baluch, M. H. and Husain, M., "Strengthening of shear-damaged RC beams by external bonding of steel plates", **Magazine of Concrete Research**, 47 (173): 329-334 (1994).

13. Baluch, M. H., Ziraba, Y. N., Azad, A. K., Sharif, A. M., Al-Sulaimani, G. J. and Basunbul, I. A. "Shear strength of plated RC beams", **Magazine of Concrete Research**, 47 (173): 369-374 (1995).
14. Ersoy, U., "Betonarme: Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, 1. Cilt", **Evrım Yayınevi**, İstanbul, 377-398 (1985).
15. ACI, Committee 318 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318 R-95)", **American Concrete Institute**, Michigan (1995).
16. ACI, Committee 440 "Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP System For Strengthening Concrete Structures", **American Concrete Institute**, Michigan (1995).
17. TS 500: Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2000)

EKLER

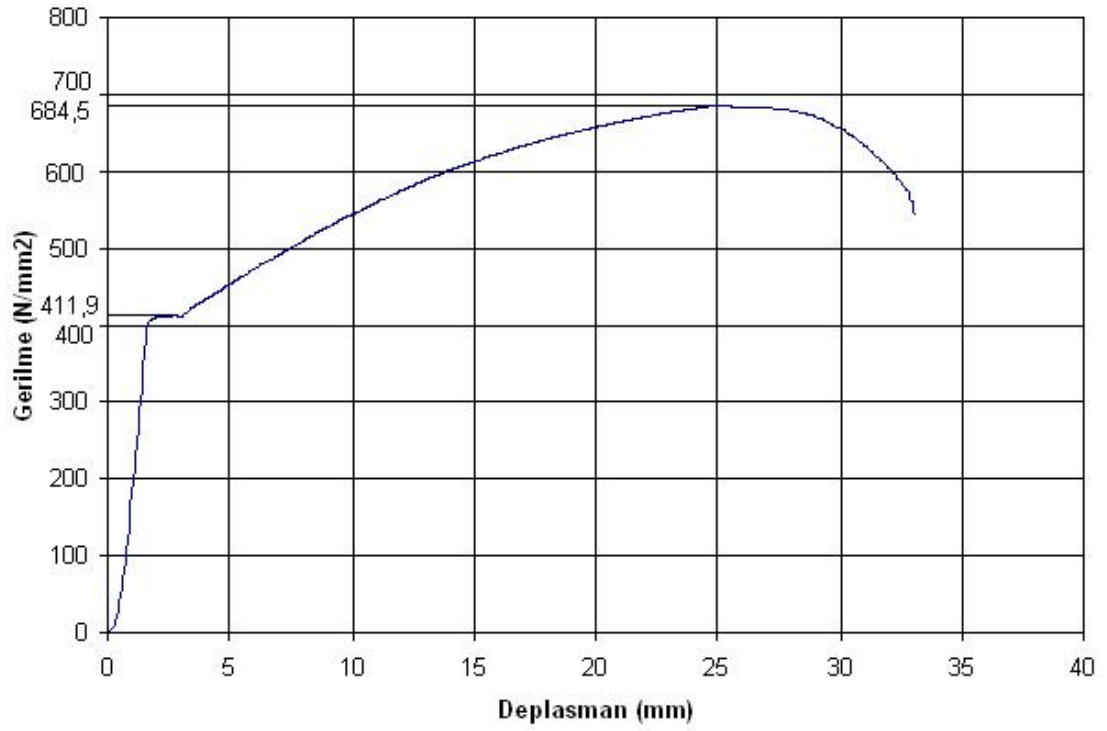
EK-1

DONATI GERİLME-BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME GRAFİKLERİ

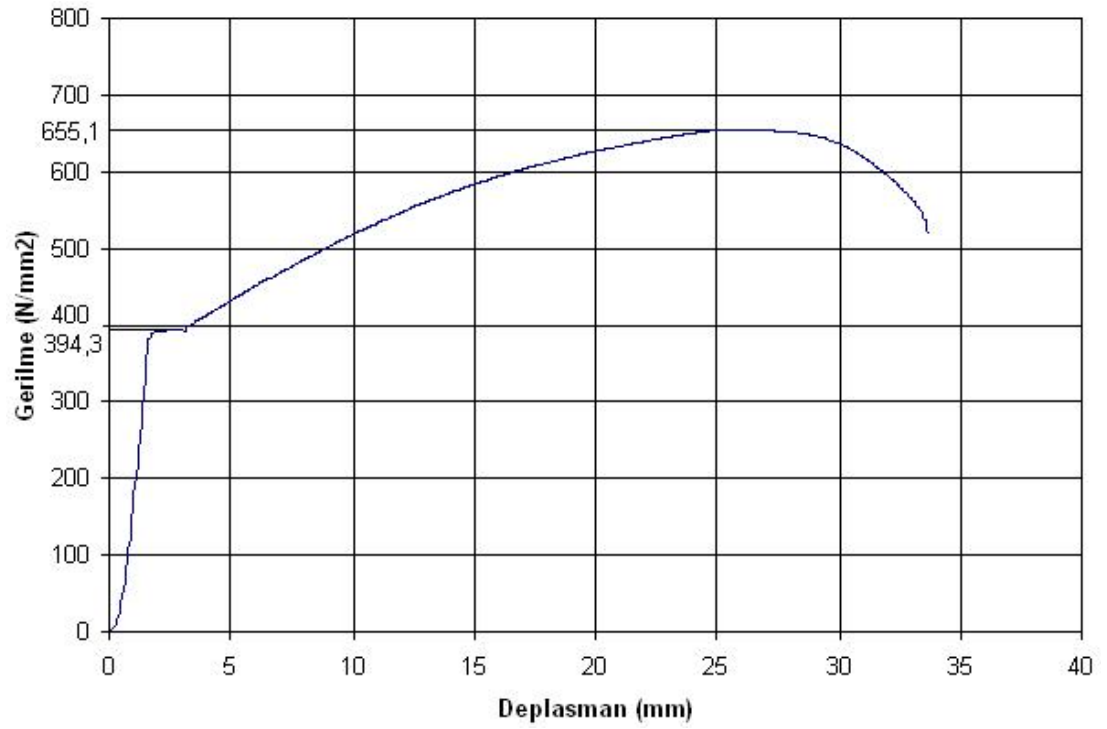
Deneyisel çalışmada kullanılan donatıların testleri Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi bilgisayar kontrollü DARTEC marka bir eksenel çekme aleti tarafından gerçekleştirilmiştir (Resim Ek-1). Gerçekleştirilen testlerde $\Phi 20$ ve $\Phi 10$ mm'lik nervürlü, $\Phi 6$ mm'lik düz donatılardan alınan numuneler test edilmiştir. Her bir donatı türü için üçer numune test edilmiştir. Donatıların çekme deneyi sonucunda elde edilen bilgisayar çıktıları Şekil A.1- A.9'da sunulmuştur.



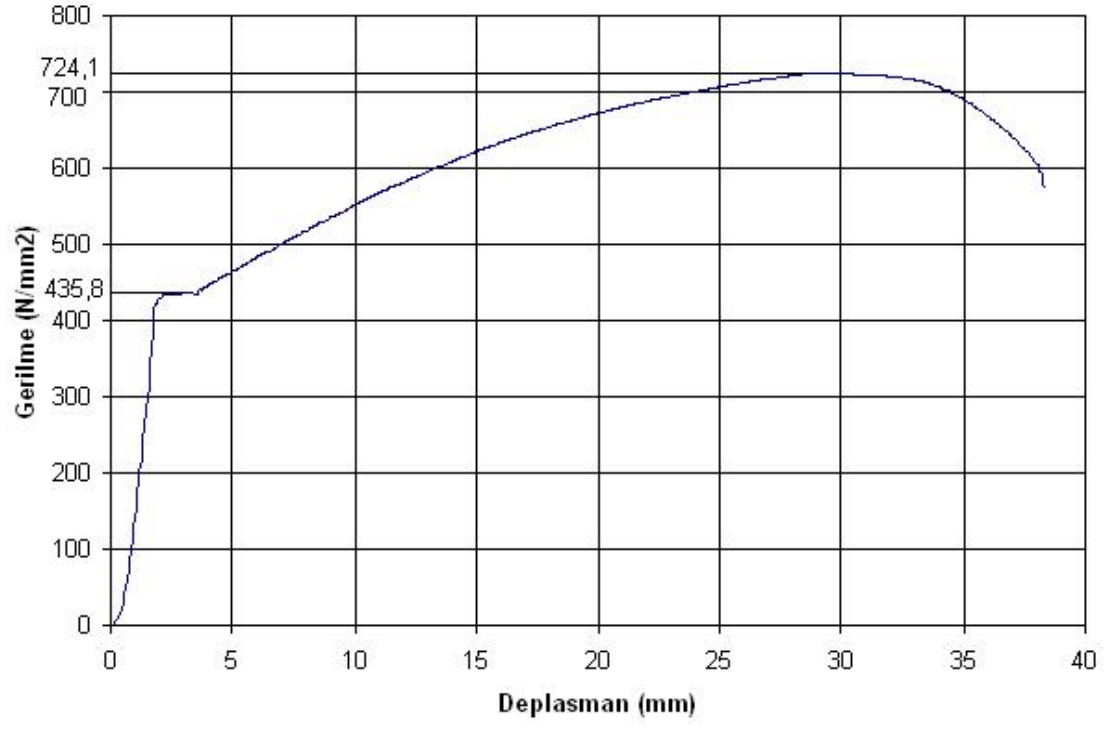
Resim Ek-1 Çekme deneyinde kullanılan deney düzeneği



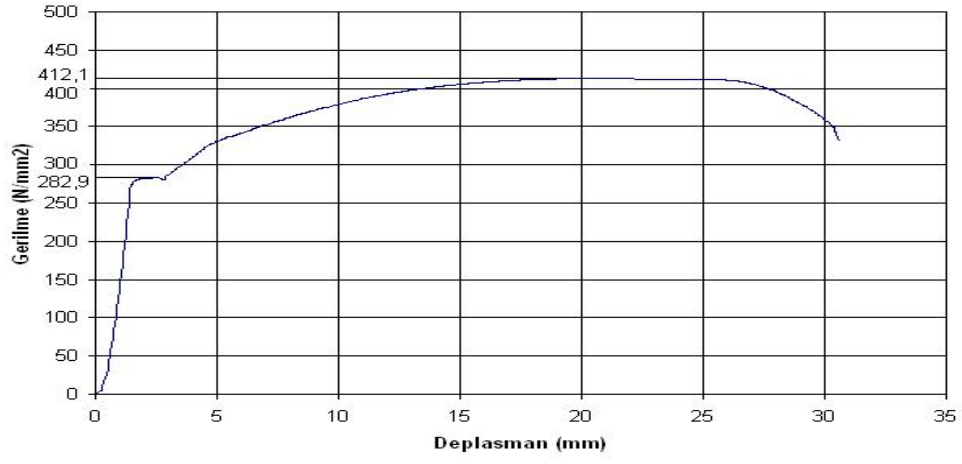
Şekil A.1. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ20)



Şekil A.2. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ20)



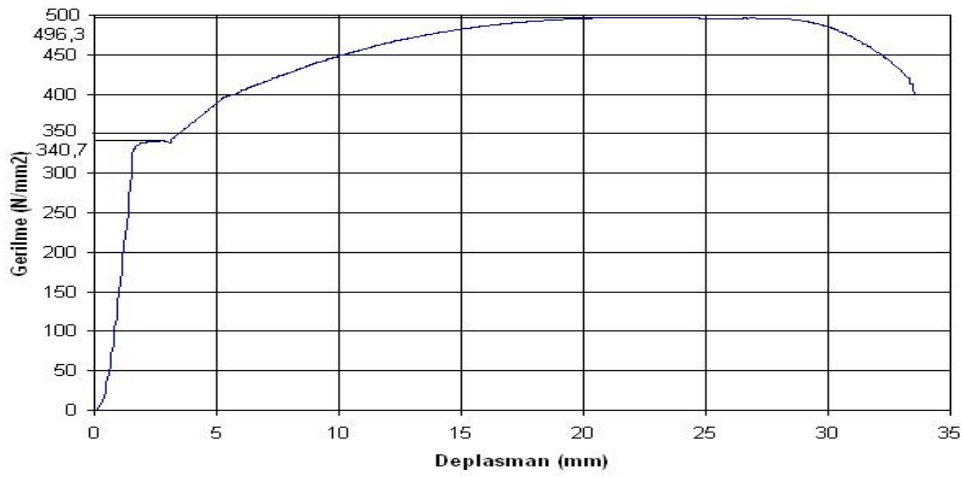
Şekil A.3. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ20)



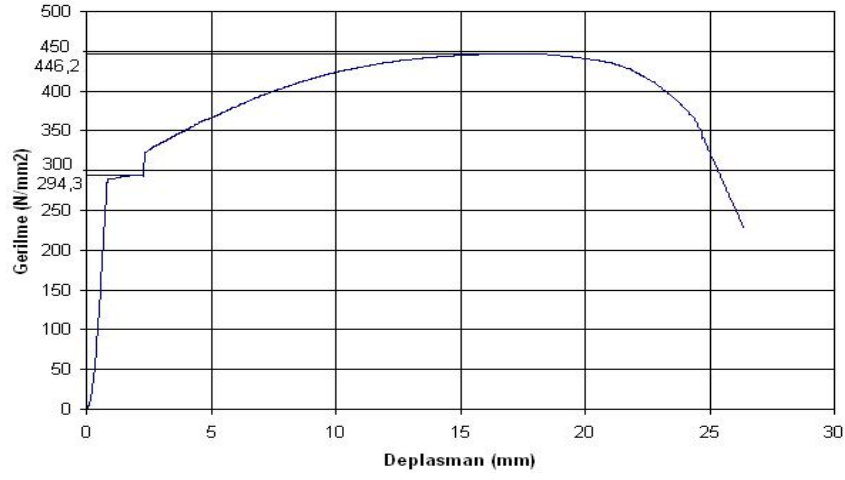
Şekil A.4. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ10)



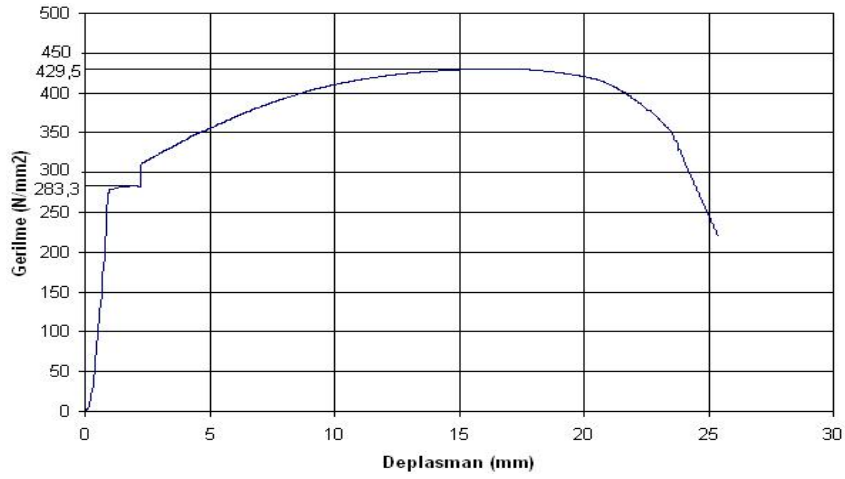
Şekil A.5. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ10)



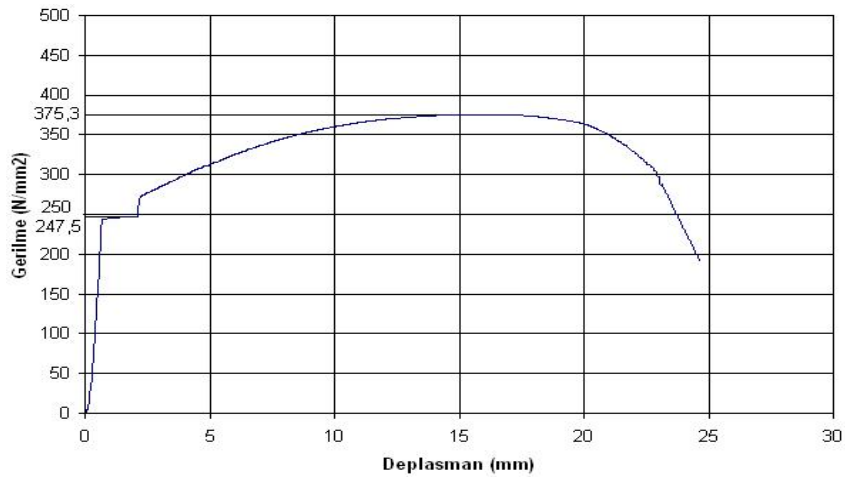
Şekil A.6. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ10)



Şekil A.7. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ6)



Şekil A.8. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ6)



Şekil A.9. Çekme Deneyi Sonuçları (Φ6)

ÖZGEÇMİŞ

14.01.1981 yılında Ankara doğdu. 1999 yılında Yenimahalle Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'nü bitirdi. İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında mezun oldu. Eylül 2005 tarihinden beri DSI Genel Müdürlüğü Proje ve İnşaat Dairesinde Başkanlığının Sulama ve Drenaj Şube Müdürlüğü'nde çalışmaktadır.