



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



# GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Eşref TÜRK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir  
2019



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞ-KOLON  
BİRLEŞİMLERİNİN MEKANİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Eşref TÜRK

Danışman: Doç. Dr. Ninel ALVER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2019



Eşref TÜRK tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 20.05.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**Jüri Başkanı**

**: Doç. Dr. Ninel ALVER**

**Raportör Üye**

**: Doç. Dr. Emre ERCAN**

**Üye**

**: Doç. Dr. Hasan Murat TANARSLAN**

**İmza**





## EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, döküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

20/ 05/ 2019

Eşref TÜRK





## ÖZET

# GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

TÜRK, Eşref

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ninel ALVER

Mayıs 2019, 167 sayfa

Bu tezde, yapısal elemanlara CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) güçlendirmesi, çelik ceket ile güçlendirme ve içten ankraj ile çelik çubuk ilave edilmesi gibi çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanarak, güçlendirilmiş kiriş kolon birleşimlerinin mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında, 1/1 geometrik ölçekli 10 adet betonarme deney elemanı üretilerek tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Deney çalışmasında, 2 adet referans eleman, 4 adet CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanı, 2 adet içten çubuk ankre edilerek donatılandırılmış deney elemanı ve 1 adet çelik ceket ile güçlendirilmiş deney elemanı olmak üzere toplamda 9 adet deney elemanı test edilmiştir. Elemanlardaki davranış farklılıklarını belirlemek için deplasman, yük ve birim deformasyon ölçümleri alınmış, bu verilerden faydalanılarak rijitlik, enerji tüketimleri, dayanım ve davranışın yanında yük-birim deformasyon ilişkileri de değerlendirilmiştir. Mekanik sonuçlar karşılaştırılarak deney elemanlarının göçme nedeni ortaya çıkarılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar, güçlendirme şekillerinin betonarme kiriş-kolon birleşim bölgesi davranışlarını değiştirdiğini göstermiştir.

**Anahtar sözcükler:** Güçlendirme, kiriş-kolon birleşimi, CFRP, çelik ceket, çelik çubuk ankraji.



## ABSTRACT

# INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN JOINTS

TÜRK, Eşref

MSc in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ninel ALVER

May 2019, 167 pages

In this thesis, it is aimed to investigate the mechanical behavior of reinforced beam-column joints by applying various strengthening methods such as strengthening with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) sheets, steel jacket and adding steel bar as an internal anchorage.

Within the scope of the study, 10 reinforced concrete test specimens with 1/1 geometric scale were produced and tested under cyclic loading. A total of 9 test specimens were tested in the laboratory, including 2 reference elements, 4 CFRP-strengthened test elements, 2 internally bar-anchored test elements and 1 steel jacketed test element. Displacement, load and strain measurements were taken in order to determine the behavioral differences in the elements, and stiffness, energy dissipation, strength and load-deformation relationships were evaluated. The mechanical results were compared and the reason for the failure of the experimental elements was revealed.

The results obtained from the experiments showed that the strengthening types changed the mechanical behavior of the reinforced concrete beam-column joint.

**Keywords:** Strengthening, beam-column joint, CFRP, steel jacket, steel bar anchorage.



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, betonarme çerçeve elemanlarda oldukça önem arz eden ve deprem yükleri altında büyük kuvvetlere maruz kalan kiriş-kolon birleşim bölgelerinin güçlendirilmesi ve güçlendirilen birleşimlerin incelenmesi ele alınmıştır. Yapı davranışını önemli derecede etkileyen birleşim bölgelerinde, özellikle büyük depremlerde kesme etkileri yoğunlaşmaktadır. Kesmeye karşı güçsüz bir birleşim, düğüm noktasının ve bazen de bütün yapının ani olarak göçmesine sebep olmaktadır. Bu sebepten ötürü, depreme dayanıklı yapı tasarımında, kesme etkilerine karşı güçsüz birleşimlerin güçlendirilmesi önemlidir. Kesmeye karşı güçsüz birleşim bölgelerini iyileştirmek için çeşitli güçlendirme yöntemlerine başvurulmuştur. Beton mantolama, bulonlu çelik levha ile güçlendirme, oluklu çelik saclarla güçlendirme, dış yüzeyden güçlendirme ve FRP ile sarmalama gibi çeşitli güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir ve konuyla ilgili yapılmış olan çalışmalardan elde edilen sonuçlar güçlendirmenin birleşimin sünekliğini, yük ve enerji tüketim kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında, birleşim bölgesi güçsüz deney elemanlarına CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) güçlendirmesi, çelik ceket ile güçlendirme ve içten ankraj ile çubuk ilave edilmesi gibi çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanarak, birleşim bölgesinin kesmeye karşı olan yetersizliğinin önüne geçilerek farklı güçlendirme yöntemlerinin sonuçlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen veriler, güçlendirilmiş elemanlarda iyileşme olduğunu göstermiş ve istenilen sonuca ulaşılmıştır.

İZMİR

20/ 05/ 2019

Eşref TÜRK



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÖNSÖZ .....	xi
İÇİNDEKİLER .....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
TABLolar DİZİNİ .....	xxvii
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1 Güçlendirme Yöntemleri.....	3
2.1.1 Çelik Ankrajlarla Güçlendirme .....	3
2.1.2 Çelik Ceket Takviyelerle Güçlendirme .....	3
2.1.3 Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP) ile Güçlendirme .....	5
2.2 Tez Konusu ile İlgili Önceki Çalışmalar .....	5
3. GEREÇ VE YÖNTEM .....	19
3.1 Deney Elemanları.....	19
3.2 Malzemeler.....	27
3.2.1 Donatı.....	27

3.2.2 Beton .....	27
3.2.3 CFRP .....	28
3.2.4 Epoksi.....	29
3.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	30
3.4 Deney Düzeneği .....	34
3.4.1 Veri Toplama Sistemi.....	37
3.4.2 Potansiyometrik Cetveller ve Yerleşimi .....	38
3.4.3 Birim Deformasyon Ölçerler ve Yerleşimleri.....	39
3.4.4 Birleşim Bölgesi Kesme Deformasyonlarının Hesabı.....	44
4. BULGULAR .....	45
4.1 Deney Elemanı-1 .....	45
4.2 Deney Elemanı-2.....	56
4.3 Deney Elemanı-3.....	68
4.4 Deney Elemanı-4.....	83
4.5 Deney Elemanı-5.....	93
4.6 Deney Elemanı-6.....	103
4.7 Deney Elemanı-7.....	114
4.8 Deney Elemanı-8.....	127
4.9 Deney Elemanı-9.....	138



5. TARTIŞMA .....	149
5.1 Deney Sonuçlarının Dayanım, Davranış, Enerji Tüketimi, Rijitlik Açısından Değerlendirilmesi.....	149
5.1.1 Dayanım ve Davranış.....	149
5.1.2 Enerji Tüketimi .....	153
5.1.3 Rijitlik .....	155
5.1.4 Kesme kuvveti-kesme deformasyonu ilişkisi .....	156
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	159
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	161
TEŞEKKÜR.....	165
ÖZGEÇMİŞ .....	168



**ŞEKİLLER DİZİNİ**ŞekilSayfa

Şekil 3.1.Referans-1 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları .....	21
Şekil 3.2.Referans-2 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları .....	22
Şekil 3.3.Deney Elemanı-3'e ait güçlendirme detayı .....	22
Şekil 3.4.Deney Elemanı-4'e ait güçlendirme detayı .....	23
Şekil 3.5.Deney Elemanı-5'e ait güçlendirme detayı .....	24
Şekil 3.6.Deney Elemanı-6'ya ait güçlendirme detayı .....	24
Şekil 3.7.Deney Elemanı-7'ye ait güçlendirme detayı .....	25
Şekil 3.8.Deney Elemanı-8'e ait güçlendirme detayı .....	26
Şekil 3.9.Deney Elemanı-9'a ait güçlendirme detayı .....	26
Şekil 3.10.MasterBrace SAT 4500 (Epoksi) .....	29
Şekil 3.11.Donatı ve kalıpların hazırlanması.....	31
Şekil 3.12.Birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılacağı bölgeye zımpara uygulanması.....	32
Şekil 3.13.Birim deformasyon ölçerlerin yerleştirilmesi.....	32
Şekil 3.14.Standart küp numunesi alımı .....	33
Şekil 3.15.Beton dökümü .....	34
Şekil 3.16.Deney düzeneği (yükleme çerçevesi).....	34

Şekil 3.17.Deney elemanlarına ait yükleme düzeneği .....	35
Şekil 3.18.Yatay pistonlar .....	36
Şekil 3.19.(a) Hidrolik güç ünitesi (b) hız kontrol ünitesi .....	36
Şekil 3.20.Veritoplama sistemi (a) ön panel görünümü ve (b) arka panel görünümü .....	37
Şekil 3.21.Veritoplama yazılımı .....	37
Şekil 3.22.Potansiyometrik Cetveller ve Yerleşimi .....	38
Şekil 3.23.Deney Elemanı-1, 2'de donatı birim deformasyon ölçer yerleşim detayı .....	40
Şekil 3.24.Deney Elemanı-3'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı.....	40
Şekil 3.25.Deney Elemanı-4'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı.....	41
Şekil 3.26.Deney Elemanı-5 ve 6'da donatı ve çapraz güçlendirme birim deformasyon ölçer yerleşim detayı .....	42
Şekil 3.27.Deney Elemanı-7'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı.....	42
Şekil 3.28.Deney Elemanı-8'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı.....	43
Şekil 3.29.Deney Elemanı-9'da donatı birim deformasyon ölçer yerleşim detayı.....	44
Şekil 4.1.Deney Elemanı-1 (a) donatı detayı (b) fotoğraf görünümü .....	46
Şekil 4.2.Deney Elemanı-1'e uygulanan yük-çevrim grafiği .....	46
Şekil 4.3.(a) ilk eğilme çatlak (b) eğilme çatlakının kiriş ön yüzde ilerlemesi ....	48

Şekil 4.4.Arka yüz çatlak durumu .....	49
Şekil 4.5.(a) ön düğüm ve (b) arka düğüm diyagonal çatlak oluşumu .....	50
Şekil 4.6.Diyagonal çatlağın yataylaşması .....	51
Şekil 4.7.Eğilme çatlağı görünümü .....	52
Şekil 4.8.Diyagonal çatlak görünümü .....	52
Şekil 4.9.Düğüm noktası mevcut çatlak görünümü.....	53
Şekil 4.10.(a) Ön ve (b) arka düğüm noktası görünümü .....	54
Şekil 4.11.Yük-tepe deplasman grafiğı .....	55
Şekil 4.12.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	55
Şekil 4.13.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	56
Şekil 4.14.Yük-kesme deformasyonu grafiğı .....	56
Şekil 4.15.Deney Elemanı-2 (a) donatı detayı (b) fotoğraf görünümü.....	57
Şekil 4.16.Deney Elemanı-2'ye uygulanan yük-çevrim grafiğı .....	58
Şekil 4.17.İlk eğilme çatlakları oluşumu .....	59
Şekil 4.18.Düğüm noktası ön yüzdeki ilk diyagonal çatlak ve eğilme çatlağı .....	60
Şekil 4.19.Düşey çatlak görünümü .....	61
Şekil 4.20.Arka yüz diyagonal ve eğilme çatlakları görünümü.....	62
Şekil 4.21.Eğilme çatlakları görünümü .....	62
Şekil 4.22.Kolon alt yüz eğilme çatlağı görünümü .....	63

Şekil 4.23.Yüklemeye sonrası nihai durum düğüm noktası (a) ön ve (b) arka genel görünümü .....	66
Şekil 4.24.Yük-tepe deplasman grafiği.....	66
Şekil 4.25.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	67
Şekil 4.26.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	77
Şekil 4.27.Yük-kesme deformasyonu grafiği .....	68
Şekil 4.28.Deney Elemanı-3 yüklemeye öncesi görünümü.....	68
Şekil 4.29.Deney Elemanı-3'e uygulanan yük-çevrim grafiği .....	69
Şekil 4.30.İlk eğilme çatlakları görünümü .....	70
Şekil 4.31.(a) Eğilme çatlakları görünümü ve (b) eğilme çatlaklarının kiriş arka yüzündeki ilerlemesi .....	71
Şekil 4.32.Eğilme çatlakları ilerlemesi .....	72
Şekil 4.33.CFRP ayrışma görünümü.....	73
Şekil 4.34.Ön yüz düğüm noktası genel görünümü.....	74
Şekil 4.35.CFRP'nin ayrışması.....	75
Şekil 4.36.CFRP bitiminde eğilme çatlakları oluşumu .....	76
Şekil 4.37.Arka yüz CFRP ayrışması .....	77
Şekil 4.38.Düğüm noktası ön yüz hasar durumu .....	78
Şekil 4.39.Düğüm noktası arka yüz hasar durumu .....	78
Şekil 4.40.Kiriş sol yüz eğilme çatlakları .....	79

Şekil 4.41.Yük-tepe deplasman grafiği .....	79
Şekil 4.42.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	80
Şekil 4.43.7 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	80
Şekil 4.44.Ön düşey sol CFRP birim deformasyon ölçer.....	81
Şekil 4.45.Ön düşey sağ CFRP birim deformasyon ölçer .....	81
Şekil 4.46.Ön çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer .....	81
Şekil 4.47.Ön çapraz (alt sağdan üst sola) CFRP birim deformasyon ölçer .....	82
Şekil 4.48.Arka çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer .....	82
Şekil 4.49.Yük-kesme deformasyonu grafiği .....	83
Şekil 4.50.Deney Elemanı-4 genel görünümü.....	83
Şekil 4.51.Deney Elemanı-4'e uygulanan yük-çevrim grafiği .....	84
Şekil 4.52.Eğilme çatlaklarının kiriş ön yüzünde ilerlemesi .....	85
Şekil 4.53.Eğilme çatlaklarının kiriş arka yüzünde ilerlemesi .....	85
Şekil 4.54.Diyagonal çatlak görünümü .....	86
Şekil 4.55.Diyagonal çatlak görünümü .....	87
Şekil 4.56.Deney Elemanı-4 hasar durumu .....	88
Şekil 4.57.(a) ön ve (b) arka yüz düğüm noktaları hasar durumu .....	89
Şekil 4.58.Yük-tepe deplasman grafiği .....	90
Şekil 4.59.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	90

Şekil 4.60.7 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	91
Şekil 4.61.Ön çapraz (alt sağdan üst sola) CFRP birim deformasyon ölçer.....	91
Şekil 4.62.Ön çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer.....	92
Şekil 4.63.Arka çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer.....	92
Şekil 4.64.Arka çapraz (üst soldan alt sağa) CFRP birim deformasyon ölçer.....	92
Şekil 4.65.Yük-kesme deformasyonu grafiği .....	93
Şekil 4.66.Deney Elemanı-5 genel görünümü .....	93
Şekil 4.67.Deney Elemanı-5'e uygulanan yük-çevrim grafiği .....	94
Şekil 4.68.(a) İlk eğilme ve (b) kiriş yüzeyi eğilme çatlakları.....	95
Şekil 4.69.Diyagonal çatlak oluşumu .....	96
Şekil 4.70.Arka düğüm diyagonal çatlak görünümü.....	97
Şekil 4.71.Kolon alt yüz eğilme çatlakları görünümü.....	97
Şekil 4.72.Birleşim noktası çatlak görünümü .....	98
Şekil 4.73.Arka düğüm diyagonal çatlak görünümü.....	99
Şekil 4.74.Deney Elemanı-5 genel hasar görünümü.....	100
Şekil 4.75.(a) ön ve (b) arka düğüm noktası hasar durumu .....	101
Şekil 4.76.Yük-tepe deplasman grafiği.....	101
Şekil 4.77.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	102
Şekil 4.78.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	102



Şekil 4.79.3 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	102
Şekil 4.80.4 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	103
Şekil 4.81.Yük-kesme deformasyonu grafiği.....	103
Şekil 4.82.Deney Elemanı-6 yükleme öncesi genel görünümü.....	104
Şekil 4.83.Deney Elemanı-6'ya uygulanan yük-çevrim grafiği.....	104
Şekil 4.84.Arka yüzeyde diyagonal çatlak görünümü.....	105
Şekil 4.85.(a) Çatlak büyümesi ve (b) ilk eğilme çatlağı.....	106
Şekil 4.86.Eğilme çatlağı görünümü.....	107
Şekil 4.87. Diyagonal çatlakların genişlemesi.....	108
Şekil 4.88.Ön yüz birleşim noktasından kolon alt yüzüne ulaşan çatlaklar.....	109
Şekil 4.89.Kolon alt yüzeyindeki çatlaklar.....	109
Şekil 4.90.Çatlakların açılması.....	110
Şekil 4.91.Yükleme sonrası nihai durum çatlak görünümleri.....	111
Şekil 4.92.Yük-tepe deplasman grafiği.....	112
Şekil 4.93.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	112
Şekil 4.94.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	113
Şekil 4.95.3 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	113
Şekil 4.96.Yük-kesme deformasyonu grafiği.....	114
Şekil 4.97.Deney Elemanı-7 yükleme öncesi genel görünümü.....	114

Şekil 4.98.Deney Elemanı-7'ye uygulanan yük-çevrim grafiği .....	115
Şekil 4.99.İlk eğilme çatlakları .....	116
Şekil 4.100.Kiriş sol yüzeyindeki eğilme çatlakları.....	117
Şekil 4.101.Kiriş sağ yüzeyindeki eğilme çatlakları .....	117
Şekil 4.102.Ön yüz CFRP görünümü.....	118
Şekil 4.103.Yeni oluşan eğilme çatlakları .....	119
Şekil 4.104.CFRP-epoksi ayrışması.....	120
Şekil 4.105.Kolonun yaptığı sehim.....	121
Şekil 4.106.Düğüm noktası CFRP kopmaları (a) ön ve (b) arka görünüş .....	122
Şekil 4.107.Düğüm noktası arka yüzü .....	122
Şekil 4.108.Düğüm noktası ön yüzü .....	123
Şekil 4.109.Düğüm noktası arka yüzü .....	123
Şekil 4.110.Yük-tepe deplasman grafiği.....	124
Şekil 4.111.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer.....	124
Şekil 4.112.Ön düşey sol CFRP birim deformasyon ölçer .....	125
Şekil 4.113.Ön düşey sağ CFRP birim deformasyon ölçer .....	125
Şekil 4.114.Arka düşey sağ CFRP birim deformasyon ölçer .....	126
Şekil 4.115.Arka düşey sol CFRP birim deformasyon ölçer .....	126
Şekil 4.116.Ön yüz yatay CFRP birim deformasyon ölçer.....	126

Şekil 4.117.Yük-kesme deformasyonu grafiği .....	127
Şekil 4.118.Deney Elemanı-8 genel görünümü .....	128
Şekil 4.119.Deney Elemanı-8'e uygulanan yük-çevrim grafiği .....	128
Şekil 4.120.İlk diyagonal çatlak .....	129
Şekil 4.121.(a) eğilme çatlak ve (b) diyagonal çatlak görünümü .....	130
Şekil 4.122.Kolon pas payına doğru ilerleyen diyagonal çatlak görünümü .....	131
Şekil 4.123.Kolon alt yüz eğilme çatlakı.....	132
Şekil 4.124.CFRP-beton ayrışması.....	133
Şekil 4.125.Ön yüz genel görünümü .....	134
Şekil 4.126.(a) ön ve (b) arka yüz düğüm noktaları hasar durumu .....	135
Şekil 4.127.Yük-tepe deplasman grafiği .....	135
Şekil 4.128.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer .....	136
Şekil 4.129.Ön düşey sol (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer .....	136
Şekil 4.130.Ön düşey sağ (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer .....	137
Şekil 4.131.Arka düşey sağ (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer .....	137
Şekil 4.132.Arka düşey sol (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer .....	137
Şekil 4.133.Ön yüz (kiriş) CFRP birim deformasyon ölçer .....	138
Şekil 4.134.Yük-kesme deformasyonu grafiği .....	138
Şekil 4.135.Deney Elemanı-9 genel görünümü .....	139

Şekil 4.136.Kesme kuvveti çevrim grafiği, Deney Elemanı-9 .....	139
Şekil 4.137.Arka yüzeyde diyagonal çatlak oluşumu .....	140
Şekil 4.138.Arka yüz 12 cm'deki eğilme çatlak görünümü.....	141
Şekil 4.139.(a) Ön yüz 40 cm'deki eğilme çatlak ve (b) arka yüz diyagonal çatlak .....	142
Şekil 4.140.Plaka üzerindeki çatlak .....	144
Şekil 4.141.Ön yüz genel görünümü.....	146
Şekil 4.142.Düğüm noktası ön yüz hasar durumu .....	146
Şekil 4.143.Düğüm noktası arka yüz hasar durumu .....	147
Şekil 4.144.Yük-tepe deplasman grafiği.....	147
Şekil 4.145.Birim Deformasyon Ölçer .....	148
Şekil 4.146.Yük-kesme deformasyonu grafiği .....	148
Şekil 5.1.Referans-2 ve CFRP ile güçlendirilen deney elemanlarına ait yük-deplasman zarf eğrileri.....	151
Şekil 5.2.Referans-2 ile çelik ankraj ve çelik ceket ile güçlendirilen deney elemanlarına ait yük-deplasman zarf eğrileri.....	152
Şekil 5.3.Deney elemanlarının yük-deplasman zarf eğrileri.....	152
Şekil 5.4.Deney elemanlarının karşılaştırmalı maksimum kesme kuvveti-kesme deformasyonu ilişkisi .....	157

**TABLolar DİZİNİ**TabloSayfa

Tablo 3.1.Deney Elemanları ve Güçlendirme Özellikleri .....	20
Tablo 3.2.Kullanılan donatıların özellikleri .....	27
Tablo 3.3.Deney elemanlarında kullanılan beton karışım oranı.....	28
Tablo 3.4.Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan CFRP malzemenin mekanik özellikleri .....	29
Tablo 3.5.Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan epoksi malzemesinin teknik özellikleri.....	30
Tablo 3.6.Epoksi karışım oranları .....	30
Tablo 5.1.Deney sonuçlarının özeti (Dayanım ve Deplasman).....	150
Tablo 5.2.Deney elemanlarının birikimli enerji tüketimleri.....	154
Tablo 5.3.Deney elemanlarının rijitlik değerleri .....	155



## 1. GİRİŞ

Betonarme çerçeve elemanlarda kiriş-kolon birleşimi oldukça önem teşkil eden bir bölgedir. Deprem yükleri altında büyük kuvvetlere maruz kalmakta ve bu da yapı davranışını etkilemektedir. Özellikle büyük depremlerde birleşim bölgesinde moment ve kesme etkileri yoğunlaşmakta, bu kuvvetlere karşı güçsüz bir birleşim, düğüm noktasının ve bazen de bütün yapının ani olarak göçmesine sebep olmaktadır. 1999'da Türkiye'nin Kocaeli kentinde meydana gelen depremde yıkılan yapılar bu tip göçmelere en iyi örnektir. Bu sebeple, depreme dayanıklı yapı tasarımında, kesmeye karşı güçsüz birleşimlerin güçlendirilmesi önemlidir. Günümüzde birçok mühendis ve araştırmacı bu problemle başa çıkmak için çeşitli yollar aramaktadırlar. Bunun için beton mantolama, bulonlu çelik levha ile güçlendirme, oluklu çelik saclarla güçlendirme, dış yüzeyden güçlendirme ve FRP (Fiber Takviyeli Polimer) ile sargı gibi çeşitli güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir ve konuyla ilgili yapılmış olan çalışmalardan elde edilen sonuçlar güçlendirmenin birleşimin sünekliliğini, yük ve enerji tüketim kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir.

Bu çalışmada kesme donatısı yetersiz düğüm noktalarından oluşan betonarme deney numuneleri ayrı ayrı karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), çelik ankrajlar ve çelik ceket takviyelerle güçlendirilmiştir. Güçlendirilen numunelerin donatı detayları ve boyutları aynıdır. Bu da çeşitli güçlendirme tekniklerini birbirleriyle ve referans deney elemanları ile karşılaştırma imkanı tanımaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında konuyla ilgili olan literatür çalışmaları incelenmiştir. Yapılan bu incelemeler sonucu, farklı güçlendirme yöntemleri ile güçlendirilen kiriş-kolon birleşim noktalarının farklı davranışlar sergileyebileceği öngörülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşaması ise deneysel düzeneğin hazırlanmasıdır. Çalışma kapsamında, 2 adet referans eleman, 4 adet CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı, 2 adet içten çelik çubuk ankre edilerek güçlendirilmiş deney elemanı ve 1 adet çelik ceket ile güçlendirilmiş deney elemanı olmak üzere toplamda 9 adet deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanlarının tümü 1/1 geometrik ölçeklidir. Güçlendirilmiş deney elemanları, 2 numaralı referans deney elemanı ile aynı donatı düzenine sahiptir. Deney elemanları tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Her bir deney elemanında 6 adet deplasman ölçer ve değişen sayıda gerinim ölçerler kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, farklı güçlendirme

tekniklerinin numunelerin dayanım ve davranışına olumlu olarak katkı sağladığı fakat katkı seviyesinin güçlendirme çeşidine göre farklılık gösterdiği görülmüştür.





## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1 Güçlendirme Yöntemleri**

Güçlendirme, bir yapının veya yapı elemanlarının statik ve dinamik yükler karşısında kendilerinden beklenen performans seviyelerini sağlayabilmesi için yapılan iyileştirme müdahalelerini ifade etmektedir.

Güçlendirme ihtiyacı, mevcut yapıların hasar görmüş kısımlarında, donatı yetersizliği, beton dayanımının düşüklüğü, yetersiz yanal rijitlik ve yürürlükteki yönetmelik koşullarının sağlanamadığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda yapıyı daha güvenli hale getirmek için çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanır.

#### **2.1.1 Çelik Ankrajlarla Güçlendirme**

Güçlendirmedeki amaç yanal yüklemelerde en çok hasar gören betonarme yapıların kiriş-kolon birleşim bölgelerine kesme donatısı niteliğinde çelik donatı ankrajları yerleştirerek, birleşimin bölgelerinin güçlendirilmesini sağlayan pratik bir teknik geliştirmektir. Birleşim bölgelerindeki enine donatı eksikliği sonucu ortaya çıkan yetersiz taşıma kapasitesi sebebiyle kullanılan güçlendirme yöntemidir. Yöntemin uygulanmasıyla kiriş-kolon birleşim bölgelerinin kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım elde edilecek, kirişte boyunca mafsallı oluşması sağlanacak ve sünek bir davranış elde edilmiş olacaktır.

Bu yöntem ile birleşim bölgesi, içten veya dıştan çelik ankrajlarla güçlendirilir. İçten çelik ankraj uygulaması ile birleşim bölgesinin içinde delikler açılarak epoksi yardımıyla ankrajlar yerleştirilir. Dıştan çelik ankraj uygulamasında ise, çelik ankrajlar birleşim bölgesinin yüzeyinde bulonlarla ankrajlanır.

#### **2.1.2 Çelik Ceket Takviyelerle Güçlendirme**

Taşıma kapasitesi bakımından zayıf kiriş-kolon birleşimlerinde kesme dayanımı ve sünekliğin artırılmasında başvurulan güçlendirme yöntemlerinden biridir. Birleşim bölgelerine çelik ceket takviyelerin eklenmesi, yapının ağırlığında hafif bir artış eklerken sertliği artıracak, süneklik ihtiyacını azaltacak ve sistemin kayma dayanımını artıracaktır.

Çelik ceket takviyelerle güçlendirme ile kiriş, kolon vb. gibi beton elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılabilir veya güçlendirme yapımında genel bir yöntem olarak kullanılabilir. Çelik ceket, yapı yükseltmelerinde, dayanım ve yapısal sağlamlığı artırırken, bina ağırlıkları üzerinde önemli bir etkisi olmayan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, kiriş ve kolon bölümleri, çelik levhalar kullanılarak hassas konumlarında güçlendirilir.

Güçlendirme yöntemi kapsamında çelik levha, köşebent ve gergi çubukları kullanılmaktadır. Güçlendirme işlemi sırasında, birleşim bölgesinin etrafına çelik levhalar ve köşebentler yerleştirilerek gergi çubukları ile bağlanmaktadır.

### **Çelik ceket takviyelerle güçlendirmenin avantajları**

- İstenilen elemanı güçlendirmek için gereken kuvvetlerde güçlü artış
- Bu yöntemin uygulanması binanın her bölümünde ve katında mümkündür ve istenen elemanın temelden istenen kata kadar güçlendirilmesi gerekli değildir.
- Güçlendirme sonrası elemanın boyutunda bir değişiklik olmadığından, mimarlık için gerekli aralık ve mekanlarda değişiklik olmaması
- Beton bir ceket ile güçlendirme ile ilgili yaklaşık uygulama kolaylığı

### **Çelik ceket takviyelerle güçlendirmenin dezavantajları**

- Önemli yapılarda yangın geciktirici kaplamalara olan ihtiyaç
- Eğilme ve kayma dayanımı arttırılacaksa, yürütme süresi ve çoklu donatı ve kaynak işlemleri gerekir.
- Yüksek maliyet
- Çerçevelerdeki bağlantılar değiştirilememesi
- Çelikte olası korozyon ve paslanma
- Sıkıştırma yükleri nedeniyle çeliğin bükülme eğilimi ve olasılığı

### 2.1.3 Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP) ile Güçlendirme

Yüksek dayanımları sayesinde son yıllarda inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanan ve kısaca FRP (Fiber Reinforced Polymer) olarak ifade edilen fiber takviyeli polimerler, yeni nesil güçlendirme malzemesi olarak görülmektedir. FRP sistemleri; cam, aramid ve karbon gibi malzemelerden üretilen kompozit sistemlerdir.

CFRP, yüksek sıcaklıklarda üretilen karbonun çeşitli işlemlerden geçirilmesi ile elde edilen mikron kalınlıktaki liflerin reçinelerle birleşmesi sonucu oluşturulan fiber takviyeli polimerdir. Düşük öz ağırlık, yüksek dayanım ve dayanıklılık, hızlı ve kolay uygulanabilirliği en önemli avantajlarıdır.

CFRP, birleşim bölgelerine epoksi, poliester, poliüretan gibi yapıştırıcı maddeler ile yapıştırılır. Yapıştırma işlemi sırasında CFRP'ye özen gösterilmeli, yapışma yüzeyi ile CFRP toz ve nemden arındırılmış olmalıdır.

#### CFRP ile güçlendirmenin avantajları

- Düşük öz ağırlık
- Yüksek dayanım
- Aşındırma olmaması
- Çok yüksek gerilme mukavemeti
- Herhangi bir uzunlukta kullanılabilmesi
- Hızlı ve kolay uygulanabilirliği

### 2.2 Tez Konusu ile İlgili Önceki Çalışmalar

Tezle ilgili ilk aşamada kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Literatür çalışmasında öncelikle kiriş-kolon güçlendirmesinde farklı uygulamalar içeren CFRP şerit ve levhalar, çelik ceket ve ankrajlarla ilgili yayınlar incelenmiş, CFRP şerit ve levhaların betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin güçlendirilmesinde kullanımına yönelik çalışmalara çok sık rastlanıldığından bu yayınlara da oldukça yer verilmiştir.

Esmaeeli et al. (2017) çalışmalarında, iki benzer kiriş-kolon bağlantısı, herhangi bir enine donatı olmaksızın zayıf kiriş-güçlü kolon prensibine göre hazırlanmıştır. Bunlardan biri kontrol numunesi olarak kullanılırken; diğeri kiriş kolon bağlantısı kesme yetersizliğine sahip numunenin birleşim bölgesi ve birleşim çevresindeki bölgeye GFRP uygulanmış olup daha sonra bu kompozit tabakaların serbest kenarlarına metalik bir kafes ankre edilerek güçlendirilmiş numunedir. Kolona etkiyen sabit eksenel yük ile eşzamanlı olarak her iki numune de çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Her bir kiriş-kolon donatısına ve GFRP tabakasına gerinim ölçer bağlanmıştır. Önerilen güçlendirme tekniği ile çevrimsel yüklemeye tabi tutulan numunenin hem mukavemet hem de sismik özelliklerinde belirgin bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Süneklik, enerji yutma kapasitesi ve kesme kuvveti artışları ölçülen iyileştirmelerdir.

Campione et al. (2015)'nin deneysel ve teorik bir araştırma olan bu çalışmalarında, dış kiriş-kolon birleşimi çelik çitalarla oluşturulan çelik kafeslerle güçlendirilmiş ve kolon ile kiriş üzerine tersinir tekrarlı yük uygulamışlardır. Bunun için dış kiriş-kolon birleşimlerinin eğilme davranışını monoton yükleme altında analiz eden basitleştirilmiş bir analitik model önermişlerdir. (Model, kirişler ve kolonlar için kesme-moment etkileşimi ve dış çelik kafesler tarafından tetiklenen sınırlayıcı etkileri içermekte, kirişin ve kolonların elastik-plastik davranışının belirlenmesine dayanmaktadır.) Çalışma kapsamında altı adet 1/1 ölçekli kiriş-kolon birleşim bölgesi için numuneler hazırlanmış ve bunların beş tanesine güçlendirme için çelik kafesler ankre edilmiştir. Hazırlanan bu numuneler zayıf kolon güçlü kiriş prensibine göre dizayn edilmiştir. Amaç, çelik kafeslerle güçlendirilmiş harici birleşim bölgesinin eğilme davranışına olan etkisini incelemektir. Elde edilen sonuçlar ile, dış çelik kafes tekniğinin, sistemin mukavemetini ve sünekliğini iyileştirdiği ve önerilen analitik modelin de elde edilen deneysel sonuçlar ile uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Santarsiero and Masi (2015) çalışmalarında, hem mevcut elemanların performanslarını arttırmak hem de oluşabilecek hasarları ortadan kaldırmak veya azaltmak için DIS-CAM güçlendirme tekniğine başvurmuşlardır. Bu çalışmada 4 katlı betonarme çerçevesel bir binaya ait, hasar görmüş ve hasar görmemiş kiriş-kolon birleşimleri üzerinde DIS-CAM güçlendirme tekniği kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında 26 adet kiriş-kolon birleşimi sismik yüklemeye tabi tutulmuştur. Numuneler, kolona etki eden eksenel yük, sismik tasarım seviyesi ve kiriş tipi gibi çeşitli parametrelerin sismik davranış üzerindeki etkisini araştırmak için dizayn edilmiştir. DIS-CAM tekniğinde, betonarme elemanların köşelerinde

(kirişler ve kolonlar), önceden gerilmiş paslanmaz çelik şeritlerle sarılı 4 çelik L-profilinin (CLP, Köşe L-Profiller) uygulanmaktadır. DIS-CAM güçlendirme tekniği, kiriş-kolon birleşimlerinin mukavemetini ve sünekliğini arttırmak için kullanılmıştır. Mevcut yapılar göz önüne alındığında DIS-CAM, uygulanması kolay, oldukça ucuz ve basit bir güçlendirme tekniğidir. Bu tekniğin gerçek uygulamalarda kullanılabilmesi, yenilenmiş bağlantıların her bir elemanının tanımlanması için basit tasarım formülleri ve FE modelleri sağlanmalıdır.

Elsouri and Harajli (2015)'nin çalışmalarında, güçlendirme için fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin kullanımının geleneksel güçlendirme tekniklerine göre uygun bir alternatif çözüm olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada kiriş plastik menteşe mekanizması ve kiriş eğilme yetersizliği geliştiren üç adet depreme dayanıklı geniş kiriş-kolon birleşim numunesi (bir iç ve iki dış) onarılacak yapısal işlevlerini korumak için FRP ile güçlendirilmiştir. Bu güçlendirme tekniğinin, hasar görmüş birleşimleri servis koşullarına geri getirdiği ve bozulan bükülme sertliğini geri kazandırdığı görülmüştür. FRP eğilme takviyesi, eğilme çatlaklarının büyümesini sınırlamış, çevrimsel yüklemeye ilişkili beton hasarını azaltmış ve orijinal derzlerin yanal yüke karşı azalmış sertliğini geri kazandırmış, stabil histerezis tepkisi ve sismik kuvvetin kayda değer bir şekilde geri kazandırılmasına yardımcı olmuştur. Onarılmış ve güçlendirilmiş birleşimlerde, orijinal birleşimlere kıyasla rijitlik ve yanal yüke karşı geri kazanım artmıştır.

Singh et al. (2014) çalışmalarında, betonarme çerçeve yapılarda kiriş-kolon birleşimlerinin yanal yüklere maruz kalan en dayanıksız yapısal eleman olduğunu belirtmişlerdir. Mevcut yapısal elemanların güçlendirilmesi için çeşitli mantolama teknikleri kullanılması günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Bu güçlendirme tekniklerinden en çok tercih edileni ise FRP ile mantolama tekniğidir. Yapılan çalışmada 9 adet kiriş-kolon birleşimi hazırlanmış ve numunelerden 3 tanesi kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Numuneler, statik yük altında test edildikten sonra altı tanesinin üzerine epoksi reçine ile iki kat CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Güçlendirme yapıldıktan sonra numuneler statik ve sismik yükler altında test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda kullanılan güçlendirme tekniğinin kiriş-kolon birleşimlerinin nihai yük taşıma kapasitelerini, mukavemetini ve sünekliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanarak, CFRP'nin betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için uygun bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Li and Sanada (2014) çalışmalarında, geçmiş sismik tasarım modlarına göre projelendirilmiş çok sayıda yapının kiriş-kolon birleşimlerinde etriye kullanılmadığını belirtmişlerdir. Günümüz koşullarında ise bu tür yapıların kiriş-kolon birleşim bölgeleri için kesme takviyesinin sağlanmadığı durumlarda betonarme kanat duvarları sismik güçlendirme tekniği uygulanmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmada, Sumatra Depremi'nde çöken ve etriye bulunmayan üç katlı bir betonarme yapının dış kiriş-kolon birleşimini benzeştiren 3 adet  $\frac{3}{4}$  ölçekli kiriş-kolon birleşimleri hazırlanmıştır. Bunlardan ikisi; tek taraflı ve çift taraflı kanat duvarları ile güçlendirilirken, diğeri kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Numuneler yüklemeye tabi tutulduktan sonra kontrol numunesi birleşimleri daha düşük mukavemet, süneklik, gevrek ve kırılgan bir yapı gösterirken, güçlendirilmiş numunelerde yüksek mukavemet ve süneklik elde edilmiştir. Yapılan güçlendirme tekniği ile birleşimlerdeki hasarların etkin bir şekilde önlenildiği sonucuna varılmıştır.

Mısır and Kahraman (2013) yaptıkları çalışma kapsamında, mevcut yapıların sismik olarak yetersiz olan kiriş-kolon birleşimleri için yeni bir güçlendirme tekniğine başvurmuşlardır. Teknik, ankraj çubuklu birleşimlere SIFCON kompozit blokların monte edilmesine dayanmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında, biri kontrol numunesi olmak üzere, 3 adet  $\frac{2}{3}$  ölçekli dış kiriş-kolon birleşimleri hazırlanmıştır. İki numune için, ankrajlar kullanılarak, özel bir çelik tel takviyeli çimento kompozit olan ve prefabrike olarak imal edilen köşe ve plaka SIFCON bloklar kiriş-kolon birleşimine ankre edilmiştir. SIFCON blokları, yüksek tokluğa sahip, çekme, kesme ve eğilme mukavemetleri yüksek yeni nesil bir güçlendirme elemanı olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında numuneler yarı statik çevrimsel yük altında test edilmiş ve deformasyonları LVDT ile izlenmiştir. SIFCON bloklar ile güçlendirme tekniğinin, yanal mukavemeti, kesme dayanımını, sertliği, enerji dağılımını ve sünekliği önemli ölçüde geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Sezen (2012) yaptığı çalışma kapsamında, farklı donatı detaylarına sahip 3 adet kiriş-kolon birleşim örneğini önce yarı statik çevrimsel yük altında test etmiştir. Test sonucunda hasar gören numunelerin birleşim bölgesindeki kesme hasarları, düşük mukavemeti önlemek ve daha yüksek süneklik elde etmek için güçlendirilmiştir. Güçlendirme için, hasar gören birleşim bölgesindeki parçalanmış beton çıkarılarak yerine yüksek mukavemetli harç yerleştirilmiş ve birleşim bölgelerine çapraz FRP şeritler sarılmıştır. Daha sonra güçlendirilmiş numuneler aynı yüklemeye geçişi uygulanarak tekrar test edilmiştir. Deney

sonuçları FRP şeritlerin bağ gibi davranıp birleşim bölgesindeki çekme kuvvetlerini başarıyla taşıdığını göstermiştir. Deneysel çalışma sonucunda hasar gören kiriş-kolon birleşimlerinin deformasyon kapasitesini arttırmak, bu bölgedeki kesme dayanımından daha sünek bükülme yetmezliğine ulaşmak, FRP şeritler için etkin bir ankraj mekanizması sağlamak gibi hedefler gerçekleştirilmiştir. FRP ile güçlendirme tekniğinin temel amacı, güçlendirilmiş birleşim bölgesindeki hasarı önlemektir. Sonuç olarak, FRP ile güçlendirme tekniği numunelerin mukavemetini hemen hemen eski haline getirmiş ve deformasyon kapasitesini arttırmıştır.

Al-Salloum et al. (2011) çalışmaları kapsamında, sismik olarak yetersiz dış kiriş-kolon birleşim noktalarının yük taşıma ve sünekliğinin geliştirilmesinde TRM (Textile Reinforced Mortar, tekstil takviyeli harç)'nin etkinliğini araştırmış ve performansı CFRP ile GFRP kullanılarak güçlendirilmiş numuneler ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada amaç, bu güçlendirme tekniklerinin numunelerin kesme mukavemetlerini ve sünekliklerini iyileştirmedeki etkinliklerinin incelenmesidir. Deneysel çalışma için 5 adet aynı tasarım detaylarına sahip ve yapısal olarak yetersiz numuneler hazırlanmıştır. İki numune kontrol numunesi olmak üzere diğer üç numune sırasıyla TRM, CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiştir. TRM mantoları, karbon elyaftan yapılmış tekstil kafesleri ve polimer maddeleri içeren bağlayıcı olarak kullanılan harçlardan oluşmaktadır. Numunelerin hepsi yarı statik çevrimsel yük ile yüklenmiştir. Sonuç olarak TRM ile güçlendirmenin; kiriş-kolon birleşimlerinin kesme direncini, deformasyon kapasitesini ve sünekliğini artırmada, CFRP ve GFRP ile güçlendirme kadar etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Attari et al. (2010) çalışmalarında, mevcut yapıların birleşim noktalarının kesme direncini ve sünekliğini iyileştirmek için FRP kompozit malzemelerle güçlendirme tekniğinin etkili bir teknik olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel çalışma kapsamında kiriş-kolon birleşimlerinin kesme direncini ve sünekliğini iyileştirmek için 3 adet  $\frac{1}{3}$  ölçekli kiriş-kolon bağlantı elemanları hazırlanmıştır. Numunelerden biri kontrol numunesi olarak kullanılmış, diğer ikisi ise CFRP ve GFRP levhaları ile güçlendirilmiştir. Kolon üzerine uygulanan aksenal yükün etkisi altında ters çevrimsel yüke tabi tutulan bu numuneler, hasar gördükten sonra taşlama ve temizleme ile düzeltilmiş, daha sonra FRP levhalarla güçlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş kiriş-kolon birleşimlerinde kesme direnci ve sünekliğin büyük ölçüde iyileştiği belirlenmiştir.

Mahmoud et al. (2014) yaptıkları deneysel çalışma kapsamında, biri kontrol numunesi olmak üzere toplam 11 adet ½ ölçekli kiriş-kolon birleşim numunesi hazırlamışlardır. Deneysel çalışma; etriye bulunmaması, kiriş ana donatı ve bağlanmış gömülü kolon için yetersiz bağ uzunluğu gibi dış kiriş-kolon birleşimlerinde karşılaşılan üç muhtemel kusur için CFRP'yi kullanarak farklı güçlendirme teknikleri üzerine bir çalışmayı kapsamaktadır. Çalışma sonunda numunelerin nihai yük kapasitesi, kırılma şekli, rijitlik, süneklik ve CFRP'de oluşan maksimum gerilmeler kontrol grubu ve CFRP ile güçlendirilmiş numuneler için karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarına bakıldığında ilk iki kusur için uygulanan CFRP ve üçüncü kusur için uygulanan CFRP şeritlerle birlikte NSM (Near Surface Mounted, yüzeye yakın monte edilmiş) şeritlerin de kullanımı tekniklerinin etkili sonuçlar verdiği gözlenmiştir. CFRP şeritlerin uygulama doğrultusunun birleşim noktasını güçlendirme konusunda oldukça etkili olduğu anlaşılmıştır. Çalışma sonucunda, önerilen farklı CFRP konfigürasyonlarına bağlı olarak gerçekleştirilen güçlendirme tekniğinin kiriş-kolon birleşimlerindeki nihai kapasiteyi ve sünekliği iyileştirdiği belirtilmiştir.

Sharbatdar et al (2012) çalışmalarında, hasar görmüş veya hasar görmemiş kiriş-kolon birleşimlerinin güçlendirilmesi için çelik payanda ile güçlendirme tekniğinin birleşimler üzerindeki etkinliği deneysel bir çalışma ile incelemişlerdir. Çalışmada amaç; birleşimlerin sertlik, nihai yük taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji yutma kapasitelerini etkili bir şekilde iyileştirmektir. Çalışma kapsamında ikisi kontrol numunesi olmak üzere 4 adet ½ ölçekli kiriş-kolon birleşim örneği hazırlanmıştır. Numuneler ilk olarak nihai dayanımlarına kadar yanal çevrimsel yük altında test edilmiş ve oluşan hasar sonrası çelik payandalarla güçlendirilerek tekrar yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında gerinim dağılımlarını elde etmek için birleşimlere gerinim ölçerler monte edilmiştir. Bu güçlendirme yönteminin, betonun çelik levhanın montaj yerinde bükülmesi ve betonarme karkas ile çelik karkas arasında güç aktarma kuvveti ve enerji emiliminin iyileştirilmesi için oldukça etkili olabileceği ve rijitliği arttırdığı görülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda bu yeni güçlendirme tekniği ile kesme gerilmeleri, çatlak sayısı ve enerji emilim gibi parametrelerde iyileşme olduğu belirtilmiştir.

Pimanmas and Chaimahavan (2011) yaptıkları çalışmada, iç kiriş-kolon birleşimleri için birleşim bölgesini genişletmeye dayalı bir güçlendirme tekniği önermişlerdir. Yöntem, kiriş-kolon birleşimlerinin yerinde dökme beton ile iki boyutlu olarak güçlendirme prensibine dayanmaktadır. Deneysel çalışma için, biri güçlendirilmemiş diğeri güçlendirilmiş kontrol numunesi olmak üzere, beş adet iç



kiriş-kolon birleşim örneği hazırlanmıştır. Numuneler, farklı boyut ve şekillerde yüzeysel birleşim bölgesi genişlemesi ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme ile plastik mafsalsal bölgesi kolon yüzünden genişleme kenarına taşınmıştır. Deneysel sonuçlar, bu yöntem ile birleşim bölgesinin boyutunun artırılmasıyla kesme yetmezliğinin önlenmesi; ortak kesme kuvveti, enerji dağılımı ve sünekliğin iyileştirilebilir olduğunu göstermiştir.

Del Vecchio et al. (2015) yaptıkları araştırmalar sonucunda, zayıf giriş-kolon birleşimlerinin sismik olaylara direnemediklerini belirtmişlerdir. Literatürde mevcut birleşimlerin sismik kapasitelerini arttırmak için birçok güçlendirme tekniğinin önerildiğine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş giriş-kolon birleşimlerinin sismik kapasitelerinin iyileştirilmesinde kesme kapasitesi artışını tahmin etmek için bir mukavemet kapasitesi modeli sunulmuştur. Bu amaçla çekme gerilmesi yaklaşımına dayanan basit ve güvenilir bir model geliştirilmiştir. Modelde, deney numuneleri şiddetli sismik yüklemeleri temsil eden yüklere maruz tutan bir veri tabanı ile analiz edilmiştir. Önerilen model köşe bağlantılarının zayıf kesme kusurlarını önlemek için gerekli olan FRP takviyesi miktarının kolay ve güvenilir bir şekilde belirlenmesine, farklı lif tipleri ile güçlendirilmiş birleşimlerin kesme mukavemetinin tahmin edilmesine imkan sağladığı görülmüştür.

Arzeyton et al. (2016) çalışmalarında, kesme kuvvetinin yetersizliği veya kolon takviyesinin sınırlandırılması sonucunda giriş-kolon birleşim noktalarında ciddi yapısal hasarların ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamında; çelik levha, köşebent ve gergi çubukları kullanarak giriş-kolon birleşimlerinin iki boyutlu genişletilmesini sağlayan yeni bir sismik güçlendirme tekniği önerilmiştir. Güçlendirme çalışmasının etkinliği deneysel ve sayısal analizlerle araştırılmıştır. Bu amaçla, boyutları ve takviye detayları aynı, üçü kontrol numunesi ve biri güçlendirilmiş numune olmak üzere dört adet ½ ölçekli dış giriş-kolon birleşimleri hazırlanmış ve ters çevrimsel yük altında test edilmiştir. Birleşimlerin davranışlarını analitik çerçevede belirlemek için doğrusal olmayan FE (Finite Elements, Sonlu Elemanlar) analizi LS-DYNA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışmada gerilme dağılımları ve çatlak modelleri araştırılmıştır. FE analizi sonucu elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve deneysel sonuçların davranışını başarıyla öngördüğü belirlenmiştir. Sonuç olarak; bu yeni tekniğin kullanılmasıyla rijitlik, nihai yük taşıma kapasitesi, enerji dağılımı ve sünekliğin iyileştirilebilir olduğu

görülmüştür. Uygun bir sayısal simülasyon ile de deneysel çalışma sonuçlarının daha etkili bir şekilde incelenebileceği önerilmiştir.

Zamani and Shariatmadar (2016) yaptıkları çalışmada, yetersiz kesme dayanımına sahip kiriş-kolon birleşimlerinin karbon fiber takviyeli polimerlerle güçlendirilmesini ele almışlardır. Dört NS-sınıfı (sismik olmayan) kiriş-kolon birleşimleri, ters çevrimsel yük altında test edilmiş ve bir S sınıfı (sismik) birleşim ile karşılaştırılmıştır. S ve NS numuneleri arasındaki fark, kolon yüksekliği ve kiriş uzunluğu boyunca çapraz bağlama detaylarında çapraz donatı varlığıdır. Deneyin ilk aşamasında birleşimler çevrimsel olarak yüklenmişlerdir. İkinci aşamada ise hasar gören numuneler karbon fiber takviyeli polimer ile güçlendirilmiş ve tekrar test edilmiştir. Test sonuçları mukavemet, süneklik, enerji dağılımı ve sertlik bozulması açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, onarılmış numunelerin yük taşıma kapasitesi, referans numunesinden daha yüksek çıkmıştır. Güçlendirilmiş numunelerin doğrusal bir davranış gösterdiği görülmüştür. Bu durum, güçlendirmenin yüksek hasar seviyelerinde birleşim bölgesini ne kadar etkilediğini gösterdiği belirtilmiştir.

Del Vecchio et al (2014) çalışmalarında, sismik açıdan yetersiz kiriş-kolon birleşim noktalarının dıştan polimer fiberle güçlendirilmiş davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla altı adet tam ölçekli test numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin boyutları ve donatı oranları, zayıf kolon ve güçlü kiriş oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Birleşim bölgelerinde enine donatı yerleştirilmemiştir. Üç adet zayıf test elemanı, üç adet de güçlendirilmiş test elemanı hazırlanmış ve sabit aksenal ve çapraz çevrimsel yük etkisi altında test edilmiştir. Zayıf test elemanlarının basınç dayanımı 15 MPa'dan küçük, güçlü test elemanlarının ise 15 MPa ile 20 MPa arasındadır. Deney sonuçları çatlak modelleri, çatlak modu, alt montaj enerjisi dağılımı, rijitlik ve moment-eğrilik ilişkisi gibi açılardan karşılaştırılmıştır. FRP ile güçlendirilmiş numuneler, güçlendirilmemiş numunelere kıyasla önemli bir mukavemet artımı gösterdiği görülmüştür.

Garcia et al. (2014) çalışmalarında, dıştan karbon fiber takviyeli polimerlerle güçlendirilmiş betonarme kiriş-kolon birleşiminin sismik davranışını araştırmışlardır. Üç adet kiriş-kolon birleşiminde ardışık iki aşamada yedi test gerçekleştirilmiştir. Testlerde birleşim noktaları temel sismik performanslarının değerlendirilmesi için önce ters çevrimsel yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda numunelerin iç bölgelerinde ciddi hasarlar oluşması nedeniyle yeni yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Numuneler daha sonra CFRP

levhaları ile güçlendirilmiş ve periyodik testler tekrar edilmiştir. Yedi test numunesinden ilk üçü orijinal test numunesidir. Diğer üç test elemanı ise tekrar dökülmüş ve CFRP ile güçlendirilmiştir, son test elemanında ise güçlendirilmiş elemanlardan birine yeniden beton dökülmüştür. Yer değiştirmeler, LVDT kullanılarak kayıt edilmiştir. Sonuçlar birleşimlerin kesme dayanımı yönünden karşılaştırılmıştır. CFRP ile güçlendirme kiriş donatılarının verimliliğini arttırmış ve daha sünek bir göçme oluşturmuştur. Yüksek mukavemetli beton ile yenilenen elemanların birleşim bölgesinin orijinal rijitliğini geri kazandığı ve kapasitesini %44 oranında arttırdığı görülmüştür.

Ha et al. (2013) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer levhalara ek olarak karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) çubuklar kullanarak çevrimsel yük altındaki betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin sismik dayanımını ve performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmada 5 adet kiriş-kolon birleşimi ½ ölçek ile üretilmiştir. LBCJM monoton yük testi için hazırlanmış standart örnek, LBCJC ise döngüsel yük için hazırlanmış standart örnektir. LBCJ-CS1 örneği, sadece dıştan CFRP levhaları ile güçlendirilmiştir. LBCJ-CRU örneği, kirişin üst ve alt yüzeylerinde gömülü uzunluğu 100 mm olan CFRP çubukları ve dıştan CFRP levhaları ile güçlendirilmiştir. LBCJ-CRS örneği, kirişin üst ve alt yüzeylerinde gömülü uzunluğu 200 mm olan CFRP çubukları ve dıştan CFRP levhaları ile güçlendirilmiştir. Tüm testler için tekrarlanan çevrimsel yükün periyodu iki tekrarlamaya ve 100 saniyedir ve çevrimsel yük, yer değiştirme maksimum seviyeye erişene kadar sürekli uygulanmıştır. Sonuçlar kırılma tipleri, enerji dağılımları ve yük taşıma kapasitesi gibi özelliklere göre karşılaştırılmıştır. CFRP çubukları ve CFRP levhaları ile güçlendirme sonucu, birleşim bölgelerinin maksimum yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme sünekliği, enerji yayılım kapasitesinin arttığı ve birleşim bölgesi yakınındaki betonda eğilme çatlaklarının oldukça azaldığı görülmüştür.

Alsayed et al. (2010) çalışmalarında, sismik olarak yetersiz köşe betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin kesme dayanımı ve sünekliğini arttırmada karbon fiber takviyeli polimerlerin etkinliğini incelemiştir. Bu amaçla üretilen dört numuneden ikisi, referans olarak kullanılmış diğer ikisi ise iki farklı uygulama şemaları altında CFRP levhaları ile güçlendirilmiştir. İlk aşamada CFRP levhalar birleşim noktasına, kirişe ve kolon bölgesinin bir kısmına uygulanmıştır. İkinci aşamada ise CFRP levhaları yalnızca birleşim bölgesine uygulanmıştır. CC1 ve CC2 numuneleri kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. CS1 ilk aşamaya uygun olarak güçlendirilen test numunesi CS2 ise ikinci aşamaya uygun olarak

güçlendirilen test numunesi olarak kullanılmıştır. CR1 ve CR2 numunesi, CC1 ve CC2 numunesinin hasar gördükten sonra epoksi ile onarılması ve CFRP levhaları ile ilk aşamaya uygun olarak güçlendirilmesi sonucu oluşmuştur. Bu numunelerin tamamı şiddetli deprem hasarına eşdeğer hasarlar oluşturmak için çevrimsel yanal yüklere tabi tutulmuştur. Kontrol numuneleri, onarılmış numuneler ve güçlendirilmiş numuneler incelenmiş ve sonuçlar, histerik döngüler, yük-yer değiştirme, süneklik ve rijitlik düşüşü bakımından karşılaştırılmıştır. Test sonuçları, dıştan CFRP levhalar ile güçlendirmenin, sismik olarak yetersiz kiriş-kolon birleşimlerinin kesme dayanımını ve deformasyon kapasitesini etkili bir şekilde artırabildiğini göstermiştir.

Li et al. (2013) çalışmalarında, çapraz takviyeli ferroçimento mantolar kullanılarak betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin güçlendirilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Biri kontrol numunesi üçü güçlendirilmiş numune olmak üzere dört adet  $\frac{2}{3}$  ölçekli kiriş-kolon birleşimleri hazırlanmış ve yarı statik çevrimsel yük altında test edilmiştir. Güçlendirilmiş her numune için üç tip harç tasarlanmıştır. C1 numunesi güçlendirme uygulanmamış kontrol numunesidir. S1 numunesi çimento-kum harçlı ferroçimento, S2 numunesi çimento harçlı ferroçimento ile güçlendirilmiştir. S3 numunesi ise epoksi esaslı harçlı ferroçimento ile güçlendirilmiştir. Sonuçlar histerik davranış, deplasman, enerji yayma, rijitlik düşüşü bakımından incelenmiştir. Test sonuçları, önerilen güçlendirme yönteminin, yüksek mukavemetli harçla birlikte ferroçimento da kullanarak kiriş-kolon birleşimlerinin sismik performansını artırabileceğini göstermiştir.

Lee et al. (2010) çalışmalarında, kiriş-kolon birleşiminin dayanım ve sağlamlığını arttırmak için etkin bir iyileştirme yöntemi önermişlerdir. Çalışma kapsamında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş birleşimlerin kesme dayanımını tahmin etmek için bir analitik model önerilmiştir. Deneysel çalışmada, üç tam ölçekli kiriş-kolon birleşimleri test edilmiştir. Bir numune standart test numunesi olarak kullanılmış, iki numune de CFRP ile güçlendirilmiştir. JI0, JI1 ve JI2 olarak adlandırılan birleşimlerden JI0 güçlendirilmemiş, JI1 ve JI2 ise CFRP ile güçlendirilmiştir. Numunelerin tam gerilme alanını ölçmek için dijital görüntü korelasyonu (DIC) kullanılmıştır. CFRP'nin çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 4382 MPa ve 258 GPa'dır. Deneysel sonuçlar, JI2 numunesinin sertliği ve mukavemetinin JI0'un sertlik ve mukavemetinden daha iyi olduğunu göstermektedir. JI2'nin enerji

dağılımı J10'dakinden yaklaşık %90 daha yüksektir ve bu da iyileştirme stratejisinin etkili olduğunu gösterdiği belirtilmiştir.

Esmaeeli et al. (2015) çalışmalarında, betonarme kiriş-kolon birleşim bölgelerinin sert çimentolu kompozit (SHCC) ve karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) levhaların bir arada kullanımı ile güçlendirilmesini sağlayan yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu tekniğe göre, kiriş- kolon birleşim yerindeki beton kendi kendini sertleştiren bir SHCC ile değiştirilir. SHCC'nin bu ince tabakası, CFRP levhalarla takviye edilmiştir. İki tam ölçekli güçlendirilmiş numuneden, JPA3 adlı numunede güçlendirme şeması sadece numunenin ön ve arka yüzlerine uygulanmıştır. JPB adlı numunede ise numunenin tüm yüzeyleri güçlendirme şeması ile kaplanmıştır. Bu güçlendirme yönteminin etkinliği, deneysel olarak histeretik tepki, enerji dağılımı, rijitlik düşüşü, yer değiştirme sünekliği ve çatlak modları bakımından deneysel olarak değerlendirilmiştir ve karşılaştırılmıştır. JPA3 ile JPB numunesi arasındaki tek fark boyuna donatı miktarıdır. JPB numunesinde fazladan dört adet boyuna donatı bulunmaktadır. Sonuç olarak güçlendirilmiş numunelerin sismik performansı önemli ölçüde iyileşmiştir. Ciddi derecede hasar gören JPA3 ve JPB numunelerinde uygulanan güçlendirme sistemi, güçlendirilmemiş durumdaki değerler düşünüldüğünde, yanal yük kapasitesi ve enerji kaybı açısından önemli bir artış sağladığı görülmüştür.

Yurdakul and Avşar (2016)'ın çalışmalarında kullanılan güçlendirme yönteminde, betonarme kiriş-kolon birleşim yerlerine harici olarak gergi çubukları uygulanmıştır. Beş tam ölçekli numune laboratuvarında test edilmiştir. Bütün numuneler, farklı yapısal hasar seviyelerini gözlemlemek için %8 deplasman oranına kadar periyodik yarı statik yüklemeye tabi tutulmuştur. Tüm numuneler, birleşimde enine donatı eksikliği ve düşük mukavemetli beton gibi zayıf malzeme özelliklerinden kaynaklanan çeşitli hasarlar içermektedir. Bu birleşim yerlerinin her iki yanında köşegen şekilde iki gergi çubuğu monte edilmiştir. Numuneler, Türkiye'deki yetersiz betonarme binalarının çoğunu temsil etmektedir. Test edilen numunelerden biri, çubukların tepki üzerindeki katkısını belirlemek için sadece çubuklarla donatılmıştır. Referans numunesinde birleşimin kesme kapasitesi, birleşimde kesme donatısının olmaması nedeniyle betonun gerilme mukavemeti ile sınırlı kalmıştır. Güçlendirilmiş numunelerde ise, birleşimin kesme kapasitesi gerdirme ile arttırılmıştır. Referans numunesi çoğunlukla birleşimde kesme çatlaklarının yoğunlaşması ile kırılğan bir davranış sergilerken, betonarme numunelerin geri kalanı neredeyse elastik aralıklarda davranış gösterdiği ve kiriş-

kolon bağlantı bölgesindeki deformasyonun, kullanılan güçlendirme tekniği ile önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Hadi and Tran (2014) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile birlikte segmental dairesel beton kapaklar kullanılarak betonarme kiriş-kolon T bağlantı yerlerinin güçlendirilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışma kapsamında birleşim bölgesinde enine donatı içermeyen iki betonarme T bağlantısı yapılmış ve test edilmiştir. İlk örnek güçlendirilmiş bağlantıdır ve TS olarak adlandırılmıştır. İkinci örnekte ise önce kiriş üzerine bir yük uygulanmış ve birleşim yerinde ciddi bir hasara meydana getirilmiştir. Ardından bağlantı TS numunesi ile aynı teknik kullanılarak onarılmış ve TR olarak adlandırılmıştır. Betonarme bağlantısı içerisinde eğilme momenti oluşturmak ve kiriş üzerine dikey frekanslı bir döngüsel yükleme yapmak için 600 kN bir hidrolik aktüatör kullanılmıştır. Testler sırasında çelik donatı ve CFRP'nin davranışını incelemek için, her bir numuneye toplam 37 deformasyon ölçme cihazı yerleştirilmiştir. Sonuçlar kesme dayanımı, sertlik, enerji yayılımı ve yer değiştirme sünekliği bakımından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yapıştırılmış dairesel beton kapaklar sadece CFRP'nin etkinliğinin artırılmasına yardımcı olmakla kalmamış, aynı zamanda kesme yüküne direnmek için birleşim yerindeki mevcut beton ile birlikte uyum içinde çalışmıştır. TR numunesinin performansı, TS numunesine göre maksimum kesme yükünde yaklaşık %10 ve enerji dağılımında %20 daha düşük çıktığı görülmüştür.

Shafaei et al. (2014) çalışmalarında, önerilmeli çapraz bağlarla monte edilen çelik köşebentler kullanılarak kiriş-kolon birleşim yerinin iki boyutlu genişletilmesine dayanan, mevcut betonarme yapıların dış kiriş-kolon birleşim yerleri için yenilikçi ve pratik bir sismik güçlendirme yöntemi önermişlerdir. Çalışma kapsamında, yedi adet yarı ölçekli betonarme kiriş-kolon birleşimleri artan genliklerle yanal çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Üç numune, kontrol kiriş-kolon birleşimleri olarak üretilmiştir ve dört numune, testten önce sismik olarak yenilenmiştir. C1 numunesi, bir kontrol numunesi olarak ACI 318M-11 gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmış sismik kiriş-kolon birleşimini temsil etmektedir. C1 numunesinde birleşim bölgesinde enine donatı bulunmaktadır. C2 ve C3 sismik olmayan numuneleri, birleşim bölgesinde yetersiz donatıya sahiptir. C2 ve C3 numunelerinde birleşim bölgesinde enine donatı yoktur. SC2-1, SC2-2, SC3-1 ve SC3-2 numuneleri, C2 ve C3 numunelerinin iyileştirilmesi sonucu oluşan güçlendirilmiş numunelerdir. SC3-1 numunesinin köşebent boyutları SC2-1 numunesi ile, SC3-2 numunesinin

boyutları ise SC2-2 numunesi ile aynıdır. Numuneler enerji yayılım kapasitesi, rijitlik düşüşü, kuvvet-yer değiştirme histeretik davranışı gibi açılardan karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Sonuç olarak önerilen güçlendirme metodu, birleşim bölgesindeki kesme çatlaklarının oluşma süresini geciktirmiş ve beton ile deforme olmuş donatılar arasındaki bağı arttırmıştır. Sismik olmayan kontrol numunesi, güçlendirilmiş numuneye göre daha yüksek mukavemet değeri göstermiştir.

Ma et al. (2017) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimerin (CFRP) güçlendirme modları ve betonarme (RC) çerçevelerin sismik performansı üzerindeki etkisini araştırmak için dört tam ölçekli iç kiriş-kolon birleşimlerinin döşeme ile birlikte yarı statik test sonuçlarını incelemiştir. Bu kiriş-kolon-döşeme alt montajları, bir kontrol numunesinden ve farklı CFRP güçlendirme şemalarına sahip üç numuneden oluşmaktadır. Kontrol numunesi (C numunesi), güçlendirilmeden test edilmiştir. Geri kalan üç numune ise, CFRP ile farklı düzenlerle güçlendirildikten sonra test edilmiştir. İlk yenilenmiş numune olan SC, 3 tabakalı CFRP'nin yanal olarak sarılmasıyla güçlendirilmiştir. Alt montajların sismik performansı, çatlak modları, histeretik davranışı, yer değiştirme sünekliği, rijitlik düşüşü, enerji yayılım kapasitesi, birleşim bölgesinin kesme deformasyonu ve kirişin düşey deformasyonları karşılaştırılarak tartışılmıştır. Numuneler CFRP ile güçlendirildikten sonra süneklik ve enerji dağılım kapasitesi artmıştır. İç kiriş-kolon-döşeme alt montajları için, CFRP sargısının sismik performansı iyileştirmek ve güçlü kolon zayıf kiriş hasar modunu uygulamak için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Sasmal et al (2011) çalışmalarında, hasarlı betonarme kiriş-kolon birleşim örneği için çevrimsel yükleme altında güçlendirme tekniği kullanmışlardır. Hindistan Standardı özelliklerine göre tasarlanmış ancak sünek kabul edilmeden tasarlanan bir numune, ters çevrimsel yükleme esnasında incelenmiştir. Daha sonra, düktil olmayan numune, epoksi harç ile tamir edilmiş olup, düşük viskoziteli polimer kullanılarak dökülmüş ve kiriş-kolon bileşenlerinde fiber takviyeli plastik (FRP) sargısı ile birleşim bölgesindeki çelik plakalı ceket kullanılarak güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, yenilenmiş numunenin orijinal sağlamlığını geri kazandığını göstermektedir. Bu çalışma, betonarme yapılarda hasar gören bölgelerin güçlendirilmesi ve iyileştirilmesi için uygun bir güçlendirme tekniğinin kullanılabilirliğini göstermektedir. Yeterli onarım ve olumlu güçlendirme ile hasar gören yapının orijinal dayanımını geri kazanmanın mümkün olduğu gözlemlenmiştir.





### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Deney Elemanları

Tez çalışması kapsamında test edilecek deney elemanları betonarme çerçeve bir binada dış kolon ve kiriş birleşim yerlerini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Kirişin kolona bağlantısının tam olması için kolon ve kiriş genişlikleri aynı alınmıştır. Deneyler için 1/1 ölçekli 9 adet betonarme konsol kiriş-kolon birleşim noktalı deney elemanı üretilmiştir. Deney elemanlarının geometrik boyutları aynıdır, fakat donatı düzenlemeleri farklıdır. 9 deney elemanı için toplamda 3 çeşit donatı düzeni vardır:

1.Kolon ve kiriş 30 cm etriye ile sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında hiç etriye yoktur. Referans numunesi olarak kullanılacaktır.

2.Kolon ve kiriş 10 cm etriye ile sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında etriye konulmamıştır. Günümüzde ve geçmişte yapılan binaların çoğunda gözlenen durumdur. Referans numunesi ve güçlendirilmiş numuneler için kullanılacaktır.

Deney elemanlarından 2 tanesi referans numunesi olarak, 7 tanesi ise farklı CFRP, çelik ceket ve çapraz çelik ankraj güçlendirmeleri için kullanılacaktır. Deney elemanları ve güçlendirme detayları Tablo 3.1'de verilmiştir.

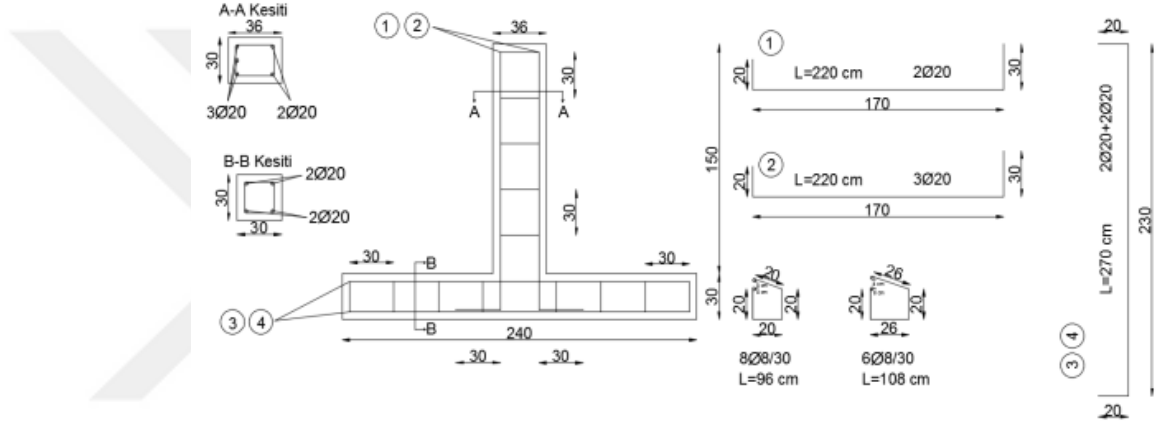
Tablo 3.1.Deney Elemanları ve Güçlendirme Özellikleri

Numune No	Güçlendirme Tipi	Beton Dayanımı (Mpa)	Zayıf Bölge Durumu (Enine Donatı Eksikliği)	Güçlendirme Bölgesi	gf* (mm)	CFRP Düzenlemesi	Ankraj Tipi
1	Referans-1	25.0	Kiriş-Kolon ve Düğüm	-	-	-	-
2	Referans-2	25.0	Düğüm	-	-	-	-
3	CFRP	25.0	Düğüm	Düğüm Noktası	150	Çapraz sargı+kolonda sargının devamı	-
4	CFRP	25.0	Düğüm	Düğüm Noktası	150	Çapraz sargı	-
5	Ankraj	25.0	Düğüm	Düğüm Noktası	-	-	2 U (Ø12)
6	Ankraj	25.0	Düğüm	Düğüm Noktası	-	-	6 (Ø12)
7	CFRP	25.0	Düğüm	Kiriş & Kolon & Düğüm Noktası	-	Tamamen	-
8	CFRP	25.0	Düğüm	Kiriş & Kolon	-	Tamamen	-
9	Çelik Ceket	25.0	Düğüm	Düğüm Noktası	-	-	-

gf\* : CFRP şeritlerin genişliği

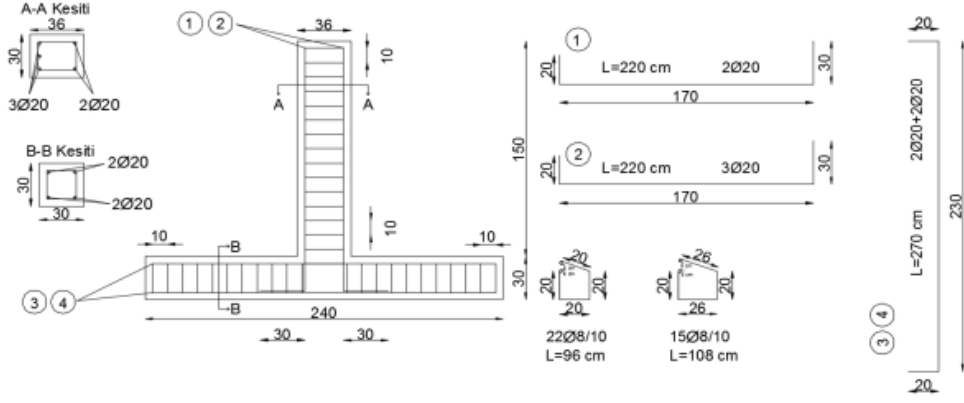
Deney programında yer alan deney elemanlarına ilişkin detaylar aşağıda verilmiştir.

Referans-1’de kolon ve kiriş 30 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında ise etriye yerleştirilmemiştir. Bu numune referans numunesi olarak kullanılacaktır. Numunede, düğüm noktası ile birlikte kiriş ve kolonda da etriye sıklaştırması yapılmamıştır. Elemana ait geometri, donatı düzenlemeleri ve kesit detayı Şekil 3.1' de verilmiştir.



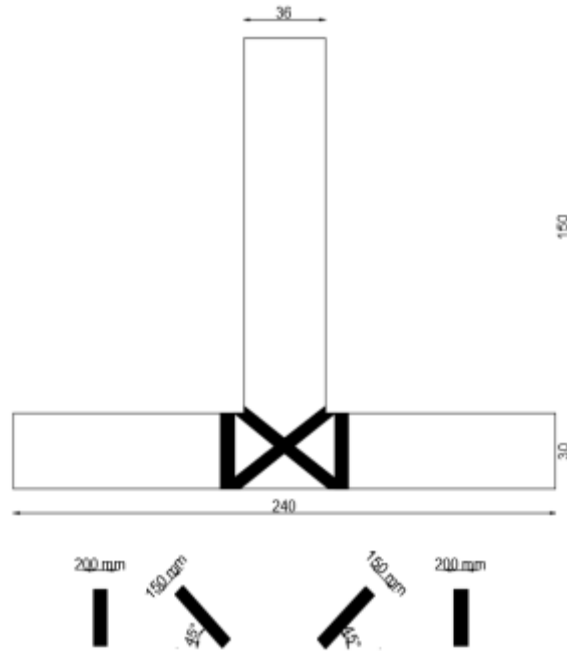
Şekil 3.1.Referans-1 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları

Referans-2’de kolon ve kiriş 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik nervürlü donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasında ise etriye yerleştirilmemiştir. Elemana ait geometri, donatı düzenlemeleri ve kesit detayı Şekil 3.2' de verilmiştir.



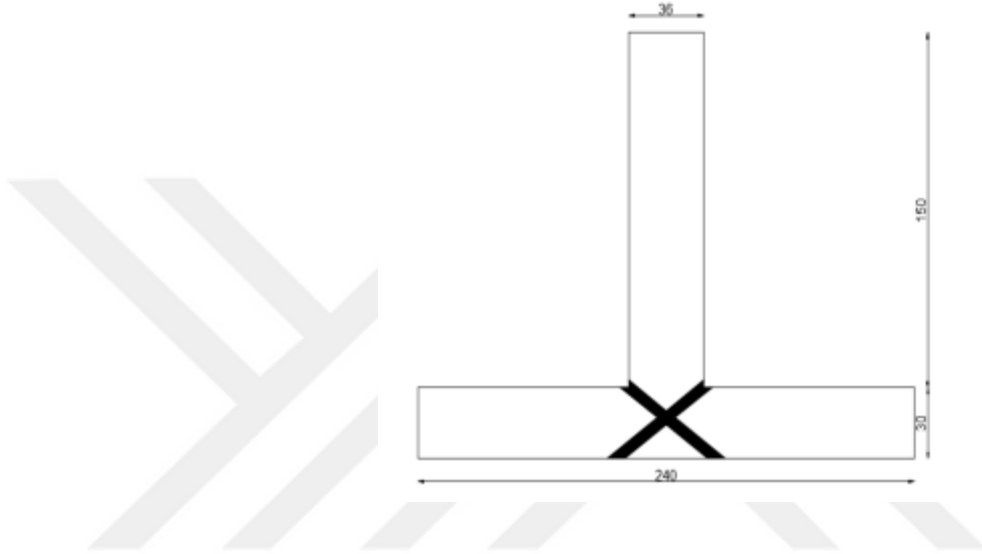
Şekil 3.2.Referans-2 Elemanı geometrisi, donatı detayları ve kesit detayları

Deney Elemanı-3, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numuneye düğüm noktasında  $45^\circ$ 'lik açıyla çapraz olarak yerleştirilmiş 150 mm genişliğinde ve iki tarafta da kolonda sargıya devam eden 200 mm genişliğinde düz CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir (Şekil 3.3). Düğüm noktasındaki çapraz sargının yanı sıra kolonda devam eden sargının davranışa etkisi incelenecektir.



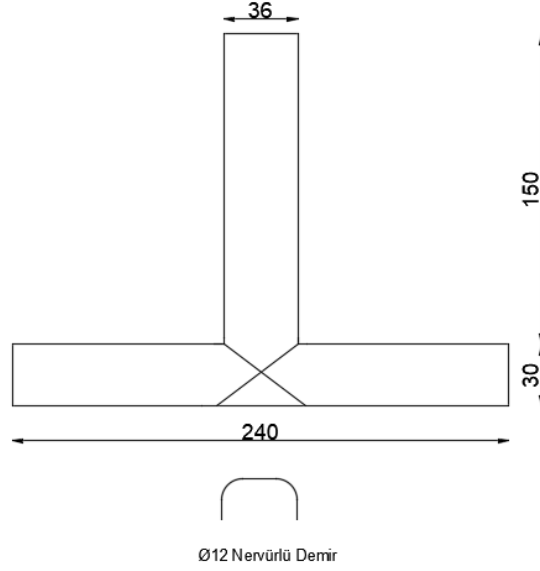
Şekil 3.3.Deney Elemanı-3'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-4, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune düğüm noktasında  $45^\circ$ 'lik açıyla çapraz olarak iki kat sarılmış 150 mm genişliğinde CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir (Şekil 3.4). Bir önceki numuneyle davranış farklılığını inceleyebilmek için güçlendirilmiştir. Her iki elemenda da CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir.



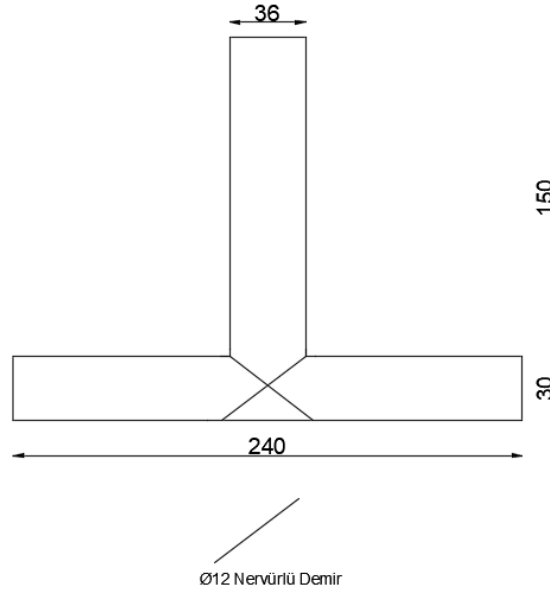
Şekil 3.4. Deney Elemanı-4'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-5, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune 2 adet  $\text{Ø}12$ 'lik çapraz yerleştirilen U şeklindeki ankrajlarla donatılmıştır. (Şekil 3.5). Güçlendirme elemanları üzerine de birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



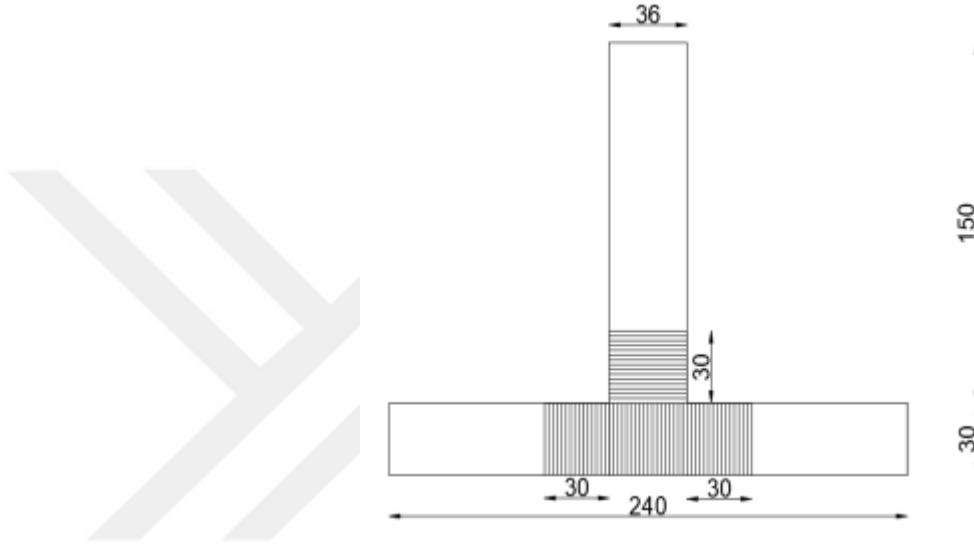
Şekil 3.5.Deney Elemanı-5'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-6, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna Ø20'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna Ø20'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna Ø20'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune 6 adet Ø12'lik düz ankrajlarla donatılandırılmıştır. (Şekil 3.6). Yine güçlendirme elemanları üzerine de birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



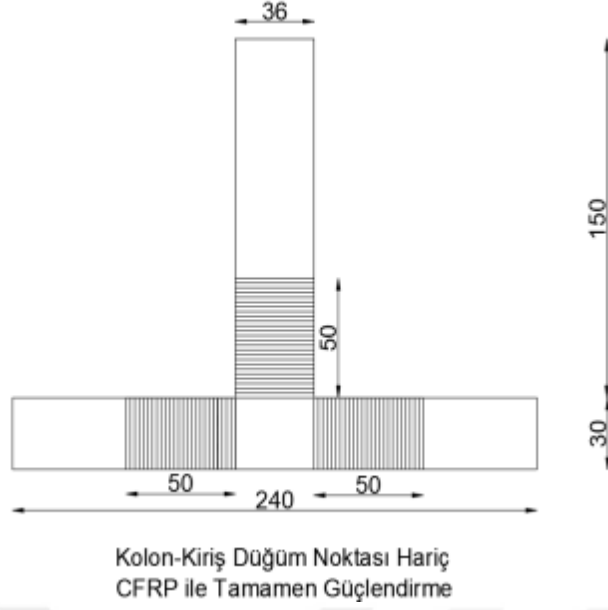
Şekil 3.6.Deney Elemanı-6'ya ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-7, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Lifler boyuna doğrultulara dik olacak şekilde kiriş ve kolonun birleşim bölgesinden itibaren 30 cm'lik kısmı düğüm noktası ile birlikte kesmeye karşı CFRP ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.7). CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



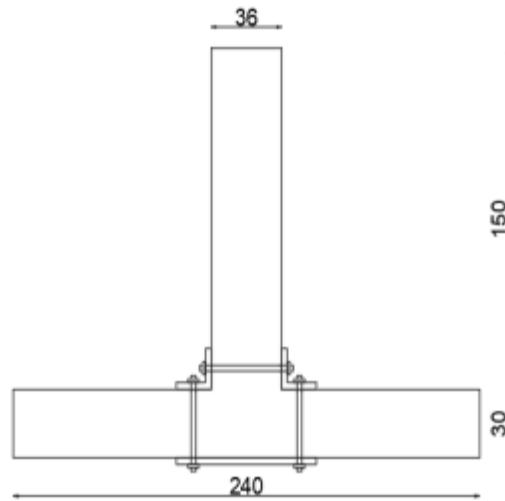
Şekil 3.7. Deney Elemanı-7'ye ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-8, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Lifler boyuna doğrultulara dik olacak şekilde düğüm noktası hariç kiriş ve kolonun kritik olan kısmının tamamı kesmeye karşı CFRP ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.8). Düğüm noktası dışında güçlendirilen bu elemanda davranışın nasıl geliştiği araştırılacaktır. CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve göçmeye neden olan faktörlerin belirlenmesine çalışılmıştır.



Şekil 3.8.Deney Elemanı-8'e ait güçlendirme detayı

Deney Elemanı-9, 10 cm aralıklı etriyelerle sarılmıştır. Kirişin üst ana donatısında 2 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik, alt ana donatısında ise 3 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatı kullanılmıştır. Kolonda ise toplamda 4 adet boyuna  $\text{Ø}20$ 'lik donatılar kullanılmıştır. Düğüm noktasına ise etriye yerleştirilmemiştir. Numune düğüm noktasında 10 mm kalınlığında çelik ceket ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.9). Güçlendirme elemanları üzerine de birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır.



Şekil 3.9.Deney Elemanı-9'a ait güçlendirme detayı



### 3.2 Malzemeler

Deney elemanlarının üretilmesinde donatı, beton, CFRP, çelik ceket ve çelik ankraj malzemesi kullanılmıştır. Donatı ve beton malzemelerinin karakteristik özellikleri numuneler üzerinde gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde aynı özellikte beton ve bir seferde ve aynı üretimden temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. Deney elemanlarının kesmeye karşı güçlendirilmesinde MasterBrace SAT 4500 (Epoksi) kullanılmıştır.

#### 3.2.1 Donatı

Deney elemanlarında kullanılan nervürlü çelik donatılar bir seferde ve aynı üretimden alınmıştır. Donatıların özelliklerinin belirlenmesi için her çaptaki donatıdan üçer adet numune alınarak çekme deneyleri yapılmıştır. Donatı özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2.Kullanılan donatıların özellikleri

GENEL			MEKANİK TEST			KİMYASAL BİLEŞİM (%)				
Çap (mm)	Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )	Kalite	Akma Muk. (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Muk. (N/mm <sup>2</sup> )	Çekm/ Akma Oranı	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
8	50,3	S420	460	563	1,22	0,210	0,150	0,630	0,011	0,021
12	113	S420	464	563	1,21	0,200	0,150	0,620	0,012	0,022
20	314,3	S420	487	633	1,30	0,290	0,140	0,620	0,017	0,020

#### 3.2.2 Beton

Deney elemanlarının betonları özel bir şantiyede ait şantiyede hazırlanarak dökülmüştür. Beton karışımında 11,2-22 mm, 4-16 mm ve 0-3 mm dane çaplarında üç grup agrega kullanılmıştır. Kullanılan agrega için elek analizi yapılmıştır. C 25/30 MPa beton basınç dayanımı elde etmek amacıyla 1 m<sup>3</sup> beton

karışımında 0-3 mm dane çapındaki malzemedan %50 oranında, 4-16 mm dane çapındaki malzemedan %23,4 oranında ve 16-32 mm dane çapındaki malzemedan %26,4 bulunması gerektiği hesaplanmıştır. 1 m<sup>3</sup> beton üretiminde 255 kg çimento kullanılmıştır. Deney elemanlarında çimento olarak Çimento CEM I42.5 R kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.66'dır. 1 m<sup>3</sup> betonun hazırlanması için karışım oranları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Deney elemanlarında kullanılan beton karışım oranı

Malzemeler	Ağırlık (kg)	Ağırlıkça Oranı (%)
Çimento	255	11,2
No 2 Agregası (11,2-22) (dya)	485	21,4
No 1 Agregası (4-16) (dya)	429	18,9
No 0 Agregası (0-3) (dya)	934	41,1
Su	167	7,4
Katkı	4,24	-
Yatağan (uçucu kül)	84	-
Toplam	2358,24	100

Deney elemanlarının beton dökümü sırasında üç adet standart küp numunesi alınmıştır. Alınan numunelere deney elemanları ile aynı şartlarda kür uygulanmıştır. Küp numuneleri deney numunelerinin test edildiği günde basınç testine tabi tutulmuş ve o numuneye ait beton basınç dayanımı olarak kabul edilmiştir.

### 3.2.3 CFRP

Çalışmada deney elemanlarının kesme dayanımlarını arttırmak için tek yönlü, yüksek dayanımlı, karbon lifli polimer (FRP) kumaş polimer malzemesi (MasterBrace FIB 300/50 CFS) kullanılmıştır. MasterBrace FIB 300/50 CFS malzemesinin üretici firma tarafından belirtilen teknik özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan CFRP malzemenin mekanik özellikleri

<b>MasterBrace FIB 300/50 CFS Karbon Lifli Dokuma Malzemesi</b>	
Toplam Lif Ağırlığı (gr/m <sup>2</sup> )	300 gr/m <sup>2</sup>
Malzemenin Yapısı	Karbon
Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	230.000 N/mm <sup>2</sup>
Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	4900 N/mm <sup>2</sup>
Tasarım Kesim Kalınlığı (mm)	0.166 mm
Kopmada Uzama (%)	%2,10
Genişlik (mm)	500 mm

### 3.2.4 Epoksi

CFRP şeritlerin deney elemanlarına yapıştırılmasında MasterBrace SAT 4500 (Epoksi) (Şekil 3.10) yapıştırıcı kullanılmıştır. MasterBrace SAT 4500, MasterBrace FIB sistemi için özel olarak geliştirilmiş, iki bileşenli, solventsiz, yüksek dayanımlı, epoksi esaslı özel yapıştırıcıdır. Güçlendirilecek elemanlarda, karbon/cam fiber (lifli polimer) malzemenin yüzeye yapıştırılması amacıyla kullanılır. Epoksi malzemesinin teknik özellikleri Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. MasterBrace SAT 4500 (Epoksi)

Tablo 3.5. Deney elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan epoksi malzemesinin teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	
<b>MasterBrace SAT 4500</b> Bileşen A	Epoksi Reçine
<b>MasterBrace SAT 4500</b> Bileşen B	Epoksi Sertleştirici
Renk	Mavi
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre
Viskozite	1500-2500 mPa.s
Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>60 N/mm <sup>2</sup>
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>50 N/mm <sup>2</sup>
Yapışma Dayanımı (Betona) (7 gün)	>3,0 N/mm <sup>2</sup>
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5 ° C + 30 ° C
Kullanma Süresi (+20 ° C)	30 dakika
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20 ° C)	Min. 48 saat- Max. 7 Gün
Tam Kürlenme Süresi (+20 ° C)	7 Gün

Tablo 3.6. Epoksi karışım oranları

<b>MasterBrace SAT 4500</b>	<b>Bileşen A</b>	<b>Bileşen B</b>
Karışım Miktarı	3,73 kg	1,27 kg
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre	

### 3.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanları Asfalya Tanıtım Şirketi'ne ait şantiyede üretilmiş ve uygun koşullarda kür uygulandıktan sonra Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'na nakliye edilmiştir. Deney elemanlarının üretimi, donatı kafesinin ve kalıbının hazırlanması, beton dökümü ve güçlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalardan sonra deney elemanları teste hazır hale gelmektedir.

Deney elemanlarının beton dökümünde ahşap kalıplar kullanılmıştır. Kiriş ve kolon kalıpları ayrı ayrı kesilip hazırlandıktan sonra birleştirilmiştir.

Deney elemanlarının donatıları yine aynı yerde hazırlanmıştır. Önce kiriş ve kolon boyuna donatıları ve etriyeleri bükülerek hazırlanmıştır. Hazırlanan donatılar bağ telleri ile birbirlerine bağlanarak kiriş ve kolon donatı kafesi oluşturulmuştur. Daha sonra kiriş ve kolon donatıları da bağ telleri ile bağlanarak deney elemanının donatı kafesleri hazırlanmıştır.

Donatı kalıba yerleştirilmeden önce kalıp yağlanmıştır. Donatıların kalıp ile temasını önlemek için pas payı bırakılmıştır. Donatı kalıba yerleştirilirken, donatının yağlanmış yüzeylere temas etmemesine özen gösterilmiştir.

Donatı kafesi kalıplara yerleştirildikten sonra, birleşim bölgesindeki kiriş alt ve üst boyuna donatıların üzeri zımpara ile taşlanarak önceden hazırlanan deformasyon ölçerler yapıştırılmıştır.

Hazırlanan beton, vibratör yardımıyla yerleştirilmiştir. Deney elemanlarının beton dökümü sırasında üç adet standart küp numunesi alınmıştır. Deney elemanları ve küp numuneler aynı şartlarda 28 gün kür ortamında tutulmuştur. Deney elemanlarının hazırlanışına ait fotoğraflar aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.11-3.15)



Şekil 3.11. Donatı ve kalıpların hazırlanması



Şekil 3.12. Birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılacağı bölgeye zımpara uygulanması



Şekil 3.13. Birim deformasyon ölçerlerin yerleştirilmesi





Şekil 3.14. Standart küp numunesi alımı





Şekil 3.15.Beton dökümü

### 3.4 Deney Düzenegi

Laboratuvarda deney süresince kullanılan yükleme çerçevesi, S235JR (St37) kalitesindeki çelikten imal yapma kutu profillerden oluşan ve ayrıca yapma dolu gövdeli I kesitli diyagonal kirişlerle desteklenmiş rijit bir çerçeve sisteminden oluşmaktadır. Deney düzenegi Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

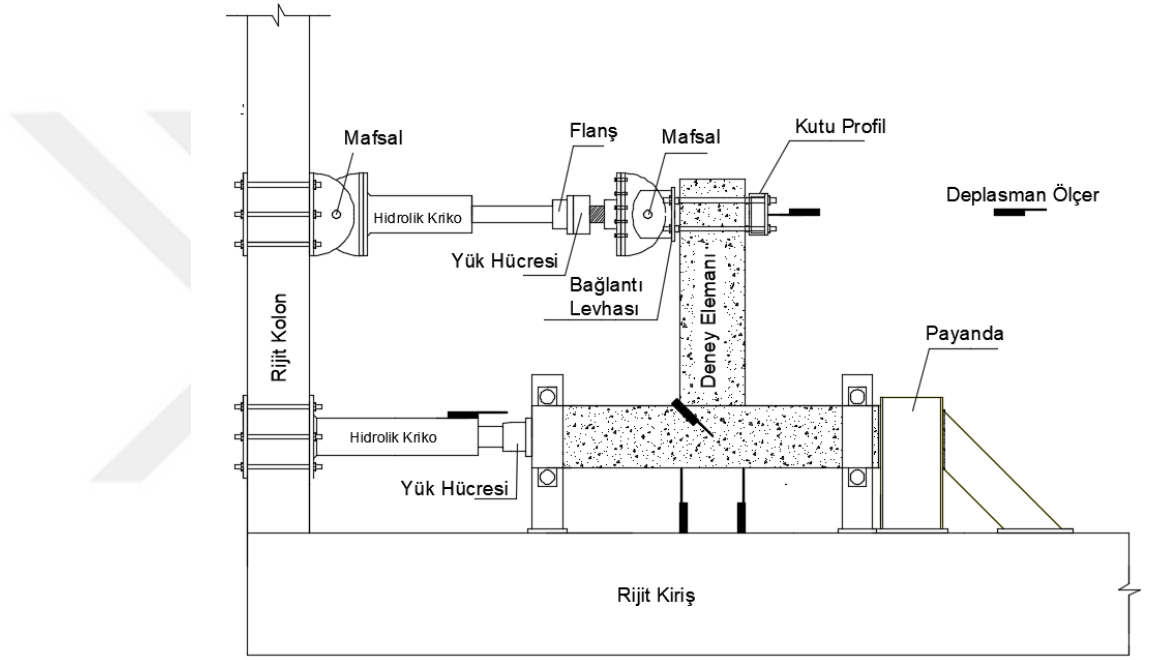


Şekil 3.16.Deney düzenegi (yükleme çerçevesi)



Deneylere yük kontrollü olarak başlanıp elemanın taşıdığı maksimum yükten sonra deplasman kontrollü devam edilmiştir. Yükleme, hidrolik pompa aracılığı ile mümkün olduğu kadar düzenli ve deney sırasında oluşan çatlak gelişimini gözleyecek hızda yapılmıştır. Deney elemanlarının yükleme düzeneği Şekil 3.17’de sunulmuştur.

Deneyler esnasında kolona uygulanan aksel yük TS500 doğrultusunda hesaplanmıştır ve bu değer 240-250 kN arasında değişen bir değer olarak alınmıştır.



Şekil 3.17. Deney elemanlarına ait yükleme düzeneği

Yükleme düzeneği 500kN kapasiteli iki adet 30cm stroklu yatayda çalışan ve bir adet 50 cm stroklu düşeyde çalışan pistonlar ile iki adet 200 bar kapasiteli manuel hidrolik güç ünitesinden ve ek yük piston aktüvatörden oluşmaktadır. Yatay pistonlar Şekil 3.18’de, hidrolik güç ünitesi ve ek yük piston aktüvatör Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Yatay pistonlar



(a)

(b)

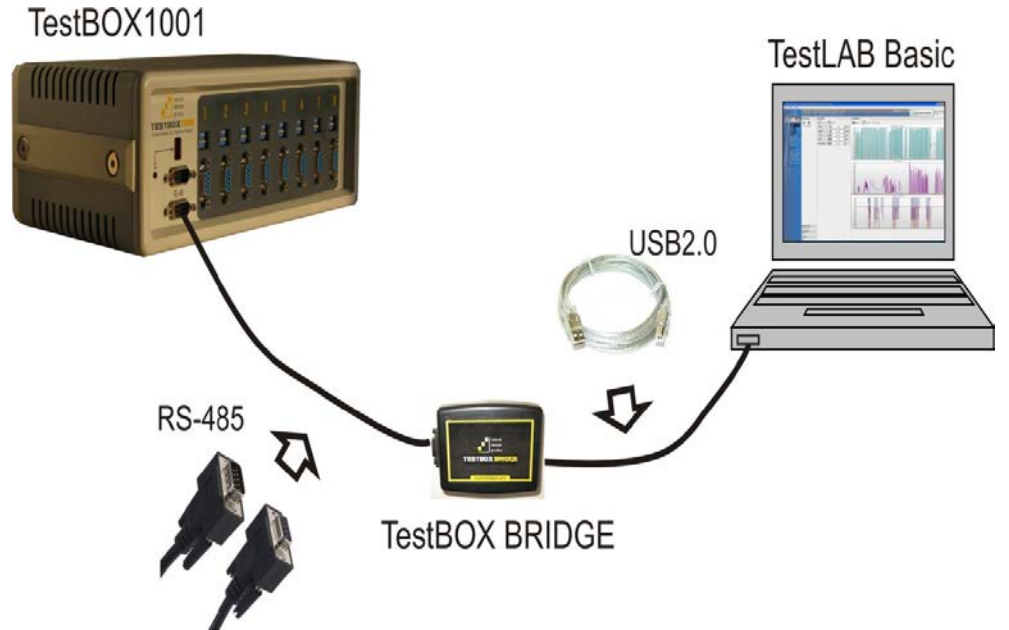
Şekil 3.19.(a) Hidrolik güç ünitesi (b) hız kontrol ünitesi

### 3.4.1 Veri Toplama Sistemi

Test edilen yapı modelinin deneysel davranışını elde etmek amacıyla model yapıların farklı noktalarından deplasman ölçümleri alınmıştır. Bunların bazıları doğrusal sistem deplasmanları için kullanılmış bazıları da elemanların deformasyonlarının hesaplanabilmesi amacıyla kullanılmışlardır. Deneylerde, deplasmanların ölçümü için doğrusal potansiyometrik cetveller (PC) kullanılmıştır. Deplasman ve yük ölçümlerinin toplanmasında TDG firması tarafından üretilen 8 kanallı TestBOX1001 statik veri toplama sistemi ve TestLAB-BASIC veri toplama yazılımı kullanılmıştır. Çalışmalarımızda toplamda 3 adet TestBOX1001 kullanarak 24 kanallı sistem elde edilmiştir. Veri toplama sistemi ve veri toplama yazılımı Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Veri toplama sistemi (a) ön panel görünümü ve (b) arka panel görünümü



Şekil 3.21. Veri toplama yazılımı

### 3.4.2 Potansiyometrik Cetveller ve Yerleşimi

Referans yapı ve güçlendirilmiş yapı modellerinde, sistemde oluşacak ötelenmelerin ve hasarların belirlenebilmesi için potansiyometrik cetveller (PC) yerleştirilmiştir. Potansiyometrik cetveller potansiyometrik (rezistif) prensiple lineer olarak çalışarak çok hassas olarak pozisyon ve hareketlerini elektronik olarak ölçebilmektedir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında deplasman ölçümlerini düzenli olarak alan, bilgisayarın sabit hafızasına kaydeden ve istenilen deplasman ölçümünün yüke karşı grafiğini çizerek deneyin takibini kolaylaştıran bir yazılım mevcuttur.

Yerleşim bölgeleri ve isimleri; arka yüz diyagonal deplasman (PC1), ön yüz diyagonal deplasman (PC2), sol düğüm düşey deplasman (PC3), sağ düğüm düşey deplasman (PC4), sol yan sabitliği (PC5), tepe deplasman (PC6)'dır. Potansiyometrik cetveller ve yerleşimleri Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22.Potansiyometrik Cetveller ve Yerleşimi

### 3.4.3 Birim Deformasyon Ölçerler ve Yerleşimleri

Deneyler sırasında ayrıca düşey donatılardan ve güçlendirme elemanlarından birim deformasyon ölçümleri alınmıştır. Deney programında 120 ohm'luk 10mm uzunluğunda standart birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerler yerleştirildikleri doğrultudaki mekanik hareketleri elektronik sinyallere dönüştüren deneysel ölçüm aletleridir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Deney sırasında volt cinsinden okunan birim deformasyon değerleri aşağıda verilen formülasyon (Denklem-1) kullanılarak birim deformasyona dönüştürülmüştür.

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

(1)

Bu eşitlikte;

$V_o$ : Okunan mili volt değeri

$V_i$ : Uygulanan gerilim

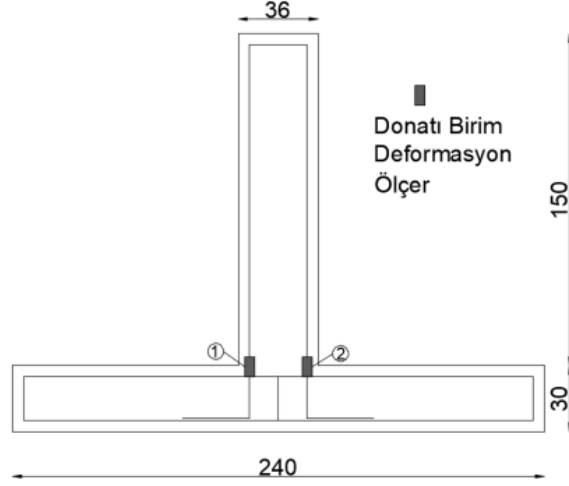
GF: Birim deformasyon faktörü (= 2)

GAIN: Kanal kazanç değeri (= 890)

$\varepsilon$  : Birim deformasyon değerini temsil etmektedir.

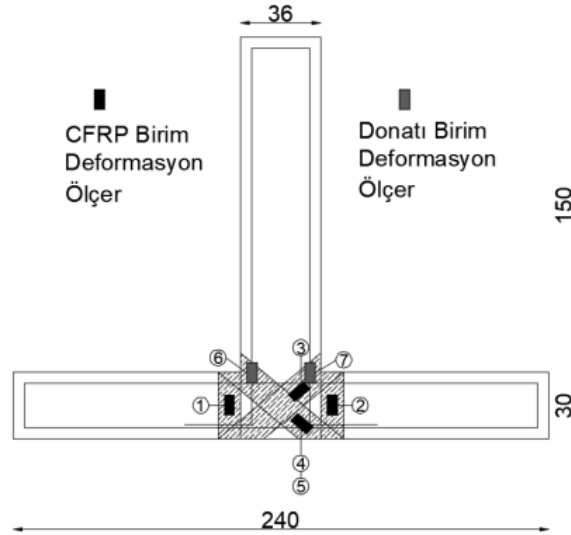
Birim deformasyon ölçerler CFRP uygulamalı numunelerde CFRP şeritlerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirildikten sonra yapıştırılmıştır. Yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin dirençleri kontrol edilerek veri toplayıcıya bağlanmıştır. Birim deformasyon ölçerlerin yerleşim detayları her numune için aşağıda verilmiştir.

Deney elemanı-1, 2 ve 3 için her birinde iki toplamda altı adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı ölçerler, giriş boyuna donatıları deformasyonları için konulmuştur. Tüm birim deformasyon ölçerler aynı numaralı kanallara yerleştirilmiştir. Deney elemanı-1, 2'ye ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.23'de gösterilmiştir.



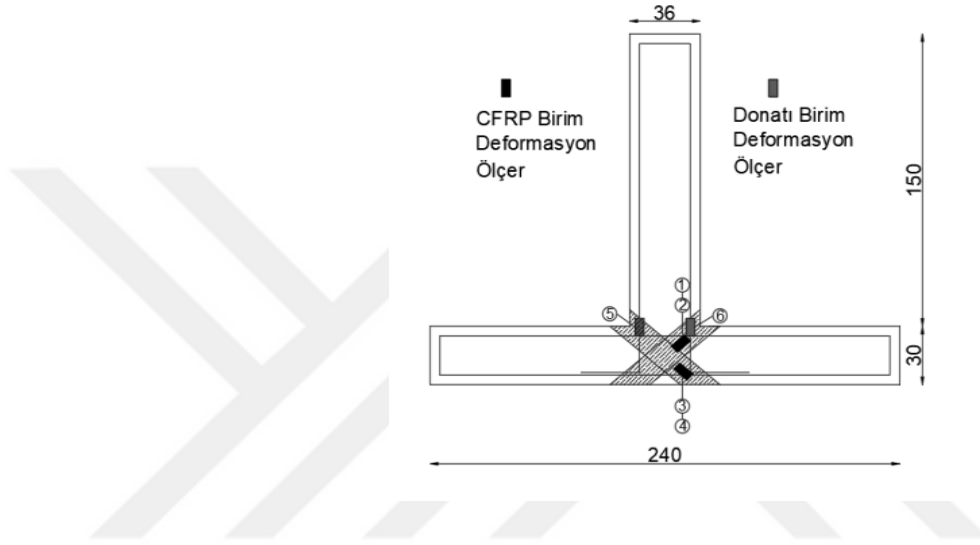
Şekil 3.23.Deney Elemanı-1,2'de donatı birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

Deney elemanı-3 için toplamda yedi adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı ölçerler, yan yüz CFRP birim deformasyonları için konulmuştur. 3 ve 4 numaralı birim deformasyon ölçerler, ön yüz diyagonal CFRP birim deformasyon için kullanılmıştır. 5 numaralı birim deformasyon ölçer, arka yüz diyagonal CFRP birim deformasyon için kullanılmıştır. 6 ve 7 numaralı birim deformasyon ölçerler ise, kiriş boyuna donatıları birim deformasyonları için konulmuştur. Tüm birim deformasyon ölçerler aynı numaralı kanallara yerleştirilmiştir. Deney elemanı-3'e ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



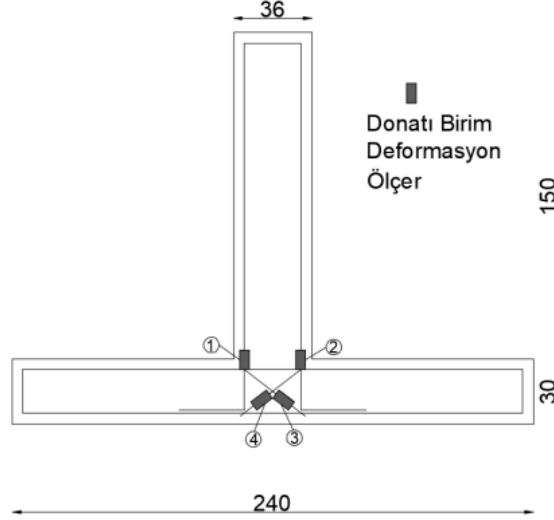
Şekil 3.24.Deney Elemanı-3'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

Deney elemanı-4 için toplamda altı adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı birim deformasyon ölçerler, ön yüz diyagonal CFRP birim deformasyon için kullanılmıştır. 3 ve 4 numaralı birim deformasyon ölçerler, arka yüz diyagonal CFRP birim deformasyon için kullanılmıştır. 5 ve 6 numaralı birim deformasyon ölçerler ise, kiriş boyuna donatıları birim deformasyonları için konulmuştur. Tüm birim deformasyon ölçerler aynı numaralı kanallara yerleştirilmiştir. Deney elemanı-4'e ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.25'de gösterilmiştir.



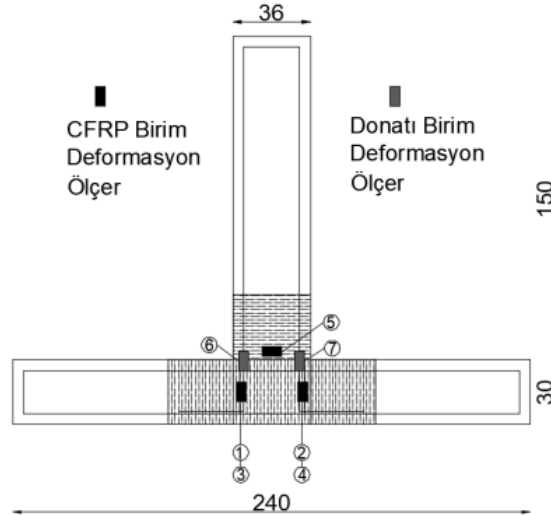
Şekil 3.25. Deney Elemanı-4'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

Deney elemanı-5 ve 6 için her birinde dört toplamda sekiz adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı birim deformasyon ölçerler, kiriş boyuna donatıları deformasyonları için konulmuştur. 3 ve 4 numaralı birim deformasyon ölçerler, düğüm noktası çapraz güçlendirme donatıları birim deformasyonları için kullanılmıştır. Tüm birim deformasyon ölçerler aynı numaralı kanallara yerleştirilmiştir. Deney elemanı-5 ve 6'ya ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Deney Elemanı-5 ve 6'da donatı ve çapraz güçlendirme birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

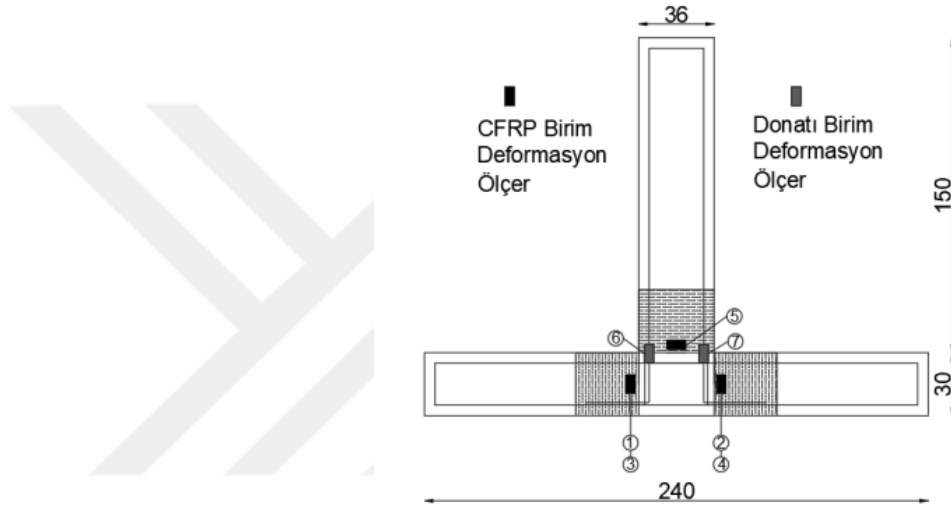
Deney elemanı-7 için toplamda yedi adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı ölçerler, ön yüz düşey CFRP birim deformasyonlar için konulmuştur. 3 ve 4 numaralı ölçerler, arka yüz düşey CFRP birim deformasyonlar için konulmuştur. 5 numaralı birim deformasyon ölçer ise, ön yüz yatay CFRP birim deformasyon ölçümleri için kullanılmıştır. 6 ve 7 numaralı birim deformasyon ölçerler ise, kiriş boyuna donatıları birim deformasyonları için konulmuştur. Deney elemanı-7'ye ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Deney Elemanı-7'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

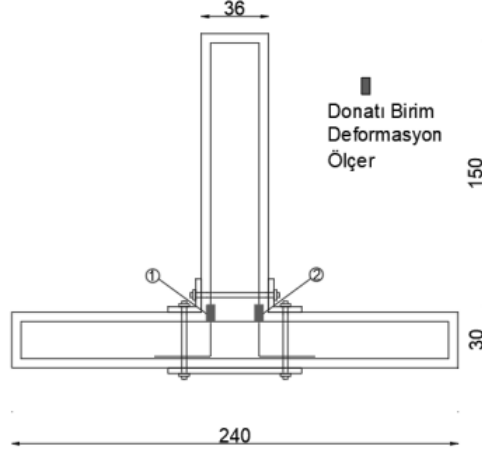


Deney elemanı-8 için toplamda yedi adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı ölçerler, ön yüz düşey CFRP birim deformasyonları için konulmuştur. 3 ve 4 numaralı birim deformasyon ölçerler, arka yüz düşey CFRP birim deformasyonları için kullanılmıştır. 5 numaralı birim deformasyon ölçer, ön yüz yatay CFRP birim deformasyon ölçümleri için kullanılmıştır. 6 ve 7 numaralı birim deformasyon ölçerler ise, kiriş boyuna donatıları birim deformasyonları için konulmuştur. Tüm birim deformasyon ölçerler aynı numaralı kanallara yerleştirilmiştir. Deney elemanı-8'e ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Deney Elemanı-8'de donatı ve CFRP birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

Deney elemanı-9 için toplamda iki adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı ölçerler, kiriş boyuna donatıları deformasyonları için konulmuştur. Tüm birim deformasyon ölçerler aynı numaralı kanallara yerleştirilmiştir. Deney elemanı-9'a ait birim deformasyon ölçer yerleşim detayı Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Deney Elemanı-9'da donatı birim deformasyon ölçer yerleşim detayı

### 3.4.4 Birleşim Bölgesi Kesme Deformasyonlarının Hesabı

Birleşim bölgeleri, enine donatı eksikliği nedeniyle kesme etkilerine karşı zayıf kalmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışma kapsamında birleşim bölgelerine yerleştirilen potansiyometrik cetvellerle elde edilen deformasyonlar yardımıyla birleşim bölgesindeki kesme deformasyonları aşağıda verilen formülasyon (Denklem-2) ile hesaplanmıştır.

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{d_1^2 - b^2} - \sqrt{d_2^2 - b^2}}{2b} \right) \quad (2)$$

$\gamma$ : Kayma Deformasyonu (rad)

**a** ve **b**: Deforme olmamış birleşim bölgesi boyutları

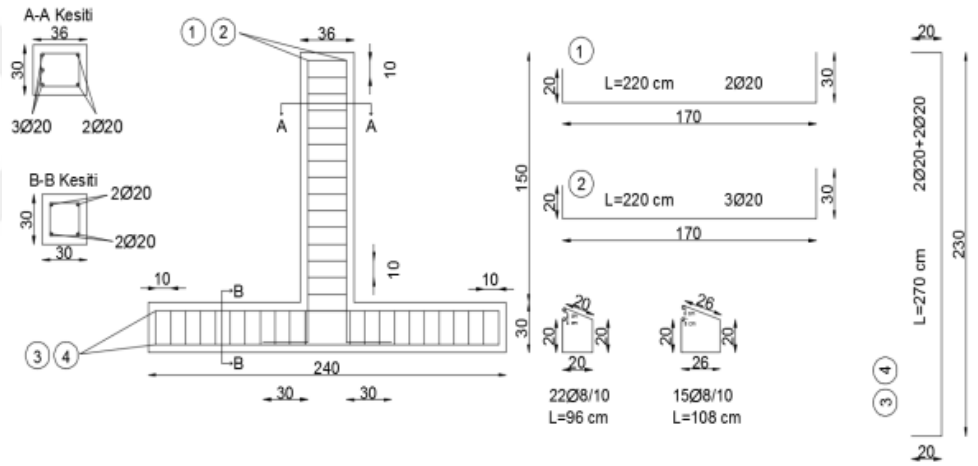
**d<sub>1</sub>** ve **d<sub>2</sub>**: Potansiyometrik cetvellerin gösterge uzunlukları

## 4. BULGULAR

Bu deneysel çalışma TÜBİTAK'ın 315M084 numaralı 1001 projesi kapsamında yapılmıştır. Bu deneysel çalışmanın bulguları mekanik ve akustik emisyon olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında mekanik sonuçlarla ilgili bulgular ayrıntılı olarak verilmektedir. Menteşoğlu (2019), tez çalışmasında bu deneyin akustik emisyon sonuçlarından detaylı bir şekilde bahsetmektedir.

### 4.1 Deney Elemanı-1

Deney elemanında düğüm noktası ile birlikte kiriş ve kolonda etriye sıklaştırması yapılmamıştır. Referans numunesi olarak kullanılacaktır. Deney elemanı-1 Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



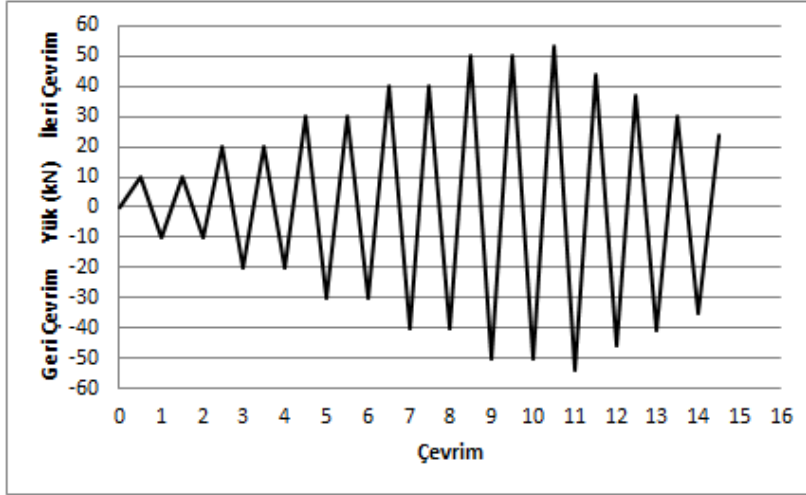
(a)



(b)

Şekil 4.1. Deney Elemanı-1 (a) donatı detayı (b) fotoğraf görünümü

Deney elemanına uygulanan yük-çevrim grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir. Deney elemanına 14 tam, 1 yarım yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. Deney Elemanı-1’e uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

## 2.Çevrim (-10 kN)

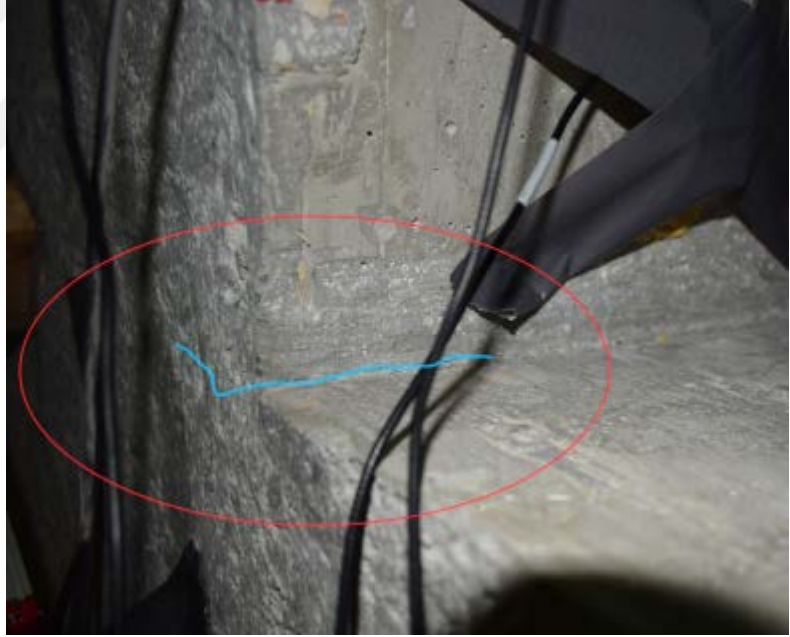
Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ birleşim noktasında kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

## 3.Çevrim (+20 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz sol birleşim noktasında kılcal çatlak oluşumu başlamıştır.

## 3.Çevrim (-20 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ birleşim noktasında ilk eğilme çatlağı oluşumu gözlenmiştir. Eğilme çatlağı, kiriş ön yüzüne doğru ilerlemiştir. Arka yüz düğüm ve birleşim noktalarında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Eğilme çatlağı oluşumu ve ilerlemesi Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.3.(a) ilk eğilme çatlak (b) eğilme çatlakının kiriş ön yüzde ilerlemesi

#### 5.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz sol birleşim noktasının kiriş mesnet yüzeyinde ikinci bir eğilme çatlak oluşmuştur. Eğilme çatlak, ön ve arka yüzde yatay bir şekilde ilerlemiştir.

#### 5.Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz diyagonal çatlak yatay duruma gelmiş ve çatallaşarak 5 cm kadar aşağı doğru ilerlemiştir. Arka yüzdeki çatlak yatayda ilerleyerek kirişin tarafsız ekseninden aşağı doğru ilerlemiştir. Kolon alt yüzünde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Arka yüz çatlak durumu Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4.Arka yüz çatlak durumu

#### 7.Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön ve arka düğüm noktasında diyagonal çatlaklar oluşmuştur. Ön ve arka diyagonal çatlak oluşumu Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



(a)





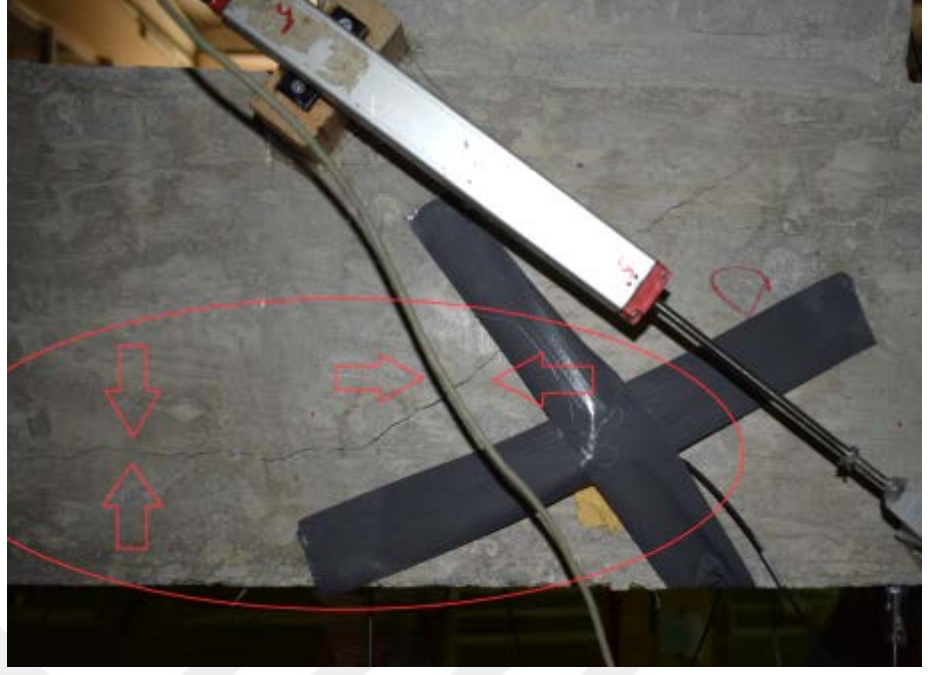
(b)

Şekil 4.5.(a) ön düğüm ve (b) arka düğüm diyagonal çatlak oluşumu

#### 7.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön ve arka yüz düğüm noktalarında diyagonal çatlaklar oluşmuştur. Diyagonal çatlaklar, kolon yüzünde yataylaşarak ilerlemiştir. Diyagonal çatlağın yataylaşması Şekil 4.6'da gösterilmiştir.





Şekil 4.6.Diyagonal çatlağın yataylaşması

#### 8.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön ve arka yüzdeki mevcut çatlaklar genişlemiştir. Kolon alt yüzde ilk eğilme çatlağı oluşmuştur.

#### 10.Çevrim (+50 kN)

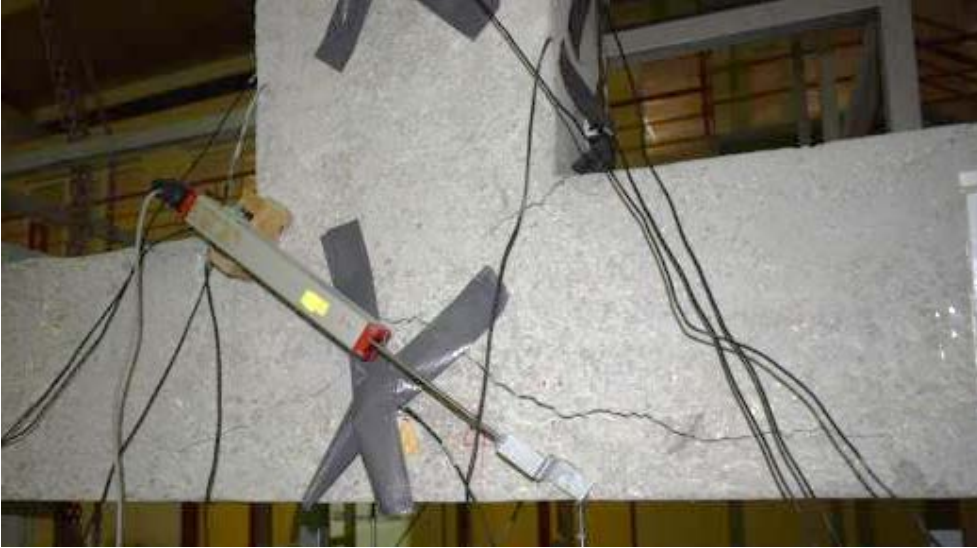
Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz sol birleşim noktasının yaklaşık 35 cm üzerinde eğilme çatlağı oluşmuştur. Mevcut diğer çatlaklar genişlemeye devam etmiştir. Eğilme çatlağı görünümü Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7.Eğilme çatlağı görünümü

#### 10.Çevrim (-50 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ birleşim noktasının yaklaşık 25 cm ve 50 cm üzerinde iki eğilme çatlağı oluşumu gözlenmiştir. Bu çevrimde 25 mm tepe deplasman değeri okunmuştur. Mevcut diyagonal çatlaklar genişlemeye devam etmiştir. Ön yüz düğüm noktası diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



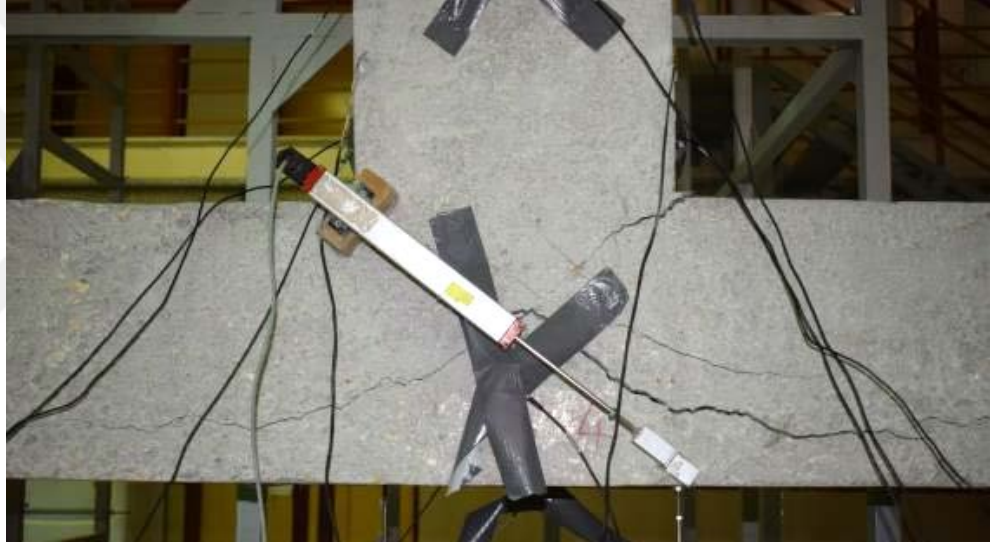
Şekil 4.8.Diyagonal çatlak görünümü

### 11.Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında numune, 53 kN'da düğüm noktası göçmesinden ötürü yük taşıyamamıştır. Donatılarda akma meydana gelmemiştir. Tepe deplasman 48 mm ölçülmüştür.

### 11.Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında numune, 54 kN'da düğüm noktası göçmesinden ötürü yük taşıyamamıştır. Donatılarda akma meydana gelmemiştir. Tepe deplasman 46 mm ölçülmüştür. Ön yüz düğüm noktası mevcut çatlak görünümü Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Düğüm noktası mevcut çatlak görünümü

### 12.Çevrim (+70 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, yükleme işlemine devam edilmiştir. 44 kN'da 58 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Ön yüz sağ birleşim noktasının yaklaşık 30 cm üzerinde ikinci bir eğilme çatlak oluşmuştur.

Bu aşamadan sonra maksimum tepe deplasmanı kontrolü için 2 tam ve 1 yarım yük çevrimi daha uygulanmıştır. Son yükleme sonucunda 90 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Yükleme sonucunda elemanın düğüm noktası göçmesinden gittiği görülmüştür. Yükleme sonunda eleman büyük bir hasara

maruz kalmıştır. Ön ve arka düğüm noktası görünümü Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



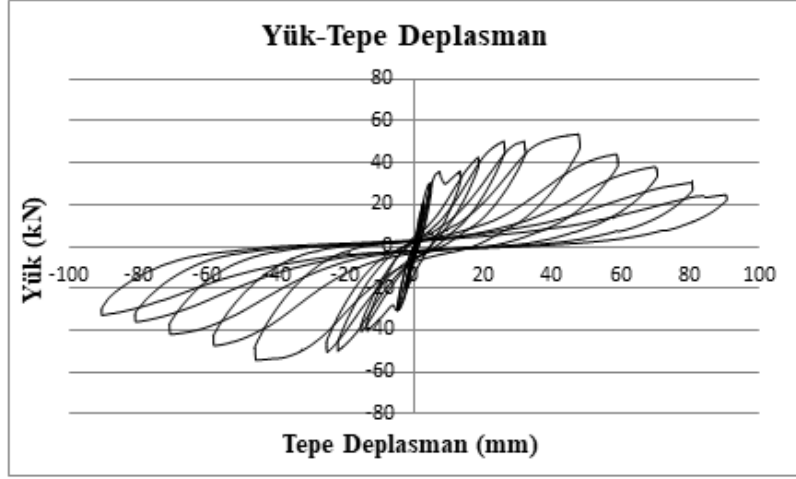
(a)



(b)

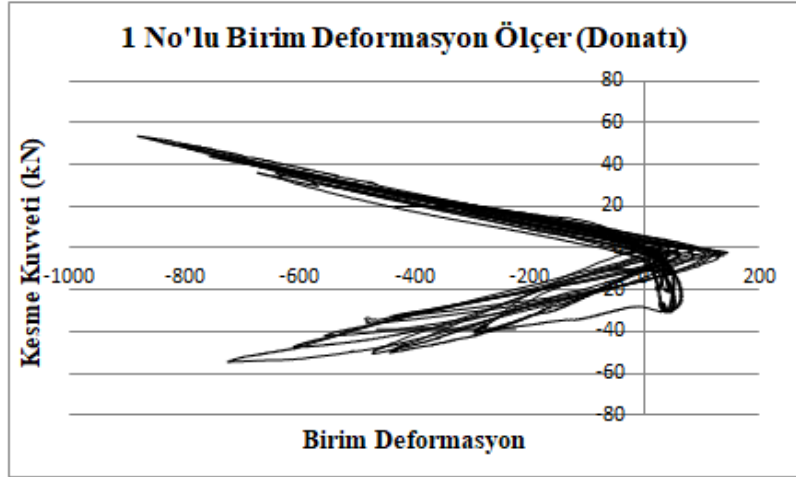
Şekil 4.10.(a) Ön ve (b) arka düğüm noktası görünümü

Deney sonrasında Deney Elemanı-1'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



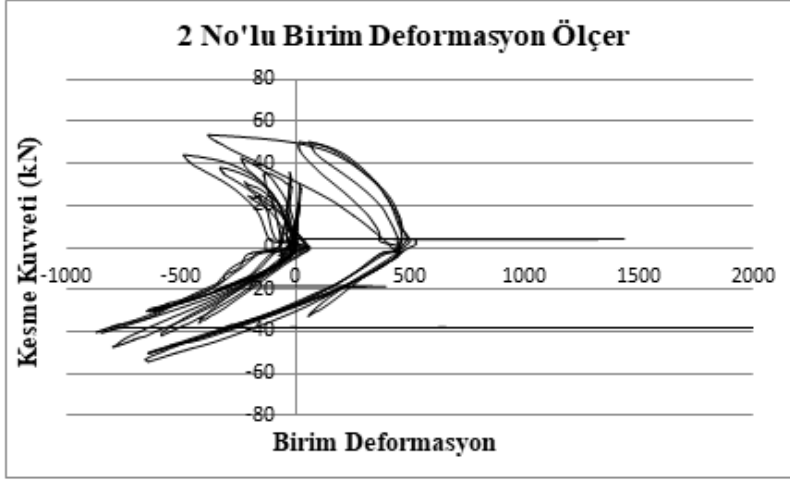
Şekil 4.11. Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-1 için kiriş boyunca donatılardaki birim deformasyonlar Şekil 4.12 ve 4.13’de verilmiştir.



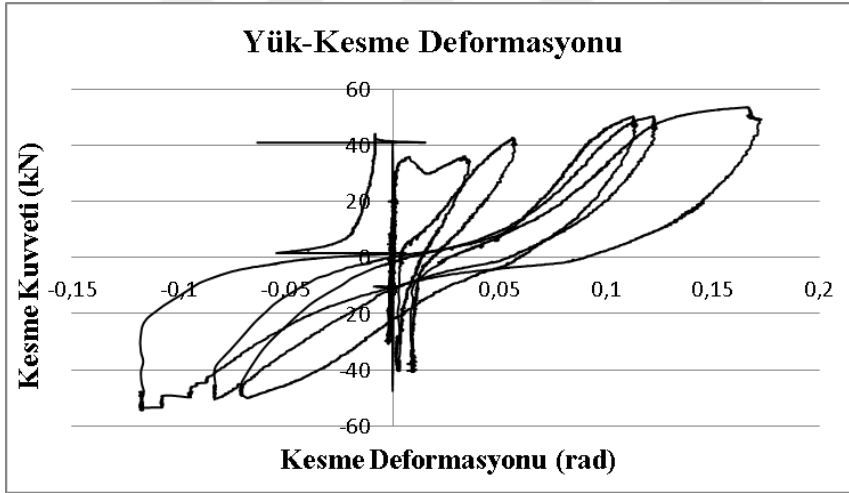
Şekil 4.12.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer





Şekil 4.13.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

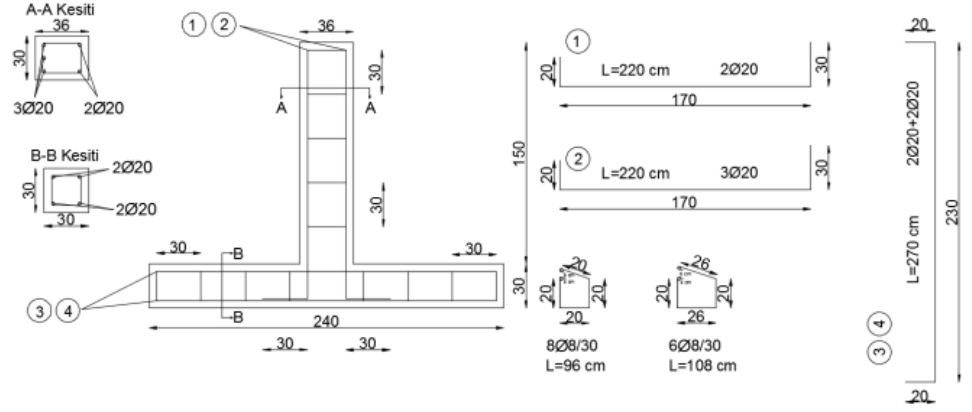
Deney Elemanı-1'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Yük-kesme deformasyonu grafiği

## 4.2 Deney Elemanı-2

Düğüm noktasına etriye yerleştirilmemiştir. Hedef ve güçlendirilen deney elemanları ile karşılaştırmak için üretilmiş elemandır. Özellikle eski betonarme yapılarda sıklıkla karşılaşılan açık aralıklı etriyenin etkileri için önemli bir numunedir. Deney Elemanı-2 Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



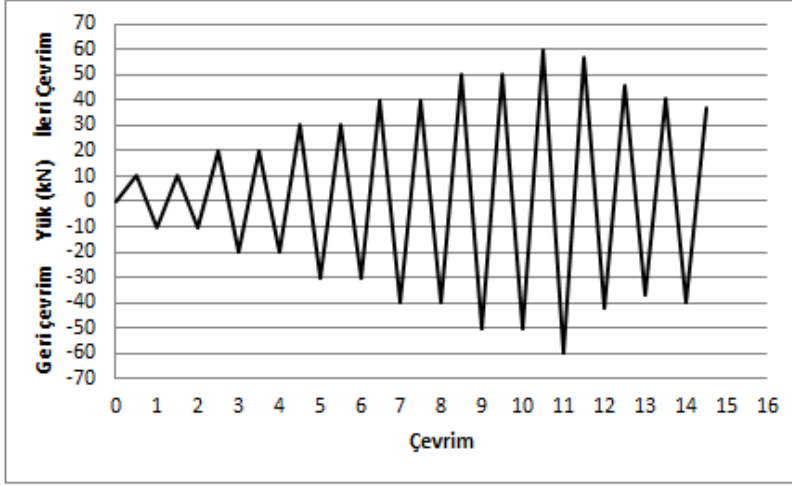
(a)



(b)

Şekil 4.15. Deney Elemanı-2 (a) donatı detayı (b) fotoğraf görünümü

Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.16'da verilmiştir. Deney elemanına 14 tam, 1 adet yarım yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.16.Deney Elemanı-2'ye uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

#### 4.Çevrim (+20 ve -20 kN)

Çevrimin ileri ve geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sağ yüzeyinde kılcal çatlaklar tespit edilmiştir. Yükleme sıfırlandığında kalıcı birim deformasyon 130 microstrain ( $\text{strain} \times 10^{-6}$ ) ölçülmüştür.

#### 5.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, düğüm noktasının ön yüz sol tarafındaki birleşim bölgesinde, kolon yüzünden itibaren kirişin 10 cm ve 23 cm yukarısında ilk eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Ön yüz düğüm noktasında yatay eğilme çatlakları oluşmuştur. Arka yüz düğüm noktasında kılcal düzeyde kesme ve eğilme çatlakları meydana gelmiştir. İlk eğilme çatlakları oluşumu Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

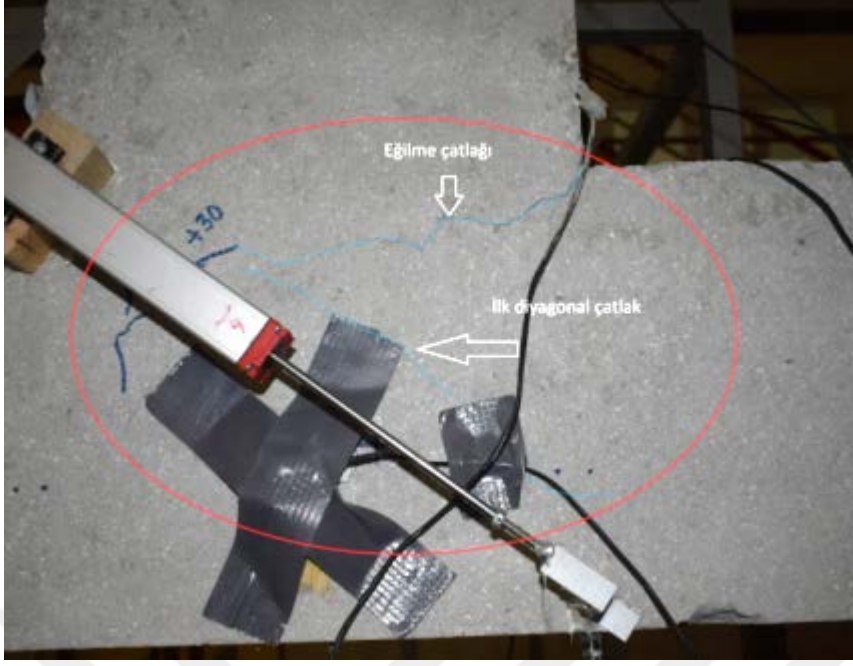




Şekil 4.17. İlk eğilme çatlakları oluşumu

#### 5.Çevrim (-30 kN)

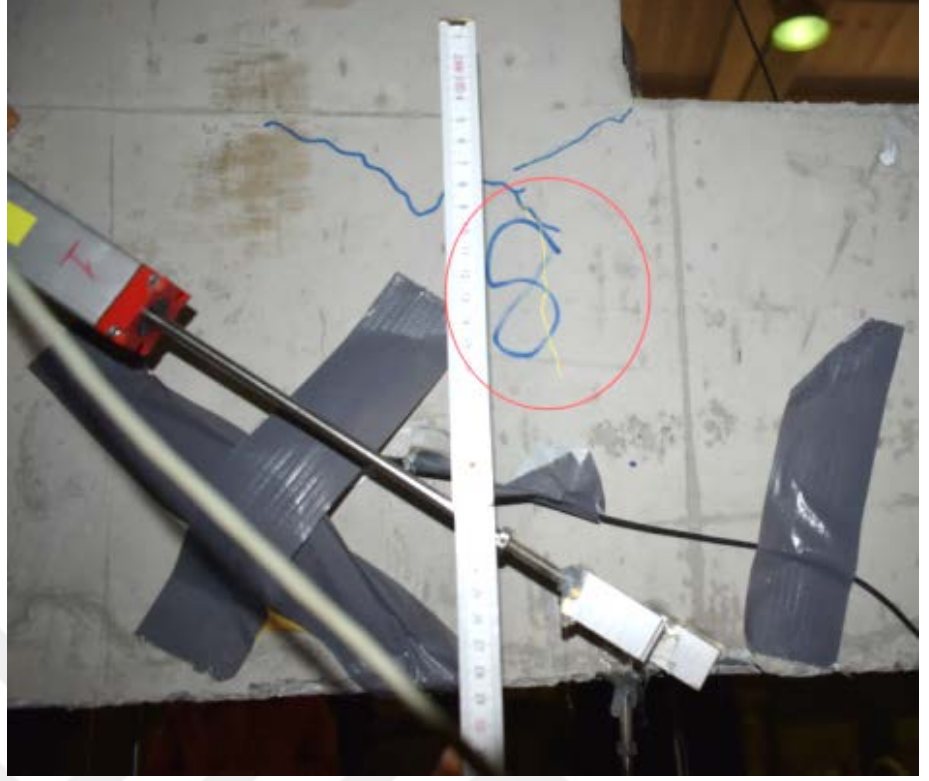
Çevrimin geri yükleme adımında, düğüm noktası ön yüzünde ilk diyagonal çatlaklar oluşmaya başlamış ve buradaki eğilme çatlakları büyümüştür. Ön yüz kolon alt yüzeyinin sol kısmında ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Ön yüz kiriş sağ yüzeyinde, kolon yüzünden itibaren kirişin 12 cm ve 18 cm’de eğilme çatlakları görülmüştür. Düğüm noktası ön yüzdeki ilk diyagonal çatlaklar ve eğilme çatlağı Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18.Dügüm noktası ön yüzdeki ilk diyagonal çatlak ve eğilme çatlağı

#### 6.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz kolon alt yüzeyinde, birleşim noktasının 13 cm sağ tarafında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Arka yüz düğüm noktasında, eğilme çatlağından itibaren aşağıya doğru 11 cm uzunluğunda düşey çatlak oluşmuştur. Düşey çatlak görünümü Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19.Düşey çatlak görünümü

#### 6.Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz düğüm noktasında eğilme çatlakları daha da açılmış ve eğilme çatlaklarından aşağıya doğru düşey çatlak oluşmuştur. Arka yüz düğüm noktasındaki diyagonal çatlak iyice belirginleşmiş ve eğilme çatlakları kolon-kiriş birleşimine doğru ilerlemiştir. Ara yüz diyagonal ve eğilme çatlakları görünümü Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Arka yüz diyagonal ve eğilme çatlakları görünümü

#### 7.Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, düğüm noktası ön ve arka yüzünde yeni diyagonal çatlaklar görülmüştür. Arka yüz, kirişin sağ yüzeyinde, kiriş ön yüzünde düğüm noktasının 10 cm ve 24 cm yukarısındaki eğilme çatlakları kiriş arka yüzüne doğru ilerlemiştir. Eğilme çatlakları görünümü Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Eğilme çatlakları görünümü

### 7.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön ve arka düğüm noktası diyagonal çatlakları belirginleşmiştir. Kolon alt yüzündeki eğilme çatlağı büyümüştür. Düğüm noktasının ön yüz sağ tarafında kirişteki eğilme çatlağı, kiriş ön yüzüne doğru ilerlemiştir. Kolon alt yüz eğilme çatlağı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22.Kolon alt yüz eğilme çatlağı görünümü

### 8.Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, arka yüzde mevcut çatlaklar durumunu korumaya devam etmiştir. Ön yüzden bakıldığında, kolon sol yüzünün 24 cm yukarısında yer alan eğilme çatlağı, kolon ön yüzüne doğru 10 cm ilerlemiştir.

### 8.Çevrim (-40 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımında, ön ve arka yüzdeki mevcut çatlaklar durumunu korumaya devam etmiştir.

### 9.Çevrim (+50 kN)

Bu çevrimin ileri yükleme adımında, düğüm noktası ön yüzdeki diyagonal çatlaklar genişlemiştir. Arka yüzdeki diyagonal çatlaklar da oldukça belirginleşmiştir.

#### 9.Çevrim (-50 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımında, ön yüzdeki diyagonal çatlak yaklaşık 2 mm genişliğe ulaşmıştır. Ön yüzün sağ tarafında, birleşim bölgesindeki eğilme çatlağı oldukça büyümüştür. Arka yüzdeki diyagonal çatlaklar yaklaşık 3 mm genişliğe ulaşmıştır.

#### 10.Çevrim (+50 kN)

Bu çevrimin ileri yükleme adımında, ön ve arka yüzdeki mevcut çatlaklar durumunu korumaya devam etmiştir.

#### 10.Çevrim (-50 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz ve arka yüzdeki diyagonal çatlaklar büyümüştür. Ayrıca eğilme çatlaklarının genişliğinde de artış görülmüştür.

#### 11.Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, birleşim noktasının ön ve arka yüzündeki diyagonal çatlaklar ve eğilme çatlakları büyümeye devam etmiştir.

#### 11.Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 52 kN'da akma meydana gelmiştir. Mevcut çatlaklar büyümüştür. Kolon alt yüzündeki çatlak daha da belirginleşmiştir.

#### 12.Çevrim (+70 kN)

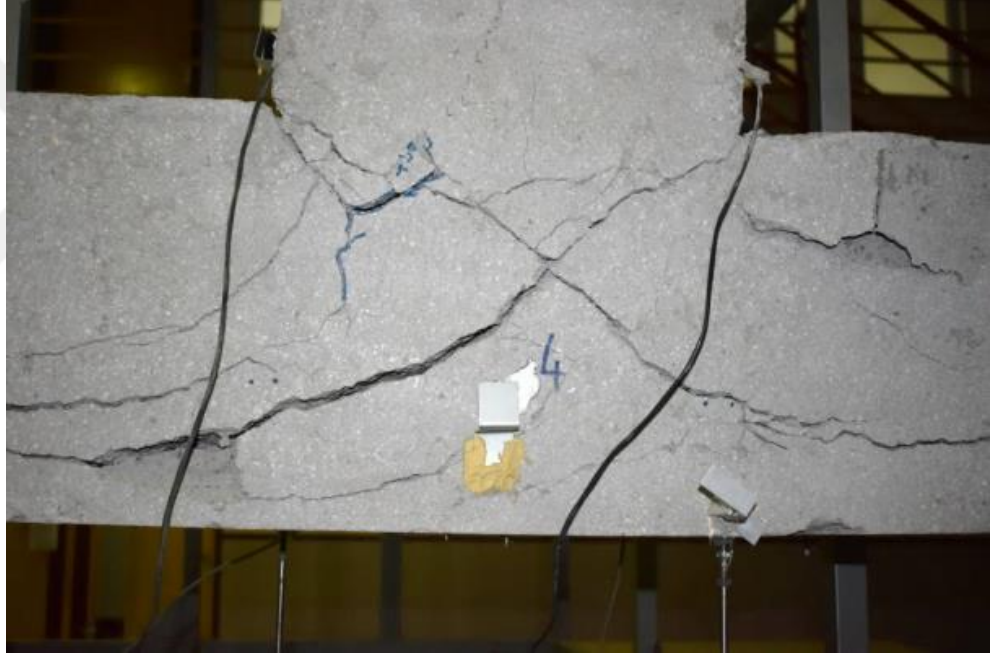
Bu çevrimin ileri yükleme adımında, ön ve arka yüzdeki çatlaklar büyümeye devam etmiştir. Kolonda herhangi bir göçme meydana gelmemiştir. 57 kN değerinde yükleme durdurulmuştur ve 45 mm tepe deplasmanı ölçülmüştür.



## 12.Çevrim (-70 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımında mevcut çatlaklar büyümeye devam etmiştir. 42 kN değerinde yükleme durdurulmuş ve 70 mm tepe deplasmanı oluşmuştur.

12. çevrim sonunda maksimum tepe deplasmanı kontrolü için 2 tam çevrim ve 1 yarım çevrim daha yapılmıştır. Yükleme sonunda elemanın bir yönde eğilmeye gittiği görülmüştür ancak diğer yönde düğüm noktası göçmesinden ötürü hızlı bir güç tükenmesi meydana gelmiştir. Düğüm noktası göçmesinden ötürü rijitliğini kaybettiği belirlenmiştir. Yükleme sonunda eleman büyük bir hasara maruz kalmıştır. Birleşim noktası ön ve arka genel görünümü Şekil 4.23'de verilmiştir.



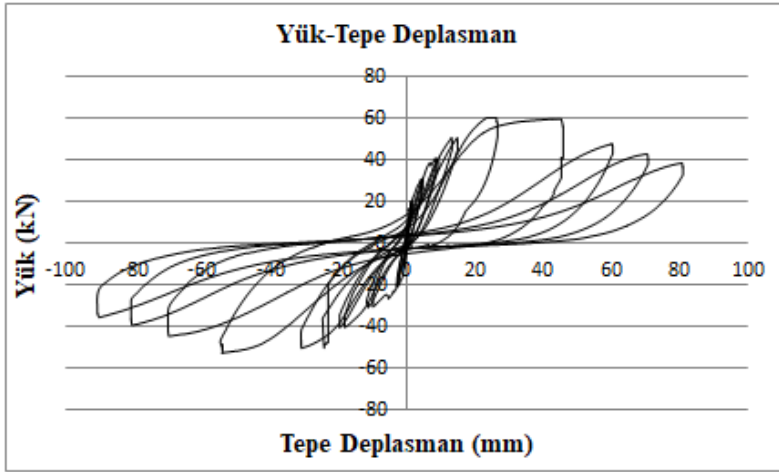
(a)



(b)

Şekil 4.23. Yükleme sonrası nihai durum düğüm noktası (a) ön ve (b) arka genel görünümü

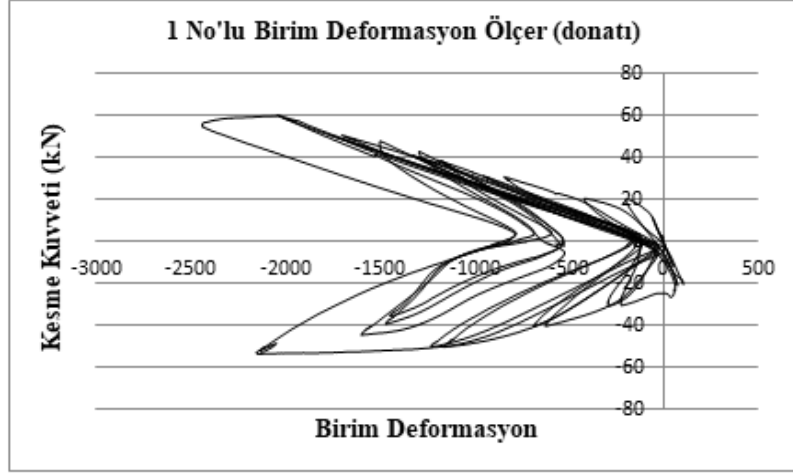
Deney sonrasında Deney Elemanı-2'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.24'de gösterilmiştir.



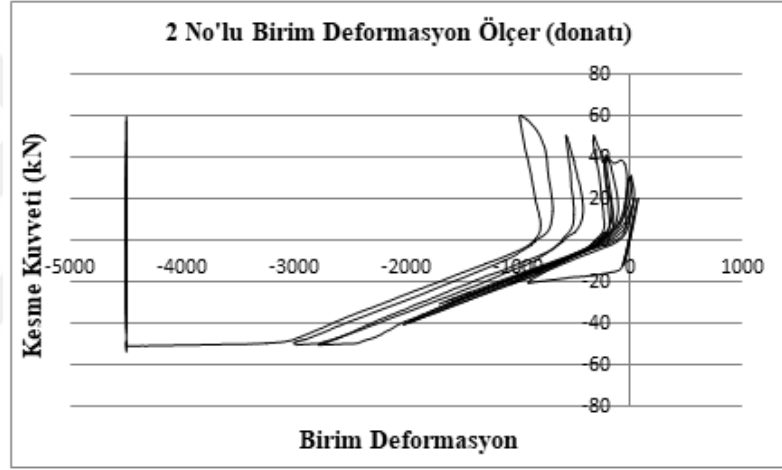
Şekil 4.24. Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-2 için kiriş boyuna donatılarındaki birim deformasyonlar Şekil 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.





Şekil 4.25.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

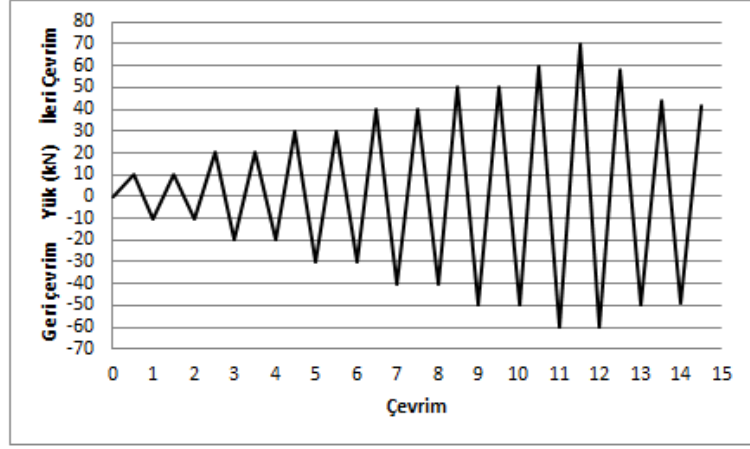


Şekil 4.26.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

Deney Elemanı-2'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Deney elemanına 14 tam, 1 adet yarım yük çevrimi uygulanmıştır. Deney Elemanı-3'e uygulanan yük-çevrim grafiği Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Deney Elemanı-3'e uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

### 3. Çevrim (+20 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, çapraz CFRP'lerde yaklaşık 50 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür.

### 4. Çevrim (-20 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sağ yüzeyinde ilk eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. İlk eğilme çatlakları Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



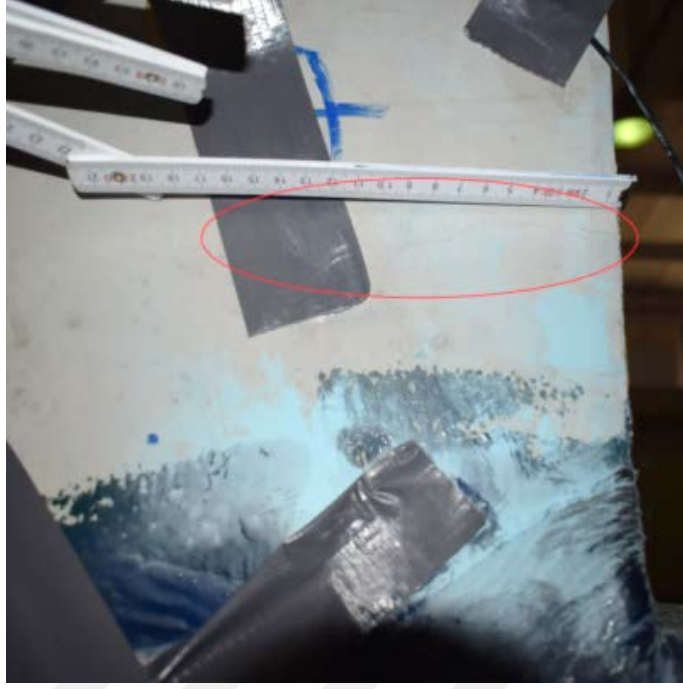
Şekil 4.30. İlk eğilme çatlaklı görünümü

#### 5. Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz kiriş sol yüzeyinde düğüm noktasının 15 ve 26 cm yukarısında eğilme çatlaklı gözlemlenmiştir. 15 cm'deki eğilme çatlaklı kiriş arka yüzünde yatayda 14 cm ilerlemiştir. Eğilme çatlaklı görünümü ve eğilme çatlaklı'nın kiriş arka yüzündeki ilerlemesi Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.31.(a) Eğilme çatlakları görünümü ve (b) eğilme çatlağının kiriş arka yüzündeki ilerlemesi

#### 5. Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş düşey donatısında 200 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Ön yüz kiriş sağ yüzeyinde düğüm noktasının 14 cm yukarıdaki eğilme çatlağı, kiriş ön yüzünde sola doğru yaklaşık 5 cm ilerlemiştir. Arka yüz kiriş sol yüzeyinin 28 cm yukarısında ikinci eğilme çatlağı gözlenmiş ve kiriş arka yüzünde sağa doğru yaklaşık 8 cm ilerlemiştir.

#### 6. Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, mevcut eğilme çatlakları durumunu korumuştur.

#### 6. Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, arka yüz kiriş sol yüzeyinin 28 cm yukarıdaki eğilme çatlağı, kiriş ön yüzünde sola doğru yaklaşık 14 cm ilerlemiştir. Eğilme çatlağı ilerlemesi Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.32.Eğilme çatlağı ilerlemesi

#### 7. Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 37 kN'da CFRP-beton birleşiminde ayrışmadan ötürü sesler duyulmaya başlanmıştır ve CFRP'de ayrışma meydana gelmiştir. Düşüm noktasında gözle görünür bir çatlak oluşumu görülmemiştir. Kiriş düşey donatısında 2600 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Arka yüz kiriş sağ yüzeyinin 15 cm yukarısındaki eğilme çatlağı iyice belirginleşmiş ve kiriş arka yüzünde ilerlemiştir.

#### 7. Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, gözle görünür herhangi bir çatlak veya CFRP ayrışması görülmemesine rağmen yükmeden ötürü CFRP-beton birleşiminden ayrışma sesleri duyulmuştur. Histerezis eğrisinde, 36 kN'da küçük bir rijitlik kaybı olduğu görülmüştür. Kiriş sağ ve sol eğilme çatlakları durumunu korumakla beraber, kiriş ön ve arka yüzeyindeki eğilme çatlakları ilerlemesi devam etmiştir.

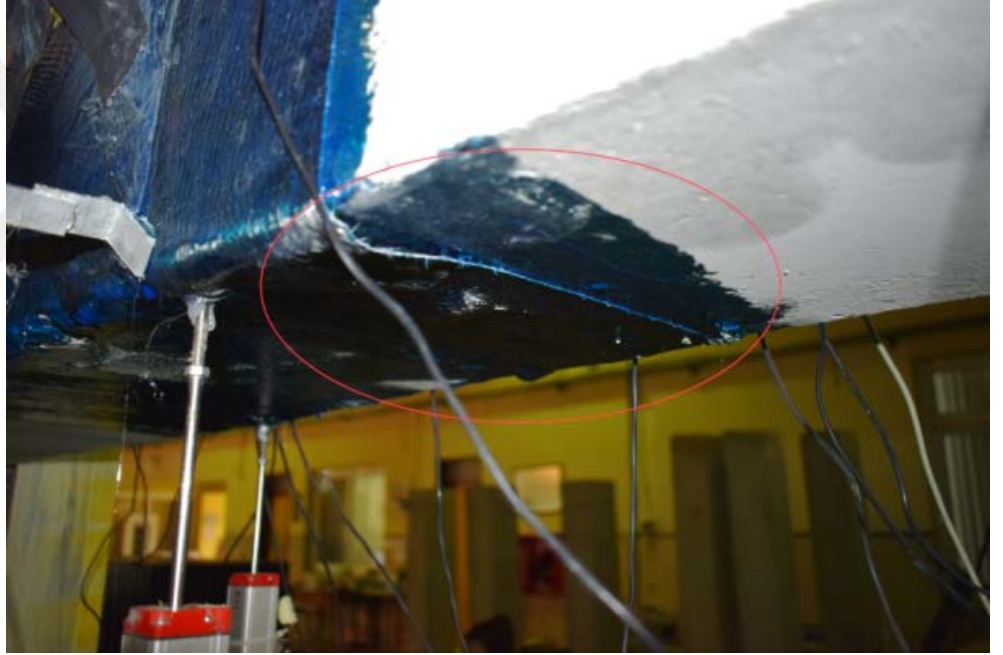


#### 8. Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, kiriş boyuna donatısında 2145 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Gözle görünür herhangi yeni bir çatlak oluşumu görülmemiştir ve mevcut çatlaklar durumunu korumuştur.

#### 9. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 48 kN'da histeresis eğride biraz daha rijitlik kaybı görülmüştür. CFRP'de ayrışma sesleri gelmeye devam etmiştir. Arka yüz kolon sağ alt yüzeyinde CFRP'de ayrışma ve kolon sol arka yüzeyinde düğüm noktasının 15 cm sol tarafında kopma başlangıcı görülmüştür. CFRP ayrışma görünümü Şekil 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.33.CFRP ayrışma görünümü

#### 9. Çevrim (-50 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş düşey donatısında 2800 micro-strain kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Mevcut çatlaklar durumunu korumuştur. Ön yüz düğüm noktası genel görünümü Şekil 4.34'de gösterilmiştir.



Şekil 4.34.Ön yüz düğüm noktası genel görünümü

#### 11. Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımımda, kiriş düşey donatısında 3920 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Ön yüz kiriş sol yüzeyindeki eğilme çatlakları genişlemiştir. Arka yüz düğüm noktasının sağ üst köşesinden sol alt köşesine doğru CFRP liflerinin zayıf eksenini doğrultusunda ayrışma görülmüştür. CFRP'nin ayrışması Şekil 4.35'de gösterilmiştir.





Şekil 4.35.CFRP'nin ayrışması

#### 11. Çevrim (-60 kN)

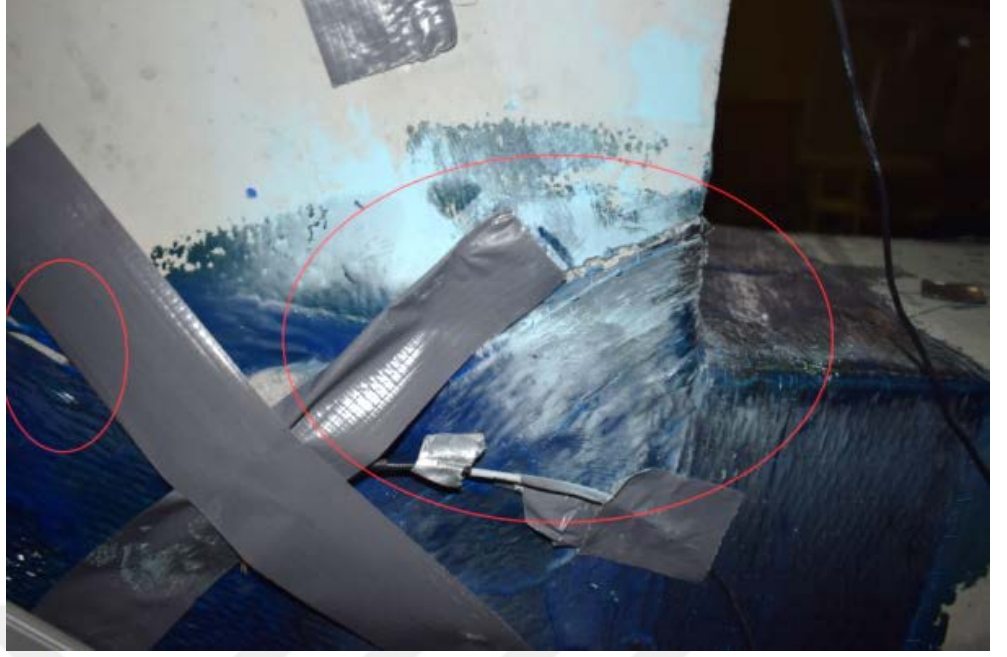
Çevrimin geri yükleme adımında, 52 kN'dan itibaren şiddetli ayrışma sesleri duyulmuştur. 59 kN'da numunede akma meydana gelmiştir ve 35 mm deplasman ölçülmüştür. Numunede bir yönde eğilme göçme durumu meydana gelmiştir. Eğilme çatlakları, CFRP bitiminde meydana gelmiştir (Şekil 4.36). Diğer yönde kiriş eğilmeye gitmeden CFRP'lerin kopması sebebiyle düğüm noktası göçmesi ile rijitlik kaybı yaşamıştır ancak sistemde ani güç tükenmesi meydana gelmemiştir.



Şekil 4.36.CFRP bitiminde eğilme çatlağı oluşumu

## 12. Çevrim (+70 kN)

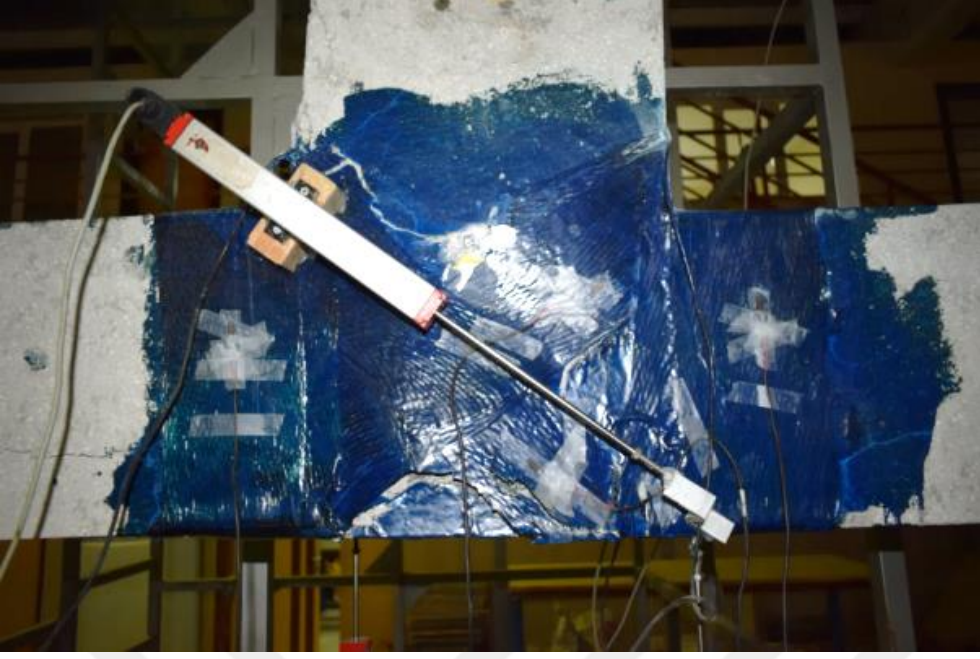
Çevrimin ileri yükleme adımında, yükleme sonunda 42 mm deplasman ölçülmüştür. Histeresis eğride rijitlik kaybı iyice görülmüştür. Ön yüz düğüm noktasının sol tarafında CFRP altında meydana gelen diyagonal çatlaklar pas payına doğru ilerlemiştir. Ön ve arka yüz düğüm noktasında CFRP ayrılması devam etmiştir. Arka yüz CFRP ayrılması Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



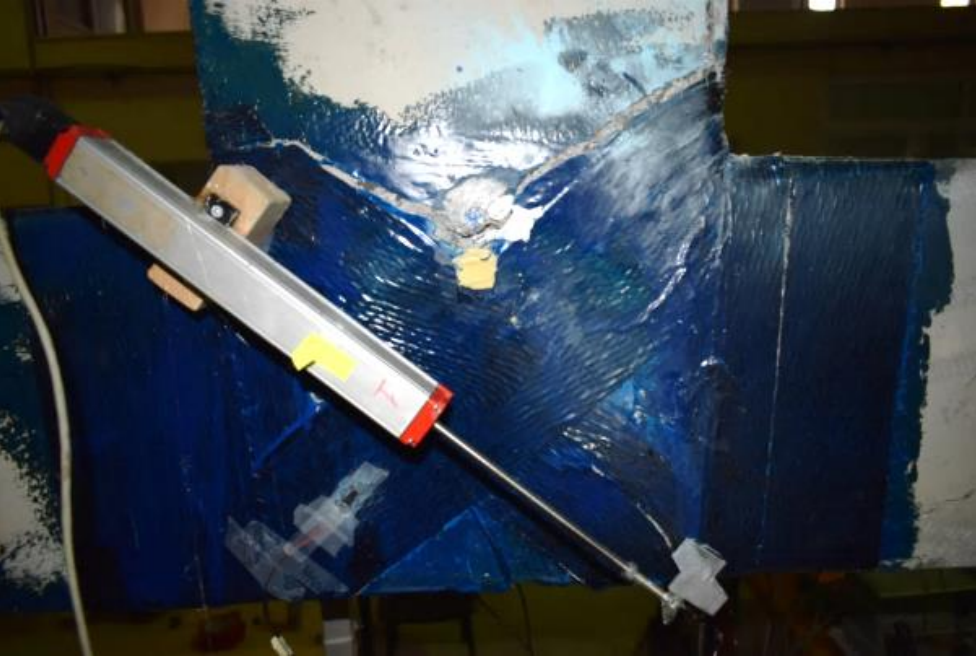
Şekil 4.37.Arka yüz CFRP ayrılması

#### 12. Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, çapraz CFRP’de 4600 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Deplasman 55 mm olduğunda yükleme 60 kN’da durdurulmuştur. Bu yüklemeden sonra 2 tam ve 1 yarım çevrim daha yapılmış ve numunenin yapacağı maksimum deplasman ölçülmüştür. Deney sonunda numunede meydana gelen hasarlar Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40’da gösterilmiştir.



Şekil 4.38.Düğüm noktası ön yüz hasar durumu



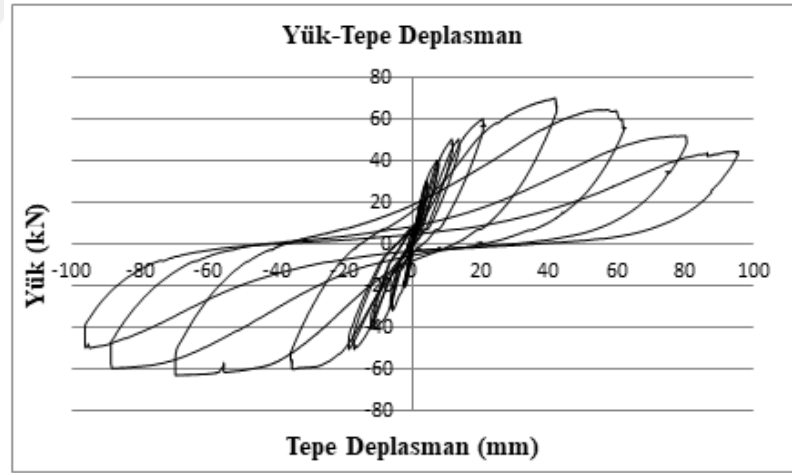
Şekil 4.39.Düğüm noktası arka yüz hasar durumu





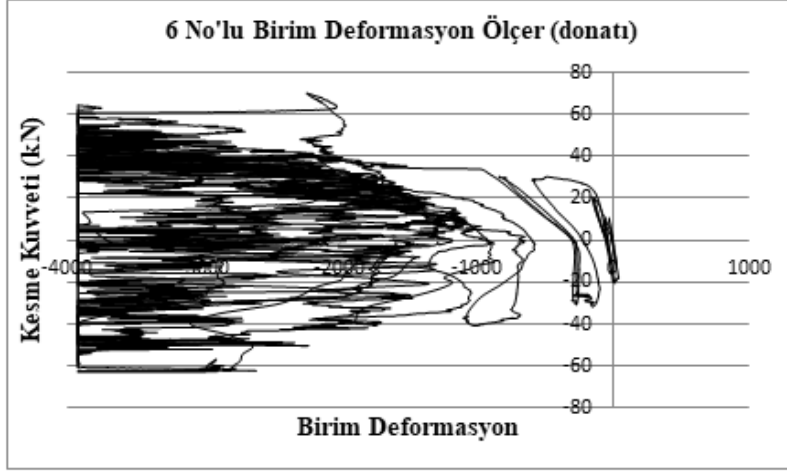
Şekil 4.40.Kiriş sol yüz eğilme çatlakları

Deney sonrasında Deney Elemanı-3'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.41'de gösterilmiştir.

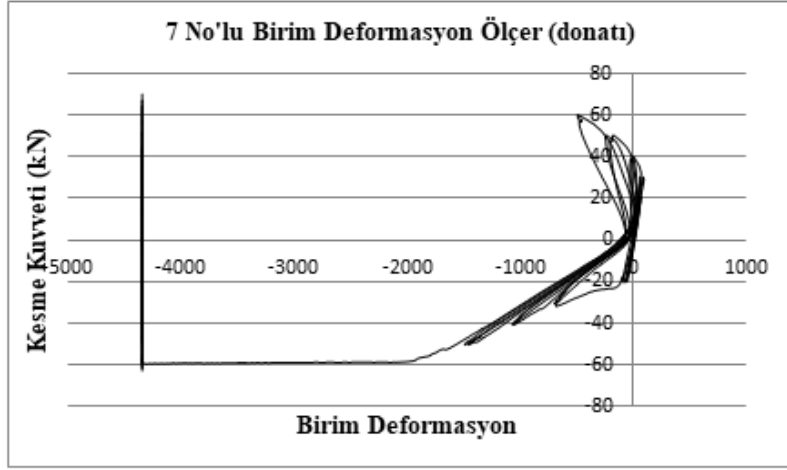


Şekil 4.41.Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-3 için kiriş boyunca donatılarındaki birim deformasyonlar Şekil 4.42 ve 4.43'de gösterilmiştir.

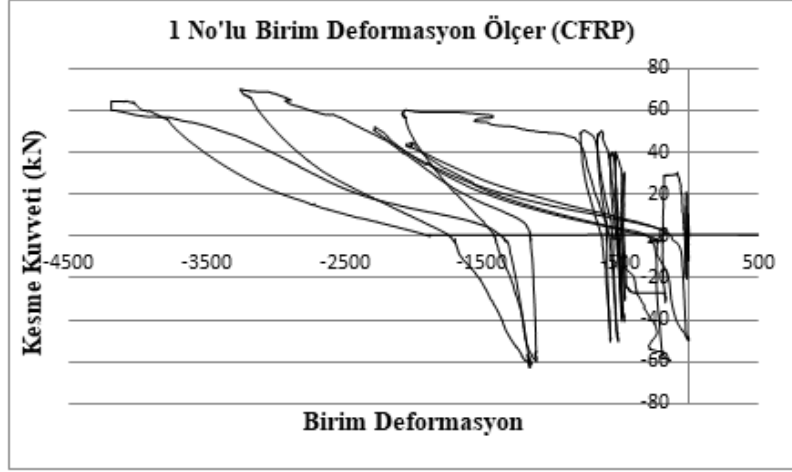


Şekil 4.42.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

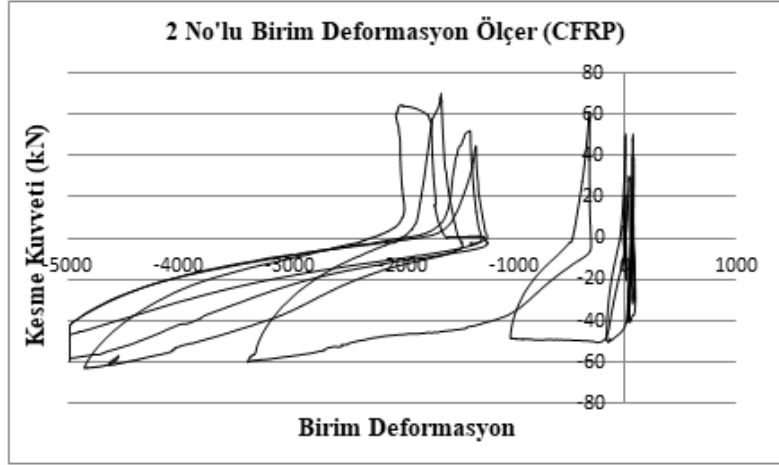


Şekil 4.43.7 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

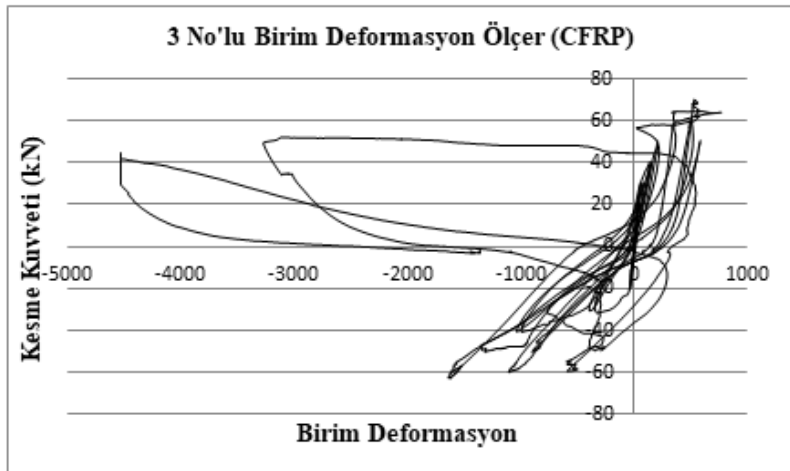
Deney Elemanı-3 için CFRP şeritlerindeki birim deformasyonlar Şekil 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 ve 4.48'de gösterilmiştir.



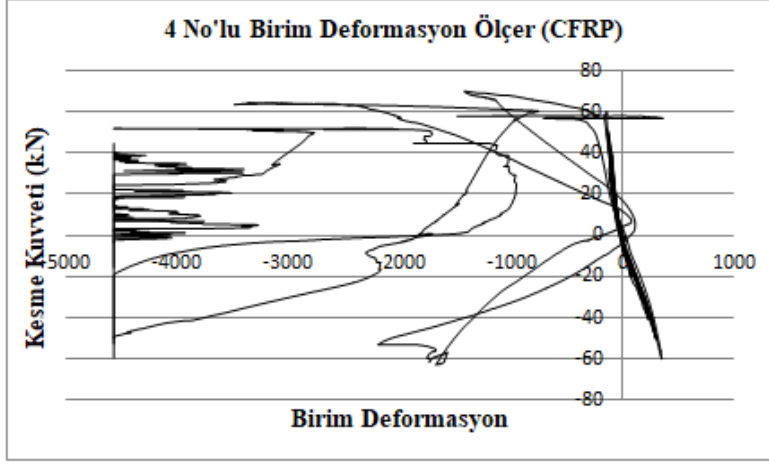
Şekil 4.44.Ön düşey sol CFRP birim deformasyon ölçer



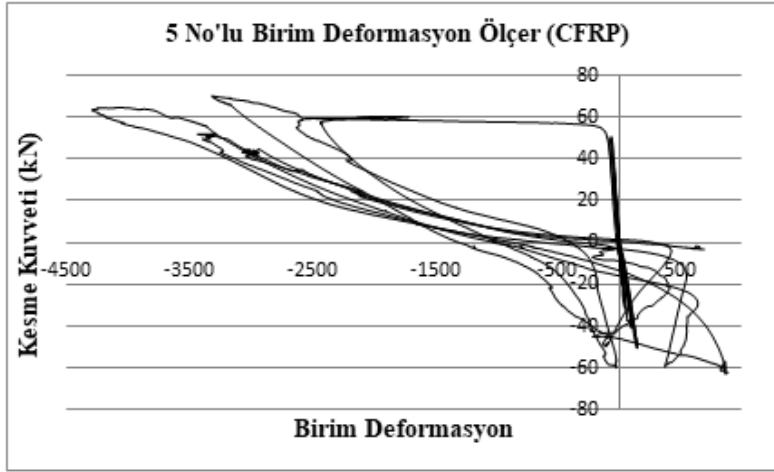
Şekil 4.45.Ön düşey sağ CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.46.Ön çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer



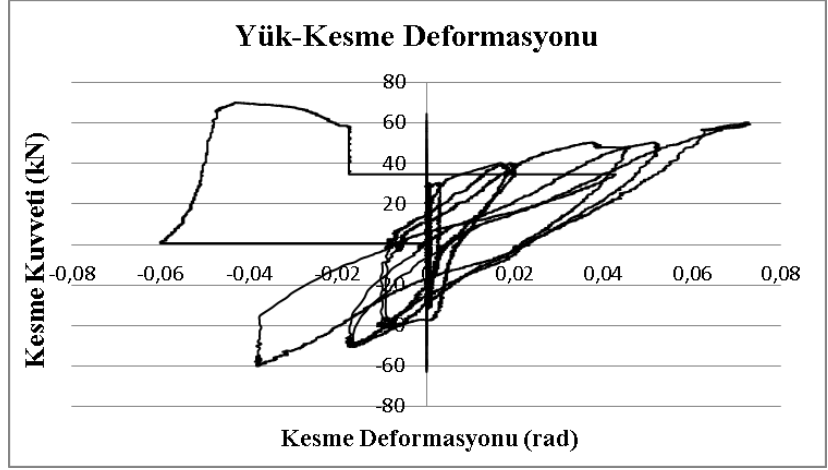
Şekil 4.47.Ön çapraz (alt sağdan üst sola) CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.48.Arka çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer

Deney Elemanı-3'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.49'da gösterilmiştir.





Şekil 49.Yük-kesme deformasyonu grafiği

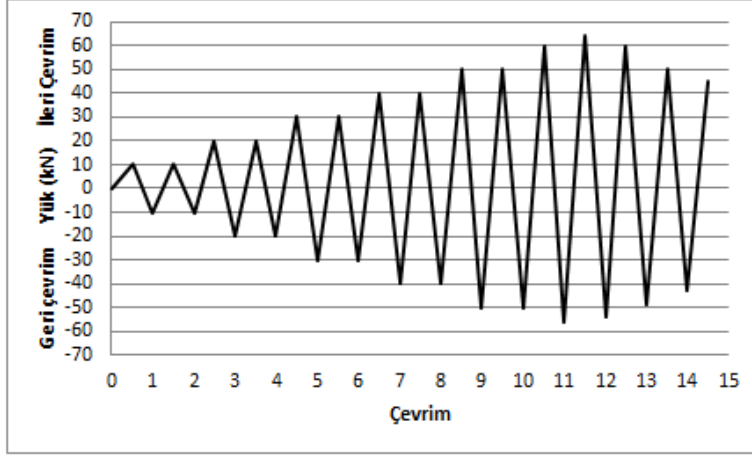
#### 4.4 Deney Elemanı-4

Deney Elemanı-2 ile aynı donatı detayına sahiptir. Numune düğüm noktasında 45<sup>o</sup>lik açıyla çapraz olarak sarılmış 150 mm genişliğinde CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Bu numune bir önceki kolonda sargının devam ettirilmesi durumu ile kıyaslanmak üzere yapılmıştır. Deney Elemanı-4 Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.50.Deney Elemanı-4 genel görünümü

Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.51'de verilmiştir. Deney elemanına 15 tam 1 yarım yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.51.Deney Elemanı-4'e uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

### 3. Çevrim (-20 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sağ yüzeyinde birleşimin yaklaşık 19 cm yukarısında ilk eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir. Düğüm noktalarında ve kolon alt yüzünde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

### 4. Çevrim (+20 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz kiriş sol yüzeyinde birleşimin yaklaşık 17 cm yukarısında ilk eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir.

### 5. Çevrim (+30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş sol yüzünde oluşan 17 cm'deki eğilme çatlak ilerleyerek birleşimin 13 cm yukarısında kiriş arka yüzüne ulaşmıştır. Düğüm noktalarında herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamıştır.

### 5. Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş sağ yüzünde oluşan 19 cm'deki eğilme çatlak ilerleyerek kiriş ön yüzüne ulaşmış ve 13 cm ilerlemiştir. Eğilme çatlakının kiriş ön yüzündeki ilerlemesi Şekil 4.52'de gösterilmiştir.



Şekil 4.52.Eğilme çatlağının kiriş ön yüzünde ilerlemesi

#### 6. Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, kiriş sol yüzünde oluşan 17 cm'deki eğilme çatlağı kiriş arka yüzünde ilerlemiştir. Eğilme çatlağının kiriş arka yüzünde ilerlemesi Şekil 4.53'de gösterilmiştir.



Şekil 4.53.Eğilme çatlağının kiriş arka yüzünde ilerlemesi

#### 6. Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, CFRP'nin betondan ayrılmaya başlamasıyla sesler gelmiştir. Ön yüz kiriş sağ yönündeki çatlak genişlemiştir ve kiriş arka yüzüne ilerlemiştir. Kolon alt yüzünde çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

#### 7. Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 35 kN'dan itibaren CFRP'den şiddetli sesler gelmeye devam etmiştir. Ön yüz kiriş sol yüzündeki çatlak kiriş ön yüzünde 2-3 cm ilerlemiştir. Ön yüz kolon sağ alt yüzünde ilk eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir.

#### 8. Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, CFRP'den sesler gelmeye devam etmiştir. Ön yüz kolon sol alt yüzünde eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir. Arka yüz sol tarafta düğüm noktasından çıkıp kolona paralel giden diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.54'de gösterilmiştir.



Şekil 4.54. Diyagonal çatlak görünümü

#### 9. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz sol tarafta düğüm noktasından çıkıp kolona paralel giden diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Ön yüz kolon sağ alt yüzündeki eğilme çatlağı kolon yüzüne ulaşmıştır. Diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.55’de gösterilmiştir.



Şekil 4.55.Diyagonal çatlak görünümü

#### 9. Çevrim (-50 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ tarafta düğüm noktasından çıkıp kolona paralel giden diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Ön yüz sol taraftaki diyagonal çatlak çatallaşarak kolon alt yüzüne ilerlemiştir. Ön yüz kiriş sağ yüzündeki eğilme çatlağı genişlemeye devam etmiştir. Kiriş düşey donatısında 1300 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür.

#### 10. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz sağ taraftaki diyagonal çatlak çatallaşmıştır. Ön yüz kiriş sol yüzeyinde birleşimin yaklaşık 50 cm yukarısında ikinci eğilme çatlağı oluşumu gözlenmiştir. Arka düğüm noktasında CFRP betondan ayrılmaya başlamıştır.



### 11. Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 56 kN'da numunede akma meydana gelmiştir ve 31 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Kiriş düşey donatısında 2025 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Mevcut eğilme çatlakları büyümeye devam etmiştir. Diyagonal çatlaklar kolon pas payına doğru ilerlemeye ve büyümeye devam etmiştir. Kiriş eğilmeye gitmeden CFRP'lerin kopması sebebiyle düğüm noktası göçmesi ile rijitlik kaybı yaşanmıştır ancak sistemde ani güç tükenmesi meydana gelmemiştir.

### 12. Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 45 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Mevcut çatlaklar genişlemeye ve CFRP betondan ayrılma devam etmiştir. Kiriş düşey donatısında 4275 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Histerezis eğrisinde rijitlik kaybı görülmüştür. Bu çevrimden sonra maksimum tepe deplasmanı kontrolü için 2 tam ve 1 yarım çevrim daha yapılmış ve numunenin yapacağı maksimum deplasman ölçülmüştür. Son yükleme sonucunda 95 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Deney Elemanı-4 yükleme sonrası genel görünümü ile ön ve arka düğüm noktası görünümü Şekil 4.56 ve 4.57'de gösterilmiştir.



Şekil 4.56. Deney Elemanı-4 hasar durumu



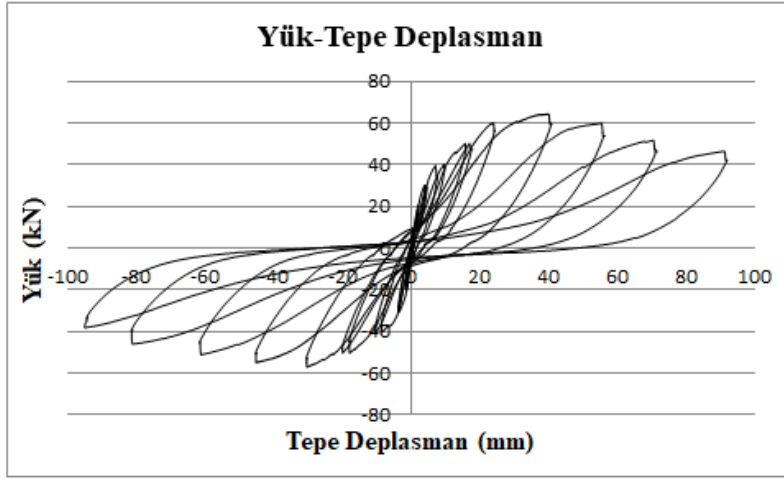
(a)



(b)

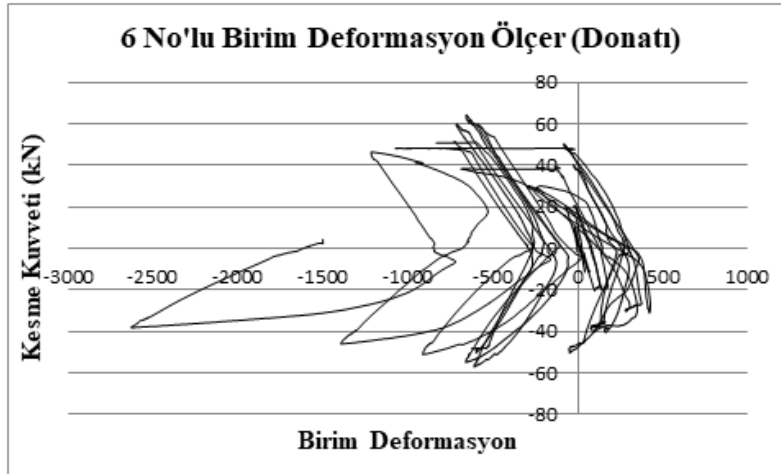
Şekil 4.57.(a) ön ve (b) arka yüz düğüm noktaları hasar durumu

Deney sonrasında Deney Elemanı-4'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.58'de gösterilmiştir.



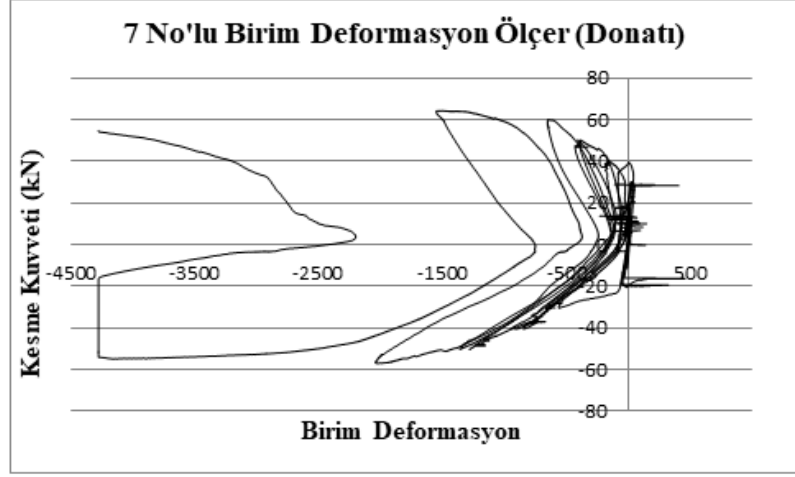
Şekil 4.58.Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-4 için kiriş boyunca donatılardaki birim deformasyonlar Şekil 4.59 ve 4.60’da gösterilmiştir.



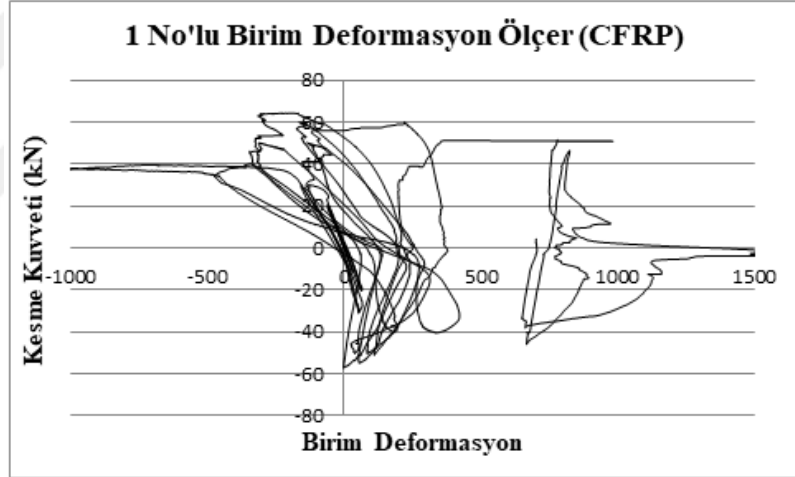
Şekil 4.59.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer



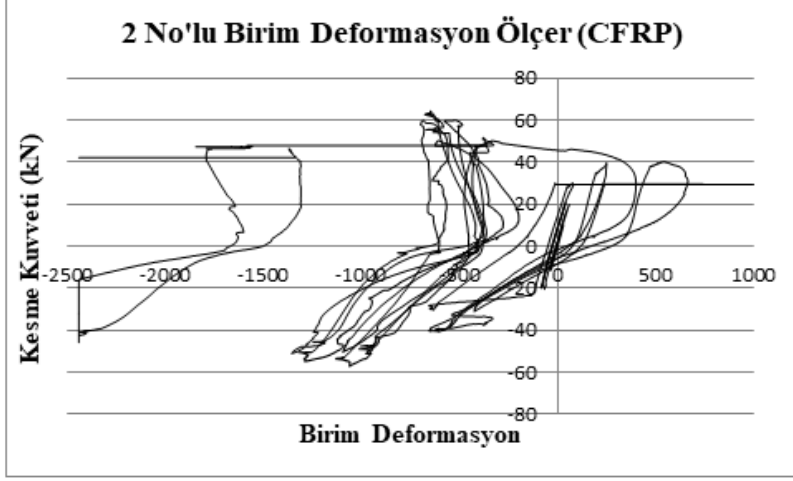


Şekil 4.60.7 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

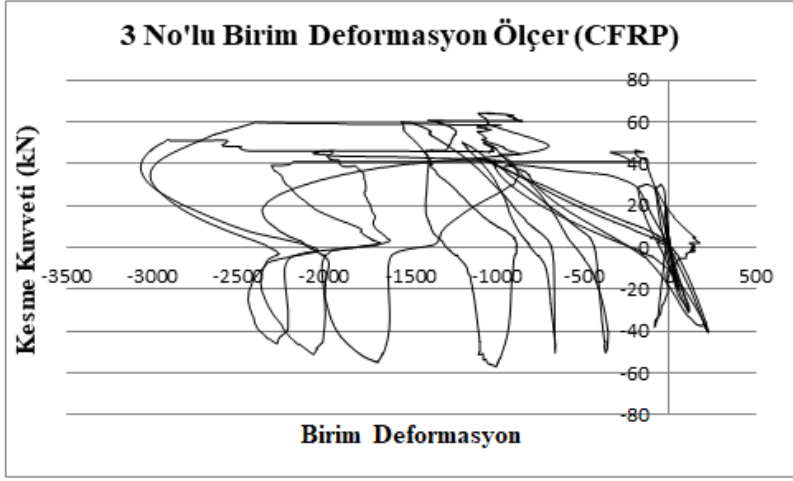
Deney Elemanı-4 için CFRP şeritlerindeki birim deformasyonlar Şekil 4.61, 4.62, 4.63 ve 4.64'de gösterilmiştir.



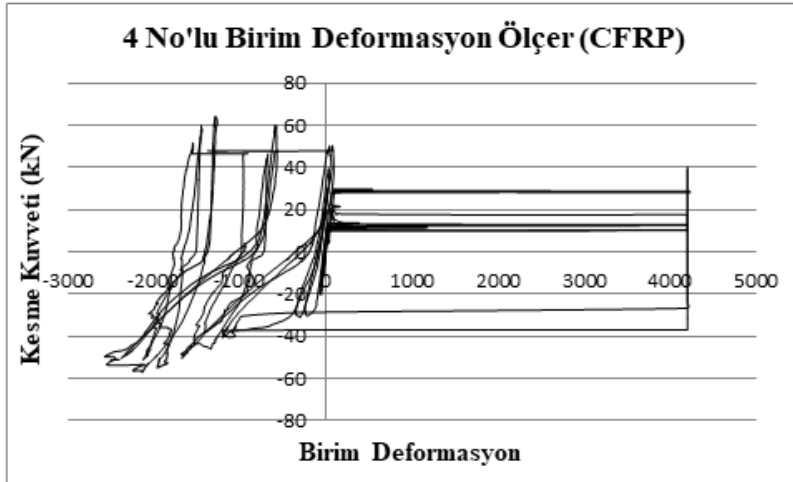
Şekil 4.61.Ön çapraz (alt sağdan üst sola) CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.62.Ön çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer

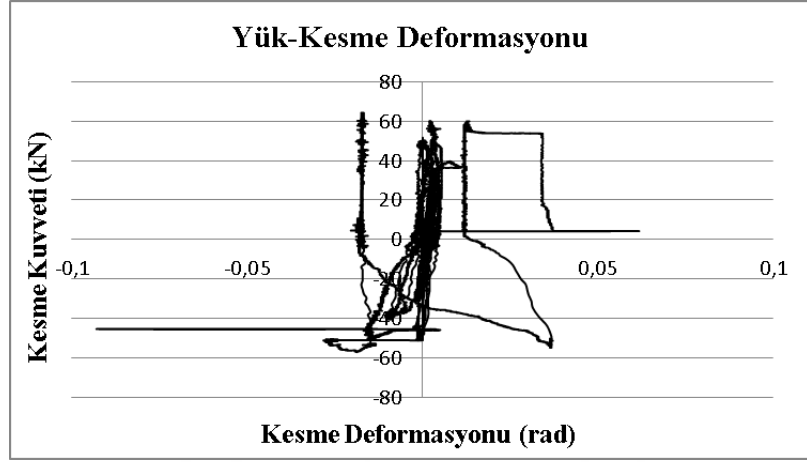


Şekil 4.63.Arka çapraz (üst sağdan alt sola) CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.64.Arka çapraz (üst soldan alt sağa) CFRP birim deformasyon ölçer

Deney Elemanı-4'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.65'de gösterilmiştir.



Şekil 4.65.Yük-kesme deformasyonu grafiği

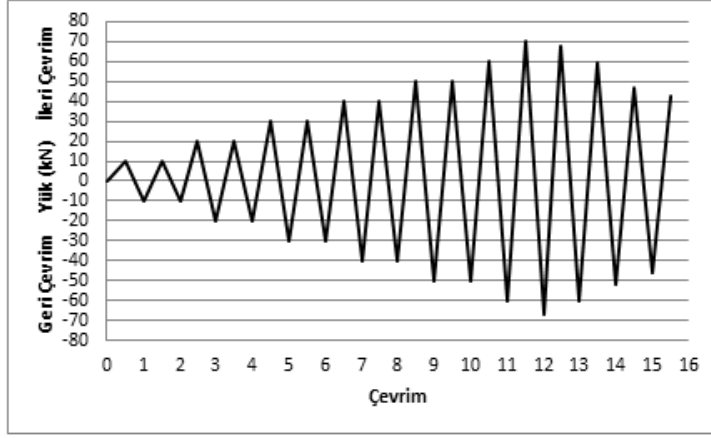
#### 4.5 Deney Elemanı-5

Deney Elemanı-2 ile aynı donatı detayına sahiptir. Numune, 2 adet Ø12'lik çapraz donatılarla dıştan güçlendirilmiştir. Güçlendirme elemanları üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve göçmeye neden olan faktörler araştırılmıştır. Deney Elemanı-5 Şekil 4.66'da gösterilmiştir.



Şekil 4.66.Deney Elemanı-5 genel görünümü

Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.67’de verilmiştir. Deney elemanına 15 tam 1 yarım yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.67.Deney Elemanı-5’e uygulanan yük-çevrim grafiği

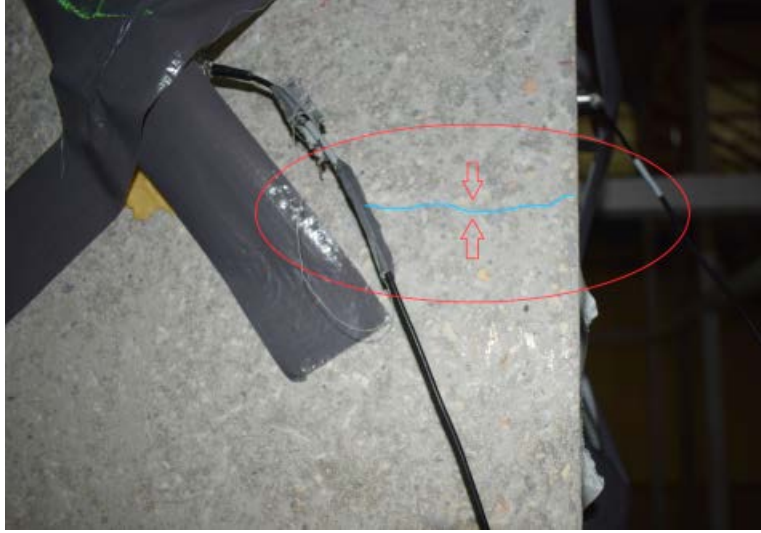
Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

#### 5. Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, kiriş ön yüz sol yüzeyde birleşimin 13 cm yukarısında ilk eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir. Arka yüz düğüm noktasında yatay çatlak oluşumu gözlenmiştir. Arka yüz kolon sol alt yüzünde eğilme çatlak oluşmuştur.

#### 5. Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sağ yüzeyinde birleşimin yaklaşık 24 cm yukarısında ilk eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir ve kiriş ön yüzüne doğru ilerlemiştir. Arka sol düğüm noktasının yaklaşık 17 cm üzerinde eğilme çatlak oluşmuştur. Arka yüz kolon sağ alt yüzünde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. İlk eğilme çatlak ve arka kiriş yüzeyi eğilme çatlak görünümü Şekil 4.68’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.68.(a) İlk eğilme ve (b) kiriş yüzeyi eğilme çatlakları

#### 6. Çevrim (+30 kN)

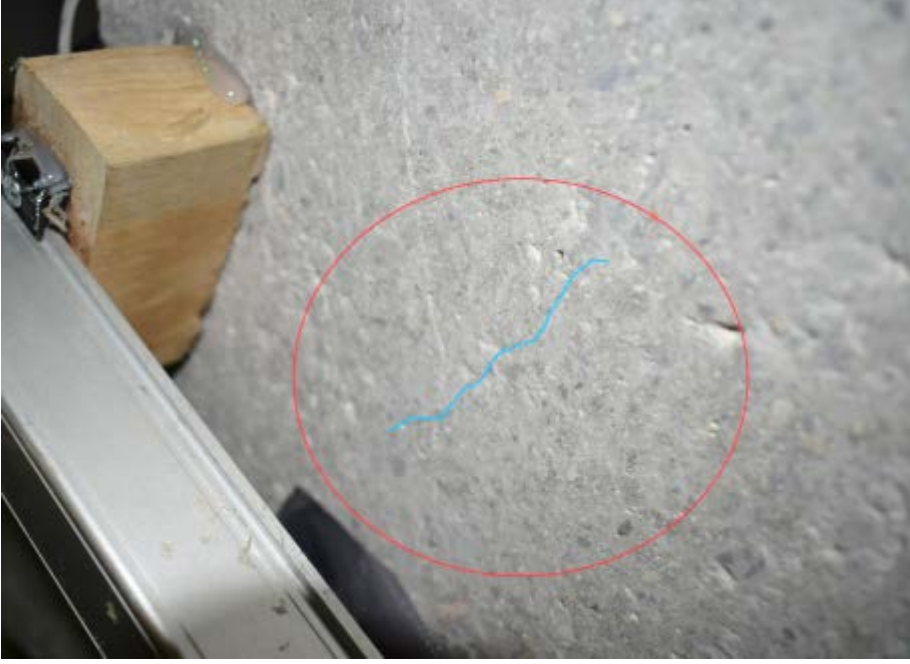
Çevrimin ileri yükleme adımında, mevcut çatlaklar genişlemeye devam etmiştir.

#### 6. Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, mevcut çatlaklar genişlemeye devam etmiştir.

### 7. Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz kiriş sol yüzeyinde birleşimin yaklaşık 34 cm yukarısında eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir. Ön yüz düğüm noktasında diyagonal çatlaklar oluşumu gözlenmiştir. Ön yüz sol birleşimden gelen çatlak ön yüz düğüm noktasında çatallaşmıştır. Diyagonal çatlak oluşumu Şekil 4.69'da gösterilmiştir.

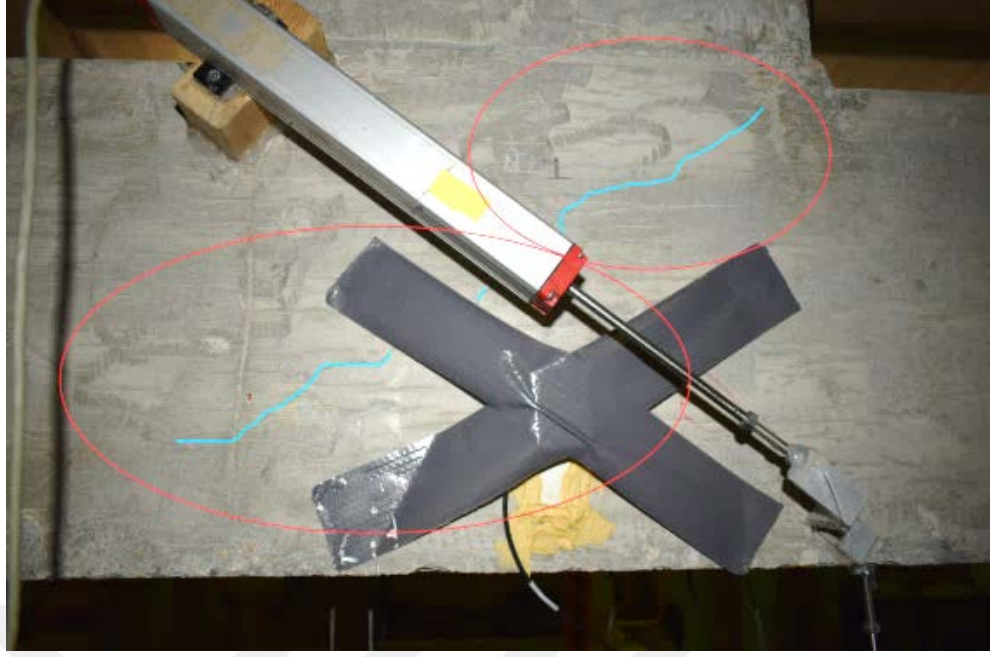


Şekil 4.69. Diyagonal çatlak oluşumu

### 7. Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ birleşimdeki eğilme çatlakları ön yüz düğüm noktasına ilerleyip açılmıştır. Ön yüz kiriş sağ yüzeyinde birleşimin yaklaşık 17, 24 ve 40 cm yukarısında eğilme çatlakları oluşmuştur. Arka düğüm noktasında diyagonal çatlaklar oluşmuştur. Arka düğüm diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.70'de gösterilmiştir.





Şekil 4.70. Arka düğüm diyagonal çatlak görünümü

#### 9. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, arka düğüm diyagonal çatlaklar belirginleşmiştir. Ön yüz kolon sağ alt yüzündeki eğilme çatlakları belirginleşerek kolon yüzüne doğru ilerlemiştir. Düğüm noktasında kullanılan güçlendirme donatısında 1430 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Kolon alt yüz eğilme çatlakları görünümü Şekil 4.71’de gösterilmiştir.



Şekil 4.71. Kolon alt yüz eğilme çatlakları görünümü

#### 10. Çevrim (-50 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, mevcut çatlaklar daha da genişlemiştir. Ön yüz sağ birleşim noktasındaki eğilme çatlakları iyice belirginleşmiştir. Birleşim noktası çatlak görünümü Şekil 4.72’de gösterilmiştir.

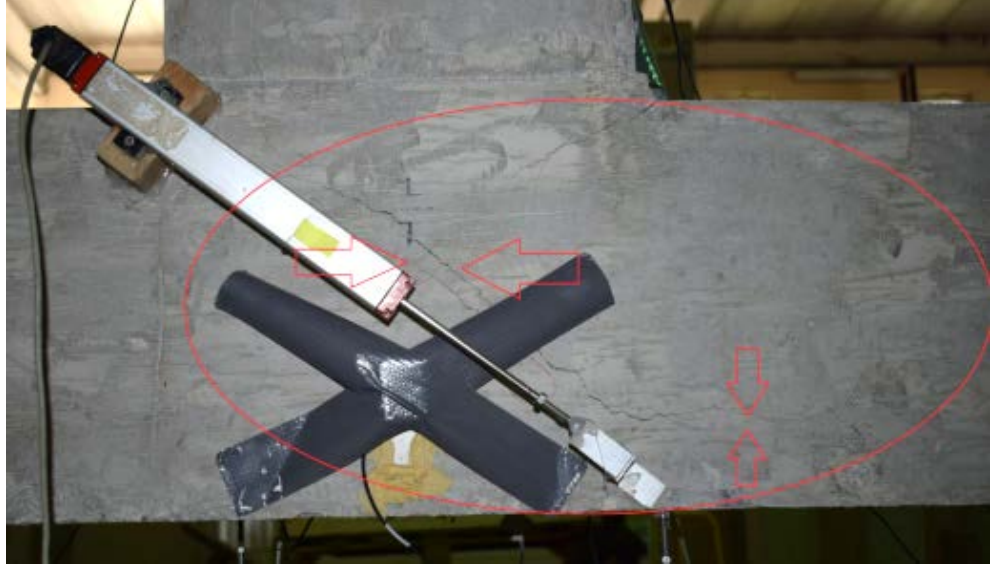


Şekil 4.72. Birleşim noktası çatlak görünümü

#### 11. Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön ve arka düğüm noktasındaki diyagonal çatlaklar genişleyerek kolon yüzünde yatay bir şekilde ilerlemiştir. Kolon alt yüz eğilme çatlakları iyice genişlemiştir. Düğüm noktasında kullanılan güçlendirme donatısında 1780 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Arka yüz düğüm noktasındaki diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.73’de gösterilmiştir.





Şekil 4.73. Arka düğüm diyagonal çatlak görünümü

#### 11. Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ kiriş boyuna donatısında 60 kN'da 4480 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Bu noktada boyuna donatıda akma meydana gelmiştir. Düğüm noktasında kullanılan güçlendirme donatısında 1375 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Mevcut çatlaklar genişlemeye devam etmiştir.

#### 12. Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sol boyuna donatısında 67 kN seviyesinde akma meydana gelmiştir. Düğüm noktasında kullanılan güçlendirme donatısında 3150 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Düğüm noktasında da akma meydana gelmiştir. Mevcut çatlaklar genişlemeye devam etmiştir.

Sünek davranış sergileyen numune, eğilme kapasitesine ulaştığı için daha fazla yük taşımamıştır. Bu aşamadan sonra maksimum tepe deplasmanı kontrolü için 3 tam ve 1 yarım yük çevrimi daha uygulanmıştır. Son yükleme sonucunda 90 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Yükleme sonunda eleman büyük bir hasara maruz kalmıştır. Deney Elemanı-5 yükleme sonrası genel görünümü ile ön ve arka düğüm noktası görüntüleri Şekil 4.74 ve 4.75'de gösterilmiştir.



Şekil 4.74.Deney Elemanı-5 genel hasar görünümü



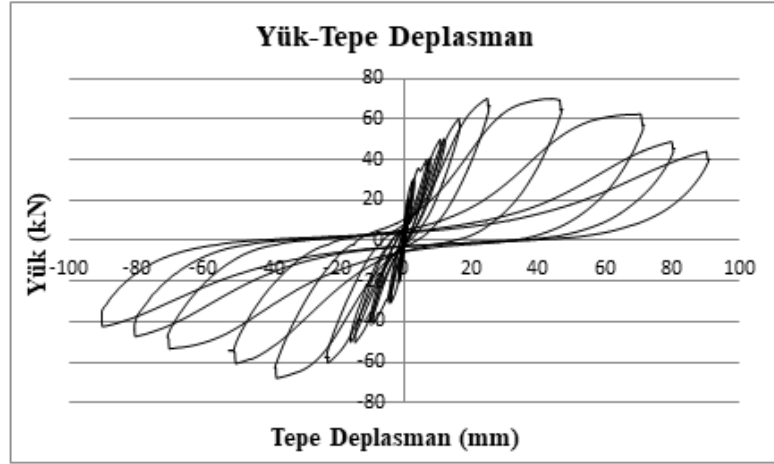
(a)



(b)

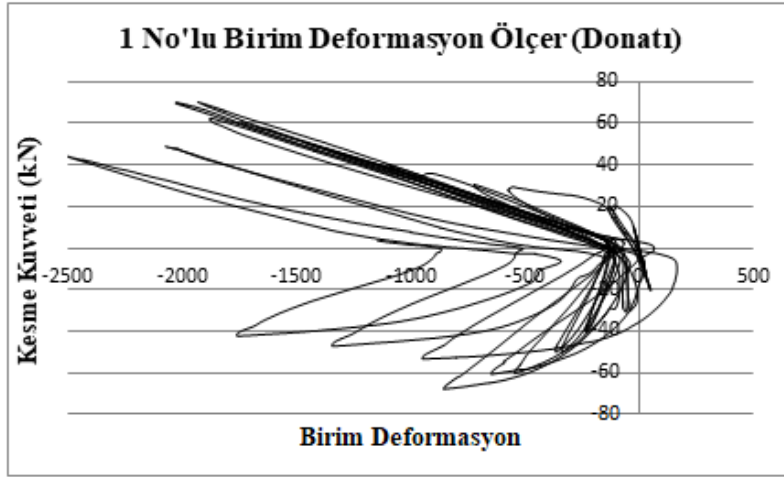
Şekil 4.75.(a) ön ve (b) arka düğüm noktası hasar durumu

Deney sonrasında Deney Elemanı-5'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.76'da gösterilmiştir.

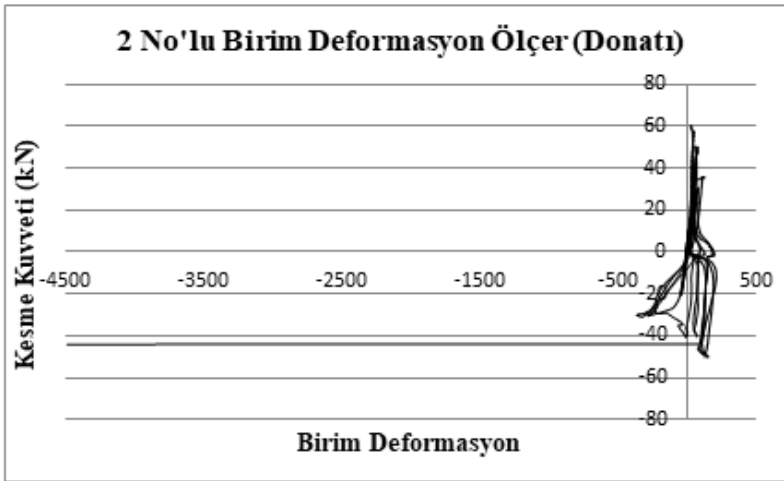


Şekil 4.76.Yük-tepe deplasman grafiği

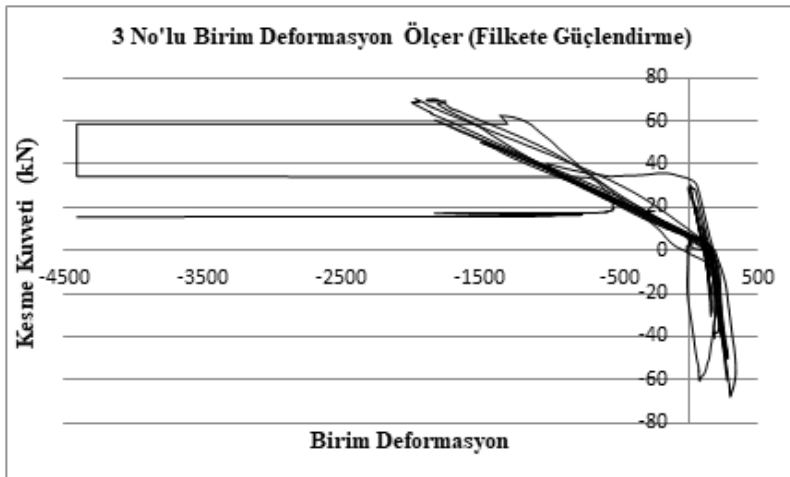
Deney Elemanı-5 için kiriş boyuna donatılarındaki ve çapraz güçlendirmedeki birim deformasyonlar Şekil 4.77, 4.78, 4.79 ve 4.80'de verilmiştir.



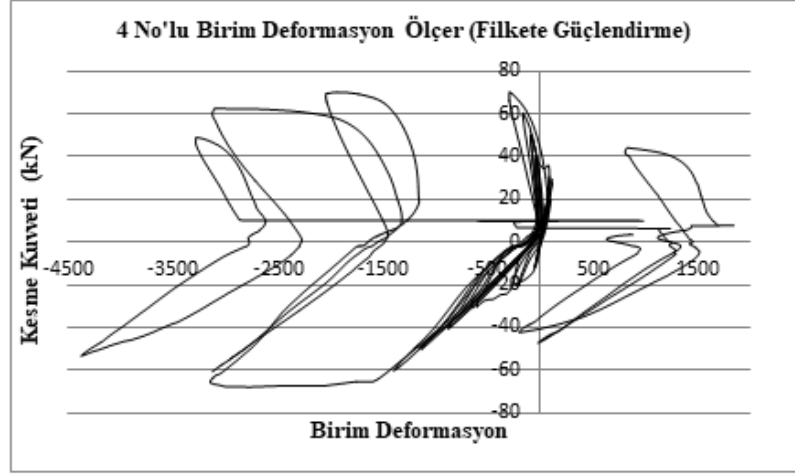
Şekil 4.77.1 No'lu Birim Deformasyon Ölçer



Şekil 4.78.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

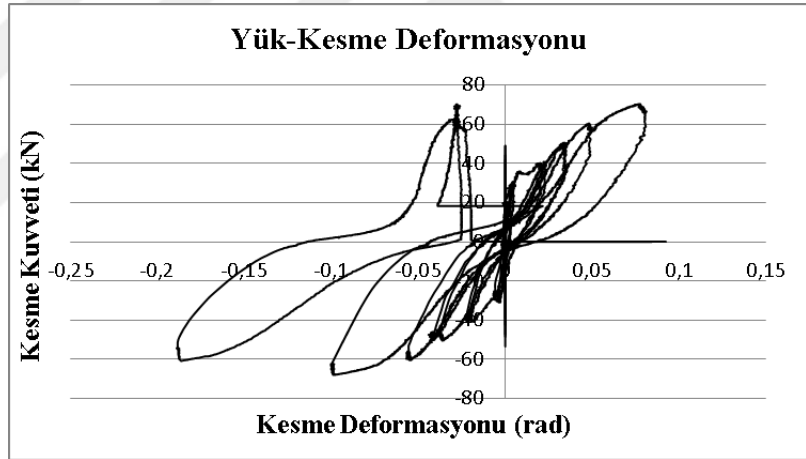


Şekil 4.79.3 No'lu Birim Deformasyon Ölçer



Şekil 4.80.4 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

Deney Elemanı-5'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.81'de gösterilmiştir.



Şekil 4.81. Yük-kesme deformasyonu grafiği

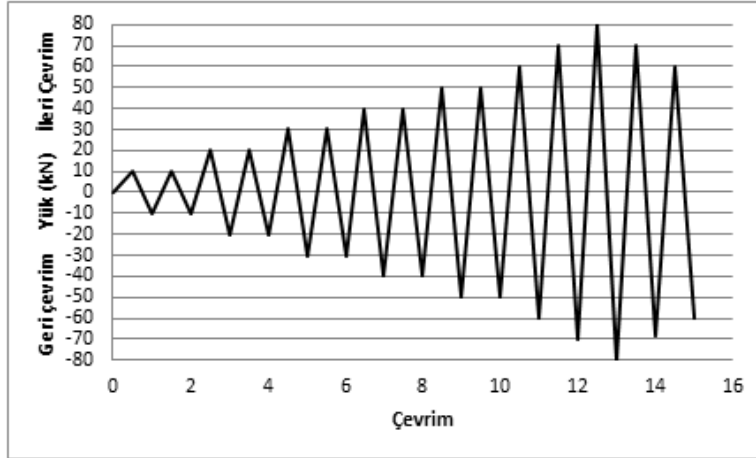
#### 4.6 Deney Elemanı-6

Deney Elemanı-2 ile aynı donatı detayına sahiptir. Deney elemanının düğüm noktasına 6 adet Ø12'lik ankrajlar yerleştirilerek içten güçlendirilmiştir. Deney Elemanı-6 Şekil 4.82'de gösterilmiştir.



Şekil 4.82. Deney Elemanı-6 yüklemeye öncesi genel görünümü

Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.83’de verilmiştir. Deney elemanına 15 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.83. Deney Elemanı-6’ya uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.



### 8.Çevrim (+40 kN)

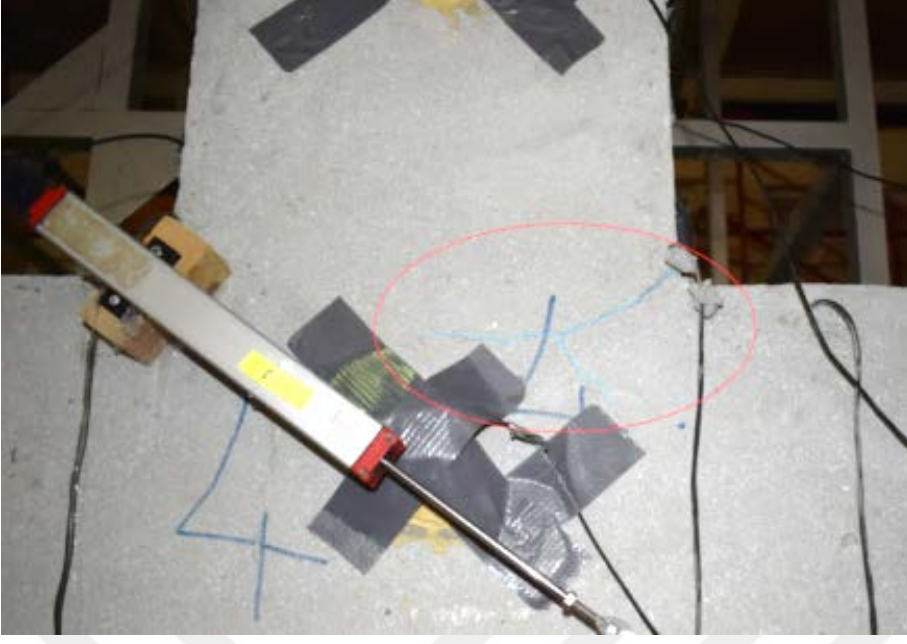
Çevrimin ileri yükleme adımında, 34 kN düzeyinde, arka yüz birleşim noktasının sağ alt köşesinden sol üst köşesine doğru ve ön yüz birleşim noktasında, sağ üst köşede diyagonal çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Çatlak görünümü Şekil 4.84’de gösterilmiştir.



Şekil 4.84.Arka yüzeyde diyagonal çatlak görünümü

### 8.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz birleşim noktasının sağ üst köşesindeki diyagonal çatlak büyümüştür. Ayrıca birleşim bölgesinde ilk eğilme çatlağı bu yükleme adımında gözlenmiştir. Çatlak büyümesi ve gözlenen ilk eğilme çatlağı Şekil 4.85’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.85.(a) Çatlak büyümesi ve (b) ilk eğilme çatlağı

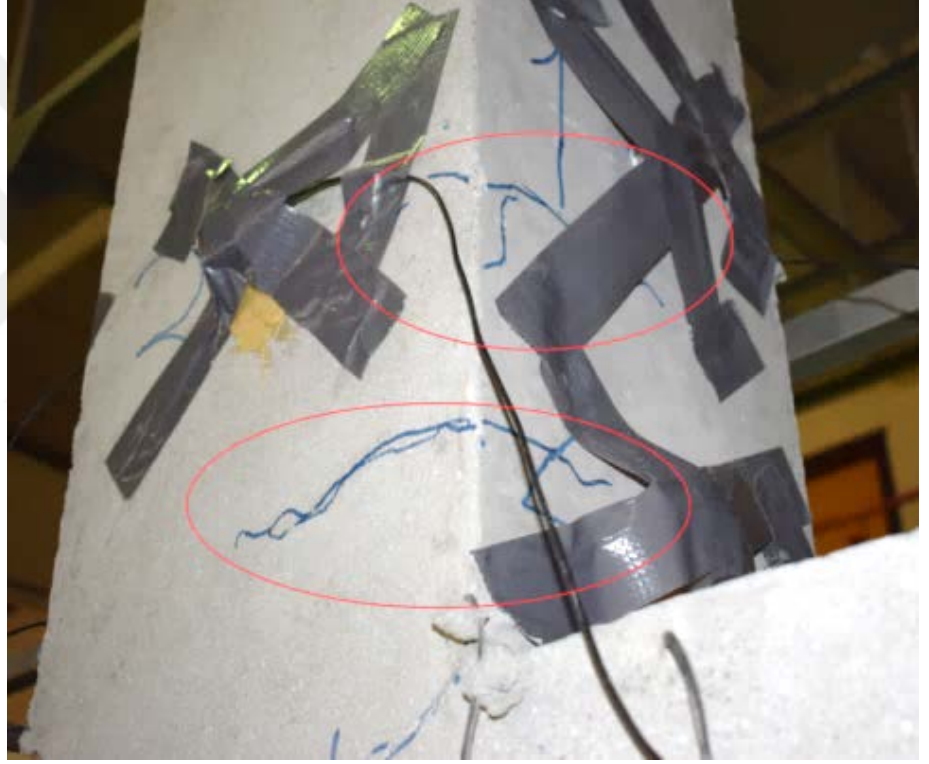


### 9. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımımda, birleşim noktasının ön ve arka yüzeyindeki diyagonal çatlaklar genişlemiştir. Ayrıca birleşim noktasının 25 cm yukarısında kirişin sol yüzeyinde eğilme çatlakları oluşmuştur.

### 9. Çevrim (-50 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımımda, ön yüz kiriş sağ yüzeyinde birleşim noktasının 12 ve 25 cm yukarısında eğilme çatlakları gözlenmiştir. Çatlak görünümü Şekil 4.86'da verilmiştir.



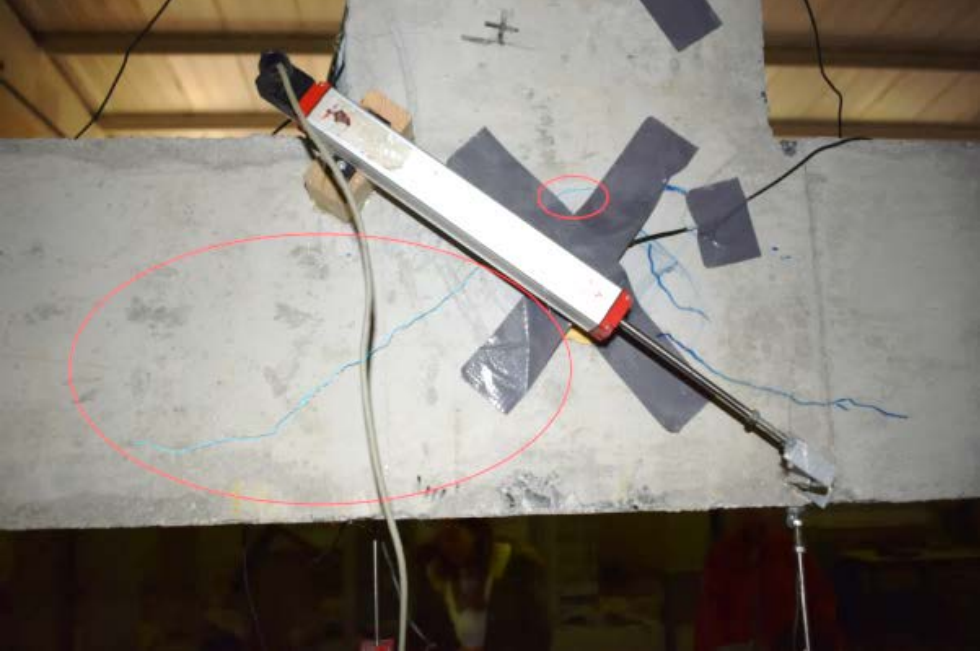
Şekil 4.86. Eğilme çatlakları görünümü

### 11. Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımımda, birleşim noktasının ön ve arka yüzeyindeki diyagonal çatlaklar büyümüş ve eğilme çatlakları oluşumu devam etmiştir.

## 11.Çevrim (-60 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımında, arka yüz birleşim noktasındaki diyagonal çatlaklar ve eğilme çatlakları büyümüşür. Çatlakların büyümesi Şekil 4.87’de gösterilmiştir.



Şekil 4.87. Diyagonal çatlakların genişlemesi

## 12. Çevrim (+70 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, birleşim noktasının ön ve arka yüzeylerinden kolon alt kısmına uzanan çatlaklar gözlenmiştir. Ön yüz birleşim noktasından kolon alt yüzüne ulaşan çatlaklar Şekil 4.88’de gösterilmiştir.



Şekil 4.88.Ön yüz birleşim noktasından kolon alt yüzüne ulaşan çatlaklar

## 12. Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, birleşim noktasının ön yüzeyinde yeni çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca, kolon alt yüzeyindeki çatlaklar birleşmiştir. Çatlak görünümleri Şekil 4.89’da verilmiştir.



Şekil 4.89.Kolon alt yüzeyindeki çatlaklar

## 13. Çevrim (+80 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, birleşim noktasının ön ve arka yüzeylerindeki ve kiriş üzerindeki mevcut çatlaklar genişlemiştir.

## 13. Çevrim (-80 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında ise mevcut durum devam etmiştir. Elemanın rijitliğinde düşüş devam etmiştir.

## 14. Çevrim (+90 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 70 kN yük altında elemanda akma meydana gelmiştir. Mevcut çatlaklar tamamen açılmıştır. Çatlak açılmaları Şekil 4.90'da gösterilmiştir.



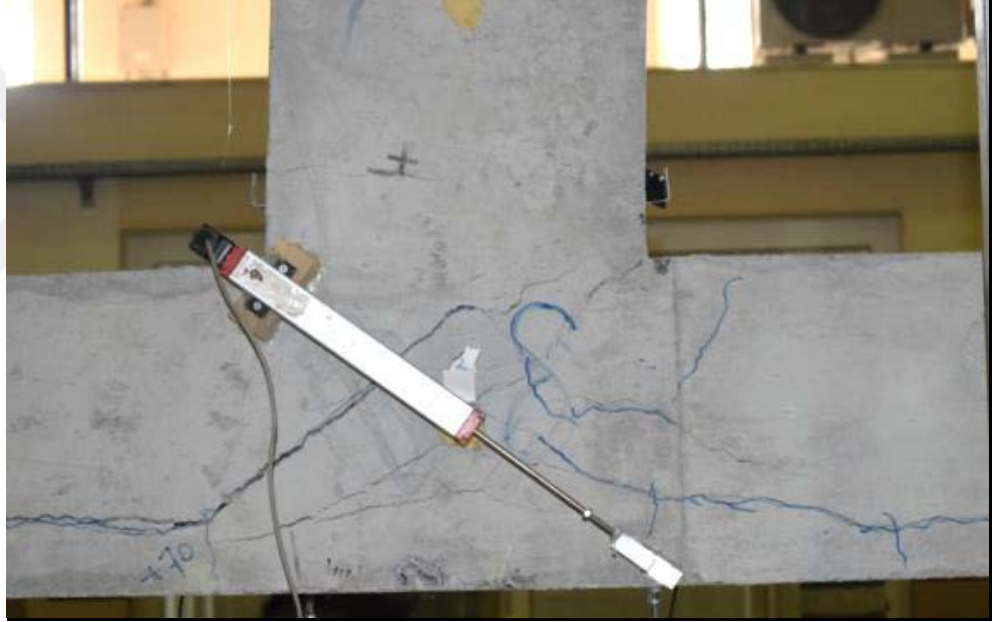
Şekil 4.90.Çatlakların açılması

## 14. Çevrim (+90 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, numuneye yük uygulanmaya devam edilmiştir ve 68 kN yük değerinde yükleme durdurulmuştur. Son yükleme ile birlikte numune oldukça büyük bir hasara maruz kalmıştır ancak ani güç tükenmesi gözlenmemiştir. Ön ve arka yüzeylerdeki son çatlak durumları Şekil 4.91'de gösterilmiştir.



(a)



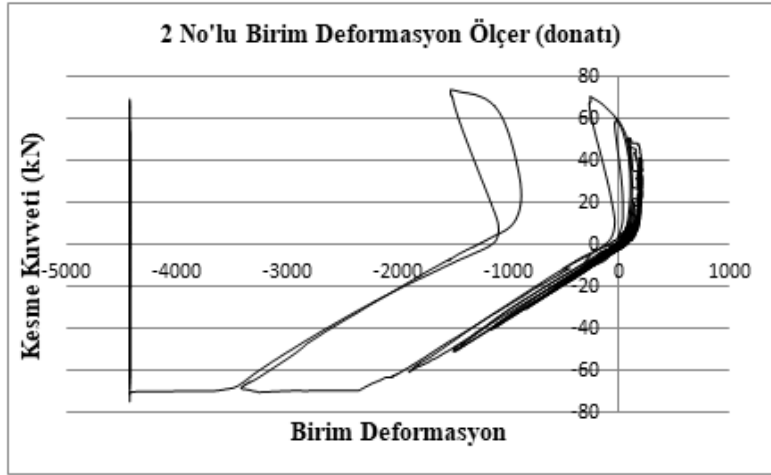
(b)

Şekil 4.91.Yükleme sonrası nihai durum çatlak görünüşleri

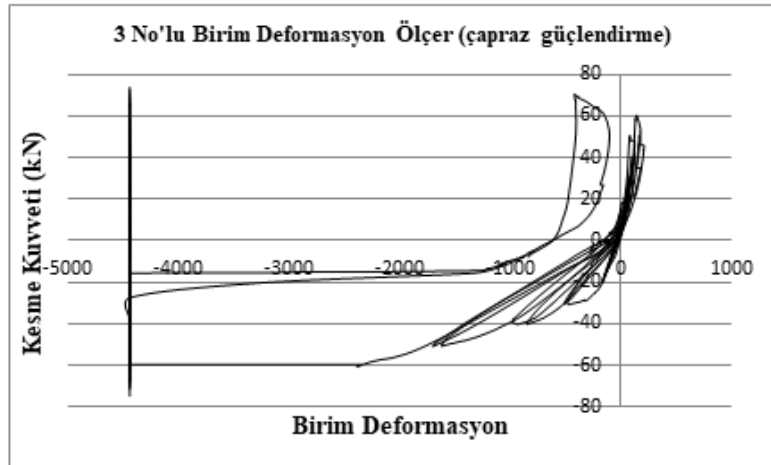
Bu aşamadan sonra 2 tam çevrim daha uygulanmıştır. Deney elemanı bir yönde eğilme kapasitesine ulaştığı için kiriş gövdesinde oluşan kesme çatlaklarının boyutunda bu çevrimden sonra artış gözlenmemiştir.





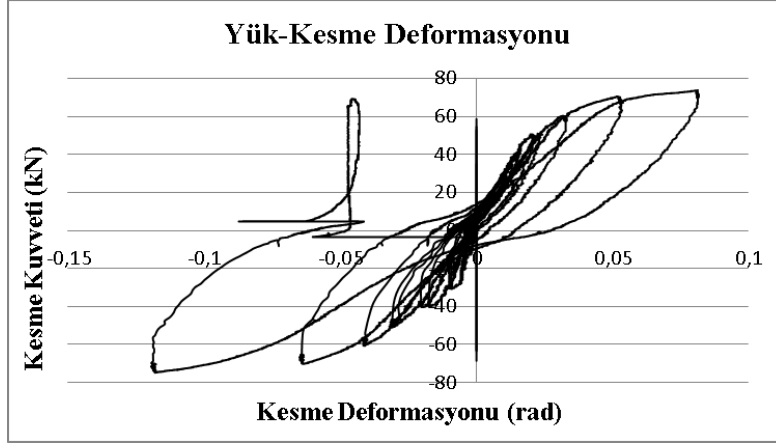


Şekil 4.94.2 No'lu Birim Deformasyon Ölçer



Şekil 4.95.3 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

Deney Elemanı-6'dan elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.96'da gösterilmiştir.



Şekil 4.96.Yük-kesme deformasyonu grafiği

#### 4.7 Deney Elemanı-7

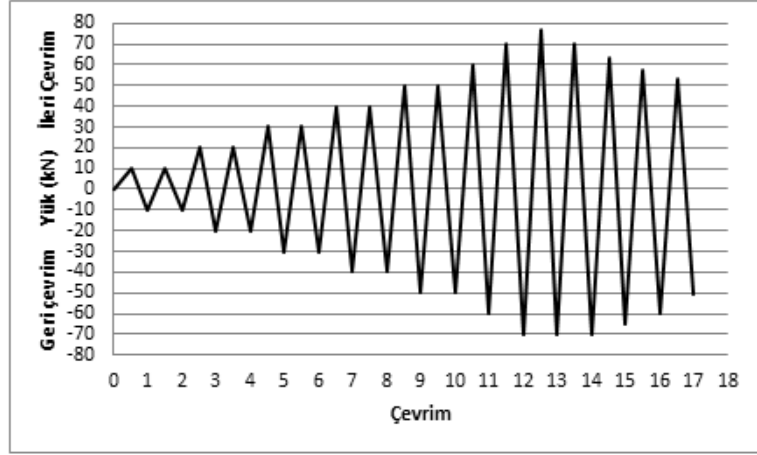
Deney Elemanı-2 ile aynı donatı detayına sahiptir. Deney elemanının düğüm noktası etriyesizdir ve CFRP ile güçlendirilmiştir. CFRP ile güçlendirme işlemi, düğüm noktası ile kolon ve kiriş bölgesinin 30 cm'lik kısmına bütün bölgeye CFRP sarılarak uygulanmıştır. Deney Elemanı-7 Şekil 4.97'de gösterilmiştir.



Şekil 4.97.Deney Elemanı-7 yüklemesi öncesi genel görünümü



Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.98’de verilmiştir. Deney elemanına 17 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.98.Deney Elemanı-7’ye uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

#### 4.Çevrim (-20 kN)

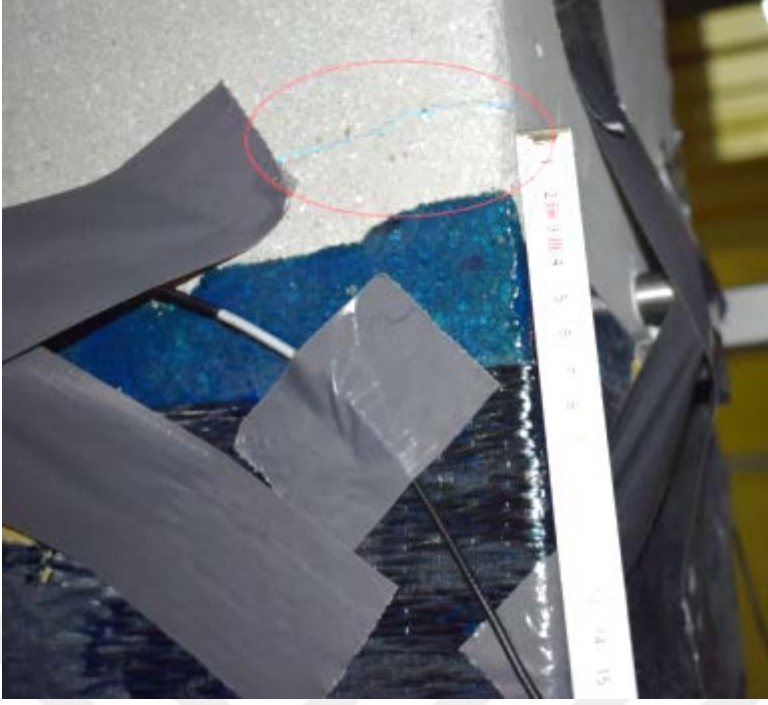
Çevrimin geri yükleme adımında, 19 kN düzeyinde CFRP’nin betondan ayrılma sesi ilk defa duyulmuştur.

#### 5.Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, CFRP’nin betondan ayrılma sesleri artmaya başlamıştır. Fakat bir ayrılma gözlenmemiştir.

#### 7. Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş ön yüzünde, kolon üst yüzeyinin 38 cm yukarısında ilk eğilme çatlakları görülmüştür. İlk eğilme çatlaklarının görünümü Şekil 4.99’da verilmiştir.



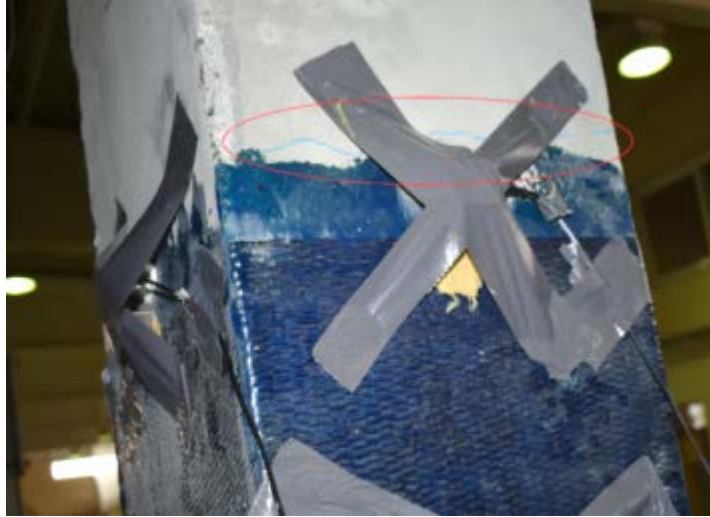
Şekil 4.99. İlk eğilme çatlakı

#### 8. Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 39 kN düzeyinde CFRP'nin betondan ayrılma sesleri duyulmaya devam etmiştir.

#### 9. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, kiriş ön yüzündeki mevcut eğilme çatlakı kiriş sol yüzeyine doğru ilerlemiştir. Ön yüzden bakıldığında kolonun alt yüzeyinde, CFRP'de liflere dik doğrultuda ayrışma belirtisi görülmüştür. Eğilme çatlakının bu çevrimdeki görünümü Şekil 4.100'de verilmiştir.



Şekil 4.100.Kiriş sol yüzeyindeki eğilme çatlakları

#### 9. Çevrim (-50 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 35 kN düzeyinde CFRP'nin betondan ayrılma sesleri duyulmuştur. Ön yüzdeki eğilme çatlakları kiriş sağ yüzeyine doğru ilerlemiştir. Kiriş sağ yüzeyindeki eğilme çatlakları Şekil 4.101'de gösterilmiştir.



Şekil 4.101.Kiriş sağ yüzeyindeki eğilme çatlakları

#### 10. Çevrim (+50 ve -50 kN)

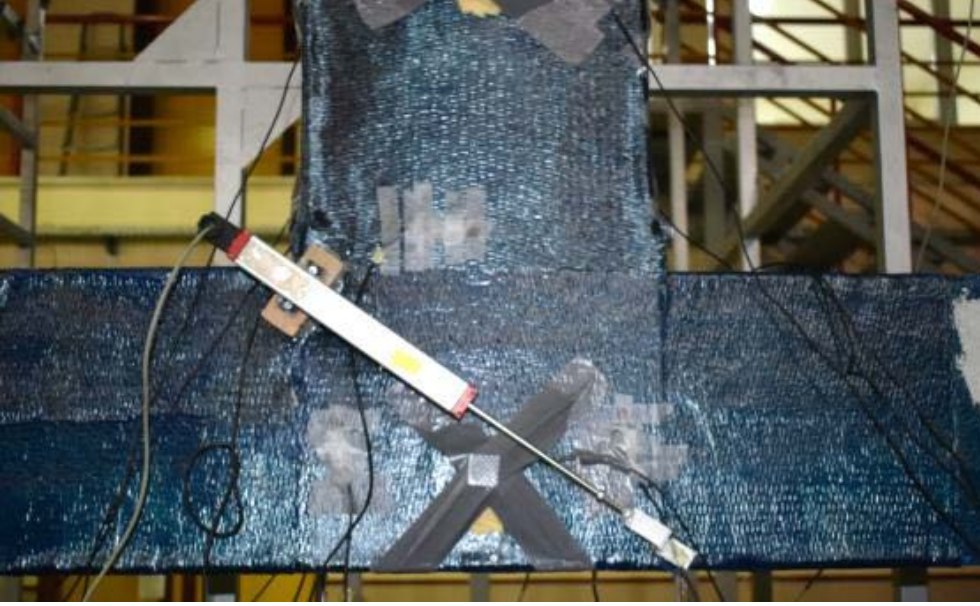
Çevrimin ileri ve geri yükleme adımında, mevcut durum korunmuştur.

#### 11. Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, CFRP'nin betondan ayrılma sesleri oldukça yükselmeye başlamıştır.

#### 11. Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 52 kN düzeyinde oldukça büyük bir ayrışma sesi gelmiştir. Ön yüzde CFRP tabakanın kabarması görülmeye başlanmıştır. Ön yüz CFRP görünümü Şekil 4.102'de verilmiştir.



Şekil 4.102.Ön yüz CFRP görünümü

#### 12. Çevrim (+70 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüzde, kolon üst yüzeyinin 61 cm yukarısında eğilme çatlakları oluşmuştur. Ön ve arka yüz düğüm noktalarında CFRP kabarması devam etmiştir.

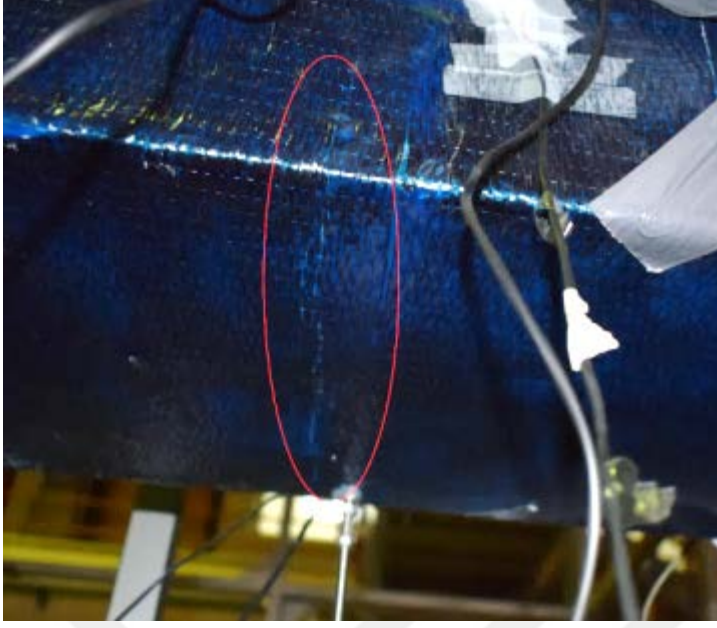
## 12. Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüzde kirişin sağ tarafında, kolon üst yüzeyinden 56 ve 72 cm yukarıda yeni eğilme çatlakları oluşmuştur. Kolon alt yüzeyinde CFRP-epoksi ayrışması oluşmuştur. Yük sıfırlandığında, ön yüz birleşim bölgesindeki çapraz potansiyometrik cetvel, CFRP üzerindeki kabarmadan dolayı kopmuştur. Yeni oluşan eğilme çatlakları Şekil 4.103'de, kolon alt yüzeyindeki CFRP çatlaması ise Şekil 4.104'de gösterilmiştir.



Şekil 4.103. Yeni oluşan eğilme çatlakları





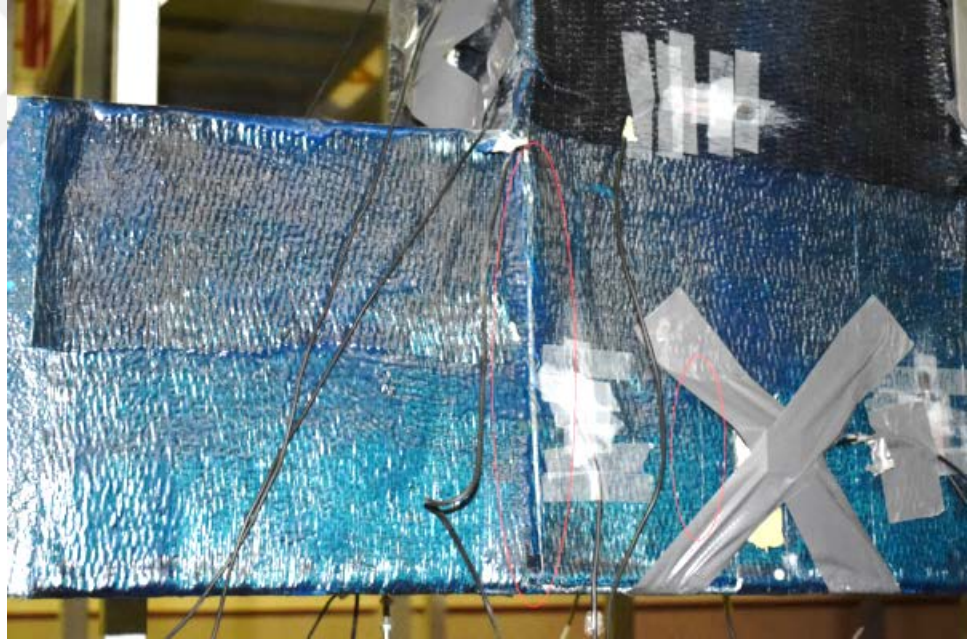
Şekil 4.104.CFRP-epoksi ayrışması

### 13. Çevrim (+80 kN)

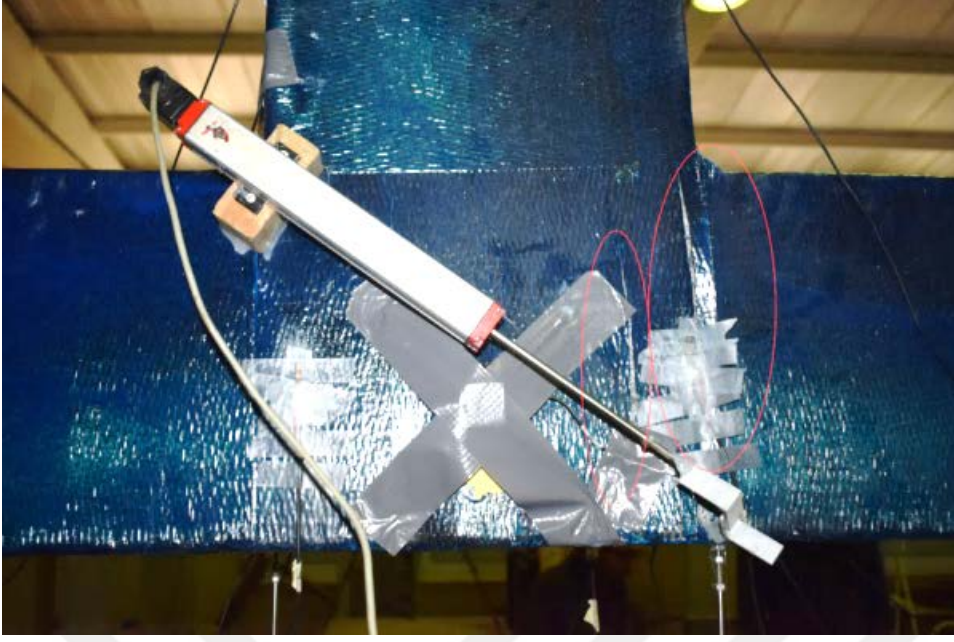
Çevrimin ileri yükleme adımında, 77 kN değerinde akma meydana gelmiştir ve 30 mm tepe deplasmanı oluşmuştur. Kolonda gözle görülür bir sehim meydana gelmiştir. Ön yüzde, 4 numaralı sensör çevresinde, CFRP kopmaları görülmüştür. Arka yüz düğüm noktasında CFRP kopmaları görülmüştür. Kolonun yaptığı sehimin görünümü Şekil 4.105’de, CFRP kopmalarının görünümü Şekil 4.106’da verilmiştir.



Şekil 4.105.Kolonun yaptığı schim



(a)

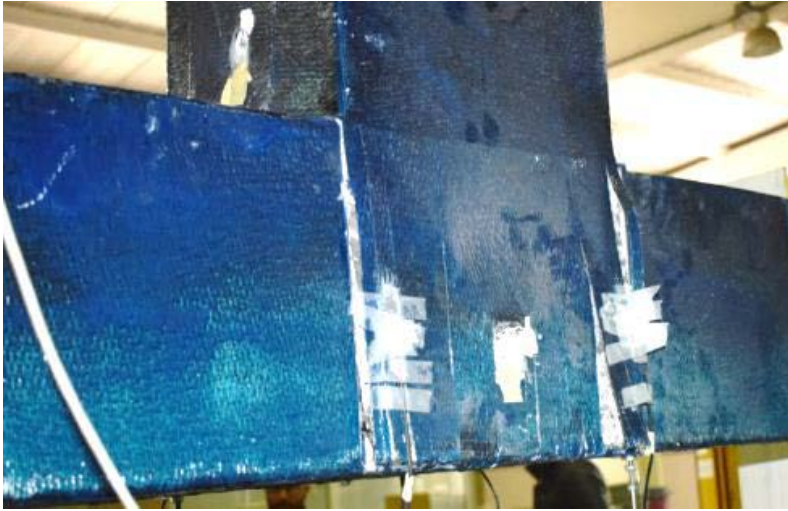


(b)

Şekil 4.106.Düğüm noktası CFRP kopmaları (a) ön ve (b) arka görünüş

### 13. Çevrim (-80 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 35 mm tepe deplasmanı oluştuğunda yükleme durdurulmuştur. Düğüm noktası arka yüz görünümü Şekil 4.107'de verilmiştir.



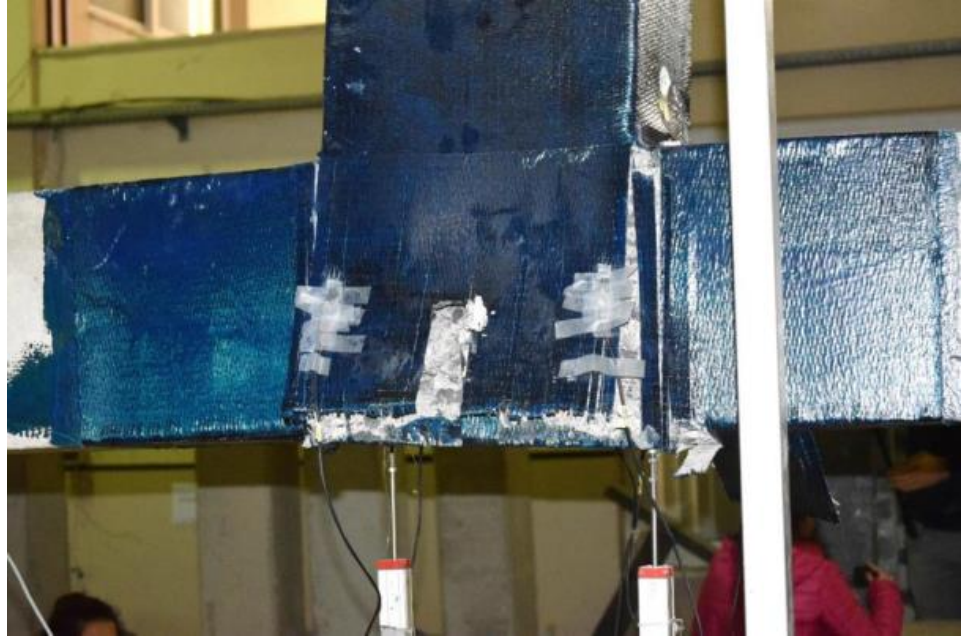
Şekil 4.107.Düğüm noktası arka yüzü



Bu çevrimden sonra, ileri ve geri yükleme adımlarındaki tepe deplasmanı değerleri 15'er mm artırılarak 4 tam çevrim daha yapılmıştır. Son çevrimin ileri yükleme adımında, 90 mm tepe deplasmanı 53 kN yükleme değerinde oluşmuştur. Son çevrimin geri yükleme adımında, 100 mm tepe deplasmanı 51 kN değerinde oluşmuştur. Son çevrimden sonra düğüm noktası ön yüz görünümü Şekil 4.108'de, arka yüz görünümü ise Şekil 4.109'da verilmiştir.



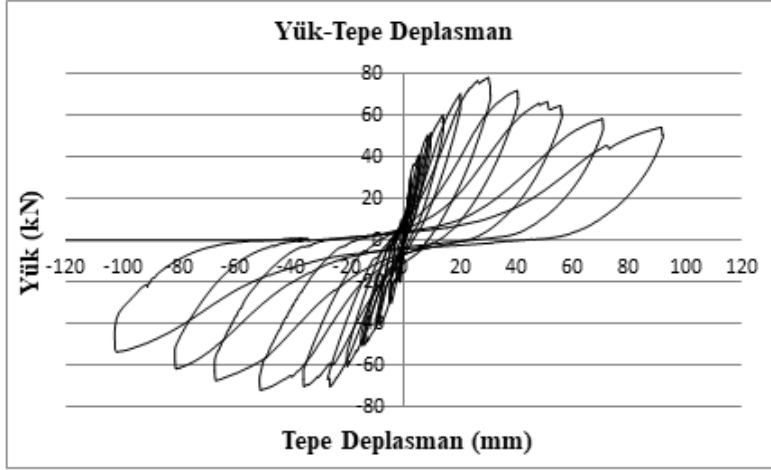
Şekil 4.108. Düğüm noktası ön yüzü



Şekil 4.109. Düğüm noktası arka yüzü

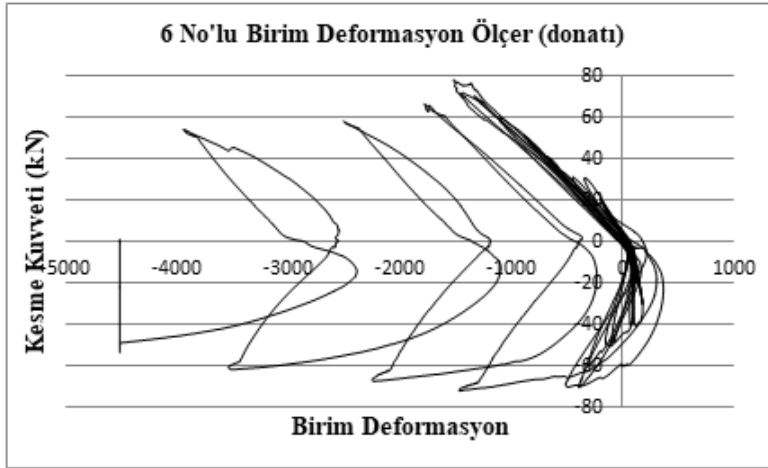
Yüklemeye sonunda CFRP'nin kopması ile düğüm noktası göçmesi oluşmuş ve bu sebeple rijitliğini kaybettiği belirlenmiştir. Yüklemeye sonunda eleman büyük bir hasara maruz kalmıştır ancak ani güç tükenmesi meydana gelmemiştir.

Deney sonrasında Deney Elemanı-7'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.110'da gösterilmiştir.



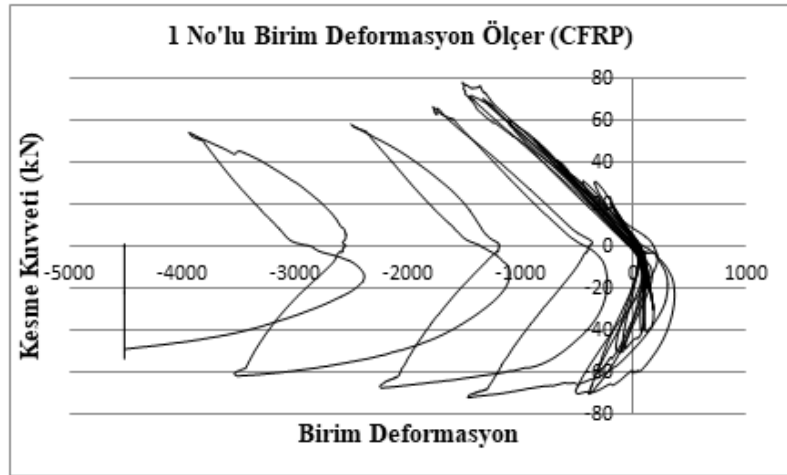
Şekil 4.110. Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-7 için kiriş boyuna donatısındaki birim deformasyon Şekil 4.111'de gösterilmiştir.

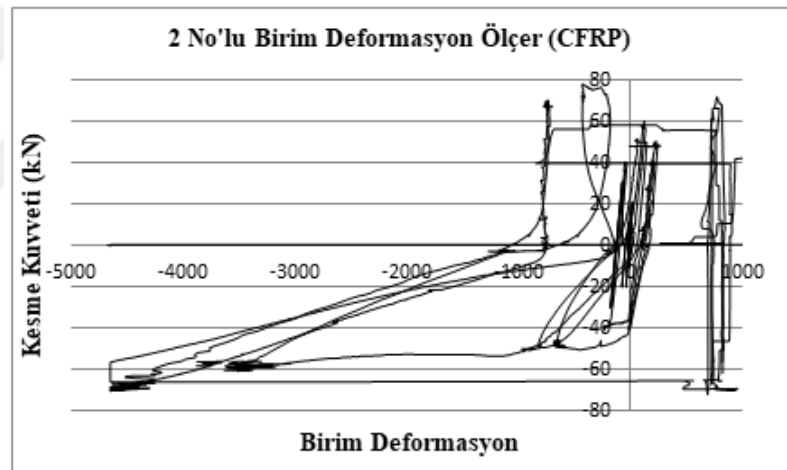


Şekil 4.111.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

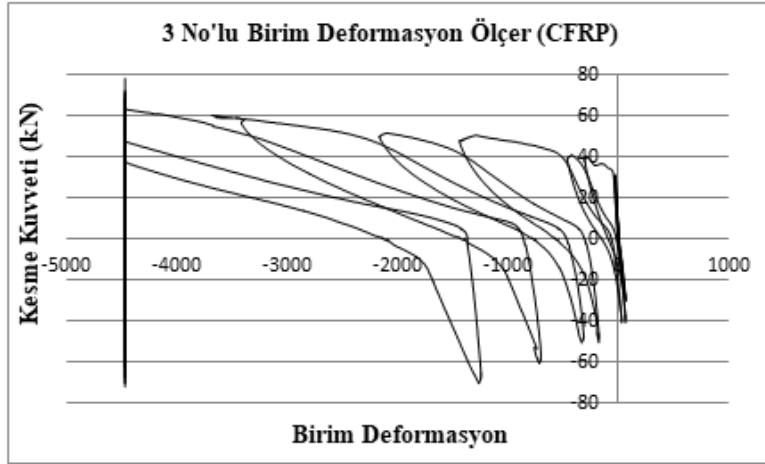
Deney Elemanı-7 için CFRP şeritlerindeki birim deformasyonlar Şekil 4.112, 4.113, 4.114, 4.115 ve 4.116'da gösterilmiştir.



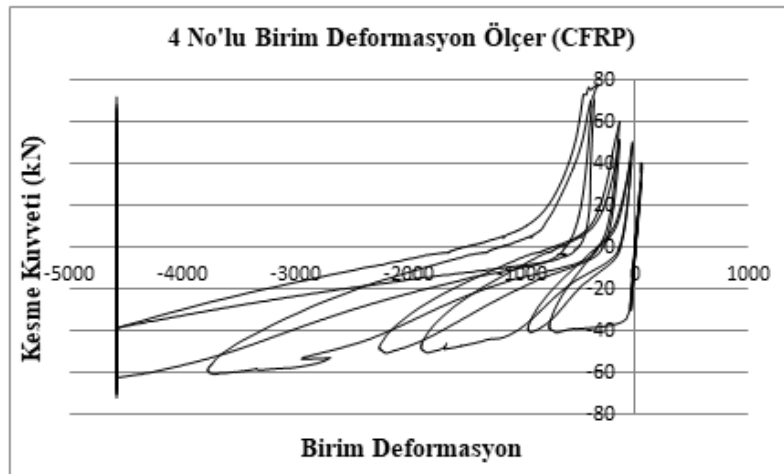
Şekil 4.112.Ön düşey sol CFRP birim deformasyon ölçer



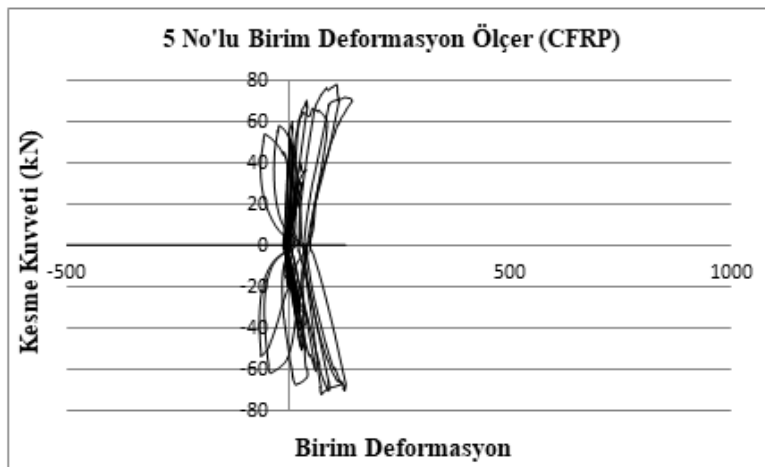
Şekil 4.113.Ön düşey sağ CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.114.Arka düşey sağ CFRP birim deformasyon ölçer

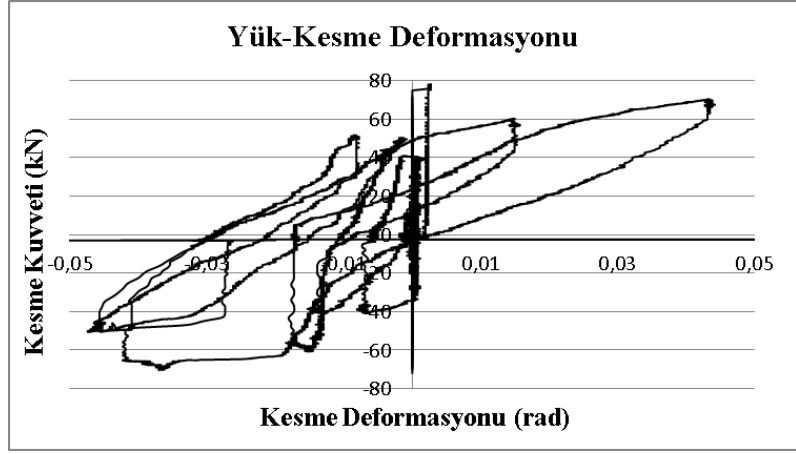


Şekil 4.115.Arka düşey sol CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.116.Ön yüz yatay CFRP birim deformasyon ölçer

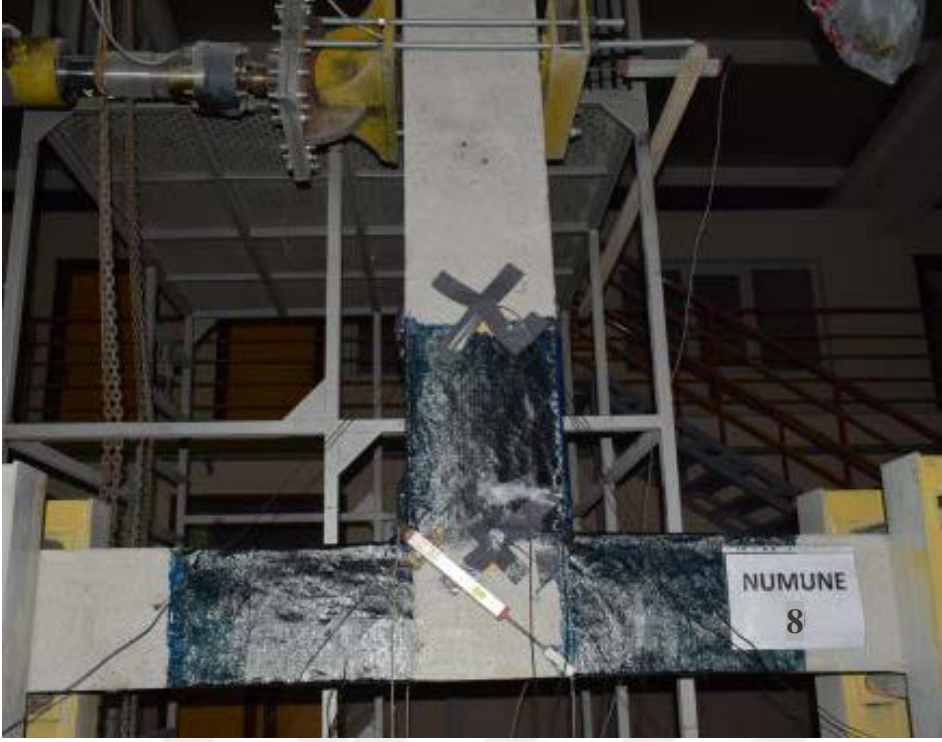
Deney Elemanı-7'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.117'de gösterilmiştir.



Şekil 4.117.Yük-kesme deformasyonu grafiği

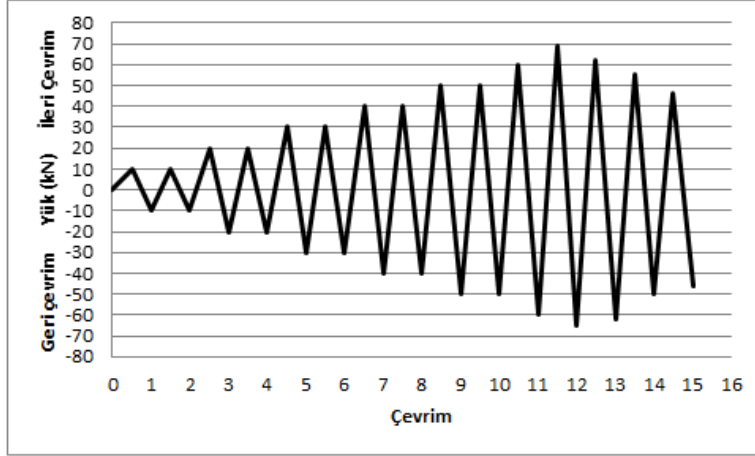
#### 4.8 Deney Elemanı-8

Deney Elemanı-2 ile aynı donatı detayına sahiptir. Lifler boyuna doğrultulara dik olacak şekilde düğüm noktası hariç kiriş ve kolonun kritik bölgesi olan 50 cm'lik kısmın tamamı kesmeye karşı CFRP ile güçlendirilmiştir. Düğüm noktası dışında güçlendirilen bu elemanda davranışın nasıl geliştiği araştırılmıştır. CFRP şeritler üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Deney Elemanı-8 Şekil 4.118'de gösterilmiştir.



Şekil 4.118. Deney Elemanı-8 genel görünümü

Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.119’da verilmiştir. Deney elemanına 15 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.119. Deney Elemanı-8’e uygulanan yük-çevrim grafiği

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

### 5.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, arka yüz düğüm noktasının sağ üst köşesinden sol alt köşesine doğru yaklaşık 5 cm uzunluğunda ilk diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.120’de gösterilmiştir.

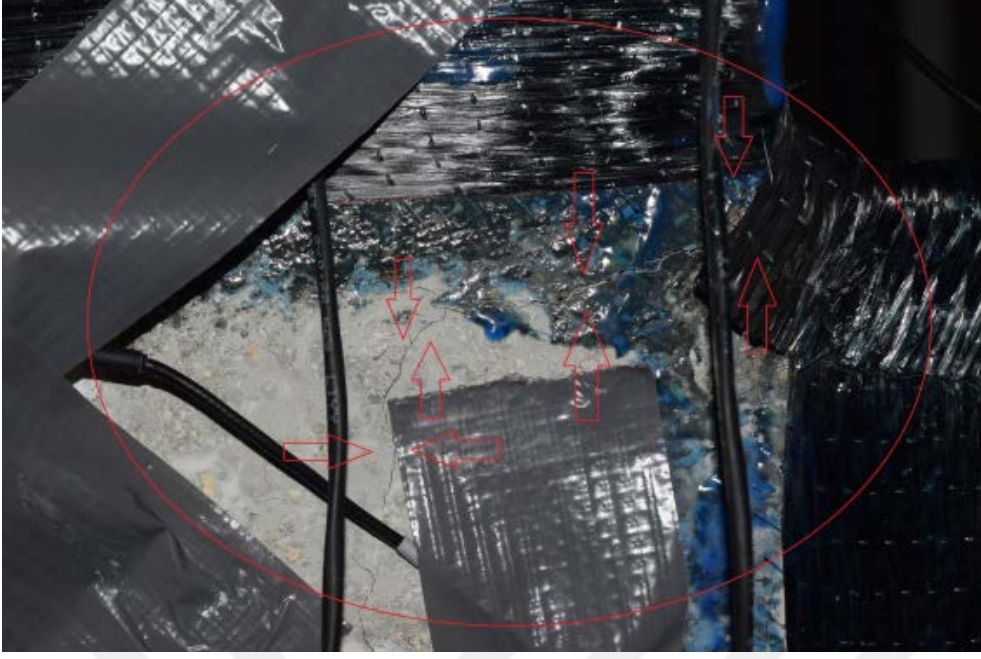


Şekil 4.120.İlk diyagonal çatlak

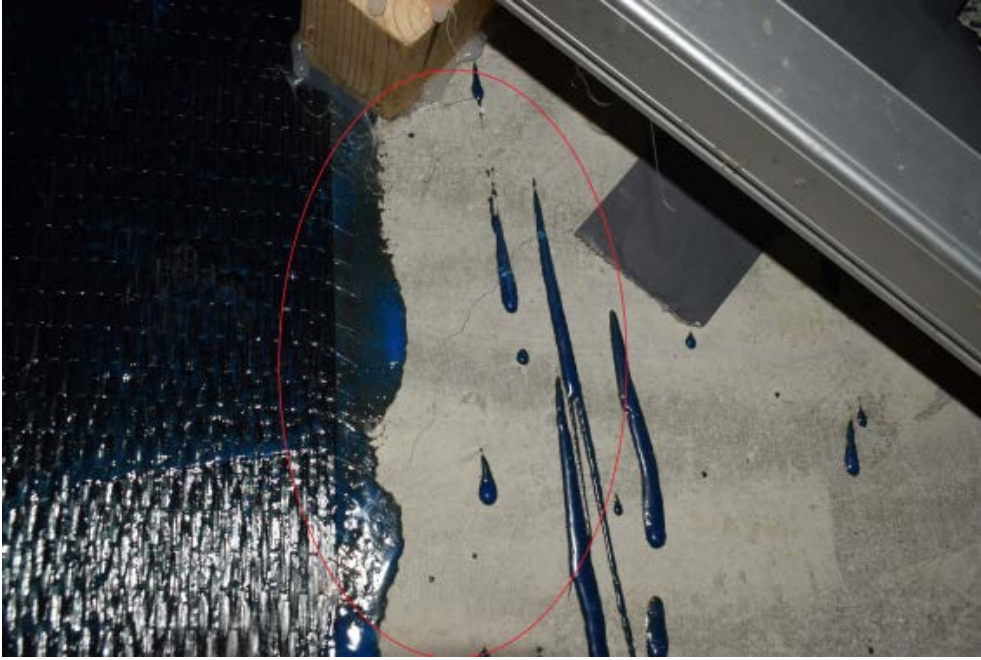
### 5.Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz sağ birleşim noktasında oluşan eğilme çatlağı düğüm noktasında diyagonal olarak ilerlemiştir. Arka yüz düğüm noktasının sol tarafında yeni bir diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Eğilme çatlağı ve diyagonal çatlak görünümü Şekil 4.121 ’de gösterilmiştir.





(a)



(b)

Şekil 4.121.(a) eğilme çatlak ve (b) diyagonal çatlak görünümü



## 6.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz düğüm noktasında diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Arka yüz düğüm noktasındaki mevcut diyagonal çatlaklar ilerlemiştir.

## 7.Çevrim (+40 kN)

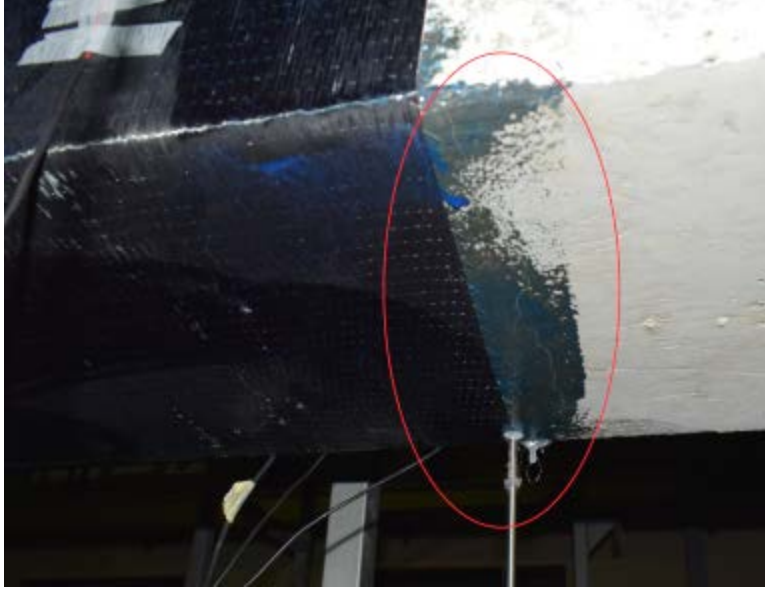
Çevrimin ileri yükleme adımında, CFRP'nin betondan ayrılma sesleri gelmeye başlamıştır. Ön yüz düğüm noktasının sol tarafında sırayla üç tane diyagonal çatlak oluşumu görülmüştür. Arka yüz düğüm noktasından kolon pas payına ilerleyen yeni bir diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Kolon pas payına ilerleyen diyagonal çatlak Şekil 4.122'de gösterilmiştir.



Şekil 4.122.Kolon pas payına doğru ilerleyen diyagonal çatlak görünümü

## 7.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, CFRP'nin betondan ayrılma sesleri gelmeye devam etmiştir. Ön yüz sağ kolon alt yüzünde eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir. Kolon alt yüz eğilme çatlak Şekil 4.123'de gösterilmiştir.



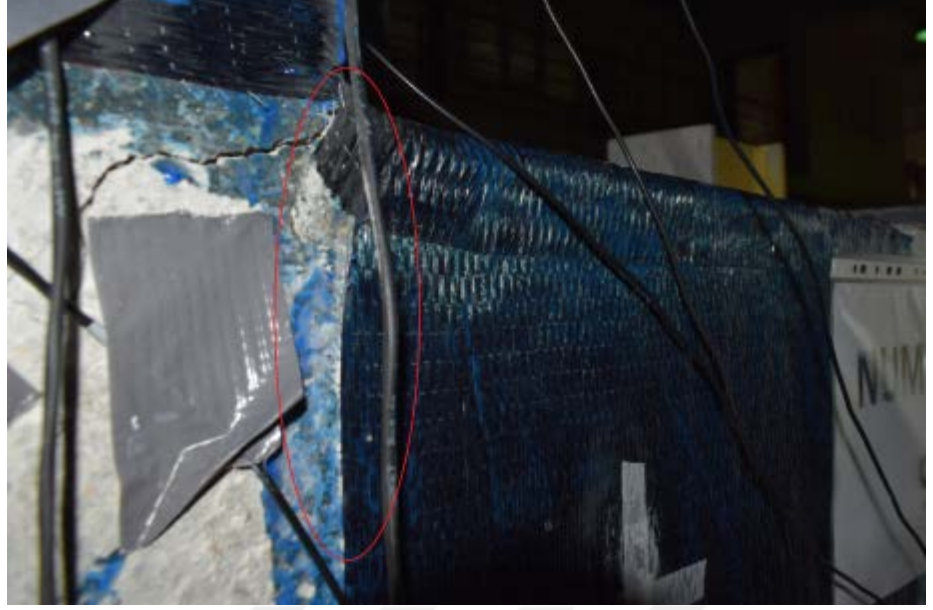
Şekil 4.123.Kolon alt yüz eğilme çatlakları

#### 10.Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, mevcut çatlaklar genişleyerek iyice belirginleşmiştir. CFRP'deki birim deformasyon değerleri CFRP-beton ayrışmasından ötürü 2000 ve üzeri micro-strain ölçülmüştür.

#### 11.Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, CFRP'nin betondan ayrılma sesleri şiddetlenmiştir. Ön yüz düğüm noktasının sağ tarafında CFRP-beton ayrışması görülmüştür. Sistemin göçme mertebesine ulaşmak üzere olduğu histerezis eğrisinden anlaşılmaktadır. Ön yüz sol kolon alt yüzünde yeni eğilme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. CFRP-beton ayrışması Şekil 4.124'de gösterilmiştir.



Şekil 4.124.CFRP-beton ayrışması

#### 12.Çevrim (+70 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, numunede 69 kN'da akma meydana gelmiştir ve 45 mm tepe deplasman ölçülmüştür. Ön ve arka yüz düğüm noktaları çevresinde CFRP, betondan ayrılmıştır. Yüklemeden ötürü kolon sehim yapmıştır.

#### 12.Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 65 kN'da numune akmıştır ve 50 mm tepe deplasman ölçülmüştür. CFRP'de yaklaşık 3500-4000 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Kiriş boyuna donatısında 4375 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür.

Bu çevrimden sonra, ileri ve geri yükleme adımlarındaki tepe deplasmanı değerleri artırılarak 3 tam çevrim daha yapılmıştır. Son çevrimin ileri ve geri yükleme adımında 95 mm tepe deplasman ve 46 kN yük değeri görülmüştür. Son çevrimden sonra ön yüz genel görünümü ile ön ve arka yüz düğüm noktaları görünümü Şekil 4.125 ve 4.126'da gösterilmiştir.

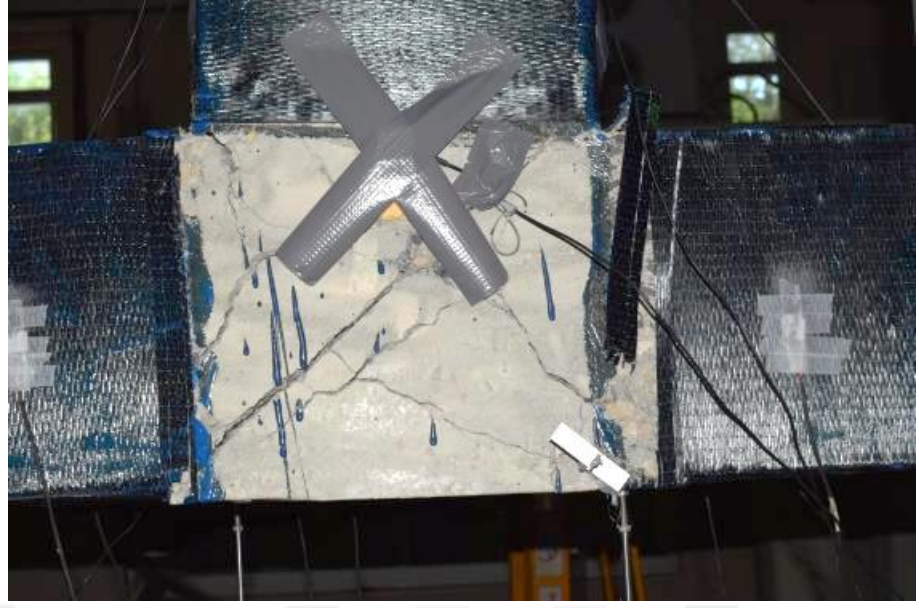


Şekil 4.125.Ön yüz genel görünümü



(a)



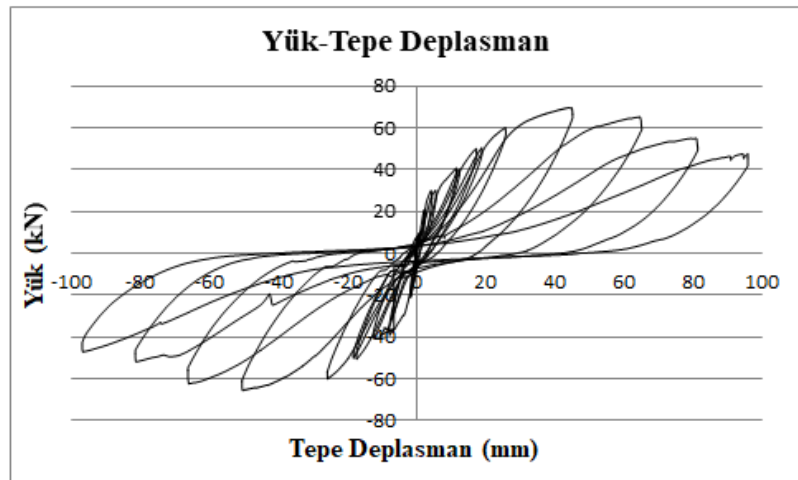


(b)

Şekil 4.126.(a) ön ve (b) arka yüz düğüm noktaları hasar durumu

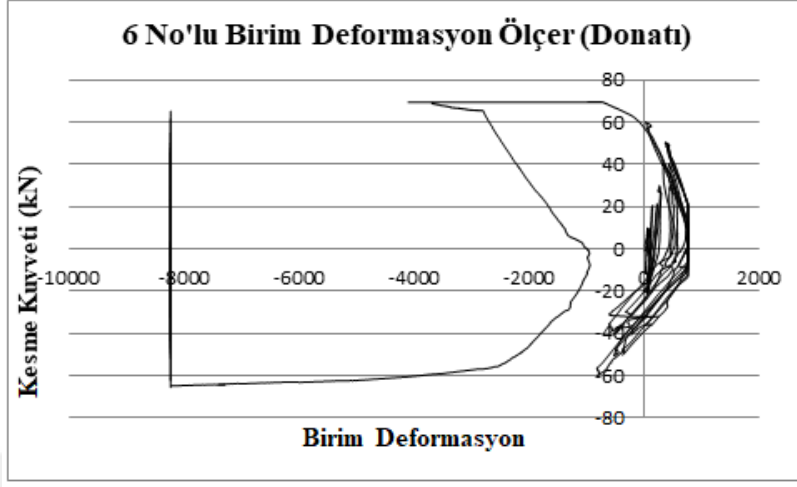
Yüklemeye sonunda CFRP'nin kopması ile düğüm noktası parçalanması gerçekleşmiştir. Bundan ötürü numunenin rijitliğini kaybettiği belirlenmiştir. Yüklemeye sonunda elemanda büyük bir hasar meydana gelmiştir.

Deney sonrasında Deney Elemanı-8'den elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.127'de gösterilmiştir.



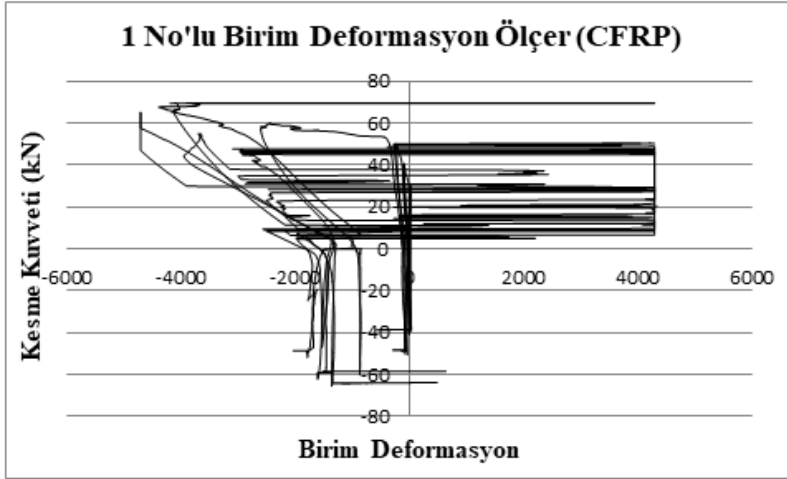
Şekil 4.127.Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-8 için kiriş boyuna donatısındaki birim deformasyon Şekil 4.128'de gösterilmiştir.

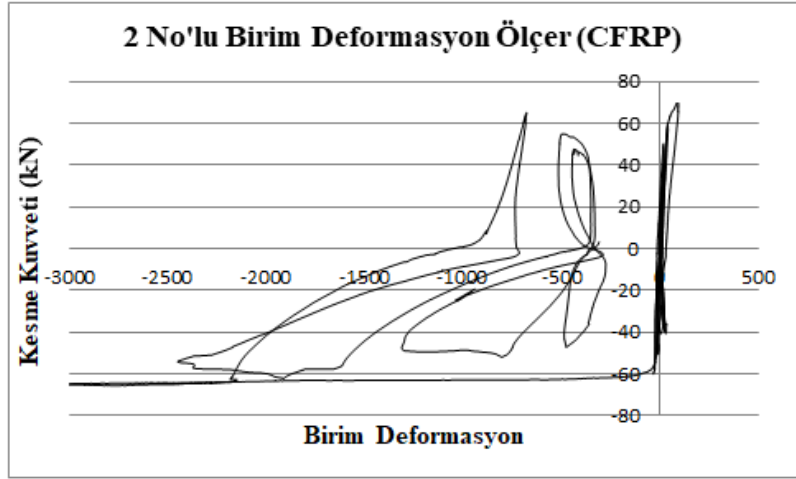


Şekil 4.128.6 No'lu Birim Deformasyon Ölçer

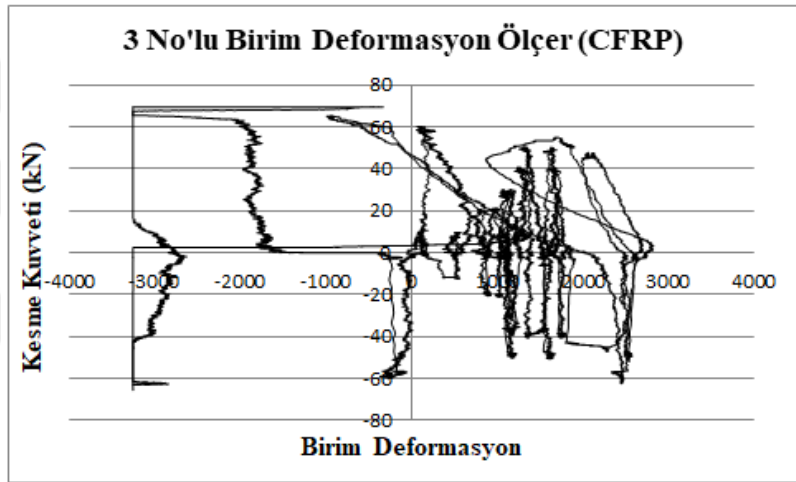
Deney Elemanı-8 için CFRP şeritlerindeki birim deformasyonlar Şekil 4.129 4.130, 4.131, 4.132 ve 4.133'de gösterilmiştir.



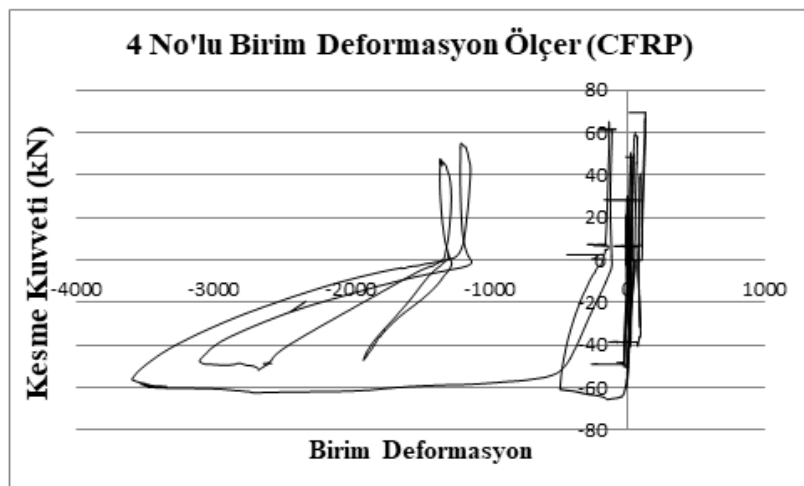
Şekil 4.129.Ön düşey sol (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer



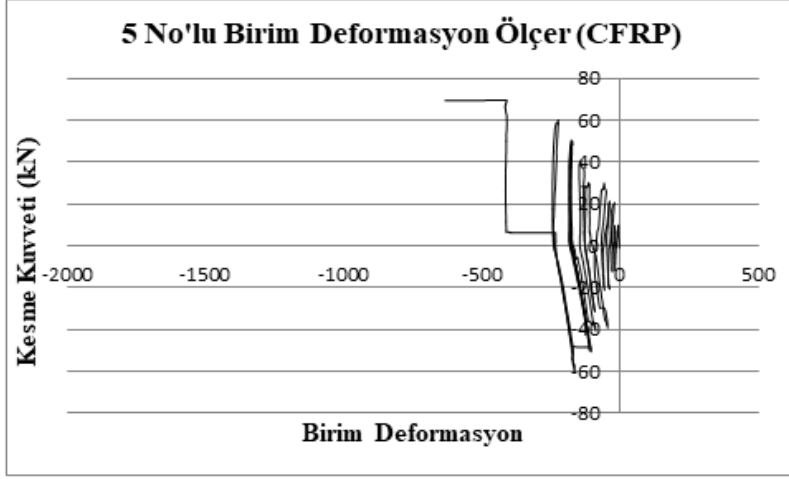
Şekil 4.130.Ön düşey sağ (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.131.Arka düşey sağ (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer

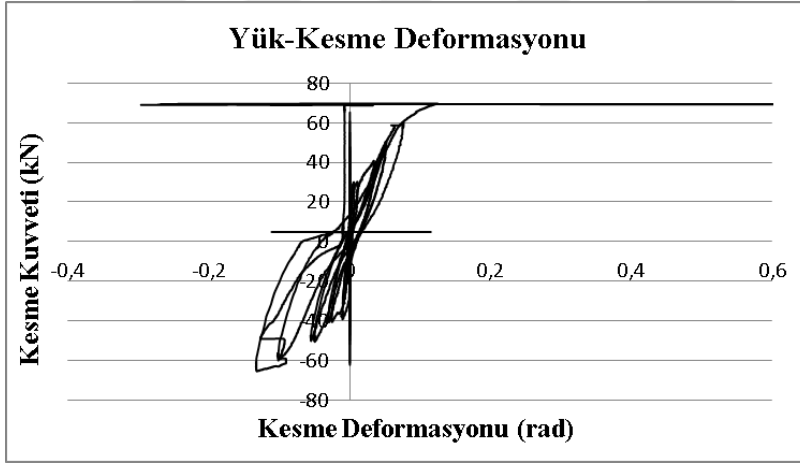


Şekil 4.132.Arka düşey sol (kolon) CFRP birim deformasyon ölçer



Şekil 4.133.Ön yüz (kiriş) CFRP birim deformasyon ölçer

Deney Elemanı-8'den elde edilen yük-kesme deformasyonu grafiği Şekil 4.134'de gösterilmiştir.



Şekil 4.134. Yük-kesme deformasyonu grafiği

#### 4.9 Deney Elemanı-9

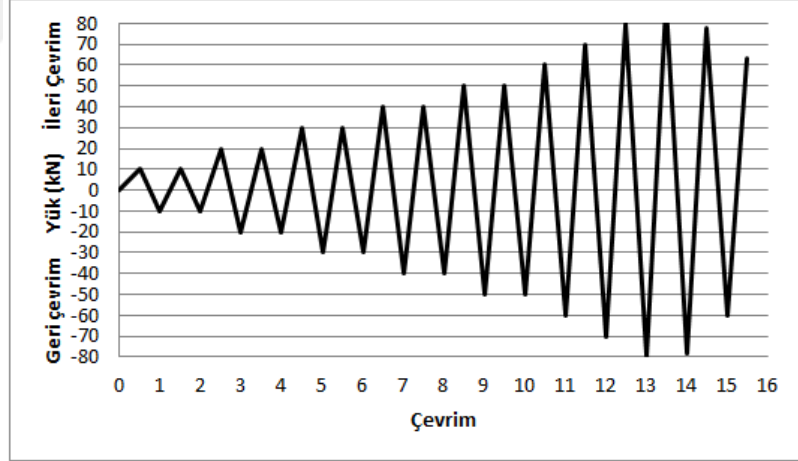
Deney Elemanı-2 ile aynı donatı detayına sahiptir. Deney elemanı, düğüm noktasından 2 adet 120x120x15 mm boyutlarında L köşebent ve 1 adet 660x378x20 mm boyutlarında çelik levha ile güçlendirilmiştir. Deney Elemanı-9 Şekil 4.135'de gösterilmiştir.





Şekil 4.135. Deney Elemanı-9 genel görünümü

Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 4.136'da verilmiştir. Deney elemanına 15 tam, 1 yarım yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 4.136. Kesme kuvveti çevrim grafiği, Deney Elemanı-9

Deney sırasında gözlemlenen bazı deneysel sonuçlar, gerçekleştiği çevrim belirtilerek aşağıda özetlenmiştir.

## 5.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, arka yüz birleşim bölgesinin sağ üst köşesinden ortaya doğru 8 cm boyunda diyagonal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Çatlak oluşumu Şekil 4.137’de gösterilmiştir.



Şekil 4.137.Arka yüzeyde diyagonal çatlak oluşumu

## 5.Çevrim (-30 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, yeni bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

## 6.Çevrim (+30 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, arka yüzdeki mevcut diyagonal çatlağın uç kısmında 3 cm boyunda eğilme çatlağı oluşmuştur. Ayrıca ön yüzde, kolonun alt yüzeyindeki levhanın sağ üst köşesinde beton ezilmesi meydana gelmiştir.

## 6.Çevrim (-30 kN)

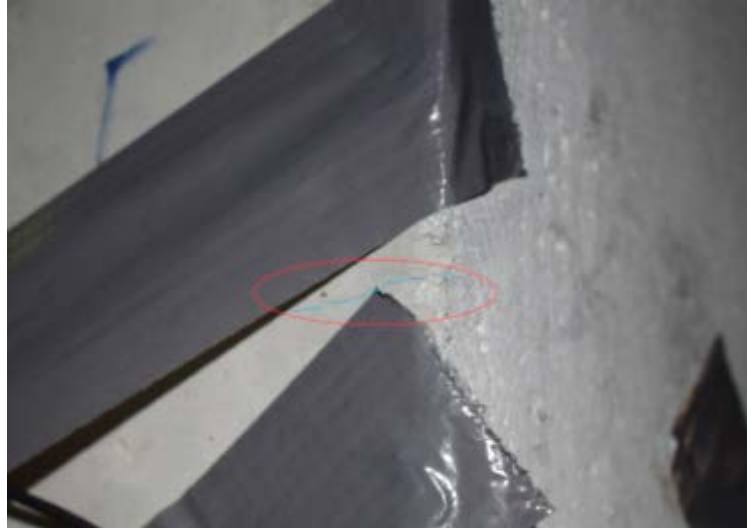
Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sağ yüzeyinde, birleşim noktasının 25 cm yukarısında eğilme çatlağı gözlenmiştir. Arka yüz kiriş sol yüzeyinde, birleşim noktasının 26 cm yukarısında eğilme çatlağı gözlenmiştir. Ayrıca, yine arka yüz kiriş sol yüzeyinde, birleşim noktasının 12 cm yukarısında ikinci bir eğilme çatlağı gözlenmiştir. Arka yüz 12 cm’deki eğilme çatlağı görünümü şekil 4.138’de gösterilmiştir.



Şekil 4.138.Arka yüz 12 cm'deki eğilme çatlağı görünümü

#### 7.Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz kiriş sol yüzeyinde, birleşim noktasının 40 cm yukarısında yeni bir eğilme çatlağı gözlenmiştir. Ön yüzde kiriş yüzeyinde, birleşim noktasının 20 cm yukarısında eğilme çatlağı gözlenmiştir. Arka yüz birleşim bölgesindeki mevcut diyagonal çatlak ikiye ayrılmıştır. Ön yüz eğilme ve arka yüz diyagonal çatlağı Şekil 4.139'da gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.139.(a) Ön yüz 40 cm'deki eğilme çatlağı ve (b) arka yüz diyagonal çatlak

#### 7.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, ön yüz kiriş sağ bölgesinde, birleşim noktasının 25 cm yukarısındaki eğilme çatlağı, kirişin sağ yüzeyine doğru ilerlemiştir. Arka yüz kiriş sol yüzeyinde, birleşim noktasının 12 cm yukarısındaki eğilme çatlağı ilerlemeye devam etmiştir.

#### 8.Çevrim (+40 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, ön yüz birleşim bölgesindeki mevcut diyagonal çatlağa dik doğrultuda yeni bir diyagonal çatlak oluşmuştur. Arka yüz birleşim bölgesinde, sol yukarıdan başlayarak sağ alt kısma doğru uzanan diyagonal çatlak oluşmuştur.

#### 8.Çevrim (-40 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, mevcut çatlaklar durumunu korumuştur.

#### 9. Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımımda, birleşim noktasının ön ve arka yüzeyindeki diyagonal çatlaklar genişlemiştir. Ayrıca ön yüz kiriş bölgesinde, birleşim noktasının 70 cm yukarısında yeni bir eğilme çatlağı oluşmuştur. Arka yüzde kolonun alt tarafında, birleşim noktasının 29 cm solunda yeni bir çatlak oluşmuştur ve kolon alt yüzeyine doğru ilerlemiştir.

#### 9. Çevrim (-50 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımımda, ön ve arka yüzdeki çatlaklar büyümeye devam etmiştir.

#### 10.Çevrim (+50 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımımda, ön yüzde kirişin sol yüzeyinde, birleşim noktasının 55 cm yukarısında yeni bir eğilme çatlağı oluşmuştur.

#### 10.Çevrim (-50 kN)

Bu çevrimin geri yükleme adımımda, arka yüzde birleşim bölgesinde plakanın sağ üst kısmında yeni bir çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çatlak şekil 4.140'da gösterilmiştir.



Şekil 4.140.Plaka üzerindeki çatlak

#### 11. Çevrim (+60 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, kiriş düşey donatısında 990 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Numunede 20 mm deplasman meydana gelmiştir. Mevcut çatlaklar ilerlemeye ve genişlemeye devam etmiştir.

#### 11. Çevrim (-60 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş düşey donatısında 2540 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Numunede 21 mm deplasman meydana gelmiştir. Mevcut çatlaklar ilerlemeye ve genişlemeye devam etmiştir.

#### 12. Çevrim (+70 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, kiriş düşey donatısında 1318 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Numunede 26,5 mm deplasman meydana gelmiştir.

#### 12. Çevrim (-70 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş düşey donatısında 4543 micro-strain birim deformasyon ölçülmüştür. Numunede 28,3 mm deplasman meydana gelmiştir. Bu yükleme adımında ön yüzdeki çapraz deplasman ölçer kopmuştur.

## 13. Çevrim (+80 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, mevcut çatlaklar ilerlemeye ve genişlemeye devam etmiştir. Numunede 37 mm deplasman meydana gelmiştir.

## 13. Çevrim (-80 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, mevcut çatlaklar ilerlemeye ve genişlemeye devam etmiştir.

## 14. Çevrim (+90 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 85 kN'da histeresis eğride biraz daha rijitlik kaybı görülmüştür. Mevcut çatlaklar durumunu korumaya devam etmiştir.

## 14. Çevrim (-90 kN)

Çevrimin geri yükleme adımında, 78 kN'da numunede akma meydana gelmiştir ve 85 mm deplasman ölçülmüştür.

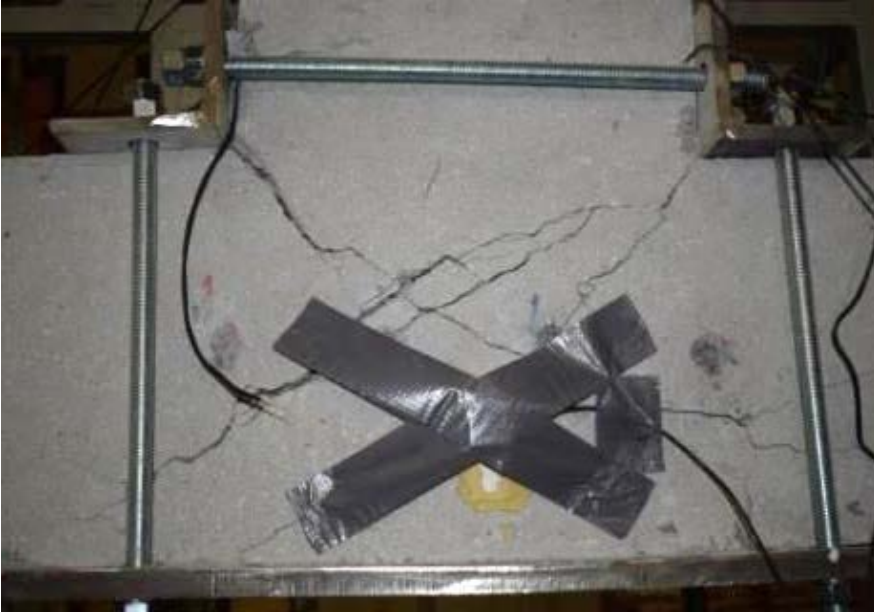
## 15. Çevrim (+100 kN)

Çevrimin ileri yükleme adımında, 78 kN'da numunede akma meydana gelmiştir ve 90 mm deplasman ölçülmüştür. Deney sonunda numunede meydana gelen hasarlar Şekil 4.141, 4.142 ve 4.143'de gösterilmiştir.





Şekil 4.141.Ön yüz genel görünümü



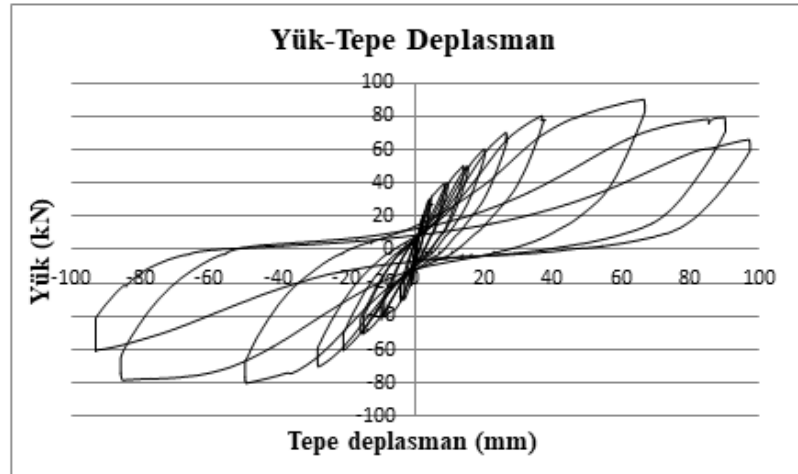
Şekil 4.142.Düğüm noktası ön yüz hasar durumu



Şekil 4.143.Düğüm noktası arka yüz hasar durumu

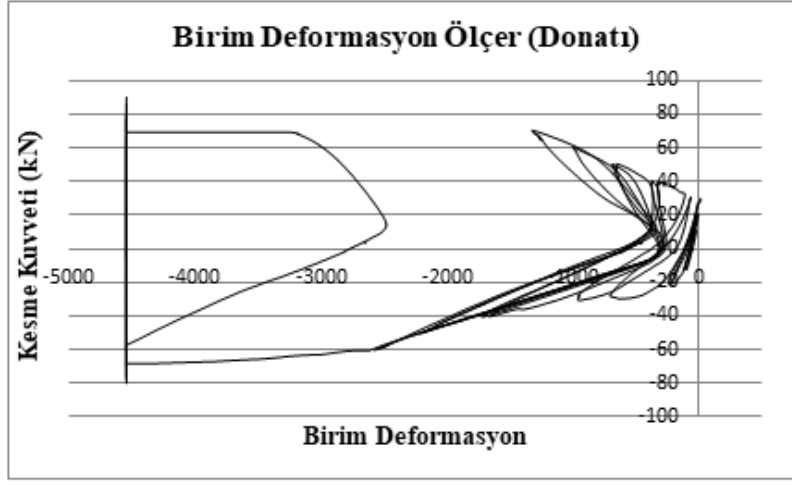
Bu aşamadan sonra, maksimum deplasman kontrolü için 110 kN'a kadar 1 tam çevrim daha uygulanmıştır. Deney elemanı eğilme kapasitesine ulaştığı için kiriş gövdesinde oluşan kesme çatlaklarının boyutunda bu çevrimden sonra gelişim gözlenmemiştir.

Deney sonrasında Deney Elemanı-9'dan elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.144'de gösterilmiştir.



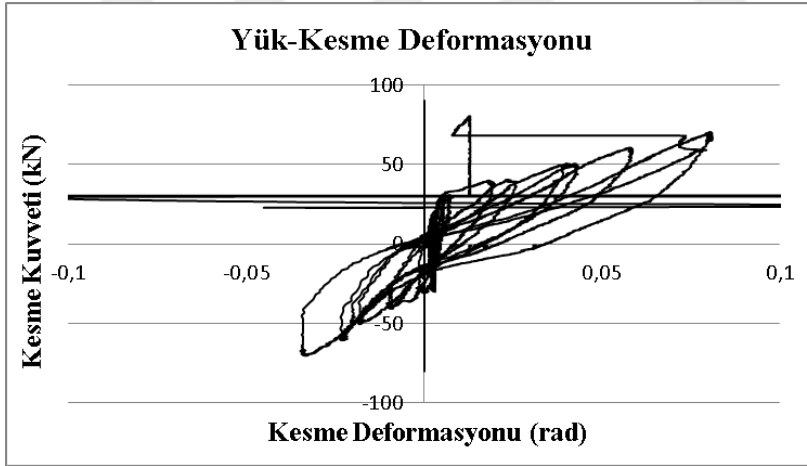
Şekil 4.144.Yük-tepe deplasman grafiği

Deney Elemanı-9 için kiriş düşey donatısındaki kesme kuvveti- birim deformasyon grafiği Şekil 4.145’de verilmiştir.



Şekil 4.145. Birim Deformasyon Ölçer

Deney sonrasında Deney Elemanı-9'dan elde edilen yük-tepe deplasman grafiği Şekil 4.146’da gösterilmiştir.



Şekil 4.146. Yük-kesme deformasyonu grafiği

## 5. TARTIŞMA

### 5.1 Deney Sonuçlarının Dayanım, Davranış, Enerji Tüketimi, Rijitlik Açısından Değerlendirilmesi

Deney sonuçları; dayanım, enerji tüketimi, rijitlik ve kesme kuvveti-kesme deformasyonu başlıkları altında değerlendirilmiştir.

#### 5.1.1 Dayanım ve Davranış

Dayanım, uygulanan çeşitli güçlendirme yöntemlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Deney elemanlarının dayanımını belirlemek için yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır. Ölçülen maksimum yük değer ve maksimum deplasmanlar Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Güçlendirilen deney elemanlarında, güçlendirme sonrasında dayanım artışı sağlanmıştır. Dayanım artışının temel sebebi, güçlendirme ile birlikte elemanın daha sünek davranarak taşıma kapasitesini arttırmasıdır. Deney elemanlarının güçlendirilmesi, kesme çatlaklarının oluşumunu geciktirmiş ve elemanların yüksek dayanım göstererek daha fazla deplasman yapmasını sağlamıştır. Yapılan üç farklı güçlendirme sonucunda hangi güçlendirme yönteminin nasıl bir dayanım artışı sergilediği görülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda çelik ceket takviyelerle güçlendirmenin, hem CFRP ile güçlendirilen hem de çelik ankraj ile donatılan deney elemanlarına göre daha yüksek bir dayanım gösterdiği görülmüştür.

Güçlendirilen deney elemanlarında, referans numunesine göre (Deney Elemanı-2) dayanım artışı sağlandığı görülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda güçlendirilmiş deney elemanlarında en küçük dayanım Deney Elemanı-4’de, en büyük dayanım ise Deney Elemanı-9’da görülmüştür. Deney Elemanı-9’da referans numunesine göre 1.497 oranında dayanım artışı sağlandığı görülürken, Deney Elemanı-4’de 1.069 oranında dayanım artışı sağlandığı görülmüştür. Dayanım artışı küçük görülmesine rağmen güçlendirmede asıl amaç daha fazla dayanım artışı sağlamak değil, gerçekleştirilen güçlendirme yöntemi ile elemanın davranışını iyileştirmektir.

Zayıf olan Deney Elemanı-1, Deney Elemanı-2’ye göre beklenildiği gibi, kiriş, kolon ve düğüm noktasının tamamında enine donatı eksikliğinden dolayı daha düşük dayanım göstermiştir.

Deney Elemanı-3 (çapraz ve düz şeritlerle güçlendirilmiş eleman) 'de, Deney Elemanı-4 (sadece çapraz şeritlerle güçlendirilmiş eleman) 'e göre daha fazla dayanım elde edilmiştir. Deney Elemanı-7 (kiriş-kolon ve düğüm noktası CFRP ile güçlendirilmiş eleman)'de ise Deney Elemanı-8 (kiriş-kolon bölgesi CFRP ile güçlendirilmiş eleman) 'e göre daha fazla dayanım elde edilmiştir. Deney Elemanı-5 (içten firkete şeklinde donatı ile güçlendirilmiş eleman), Deney Elemanı-6 (içten çapraz donatı ile güçlendirilmiş eleman)'ye göre daha düşük dayanıma sahiptir. En fazla dayanım, çelik ceket ile güçlendirilmiş Deney Elemanı-9'da görülmüştür. Tüm deney elemanlarında düğüm noktası göçmesi meydana gelmiştir. Güçlendirilen deney elemanlarının hepsinde kiriş boyuna donatısı akmıştır.

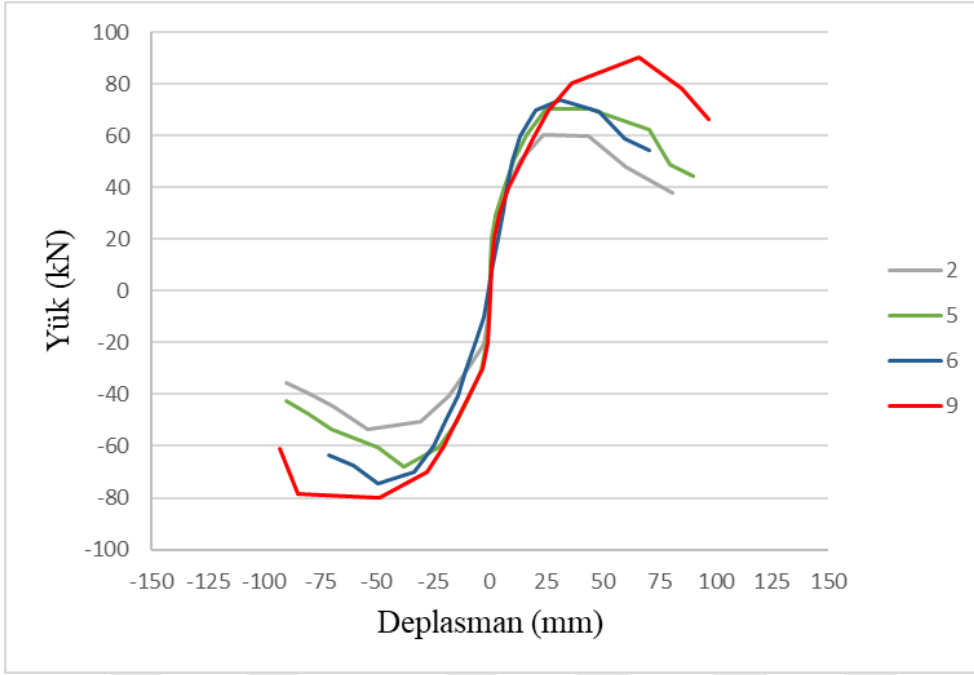
Tablo 5.1.Deney sonuçlarının özeti (Dayanım ve Deplasman)

Deney Elemanı No	Akma Yüğü (kN)		Akma Anındaki Deplasman (mm)		Ölçülen Maksimum Yüğü değeri (kN)	Güçlendirme sonrası elde edilen dayanım artışı	Göçme Mekanizması
	İleri	Geri	İleri	Geri			
1	53.64	-54.45	47.5	-45.6	-54.45	-	Düğüm noktası
2	60.22	-51.38	23.4	-54.0	60.22	-	Düğüm noktası
3	70.14	-62.91	41.8	-69.3	70.14	1.165	Düğüm noktası
4	64.37	-57.10	39.5	-30.2	64.37	1.069	Düğüm noktası
5	70.23	-67.90	24.7	-38.0	70.23	1.166	Düğüm noktası
6	73.80	-74.75	30.8	-49.7	-74.75	1.241	Düğüm noktası
7	78.12	-71.96	30.1	-50.9	78.12	1.297	Düğüm noktası
8	69.79	-65.54	44.2	-50.2	69.79	1.159	Düğüm noktası
9	90.17	-80.20	66.5	-49.1	90.17	1,497	Düğüm noktası

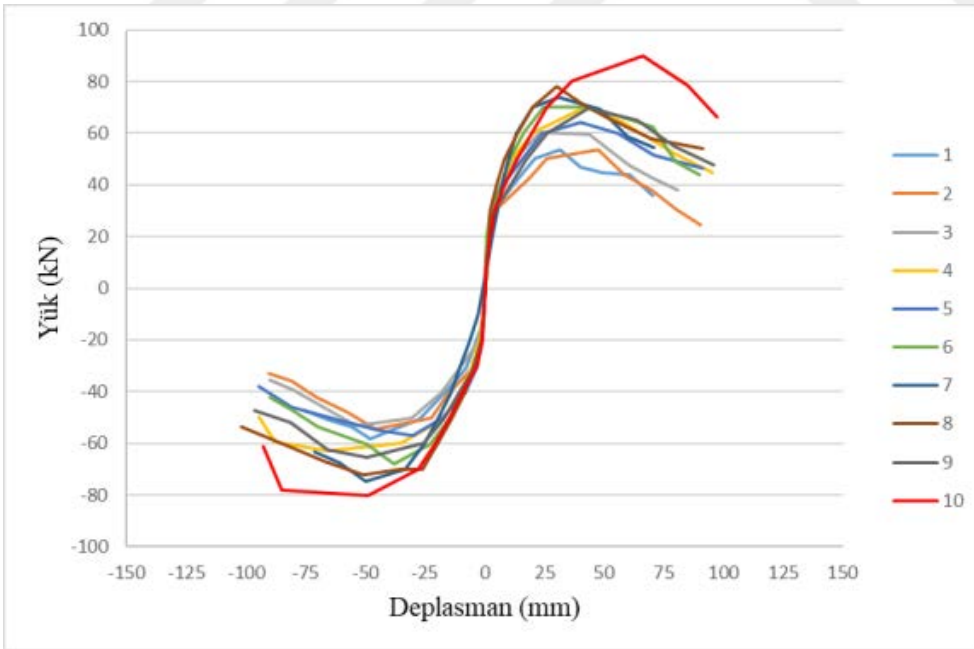
Her bir döngüdeki maksimum yüklere karşılık gelen deplasmanlara göre, elemanların zarf eğrileri çizilmiştir. Zarf eğrileri, numuneleri dayanım ve deplasman açısından kıyaslamak için çıkarılmıştır.

Şekil 5.1'de Referans-2 ve CFRP ile güçlendirilen deney elemanları karşılaştırılmıştır. Eğri incelendiğinde, en iyi davranışı kiriş-kolon ve düğüm





Şekil 5.2. Referans-2 ile çelik ankraj ve çelik ceket ile güçlendirilen deney elemanlarına ait yük-deplasman zarf eğrileri



Şekil 5.3. Deney elemanlarının yük-deplasman zarf eğrileri

### 5.1.2 Enerji Tüketimi

Enerji tüketimi, deney elemanlarına uygulanan her yük çevrimi için kesme kuvveti-deplasman grafiklerinde oluşan kapalı alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Her çevrimde tüketilen enerjinin 14. Çevrim sonuna kadar birikimli olarak toplanmasıyla deney elemanının birikimli enerji tüketimi elde edilmiştir. Her elemanda ilk 14 çevrimin kümülatif enerji hesabında dikkate alınmasının sebebi her numunede nihai duruma kadar farklı sayıda çevrimin uygulanması ve bazı numunelerde en fazla 14 çevrim yük uygulanmış olmasıdır. Deney elemanlarının enerji tüketimleri göçmede hesaplanmıştır (Tablo 5.2).

Güçlendirme ile birlikte elemanlar sünek davranış sergilediğinden ötürü, elemanlarda yüksek enerji tüketimi görülmüştür. Sünek davranmalarından dolayı elemanlarda çok sayıda mikro çatlak oluşmuş ve bu yüzden elemanlarda yüksek enerji tüketimi görülmüştür. Yapılan üç farklı güçlendirme sonucunda hangi güçlendirme yönteminin ne kadar enerji tükettiği hesaplanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda çelik ceket takviyelerle güçlendirmenin, hem CFRP ile güçlendirilen hem de çelik ankraj ile donatılan deney elemanlarına göre daha yüksek enerji tükettiği görülmüştür.



Tablo 5.2.Deney elemanlarının birikimli enerji tüketimleri

Deney Eleman No	Kümülatif Enerji Tüketimi (kNmm)	$\frac{E_{(n)}^1}{E_1}$
1	11168,88	0,91
2	12276,34	1,00
3	16915,25	1,38
4	13251,01	1,08
5	14386,03	1,17
6	12327,81	1,01
7	16059,09	1,31
8	14498,80	1,18
9	22884,49	1,86

Not:  $E_{(n)}^1$  = n numaralı deney elemanının enerji tüketimi

Deney programında en az enerjiyi kiriş, kolon ve düğüm noktasında enine donatı eksikliği olan ve zayıf eleman olarak tasarlanan Deney Elemanı-1 tüketmiştir. Deney Elemanı-1, düğüm noktası göçmesinden dolayı 11168,88 kNmm enerji tüketerek göçmüştür. CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanları içerisinde en düşük enerjiyi 13251,01 KNmm ile Deney Elemanı-4 tüketmiştir. Deney Elemanı 3 (çapraz ve düz şeritlerle güçlendirilmiş eleman), Deney Elemanı-4 (sadece çapraz şeritlerle güçlendirilmiş eleman) 'den daha fazla enerji tüketmiştir. Deney Elemanı-7 (kiriş-kolon ve düğüm noktası CFRP ile güçlendirilmiş eleman), Deney Elemanı-8 (kiriş-kolon bölgesi CFRP ile güçlendirilmiş eleman) 'den daha fazla enerji tüketmiştir. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması enerji tüketimi açısından olumsuz davranış sergilemiştir. Birleşim bölgesinde içten donatı ankrajı ile güçlendirilen deney elemanları (Deney Elemanı-5 ve Deney Elemanı-6), referans numunesine (Deney Elemanı-2) göre daha fazla enerji tüketmiştir. Deney Elemanı-5 (içten firkete şeklinde donatı ile güçlendirilmiş eleman), Deney Elemanı-6 (içten çapraz donatı ile güçlendirilmiş eleman)'ya göre daha fazla enerji tüketmiştir. En fazla enerji tüketimini, çelik ceket ile güçlendirilmiş Deney Elemanı-9 göstermiştir. Deney Elemanı-9, 22884,49 kNmm enerji ile referans elemanından 1,86 kat fazla enerji tüketmiştir.

### 5.1.3 Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri kesme kuvveti-tepe deplasman grafiği baz alınarak hesaplanmıştır. Rijitlik, belirlenen yük düzeyinin grafiğinin orijinine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir. Rijitlikler başlangıç ve maksimum yük düzeyinde hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanının testinde ilk eğilme çatlaklarının olduğu yük düzeyi için hesaplanmıştır. Deney elemanlarına uygulanan ileri ve geri yükleme adımlarında ulaşılan maksimum yük düzeyi için maksimum yük rijitlikleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Maksimum yük düzeyindeki rijitliklerin karşılaştırılmasında, ileri ve geri çevrimde elde edilen rijitliklerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Tablo 5.3'de deney elemanlarının ileri ve geri yükleme adımları için rijitlikleri ve rijitliklerin ortalama değerleri verilmiştir.

Tablo 5.3. Deney elemanlarının rijitlik değerleri

Deney Eleman No	Başlangıç (kN/mm)	Maksimum Yük		$(K_n^1/K_1)$ Oranı		
		İleri Çevrim (kN/mm)	Geri Çevrim (kN/mm)	Başlangıç	Maksimum Yük	
					İleri	Geri
1	13,64	1,13	1,20	0,81	0,44	1,24
2	16,83	2,57	0,97	-	-	-
3	13,48	1,67	0,90	0,80	0,65	0,93
4	24,21	1,61	1,84	1,44	0,63	1,90
5	22,22	1,58	1,78	1,32	0,61	1,84
6	18,75	2,39	1,50	1,11	0,93	1,55
7	20,10	2,59	1,41	1,19	1,01	1,45
8	24,87	1,58	1,31	1,48	0,61	1,35
9	35,23	1,36	1,63	2,10	0,53	1,68

Not:  $K_n^1$  = n numaralı deney elemanının rijitliği

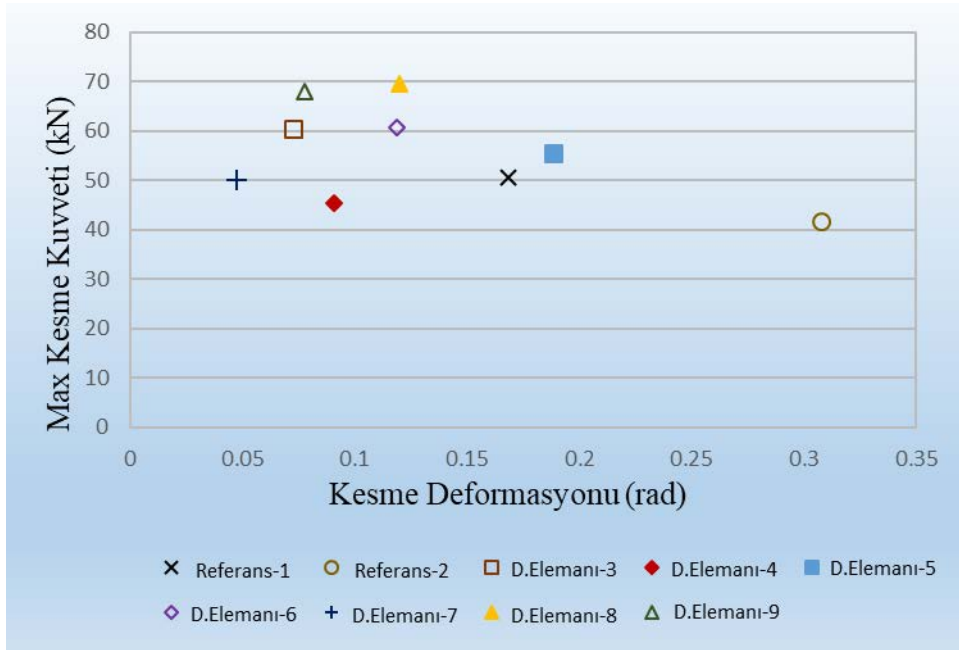
Düğüm noktasında enine donatı eksikliği olan Referans-2 elemanının başlangıç rijitliği, kiriş-kolon ve düğüm noktasında enine donatı eksikliği olan Referans-1 elemanına göre daha büyüktür. Deney Elemanı-3, deney sonuçları içinde en küçük başlangıç rijitliğine sahiptir. Deney Elemanı-3'ün başlangıç rijitliği 13,48 kN/mm'dir. CFRP şerit kullanılarak güçlendirilen diğer deney

elemanlarından Deneş Elemanı-4, Deneş Elemanı-7 ve Deneş Elemanı-8'de, başlangıç rijitliğinde referans deneş elemanına (Deneş Elemanı-2) göre artış sağlanmışır. Güçlendirilen deneş elemanları içerisinde en büyük başlangıç rijitliğine 35,23 kN/mm ile düğüm noktası çelik ceket ile güçlendirilen Deneş Elemanı-9 sahiptir. Deneş Elemanı-9'un başlangıç rijitliği referans elemandan 2,10 kat daha büyüktür.

Güçlendirilen elemanların geri yükleme adımlarında ölçülen maksimum yük rijitliklerine baktığımızda, test elemanlarından Deneş Elemanı-7 hariç diğer tüm deneş elemanları daha düşük rijitlik göstermişlerdir. Güçlendirilen elemanların ileri yükleme adımlarında ölçülen maksimum yük rijitliklerine baktığımızda, Deneş Elemanı-3 hariç diğer tüm deneş elemanları yüksek maksimum yük rijitliği göstermişlerdir. Güçlendirilen deneş elemanları, güçlendirme malzemesinin yardımıyla referans elemanından daha fazla yük taşımaktadırlar. Ancak yük seviyesi arttıkça birleşim noktası ve çevresinde çok sayıda eğilme ve kesme çatlakları oluşmaktadır. Bu çatlak oluşumları deneş elemanlarının geri yükleme maksimum yük rijitliklerinin referans (Referans-2) elemanına göre azalmasına neden olmaktadır.

#### 5.1.4 Kesme kuvveti-kesme deformasyonu ilişkisi

Düğüm noktasındaki kesme kuvveti ve kesme deformasyonu ilişkisi her numune için karşılaştırılmalı olarak Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Deney elemanlarının karşılaştırmalı maksimum kesme kuvveti-kesme deformasyonu ilişkisi

Şekilden de görülmektedir ki sonuçlar genel olarak diğer bulgularla uyumludur. En çok hasar gören Deney Elemanı-2 en fazla dönme değerine sahiptir. Deney Elemanı-7 ise en küçük dönme değerine sahiptir. Diğer sonuçlarda en iyi değerleri veren Deney Elemanı-9 tüm yüzeyi CFRP ile kaplı Deney Elemanı-7 ve çapraz olarak sargılanmış ve kolonda da sargısı devam eden Deney Elemanı-3'den sonra en küçük dönme değerini vermiştir. CFRP güçlendirmesi dönme deformasyonlarını azaltmıştır.





## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Gerçekleştirilen deneyler sonucunda en küçük dayanım Deney Elemanı-1’de, en büyük dayanım ise Deney Elemanı-9’da elde edilmiştir.
- En uygun güçlendirme yönteminin çelik ceket ile güçlendirme olduğu görülmüştür. CFRP ve donatı ilave edilerek güçlendirilen numuneler de başarılı sonuçlar vermesine rağmen dayanım ve davranış bakımından en uygun yöntemin referans elemana göre 1.5 kat dayanım artışıyla çelik ceket ile güçlendirme yöntemi olduğu görülmüştür.
- Enerji tüketim kapasitesi bakımından karşılaştırıldığında en az enerjiyi 11168,88 kNmm ile Deney Elemanı-1 tüketmiştir, en fazla enerjiyi ise 22884,49 kNmm ile Deney Elemanı-9 tüketmiştir. Enerji tüketim kapasitesinin dayanım ile doğru orantılı olduğu görülmüştür.
- En küçük başlangıç rijitliğine sahip deney elemanı 13,48 kN/mm ile Deney Elemanı-3’dür. En büyük başlangıç rijitliğine sahip deney elemanı ise 35,23 kN/mm ile Deney Elemanı-9’dur. Çelik levha ile güçlendirme başlangıç rijitliğini diğer güçlendirme yöntemlerine göre artırmıştır.
- CFRP ile güçlendirilen elemanlar arasında en fazla dayanıma sahip eleman Deney Elemanı-7’dir. Böylece kiriş-kolon bölgesi ile düğüm noktasının CFRP ile güçlendirilmesinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.
- İçten donatı ilave edilerek güçlendirilen elemanlarda ise, Deney Elemanı-5 (içten firkete şeklinde donatı ile güçlendirilmiş eleman), Deney Elemanı-6 (içten çapraz donatı ile güçlendirilmiş eleman)’ya göre daha düşük dayanıma sahiptir. Fakat başlangıç rijitliği ve enerji tüketimi daha fazla olduğu görülmüştür.
- CFRP ile güçlendirilen elemanlar arasında en fazla enerji tüketimine sahip eleman 16059,09 kNmm ile Deney Elemanı-7’dir. En düşük enerji tüketimine ise 13251,01 kNmm ile Deney Elemanı-4 sahiptir. Sadece çapraz şeritli CFRP ile güçlendirmenin dayanımı ve enerji tüketim kapasitesini fazla arttırmadığı görülmüştür.

- Çalışma sonucunda güçlendirme yöntemleri değerlendirildiğinde en iyi sonucu çelik plakalarla güçlendirme vermiştir. Sonrasında ise CFRP ile güçlendirmenin de oldukça etkin bir yöntem olduğu söylenebilir.



**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Al-Salloum, Y.A., Siddiqui, N.A., Elsanadedy, H.M., Abadel, A.A., Aqel M.A.,** 2011, Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints, *Journal of Composites for Construction*, 15:920-933 pp.
- Alsayed, S.H., Almusallam, T.H., Al-Salloum, Y.A., Siddiqui, N.A.,** 2010, Seismic rehabilitation of corner RC beam-column joints using CFRP composites, *Journal of Composites for Construction*, 14:681-692 pp.
- Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M.,** 2010, Efficiency of Beam Column Joint Strengthened by FRP Laminates, *Advanced Composite Materials*, 19:171-183 pp.
- Arzeyton, A., Hosseini, A., Goudarzi, A.,** 2016, Seismic rehabilitation of exterior RC beam-column joints using steel plates, angles, and posttensioning rods, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30.
- Campione, G., Cavaleri, L., Papia, M.,** 2015, Flexural response of external R.C. beam-column joints externally strengthened with steel cages, *Engineering Structures*, 104:51-64 pp.
- Del Vecchio, C., Di Ludovico, M., Balsamo, A., Prota, A., Manfredi, G., Dolce, M.,** 2014, Experimental investigation of exterior RC beam-column joints retrofitted with FRP systems, *Journal of Composites for Construction*, 18(4).
- Del Vecchio, C., Di Ludovico, M., Prota, A., Manfredi, G.,** 2015, Analytical model and design approach for FRP strengthening of non-conforming RC corner beam-column joints, *Engineering Structures*, 87:8-20 pp.
- Esmaeeli, E., Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J., Fasan, L., Li Prizzi, F.R., Melo, J., Varum, H.,** 2015, Retrofitting of interior RC beam-column joints using CFRP strengthened SHCC: Cast-in-place solution, *Composite Structures*, 122:456-46 pp.



- Esmaeeli, E., Danesh, F., Tee, K.F., Eshghi, S.,** 2017, A combination of GFRP sheets and steel cage for seismic strengthening of shear-deficient corner RC beam-column joints, *Composite Structures*, 159: 206-219 pp.
- Elsouri, A.M., Harajli, M.H.,** 2015, Repair and FRP Strengthening of Earthquake-Damaged RC Shallow Beam-Column Joints, *Advances in Structural Engineering*, 18:237-249 pp.
- Garcia, R., Jemaa, Y., Helal, Y., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.,** 2014, Seismic strengthening of severely damaged beam-column RC joints using CFRP, *Journal of Composites for Construction*, 18.
- Ha, G-J., Cho, C-G., Kang, H-W, Feo, L.,** 2013, Seismic improvement of RC beam-column joints using hexagonal CFRP bars combined with CFRP sheets, *Composite Structures*, 95:464-470 pp.
- Hadi, M.N.S., Tran, T.M.,** 2014, Retrofitting nonseismically detailed exterior beam-column joints using concrete covers together with CFRP jacket, *Construction and Building Materials*, 63:161-173 pp.
- Lee, W.T., Chiou, Y.J., Shih, M.H.,** 2010, Reinforced concrete beam-column joint strengthened with carbon fiber reinforced polymer, *Composite Structures*, 92:48-60 pp.
- Li, Y., Sanada, Y.,** 2014, Strengthening with wing walls for seismically substandard RC Beam-Column joints, 10<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering (NCEE)-Frontiers of Earthquake Engineering, Alaska.
- Li, B., Shu Lam, E.S., Wu, B., Wang, Y.Y.,** 2013, Experimental investigation on reinforced concrete interior beam-column joints rehabilitated by ferrocement jackets, *Engineering Structures*, 56:897-909 pp.
- Ma, C., Wang, D., Wang, Z.,** 2017, Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps, *Composite Structures*, 159:397-409 pp.

- Mahmoud, M.H., Afety, H.M., Kassem, N.M., Fawzy, T.M.,** 2014, Strengthening of defected beam–column joints using CFRP, *Journal of Advanced Research*, 5:67-77 pp.
- Menteşoğlu, M.,** 2019, Güçlendirilmiş betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin kırılma mekanizmalarının akustik emisyon yöntemi ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 134 s. (yayımlanmamış)
- Mısır, I.S., Kahraman, S.,** 2013, Strengthening of non-seismically detailed reinforced concrete beam-column joints using SIFCON blocks, *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 38:69-88 pp.
- Pimanmas, A., Chaimahavan, P.,** 2011, Cyclic Shear Resistance of Expanded Beam-Column Joint, *Procedia Engineering*, 14:1292-1299 pp.
- Santarsiero, G., Masi, a.,** 2015, Seismic performance of RC beam–column joints retrofitted with steel dissipation jackets, *Engineering Structures*, 85:95-106 pp.
- Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K., Novak, B., Srinivas, V., Saravana Kumar, K., Korkowski, C., Roehm, C., Lakshmanan, N., Iyer, N.R.,** 2011, Seismic retrofitting of nonductile beam-column sub-assembly using FRP wrapping and steel plate jacketing, *Construction and Building Materials*, 25:175-182 pp.
- Singh, V., Pal Bansal, P., Kumar, M., Kaushik, S.K.,** 2014, Experimental studies on strength and ductility of CFRP jacketed reinforced concrete beam-column joints, *Construction and Building Materials*, 55:194-201 pp.
- Sezen, H.,** 2012, Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints with fiber-reinforced polymer composites, *Journal of Composites for Construction*, 16:499-506 pp.
- Shafaei, J., Hosseini, A., Marefat, M.S.,** 2014, Seismic retrofit of external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles, *Engineering Structures*, 81:265-288 pp.

- Sharbatdar, M.K., Kheyroddin, A., Emami, E.,** 2012, Cyclic performance of retrofitted reinforced concrete beam–column joints using steel prop, *Construction and Building Materials*, 36:287-294 pp.
- Yurdakul, Ö., Avşar, Ö.,** 2016, Strengthening of substandard reinforced concrete beam-column joints by external post-tension rods, *Engineering Structures*, 107:9-22 pp.
- Zamani, B.E., Shariatmadar, H.,** 2016, Strengthening and rehabilitation of exterior RC beam–column joints using carbon-FRP jacketing, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49:5067-5083 pp.



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam aşamasında; çalışmalarımın yönlendirilmesinde, şekillendirerek sonuçlandırılmasında her zaman yanımda olan, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşıp yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Ninel ALVER'e ve çalışmalarım süresince bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, her konuda desteğini her zaman hissettiren kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Emre ERCAN ve Arş. Gör. Sena TAYFUR'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi bu tez çalışması döneminde de maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

315M084 numaralı 1001 projesi ile bu çalışmaya sağladığı desteği için ve bilimin ve bilim insanının destekçisi olan TÜBİTAK'a bilime olan katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.

20/ 05/ 2019

Eşref TÜRK



## ÖZGEÇMİŞ

1992 yılı Diyarbakır ili Silvan ilçesi doğumlu olup, öğrenim hayatını sırasıyla Gazi İlköğretim Okulu, Rekabet Kurumu Anadolu Lisesi ve Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. 2011 yılında başladığı lisans eğitimini 2016 yılında bitirerek aynı yıl İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitimine başlamıştır. Lisansüstü eğitimi süresince yürütücülüğünü Doç. Dr. Ninel Alver'in yaptığı "Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Kırılma Mekanizmalarının ve Hasar Durumlarının Akustik Emisyon ve Elastik Dalga Hızı Tomografi Yöntemleriyle Belirlenmesi" adlı TÜBİTAK projesinde bursiyer olarak görev yapmıştır.

