
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BETONARME KİRİŞLERİN ÇELİK KABLOLARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

Sefa Kürşat DEMİRBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sefa Kürşat DEMİRBAŞ

08/05/2023

BETONARME KİRİŞLERİN ÇELİK KABLOLARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sefa Kürşat DEMİRBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2023

ÖZET

Kesme dayanımı yetersiz olan betonarme kirişlerin güçlendirilmesi gerektiğinde, genellikle mevcut kirişe, içinde yeni etriyeler veya kelepçe sistemi bulunan betonarme bir katman eklenmektedir. Ancak bu yöntemler kolay uygulanabilir değildir. Yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem ise kiriş gövdesine karbon kumaşlar yapıştırmaktır. Bu durumda ise sargılama tam ve etkin olarak sağlanamamaktadır. Mevcut deneysel çalışmada ise yenilikçi bir yaklaşımla kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi dışarıdan kirişi saran çelik kablolar ile yapılmıştır. Kablolar rahatlıkla bükülebilir olduğundan hem uygulaması kolay olmuş hem de kirişler tüm yüzeylerinden tam olarak sargılanabilmiştir. Yöntemin ayrı ayrı bağlanan etriyelere göre diğer bir üstünlüğü ise, kiriş boyunca tek bir kablo ile yapılan sürekli sargılamadır. İhtiyaç durumunda piyasada yüksek dayanımlı kabloların bulunabilmesi de yöntemi daha da avantajlı hale getirmektedir. Araştırmada 12 adet 2⁄3 ölçekli deney elemanı hazırlanarak deprem benzeri tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla oluşturulan iki adet referans elemanından birisinin etriyesi betonun kesme dayanımına katkısı ihmal edilerek (Ø8/70mm), diğerinin ise edilmeden (Ø8/100mm) detaylandırılmıştır. Ardından etriyesi yetersiz (Ø8/200mm), kalan 10 eleman ise çelik kablolarla kesmeye güçlendirildikten sonra test edilmiştir. Daha sıkı sargılanabildiği için, tek kablo yerine eşdeğer alanlı ve 3 mm çaplı bitişik çift sıra kablo kullanılmıştır. Kablo sarım aralığı da benzer şekilde beton dayanımının kesme dayanımına katkısı ihmal edilerek (2xØ3/50mm) veya edilmeden (2xØ3/90mm) hesaplanmıştır. Ayrıca kabloların sıva ile kapatılıp kapatılmaması, kablo kopmalarına karşı önlem alınıp alınmaması da deneysel değişkenler olup kablo kopması durumunda davranışın nasıl değişebileceği de araştırılmıştır. Sonuçlar, çelik kablolarla yapılan güçlendirmenin etkin çalıştığını ve sünek referans eleman davranışına ulaşılabildiğini göstermiştir.

Bilim Kodu	:	91102
Anahtar Kelimeler	:	Betonarme kiriş, güçlendirme, kesme kuvveti, çelik kablo
Sayfa Adedi	:	95
Danışman	:	Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ
İkinci Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Eray ÖZBEK

SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCEMENT CONCRETE BEAMS WITH STEEL WIRE ROPES

(M. Sc. Thesis)

Sefa Kürşat DEMİRBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2023

ABSTRACT

When reinforced concrete beams with insufficient shear strength need to be strengthened, a reinforced concrete layer with new stirrups or clamp system is usually added to the existing beam. However, these methods are not easily applicable. Another commonly used method is to attach Carbon Fiber Reinforced Polymers to the beam web. In this case, confinement cannot be provided entirely and effectively. In the current innovative experimental study, strengthening of the beams against shear was provided by wrapping around all faces with steel wire ropes. Since the wire ropes can be bent easily, confinement could be maintained conveniently and efficiently around the beams. Another advantage of the method over separately formed stirrups is the continuous wrapping with a single rope along the beam. The availability of high-strength cables on the market in case of need makes the method even more superior. In the study, a total of twelve 2⁄3 scaled specimens were prepared and tested under earthquake-like reversed cycling loads. While the stirrup for one of the two reference specimens, formed for comparison, is detailed by neglecting the contribution of concrete to shear strength (Ø8/70mm), the other one is detailed by considering the contribution of concrete to shear strength (Ø8/100mm). Then, inadequately detailed (Ø8/200mm) remaining 10 specimens were tested after strengthened against shear by steel wire ropes. Since it can be wrapped much more tightly, instead of a single rope, double rope with an equivalent area and a diameter of 3 mm was used. The spacing of rope wrapping was similarly detailed by neglecting the contribution of concrete to the shear strength (2xØ3/50mm) or considering the contribution of concrete to shear strength (2xØ3/90mm). In addition, whether the cables are covered with plaster and whether precautions are taken against rope rupture are also experimental variables, and how the behavior can change in case of rope rupture has also been investigated. As a result, the strengthening method, which uses steel wire rope, worked efficiently and the ductile reference behavior could be achieved.

Science Code : 91102
Key Words : Reinforced concrete beam, strengthening, shear force, steel wire rope
Page Number : 95
Supervisor : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ
Co-Supervisor : Dr. Eray ÖZBEK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışmanlarım Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Eray ÖZBEK' e teşekkür ederim. Aynı zamanda deney çalışmalarımın hazırlık aşamasında vakit alan ve ciddi emek gerektiren işler için beni yalnız bırakmayan, birlikte deney elemanlarının güçlendirilmesi işlemlerini tamamladığımız değerli dostum Aytaç ELİTOK' a, deney numunelerinin deney düzeneğine yerleştirilmesi işlerinde benimle birlikte çalışan bölüm öğrencilerine ve kıymetli kardeşim Hakan GÜLSEVEN' e, deneyler ve sonrasında bana pek çok konuda yardımcı olan Dr. Meryem BÖCEK' e teşekkürü bir borç bilirim. Bir anne şefkatiyle varlığı güç veren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Bengi AYKAÇ' a sonsuz teşekkürler.

Hayatımın her aşamasında beni hep destekleyen annem Şermin DEMİRBAŞ' a ve babam Oktay DEMİRBAŞ' a ne kadar teşekkür etsem azdır.

Eşim Yasemin DEMİRBAŞ' a, uzun süren yorucu yüksek lisans sürecimde her zaman anlayışla bana destek olduğu için çok teşekkür ederim.

Bana babalık sıfatını ekleyen ilk göz ağrım kızım Gökçe ve daha sonra aramıza katılan canım kızım Beren, bu tez çalışması sizlerin şahsında kız çocuklarının aydınlık geleceği ülküsüne adanmıştır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. AMAÇ VE KAPSAM 3

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR 5

3.1. CFRP (Karbon Fiber Lifli Polimer) ile Güçlendirme 5

3.2. Çelik Levha ile Güçlendirme 7

4. DENEYSEL ÇALIŞMA 9

4.1. Deney Elemanları 9

4.2. Malzeme Özellikleri 13

4.2.1. Beton 13

4.2.2. Donatı çeliği 15

4.2.3. Çelik kablo 16

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması 16

4.4. Deney Düzeni 22

4.4.1. Deneysel düzenek 22

4.4.2. Yükleme düzeni 22

4.4.3. Ölçüm düzeni 23

5. DENEYSEL SÜREÇ 25

Sayfa

5.1. R0 Deneyi 25
5.2. UP0 Deneyi 29
5.3. P0 Deneyi 32
5.4. PL0 Deneyi 35
5.5. PC0 Deneyi 39
5.6. PLC0 Deneyi 42
5.7. R8 Deneyi 45
5.8. UP8 Deneyi 48
5.9. P8 Deneyi 52
5.10. PL8 Deneyi 55
5.11. PC8 Deneyi 58
5.12. PLC8 Deneyi 63
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 67
6.1. Genel 67
6.2. Taşıma Gücü Hesabı Üzerinden Yapılan Karşılaştırmalar 67
6.3. Zarf Eğrileri 68
6.3.1. Zarf eğrilerinde 1. grup numunelerin karşılaştırmaları 69
6.3.2. Zarf eğrilerinde 2. grup numunelerin karşılaştırmaları 75
6.4. Akma Rijitliği 81
6.4.1. Akma rijitliği ile 1. grup deney elemanlarının karşılaştırılması 81
6.4.2. Akma rijitliği ile 2. grup deney elemanlarının karşılaştırılması 82
6.5. Enerji Dönüştürme 83
6.5.1. Enerji dönüştürme yönünden 1. grup numunelerin karşılaştırmaları 83
6.5.2. Enerji dönüştürme yönünden 2. grup numunelerin karşılaştırmaları 86
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 91
KAYNAKLAR 93

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Deney numunelerin özellikleri 9

Çizelge 4.2. Beton numunelerinin 7 günlük küp numune sonuçları 14

Çizelge 4.3. Beton numunelerinin 28 günlük küp numune sonuçları 14

Çizelge 4.4. Deneyler başladıktan sonra testi yapılan beton küp numune sonuçları 15

Çizelge 4.5. Donatı çekme dayanımları 16

Çizelge 6.2. Deney 2. grup elemanlarının dayanım değerleri 68

Çizelge 6.5. 1. grup deney elemanlarının ileri yöndeki akma rijitlikleri 81

Çizelge 6.6. 1. grup deney elemanlarının geri yöndeki akma rijitlikleri 82

Çizelge 6.7. 2. grup deney elemanlarının ileri yöndeki akma rijitlikleri 82

Çizelge 6.8. 2. grup deney elemanlarının geri yöndeki akma rijitlikleri 83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Deney elemanları 11

Şekil 4.2. R0 Referans deney elemanına ait donatı detayı 12

Şekil 4.3. R8 Referans deney elemanına ait donatı detayı 12

Şekil 4.4. Güçlendirilecek deney elemanlarına ait donatı detayı 13

Şekil 4.5. Deney elemanının rijit duvara bağlanması 22

Şekil 4.6. Deneylere ait yükleme düzeni 23

Şekil 4.7. Deneylere ait sistemin ölçüm düzeni 24

Şekil 5.1. R0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 28

Şekil 5.2. UP0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 31

Şekil 5.3. P0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 34

Şekil 5.4. PL0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 38

Şekil 5.5. PC0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 41

Şekil 5.6. PLC0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 44

Şekil 5.7. R8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 47

Şekil 5.8. UP8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 51

Şekil 5.9. P8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 54

Şekil 5.10. PL8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 58

Şekil 5.11. PC8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 62

Şekil 5.12. PLC8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi 66

Şekil 6.1. R0-UP0-P0-PL0-PC0-PLC0 elemanlarına ait zarf eğrileri karşılaştırması 69

Şekil 6.2. R0 – UP0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 70

Şekil 6.3. R0 – P0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 71

Şekil 6.4. R0 – PL0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 72

Şekil 6.5. R0 – PC0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 73

Şekil 6.6. R0 – PLC0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 74

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.7. R8-UP8-P8-PL8-PC8-PLC8 elemanlarına ait zarf eğrileri karşılaştırması 75

Şekil 6.8. R8 – UP8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 76

Şekil 6.9. R8 – P8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 77

Şekil 6.10. R8 – PL8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 78

Şekil 6.11. R8 – PC8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması..... 79

Şekil 6.12. R8 – PLC8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması 80

Şekil 6.13. R0 – UP0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması..... 84

Şekil 6.14. R0 – P0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması..... 84

Şekil 6.15. R0 – PL0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması 85

Şekil 6.16. R0 – PC0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması..... 85

Şekil 6.17. R0 – PLC0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması.... 86

Şekil 6.18. R8 – UP8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması..... 87

Şekil 6.19. R8 – P8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması..... 87

Şekil 6.20. R8 – PL8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması 88

Şekil 6.21. R8 – PC8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması..... 88

Şekil 6.22. R8 – PLC8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması.... 89

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Deney elemanlarında kullanılan etriyeler 16

Resim 4.2. Kirişlerde etriyelerin yerleşim örneği 17

Resim 4.3. Hazırlanan deney elamanları donatısı 17

Resim 4.4. Her bir deney elemanı için ayrı hazırlanan kalıplar 18

Resim 4.5. Güçlendirme işlemleri öncesi deney elemanları 19

Resim 4.6. Çelik kablo ile güçlendirme yapılmış elemanların durumu 20

Resim 4.7. Çelik kablonun çivi ile gevşekliğinin giderilmesi 20

Resim 4.8. Sıva yapılan elemanlar 21

Resim 4.9. Sıva yapılan elemanların 3 gün sonra toplu görünümü 21

Resim 5.1. R0 deney elemanının deney öncesi görünümü 26

Resim 5.2. R0 deney elemanının deney sonrası görünümü 27

Resim 5.3. UP0 deney elemanının deney öncesi görünümü 29

Resim 5.4. UP0 deney elemanının deney sonrası görünümü 30

Resim 5.5. P0 deney elemanının -205 kN yük ve -70 mm deplasman durumunda görünümü 33

Resim 5.6. P0 deney elemanının deney sonrası görünümü 33

Resim 5.7. P0 deney elemanının deney sonrası yakın görünüşleri 34

Resim 5.8. PL0 deney elemanının 5. çevrim sonundaki görünüşü 36

Resim 5.9. PL0 deney elemanının deney sonundaki görünüşü 37

Resim 5.10. PC0 deney elemanının kesilen kabloların detay görünüşü 39

Resim 5.11. PC0 elemanının -200 kN yük ve -90 mm deplasman değerinde görünüşü 40

Resim 5.12. PLC0 elemanının kablo kesiminin görünüşü 42

Resim 5.13. R8 elemanının deney sonrası görünüşü 46

Resim 5.14. R8 elemanının kopan etriye görünüşü 46

Resim **Sayfa**

Resim 5.15. UP8 elemanının 188 kN yük ve 60 mm deplasman durumundaki görünüşü 49

Resim 5.16. UP8 elemanının -152 kN yük ve -90 mm deplasman durumundaki görünüşü 50

Resim 5.17. UP8 elemanının -57 kN yük ve -105 mm deplasman durumundaki görünüşü 50

Resim 5.18. P8 deney elemanının deney öncesi görünümü 52

Resim 5.19. P8 deney elemanının deney sonrası görünümü 53

Resim 5.20. PL8 deney elemanının -60 mm deplasman durumundaki görünümü 55

Resim 5.21. PL8 deney elemanının kopan kablolar sonrası görünümü 56

Resim 5.22. PL8 deney elemanının deney sonrası görünümü 57

Resim 5.23. PC8 deney elemanındaki yapay koparılan kablolar 59

Resim 5.24. PC8 deneyi -90 mm yüklemesinde kopan kablolar sonrası elemanın durumu 60

Resim 5.25. PC8 deney elemanının deney sonrası görünümü 61

Resim 5.26. PLC8 deney elemanında yapay olarak kabloların kesileceği bölge 64

Resim 5.27. PLC8 deney elemanında yapay olarak kabloların yakın görünüşleri 64

Resim 5.28. PLC8 elemanının deney sonu görünümü 65

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
d_y	Deney elemanının akma anındaki deplasman değeri
$f_{ci,maks}$	Beton numunesi maksimum basınç dayanımı
$f_{ci,min}$	Beton numunesi minimum basınç dayanımı
f_{cm}	Beton numunelerinin ortalama basınç dayanımı
$f_{k,150}$	150 mm olan küp beton numune dayanımı
f_u	Kopma dayanımı
f_y	Akma dayanımı
kN	Kilonewton
mm	Milimetre
Ø	Donatı ve kablo çapı
P_{uort}	Deney elemanının ileri ve geri yöndeki maksimum dayanım ortalaması
P_y	Deney elemanının akma anındaki yük değeri

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
CFRP	Karbon lifli kumaş
FRP	Fiber takviyeli polimer
GFRP	Cam-fiber takviyeli polimer
LVDT	Elektronik deplasman ölçer
UPS	Kesintisiz güç kaynağı

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda güçlendirme, günümüzde sık karşılaşılan betonarme yapı ihtiyaçlarından birisidir. Bilindiği üzere betonarme yapıların belirli kullanım ömürleri vardır. Mevcut yapıların değişen şartlara göre güçlendirilmesi için de doğan ihtiyaca ve uygulama alanlarının farklılığına göre çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, karbon lifli kumaşlar kullanılarak, çelik levha yapıştırılarak, betonarme katman eklenerek ve deneysel araştırmaya dayanan uygulamalar olarak gösterilebilir.

Yapıların mevcut durumu ve kullanılacak yöntemin maliyeti göz önünde bulundurularak yapılacak seçimler, güçlendirme alternatiflerini çoğaltmaktadır. Ancak daha önce kullanılan yöntemlerden birini seçmek günümüzde öncelikle tercih edilen yoldur. Oysa her bir yöntemin kendi içerisinde avantajları olduğu gibi, dezavantajları da vardır. Bu durum, her geçen gün yeni güçlendirme çalışmalarının yapılması için bir motivasyon oluşturmaktadır. Hem maliyeti düşürmek, hem uygulama kolaylığı, hem de güçlendirmedeki performansı yükseltmek araştırmacıların başlıca hedefidir.

Uygulamada sık tercih edilen yöntemlerden birisi polimer kumaşlar yapıştırılması ile kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesidir. Bu amaçla fiber takviyeli polimer (FRP), cam-fiber takviyeli polimer (GFRP) veya karbon-fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerde her ne kadar yeterli dayanım sağlansa da, hem malzemenin (Epoksi+polimer kumaş) maliyeti yüksektir, hem de sünekliği oldukça sınırlıdır (Uysal, 2006).

Çelik plakaların epoksiyle kirişlerin üzerine yapıştırılması ile gerçekleştirilen kesme güçlendirmesinde ise etkili ankrajlama yapılmadığı sürece süneklik sınırlı kalmaktadır. Öte yandan, etkili ankrajlama için mevcut donatılar nedeniyle detaylı ve zaman alıcı işçilik gerekmektedir (Uysal, 2006).

Katman ekleme yöntemi ise oldukça zor uygulanması nedeniyle işçilik hatalarının güçlendirmeye doğrudan etki edeceği bir diğer yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Betonarme kirişin kesitini büyütebilmek için kirişin alt ve üst yüzünün birine veya her ikisine betonarme bir katman eklenmesi ile gerçekleştirilir. Bu yeni betonarme katmanın

içerisindeki boyuna donatılar eski donatılara kaynaklanır. Böylece yeni katmanla eski kirişin birlikte çalışması hedeflenir. Güçlendirme yapılırken sünek kırılmayı da sağlayabilmesi yönüyle avantajlı bir yöntem olarak görünse dahi, yöntemin uygulanması oldukça zor bir işçilik gerektirmektedir (Uysal, 2006).

Bu tezin konusu olarak gerçekleştirilen çalışmada ise, mevcut yöntemlerden farklı bir yol izlenmiştir. Kolay uygulanabilir yöntem ve düşük maliyetle kesme kırılmasının önlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla seyrek etriye aralığı ile tasarlanan on adet betonarme kiriş, kesme kuvvetine karşı enine yönde çelik kablolarla dıştan sarılmış ve deney sonuçları tam etriyeli referans kiriş deneyleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan yöntemin, seri şekilde güçlendirme çalışmalarında kullanılabilmesi ve diğer yöntemlere nazaran uygulamadaki kolaylığı öne çıkan özellikleridir. Ancak bazı parametreleri daha net ortaya koyabilmek için, bir takım iyileştirmeler muhakkak gereklidir. Farklı bir araştırma konusu olabilecek bu iyileştirmeler ile yöntem gerçekten de alanında öncü bir metoda dönüşebilir. Yöntemin ortaya çıkışı, lisans döneminde alınan bilgiler esnasında, etriyelerin sürekli olması bize ne avantaj sağlar sorusunun takibiyle olmuştur. Tez danışmanım Prof. Dr. Sabahattin Aykaç'ın da yönlendirmeleriyle, bu sorunun cevabını güçlendirme alanında aramak üzere bu tez çalışması başlatılmıştır.

2. AMAÇ VE KAPSAM

Betonarme elemanların tasarımında yeterli dayanım, rijitlik ve süneklik sağlanmalıdır. Bu durum benzer olarak güçlendirmede de geçerlidir. Bu çalışmada, rijitlik sorunu olmayan eksik etriyeli betonarme kirişlerin, çelik kabloların sarılmasıyla kesme dayanımı ve sargılaması arttırılarak davranışın sünek-eğilmeye geçirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemin ise, uygulama kolaylığı bulunmaktadır ve diğer yöntemlere kıyasla düşük maliyetlidir. Bu kapsamda deneysel bir araştırma planlanmış ve laboratuvar imkanları dahilinde 12 adet deney elemanı teste tabi tutulmuştur. Deney elemanları $^2/_3$ ölçekli olarak tasarlanmıştır. 12 adet elemandan iki tanesi tam etriyeli referans, diğerleri ise çelik kabloların çeşitli parametrelerle sarılmasıyla güçlendirmek üzere hazırlanan eksik etriyeli elemanlardır.

Beton gibi bir malzemenin standart sapmasını en aza indirilebilmek için tüm deney elemanları aynı gün aynı transmikserden dökülen hazır beton ile hazırlanmıştır. Güçlendirilecek numunelerden, tamir harcı ile sıva yapılacak olanları ayrılmış, hepsine aynı gün sıva yapılmıştır. Deney olabildiği kadar standartlara uymak kaygısıyla titizlikle yürütülmüştür.

3. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme yapı elemanlarında değişen mevcut durum ve kullanıma göre ortaya çıkan onarım ve güçlendirme ihtiyacına yönelik çalışmalar, hem daha önce yapılmış çalışmaları ileri götürmek hem de yeni bir yöntem belirlemek amacıyla artarak devam etmektedir. Çalışma konusu kirişlerin güçlendirmesi olduğu için, öncelikle kirişlere yönelik yapılan geçmiş çalışmalar incelenmiştir. Kirişlerde yapılan güçlendirme çalışmaları ile dayanımları, rijitlikleri ve sünekliklerinin artırılması hedeflenmektedir. Ancak her metot bu üç konuda mutlak başarı sağlayabilmiş değildir. Güçlendirme yapılacak elemanın analizi yapılarak hangi konuda zayıfsa ona yönelik bir yöntem seçilmesi daha doğru olacaktır. Kirişlerde güçlendirme eğilme kuvvetlerine, kesme kuvvetlerine veya hem eğilme hem kesmeye yönelik kuvvetlere karşı olarak yapılabilmektedir. Güçlendirilmesi planlanan elemanın durumuna göre fayda maliyet analizi neticesinde bu güçlendirme yöntemlerinden biri seçilebilir. Günümüzde kiriş güçlendirmesinde kullanılan başlıca yöntemler olarak karbon lifli kumaşlarla sargılama, çelik levha kullanılması ve betonarme katman ekleme sayılabilir. Betonarme katman ekleme yönteminde kirişin farklı yüzlerine betonarme bir katman ilave edilmesi ile güçlendirme yapılmaktadır. Mevcut kirişin betonu ile güçlendirme amacıyla eklenen katmanın betonu arasındaki aderansın yüksek olması durumunda başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak yürütülen deneysel çalışma ile kıyas edilemeyecek bir uygulama güçlüğü mevcuttur ve bu sebeple detaylıca incelenmeyecektir.

3.1. CFRP (Karbon Fiber Lifli Polimer) ile Güçlendirme

Karbon lifli kumaşlarla (CFRP) yapılan güçlendirme çalışmalarında genel olarak malzemenin epoksi ile betonarme kirişe yapıştırılması ile güçlendirme işlemi yapılmaktadır.

Khalifa ve Nanni (2000), gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, kesmeye karşı güçlendirilecek deney numunelerinin kesme kapasitesini artırmak için CFRP kullanmışlardır. Deneylerde kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a/d) oranı 3 olan ve kesme açıklığında kesme donatısı kullanılmayan 6 adet T-kesitli deney elamanı için farklı varyasyonlarda CFRP kullanılmıştır. Deney elemanları 4-noktalı tek düze yükleme altında test edilmiştir. Sonuçlar, referans kiriş taşıma kapasitesinin %145 oranında arttırılabildiğini göstermiştir. Ankraj uygulama yöntemlerinin göçme modunu değiştirdiği ve CFRP şerit ile

U-biçiminde uygulama yapılan elemanların, kirişin iki yüzüne yapıştırılan CFRP şeritli elemanlardan daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir. Deneylerde saptanan bir diğer husus ise, CFRP şeritlerin kiriş eksenine paralel yapıştırılması halinde kesme kapasitesine etki etmediğidir. Bunun dışında deneylerde iki elemanda %40 daha fazla CFRP şerit kullanılmasına rağmen aynı taşıma gücüne erişildiği gözlemlenmiştir. Yani malzemenin miktarından çok uygulama yöntemi davranışta önemli değişikliklere neden olmuştur.

Khalifa ve Nanni (2002) diğer bir deneysel çalışmada, 12 adet kirişi test edip kesme kapasitesini CFRP şerit kullanılarak arttırmayı amaçlamışlardır. Deneylerde kullanılan CFRP şeritlerin genişliği, enine çelik donatı ve a/d oranı deneysel çalışmanın parametrelerini oluşturmuştur. Kirişlerin uzunluğu 3050 mm ve kesiti 150x305 mm olarak belirlenmiştir. Deney elemanları 4-noktalı tek düze yükleme uygulanarak test edilmiştir. Deney numuneleri etriyeli ve etriyesiz olarak iki gruba ayrılmış ve bu gruplarda a/d oranı 3 ve 4 olarak seçilmiştir. Sonuçlar, kirişe dıştan yapıştırılmış CFRP şeritlerin, önemli ölçüde kesme dayanımına etki ettiği ve kesme dayanımının %40 ila %138 arasında arttırdığını göstermiştir.

Taljsten ve Elfgren (2000) tarafından yapılan deneysel çalışma 8 adet kirişin onarılması veya güçlendirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişler 4500 mm uzunluk ve 500x180 mm kesitli olarak üretilmiştir. Referans kirişi olarak 3 adet eleman kullanılan deneylerde, güçlendirme işlemi yapılacak deney elemanlarında CFRP şeritler yatayla 45° ve 135° açı yapacak şekilde yapıştırılmıştır. Deney numunelerinden birinde ise kullanılan CFRP şeritler her iki yönde üst üste olarak uygulanmıştır. Deney elemanları 4-noktalı tek düze yükleme altında test edilmiştir. Deneyler esnasında üç farklı göçme şekli görülmüştür. Bunlar beton basınç bölgesinde ezilme, CFRP şeritlerin sıyrılması ve bu şeritlerin kopması şeklinde gerçekleşmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, CFRP şeritlerin 45° açı ile uygulandığı güçlendirilmiş elemanların kiriş kesme kapasitesinde %300'e kadar artış görülmüştür. Deneylerde test edilen hasarlı kirişlerin kesme kapasitesinin güçlendirilmesinde ise %100 oranında kesme kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir.

Taljsten (2003) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise 4000 mm uzunluğunda ve 500x180 mm kesitinde 7 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Güçlendirme yapılacak kirişlerin kesme açıklıklarında kesme donatısı kullanılmamıştır. Deney numuneleri farklı kalınlık ve açılarda CFRP şerit yapıştırılarak güçlendirilmiştir. İçlerinde bir adet referans kirişin de olduğu deney elemanlarına 4-noktalı tekdüze yükleme uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda,

CFRP şeritlerin potansiyel eğik çatlaklara dik yönde yapıştırılması durumunda en etkin şekilde çalışabildiği kanaatine varılmıştır.

Raghu ve diğerleri (2000) T-kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmesini ve onarılmasını hedefleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. CFRP şeritleri güçlendirme yapılacak kirişin yüzeyine ankrajlı ve ankrajsız olarak uygulanmıştır. Kiriş uzunluğu 2640 mm olarak seçilen deney grubunda, 2 adet kiriş referans olarak test edilmiş ve CFRP şeritler yapıştırılan deney elemanları ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde elemanın negatif moment bölgesine 510 mm genişliğinde ve pozitif moment bölgesine 100 mm genişliğinde CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Bu grup ile aynı işlemlerin yapıldığı diğer grupta CFRP şeritler iki kat olarak uygulanarak güçlendirme yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, kiriş kesme dayanımlarının %11 ile %34 arasında arttığı gözlemlenmiştir. Deneylerde U biçiminde CFRP şerit yapıştırılan elemanlarda daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ankraj uygulaması deney sonuçlarına göre değerlendirildiğinde, ankraj uygulanan şeritlerde uygulanmayanlara göre %17 daha fazla kesme kuvvetinin karşılandığı görülmüştür. Deneylerde çift kat CFRP kullanılan elemanların kesme kapasitesinin tek kat CFRP şerit kullanılan elemanlara göre %4 kadar daha fazla kesme kapasitesine ulaştığı görüşmüştür. Buradan çift kat CFRP kullanılmasının kesme kapasitesini anlamlı miktarda artırmadığını söylemek mümkündür.

Zhang ve Hsu (2005) kirişlerin dış yüzeylerine CFRP uygulayarak kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişleri güçlendirmeyi hedeflemişlerdir. Deneyler 11 adet betonarme kiriş ile gerçekleştirilmiştir. Yalın kirişlerde kesme donatısı kullanılmamıştır. Yapılan çalışmada kirişlerin güçlendirilmesi sonrası kesme ve göçme davranışı incelenmiş, tasarım yaklaşımları oluşturulmuştur. CFRP şeritlerin kiriş eksenine göre farklı yönlerde uygulanması ile deneyin değişkenleri belirlenmiştir. 45° ve 135° açıyla uygulanan CFRP şeritlerin kesme kapasitesini artırmada daha iyi performans verdiği ve çatlak oluşumunu sınırladığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

3.2. Çelik Levha ile Güçlendirme

Çelik levhalar ile yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan levhalar epoksi ile betonarme kirişe yapıştırıldığı gibi bulon yardımıyla da kirişe uygulanabilmektedir.

Adhikary ve diğerleri (2000) 12 adet deney elemanı ile çelik levhalar kullanarak kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesini araştırmışlardır. 2 adet referans kirişinin bulunduğu toplam 12 adet 150x200 mm kesitinde ve 2600 mm uzunluğunda deney elemanı kiriş ile deneyler yürütülmüştür. Güçlendirme işlemi yapılan 10 adet kirişte farklı genişlik ve kalınlıkta çelik levhalar kullanılmıştır. Deneyler sonunda güçlendirmede kullanılan çelik levhaların genişlik ve kalınlığının artması ile kirişlerin kesme dayanımının arttığı görülmüştür. Güçlendirilen elemanlardaki kesme dayanımı dışında, eğilme dayanımları ve rijitliklerinin de referans kirişe göre arttığı tespit edilmiştir.

Barnes ve diğerleri (2001), 175x400 mm kesitli ve 2370 mm uzunluğunda 9 adet kiriş ile kirişlerin çelik levhalar kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilmesini araştırmışlardır. Güçlendirme amacıyla kullanılan çelik levhalar 360 mm genişliğinde ve 2330 mm boyundadır. Kalınlıkları ise 2 mm, 4 mm ve 6 mm olarak seçilmiştir. Uygulanan güçlendirme işleminde 4 adet deney elemanında kiriş gövdesine çelik levhalar yapıştırılmış ve 3 adet deney elemanında da bulonlanmıştır. Deneyler sonucunda deney numunelerinin kesme dayanımında artış görülmüştür. Çelik levhaların yapıştırılması ile yapılan güçlendirmede levhaların sıyrıldığı görülmüştür. Bulonlanarak yapılan güçlendirme ile deney elemanı daha iyi dayanım göstermiştir. Çelik levhaların hem yapıştırılması hem de bulonlanması ile güçlendirilen elemanlar ise en iyi sonuçları vermiştir.

Barnes ve Mays (2006) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada 15 adet 160x230 mm gövde genişliği ve derinliğinde 400x75 mm tabla genişliği ve yüksekliğinde T kesitli ve 15 adet 155x250 mm dikdörtgen kesitli deney elemanı kullanılmıştır. T kesitli toplam 15 adet kirişi çelik levhalar yapıştırarak kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Deney parametreleri kiriş kesit şekli, kiriş kesme açıklığı/etkili yükseklik oranı ve levha yüksekliği olarak belirlenmiştir. Deney elemanları a/d oranı 4.0, 1.8 ve 0.8 olarak üç farklı tipte belirlenmiştir. 3 mm kalınlığındaki çelik levhalar kirişin her iki yüzüne epoksi ile yapıştırılmış ve ardından elemanlar test edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde güçlendirme işlemi yapılan T kesitli ve dikdörtgen kirişlerin kesme dayanımında anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Levha yüksekliği daha büyük olan kirişlerde ise levha yüksekliği küçük olan kirişlere göre daha başarılı sonuçlar alınmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Elemanları

Yapılan bu deneysel çalışmanın amacı, kirişlerde kesme kuvvetine karşı kolay uygulanabilmesiyle öne çıkan yenilikçi bir anlayışla etkili bir güçlendirme alternatifi oluşturmaktır. Bu amaçla kullanılan çelik kablolar, ihtiyaca göre çeşitli dayanımlara göre piyasada kolaylıkla erişebilecek malzemelerdendir. Uygulama esnasında kiriş döşemenin içerisinde kalsa ve altında da duvar devam etse dahi, matkapla açılacak küçük deliklerden ince kabloların geçirilmesi, kirişin etrafını açıp sargılamaya göre oldukça avantaj sağlayan basit bir metot olarak öne çıkmaktadır. Böylece döşemeye ve muhtemel dolgu duvara verilecek hasar düzeyi oldukça azaltılabilecektir.

Deney öncesinde elemanların tasarımı yapılırken deneylerin yapılacağı Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı koşullarında gerçekleştirilebilecek ve uygulamadaki olası durumları yansıtabilecek şekilde numune boyutları belirlenmiştir. Deney elamanlarının davranış ve dayanımlarını gözlemlemek için on iki adet 2/3 ölçekli kiriş testi yapılmıştır. Çizelge 4.1 ile deney elemanlarının özellikleri ve değişkenleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney numunelerin özellikleri

No	Adı	Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	Vc/Vcr	Mevcut Etriye	Kablo Sargısı	Sargı Üstü Sıva	Emniyet Kilidi	Kabloyu Yapay Koparma
1	R0	4Ø20	4Ø20	0	Ø8/70	---	---	---	
2	UP0	4Ø20	4Ø20	0	Ø8/200	Ø3/50	Yok	Yok	Yok
3	P0	4Ø20	4Ø20	0	Ø8/200	Ø3/50	Var	Yok	Yok
4	PL0	4Ø20	4Ø20	0	Ø8/200	Ø3/50	Var	Var	Yok
5	PC0	4Ø20	4Ø20	0	Ø8/200	Ø3/50	Var	Yok	Var
6	PLC0	4Ø20	4Ø20	0	Ø8/200	Ø3/50	Var	Var	Var
7	R8	4Ø20	4Ø20	0,8	Ø8/100	---	---	---	---
8	UP8	4Ø20	4Ø20	0,8	Ø8/200	Ø3/90	Yok	Yok	Yok
9	P8	4Ø20	4Ø20	0,8	Ø8/200	Ø3/90	Var	Yok	Yok
10	PL8	4Ø20	4Ø20	0,8	Ø8/200	Ø3/90	Var	Var	Yok
11	PC8	4Ø20	4Ø20	0,8	Ø8/200	Ø3/90	Var	Yok	Var
12	PLC8	4Ø20	4Ø20	0,8	Ø8/200	Ø3/90	Var	Var	Var

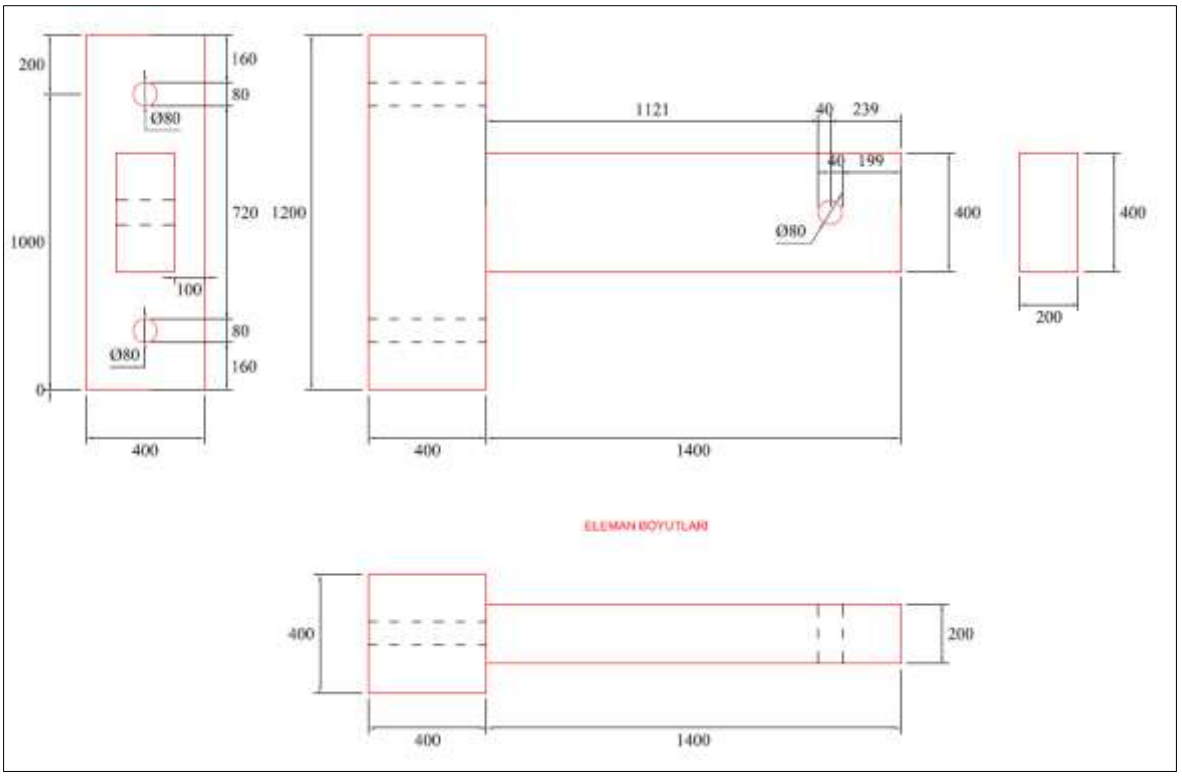
Deney elemanlarında kullanılan elaman isimlerindeki harfler sırasıyla R:Referans, UP:Sıvasız, P:Sıvalı, L:Kilitli, C:Kablo kesimi yapılan anlamına gelmektedir. Ayrıca beton katkısı Vc/Vcr=0 ve Vc/Vcr=0,8 olmasına göre eleman sonuna 0 ya da 8 rakamı eklenerek isimlendirme yapılmıştır. Deney elemanlarının tamamında kirişin alt ve üst boyuna donatıları 4Ø20 (4 adet 20 mm çapında) nervürlü inşaat çeliklerinden oluşmaktadır. Deney elemanları iki ana gruba ayrılmıştır. İki adet referans elemanı her bir gruba ait olup, R0 elemanında yatay donatı Ø8/70 (8 mm çapındaki etriye aralığı 70 mm) iken, R8 elemanında Ø8/100 olmuştur. Deneyde güçlendirmesi yapılan on adet elamanın tamamında Ø8/200 yatay donatı kullanılmıştır. Etriyeler kullanılan tüm deney elemanlarında yeterli kanca boyuna sahip olacak şekilde titizlikle bükülmüştür. Ø8 çaplı etriyelerde kanca uzunluğu 80 mm olup açısı 135º'dir.

Deneyde beton katkısının göz ardı edildiği grup 50 mm aralıkla çift sıra 3 mm çelik kablo ile sargılanırken, diğer grup için bu aralık 90 mm'dir. Güçlendirme için kullanılan çelik kabloların kirişin köşelerinde ezilerek kesilmesini önlemek açısından, kirişte kabloların geçeceği yerler pahlanarak yuvarlatılmıştır.

a) R0; Kesmeye karşı güçlendirilecek olan ve beton katkısı hesaba katılmamış grup için 70 mm etriye aralıklı referans elemanı
b) R8; Kesmeye karşı güçlendirilecek olan ve beton katkısı hesaba dahil edilen grup için 100 mm etriye aralıklı referans elamanı
c) UP0; R0 referans grubuna ait eksik etriyeli olan ve çift sıra çelik kablo ile sargılanarak güçlendirilen ancak tamir harcı ile sıva yapılmamış elemanı
d) P0; UP0 elemanına ilave olarak tamir harcı ile sıva yapılmış elemanı
e) PL0; P0 elemanına ilave olarak klemens yardımıyla sıyrılmaya karşı kilit desteği bulunan elemanı
f) PC0; P0 elemanından farklı olarak deney esnasında belirlenen noktada çift sıra kablonun yapay olarak kesildiği elemanı
g) PLC0; PC0 elamanına ilave olarak klemens yardımıyla sıyrılmaya karşı kilit desteği bulunan elemanı
h) UP8; R8 referans grubuna ait eksik etriyeli olan ve çift sıra çelik kablo ile sargılanarak güçlendirilen ancak tamir harcı ile sıva yapılmamış elemanı
i) P8; R8 referans grubuna ait eksik etriyeli olan ve çift sıra çelik kablo ile sargılanarak güçlendirilen ancak tamir harcı ile sıva yapılmamış elemanı

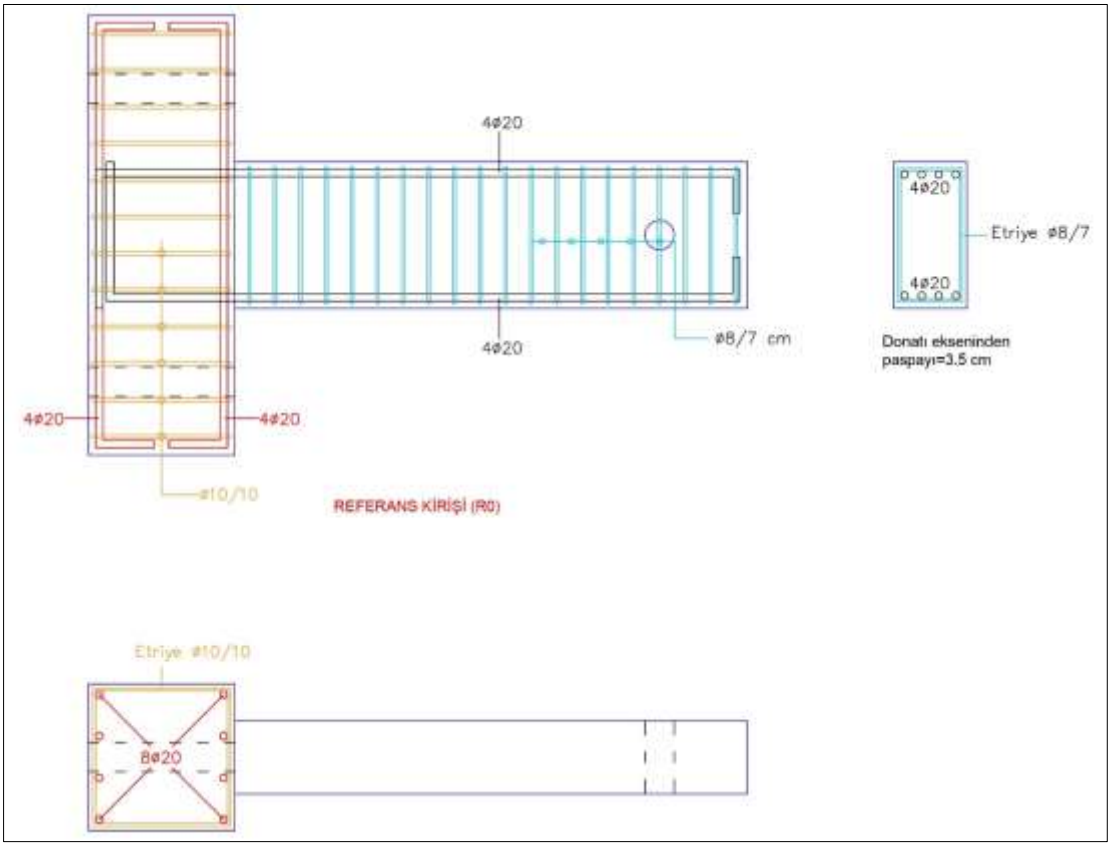
j) PL8; P8 elemanına ilave olarak klemens yardımıyla sıyrılmaya karşı kilit desteği bulunan elemanı
k) PC8; P8 elemanından farklı olarak deney esnasında belirlenen noktada çift sıra kablonun yapay olarak kesildiği elemanı
l) PLC8; PC8 elamanına ilave olarak klemens yardımıyla sıyrılmaya karşı kilit desteği bulunan elemanıdır.

Deney için hazırlanan tüm elemanların kalıpları ayrı ayrı imal edilmiş ve beton tek seferde hazır betonla dökülmüştür. Eleman boyut ve detayları Şekil 4.1 ile gösterilmiştir.

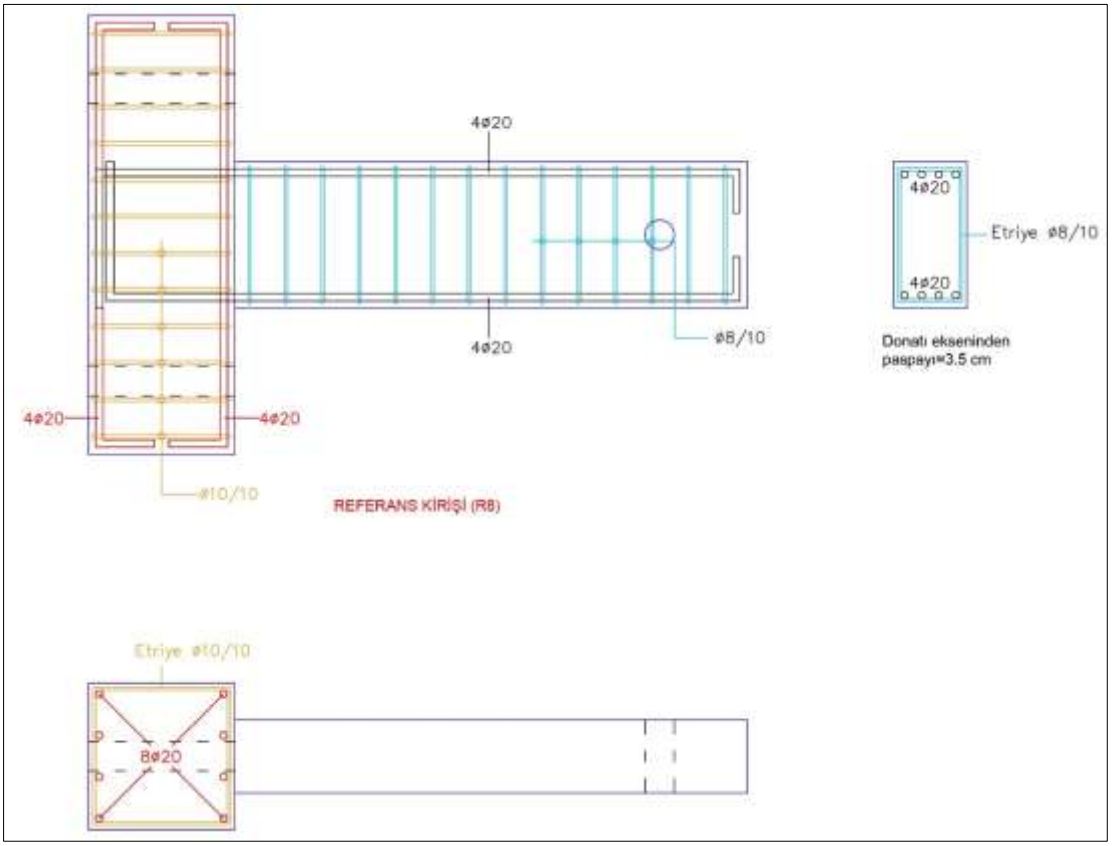


Şekil 4.1. Deney elemanları

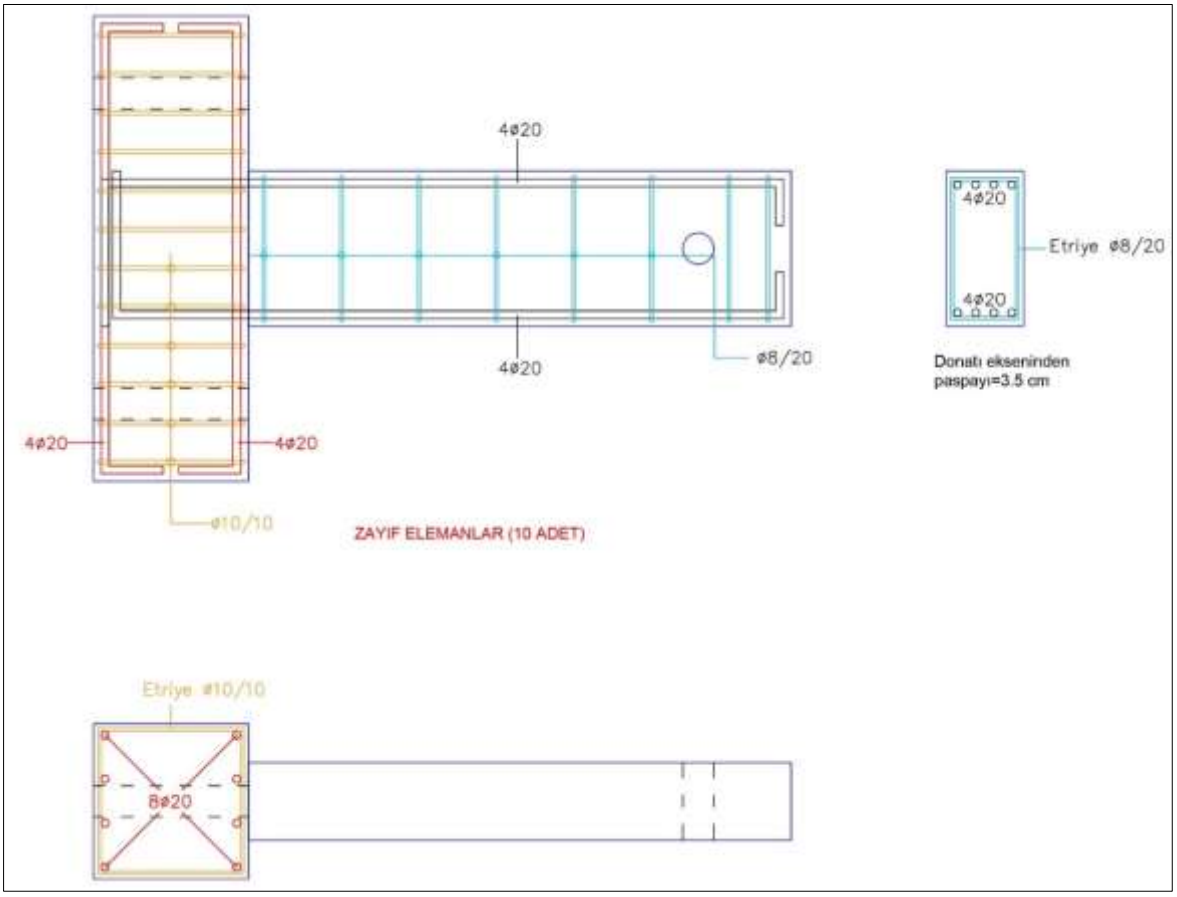
Deney elemanlarından R0 ve R8 numuneleri, sırasıyla 70 mm ve 100 mm etriye aralığına sahip olup, donatı detayları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ile gösterilmiştir. Güçlendirilecek deney elemanlarına ait donatı detayları da Şekil 4.4 ile verilmiştir.



Şekil 4.2. R0 Referans deney elemanına ait donatı detayı



Şekil 4.3. R8 Referans deney elemanına ait donatı detayı



Şekil 4.4. Güçlendirilecek deney elemanlarına ait donatı detayı

4.2. Malzeme Özellikleri

4.2.1. Beton

Gerçekleştirilecek deneylerde, olabildiğince malzemelerin standart olmasına özen gösterilmiştir. Deney elemanları için ayrı ayrı kalıplarda, tek seferde ve tek bir transmikserden dökülen hazır beton kullanılmıştır. Dökülen hazır betonun hedef dayanımı C25'tir. Toplamda 21 adet beton numunesi alınmasına karar verilmiştir. Deney elemanlarının her birinin yanına konulan 150x150x150 mm boyutlarında küp numune kaplarına beton dökülerek, 12 adet numune alınmıştır. Bu numuneler, deney elemanlarının deneye alınmaya başladığı tarihte basınç dayanım testine tabi tutulmuş olup deney elemanlarıyla aynı ortam koşullarında bırakılmıştır. Ayrıca 9 adet daha aynı ebatlarda numune alınarak laboratuvar ortamında saklanmış, bunların 3'ü 7 günlük basınç dayanımı ve kalan 6 adeti de 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarını test etmek için kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 ile alınan beton numunelerinin 7 günlük küp numune dayanımları ve Çizelge 4.3 ile beton numunelerinin 28 günlük küp numune dayanımı verilmiştir.

Çizelge 4.2. Beton numunelerinin 7 günlük küp numune sonuçları

Beton Numunelerinin 7 Günlük Basınç Dayanımları	
Küp Numune No (150x150x150 mm)	Basınç Dayanımı (MPa) $f_{k,150}$
1	30,8
2	30,7
3	33,1

Çizelge 4.3. Beton numunelerinin 28 günlük küp numune sonuçları

Beton Numunelerinin 28 Günlük Basınç Dayanımları	
Küp Numune No (150x150x150 mm)	Basınç Dayanımı (MPa) $f_{k,150}$
1	40,8
2	41,2
3	41,6
4	43,2
5	41,8
6	40,1
f_{cm} (MPa)	41,4
$f_{ci,maks}$ (MPa)	43,2
$f_{ci,min}$ (MPa)	40,1
Standart sapma	1,050
Değişim (Varyasyon) katsayısı	%2,54

Çizelge 4.4. Deneyler başladıktan sonra testi yapılan beton küp numune sonuçları

Beton Numunelerinin Deneyler Başladıktan (+90 Gün) Sonra Test Edilen Basınç Dayanımları	
Küp Numune No (150x150x150 mm)	Basınç Dayanımı (MPa) $f_{k,150}$
1	41,6
2	40,6
3	40,1
4	40,3
5	39,8
6	42,0
7	43,4
8	43,5
9	39,5
10	39,9
11	41,9
12	43,5
f_{cm} (MPa)	41,3
$f_{ci,maks}$ (MPa)	43,5
$f_{ci,min}$ (MPa)	39,5
Standart sapma	1,519
Değişim (Varyasyon) katsayısı	%3,68

4.2.2. Donatı çeliği

Kullanılan donatılar tek seferde ve aynı tedarikçiden alınmış olup, S420 inşaat demiridir. Çizelge 4.5 ile donatı çeliğine ait yapılan deneylerin ortalama dayanımı gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Donatı çekme dayanımları

Donatı Dayanımları		
Çelik Sınıfı ve Çapları	Akma Dayanımı f_y (MPa)	Kopma Dayanımı fu (MPa)
S420 (Ø8)	490	610
S420 (Ø20)	445	600

4.2.3. Çelik kablo

Deneyde yapılacak güçlendirmede kullanılan çelik kablolar da tek seferde aynı makara üzerinden tedarik edilmiştir. Yapılan testler neticesinde ortalama 770 MPa çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Hazırlanan deney elamanlarında, 8 mm çapında etriye kullanılan kirişler için 80 mm uzunluğunda kanca, 10 mm çapında etriye kullanılan rijit kısım için 100 mm çapında kanca olacak şekilde etriyeler 135° olarak Resim 4.1'de gösterildiği gibi imal edilmiştir. Kirişlerde, etriyeler şaşırtmalı olarak bağlanmış olup, Resim 4.2 ile gösterilmiştir.



Resim 4.1. Deney elemanlarında kullanılan etriyeler



Resim 4.2. Kirişlerde etriyelerin yerleşim örneği

Büyük bir titizlikle işçiliği takip edilen deney elemanlarının, kalıba yerleştirilmek için hazırlanan bir örneği Resim 4.3 ile gösterilmiştir.



Resim 4.3. Hazırlanan deney elemanı donatısı

Deney elemanları, her biri ayrı kalıba tek seferde Resim 4.4 ile gösterildiği üzere yerleştirilmiştir.



Resim 4.4. Her bir deney elemanı için ayrı hazırlanan kalıplar

Deney elemanları, imalatının şantiyede tamamlanmasının ardından güçlendirme işlemleri ve deneye hazırlıkları için Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'na getirilmiştir. Güçlendirme işlemleri öncesi deney elamanlarının durumu Resim 4.5 ile gösterilmiştir.



Resim 4.5. Güçlendirme işlemleri öncesi deney elemanları

Deney elemanlarının laboratuvara getirilmesinin ardından, çelik kabloların geçeceği yerler belirlenerek pahlanmış ve kabloların içerisinden geçeceği bir yuva oluşturulmuştur. Çelik kablolar el ile çift sıra sarılmış ve yeterince sıkı olmayan kısımları daha sonra çiviler yardımıyla sıkıştırılmıştır. Elemanların çelik kablolar ile sargılanmasının ardından, kiriş ile arasında nitelikli sıvanın bulunabilmesi için 10 mm çapında donatılar kullanılmıştır. Resim 4.6 ile güçlendirme işlemleri yapılmış elemanların durumu gösterilmiştir. Resim 4.7 ile çivi ile kabloların sıkıştırılması yönteminde kabloların son durumunun temsili yakın çekim görseli verilmiştir. Çelik kablolarda gevşeklik mevcutsa, bu yöntem kullanılarak sıkıştırılmış ve gevşeklik giderilmiştir. Kilit sistemi bulunan deney elemanlarının ön ve arka yüzünün köşeye yakın noktalarında klemensler kullanılmıştır. İşçiliği uzun süren bu sistemin faydasının ne ölçüde olduğu deneyler ile birlikte incelenmiştir.



Resim 4.6. Çelik kablo ile güçlendirme yapılmış elemanların durumu



Resim 4.7. Çelik kablonun çivi ile gevşekliğinin giderilmesi

Deney elemanlarından sıvalı olanlara, laboratuvarda aynı gün sıvacı ustası tarafından sıva yapılmıştır. Sıva için tamir harcı kullanılmış olup, kullanım talimatları doğrultusunda imalat gerçekleştirilmiştir. Resim 4.8 ile sıva yapılan elemanların ilk günkü ve Resim 4.9 ile de 3 gün sonraki görünümleri verilmiştir. Sıvalı elemanlara ait ilk deney, sıva işleminin yapılmasının 21. gününde gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.8. Sıva yapılan elemanlar

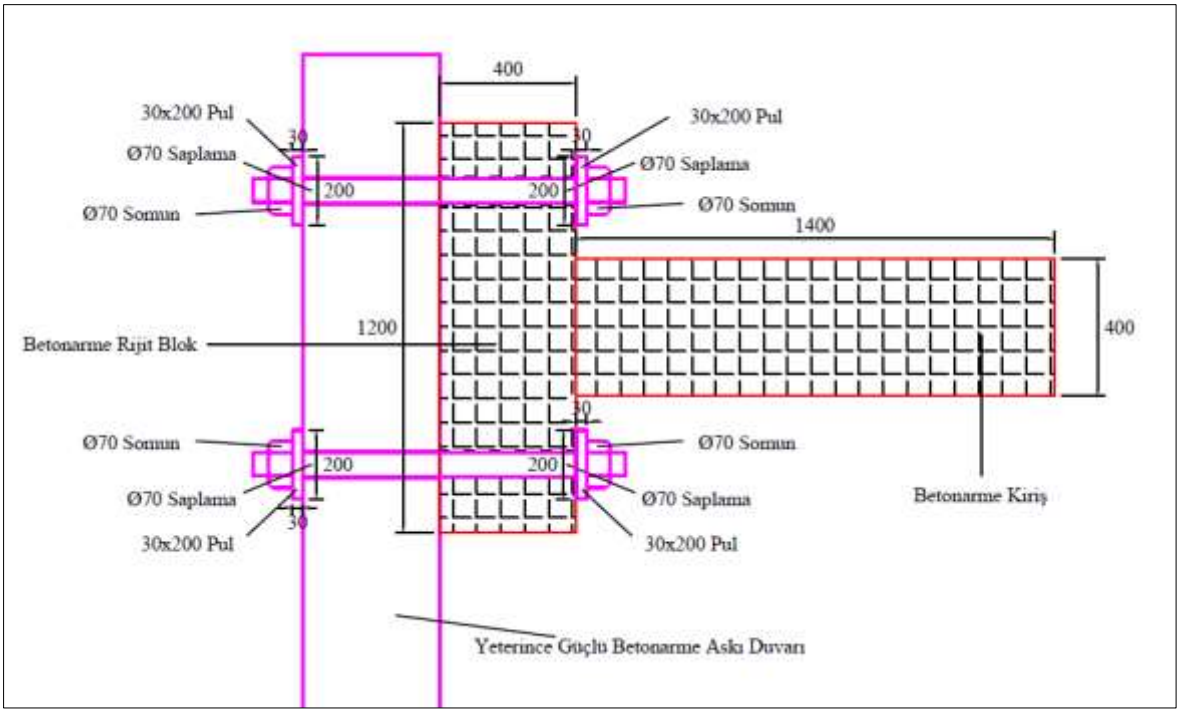


Resim 4.9. Sıva yapılan elemanların 3 gün sonra toplu görünümü

4.4. Deney Düzeni

4.4.1. Deneysel düzenek

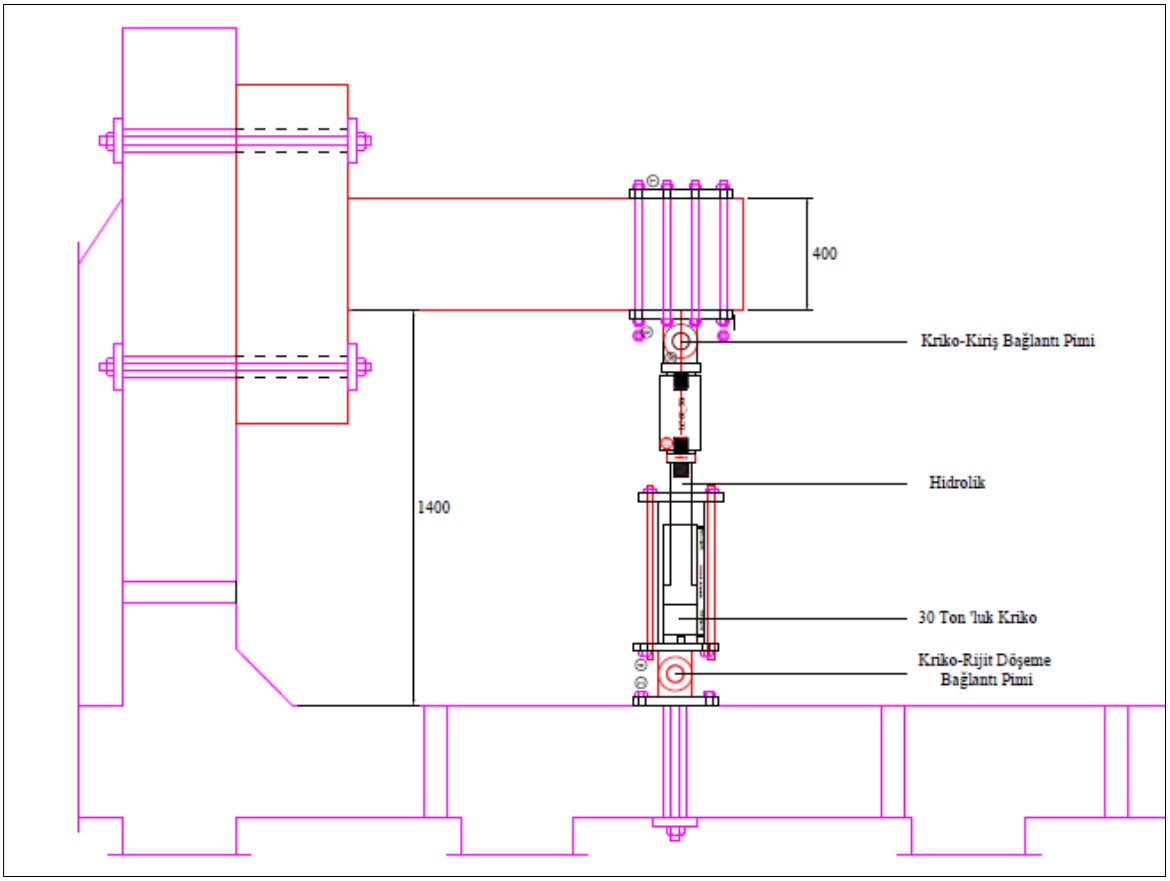
Deneysel çalışmadaki elemanların deneyleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Rijit deney platformuna deney elemanları Şekil 4.5 ile verilen askı düzeni ile bağlanarak tersinir tekrarlanır yükler altında deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Deney elemanının rijit duvara bağlanması

4.4.2. Yükleme düzeni

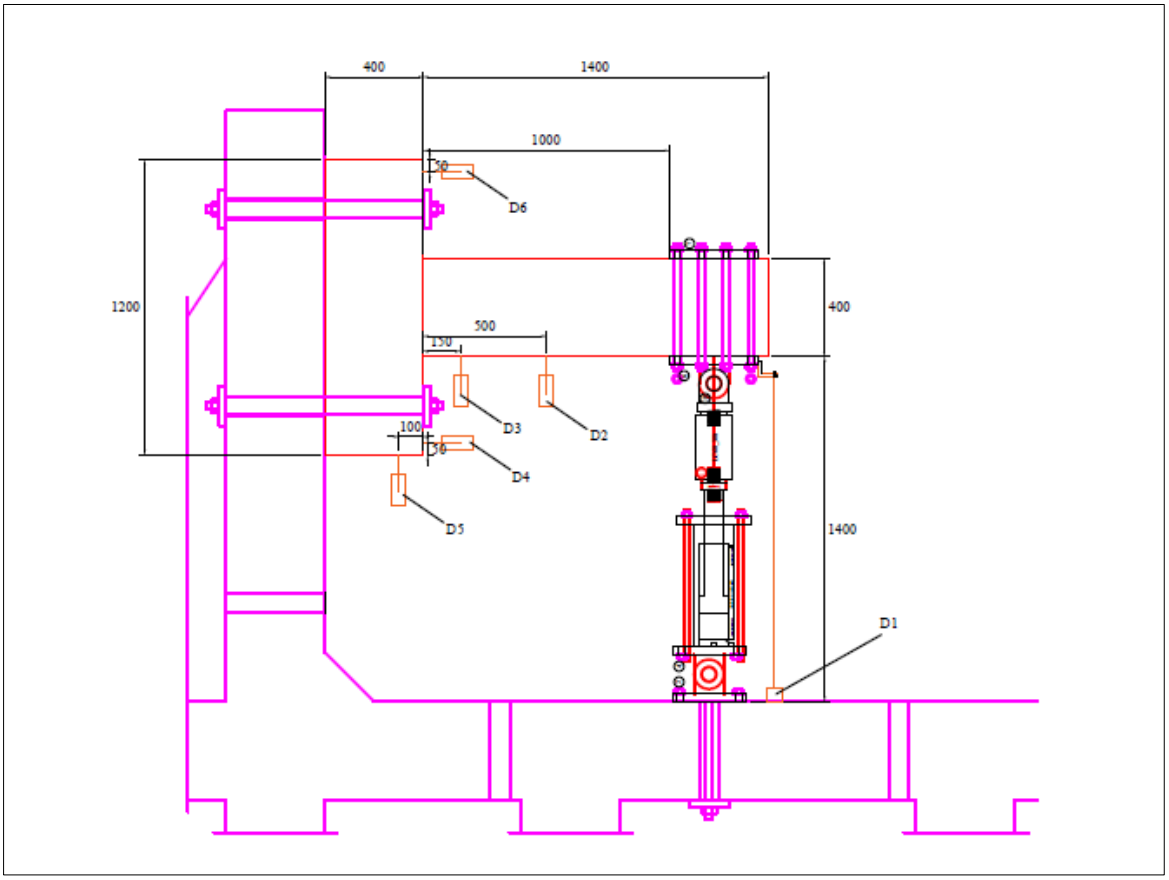
Deney elemanları, tersinir tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deney elemanları akma noktasına kadar yükleme yapıldıktan sonra, her çevrimde 15 mm kademeli olarak artacak şekilde yüklemelere deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Yüklemeler, 30 ton kapasiteli çift etkili hidrolik kriko yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneye ait yükleme düzeni Şekil 4.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Deneylere ait yükleme düzeni

4.4.3. Ölçüm düzeni

Deney elemanlarının yüklemeler altındaki yer değiştirmelerini ölçmek için sistemde 6 adet elektronik deplasman ölçer (LVDT) kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazlarından alınan veri, elektronik dönüştürücü ile bilgisayara kaydedilmiştir. Şekil 4.7 ile verilen ölçüm düzeninde, her bir LVDT, "D" harfi ve bir numara ile isimlendirilmiştir. D1 kiriş uç deplasmanını, D2 – D3 ve D4 – D6 rijit blok dönmesini, D5 düşey yönde rijit hareketi takip edebilmek için yerleştirilmiştir. Bilgisayara kaydedilen verilerin olası enerji kesintisinde kaybolmaması için bilgisayar kesintisiz güç kaynağına (UPS) bağlı olarak verileri işlemiştir.



Şekil 4.7. Deneylere ait sistemin ölçüm düzeni

5. DENEYSEL SÜREÇ

Bu bölümde deney elamanlarının parametrelerinin deney elemanı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deney elemanlarında çatlak durumunu takip edebilmek için ön yüzü beyaza boyanan elemanlarda 100 mm aralıklı karelaj uygulaması yapılmıştır. Deney esnasında ortaya çıkan durumlar görseller yardımıyla anlatılmıştır. Elemanlara ait yük – deplasman grafikleri de yine her bir deneyin sonunda verilmiş olup yük hücresinden okunan kN değeri ve D_1 elektronik deplasman ölçer tarafından ölçülen mm değeri kullanılarak çizdirilmiştir.

Deneylerde elemanlar, akma noktasına erişinceye kadar yüklenmiş ve daha sonra deplasman belirlenen değere tamamlandıktan sonra her çevrimde 15 mm artacak şekilde deneyler deplasman kontrollü olarak sürdürülmüştür. Daha önce Kofoğlu' nun (2019) çalışmaları sırasında karşılaştığı sorunlar için önlem alınarak, kiriş köşe noktalarında kabloların geçtiği yerler pahlanmış ve kablonun kesilmesinin önüne geçilmiştir. Ayrıca, sargılama yapıldıktan sonra kablo ile kiriş arasına kirişin ön ve arka yüzüne ikişer adet 10 mm çapında donatılar geçirilerek, uygulanan sıvanın ana kiriş ile güçlendirme amacıyla yapılan sargının arasına girmesi sağlanmıştır.

5.1. R0 Deneyi

R0 deneyi ile 1. grubun referans deneyi yapılmıştır. İlgili deney elemanı Resim 5.1 ile gösterilmiştir. Pozitif yön yukarı tayin edilmiştir. İlk çevrimde ileri yönde akmaya kadar devam edilmiştir. Deneyde 59 kN yük altında 5 mm deplasmanda ilk çatlak gözlemlenmiştir. Rijit blokla arasında 300 mm ilerden başlayan çatlak, 67 kN yük altında 7 mm deplasman ile hafif kesme çatlağı niteliğindedir. 2. ve 3. çatlaklar sırasıyla 500 mm ve 40 mm bölgesinde eğilme çatlağı görünümünde oluşmuştur. 100 kN yüke ulaşıldığında deformasyon 12 mm olurken maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak görülmüştür. Deney elemanı 185 kN yük ve 27 mm deplasmanda iken akma gerçekleşmiştir. Deformasyonun 30 mm'ye tamamlanarak daha sonra her çevrimde 15 mm artırılmasına karar verildi. Çevrim tamamlandı ve geri yöndeki çevrim de 195 kN yük -27 mm deplasman değerinde akma görüldü. Yine 30 mm'ye tamamlanan deformasyon ardından ileri yönde 45 mm deformasyon görülen 183 kN yüküne kadar yükleme yapıldı. Bu durumda maksimum çatlak

genişliği temas yüzeyinde 4 mm olarak gözlenmiştir ve eğilme çatlağı niteliğindedir. Diğer çatlakların maksimum genişliği 0,5 mm genişliğinde olup kesme çatlağı görünümündedir.

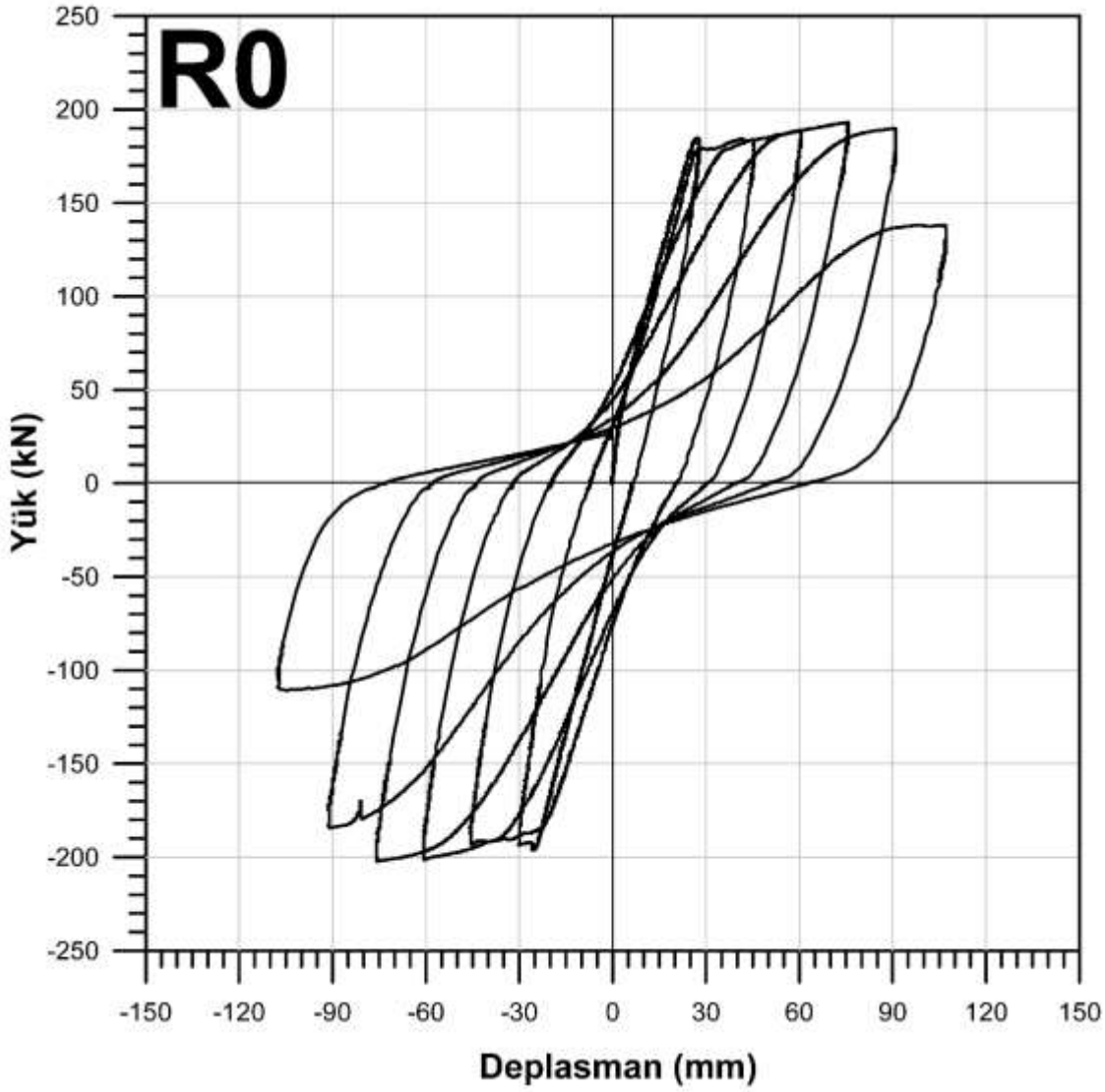


Resim 5.1. R0 deney elemanının deney öncesi görünümü

Çevrimler sırasıyla, -193 kN yük ve -45 mm deplasman, 187 kN yük ve 60 mm deplasman, -201 kN yük ve -60 mm deplasman, 192 kN yük ve 75 mm deplasman, -200 kN yük ve -75 mm deplasman, 189 kN yük ve 90 mm deplasman, -183 kN yük ve -90 mm deplasman, 133 kN yük ve 105 mm deplasman, 105 kN yük ve -105 mm deplasman görüldükten sonra 0 kN yük ve 0 mm deplasmanda deney sonlandırılmıştır. Bu çevrimlere ait yük – deplasman grafiği Şekil 5.1 gösterilmiştir. Mafsal gelişimi 192 kN yük ve 75 mm deplasman durumunda yaklaşık 250 mm'de gözlenmiştir. Bu bölgedeki çatlak genişlikleri 3-4 mm civarındadır. Onun dışında kalan bölgelerde çatlak sınırlı kalmıştır ancak kirişte kayma deformasyonları görülmektedir. Bu deformasyonlar ilk 300 mm'ye kadar yaklaşık yatay görünümde iken, sonra meyilinde değişiklikler görülmüştür. Kirişin deney sonundaki durumu Resim 5.2 ile görülmektedir.



Resim 5.2. R0 deney elemanının deney sonrası görünümü



Şekil 5.1. R0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.2. UP0 Deneyi

UP0 elemanı ile ilk güçlendirilmiş eleman deneyi yapılmıştır. Elemana ait deney öncesi durum Resim 5.3 ile gösterilmiştir. Deney birinci çevrime doğru giderken önemli bir kesme çatlağı 800 mm'den başlamış, yaklaşık 35 derece açıyla 300 mm'ye kadar devam etmiştir. Oluşan kesme çatlağının genişliği 1,2 mm olarak gözlenmiştir. Akma yaklaşık 33 mm deplasmanda gerçekleşince ilk çevrimin 35 mm deplasmana tamamlanması kararlaştırılmıştır. 182 kN yük altında 35 mm deplasmanda birinci çevrimin ileri yöndeki hareketi tamamlanmıştır. Geri yönde yapılan yükleme ile -189 kN yük altında -30 mm deplasmanda gerçekleşen akmada çevrim bitmiştir. Bu esnada elemanda 2 adet çatlak görülmüştür. 900 mm'den başlayıp, 450 mm çizgisinin aşağısına kadar inen çatlak, 1 mm genişliğindedir. Çatlak genişliği ise 1,4 mm olan diğer çatlak ise 600 mm'den başlayıp 300 mm'ye kadar 45 derece açı ile gelmekte ve yaklaşık yatay devam edene kadar 0 mm'ye kadar ulaşmaktadır. 181 kN yük – 50 mm deplasman ve -191 kN yük -45 mm deplasman ile 2. çevrim tamamlanmıştır. Üçüncü çevrimde 185 kN yük ve 65 mm deplasman değerine erişildiğinde, ileri yönde 3 ana kesme çatlağı gözlenmiştir.



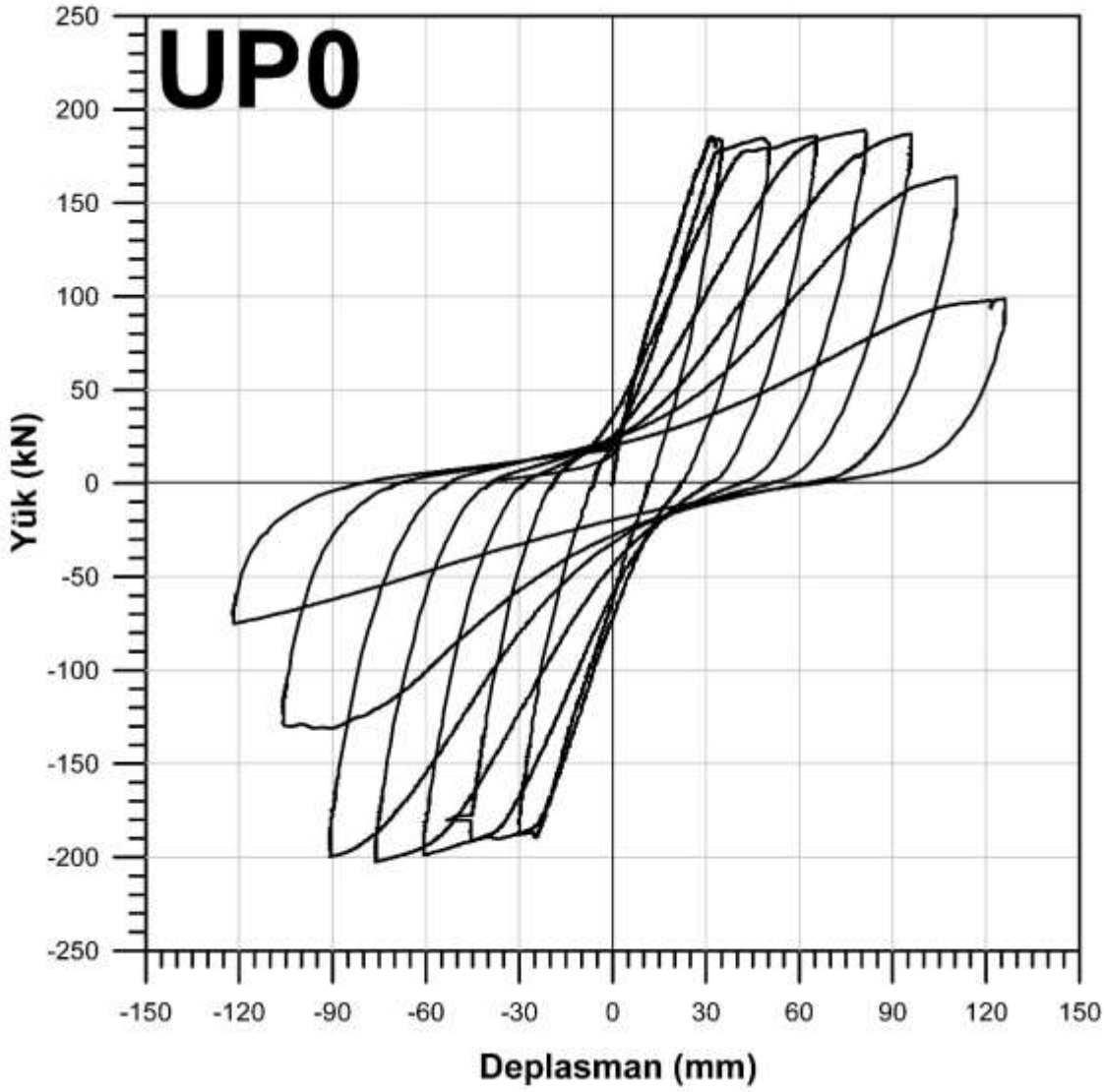
Resim 5.3. UP0 deney elemanının deney öncesi görünümü

-198 kN ve -60 mm deplasman ile 3. çevrim tamamlanmıştır. Dördüncü çevrimin ileri yöndeki yüklemesi 188 kN yük altında 80 mm deplasman ile gerçekleşirken, bu noktada elemanda ağır denebilecek hasarlar görülmüştür. Ancak yükte bir kayıp yoktur. -202 kN yük ve -75 mm deplasman ile 4. çevrim tamamlanmıştır. Sırasıyla 186 kN yük ve 95 mm deplasman, -199 kN yük ve -90 mm deplasman, 163 kN yük ve 110 mm deplasman, 125 kN yük ve -105 mm deplasman ile çevrimler tamamlanarak deney devam etmiştir. Son çevrim ileri yöndeki yükleme 98 kN yük ve 125 mm deplasman ile bitmiştir. Deney elemanı bu durumda iken, çelik kablolar son derece gergin ve bu halde bile başarılı durumdadır. Eğilme bölgesinde yaklaşık 300 mm'lik bir bölge paramparça olmasına rağmen sargılama son derecede başarılı olmuştur ve betonda dökülme yoktur. Kesme çatlaklarını da kablolar kestiği için çatlakları sınırlamış durumdadır. Maksimum çatlağı 8 – 10 mm civarındadır ve o kısımlardaki kablolar son derecede gergindir. Sıvalı kirişlerde bunların daha sınırlı olacağı düşünülmektedir. UP0 elemanın geri yöndeki yüklemesi -73 kN yük ve -120 mm deplasman tamamlandıktan sonra 0 kN yük ve 0 mm deplasmanda deney sonlandırılmıştır ve Resim 5.4 ile deney sonrası durum görülebilmektedir.



Resim 5.4. UP0 deney elemanının deney sonrası görünümü

UP0 elemanına ait yük – deplasman grafiği Şekil 5.2 ile gösterilmiştir.



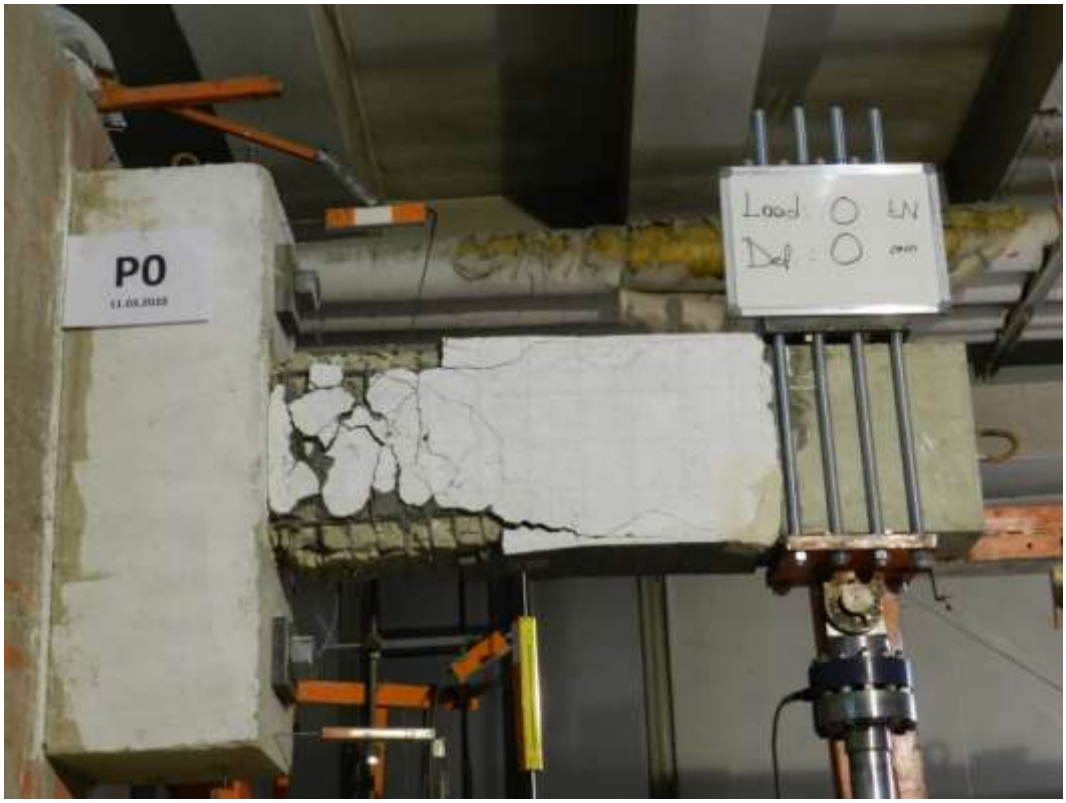
Şekil 5.2. UP0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.3. P0 Deneyi

P0 deneyinde, UP0 deney elemanına ilave olarak tamir harcı ile 25 mm kalınlığında sıva yapılmış deney elemanı kullanılmıştır. Deney ileri yönde gerçekleşecek akmaya kadar yapılan yükleme ile başlamıştır ve 184 kN yük ile 28 mm deplasman değerinde akma meydana geldikten sonra deplasman 30 mm'ye tamamlanarak ilk çevrimin yarısı tamamlanmıştır. Geri yöndeki yüklemede -190 kN yük ve 21 mm deplasman koşullarında gerçekleşen akma sonrası deplasman 25 mm'ye tamamlanmıştır. Eleman 183 kN yük ve 45 mm deplasman durumunda iken, 450 mm hizasında 1 adet kesme çatlağı vardır. Bu çatlak dışında mesnetlenme bölgesinde eğilme çatlağı görülmüştür. Mesnetten ayrılması kiriş alt yüzünden 6 mm olarak ölçülmüştür. -194 kN yük ve -40 mm deplasman durumunda 3 adet ana kesme çatlağı gözlenmiştir. Eğilme çatlağı ile simetrik olarak mesnet üst yüzünde 6 mm ayrılmış durumdadır. 186 kN yük ve 60 mm deplasman ile -203 kN yük -55 mm deplasman değerleriyle 3. çevrim tamamlanmıştır. 190 kN yük ve 75 mm deplasman değeri ile 4. çevrim ileri yönlü hareketi tamamlanmışken arka yüz mesnet bölgesinde yan yüzdeki beton dökülmüş durumdadır. Kullanılan harcın çelik kabloların altını tamamen doldurduğu görülmektedir ve herhangi bir sıyrılma yoktur. Ancak kesme çatlaklarının ileri seviyede olduğu söylenebilir. -205 kN yük ve -70 mm deplasman değerinde eleman ağır hasarlı olmasına rağmen henüz yükte bir kayıp yoktur. Resim 5.5'te hasar durumu gösterilmiştir. 190 kN yük ve 90 mm deplasman, -202 kN yük ve -85 mm, 160 kN yük ve 105 mm deplasman, 176 kN yük ve -100 mm deplasman değerleriyle son çevrime kadar gelinmiştir. Son çevrimin ileri yönde 125 kN yük ve 120 mm deplasman ile, geri yönde ise -122 kN yük ve -115 mm değerleriyle tamamlanmasının ardından 0 kN yük ve 0 mm deplasmanda deney sonlandırılmıştır. Son çevrimde kabloların kopmaya başladığı gözlenmiştir. 1. sırada kullanılan çift sıra güçlendirme kabloları tamamen kopmuştur. 3. sırada da kabloların koptuğu görülmüştür. Kabloları germek ve kablolar ile eleman arasında sıva girmesini sağlamak amacıyla kullanılan demirler ile kabloların kesiştiği noktalarda kopmaların yaşandığı gözlemlenmiştir. P0 elemanına ait yük – deplasman grafiği Şekil 5.3 ile verilmiştir. Deney sonu kabloların durumunu da gösteren fotoğraf Resim 5.6 ile yakın fotoğraflar Resim 5.7 ile gösterilmiştir.



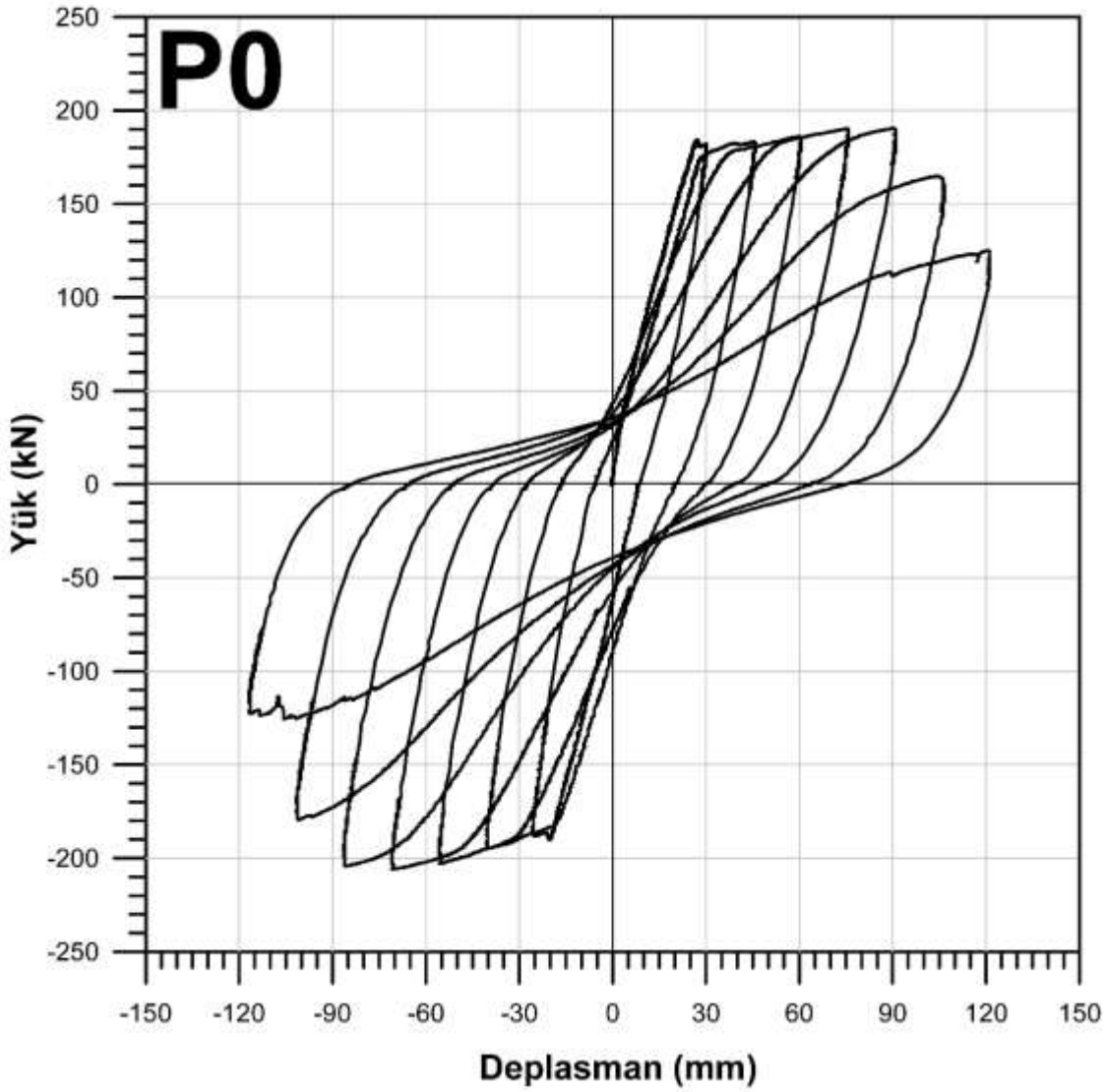
Resim 5.5. P0 deney elemanının -205 kN yük ve -70 mm deplasman durumunda görünümü



Resim 5.6. P0 deney elemanının deney sonrası görünümü



Resim 5.7. P0 deney elemanının deney sonrası yakın görünüşleri



Şekil 5.3. P0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.4. PL0 Deneyi

PL0 deneyinde, P0 deney elemanına ilave olarak 50 mm ara ile sarılmış çelik kabloların her bir sırasının iki yüzünde de ikişer tane olmak üzere klemens kullanılarak yapılan kilit sistemli deney elemanı kullanılmıştır. Kilit sistemiyle ortaya çıkacak sürtünme kuvvetlerinin, kabloların sıyrılmasının önlenmesinde etkisini gözlemlemek amacıyla elemana bu işlem yapılmıştır. 190 kN yük ve 26 mm deplasman değerinde akma gerçekleşmiştir ve 30 mm deplasman değerine tamamlanmıştır. Birleşim bölgesi ara kesitinde 3 mm genişliğinde bir eğilme çatlağı vardır. Onun dışında kiriş yüzeyinde 2 adet 400-500 mm arasında düşey yönlü çatlaklar oluşmuştur. Aynı zamanda kiriş alt yüzünde sıva katmanında hafif ayrılma belirtisi görülmektedir. Alt yüzde 500 mm'den 800 mm'ye giden diyagonal bir kesme çatlağı bulunmaktadır. İleri yöndeki yüklemenin tamamlanmasının ardından geri yönde yapılan ilk çevrim yüklemesinde aynı değerlerle, -190 kN yük ve -26 mm deplasmanda akma gözlenmiştir ve yine deplasman -30 mm'ye tamamlanmıştır. Deney elemanında 100 mm ile 200 mm arasında başlayan bir diyagonal çatlak, 300 mm ile 400 mm arasında başlayan bir diyagonal çatlak ve 400 mm ile 500 mm arasında başlayan bir diyagonal çatlak mevcuttur. Birleşim ara kesitinde oluşan 3 mm genişliğinde ana kesme çatlağı görülmüştür. 500 mm ile 600 mm arasında başlayan bir diyagonal çatlak mevcut olup, bu diyagonal çatlakların hepsi kılcal düzeydedir. 187 kN yük ve 45 mm deplasman değeriyle 2. çevrimin ileri yöndeki ilerlemesi gerçekleştirilmiştir. Dayanımda %15 gibi bir kayıp olmadığı için yükte önemli bir kayıp olmadığını söylenebilir. -192 kN yük değerinde gerçekleşen -45 mm deplasman ile 2. çevrim tamamlandıktan sonra sırasıyla, 187 kN yük ve 60 mm deplasman, -201 kN yük ve -60 mm deplasman, 189 kN yük ve 75 mm deplasman, -201 kN yük ve -75 mm deplasman ile çevrimler geçilmiştir. 5. çevrime ileri yönde 179 kN yük ve 90 mm deplasman değeriyle ulaşıldığında, kirişte ağır hasar olmasına rağmen dayanımda önemli bir kayıp yoktur. Geri yöndeki yükleme -179 kN yük ve -90 mm deplasman değerleriyle tamamlanmıştır. 3. sargı sırasında tek taraflı liflerde kopma meydana gelmiştir. Elemanın 5. çevrim sonundaki görünümü, resim 5.8 ile gösterilmiştir. 136 kN yük ve 105 mm deplasman, -118 kN yük ve -105 mm deplasman ile tamamlanan 6. çevrim sonrası 3. sıradaki sargının her iki kablosu da kopmuş durumdadır. 93 kN yük ve 120 mm deplasman, -61 kN yük ve -120 mm deplasman ile deneyin son çevrimi tamamlanmıştır. Kopma olduktan sonra deformasyonlarda artma neticesinde parçalanma meydana geldiği için komşu kablolarda da gevşeme olmuş ve bu durum da yükün düşmesine sebep olmuştur.



Resim 5.8. PL0 deney elemanının 5. çevrim sonundaki görünüşü

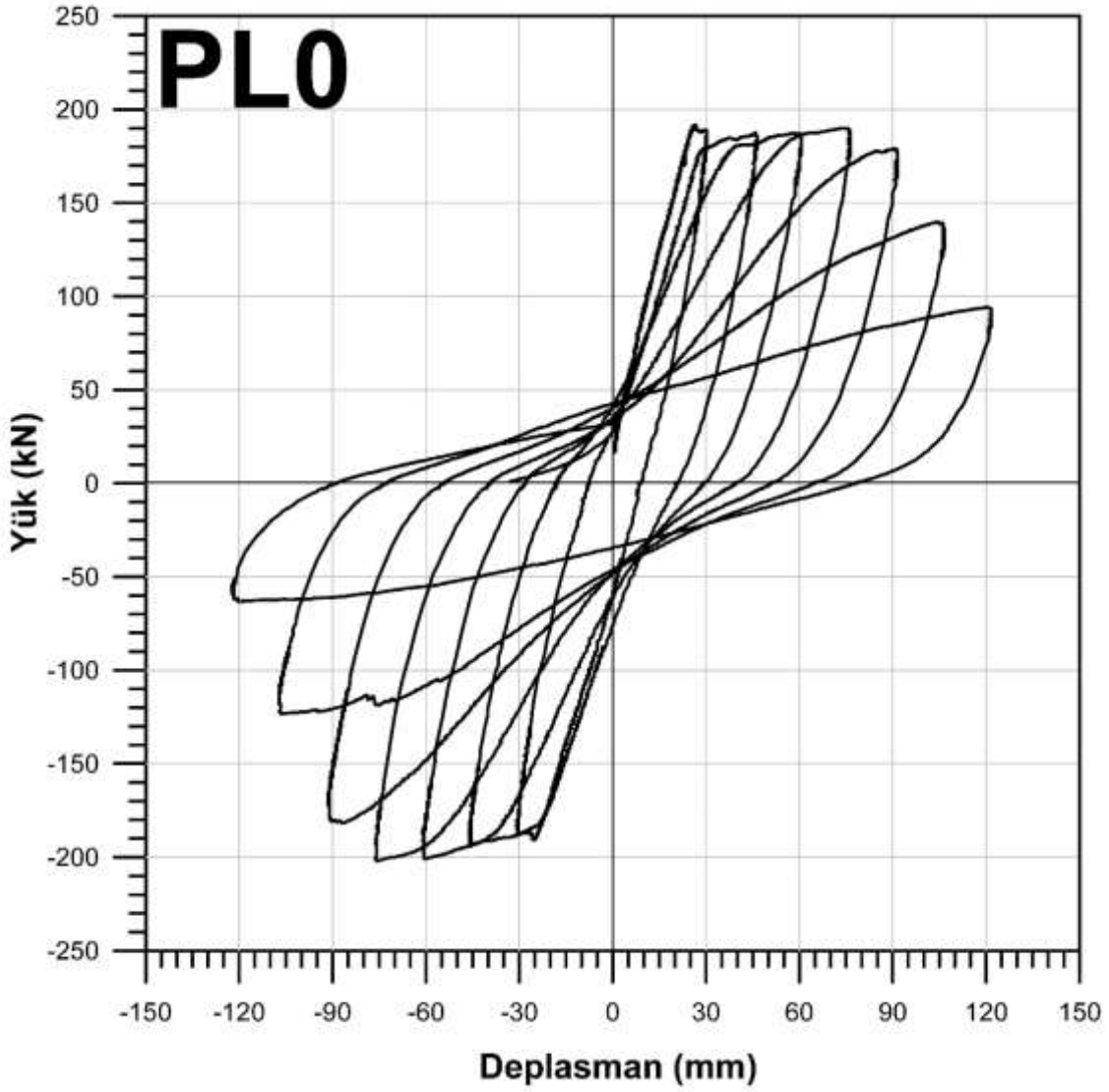
5. çevrim sonunda görünüşü verilen PL0 elemanı, ağır hasar durumunda bile yükte büyük bir kayıp yaşamamışken, 6. çevrimde tamamen kopan kablolar sonrası yükteki düşüş ciddi seviyede gerçekleşmiştir. Deney sonrası durum da Resim 5.9 ile gösterilmiştir. Dikkat edilirse, elemanın güçlendirme yapılan ana gövdesindeki Resim 5.8 ile gösterilen hasarların boyutu, kabloların kopmasıyla artarak kiriş dibinden dökülmelere neden olacak seviyeye ulaşmıştır. Zira artık güçlendirme kablosu olmayan bir elemanın sargı etkisi ortadan kalkmıştır. Dikkat çeken bir diğer husus, PL0 elemanında kabloların P0 elemanına göre daha erken kopmuş olmasıdır. P0 deney elemanında, kablolar 6. çevrim sonrası kopma belirtileri gösterip, 7. ve son çevrimde kopmuş iken PL0 deney elemanında 5. çevrimin sonunda tek kabloda kopma meydana gelmiştir. Buradan, deneyde çelik kablodaki sıyrılmayı önlemek amacıyla kullanılan kilit sisteminin, sıyrılma hareketini kısıtlarken kablodaki gerilmeyi artırarak kopmalara sebebiyet verdiği görüşü oluşmuştur. Yani kablo kendi başına güçlendirme amacıyla uygulanan sıva içerisinde sürtünerek sıyrılma yapsa daha geç kopacakken, kilit sistemi kablonun hareketini engelleyince kabloya etki eden kuvvet kabloda kopmayı gerçekleştirmiştir. PC0 ve PLC0 elemanları arasında deney davranışı tekrar gözlenecek kilit sisteminin deneylerin 2. grubunda da etkisi incelenecektir.

Ancak mevcut durumda, klemensler kullanılarak yapılan ve güçlendirilecek elemanın her iki yüzünde de iki adet kullanılan kilit sisteminin başarısından söz edilemez. Uygulamada ilave işçilik gerektiren kilit sisteminin, gerçekleştirilen bu deney sonrası güçlendirmeye olumlu bir etki yapmadığı görülmüştür. Diğer deney sonuçlarına göre araştırmanın sonuç kısmında ayrıntılı olarak konu gözden geçirilecektir.



Resim 5.9. PL0 deney elemanının deney sonundaki görünüşü

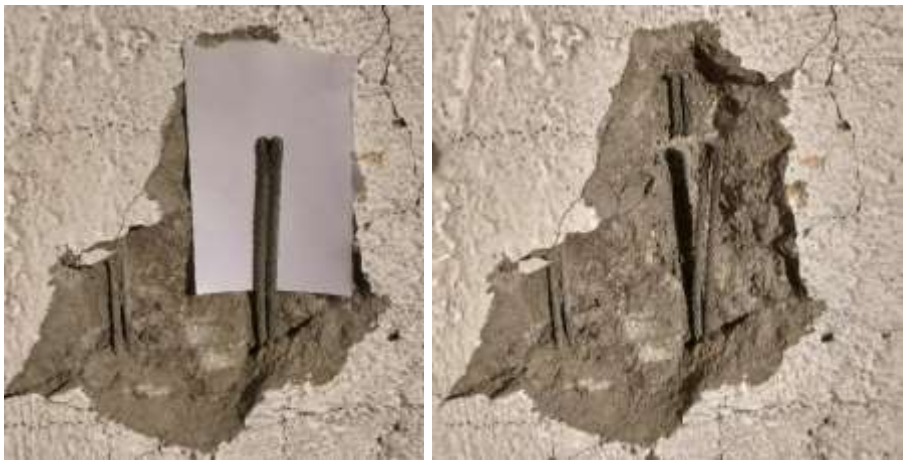
PL0 deney elemanına ait yük – deplasman grafiği Şekil 5.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.4. PL0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.5. PC0 Deneyi

PC0 deneyi, önce P0 deneyi gibi başlatılan ancak 3. çevrimin ardından güçlendirme kablosunun çift sırasının birlikte yapay olarak kesilmesi ile devam ettirilerek sonuçların gözleneceği deneydir. Yükleme başladıktan sonra 180 kN yük ve 27 mm mm deplasman değerinde akma gerçekleşmiş ve deplasman 30 mm'ye tamamlanmıştır. Konsol dibindeki çatlak genişliği yaklaşık 2,5 mm'dir. Ancak bu çatlaklar sıva katmanının içerisinde daha az olabilir. Yan yüzde de çatlaklar vardır fakat çok belirgin değildir. Deney geri yönde yükleme ile devam ettirildiğinde -185 kN yük ve -25 mm deplasman durumunda gerçekleşen akmanın ardından deplasman 30 mm'ye tamamlanmıştır. Negatif yönde çatlak genişliği yine 2 mm civarındadır. 182 kN yük ve 45 mm deplasman durumunda maksimum çatlak genişliği konsol dibinde 5 mm'dir. -192 kN yük ve -45 mm deplasman ile tamamlanan 2. çevrimde negatif çatlak genişliği konsol dibinde 6 mm'dir. Yan yüzde de çatlaklar vardır, fakat halen çok belirgin değildir. 3. çevrim ileri yöndeki yüklemesinde 184 kN yük ile 60 mm deplasman görülmüş ve çatlak genişliği 10 mm olmuştur. Nitelikli sıva ile rijit blok arasındaki açıklık 10 mm iken orijinal kirişteki çatlak genişliği 3-4 mm olarak görülebilmektedir. Bu durum kaplama ile orijinal kiriş arasında göreceli bir hareket – oynama olduğunu göstermektedir. Sıvadaki çatlak genişliği konsol dibinde 10 mm civarında iken orijinal kirişte 4 mm civarında olduğundan hareketle, yaklaşık 6 mm rölatif hareket olduğunu söylemek mümkündür. 198 kN yük ve -60 mm deplasman ile tamamlanan 3. çevrimin ardından yükü boşalttıktan sonra kablo kesilmiştir. Kablo koparmaları kabloyu en çok zorlayan çatlağın kablo ile kesiştiği noktadan yapılmıştır. Resim 5.10 ile kesilen çift sıra kablonun detay görüntüleri verilmiştir.



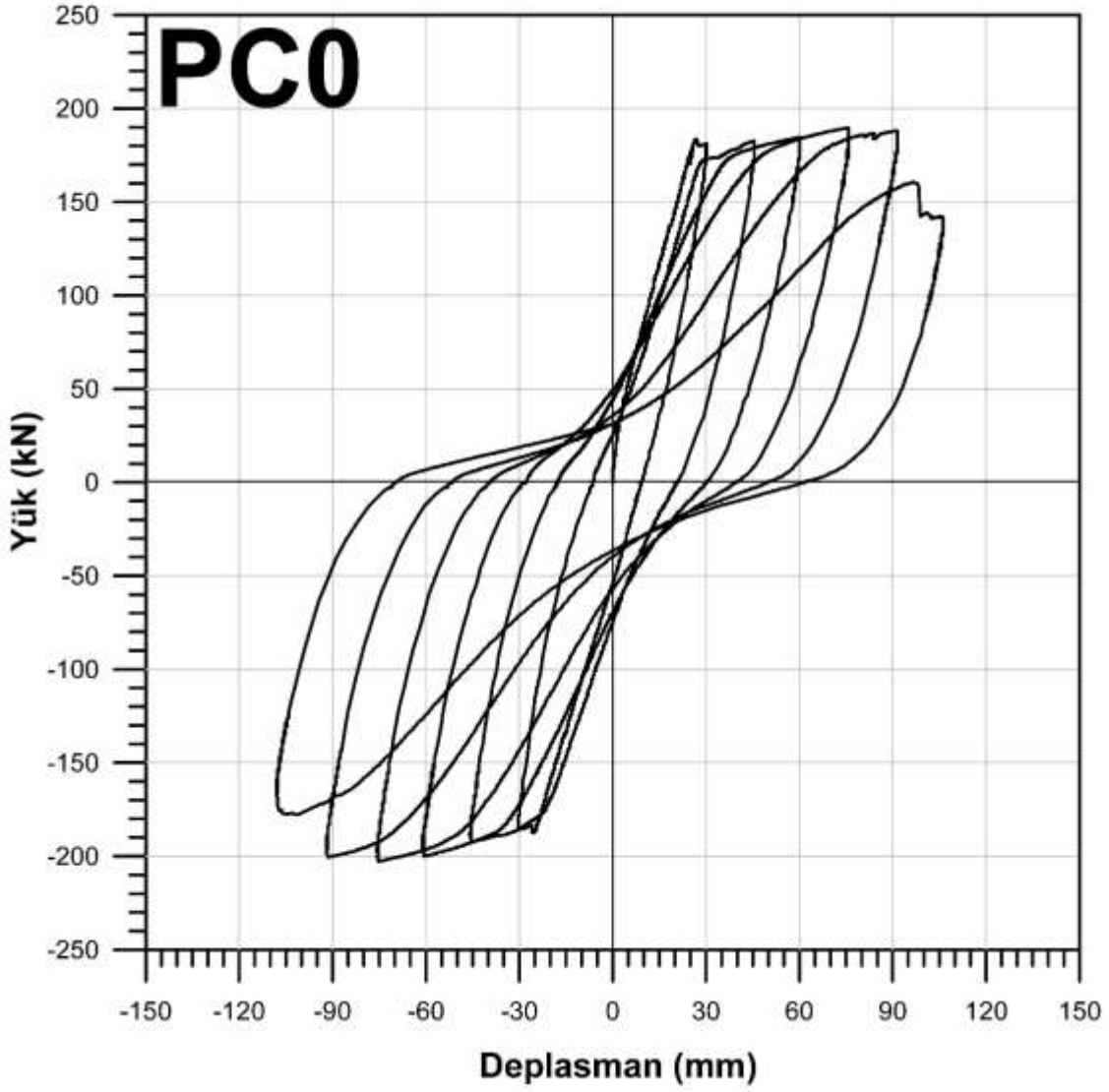
Resim 5.10. PC0 deney elemanının kesilen kabloların detay görünüşü

189 kN yük ile 75 mm deplasman ve -200 kN yük ile -75 mm deplasman değerleriyle 4. çevrim tamamlanmıştır. 187 kN yük ve 90 mm deplasman değerine gelindiğinde 60 mm iken kasten kopartılmış kabloda sıyrılmalar başlamıştır. Konsol dibindeki 200 mm'lik bölgede betonda aşırı parçalanmalar olmasına rağmen dışarıdan eklenmiş kablolar bölgeyi oldukça iyi sargılamaktadır. Yapay olarak kesilen kablonun hemen sağındaki ve solundaki kablolar gerginliğini çok iyi derecede koruduğu için en azından şimdilik bir kesme problemi görülmemektedir. Kablonun ön yüzde koparıldığı deney elemanının arka yüzünde ise herhangi bir problem yoktur. Ön yüzde kablo koparılmış olsa bile arka yüzdeki koruyucu sıva yük aktarımını sağlamaktadır. -200 kN yük ve -90 mm deplasman değerine ulaşıldığında, bir önceki çevrimde koparılan kablonun 2 sağındaki kablo da kopmuş durumda olarak görünmektedir. Resim 5.11 ile deney elemanının bu andaki görünüşü verilmiştir. Deney bu noktaya gelinceye kadar kelepçelerde herhangi bir gevşeme kopma yoktur.



Resim 5.11. PC0 elemanının -200 kN yük ve -90 mm deplasman değerinde görünüşü

140 kN yük ve 105 mm değeriyle son çevrim ileri yöndeki yüklemesi yapılmıştır. Yapay kesilen kablonun yeri 200 mm'deki sırada olup, 2 sağındaki sırada yani 300 mm'de tam kopma varken, 350 mm'deki çelik kablolarda tellenme (kesit kaybı) mevcuttur, 150 mm'deki çelik kablolarda ise ileri derecede tellenme vardır, kablolar kopmak üzeredir. -175 kN yük ve -105 mm deplasman değeriyle deneyin son çevriminin geri yüklemesi tamamlanmıştır. İlk 400 mm'lik bölgede betonda ağır hasar olmasına karşın göreceli olarak eleman iyi durumdadır. Kopmayan çelik kablolar bile yine katkı sağlamaktadır. PC0 deney elemanına ait yük – deplasman grafiği şekil 5.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.5. PC0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

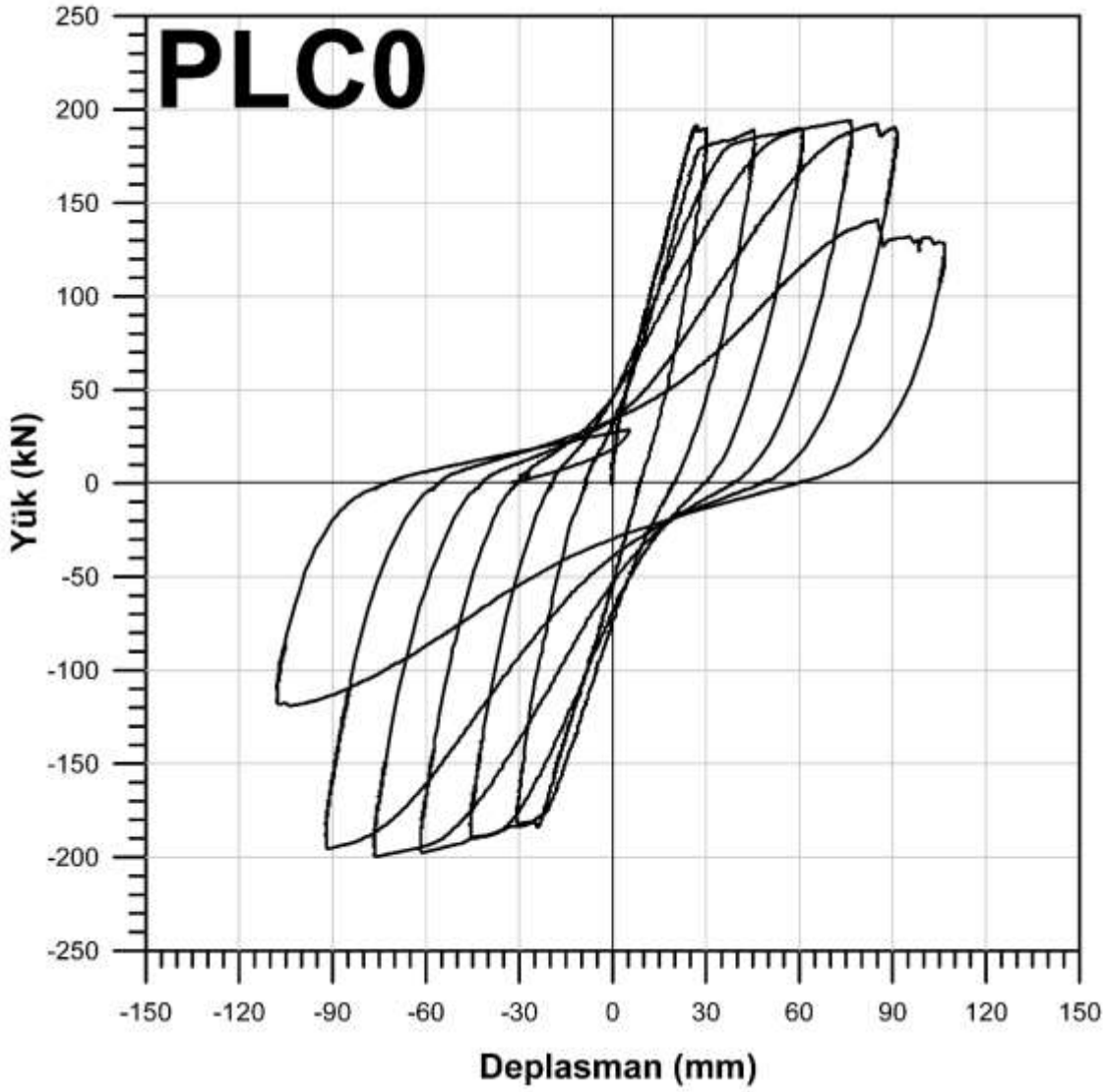
5.6. PLC0 Deneyi

PC0 elemanından farklı olarak her sırada çift yüzde ikişer tane kilit bulunduran PLC0 deney elemanı ile daha önce P0 ve PL0 arasında yorumlanan kilit sisteminin etkisi de dikkatli bir şekilde incelenecektir. Deneyde ileri yönde yükleme 189 kN ve 27 mm'de gerçekleşen akmanın 30 mm değerine kadar tamamlanmasıyla başlamıştır. Geri yönde de -189 kN ve -27 mm'deki akma dayanımına ulaşmasının ardından deplasman -30 mm'ye tamamlanmıştır. Deney elemanı 188 kN yük altında 45 mm deplasmana ulaştığında birleşim bölgesinde bir eğilme çatlağı mevcuttur. Eğilme çatlağı alt yüzden itibaren yaklaşık 10 mm'dir. Ancak bu yaklaşık 10 mm'lik sıyrılma nitelikli sıvada görünmektedir. Güçlendirilen betonarme kirişte çatlak kılcal düzeydedir. Deney numunesi -185 kN yük ve -45 deplasman durumundayken, üst yüzdeki eğilme çatlağı ara kesitte yoğunlaşmış durumda gözlemlenmiştir. Yine takviye sıvasında yaklaşık 10 mm ayrılma vardır ancak kirişte bu çatlak kılcal düzeydedir. Kiriş ara kesitinde 100 mm ilerde eğilme – kesme çatlağı gibi bir durum oluşmuştur. 190 kN ve 60 mm deplasman durumunda çatlakların simetrik ilerlediği görülmüştür. İleri ve geri yöndeki çatlaklar oldukça simetriktir. Takviye sıvasının ana kesitten ayrılması yaklaşık 15 mm'yi geçmiş olmasına rağmen ana kirişteki çatlak 2-3 mm civarındadır. Eğilme ve kesme karşımı çatlaklar kiriş alt yüzünde görülmüştür. -197 kN yük ve -60 mm durumnda, eksi yöndeki ve pozitif yöndeki çatlaklar simetriktir ancak ileri düzeyde kesme çatlakları takviye sıvası üzerinde yaklaşık 3 mm civarında görülmüştür. Sıyrılma yine deney numunesinin +60 mm deplasmandaki haline benzer şekilde ana kesitten yaklaşık 15 mm olarak ölçülmüştür.



Resim 5.12. PLC0 elemanının kablo kesiminin görünüşü

Resim 5.12 ile gösterildiği üzere ana kesme çatlağı ana kesitten itibaren 200 mm'den geçen bölümde yoğunlaştığı için kesme işlemi önceki deneyde olduğu gibi 200 mm'deki kablo sırasından gerçekleştirilmiştir. Yük 0 kN iken kablo kesilmiştir. Kesme işlemi yapıldıktan sonra +75 mm deplasmana gidilecektir. Kesme işlemi ana kesit alt ve yan yüzünden 200 mm uzaklıkta olacak şekilde yapılmıştır. 192 kN yük ve 75 mm deplasman durumunda, takviye sıvasının eğilmeden dolayı sıyrılması oldukça belirgin olduğu görülmüştür. Takviye sıvası eğilmenin en çok olduğu bölümde dökülmeye başlamıştır. Buna rağmen ana kirişteki eğilme çatlakları 3-4 mm civarındadır. Aynı zamanda kesilen kablo uçları birbirinden 10 mm uzaklaşmıştır. Yapay olarak kesilen kablonun birbirine göre sıyrılması yani rölatif hareketi yaklaşık 10 mm olmuştur. -199 kN yük ve -75 mm deplasman durumunda hasarlar çok belirgindir ancak buna rağmen yükte önemli bir kayıp yoktur. Kabloların birbirine göre sıyrılması 15 mm civarındadır. 190 kN yük ve 90 mm deplasman değerine gelindiğinde kasten kopartılmış kabloda sıyrılmalar artmıştır. Kasıtlı olarak kestiğimiz kablonun sağındaki, yani 250 mm'deki kablolar +90 mm deplasmana gidilirken kopmuştur. 2 adet kablo kopuk olmasına rağmen yükte herhangi bir önemli kayıp oluşmamıştır. -195 kN yük ile -90 mm deplasmana gelindiğinde 3. sıradaki yani 150 mm'deki kablo kopmak üzeredir, yani tellenme vardır. Kesitin her bir telde en az %50si kaybolmuş durumdadır. Deneyde 128 kN yük ile 105 mm deplasmana gelindiğinde, yükte önemli bir kayıp meydana geldiği görülmüştür. Önceki çevrimde zayıflayan kesit diye bahsedilen 3. sıradaki kablolar kopmuş durumdadır. Kiriş ana kesitinden itibaren 2 tane sargı kablosu dışında eğilme bölgesindeki hemen hemen tüm kablolar kopmuştur. Ancak bu kabloların kopması birbirinden bağımsız gerçekleşmiştir. Yani bu klemensler takviye sıvası içerisinde bir direnç sağlayarak sargılamanın hemen kaybedilmesini engellediği düşünülebilir. Ancak PC0 elemanı 105 mm deplasman değerine geldiğinde 140 kN yük almıştır ve daha az kablo kopmuştur. Daha önce tahminde bulunulan, klemenslerin kablo uygulamasına faydasının olmaması durumu yine göze çarpmıştır. -108 kN yük ve -105 mm deplasman değeri ile deneyin son çevrimi tamamlanmıştır. Eleman artık taşıma gücünü kaybetmiştir ancak son ana kadar kablolar kopmasına rağmen yükte önemli bir kayıp olmasını engellediği söylenebilir. Artık daha büyük ötelenmelere gelindiğinde eleman taşıma gücüne ulaşmış ve yükte önemli kayıp meydana gelmiştir. PLC0 deney elemanına ait yük deplasman grafiği Şekil 5.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.6. PLC0 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.7. R8 Deneyi

R8 deney elemanı ile araştırmanın 2. grubuna ait deneysel süreç, referans eleman olan R8 ile başlamıştır. 1. grup referans elamanı olan R0 deney elemanında etriye aralığı 70 mm iken, R8 elemanında etriye aralığı 100 mm'dir. Yükleme başladıktan sonra 185 kN yük ve 30 mm deplasman değerinde akma gerçekleşmiştir. Elemanda 4 tane 200 mm aralıklı düzgün kesme çatlakları mevcuttur. Gövde alt yüzündeki ayrılma 1 mm olarak görülmüştür. Eleman geri yönde -192 kN yük ve -24mm deplasman altında aktıktan sonra 30 mm deplasmana kadar deformasyon tamamlanmıştır. -194 kN yük altında -30 mm deplasman ölçülmüştür. Yine 4 tane ters yönde kesme çatlağı oluşmuş olup gövde üst yüzdeki çatlak genişliği 2 mm'dir. 182 kN yük 45 mm deplasman durumunda, ana gövdeden açılma 3 mm olarak gözlemlenmiştir. -192 kN yük -45 mm deplasman ile 2. çevrim tamamlanırken, konsol dibi çatlak genişliği 4 mm'dir. Deneyin devamında, 177 kN yük ile 60 mm deplasman gerçekleşmiştir. Kesme çatlakları üst yüzdeki temas noktasına ulaşmış durumdadır. Üst yüzde de ezilme belirtileri gözlenmektedir. Gövde yüzündeki çatlak haricinde üst köşeden başlayan yatayla 75 derece açı yapan 2. bir büyük kesme çatlağı mevcut olup genişliği yaklaşık 5 mm'dir. Onun hemen sağında 135 derece açılı ve genişliği 2,5 mm civarında olan 3. bir kesme çatlağı mevcuttur. -199 kN yük ve -60 mm deplasman durumunda, ilk 150 mm'lik bölgede plastik mafsal oluşmuştur. 161 kN yük ve 75 mm deplasman ilerlemesinde, ilk 400 mm'lik bölgede kayma deformasyonları belirginleşmiştir. Plastik mafsal genişliği 200 mm'lik bölgededir. Deney numunesi -164 kN yük altında -75 mm deplasman durumundayken ön ve arka yüzde 50, 150 ve 250 mm mesafelerdeki ilk 3 etriye açığa çıkmış durumdadır. 104 kN yük ve 90 mm deplasman ile tamamlanan ileri yüklemenin ardından, geri yöndeki -90 mm deplasman değerine gidilirken 2. sıradaki etriye kopmuş ve -86 kN yük ile -90 mm deplasman ölçülmüştür. Son çevrim ileri yönde 59 kN yük ve 105 mm deplasman, geri yönde -64 kN yük ve -105 mm deplasman ile tamamlandı. Deney elemanının 350 mm'lik bölgesi ağır hasarlıdır. Plastik mafsaldan dahi bahsedilmesi mümkün değildir, çünkü elemanda boşalmalar vardır. Taşıma gücünü eğilme belirlemiştir ancak ağır kesme hasarları da vardır. Yani kesme de kirişi iyi zorlamış, bunun neticesinde etriyelerden 1 tanesi de kopmuştur. Resim 5.13 ile deney sonrası durum ve Resim 5.14 ile kopan etriye görülebilir.

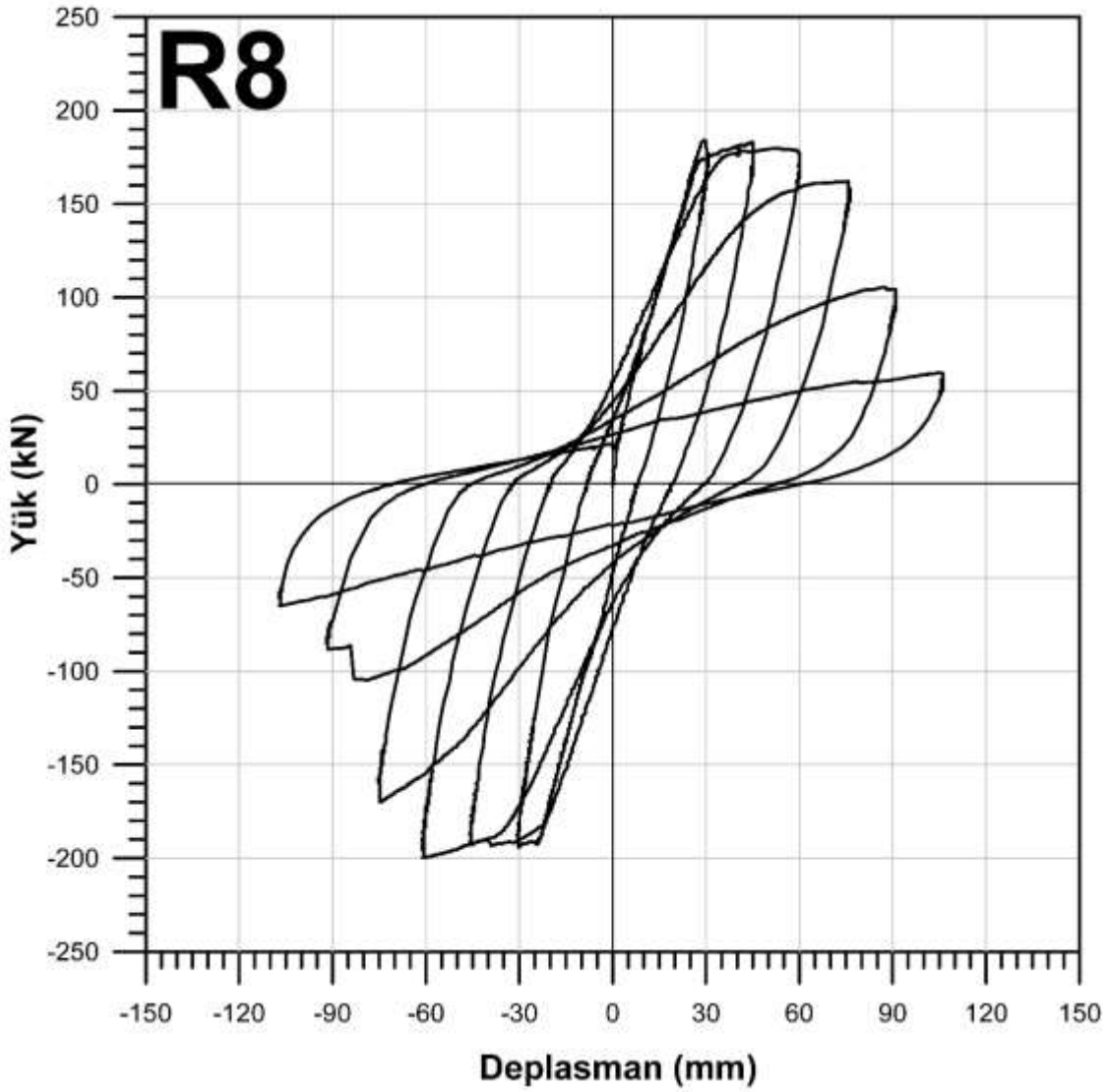


Resim 5.13. R8 elemanının deney sonrası görünüşü



Resim 5.14. R8 elemanının kopan etriye görünüşü

R8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi Şekil 5.7 ile gösterilmiştir. Etriyenin koptuğu anda, yükteki meydana gelen ani düşüş grafikte görülebilmektedir.



Şekil 5.7. R8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.8. UP8 Deneyi

UP8 deney elemanı, 2. grup deney elemanlarının ilk güçlendirilmiş numunesidir. İlk grubun aksine, çift sıra çelik kablolar ile yapılan güçlendirme işleminde, kablolar arası 70 mm'dir. Deformasyon kontrollü yükleme başladıktan sonra, 184 kN yük ve 28 mm deplasman değerinde aktıktan sonra 30 mm deplasmana kadar tamamlanmıştır. Üç tane çatlak görünmektedir. İki tane ana kesme çatlağı mevcut olup, bir tanesi temas yüzeyi üst köşeden başlayıp 500 mm sonra alt yüzü bulmuşken, 2.si üstte 400 mm'den başlayıp aşağıda 900 mm'e ulaşmıştır. Her iki çatlağın genişliği de 1-1,5 mm civarındadır. Onun haricinde açısı 75 derece olan 3. bir çatlak vardır. Bu çatlak da yine üst köşeden başlamış ve 200 mm'de alt yüzü bulmuş olan göreceli olarak küçük bir çatlaktır. Deneyin bu durumunda temel olarak 2 tane ana kesme çatlağı vardır denilebilir. -30 mm deplasmana -194 kN yük ile ulaşıldığındaki geri çekmede yine temelde 2 tane kesme çatlağı vardır. Bir tanesi alt köşeden başlayıp 550 mm'de üst yüze ulaşmaktadır. Çatlak genişliği yaklaşık 1,5 mm'dir. Diğeri alt yüzde 550 mm'de başlayıp 950 mm'de üst yüzü bulmaktadır. Buradaki genişlik 20 mm civarındadır. 182 kN yük ve 45 mm deplasman ile 2. çevrim ileri yöndeki eleman durumunda, ilk çevrimdeki 2 ana kesme çatlağının genişlikleri sırasıyla 1,5 mm ve 1 mm'dir. İlave olarak rijit blok üzerinde bir eğilme çatlağı mevcuttur ve çatlak genişliği 2 mm'dir. -194 kN ve -45 mm ile 2. çevrim tamamlanmıştır. 188 kN yük ve 60 mm deplasman durumunda konsol dibinde 50 mm'lik bölge plastik mafsal olarak görünmektedir. Bu bölgedeki maksimum çatlak genişliği 4 mm'dir. Ana kesme çatlakları sırasıyla 2,5 mm ve 2 mm'dir. Basınç bölgesinde çok hafif ezilme belirtisi vardır. Resim 5.15 ile gösterildiği üzere bu aşamaya kadar eleman oldukça iyi durumdadır. 197 kN yük ve -60 mm deformasyonla 3. çevrim tamamlanırken, kayma deformasyonları belirginleşmiştir. Ayrıca konsol dibindeki eğilme çatlağı 6 mm civarındadır. Kesme çatlaklarından bir tanesi özellikle belirginleşmiştir. Bu çatlak alt köşeden başlayıp 700 mm'ye yukarı ulaşmaktadır, maksimum kesme çatlağı olarak gözlemlenen çatlağın genişliği 4 mm civarındadır. Bu çatlağın solunda yine çeşitli açılarla çatlaklar vardır. Plastik mafsal genişliğinin yaklaşık olarak 150 – 200 mm olduğu söyleyenebilir. Konsol dibi üst yüzde hafif de olsa betonda ezilme belirtisi mevcuttur. 190 kN yük ve 75 mm deplasman ile 4. çevrim ilk turu tamamlanmıştır. Konsol yüzünden 3. sıradaki kabloların birinde kopma başlamış olup, diğeri sağlam görünmektedir. Bunun dışında herhangi bir sıkıntı yoktur, kelepçelerde bir sıyrılma görülmemiştir. -201 kN yük ve -75 mm deplasman değeriyle çevrim bitirilirken, çevrim grafiklerinde herhangi bir anormallik yoktur.



Resim 5.15. UP8 elemanının 188 kN yük ve 60 mm deplasman durumundaki görünüşü

177 kN yük ve 90 mm deplasman ile deneye devam edilirken, 3. sıradaki kablolardan bir tanesi hala kopmak üzeredir. 3. sıradaki diğer kabloda da kopmalar başlamıştır. 4. sıradaki kablolardan bir tanesinde kopmalar başlamış durumdadır. 9. sıradaki kabloların her ikisinde de kopmalar başladmıştır. Şu ana kadar tamamen kopan bir kablo yoktur. Kelepçelerde sıyrılma yoktur. Referansla kıyaslandığında elemanın durumu daha iyi sayılabilir. -152 kN yük ve -90 mm deplasman değerinde, ilk yarım metredeki beton gövde boyunca paramparça olmasına ve kablolarda kısmen kopmalar olmasına rağmen, kablolar halen kırılmış - dağılmış parçaları bir arada tutabilmektedir. Yükteki kayıp şu anda %25 seviyesinde olup, bu hasar durumuna göre oldukça iyi olduğu söylenebilir. Mevcut durumun hasarı Resim 5.16 ile gösterilmiştir. 110 kN yük ile 105 mm deplasman değerine gidilirken, ileri çevrim sonlarına doğru kablolarda peş peşe kopmalar olmuştur. Buna rağmen referans ile kıyaslandığında elemanın halen iyi durumda olduğu söylenebilir. Son çevrim -57 kN yük ve -105 mm deplasman ile tamamlandığında, 2. Sıradaki etriye kopmuş durumdadır. Kiriş paramparça olmuştur. Resim 5.17 ile gösterilen bu durum sonrası yük ve deplasman değeri sıfırlanarak deney sonlandırılmıştır.

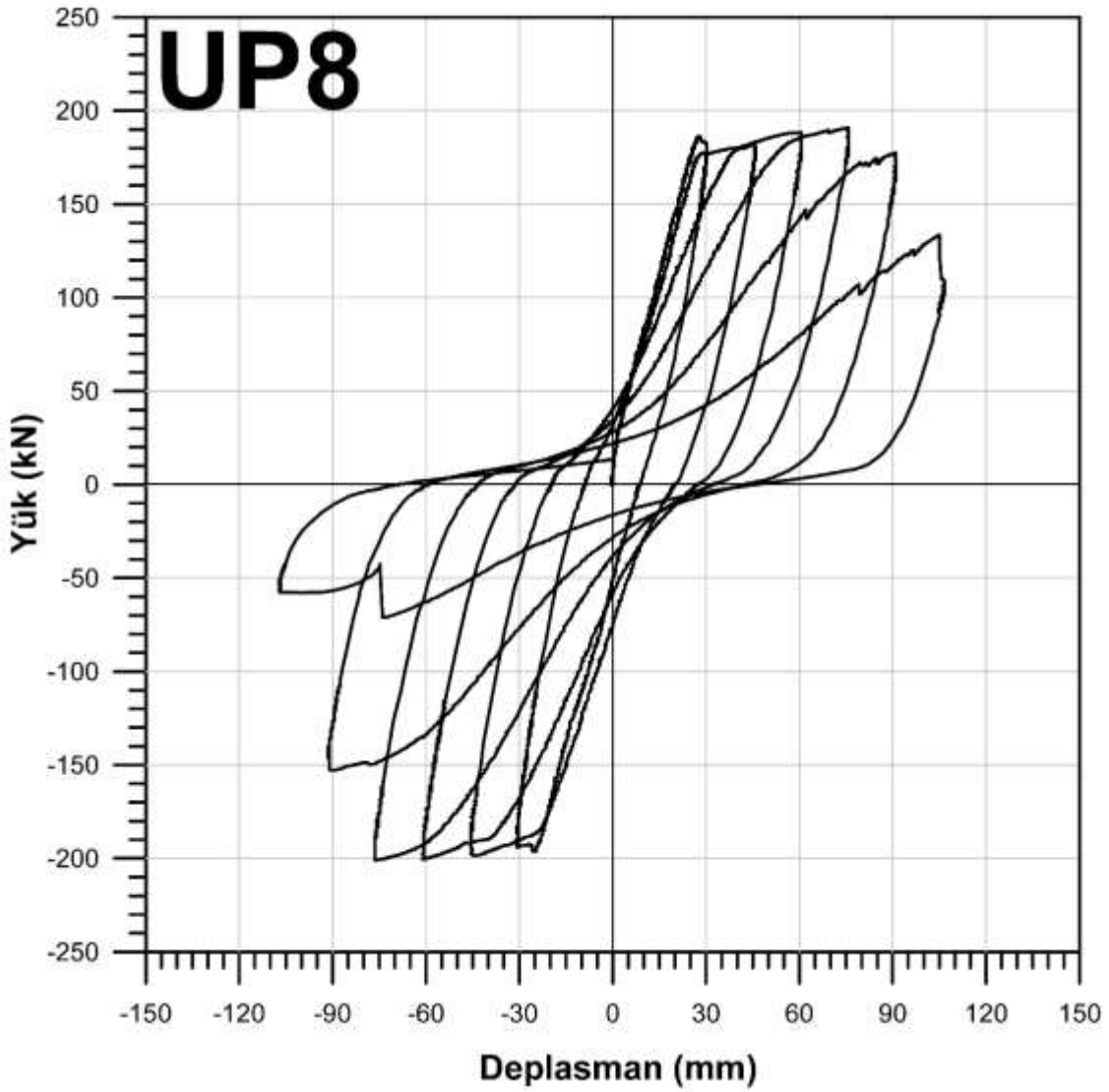


Resim 5.16. UP8 elemanının -152 kN yük ve -90 mm deplasman durumundaki görünüşü



Resim 5.17. UP8 elemanının -57 kN yük ve -105 mm deplasman durumundaki görünüşü

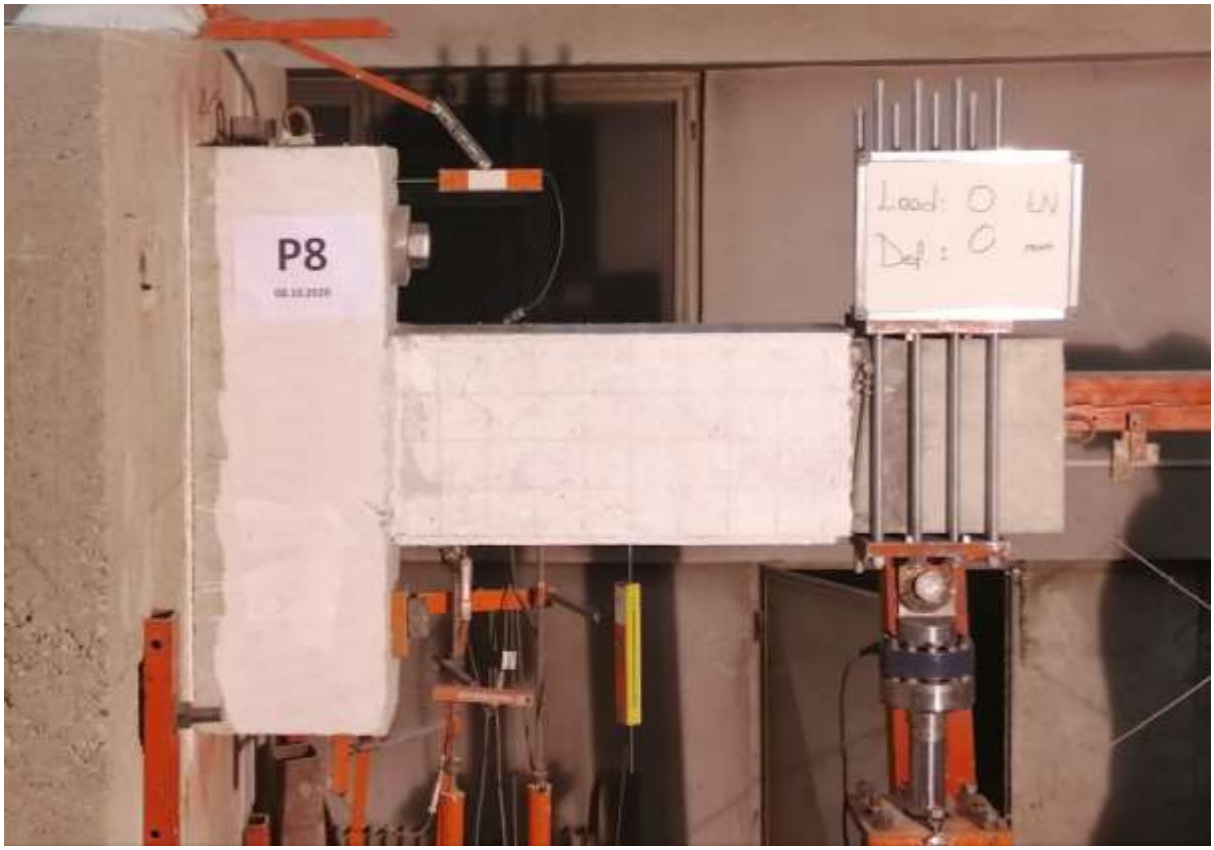
UP8 elemanına ait yük – deplasman grafiği Şekil 5.8 ile gösterilmiştir. Etriyenin koptuğu anda, yükteki ani düşüş grafikte görülebilmektedir.



Şekil 5.8. UP8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.9. P8 Deneyi

UP8 deney elemanına ek olarak sıva işlemi uygulanan P8 elemanının deney öncesi görünümü Resim 5.18 ile verilmiştir.



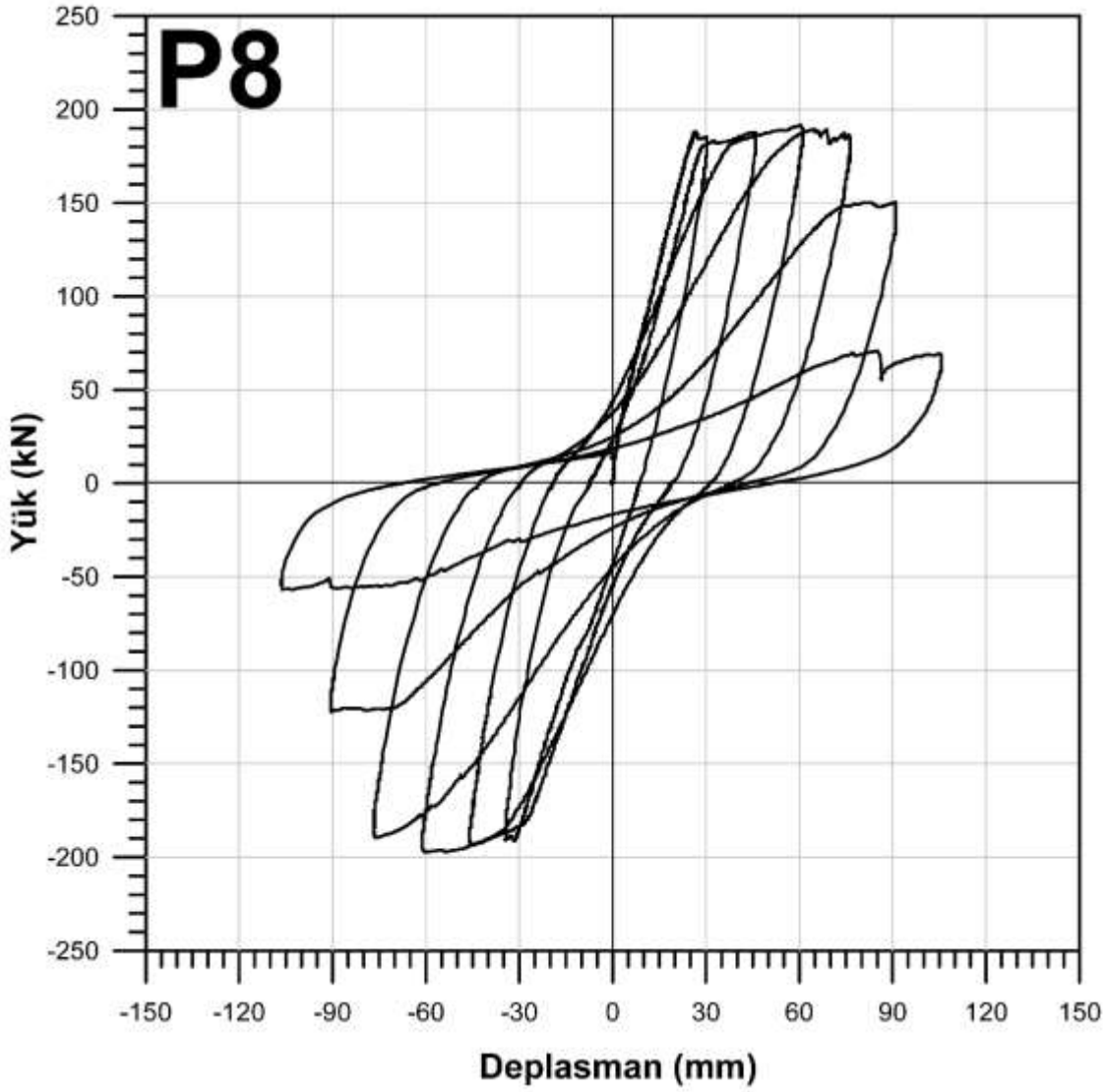
Resim 5.18. P8 deney elemanının deney öncesi görünümü

Deney elemanı ilk çevrimde 184 kN yük değerinde 27 mm deplasman ile akmıştır. Aktıktan sonra 185 kN yük ile 30 mm deplasmana kadar tamamlanmıştır. İlk çevrim geri yüklemede -188kN yük ve -33 deplasman değerinde akmaya ulaşılınca tamamlanmıştır. 187 kN yük ve 45 mm deplasman ile ileri yüklemesi tamamlanan 2. çevrim, -193 kN yük ve -45 mm deplasman ile tamamlanmıştır. Çevrim sonunda bir eğilme çatlağı, bir tane de ana kesme çatlağı mevcuttur. Eğilme çatlağının maksimum genişliği 10 mm civarındadır. Kesme çatlağının genişliği ise 3-4 mm civarında olarak görülmüştür. 191 kN yük ve 60 mm deplasman ile ileri yöndeki yüklemesi yapılan, -197 kN yük ve -60 mm deplasman ile tamamlanan 3 çevrim sonunda ana kesme çatlağı açıklığı yaklaşık 10 mm genişliğe ulaşmıştır. 185 kN yük ve 75 mm deplasman değerinde, 65 mm'de bir kablo kopmuştur. 3. Sıradaki iki kablo da kopmuş, 4. Sıradaki kablolardan biri kopmuş ve 2. sırada da tek bir

kablo koptuğu görülmüştür. Geri yönde -189 kN yük ile -75 mm deplasmana gelindiğinde, 2-3-4. sıradaki kablolar tamamen kopmuş durumdadır. 150 kN yük ve 90 mm deplasman durumunda belirgin kayma deformasyonları gözlemlenmektedir. -120 kN ve -90 mm ile çevrim tamamlanırken, dışarıdaki takviye sıvası tamamen parçalanmış durumdadır. Tüm yüzeylerden sıva ayrılmıştır. Geri yönde de çok belirgin kayma deformasyonları mevcuttur. Son çevrim ileri yüklemesi 68 kN yük ve 105 mm deplasman değeriyle tamamlandığında, eleman büyük ölçüde taşıma gücünü kaybetmiş durumdadır. Ana gövdeden 230 mm uzaklıktaki 2. sıradaki etriyenin kopması neticesinde yükte ileri düzeyde kayıp meydana gelmiştir. -56 kN yük ve -105 mm deplasman ile son çevrim tamamlanmıştır. Yük ve deplasmanın sıfırlanmasıyla deney sona ermiştir. Deney sonrası görünüm Resim 5.19 ile gösterilmiştir. P8 elemanına ait yük – deplasman grafiği Şekil 5.9 ile verilmiştir.



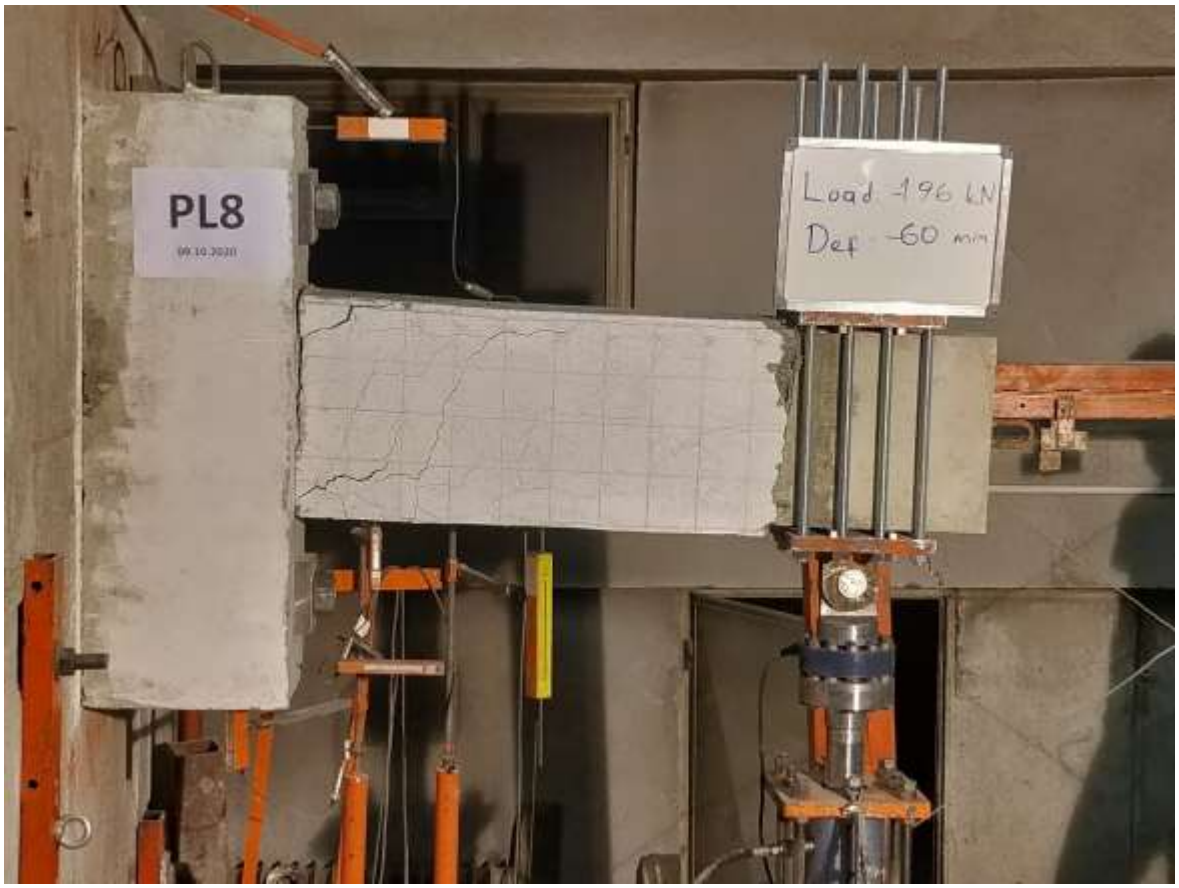
Resim 5.19. P8 deney elemanının deney sonrası görünümü



Şekil 5.9. P8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.10. PL8 Deneyi

P8 deney elemanına ilave olarak, her güçlendirme sırasının ön ve arka yüzünde ikişer adet klemens bulunduran PL8 deney elemanına ait deney, 30 mm deplasman değerine ulaşması için yapılan yüklemede 179 kN yük ve 27 mm aktıktan sonra, deplasman 30 mm'ye tamamlanarak başlamıştır. Geri yönde -185 kN yük ve -27 mm deplasman değerindeki akmanın ardından yine deplasman 30 mm'ye tamamlanmıştır. 2. çevrim 180 kN yük ve 45 mm deplasman, -189 kN yük ve -45 mm deplasman değerleriyle, 3. çevrim 182 kN yük ve 60 mm deplasman, -196 kN yük ve -60 mm deplasman değerleriyle tamamlanmıştır. Mevcut durumda deney elemanında 300 mm'de ana bir kesme çatlağı vardır. Çatlak açısı yatayla yaklaşık 75 derecedir. Sıvadaki çatlak genişliği 4 mm olup, maksimum çatlak genişliği 6-8 mm arasında değişmektedir. Deney elemanında ufak bazı çatlaklar oluşmuştur. Şu ana kadar kayma deformasyonlarında herhangi bir belirti yoktur, genellikle eğilme deformasyonları hakimdir. Eğilme de konsol dibinde gerçekleşmiş durumdadır. Resim 5.20 ile deneyin bu aşamasındaki eleman durumu görülebilir.



Resim 5.20. PL8 deney elemanının -60 mm deplasman durumundaki görünümü

186 kN yük ile 75 mm deplasmana ulaşıldığı durumda, ilk 200 mm'de alt yüzdeki kabuk beton tamamen dökülmüş durumdadır ve orijinal kirişin betonu gözükmektedir. Orijinal betondaki çatlaklar 2-3 mm civarındadır. Plastik mafsal oluşmuştur ve plastik mafsal bölgesi yaklaşık olarak 200 mm'dir. Orijinal kirişteki çatlak sayısı sıva katmanına göre daha çok olduğu için çatlak genişliği ve çatlak açıklığı kabuğa göre daha az olarak görülmüştür. Kablolarda herhangi bir kopma ve performansta herhangi bir düşme yoktur. -196 kN yük ile -75 mm deplasman değerine gidilmiştir. Gövde yüzeyindeki çatlak genişliği 12 mm'dir. Ancak bu kabuktaki genişlik olup, orijinal kirişte daha düşük olduğu düşünülmektedir. Kayma deformasyonlarında hafif de olsa belirginleşme vardır. 142 kN yük ve 90 mm deplasman durumunda ilk 400 mm'deki tüm kablolar kopmuştur. P8 elemanında kabloların 75 mm deplasman çevriminde koptuğu göz önüne alındığında, birinci gruptaki sonuçlardan yola çıkılarak kilit sisteminin başarısızlığından söz edilemeyeceği görülmüştür. PC8 ve PLC8 deneylerinde durum tekrar gözden geçirilecektir. İlk 400 mm'deki tüm sargılar kopmuştur ve kiriş kesmeye karşı savunmasızdır. Güçlendirmenin bu noktadan itibaren etkisi yoktur denilebilir. Kopan kabloların olduğu bölgedeki sıva katmanı temizlendikten sonraki görünüm Resim 5.21 ile gösterilmiştir.



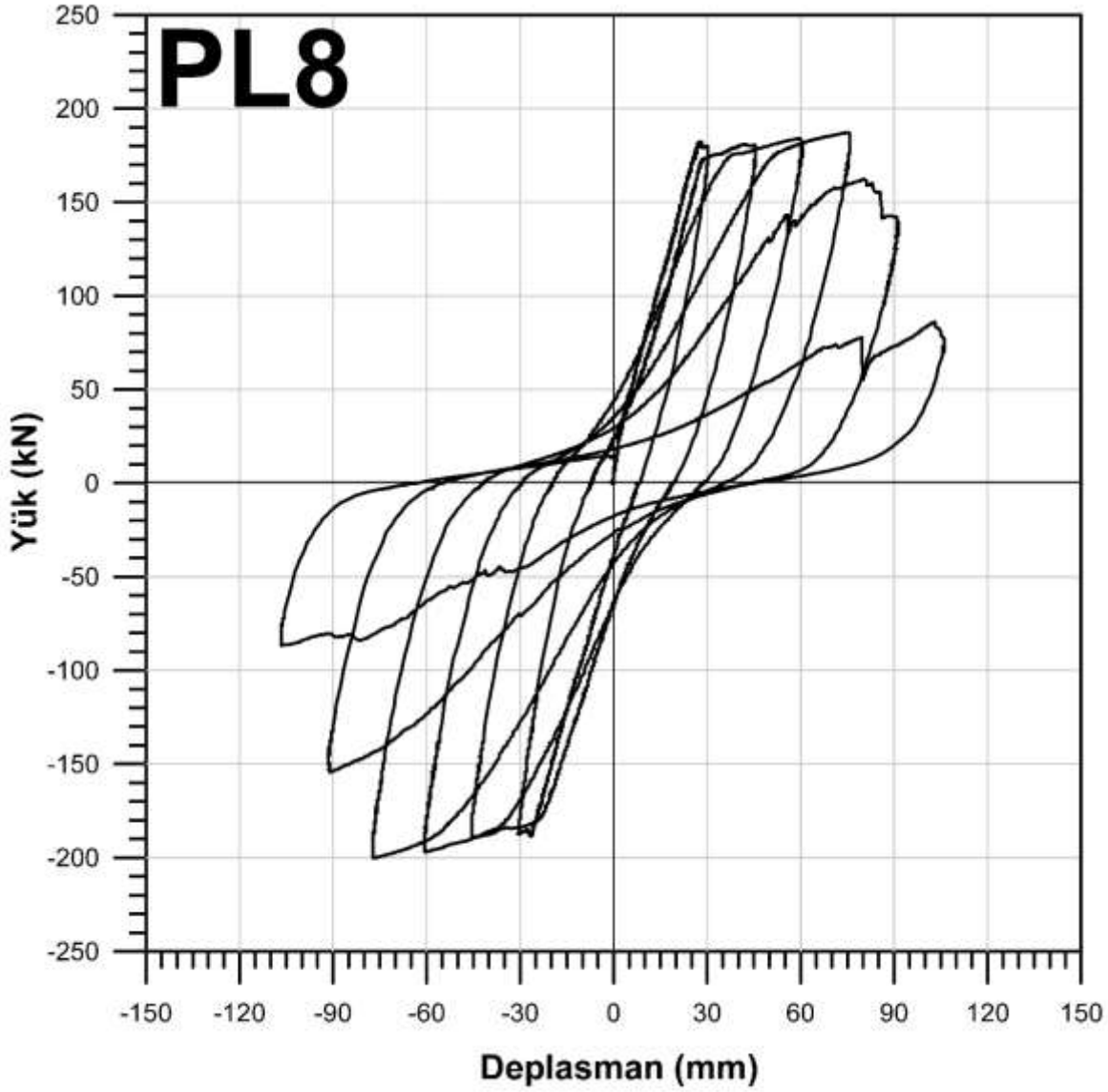
Resim 5.21. PL8 deney elemanının kopan kablolar sonrası görünümü

Geri yönde -154 kN yük ve -90 mm deplasman ile çevrim tamamlanırken, ilk 200 mm'deki beton bölgesi paramparça olmuştur. 78 kN yük ile 105 mm deplasmana gidildiğinde 2. sıradaki etriye kopmuştur. Son çevrim -86 kN yük ve -105 mm deplasman değeriyle tamamlanmıştır. Yük ve deplasman değerlerinin sıfırlanması ile deney bitirilmiştir. PL8 deney elemanına ait deney sonrası görünüm Resim 5.22 ile görülebilir.



Resim 5.22. PL8 deney elemanının deney sonrası görünümü

PL8 deneyi sırasında elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yük – deplasman grafiği Şekil 5.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.10. PL8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.11. PC8 Deneyi

PC8 deneyi sıvalı güçlendirilmiş P8 deney elemanının, deney esnasında bir çift kablosunun yapay olarak kesilmesi ile gerçekleştirilecek olan deneydir. İlk çevrim ileri yönde yüklemesi 182 kN yük ve 30 mm deplasman değerinde elemanın akması ile tamamlanmıştır. Bir adet kesme çatlağı mevcut olup genişliği 0,2 mm civarındadır. Çevrimin geri yüklemesi, 189 kN yük ve -26 mm deplasman ile aktıktan sonra -189 kN yük ile 30 mm deplasmana kadar tamamlanmıştır. 176 kN yük ve 45 mm deplasman durumunda, birleşim yüzeyi ara kesitinde 4-5 mm eğilme çatlağı mevcuttur. -186 kN yük ve -45 mm deplasmana ulaşıldığında üst kabukta açılma meydana gelmiştir. Kesme çatlakları çok düzenli değildir ancak 1-2 mm

arasında değişmektedir. Fakat bu çatlaklar hep kabukta görünenler olup, orijinal kiriştekiler gözlemlenememektedir. 183 kN yük ile 60 mm deplasmana ulaşıldığında konsol dibindeki çatlak genişliği kabukta 15 mm'dir. Ana yani orijinal güçlendirmeye tabi tutulan kirişte ise 3 mm'dir. Kabuk ve kiriş arasında oynama olduğunu anlayabilmek mümkündür. -192 kN yük ile -60 mm deplasmana ulaşıldığında üst yüzde kabuğun gövdeden ayrılması 10 mm iken ana kirişin gövdeden ayrılması 3 mm'dir. 3. çevrim sonunda 200 mm uzaklıkta 2 kablo birden kesilmiştir. Resim 5.23 ile kesilen kablolara ait durum gösterilmiştir.



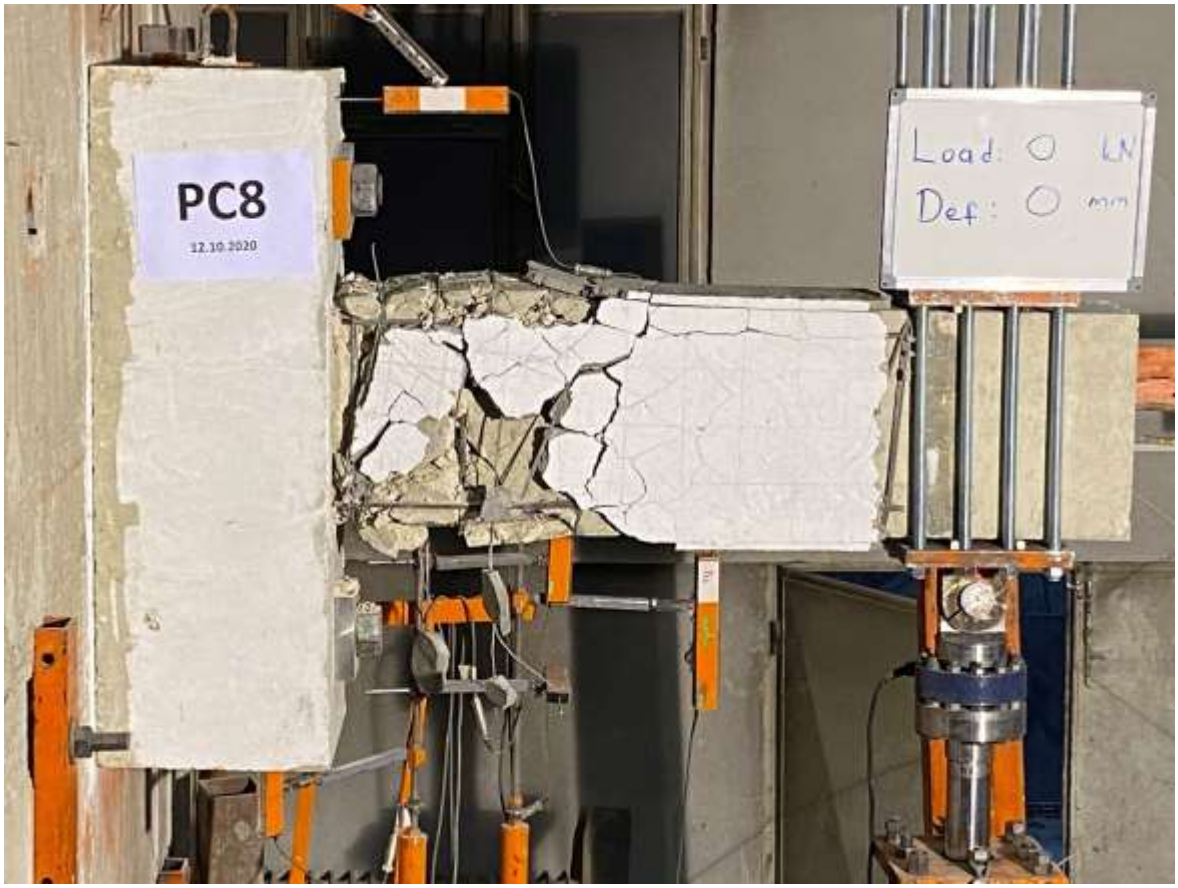
Resim 5.23. PC8 deney elemanındaki yapay koparılan kablolar

Dördüncü çevrim ileri yönde 177 kN yük ve 75 mm deplasman, geri yönde -184 kN yük ve -75 mm deplasman ile tamamlanmıştır. Kayma deformasyonları gözlemlenmektedir. 142 kN yük ile 90 mm deplasmana ulaşıldığında, ilk 400 mm'lik bölgede kabuk ağır hasarlıdır. Ana kirişteki plastik mafsal boyu yaklaşık 200 mm'dir. Çevrim geri yönde -105 kN yük ve -90 mm deplasman ile tamamlanırken, 2. 3. ve 4. Sıradaki kablolar kopmuş durumdadır. Resim 5.24 ile gösterilen bu durumdan itibaren kirişte güçlendirme etkisi kalmamıştır denilebilir.

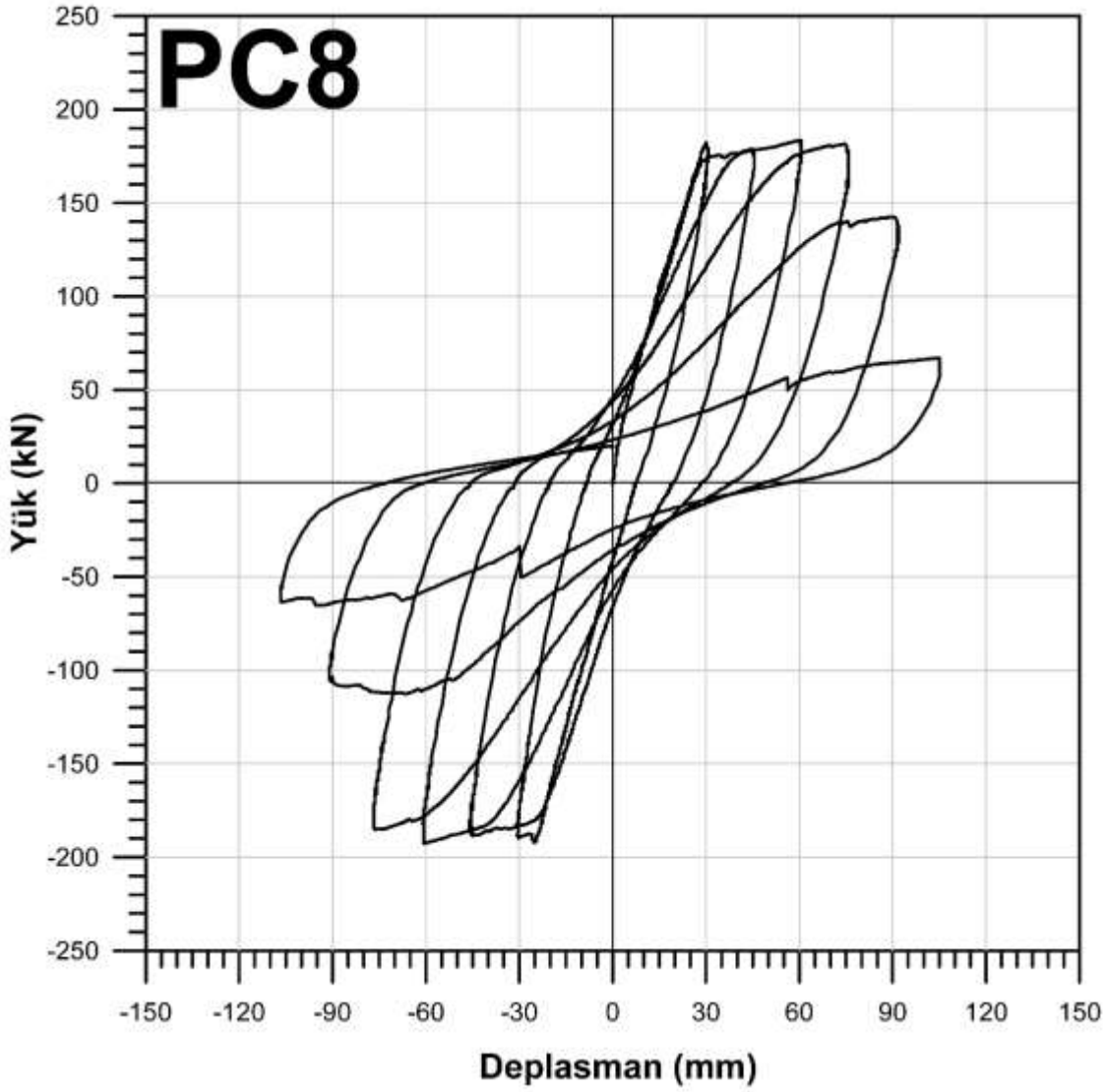


Resim 5.24. PC8 deneyi -90 mm yüklemesinde kopan kablolar sonrası elemanın durumu

Son çevrim ileri yönde yüklemesi 65 kN yük altında 105 mm deplasman durumunda, ilk 400 mm'lik bölgede ana kiriş betonu paramparça görünümdedir. 2. Sıradaki etriye kopmuştur. Geri yönde -63 kN yük ve -105 mm deplasmanla son çevrim tamamlanmıştır. Eleman taşıma gücünü tamamen yitirmiştir. Deney yük ve deplasmanın sıfırlanmasıyla sonlandırılmıştır. Deney sonrası eleman durumu, Resim 5.25 ile gösterilmiş olup, elde edilen verilerle çizilen yük – deplasman grafiği Şekil 5.11 ile verilmiştir.



Resim 5.25. PC8 deney elemanının deney sonrası görünümü



Şekil 5.11. PC8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

5.12. PLC8 Deneyi

Yapılan çalışmanın son deneyi, PC8 elemanına ilave olarak elemanın güçlendirilmesinde kullanılan çelik kablonun geçtiği çift yüzdeki her bir sırada ikişer tane klemens kullanılarak kilitli sistem oluşturulmasıyla yapılan PLC8 deney elemanına ait olan deneydir. Deney akma noktasına ileri yöndeki yüklemesinde 186 kN yük ve 30 mm deplasman ile ulaşmıştır. Kiriş birleşim ara kesitinde eğilme çatlağı açılmaya başlamıştır fakat sadece takviye sıvası üzerinde görülmektedir. Deney elemanı, ilk çevrimin geri yöndeki -186 kN yük ve -26 mm deplasman durumunda aktıktan sonra -188 kN yük ile -30 mm deplasmana kadar tamamlanmıştır. Bu sırada sadece konsol dibinde eğilme çatlağı görülmektedir. İkinci çevrim ile deney elemanı ileri yönde 184 kN yük ve 45 mm deplasman durumundayken, takviye sıvası üzerinde konsol dibindeki eğilme çatlağı yaklaşık 7-8 mm'dir. Bu çevrimle birlikte kesit gövdesinde 200 mm'de kılcal düzeyde bir kesme çatlağı oluşmuştur. Geri yönde ise -185 kN yük ile -45 mm deplasman durumundayken, konsol dibindeki eğilme çatlağı takviye sıvası üzerinden bakıldığında 10 mm'ye ulaşmıştır. Güçlendirilen ana kirişte ise bu çatlak 1-2 mm civarındadır. Dolayısı ile üstteki takviye sıvasında bir miktar sıyrılma başladığı söylenebilir. 190 kN yük ile 60 mm deplasman değerine gidildiğinde, artık takviye sıvasının ana kirişten sıyrılması belirgin düzeydedir. Fakat sıyrılma sadece konsol dibindeki bölgededir. Bunun dışında elemanın yük durumunda herhangi bir olumsuzluk görünmemektedir. Çevrim geri yönde -194 kN yük ve -60 mm deplasman ile tamamlanırken, kesme çatlağı genişliği 4-5 mm'ye ulaşmıştır. Bu çatlağın alt uçta konsol dibine, üst kenarda da yükleme noktasına doğru ilerlemeye devam ettiği görülmektedir. Takviye sıvasının açılması 25 mm'yi bulmuştur. Buna rağmen içeriden ana kirişe bakıldığında ana kirişteki çatlağın sınırlı düzeyde olduğu söylenebilir. Güçlendirme kablosunun yapay olarak kesildiği deneylerde, bu deneye kadar 3. çevrim sonunda 200 mm uzaklıktan kesim yapılmaktayken, bu deneyde kesme çatlağının yani hasarın yoğunlaştığı bölgeden kesim yapılmasına karar verilmiştir. Bu deneyde, yükü sıfırladıktan sonra tam kesme çatlağının yoğunlaştığı bölgeden kabloları yatay olarak kesme yoluna gidilecektir. Kiriş orta ekseninin tam ortasından ve konsol dibinden 270 mm'deki çatlağı kabloda kesme işlemini yapmak için açılmaya başlanmış ve o bölgede kablo olmaması sebebiyle yaklaşık 300 mm'den kesme işlemi yapılmıştır. Resim 5.26 ile kablo kesilmesi planlanan nokta ve Resim 5.27 ile kesilen kabloların yakın görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.26. PLC8 deney elemanında yapay olarak kabloların kesileceği bölge



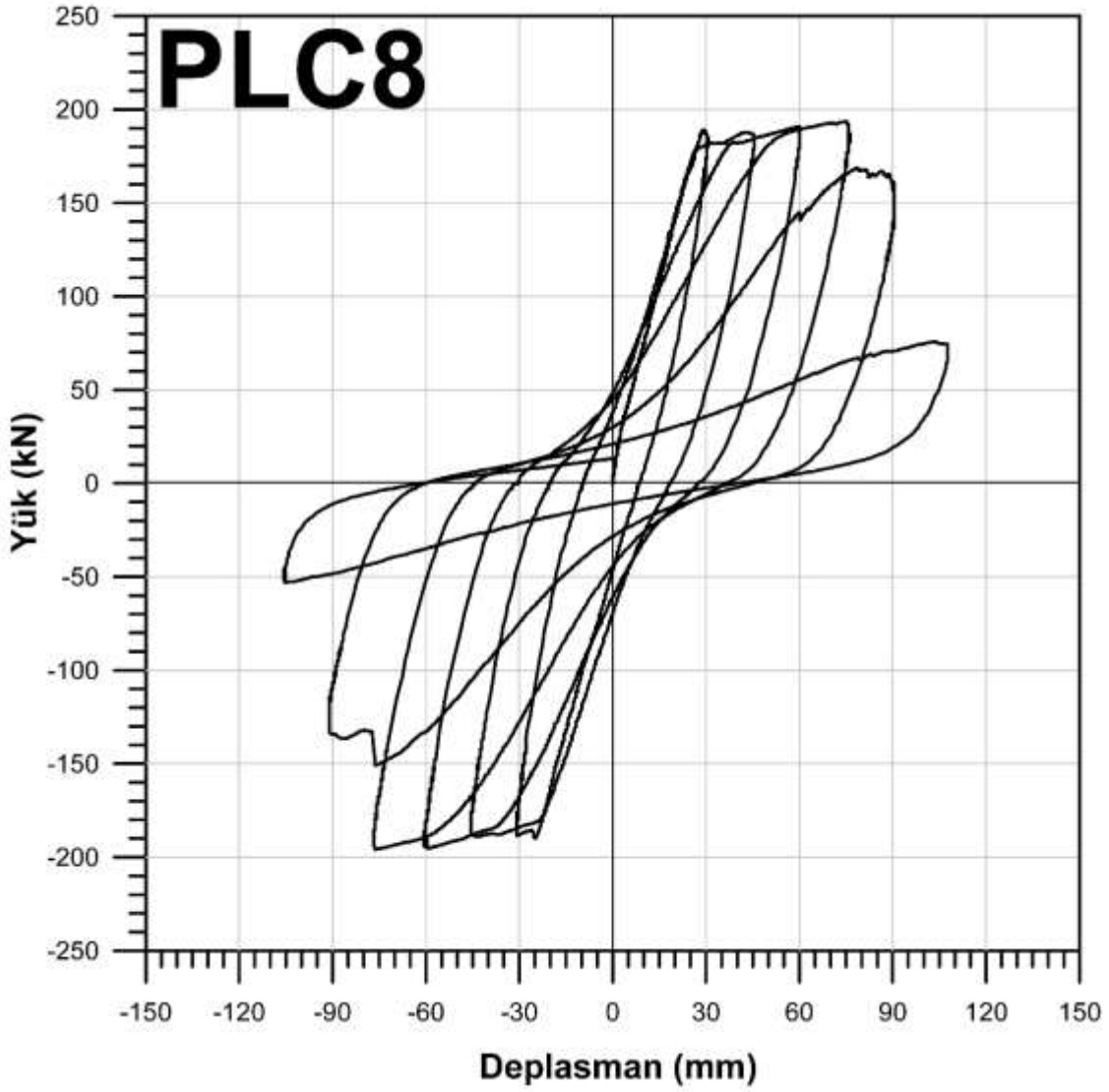
Resim 5.27. PLC8 deney elemanında yapay olarak kabloların yakın görünüşleri

190 kN yük ile ulaşılan 75 mm deplasman durumunda, konsol dibindeki çatlak alt yüzde 25 mm'yi bulmuştur. Kesme çatlağında kablo birbirine göre bir miktar rölatif olarak 10 mm'yi bulan bir hareket etmiş olup buna bağlı olarak kesme çatlağında da bir miktar artış meydana gelmiştir. Bütün bu durumda kestiğimiz kablo dışında herhangi bir kabloda kopma belirtisi ve betonda ezilme belirtisi yoktur. -192 kN yük ve -75 mm deplasmana ulaşıldığında artık kablolar epey zorlanmaktadır. Buna rağmen herhangi bir tellenme veya kabloda zayıflama

görünmemektedir. Ancak kestiğimiz bölgede kablolar birbirine göre oldukça ötelenmiş durumdadır. 158 kN yük ve 90 mm deplasman değerinde, artık yükte önemli bir kayıp oluştu denilebilir. Bunun da sebebi sargılama görevi yapacak kablolardan bazılarının kopmasıdır. 3. ve 4. sıradaki kablolar tamamen kopmuşken, 5. sıradaki kablolardan biri kopmuştur. Daha önce yapay olarak kesme yaptığımız kablo kesilen yer dışında başka bir bölgeden tekrar kopmuştur. Bu durum kablonun tek bir bölgeden kopmakla devre dışı kalmadığı anlamına gelmektedir. Kopmalar daha ziyade dönme noktalarından meydana gelmiş olup, klemensin olduğu bölgede kopma yoktur. Burada önemli olan konu, aynı kablonun birçok yerden kopma yapmasıdır. Tüm deneylerde geçerli olan durum, etriyeler her zaman kablolardan sonra kopmuştur. Kablonun dayanımı daha yüksek olmasına rağmen sünek olmaması sebebiyle bu durumun meydana geldiği söylenebilir. 131 kN -90 mm' de 2. sıradaki etriyenin kopması nedeniyle yükte düşüş meydana gelmiştir. Ana kirişte beton paramparça olduğu için şu aşamada taşıma gücünü bitirecek hasarlar görülmektedir. Son çevrim ileri yönde 74 kN yük ve 105 mm deplasman, geri yönde -51 kN yük ve -105 mm deplasman ile tamamlanmıştır. Ardından yük ve deplasmanın sıfırlanmasıyla, araştırmada gerçekleştirilen deneylerin sonuna gelinmiştir. PLC8 deney elemanının yük – deplasman grafiği Şekil 5.12 ile, deney sonu görünümü ise Resim 5.28 ile gösterilmiştir.



Resim 5.28. PLC8 elemanının deney sonu görünümü



Şekil 5.12. PLC8 deney elemanı yük - deplasman ilişkisi

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Genel

Daha önce deney elemanlarının detaylı özellikleri hakkında bilgi verilmiş olup, bu bölümde deney elemanlarındaki, kilit sistemi var – yok, sıva var – yok, kablo kesimi yapılmış – yapılmamış durumlarına göre kıyas yapılacaktır. Bütün bu parametreler dışında beton katkısının kesmeye olan katkısının ihmal edilip – edilmediği durumun belirleyici olarak kabul edildiği sargılar arası mesafenin 50 mm ve 90 mm olduğu durumlardaki sonuçları da gözden geçirilecektir. Öncelikle elemanlara ait deneylerde sırasıyla verilen yük – deplasman grafiklerinin analizi üzerinden taşıma gücü ve zarf eğrileri göz önünde bulundurularak elemanlar arasında bahsedilen parametreler doğrultusunda kıyaslama yapılacaktır.

6.2. Taşıma Gücü Hesabı Üzerinden Yapılan Karşılaştırmalar

Deney elemanlarının bulundukları gruba ait referans numune ile karşılaştırmaları tablolar yardımıyla sırasıyla gösterilmiştir. Deneyde 1. grup elemanlarına ait yapılan yüklemeler sonucunda elde edilen bilgiler, deney verilerinin kaydedildiği ve zarf eğrilerinin çiziminde kullanılan dosyadaki maksimum dayanımların tespit edilmesiyle Çizelge 6.1 ’de gösterilmiştir. Yine aynı işlem deney 2. grubu için de yapılmış ve sonuçları Çizelge 6.2 ile verilmiştir. Zarf eğrileri üzerinden de bu noktaların yeri kontrol edilebilir.

Çizelge 6.1. Deney 1. grup elemanlarının dayanım değerleri

Deney Elemanı Adı	Maksimum Dayanım (kN) P_u		Ortalama Dayanım (kN)	Göreceli Dayanım
	İleri Yön (+)	Geri Yön (-)	P_{uort}	R0'a göre
R0	+193	-202	198	1,00
UP0	+189	-203	196	0,99
P0	+190	-206	198	1,00
PL0	+192	-202	197	0,99
PC0	+189	-203	196	0,99
PLC0	+194	-200	197	0,99

Çizelge 6.2. Deney 2. grup elemanlarının dayanım değerleri

Deney Elemanı Adı	Maksimum Dayanım (kN) P_u		Ortalama Dayanım (kN) P_{uort}	Göreceli Dayanım R8'e göre
	İleri Yön (+)	Geri Yön (-)		
R8	+184	-200	192	1,00
UP8	+191	-201	196	1,02
P8	+191	-197	194	1,01
PL8	+187	-200	194	1,01
PC8	+183	-193	188	0,98
PLC8	+194	-196	195	1,02

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 ile gösterilen tablolar incelendiğinde, her bir deney grubunun referans elemanının eğilme dayanımına tüm deneylerde oldukça yakın olarak ulaşıldığı söylenebilir. İlk deney grubunda, %99 ile %100 arasında bir göreceli dayanım görülürken, ikinci deney gurubunda bu oran %98 ile %102 arasındadır. Buradan, elemanların tamamında hedeflenen referans eleman dayanımına ulaşıldığını söylemek mümkündür. Öte yandan, deneyde farklı parametrelere yönelik olarak farklı varyasyonlar ile üretilmiş numunelerin, neredeyse aynı bir performans göstermiş olması oldukça şaşırtıcıdır. Takviye sıvası, taşıma gücü yönünden incelendiğinde beklenen etkiyi göstermemiştir. Ancak yine de kopan kabloların takviye sıvası içerinde farklı noktalardan kopmaya devam etmesi, sıva içerisinde kablo sürekliliğinin sağlandığı anlamına gelebilir. Kilit sistemi de deney başlıklarında yüzeysel olarak incelenmiş ve sanki olumsuz bir sonuç gibi görünmesine rağmen, rakamlar kilit sistemi için de olumlu veya olumsuz net bir bilgi vermemektedir.

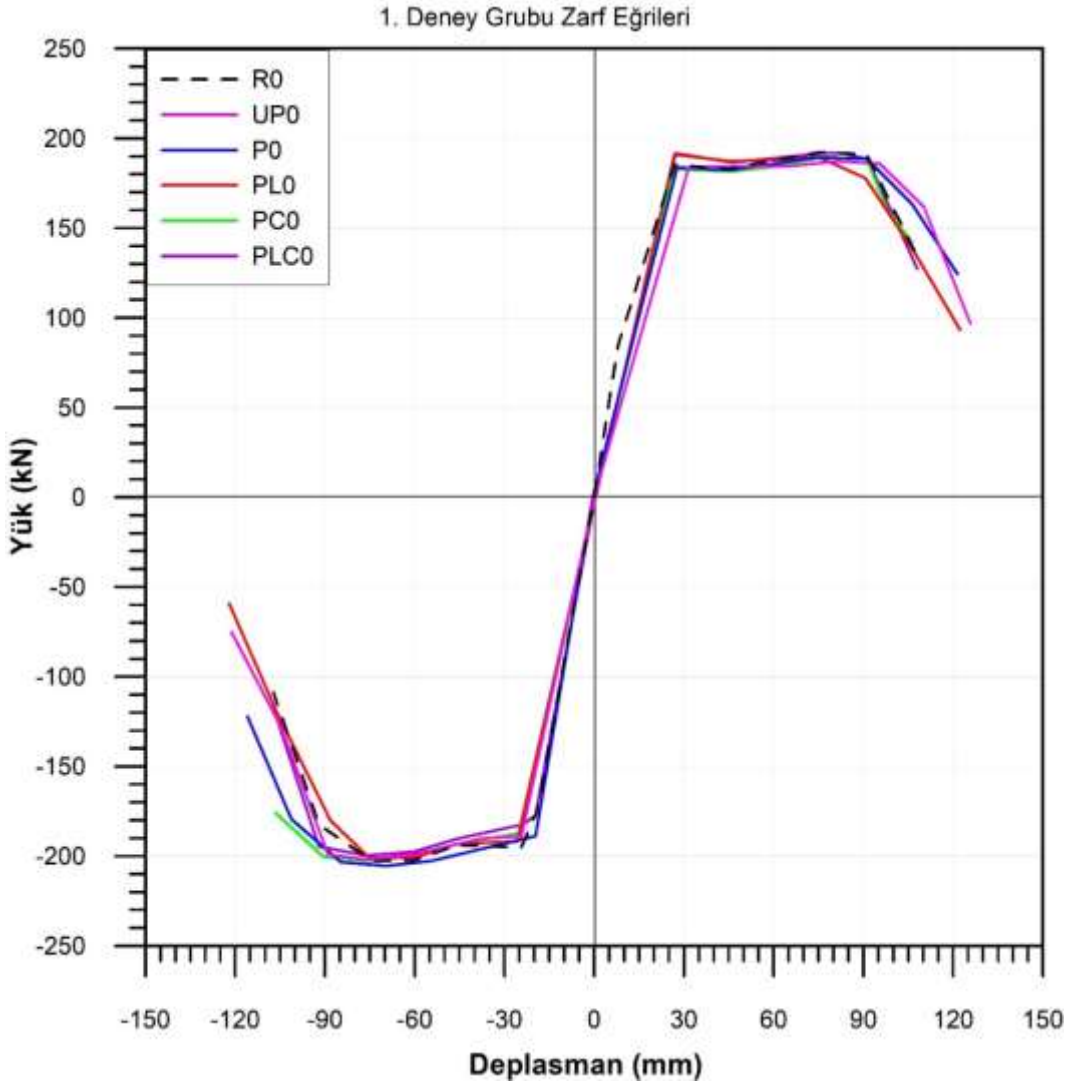
6.3. Zarf Eğrileri

Deney elemanlarının yük-deplasman grafiklerinde tepe noktaları birleştirilerek zarf eğrileri oluşturulmuştur. Beton katkısının hesaba dahil edilmediği ve 50 mm aralıklarla sargılama işlemi yapılan 1. gruba ait zarf eğrileri ve beton katkısının hesaba dahil edildiği 90 mm aralıklarla sargılama işlemi yapılarak güçlendirilen 2. grup numunelerinin zarf eğrileri kendi

gruplarına ait referans elemanlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalara ait zarf eğrileri Şekil 6.1 ile başlayıp Şekil 6.12 ile bitecek şekilde sırasıyla gösterilmiştir.

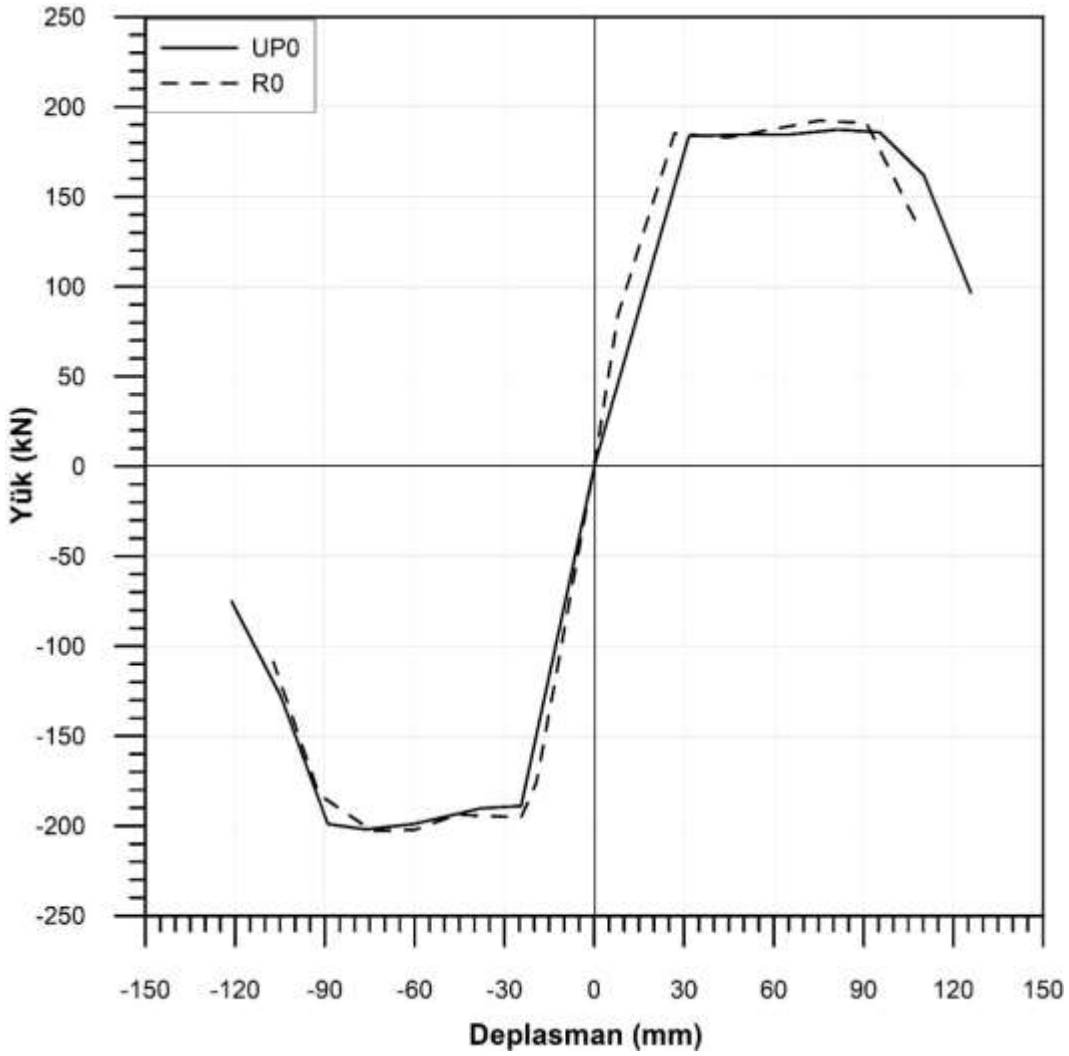
6.3.1. Zarf eğrilerinde 1. grup numunelerin karşılaştırmaları

Beton katkısının hesaba dahil edilmediği ve 50 mm aralıklarla sargılama işlemi yapılan bu grupta, biri referans olmak üzere toplam 6 deney elemanı test edilmiştir. R0 referans elemanının etriye aralığı 70 mm iken, güçlendirme uygulanan elemanlarda etriye aralığı 200 mm'dir. Deney grubundaki tüm elemanların eğilme donatıları aynı olup, çekme ve basınç için 4Ø20 olarak tasarlanmıştır. Şekil 6.1 ile deney grubunun zarf eğrileri gösterilmiştir.



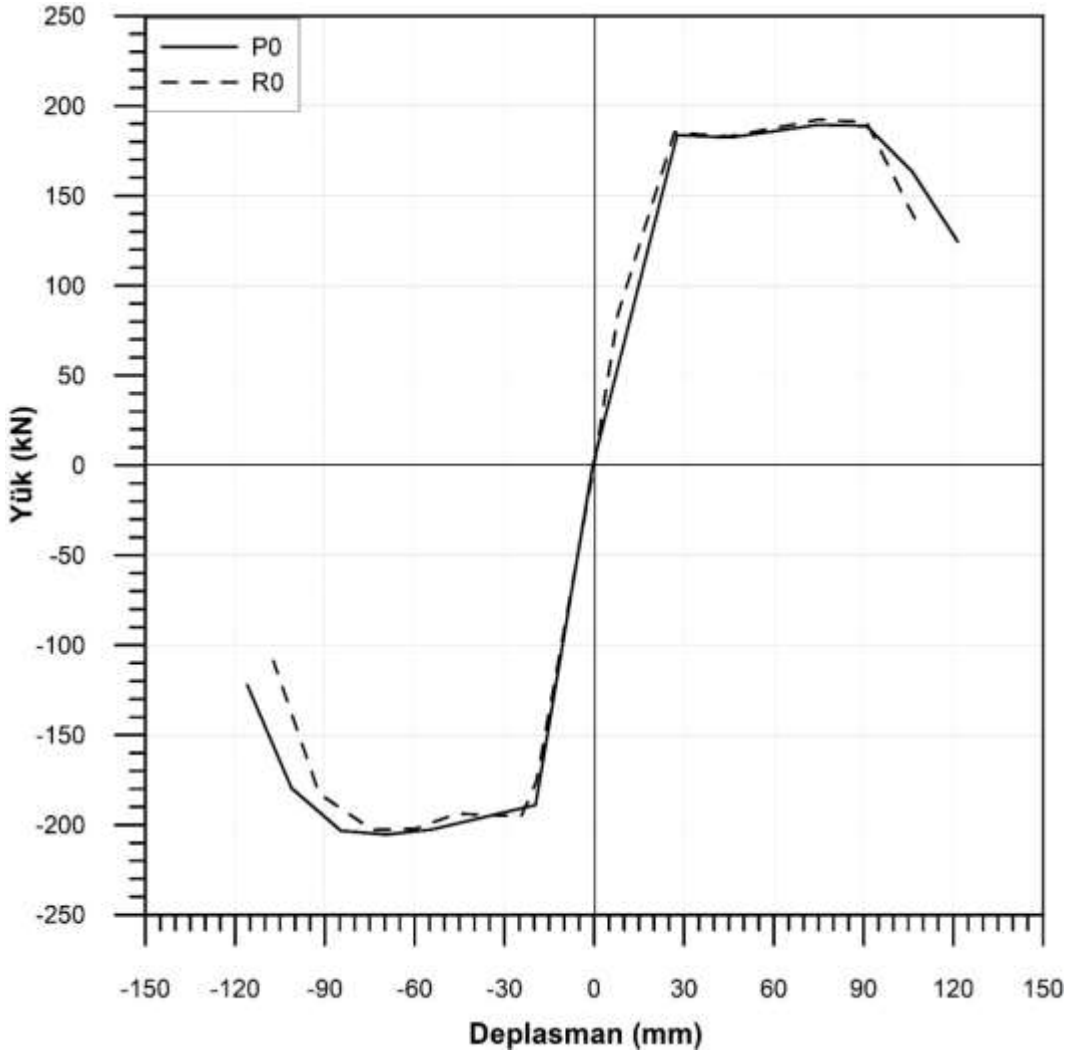
Şekil 6.1. R0-UP0-P0-PL0-PC0-PLC0 elemanlarına ait zarf eğrileri karşılaştırması

Toplu verilen bu zarf eğrisi incelendiğinde, güçlendirme yapılan deney elemanları ile referans eleman arasındaki benzerlik göze çarpmaktadır. Şekil 6.2 ile ise, UP0 elemanı ile referans eleman arasındaki karşılaştırma yapılmıştır.



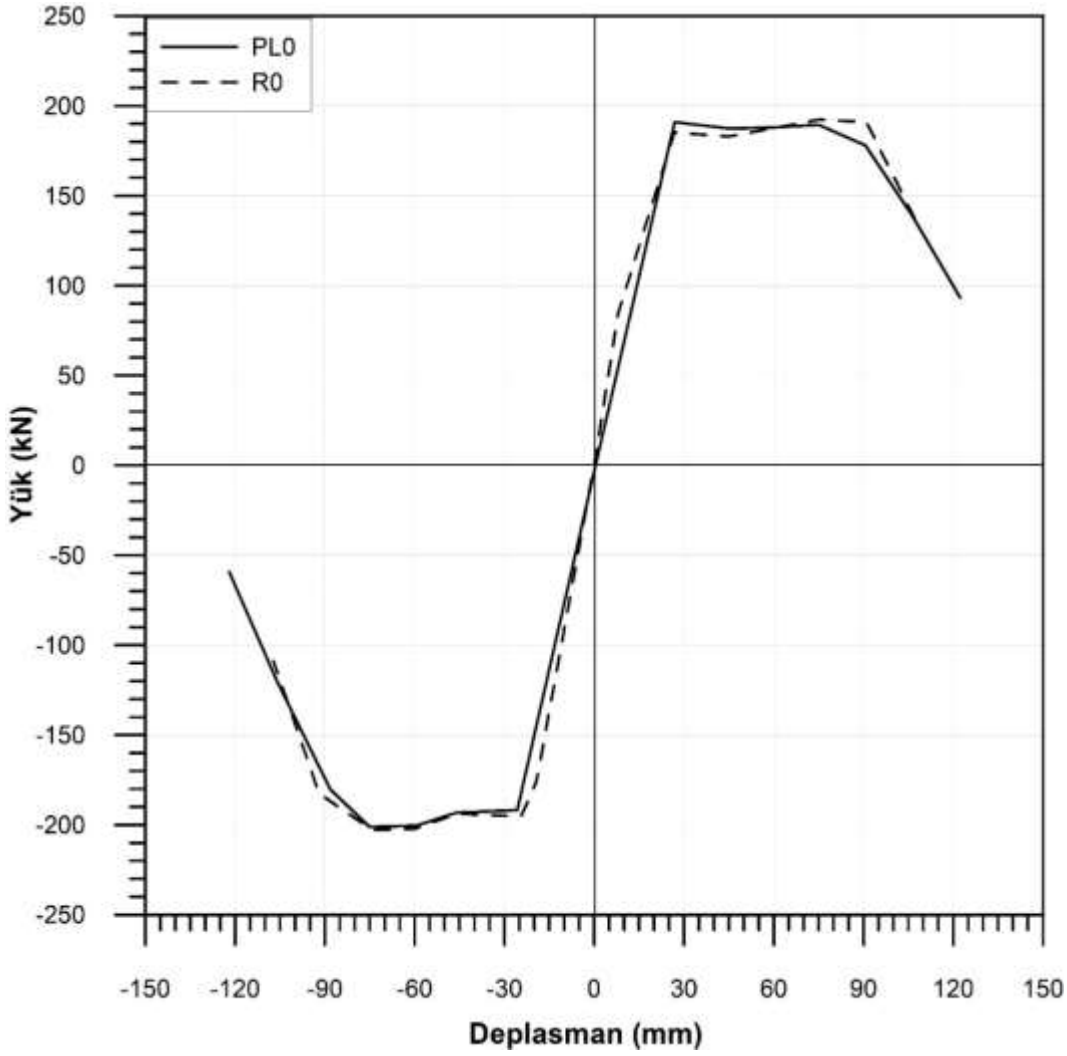
Şekil 6.2. R0 – UP0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

R0 elemanı ilgili grubun referans elemanı iken UP0 elemanı, güçlendirilmiş fakat takviye sıvası uygulanmamış eleman olarak deneysel süreç kısmında detaylıca tarif edilmiştir. Şekil 6.2 ile verilen zarf eğrisine bakarak, uygulanan güçlendirmenin oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülebilir. Hem referans elemanın karşıladığı yük değerine ulaşılmış, hem de oldukça sünek bir davranış elde edilmiştir. Güçlendirme işleminin süneklikle paralelliği, deneysel süreçte hedeflenen oldukça olumlu bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Yüklemeler esnasında güçlendirilmiş elemanın, referans eleman dayanımını aştığı durumlar görülmektedir.



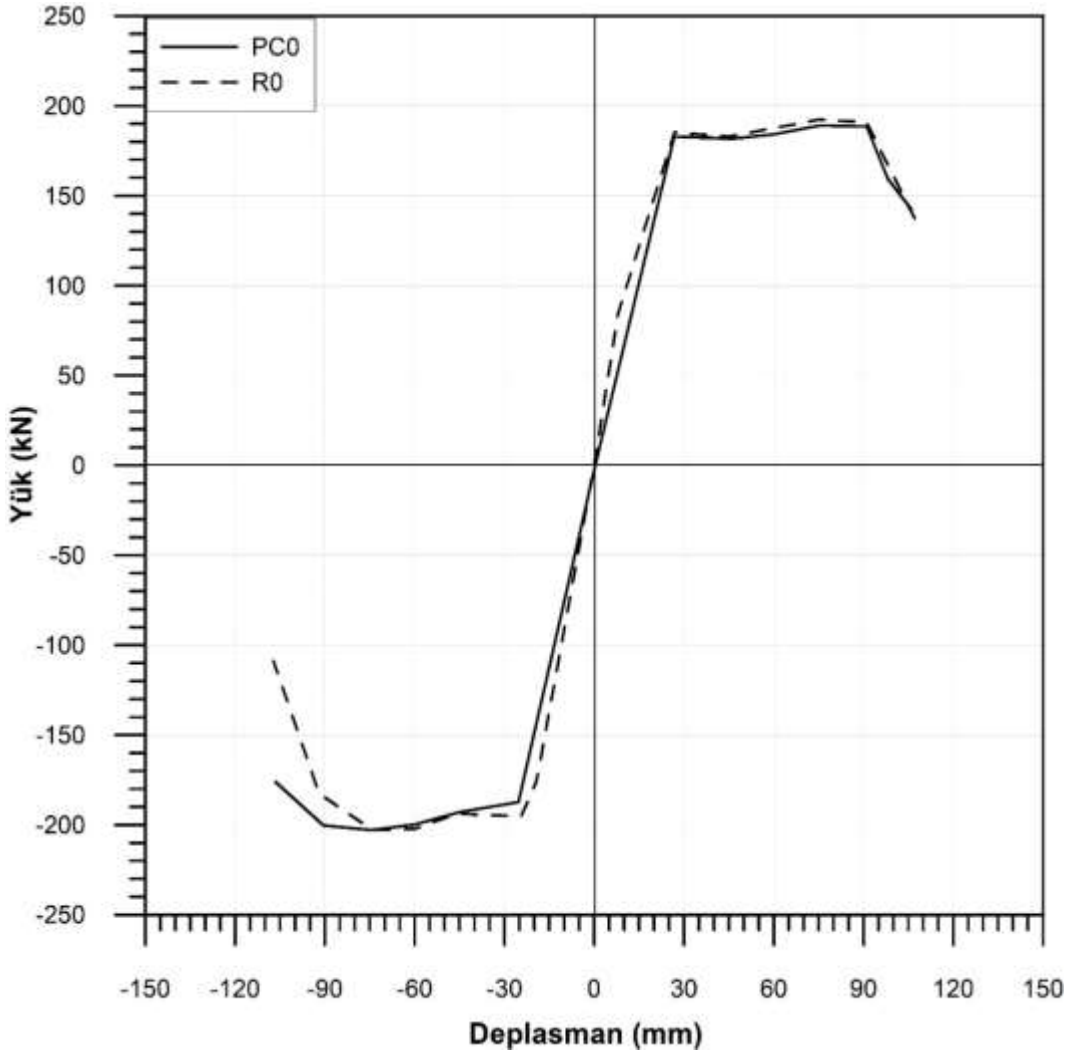
Şekil 6.3. R0 – P0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R0 ile sıvalı güçlendirilmiş eleman P0 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.3 ile gösterilmiştir. Güçlendirilmiş P0 elemanı, referans elemana oldukça benzer davranışlar göstermiş olup güçlendirmenin eksik etriyeleri karşılayacak şekilde çalıştığını söylemek mümkündür. UP0 elemanına göre, takviye sıvasının güçlendirmeye biraz daha katkı yaptığını söylemek zarf eğrilerine bakılarak söylenilebilir.



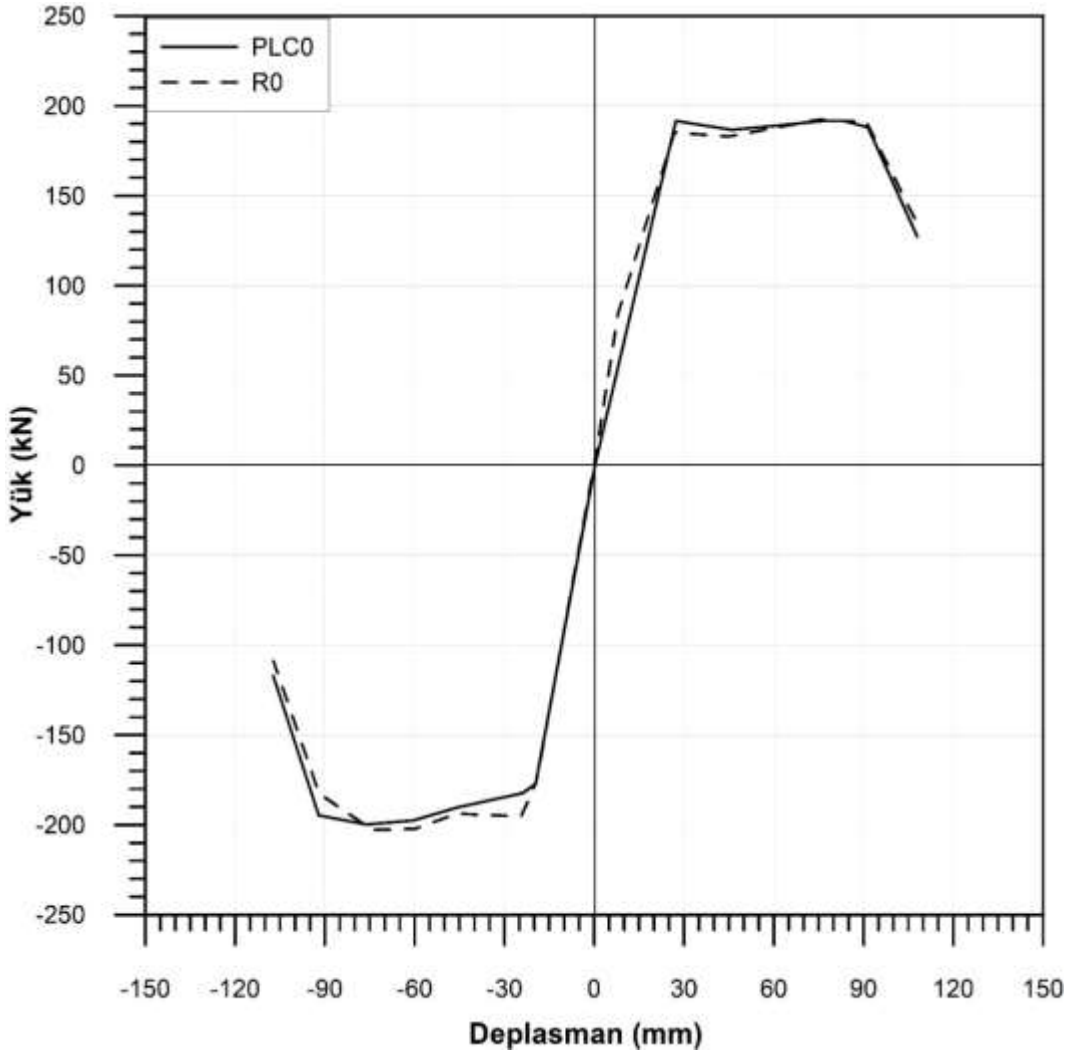
Şekil 6.4. R0 – PL0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R0 ile sıvalı güçlendirilmiş ve kilit sistemi eklenmiş olan eleman PL0 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.4 ile gösterilmiştir. Takviye sıvası ve kilit sistemi ile güçlendirilmiş PL0 elemanı, referans eleman ile çok yakın davranışlar göstermiş olup, güçlendirmenin amacına ulaştığı söylenebilir. P0 elemanına göre karşılaştırma yapıldığında, zarf eğrilerine bakılarak kilit sisteminin güçlendirmeye olumlu katkı yaptığı söylenemez. Zaten deneylerin anlatımında da bu durum detaylıca tarif edilmiş olup işçiliği ve maliyeti arttıran kilit sisteminin en azından bu deneylerde olumlu sonuç vermediği görülmüştür.



Şekil 6.5. R0 – PC0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R0 ile sıvalı güçlendirilmiş ve deney esnasında bir kablosu yapay olarak kesilecek olan eleman PC0 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.5 ile gösterilmiştir. Takviye sıvası ile güçlendirilmiş PC0 elemanı, -60 mm deplasman değerinden sonra yük sıfırlandıktan sonra çift sıra kablosu yapay olarak koparılarak test edilmiştir. P0 elemanına göre karşılaştırma yapıldığında, zarf eğrilerine bakılarak kablo yapay koparılsa dahi, elemanın kopmayan kabloları güçlendirmeye katkı sağlamaya devam etmiştir. Deney elemanı referans eleman ile karşılaştırıldığında da, güçlendirmenin olumlu sonuçları görülebilir.

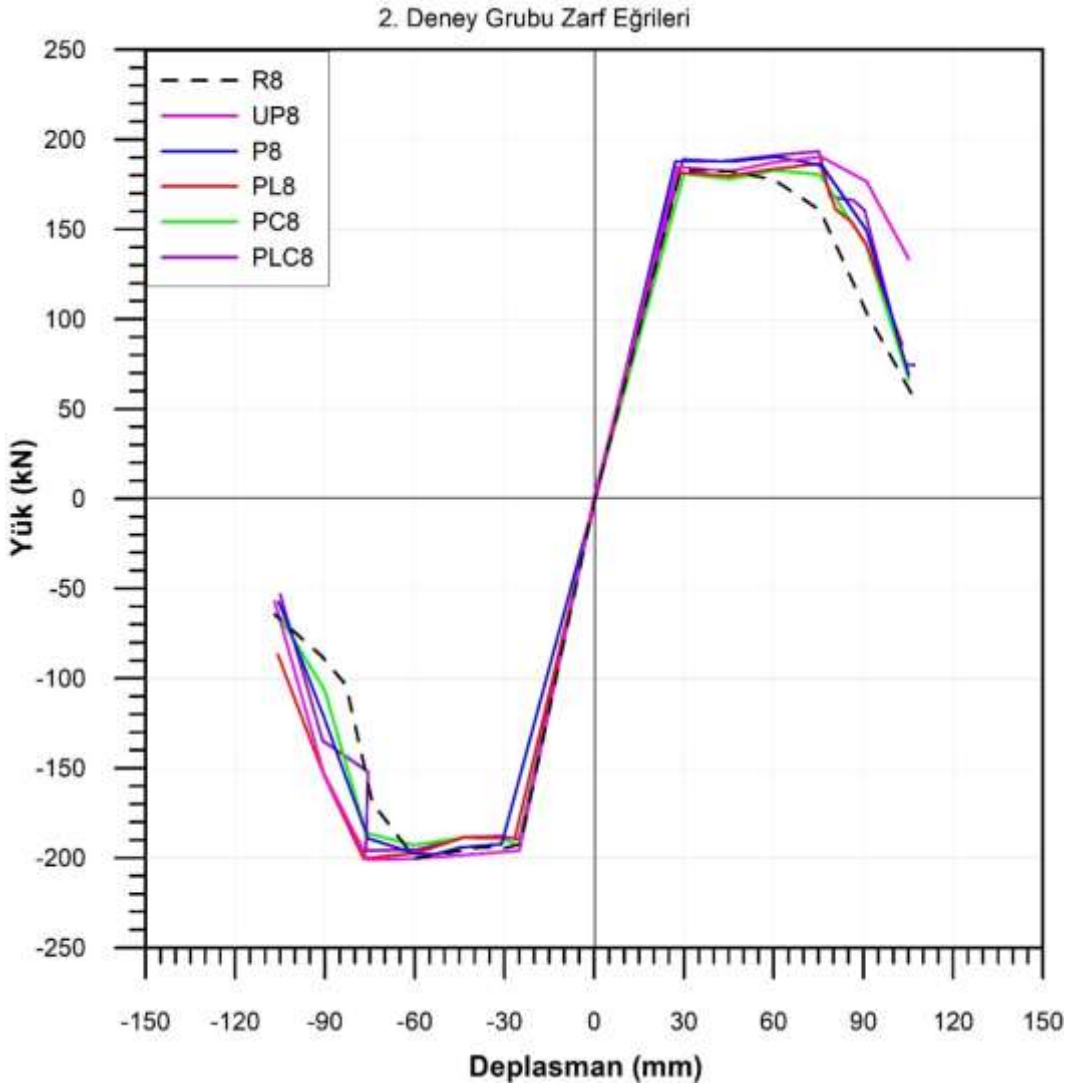


Şekil 6.6. R0 – PLC0 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

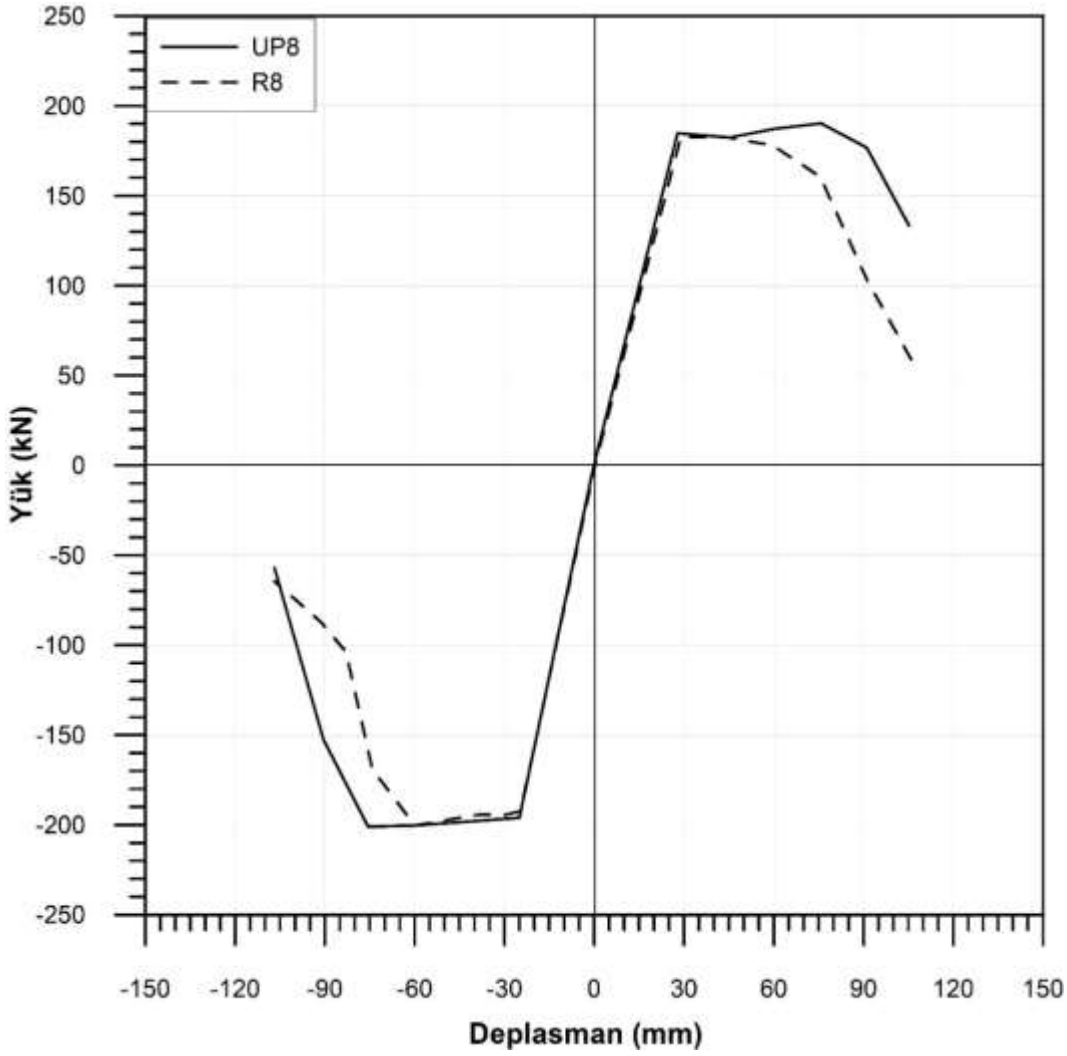
Referans eleman R0 ile sıvalı güçlendirilmiş, kilit sistemi uygulanmış ve deney esnasında bir kablosu yapay olarak kesilecek olan eleman PLC0 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.6 ile gösterilmiştir. Takviye sıvası ve kilit sistemi uygulanarak güçlendirilmiş PLC0 elemanı, -60 mm deplasman değerinden sonra yük sıfırlandıktan sonra çift sıra kablosu yapay olarak koparılarak test edilmiştir. PC0 elemanına göre karşılaştırma yapıldığında, kilit sisteminin son çevrim geri yöndeki harekete olumsuz etkisi görülebilir. İşçiliği ve maliyeti artıran kilitli sistem, kablonun yapay koparıldığı durumda da pozitif bir katkı sağlayamamıştır. Buna rağmen, PLC0 elemanı referans eleman ile oldukça paralel davranış sergilemiş olup, istenilen güçlendirme sağlanmıştır.

6.3.2. Zarf eğrilerinde 2. grup numunelerin karşılaştırmaları

Beton katkısının hesaba dahil edildiği ve 90 mm aralıklarla sargılama işlemi yapılan bu grupta, biri referans olmak üzere toplam 6 deney elemanı test edilmiştir. R8 referans elemanının etriye aralığı 100 mm iken, güçlendirme uygulanan elemanlarda etriye aralığı 200 mm'dir. Deney grubundaki tüm elemanların eğilme donatıları aynı olup, çekme ve basınç için 4Ø20 olarak tasarlanmıştır. Şekil 6.1 ile deney grubunun zarf eğrileri gösterilmiştir.

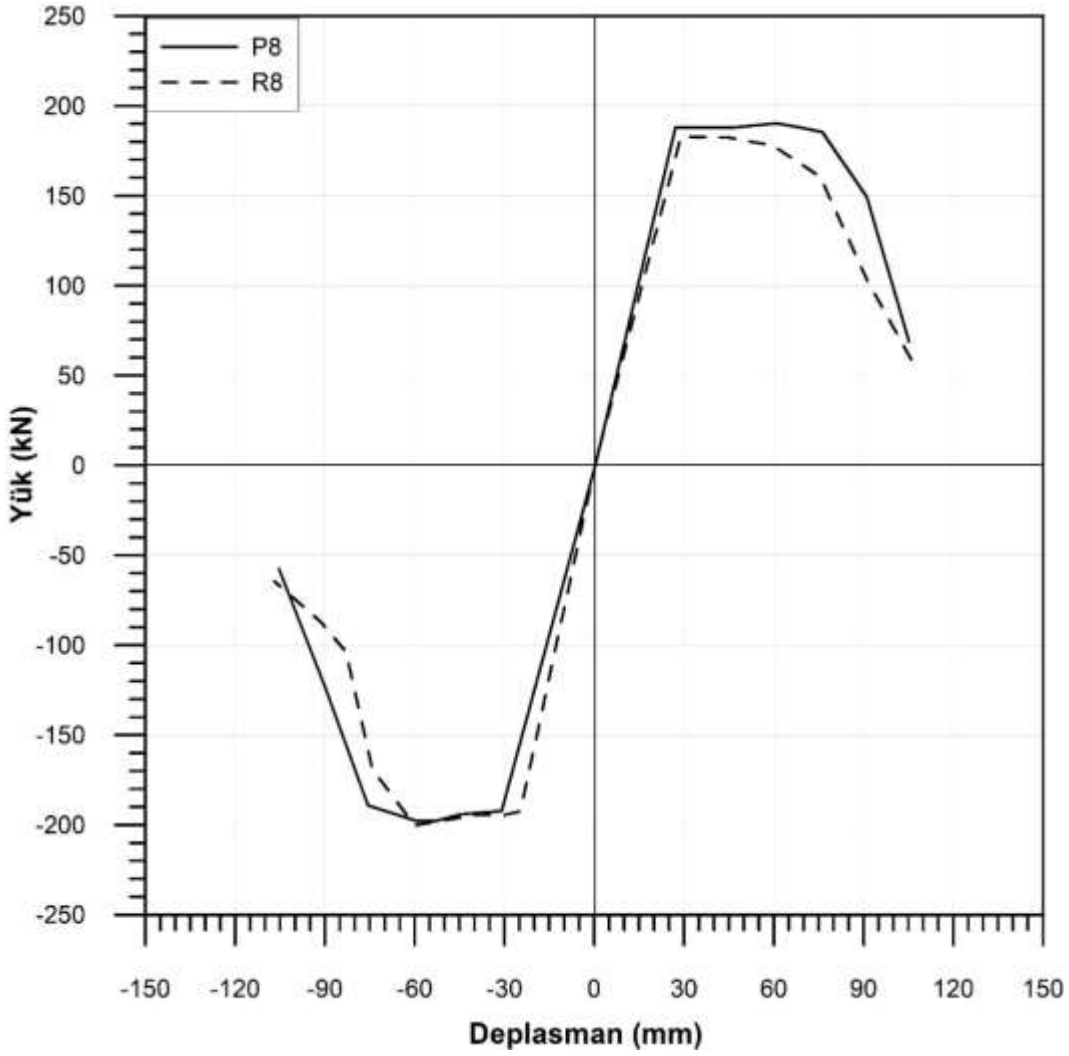


Şekil 6.7. R8-UP8-P8-PL8-PC8-PLC8 elemanlarına ait zarf eğrileri karşılaştırması



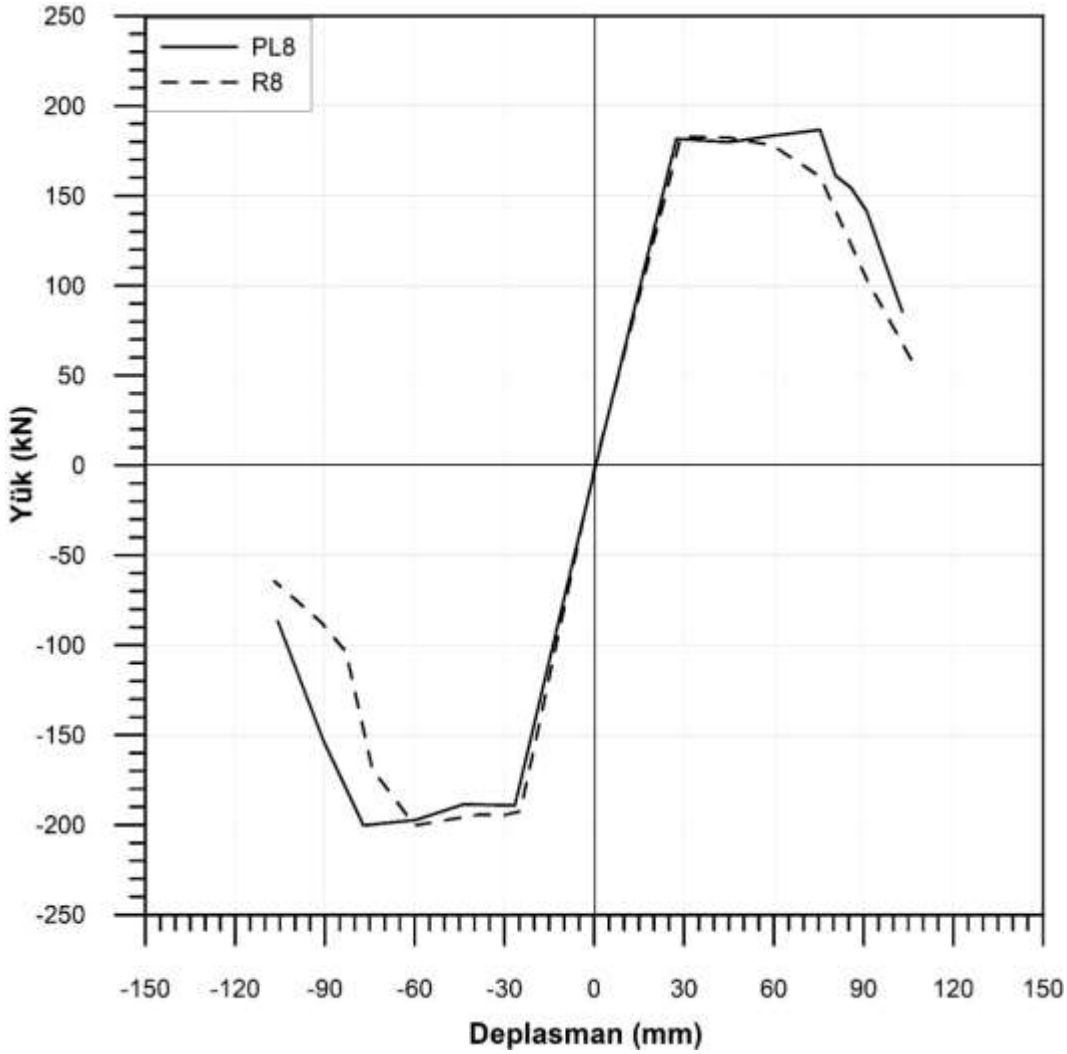
Şekil 6.8. R8 – UP8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

R8 elemanı ilgili grubun referans elemanı iken UP8 elemanı, güçlendirilmiş fakat takviye sıvası uygulanmamış eleman olarak deneysel süreç kısmında detaylıca tarif edilmiştir. Şekil 6.8 ile verilen zarf eğrisine bakarak, uygulanan güçlendirmenin oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülebilir. Referans eleman 60 mm deplasman değerlerine erişilen 2. çevrim sonrası yük kayıpları yaşamaya başlarken güçlendirilmiş UP8 elemanı referans elemanın üzerinde bir davranış göstermiştir. Aynı zamanda 1. grup güçlendirilmiş UP0 elemanıyla da ilk 4 çevrim göz önüne alındığında oldukça yakın bir durum söz konusudur. Ancak deney elemanlarının detaylı incelendiği yer olan 5. Bölümde detaylı tarif edildiği üzere, geri yönde 90 mm deplasman değerine erişildiği yüklemede yükte kayıp başlamış ve 105 mm deplasman yüklemesinde etriye kopmuş olup, referans eleman R8'de de görülen etriye kopması durumu 1. deney grubunda görülmemiştir.



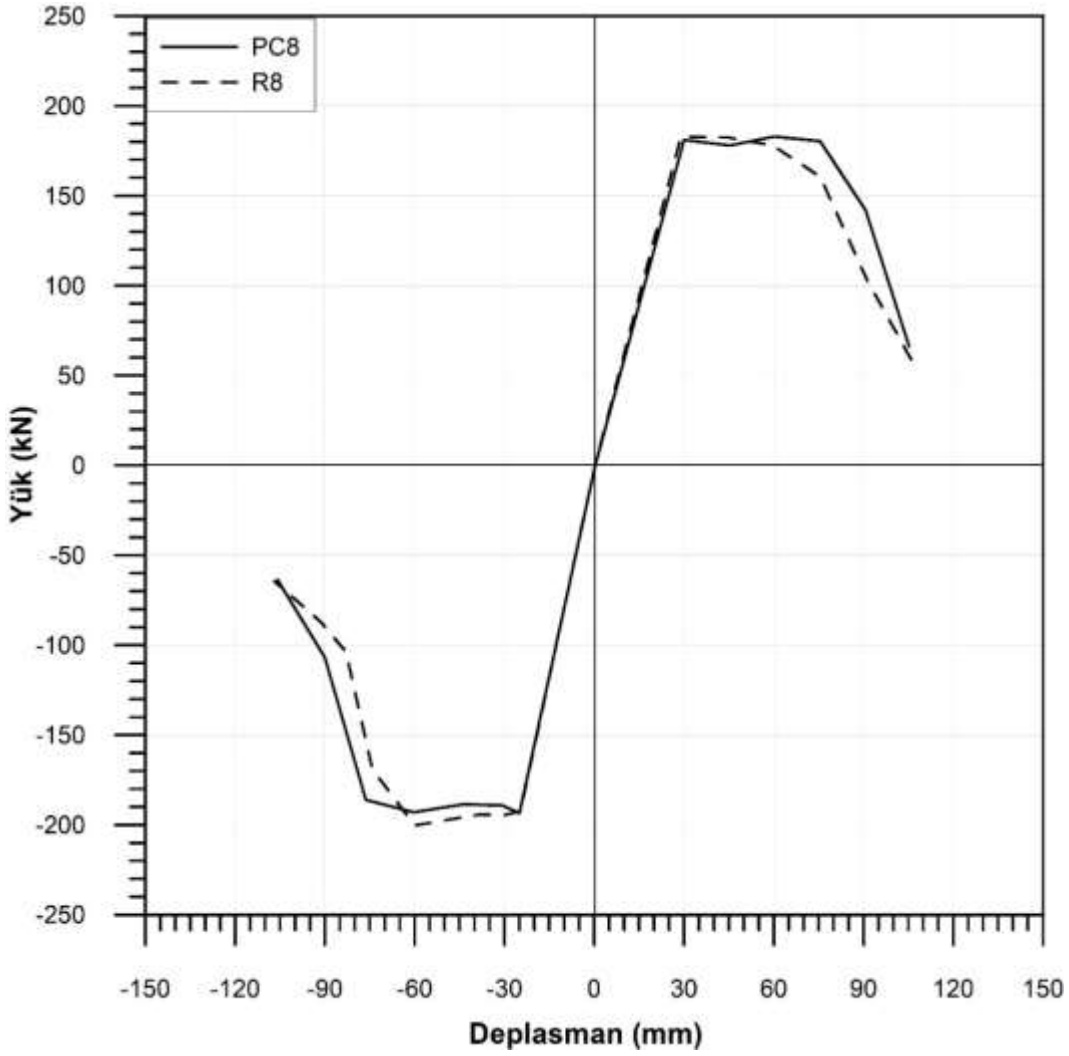
Şekil 6.9. R8 – P8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R8 ile sıvalı güçlendirilmiş eleman P8 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.9 ile gösterilmiştir. Güçlendirilmiş P8 elemanı, referans elemana oldukça benzer davranışlar göstermiş olup, güçlendirmenin eksik etriyeleri karşılayacak şekilde çalıştığını söylemek mümkündür. UP8 elemanına göre, takviye sıvasının güçlendirmeye olumlu katkısından söz edilemez. Güçlendirme sıvasının uygulanması için kiriş ile çelik kablolar arasına geçirilen 10 mm çapındaki donatı sebebiyle kablolarda UP8 elemanına göre daha çok hasar görülmesinin bu duruma neden olmuş olabileceği değerlendirilmektedir.



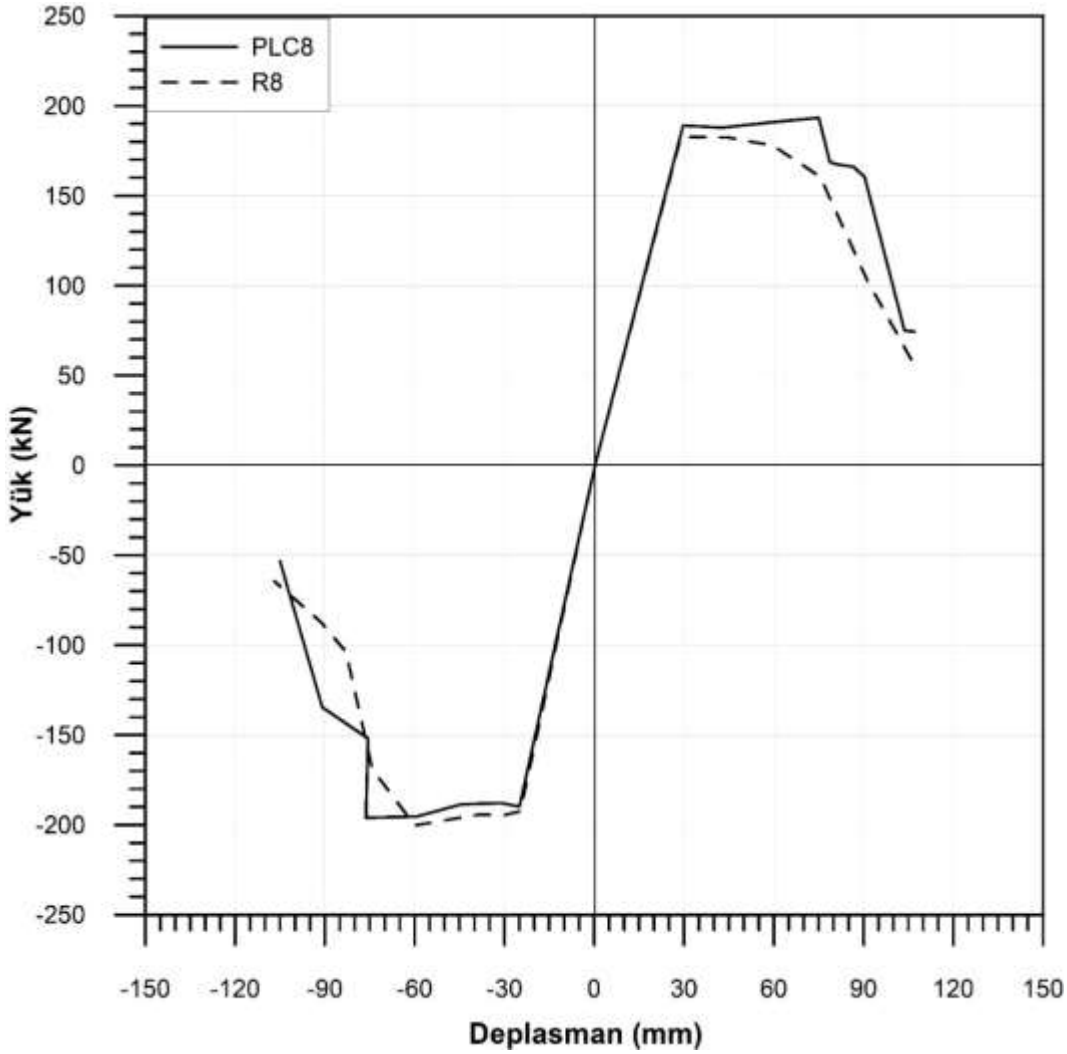
Şekil 6.10. R8 – PL8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R8 ile sıvalı güçlendirilmiş ve kilit sistemi eklenmiş olan eleman PL8 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.10 ile gösterilmiştir. Takviye sıvası ve kilit sistemi ile güçlendirilmiş PL8 elemanı, referans elemanın dayanımını aşan davranışlar göstermiş olup, güçlendirmenin amacına ulaştığı söylenebilir. P8 elemanına göre karşılaştırma yapıldığında ise, güçlendirmede işçiliği ve maliyeti arttıran kilit sisteminin beklenilen katkıyı sağlamadığı görülmüştür.



Şekil 6.11. R8 – PC8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R8 ile sıvalı güçlendirilmiş ve deney esnasında bir kablosu yapay olarak kesilecek olan eleman PC8 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.11 ile gösterilmiştir. Takviye sıvası ile güçlendirilmiş PC8 elemanı, -60 mm deplasman değerinden sonra yük sıfırlandıktan sonra çift sıra kablosu yapay olarak koparılarak test edilmiştir. P8 elemanına göre karşılaştırma yapıldığında, zarf eğrilerine bakılarak kablo yapay koparılsa dahi, elemanın kopmayan kabloları güçlendirmeye katkı sağlamaya devam ettiği görülebilir. Deney elemanı referans eleman ile karşılaştırıldığında da, güçlendirmenin olumlu sonuçlandığı söylenebilir.



Şekil 6.12. R8 – PLC8 deney numuneleri zarf eğrileri karşılaştırılması

Referans eleman R8 ile sıvalı güçlendirilmiş, kilit sistemi uygulanmış ve deney esnasında bir kablosu yapay olarak kesilecek olan eleman PLC8 arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla çizilen zarf eğrisi Şekil 6.12 ile gösterilmiştir. Takviye sıvası ve kilit sistemi uygulanarak güçlendirilmiş PLC8 elemanı, -60 mm deplasman değerinden sonra yük sıfırlandıktan sonra çift sıra kablosu yapay olarak koparılarak test edilmiştir. PC8 elemanına göre karşılaştırma yapıldığında, kilit sisteminin eleman üzerindeki olumsuz etkisi görülebilir. Kilitli sistem, kablonun yapay koparıldığı durumda da bir katkı sağlayamamıştır. Buna rağmen, PLC8 elemanı referans eleman ile karşılaştırıldığında, istenilen güçlendirme sağlanmıştır.

6.4. Akma Rijitliği

Betonarme kiriş elemanlarının yük – deplasman grafiklerinin elemanın akmaya eriştiği noktaya kadar doğrusal olduğu varsayımından yola çıkılarak, akma gerçekleştiği andaki yük değerinin o andaki deplasman değerine bölünmesiyle elde edilen akma rijitliği değerleri hesaplanmış ve ilgili deney gruplarının ileri ve geri yönde kendi içerisinde karşılaştırmaları yapılmıştır.

6.4.1. Akma rijitliği ile 1. grup deney elemanlarının karşılaştırılması

Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6 ile 1. grup deney elemanlarının ileri ve yöndeki akma rijitliği sırasıyla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.5. 1. grup deney elemanlarının ileri yöndeki akma rijitlikleri

Deney Elemanı Adı	Elemanın Akma Anındaki Durumu		Akma Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği Numune / Referans
	Yük (kN) (Py)	Deplasman (mm) (dy)		
R0	+185	+27	6,85	1,00
UP0	+182	+35	5,20	0,76
P0	+184	+28	6,57	0,96
PL0	+190	+26	7,31	1,07
PC0	+180	+27	6,67	0,97
PLC0	+189	+27	7,00	1,02

Çizelge 6.6. 1. grup deney elemanlarının geri yöndeki akma rijitlikleri

Deney Elemanı Adı	Elemanın Akma Anındaki Durumu		Akma Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği Numune / Referans
	Yük (kN) (Py)	Deplasman (mm) (dy)		
R0	-195	-27	7,22	1,00
UP0	-189	-30	6,30	0,87
P0	-190	-21	9,05	1,25
PL0	-190	-26	7,31	1,01
PC0	-185	-25	7,40	1,02
PLC0	-183	-27	6,78	0,94

6.4.2. Akma rijitliği ile 2. grup deney elemanlarının karşılaştırılması

Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8 ile 2. grup deney elemanlarının ileri ve geri yöndeki akma rijitliği sırasıyla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.7. 2. grup deney elemanlarının ileri yöndeki akma rijitlikleri

Deney Elemanı Adı	Elemanın Akma Anındaki Durumu		Akma Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği Numune / Referans
	Yük (kN) (Py)	Deplasman (mm) (dy)		
R8	+185	+30	6,17	1,00
UP8	+184	+28	6,57	1,06
P8	+184	+27	6,81	1,10
PL8	+179	+27	6,63	1,07
PC8	+182	+30	6,07	0,98
PLC8	+186	+30	6,20	1,00

Çizelge 6.8. 2. grup deney elemanlarının geri yöndeki akma rijitlikleri

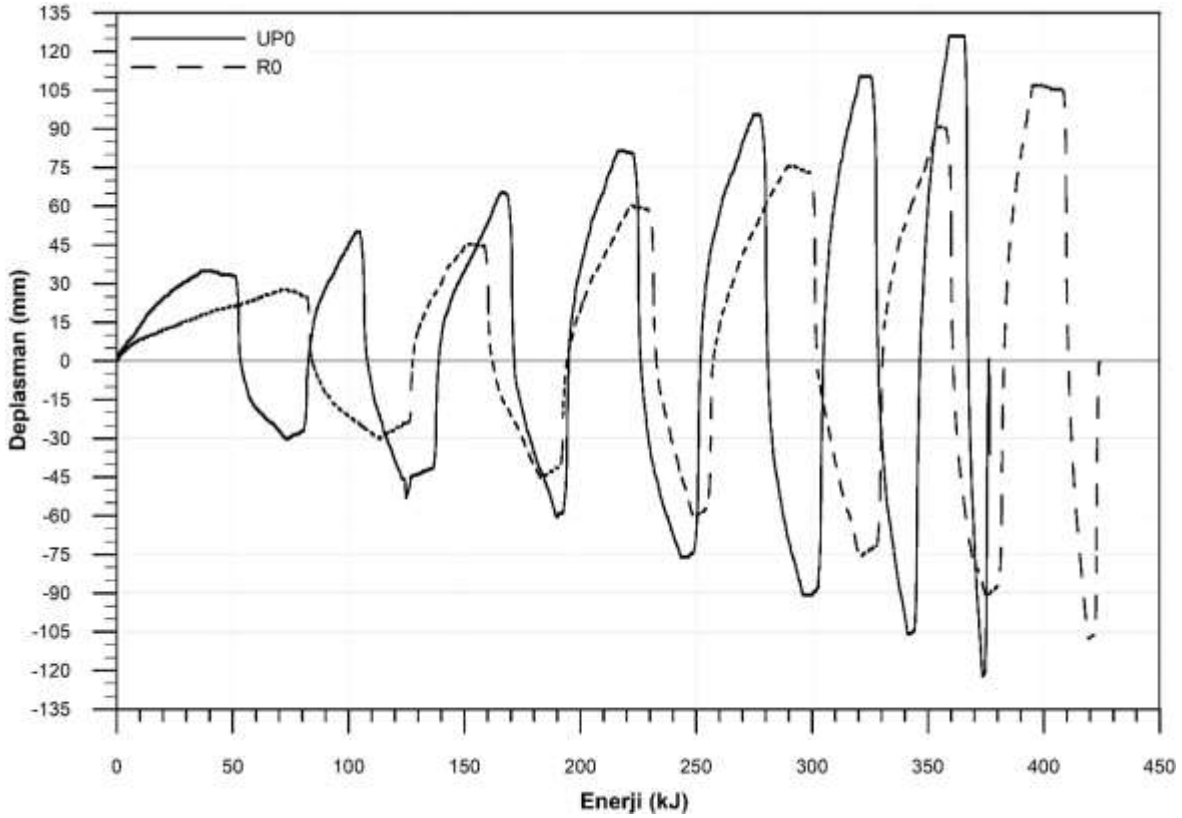
Deney Elemanı Adı	Elemanın Akma Anındaki Durumu		Akma Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği Numune / Referans
	Yük (kN) (Py)	Deplasman (mm) (dy)		
R8	-192	-24	8,00	1,00
UP8	-194	-30	6,47	0,81
P8	-188	-33	5,70	0,71
PL8	-185	-27	6,85	0,86
PC8	-189	-26	7,27	0,91
PLC8	-186	-26	7,15	0,89

6.5. Enerji Dönüştürme

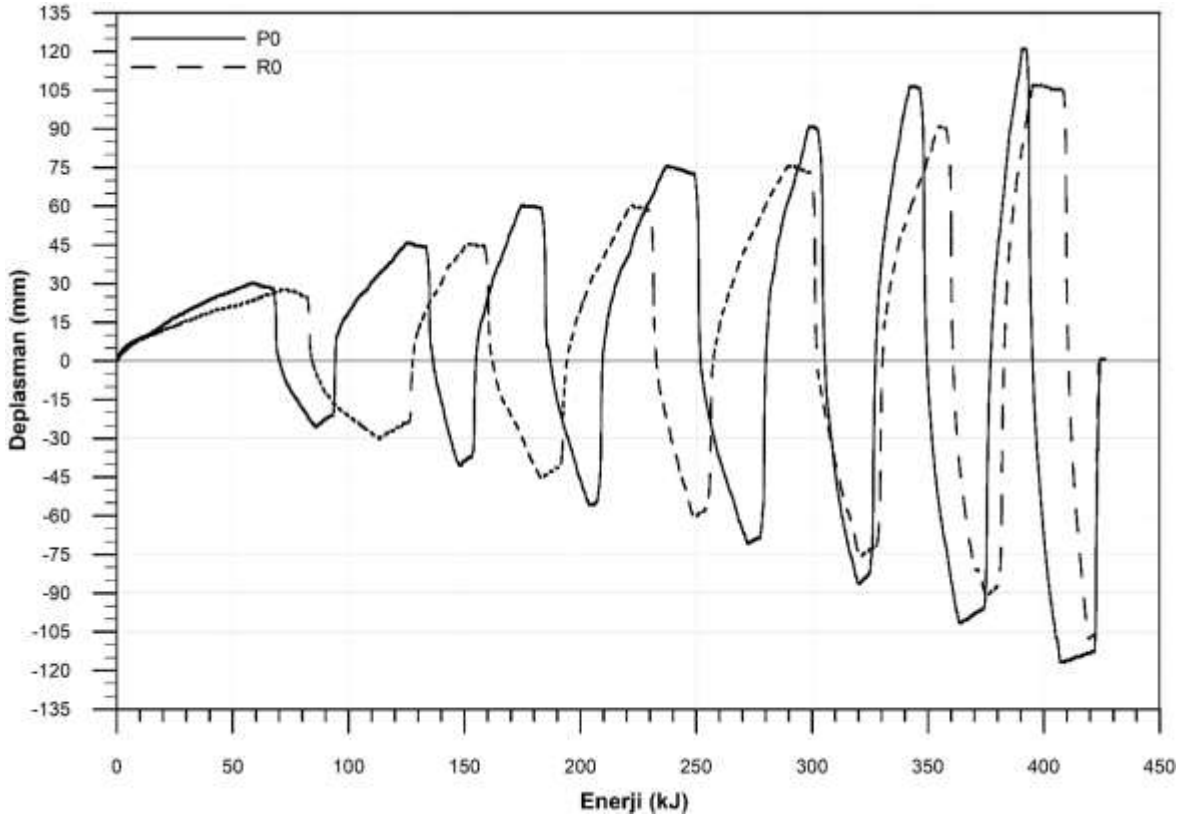
Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen yük – deplasman grafiklerinin altında kalan alanlar göz önünde bulundurularak, her çevrimdeki alanın toplanması ile elde edilen enerji dönüştürme kapasiteleri kıyaslanmıştır. Tüm deneylerde söz konusu yük – deplasman grafiklerinin altında kalan alanlar kümülatif olarak toplanarak sırasıyla gösterilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

6.5.1. Enerji dönüştürme yönünden 1. grup numunelerin karşılaştırmaları

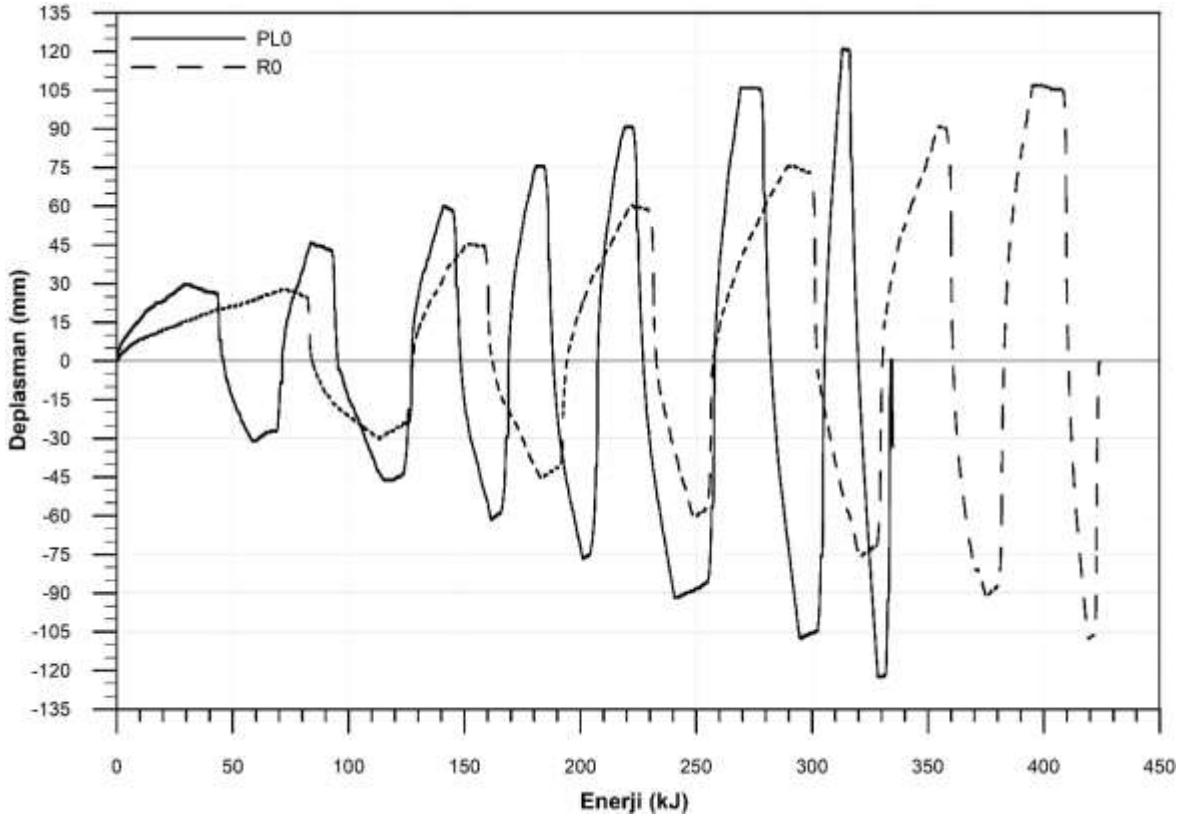
Daha önce Bölüm 6.3 ile zarf eğrilerinde yapılan karşılaştırma, bu bölümde enerji dönüştürme kapasitelerine göre yapılacaktır. Zarf eğrilerinin altında kalan alanın kümülatif olarak toplanması ile elde edilen grafiklerden deney elemanlarının 1. grubuna ait olanları sırası ile gösterilmiştir.



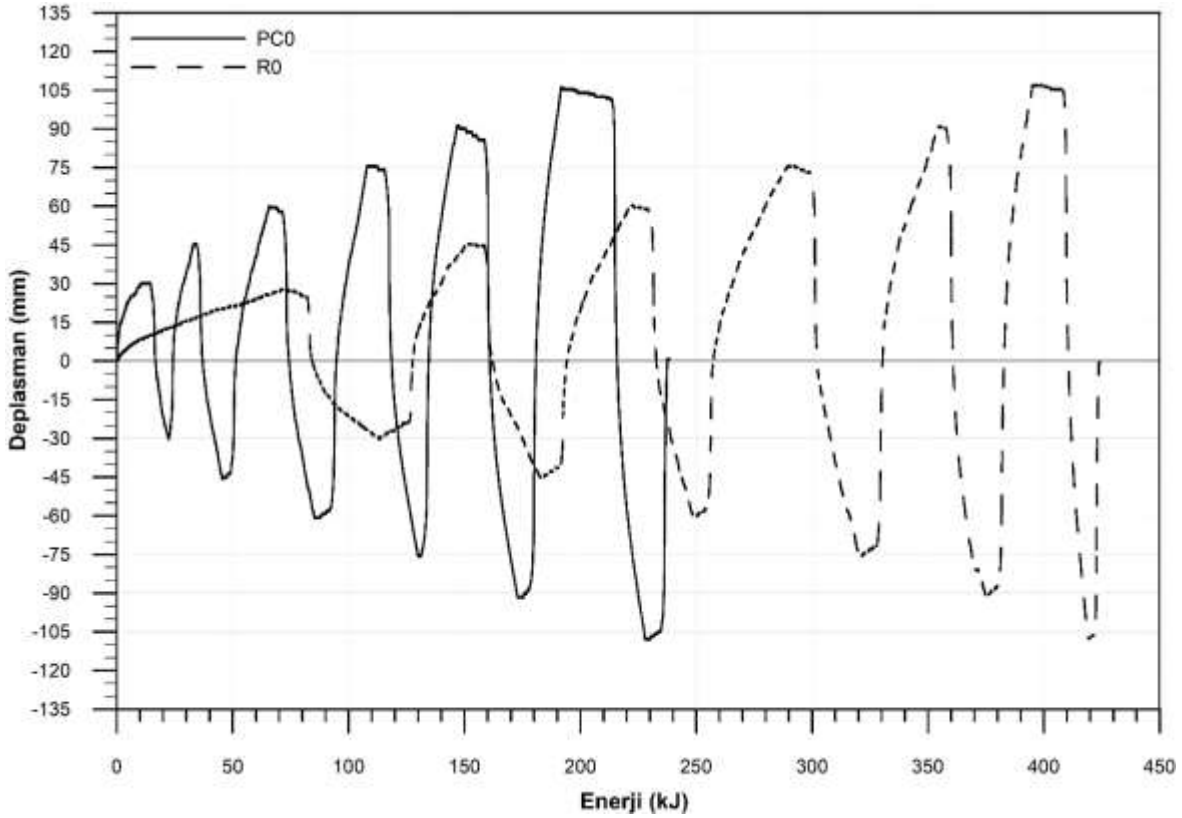
Şekil 6.13. R0 – UP0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



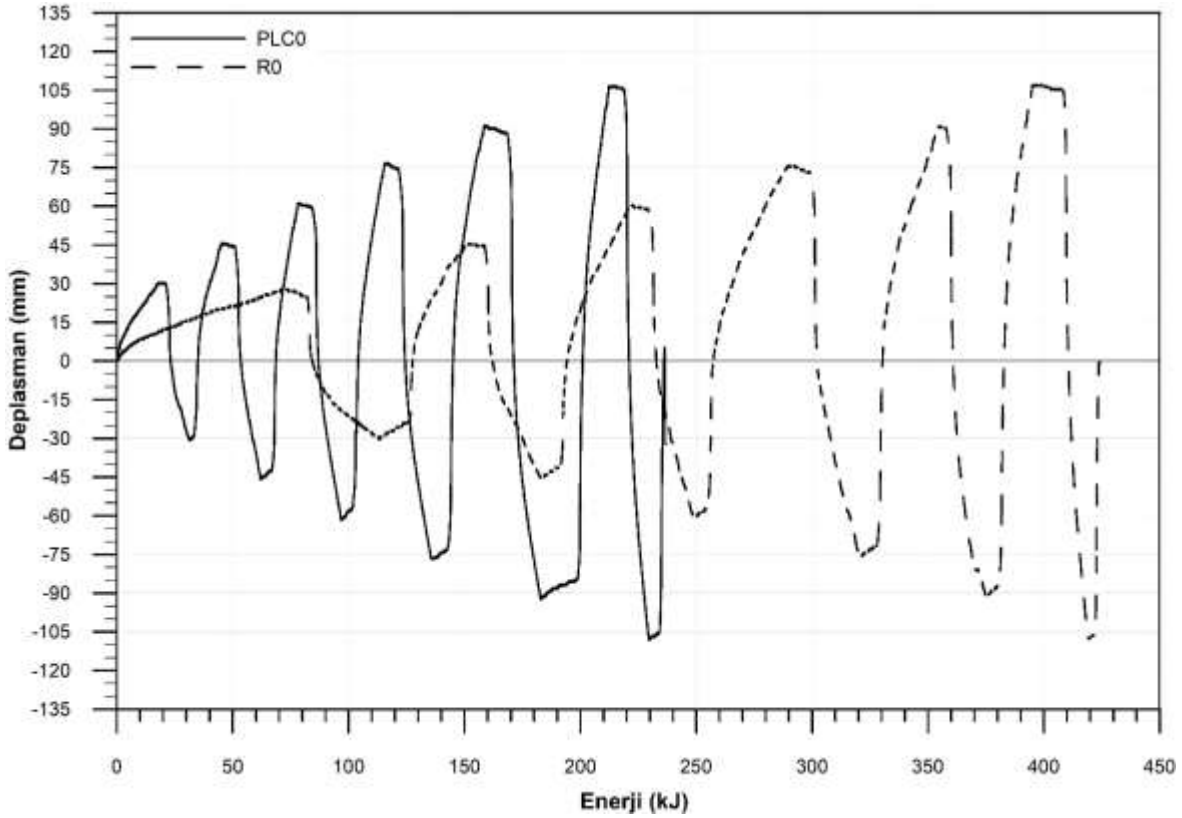
Şekil 6.14. R0 – P0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



Şekil 6.15. R0 – PL0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



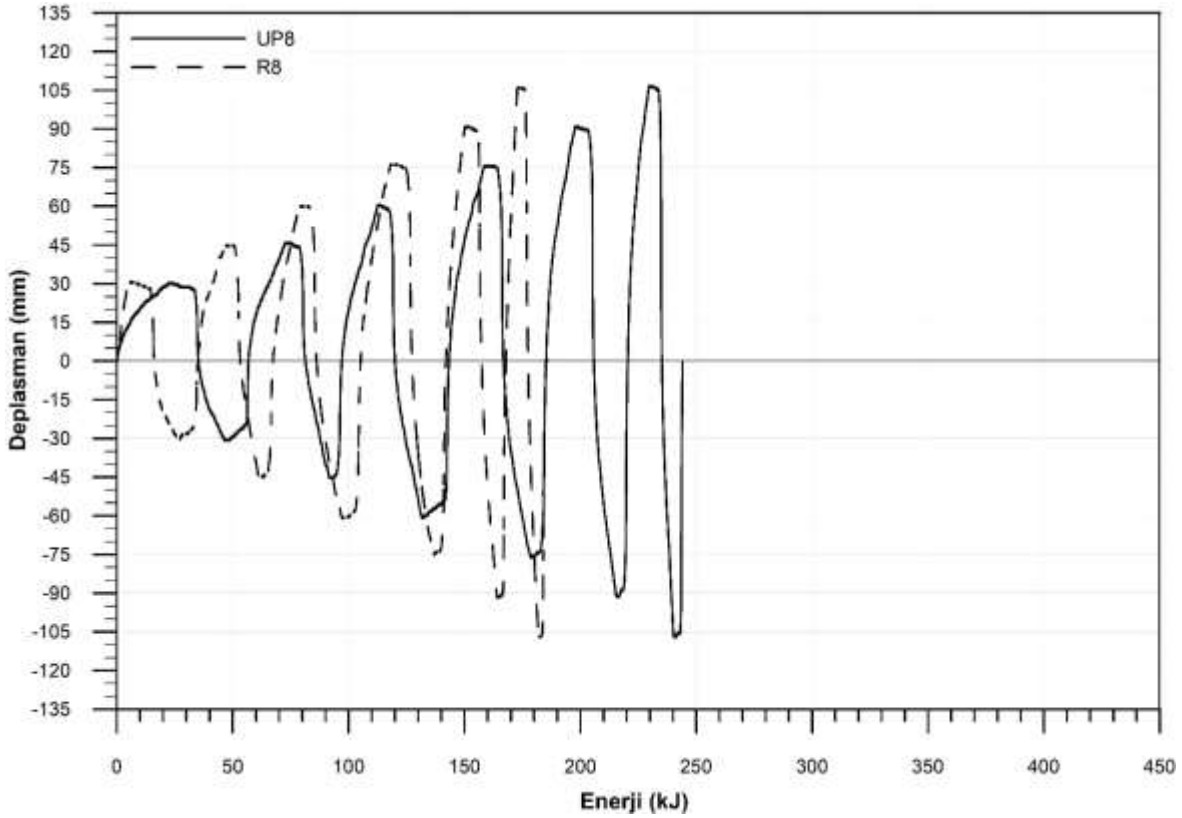
Şekil 6.16. R0 – PC0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



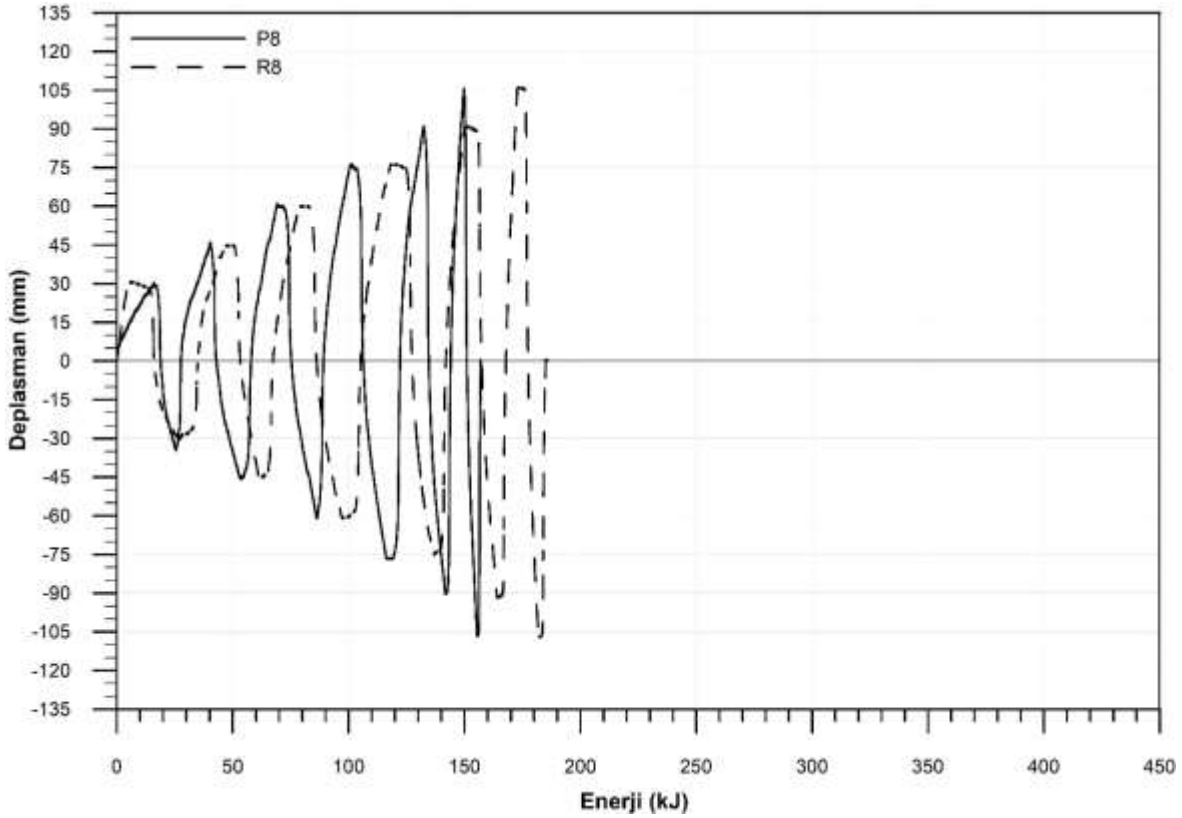
Şekil 6.17. R0 – PLC0 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması

6.5.2. Enerji dönüştürme yönünden 2. grup numunelerin karşılaştırmaları

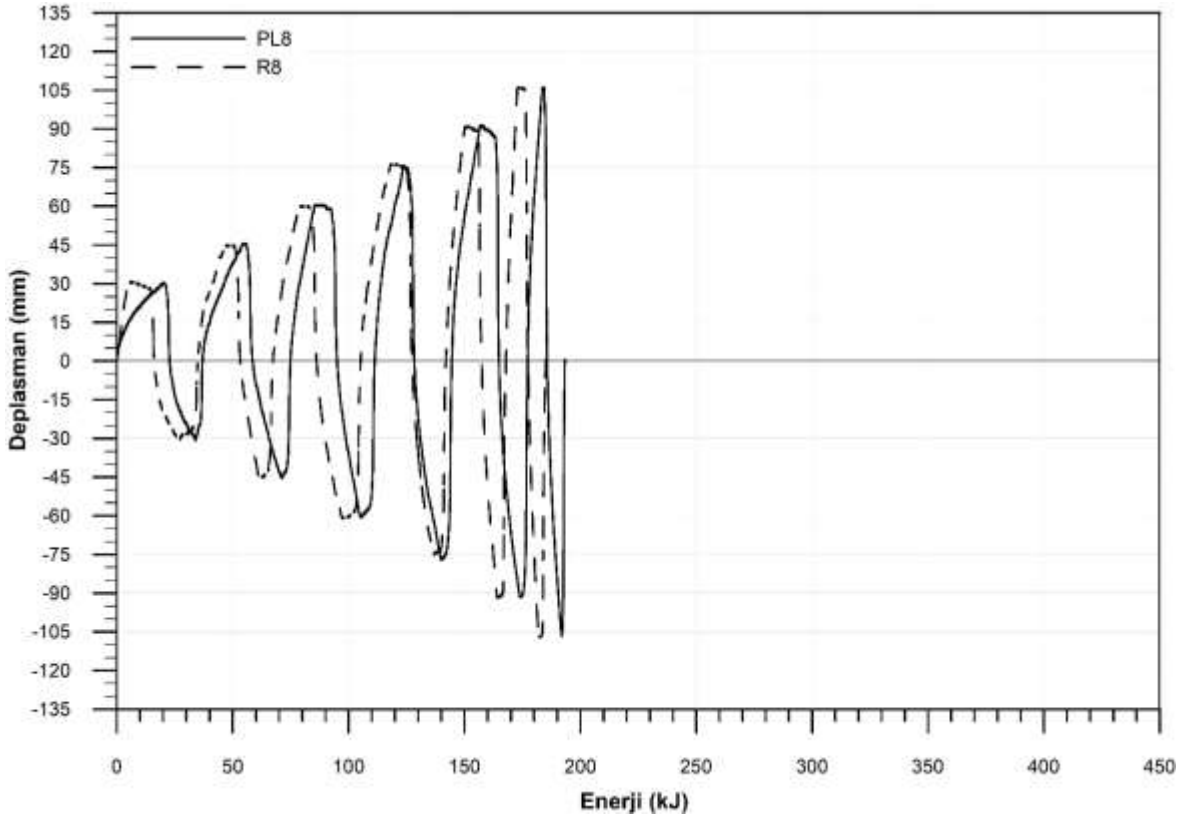
Zarf eğrilerinin altında kalan alanın kümülatif olarak toplanması ile elde edilen grafiklerden deney elemanlarının 2. grubuna ait olanları sırası ile gösterilmiştir.



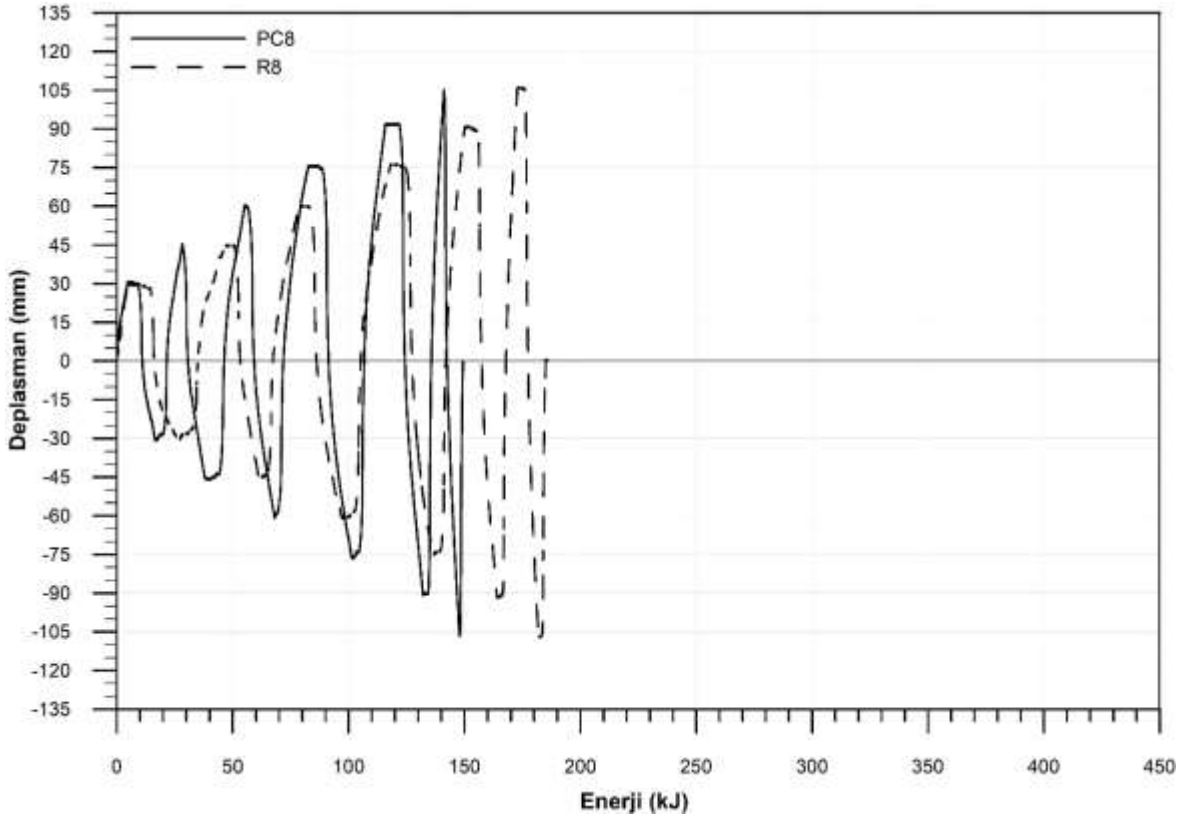
Şekil 6.18. R8 – UP8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



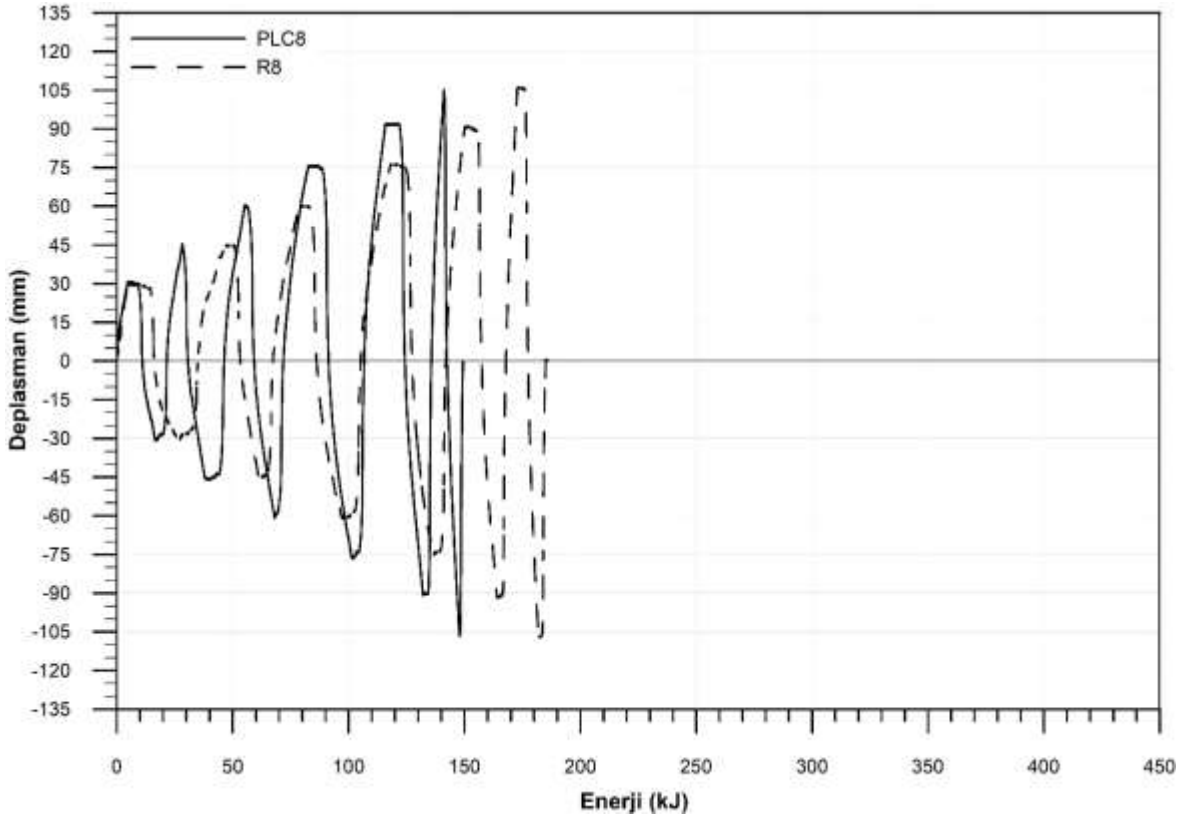
Şekil 6.19. R8 – P8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



Şekil 6.20. R8 – PL8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



Şekil 6.21. R8 – PC8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması



Şekil 6.22. R8 – PLC8 deney numuneleri enerji dönüştürmelerinin karşılaştırılması

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi için yapılan bu tez çalışmasında 2 adeti referans olmak üzere toplam 12 adet betonarme kiriş 2 grupta tersinir tekrarlanır yük altında deplasman kontrollü olarak test edilmiş ve sonuçları gözlenmiştir. Güçlendirilecek kesme yönünden yetersiz 10 betonarme kiriş deney elemanının etriyeleri aynı olup, referans elemanların etriye aralığı farklıdır. Çalışma, kesme yönünden yetersiz olan betonarme kiriş elemanlarının, uygulanan güçlendirme yöntemleri ile referans eleman davranışı ile benzer davranış göstermesini hedeflenmektedir. Deney sonuçları taşıma gücü, zarf eğrileri, akma rijitliği ve enerji dönüştürme kapasiteleri yönünden incelenmiştir. Yapılan çalışma sonrasında erişilen sonuçlar ve benzer araştırma yürütecek araştırmacılar için öneriler sunulmuştur.

- Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilerden yola çıkılarak, yapılan güçlendirme işleminin amacına ulaştığı söylenebilir. Tüm deney elemanları referans elemanlarına oldukça yakın bir dayanıma erişmiştir.

- Ayrıca, 50 mm ve 90 mm aralık ile sargılanan kirişlerin taşıma gücü sonuçları incelendiğinde, yine birbirine yakın dayanımlar göstermesi, 90 mm kablo aralığının da kesmeye karşı istenilen dayanıma erişilmesi için yeterli olduğu sonucunu gösterdiği düşünülebilir. Ancak enerji dönüştürme grafikleri incelendiğinde 50 mm aralık ile sargılama işlemi yapılan kirişlerin enerji dönüştürme kapasiteleri daha yüksektir.

- Kiriş köşelerinde kablonun kesilmesine karşı önlem alınarak pahlanması, kabloların bu noktalardan kesilmemesine fayda sağlamıştır.

- Kablolar ile güçlendirilecek kiriş arasına geçirilen 10 mm çapındaki nervürlü donatılar, kablolar için olumsuzluğa neden açmış olabilir. Zira bazı deneylerde kabloların bu noktalardan tellenmeye başladığı görülmüştür.

- Deney esnasında yapay koparılan kablo sonrası, aynı kablonun farklı bir noktadan daha kopmuş olması güçlendirmenin kopan kabloya rağmen etkili çalıştığını göstermektedir.

- Deneylerde sargılama amacıyla kullanılan çelik kabloların gerginliğini objektif bir metotla ölçecek sistem ile kabloların ne aşamada koptuğu hakkında daha kesin bilgiler toplanabilir. Zira çelik kablolar el ile yeterince sıkı olarak çift sıra sargılanmış ve aşırı güç uygulanmadan bastırıldığında ana kirişe dokunulamayacak kadar sıkı sarılmıştır. Ancak yeteri kadar ve aşırı kelimeleri bilimsel veriler açısından oldukça subjektif bir değerlendirme olacaktır. Daha sonra çelik kablolar ile ana kiriş arasına geçirilen 10 mm çapındaki nervürlü donatılar, çelik kabloyu fazlasıyla germiştir. Bu gerginliği de rakamsal olarak ölçmek mümkün olmamıştır. Sistemin bu konuda ölçülebilir bir yöntem geliştirilerek deneylerin bu yönüyle değerlendirilmesi daha sağlıklı sonuçlara ulaşabilmeye yardımcı olacaktır.

- Güçlendirmede kullanılan çelik kablolar ile güçlendirilecek kiriş arasına geçirilen 10 mm çapındaki nervürlü donatılar yerine düz donatı kullanılırsa temas noktasındaki olası kesilmelerin önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

- Deney grubunda, güçlendirilecek elemanlara bir adet referans eleman da eklenerek, herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmadan test edilmesi, elemanların güçlendirme öncesi durumuna göre ne yönde bir fark geliştirildiğini göstermesi açısından faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., ve Sano, M. (2000). Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam. *Construction and Buiding Materials*, 14, 5, 237-244.

Barnes, R.A., Baglin, P.S., Mays, G.C., ve Subedi, N.K. (2001). External steel plate systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 23, 9, 1162-1176.

Barnes, R.A., ve Mays, G.C. (2006). Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates. *Construction and Buiding Materials*, 20, 6, 396-402.

Khalifia, A., ve Nanni, A., (2000). Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cement and Concrete Composites*, 22, 3, 165-174.

Khalifa, A., ve Nanni, A. (2002). Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. *Construction and Buiding Materials*, 16, 3, 135-146

Kofoğlu A. (2019). *Kesmeye Karşı Çelik Kablolarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişin Davranışı*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-15.

Raghu, A., Mettemeyer, M.M., Myers, J.J., ve Nanni, A. (2000). *An assessment of in-situ FRP shear and flexural strengthening of reinforced concrete joints*. ASCE Structures Congress, Philadelphia, PA, M. Elgaaly, Ed., May 8-10, CD version, 8

Taljsten, B. (2003). Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. *Construction and Buiding Materials*, 17, 1, 15-26.

Taljsten, B., ve Elfgren, L. (2000). Strengthening concrete beams for shear using CFRP materials: evuluation of different application methods. *Composites: Part B:Engineering*, 31, 2, 87-96.

Uysal, A. (2006). *Betonarme kirişlerin epoksiyle yapıştırılan delikli çelik levhalarla güçlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-23.

Zhang, J., Hsu, T. T. C. (2005). Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Composites for Construction*, 9(2), 126-135.



Gazili olmak ayrıcalıktır