



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**KOROZYON HASARLI KOLON-KİRİŞ  
BİRLEŞİM BÖLGELERİNİN KOMPOZİT  
MALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

**Hasan DOĞANTİMUR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Eylül-2025**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Hasan DOĞANTİMUR tarafından hazırlanan “Korozyon Hasarlı Kolon-Kiriş Birleşim Bölgelerinin Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmesi” adlı tez çalışması 25/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK  
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇER  
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Veli BAŞARAN  
(Afyon Kocatepe Üniversitesi)

ONLINE

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından 241004025 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hasan DOĞANTİMUR

Tarih:25.09.2025

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### KOROZYON HASARLI KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİM BÖLGELERİNİN KOMPOZİT MALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Hasan DOĞANTİMUR

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇER

2025, 148 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇER  
Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK  
Dr. Öğr. Üyesi Veli BAŞARAN

Deprem yüküne maruz kalan betonarme yapılarda korozyon hasarlarının yol açtığı performans kayıplarını minimize etmek ve gerekli güçlendirmeleri sağlamak amacıyla belirli çalışmalar yapılmıştır. Betonarme yapılarda donatılardaki korozyon, çevresel faktörler, işçilik hataları vb. nedenlerle ortaya çıkmakta; bu durum, yapıların dayanım, rijitlik ve sünekliğinin kaybına ve zamanla yapısal hasarlara yol açarak göçme riskini artırmaktadır. Bu bağlamda, CFRP kompozit malzemelerle güçlendirme, yapının eski dayanımını kazandırmakta ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır. Ülkemizdeki mevcut yapı stoğu incelendiğinde birçok yapının dayanım gereksinimlerini karşılamadığı ve yeniden inşa edilmesinin ciddi maliyet artışına yol açtığı görülmektedir; bu nedenle korozyon hasarlı yapıların yıkılıp yeniden inşa edilmesi yerine, özellikle deprem anında en çok zorlanan kolon-kiriş birleşim bölgelerinin CFRP ile güçlendirilmesi hem ekonomik hem de işlevsellik açısından önemli faydalar sunmaktadır. Bu çalışmada, birbirleri ile özdeş donatı düzenine sahip bir adet korozyonsuz ve bir adet korozyonlu referans numuneleri dahil olmak üzere toplamda 6 adet kolon kiriş birleşim noktası üretilerek korozyonun birleşim noktalarındaki dayanımsal etkileri, tersinir tekrarlanır yatay yükler altında incelenmiştir. Deneylerde birleşim bölgeleri, kiriş yüzeyi ve kolon açıklığı boyunca CFRP kompozitleri numunelere epoksi ile uygulanmış, kiriş uç bölgesinden sisteme tersinir tekrarlanır yatay yükleme yapılmıştır. Deneyler sırasında elde edilen yük-deplasman verileri kullanılarak zarf eğrileri, kümülatif enerji tüketim grafikleri ve rijitlik eğrileri oluşturulmuş, süneklik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, CFRP kompoziti ile güçlendirme öncesi ve sonrası korozyon etkileri ile hasara uğramış birleşim noktalarının taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji tüketim kapasiteleri gibi dayanımsal parametlerin değişkenlikleri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** betonarme, birleşim noktası, CFRP, güçlendirme, kiriş, kolon, korozyon, lifli polimer

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

# **STRENGTHENING COLUMN-BEAM JOINT AREAS DAMAGED BY CORROSION WITH COMPOSITE MATERIALS**

**Hasan DOĞANTİMUR**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Asst.Prof. Dr. Mustafa KOÇER**

**2025,148 Pages**

### **Jury**

**Asst. Prof. Dr. Mustafa KOÇER  
Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK  
Asst. Prof. Dr. Veli BAŞARAN**

Specific studies have been conducted to minimize performance losses caused by corrosion damage in reinforced concrete structures exposed to earthquake loads and to provide necessary reinforcement. Corrosion in reinforcement in reinforced concrete structures occurs due to environmental factors, workmanship errors, and other factors. This leads to a loss of strength, rigidity, and ductility, and over time, leading to structural damage and increasing the risk of collapse. In this context, strengthening with CFRP composite materials restores the structure's former strength and provides significant economic advantages. An examination of the existing building stock in our country reveals that many structures fail to meet strength requirements, and rebuilding them leads to significant cost increases. Therefore, instead of demolishing and rebuilding structures with corrosion damage, reinforcing CFRP, particularly in the column-beam joint areas most vulnerable to earthquake stress, offers significant benefits in terms of both economics and functionality. In this study, a total of six column-beam joints, including one uncorroded and one corroded reference specimen with identical reinforcement arrangements, were fabricated. The effects of corrosion on the joints were investigated under reversible cyclic horizontal loading. In the experiments, CFRP composites were applied to the joints, beam surfaces, and column spans with epoxy. Reversible cyclic horizontal loading was applied to the system from the beam end region. Load-displacement data obtained during the experiments were used to generate envelope curves, cumulative energy dissipation graphs, and stiffness curves, and ductility values were calculated. The obtained results were used to investigate the effects of corrosion on the strength parameters such as bearing capacity, ductility, and energy dissipation capacities of damaged joints before and after reinforcement with CFRP composite.

**Keywords:** reinforced concrete, joint, CFRP, reinforcement, beam, column, corrosion, fiber-reinforced polymer

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, korozyon hasarlı kolon-kiriş birleşim bölgelerinin Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozitlerle güçlendirilmesi ve güçlendirilmiş birleşim noktalarını tekrar korozyon hasarına maruz bırakarak yatay yükler altında birleşim noktasının performansa etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler neticesinde, söz konusu yöntemin korozyon hasarlarını engellemede ve hasarlı numunelerin dayanım parametrelerinin artmasında etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, 241004025 numaralı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) projesi kapsamında desteklenmiş olup, katkı ve desteklerinden dolayı BAP'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince akademik gelişimime yön veren, bilgi ve birikimini benimle cömertçe paylaşan, her aşamada ilgi, sabır ve desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOÇER'e en içten şükranlarımı sunarım. Tez çalışmasının şekillenmesinde ve araştırma sürecimin ilerlemesinde katkı sağlayan, akademik bakış açımı geliştirmeme yardımcı olan Doç. Dr. Alptuğ Ünal ve Doç. Dr. Oğuzhan Öztürk'e değerli destekleri ve yol göstericiliği için teşekkür ederim. Ayrıca, akademik yaşamım boyunca sağladığı nitelikli eğitim ortamı, bilimsel katkı ve destekle bu sürecin önemli bir parçası olan Konya Teknik Üniversitesi ailesine de teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte her daim yanımda olan gerek maddi gerek manevi anlamda sonsuz desteklerini hissettiren, varlıklarıyla bana güç veren kıymetli aileme minnettarım.

Hasan DOĞANTİMUR  
KONYA-2025

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÖZET.....</b>                                                                                          | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                                      | <b>v</b>   |
| <b>ÖNSÖZ.....</b>                                                                                         | <b>vi</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                                                                  | <b>vii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>                                                                      | <b>ix</b>  |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                                     | <b>1</b>   |
| 1.1. Tezin Amacı.....                                                                                     | 2          |
| 1.2. Tezin Önemi.....                                                                                     | 3          |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>                                                                        | <b>5</b>   |
| 2.1. Korozyon Hasarsız Betonarme Kolon ve Kirişlerin Güçlendirilmesine<br>Yönelik Yapılan Çalışmalar..... | 5          |
| 2.2. Korozyon Hasarlı Betonarme Kolon ve Kirişlerin Güçlendirilmesine<br>Yönelik Yapılan Çalışmalar.....  | 17         |
| <b>3.METERYAL VE YÖNTEM.....</b>                                                                          | <b>19</b>  |
| 3.1. Deney Numuneleri .....                                                                               | 19         |
| 3.1.1. Deney numunelerinin özellikleri.....                                                               | 19         |
| 3.2. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri .....                                                        | 22         |
| 3.2.1. Beton mekanik özellikleri .....                                                                    | 22         |
| 3.2.2. Donatı mekanik özellikleri.....                                                                    | 23         |
| 3.3. Deney Düzeneği ve Ölçme Tekniği .....                                                                | 24         |
| 3.3.1. Deney düzeneği.....                                                                                | 24         |
| 3.3.2. Ölçme tekniği.....                                                                                 | 25         |
| 3.3.3. Yükleme protokolü .....                                                                            | 26         |
| 3.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....                                                                | 28         |
| 3.4.1. Deney elemanları kalıplarının üretimi .....                                                        | 28         |

|                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.2. Deney elemanları donatılarının hazır hale getirilmesi .....                                                        | 28         |
| 3.4.3. Donatıların kalıplara yerleştirilmesi.....                                                                         | 29         |
| 3.4.4. Deney elemanlarının üretilmesi .....                                                                               | 29         |
| 3.5. Hızlandırılmış Korozyon Deneyleri.....                                                                               | 30         |
| 3.6. Deney Numunelerinin CFRP Kompoziti ile Güçlendirilmesi .....                                                         | 40         |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                                                                            | <b>54</b>  |
| 4.1. Deney Sonuçları.....                                                                                                 | 57         |
| 4.1.1. Birinci deney Referans Deneyi (REF) .....                                                                          | 57         |
| 4.1.2. İkinci deney Referans Korozyon Deneyi (REF+%20COR) .....                                                           | 67         |
| 4.1.3. Üçüncü deney %20Korozyon+CFRP Deneyi(%20COR+CFRP) ....                                                             | 77         |
| 4.1.4. Dördüncü deney CFRP+%20 Korozyon Deneyi (CFRP+%20COR)86                                                            |            |
| 4.1.5. Beşinci deney %10 Korozyon+CFRP+%10 Korozyon Deneyi (%10<br>COR+CFRP+%10 COR).....                                 | 94         |
| 4.1.6. Altıncı deney Referans CFRP Deneyi (REF+CFRP) .....                                                                | 102        |
| 4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması .....                                                                           | 111        |
| 4.2.1. Grup-1 Referans numunelerinin korozyon ve güçlendirme<br>karşısındaki davranış değişimi.....                       | 112        |
| 4.2.2. Grup-2 Korozyon hasarına maruz kalmış numunelerinin korozyon ve<br>güçlendirme karşısındaki davranış değişimi..... | 116        |
| 4.2.3. Grup-3 Deney numunelerinin güçlendirme karşısındaki davranış<br>değişimi.....                                      | 119        |
| 4.2.3. Tüm deney elemanlarının karşılaştırılması .....                                                                    | 124        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                                                                                      | <b>129</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                                    | <b>136</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                      |                                                                              |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi$               | : Donatı çapı, mm                                                            |
| $\mu\text{m}$        | : Mikrometre                                                                 |
| a                    | : Kesme açıklığı                                                             |
| $A_c$                | : Kiriş en kesit toplam alanı, mm                                            |
| b                    | : Deney numunesinin genişliği, mm                                            |
| $b_w$                | : Kiriş genişliği, mm                                                        |
| C30                  | :28 gün kür ortamında bekletilmiş silindir basınç dayanımı 30 MPa olan beton |
| $\text{CO}_2$        | : Karbondioksit                                                              |
| d                    | : Kirişin etkin derinliği                                                    |
| $f_{ck}$             | : Beton karakteristik silindir basınç dayanımı, MPa                          |
| gr                   | : Gram                                                                       |
| $\text{H}_2\text{S}$ | : Hidrojen sülfür                                                            |
| L                    | : Deney numunesinin uzunluğu, mm                                             |
| $L_{top}$            | : Kirişin toplam uzunluğu, mm                                                |
| m                    | : Metre                                                                      |
| $\text{m}^3$         | : Metre küp                                                                  |
| mg                   | : Mili gram                                                                  |
| mm                   | : Milimetre                                                                  |
| N                    | : Newton                                                                     |
| $\text{NH}_3$        | : Amonyak                                                                    |
| nm                   | : Nanometre                                                                  |
| $\text{NO}_2$        | : Azot dioksit                                                               |
| O                    | : Oksijen                                                                    |
| P                    | : Pascal                                                                     |
| $\text{SO}_2$        | : Sülfür dioksit                                                             |
| V                    | : Volt                                                                       |
| $\Delta_u$           | : Deney elemanının göçme deplasmanı                                          |
| $\Delta_y$           | : Deney elemanının akma deplasmanı                                           |
| $\mu$                | : Deney elemanının süneklik katsayısı                                        |

### Kısaltmalar

|                     |                                                                                                                                             |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| %10COR+CFRP+%10 COR | :32 gün %10 korozyona uğratılmış sonrasında CFRP ile güçlendirilmiş ve tekrar 32 gün hızlandırılmış %10 korozyona uğratılmış deney numunesi |
| %20 COR+CFRP        | : 64 gün hızlandırılmış korozyona uğratılmış (%20) ve sonrasında CFRP ile güçlendirilmiş deney numunesi                                     |
| ACI                 | : Amerikan Beton Enstitüsü                                                                                                                  |
| AFRP                | : Aramid Elyaf Takviyeli Polimer                                                                                                            |
| Ark.                | : Arkadaşları                                                                                                                               |
| CFRP                | : Karbon Elyaf Takviyeli Polimer                                                                                                            |
| CFRP+%20COR         | : CFRP ile güçlendirildikten sonra %20 hızlandırılmış korozyon hasarına uğratılmış deney numunesi                                           |
| Cm                  | : Santimetre                                                                                                                                |
| EN                  | : Avrupa normu                                                                                                                              |

|            |                                                                                    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| FRP        | : Fiberle Güçlendirilmiş Polimer                                                   |
| GFRP       | : Cam Elyaf Takviyeli Polimer                                                      |
| GPa        | : Giga Paskal                                                                      |
| GSMH       | : Gayri Safi Milli Hasıla                                                          |
| HFRP       | : Hibrit Elyaf Takviyeli Polimer                                                   |
| Kg         | : Kilogram                                                                         |
| kN         | : Kilo Newton                                                                      |
| Kor.       | : Korozyon                                                                         |
| LP         | : Lif Takviyeli Polimer                                                            |
| LVDT       | : Lineer yer değıştirme algılayıcısı                                               |
| Mm         | : milimetre                                                                        |
| MPa        | : Mega Pascal                                                                      |
| NBS        | : Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü                                        |
| Nd         | : Eksenel yük, kN                                                                  |
| REF        | : Güçlendirme işlemi yapılmamış referans numunesi                                  |
| REF+%20COR | :64 gün hızlandırılmış korozyona uğratılmış (%20) korozyon referans deney numunesi |
| REF+CFRP   | : CFRP ile güçlendirilmiş referans numunesi                                        |
| TBDY 2018  | : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı                                                  |
| TS         | : Türk Standardı                                                                   |
| Vb.        | : Ve benzeri                                                                       |

## 1. GİRİŞ

Ülkemiz yeryüzünde aktif sayılan birçok fay hattı üzerinde yer almaktadır. Jeolojik zaman ölçeğinde, dünyanın herhangi bir yerindeki deprem tehlikesi değişmez çünkü yer kabuğundaki hapsedilmiş sismik enerjinin salım oranı sabittir. Buna karşılık, depremleri üreten doğal süreçlere dair anlayışımız ile tasarımda kullanılmak üzere depremlerin nicelleştirilmesine dair bilimsel bilgi değişmektedir. İnsan ürünü çevrenin oluşturulmasına yönelik faaliyetlerinde mühendisler, doğal afetlerin insan yapımı sistemler üzerindeki etkilerini tasarım sırasında dikkate almak zorundadırlar. Deprem etkilerinin tasarım açısından dikkate alınma şekli ulusal yönetmelikler, standartlar veya mevzuatta açıklanmaktadır (Housner ve Jennings, 1982).

Günümüzdeki yapı stoğumuz düşünüldüğünde, oluşabilecek depremlere karşı yeterli dayanıma sahip olmayan, büyük çoğunluğu mühendislik hizmeti almamış veya statik projesine uygun yapılmamış yapılarımız bulunmaktadır. Bu yapılar son depremlerde görüldüğü üzere, can ve mal güvenliği açısından oldukça riskli yapılar olmakla beraber ülkemiz ekonomisi açısından da önemli riskler barındırmaktadır. Bu amaçla yeni oluşabilecek depremlere karşı, bu eski ve güvensiz yapı stoğunu minimuma indirmek ve gerekli güvenliği sağlayan yapılara sahip olmak için yapılara gerekli güçlendirme çalışmalarının yapılması her geçen gün zorunlu hale gelmektedir.

Betonarme yapılarda projeye uygun yapılmamış imalatlar dışında dayanımı ciddi miktarda etkileyen ve çok sık görülen bir diğer etken ise korozyon hasarlarıdır. Korozyon, betonarme yapıları servis ömürleri boyunca tehdit ederek, yapıların yanal yer değiştirme kapasitelerini kaybetmesine neden olmaktadır (Göksu ve İlki, 2016). Korozyondan etkilenen yapılar için hizmet ömrü, donatının beton örtüsünün kaybolması ile karakterize edilmektedir ve bu aşamada artık yapı, korozyon hasarına karşı daha korumasız kalmaktadır. Ülkemizde meydana gelen yıkıcı depremler sonrasında yapılan saha incelemeleri, yıkılan veya ağır hasar gören yapıların büyük bölümünde donatıların korozyona uğradığını ve beton ile donatı arasındaki aderansın kaybolduğunu göstermektedir (Doğan, 2009).

Korozyona uğramış donatı, hacmindeki artış nedeniyle beton üzerinde çekme gerilmeleri oluşturma eğilimindedir (Zhang et al., 2009). Beton üzerinde oluşan çekme gerilmeleri beton örtüsüne zarar vererek dağılmasına sebep olabilmektedir. Bu da

yapısal elemanlarda istenmeyen durumlar arasında kaldığı için büyük tehlike oluşturmaktadır.

Depremde yapı üzerinde oluşan gerilimlere karşı yapının veya elemanın güçlendirilmesi olmak üzere güçlendirmenin iki açıdan değerlendirilmesi gerekmektedir. Yapıda rijitlik, süneklik ve aşırı deplasman sorunu varsa, yapı bir bütün olarak kabul edilerek yapının sistemsel olarak güçlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak, taşıyıcı sistemin genelinde bir sorun bulunmuyor ve yalnızca belirli elemanlarda yapısal zayıflıklar tespit ediliyorsa, bu durumda yalnızca ilgili elemanlara yönelik lokal güçlendirme uygulamaları tercih edilmelidir. Korozyon hasarlarını minimize etmek veya hasarı ortadan kaldırarak gerekli dayanımı karşılayan yapılara dönüştürmek için çeşitli güçlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Güçlendirme çalışmalarının seçiminde en ekonomik ve kapasite ölçütlerini karşılayacak güçlendirme yöntemlerinin seçilmesi gerekmektedir.

### 1.1. Tezin Amacı

Literatür çalışmaları ve gerçekleştirilen saha uygulamaları dikkate alındığında, deprem yüklerine karşı güçlendirilmesi gereken yapılarda en belirgin hasar türlerinden birinin korozyon kaynaklı hasarlar olduğu görülmektedir. Korozyon hasarlarının yapıda yol açabileceği etkileri en aza indirmek ve gerekli taşıyıcı performansın sağlanabilmesi amacıyla yapılacak güçlendirme uygulamalarında, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozit malzemelerin kullanımı; hem ekonomik açıdan uygunluğu hem de yüksek dayanım ve güvenlik kriterlerini karşılaması bakımından çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, hem ülkemizde hem de uluslararası düzeyde giderek daha fazla araştırmaya konu olan korozyon hasarlı kolon-kiriş birleşim bölgelerinin Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozitlerle güçlendirilmesi ve güçlendirilmiş birleşimlerin tekrar korozyon hasarına maruz bırakılarak yatay yükler altında CFRP'nin birleşim performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, biri korozyonsuz ve biri korozyonlu referans numunesi olmak üzere toplam altı adet kolon-kiriş birleşim numunesi üretilmiş ve deprem etkisini simüle eden tersinir tekrarlanır yatay yükler altında deneysel olarak test edilmiştir. Deneylerde, kolon kiriş birleşim bölgesi, kiriş açıklığının bir kısmı ve kolon açıklığı boyunca aralıklı olarak CFRP kompozit malzemeler kullanılmış; bu kompozit malzemeler epoksi esaslı

bağlayıcılar aracılığıyla numunelere uygulanmıştır. Yükleme, kirişin uç noktasından gerçekleştirilmiş ve birleşim bölgesindeki hasar gelişimi detaylı biçimde gözlemlenmiştir.

Deney sonuçlarının daha sağlıklı yorumlanabilmesi amacıyla, test sırasında elde edilen yük ve deplasman verileri kullanılarak yük-deplasman grafikleri, zarf eğrileri, kümülatif enerji tüketimi grafikleri, rijitlik değişim grafikleri oluşturulmuş ve süneklik değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, tüm numuneler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu bağlamda, CFRP kompozitlerle güçlendirilmiş korozyon hasarlı birleşim bölgelerinde;

- Taşıma kapasitesindeki artış,
- Güçlendirme sonrası tekrar korozyona maruz kalma durumunda CFRP'nin etkinliği,
- Korozyon hasarının referans numuneye göre oluşturduğu dayanım kaybı,
- Korozyonun devam ettiği koşullarda güçlendirme uygulamasının performansı

gibi parametreler detaylı olarak incelenmiş ve CFRP kompozitlerin korozyon hasarına karşı yapısal güvenliği artırmadaki potansiyeli değerlendirilmiştir.

## 1.2. Tezin Önemi

Betonarme yapıların üretimi ve kullanımı sonrasında, donatılarda meydana gelen korozyon; çevresel faktörlerin etkileri, işçilik hataları ve yapının konumuna uygun şekilde projelendirilmemesi gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır. Bu durum, yapıların zamanla dayanım, rijitlik ve süneklik özelliklerini kaybederek yapısal hasarlara yol açmasına ve nihayetinde göçme riskinin kaçınılmaz hale gelmesine neden olmaktadır.

Ülkemizdeki mevcut yapı stoğu incelendiğinde, çok sayıda eski yapının yürürlükteki yönetmeliğin dayanım gereksinimlerini karşılamadığı görülmektedir. Bu yapıların yıkılarak yeniden inşa edilmesi, ciddi maliyet artışlarına yol açmakta ve ülke ekonomisi açısından önemli riskler barındırmaktadır. Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozitlerle gerçekleştirilen güçlendirme uygulamaları, yapıların kaybedilen taşıma kapasitesini yeniden kazandırabilmektedir.

Bu nedenle, korozyon hasarına uğramış yapıların tamamen yıkılıp yeniden yapılması yerine; özellikle deprem anında en fazla zorlanmaların meydana geldiği

kolon-kiriş birleşim b6lgelerinin CFRP kompozitlerle g6çlendirilerek onarılması hem ekonomik açıdan hem de mevcut yapıların işlevselliğinin korunması bakımından 6nemli avantajlar sunmaktadır.

Literat6r incelemeleri, korozyon hasarına uğramış birleşim b6lgelerinin CFRP kompozitlerle g6çlendirilmesine y6nelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğunu ortaya koymuştur. Bu eksiklik doğrultusunda, s6z konusu konu 6zerine bir tez çalışması y6r6t6lm6řt6r. Bu kapsamda, 6lkemizde yaygın kullanımı bulunmayan ancak uluslararası alanda sıkça tercih edilen CFRP kompozit malzemelerle kolon kiriş birleşim noktalarının g6çlendirilmesi gerçekleştirilmiş; kolon-kiriş birleşim b6lgelerinde oluşabilecek deformasyonlar, taşınabilecek maksimum y6k kapasitesi ve yapıya kazandırılan s6neklik gibi parametreler detaylı olarak incelenmiştir.

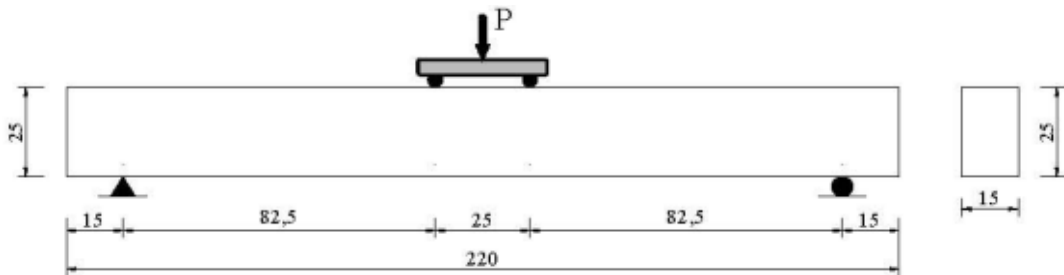
## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Konu üzerinde detaylı literatür taraması yapılırken araştırma kapsamına girecek iki konuda literatür taramasına gidilmiştir. Birinci başlık; korozyon hasarsız betonarme kolon ve kirişlerin güçlendirilmesine yönelik yapılan çalışmalar, ikinci başlık ise korozyon hasarlı betonarme kolon ve kirişlerin güçlendirilmesine yönelik yapılan çalışmalardır. Alt başlıklarda tarama özetleri verilmiştir.

### 2.1. Korozyon Hasarsız Betonarme Kolon ve Kirişlerin Güçlendirilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

**Özcan ve Yöntem (2005)**, eğilme etkisi altındaki betonarme dikdörtgen kesitli kirişlerin yapısal performansını artırmaya yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, dikdörtgen kesitli kirişler Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozitlerle güçlendirilmiş ve laboratuvar ortamında üç noktalı eğilme deneyleri uygulanmıştır.

Deneysel program kapsamında, her biri 220 cm uzunluğunda ve 15×25 cm kesit boyutlarında toplam sekiz adet deney numunesi üretilmiş; bu numuneler üç ayrı grup halinde test edilmiştir. Numunelerde kullanılan beton, C16/20 sınıfındadır. Kiriş donatı düzeninde ise S420 sınıfı nervürlü çelik kullanılmış olup, boyuna donatı olarak 4Ø12 ve enine donatı (etriye) olarak Ø6/10 aralıklı donatılar tercih edilmiştir.

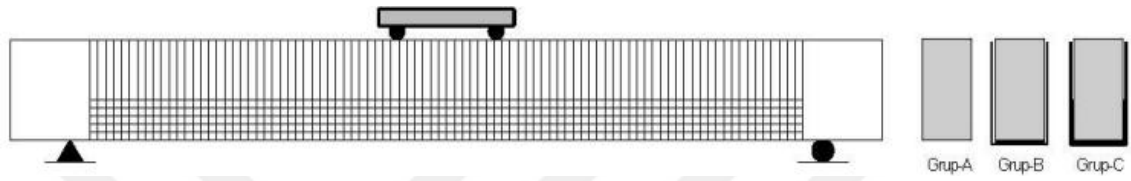


Şekil 2.1. Kiriş boyutları ve yükleme düzeneği (Özcan ve Yöntem,2005).

Deneysel çalışmada üç farklı grup oluşturulmuş olup, bu gruplar sırasıyla Grup-A, Grup-B ve Grup-C olarak isimlendirilmiştir. Grup-A'da yer alan iki adet numune, kontrol kirişi olarak tanımlanmış ve herhangi bir güçlendirme uygulanmaksızın test edilmiştir.

Grup-B’de toplam üç adet deney numunesi yer almakta olup, bu numunelerin kiriş çekme bölgelerine 15 cm genişliğinde, 24.75 mm<sup>2</sup> enkesit alanına sahip ve 180 cm uzunluğunda FRP kompozit malzeme, uygulama standartlarına uygun şekilde epoksi reçine kullanılarak monte edilmiştir.

Grup-C’de ise yine üç adet numune bulunmakta olup, bu numunelere Grup-B’de uygulanan FRP kompozitlerin iki katı olacak şekilde, toplamda yaklaşık 50 mm<sup>2</sup> enkesit alanına sahip FRP uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, farklı FRP miktarlarının yapısal performansa etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 2.2. Deneyde kullanılan kiriş grupları (Özcan ve Yöntem,2005).

Deney numuneleri, çevresel etkilerden kaynaklı toz, yağ, kir gibi yabancı maddelerden arındırıldıktan sonra, yüzeye öncelikle iki bileşenli FRP astarı uygulanmıştır. Ardından sırasıyla epoksi esaslı yapıştırıcı, tek yönlü FRP kumaşı ve üzerine iki kat yapıştırma reçinesi uygulanarak güçlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Uzun doğrultuda yerleştirilen FRP kumaşlarının montajı tamamlandıktan sonra, kısa doğrultudaki FRP kompozit malzemelerin yüzeye etkin biçimde yapışabilmesi amacıyla ilgili bölgelere yeniden epoksi reçine uygulanmış ve FRP elyafları yüzeye yerleştirilmiştir.



Şekil 2.3. Kiriş yüzeylerinin hazırlanması ve epoksi ile FRP liflerin yapıştırılması (Özcan ve Yöntem,2005).



Kirişe uygulanan yük, 20 ton kapasiteli manuel kontrollü hidrolik kriko yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yükleme sırasında, kirişin orta noktasında meydana gelen düşey ve yatay yer değiştirmeler, hassas şekil değiştirme ölçerler (deplasman dönüştürücüler) kullanılarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.4. Eğilme etkisi altında çalışan kiriş test düzeneği ve şekil değiştirme ölçümleri (Özcan ve Yöntem 2005).

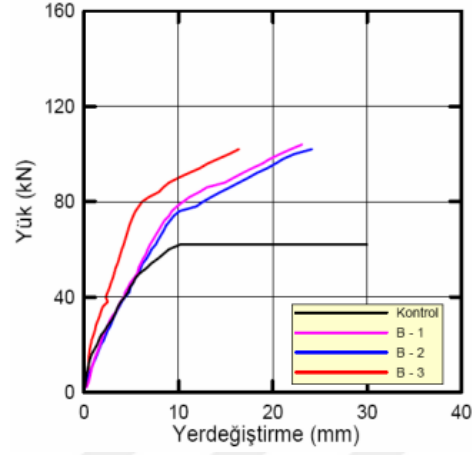
Yapılan üç noktalı eğilme deneyleri sonucunda, Grup-A kontrol numunelerinde ilk çatlaklar 49–51 kN yük aralığında meydana gelmiş; donatının akma davranışı ise sırasıyla 61 kN ve 63 kN yük seviyelerinde gözlemlenmiştir. Bu numuneler, taşıma kapasitelerine sırasıyla 32 mm ve 34 mm yer değiştirme seviyelerinde ulaşmıştır.

Grup-B numunelerinde elde edilen taşıma kapasitesi 102–104 kN aralığında gerçekleşmiş; kiriş orta noktasında 18–23 mm aralığında düşey yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Bu grupta, beton yüzeyinde ortalama %1,8, FRP yüzeyinde ise ortalama %8 oranında şekil değiştirme ölçülmüştür. Taşıma kapasitesi, FRP kompozitlerin beton yüzeyinden ayrılmasıyla sona ermiş; FRP'nin kopmasının ardından betonarme elemanda belirgin bir hasar gözlenmemiştir.

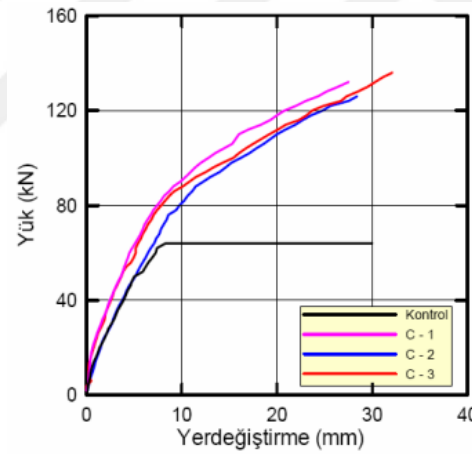
Grup-C numuneleri ise daha yüksek yapısal performans sergilemiştir. Bu grupta maksimum yük taşıma kapasitesi 127–136 kN aralığında ölçülmüş; kiriş orta noktasında 28–33 mm arasında yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Beton yüzeyindeki ortalama basınç şekil değiştirmesi %2,2, FRP yüzeyindeki ortalama çekme şekil değiştirmesi ise %1,25 olarak belirlenmiştir. Elde edilen yük-yer değiştirme ilişkileri Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8, Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da grafiksel olarak sunulmuştur.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, FRP kompozitlerle yapılan güçlendirme uygulamalarının kirişlerin taşıma kapasitesini anlamlı düzeyde artırdığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, kullanılan FRP miktarının artmasıyla birlikte bu etkinin daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir (Özcan ve Yöntem, 2005). Sonuç olarak kirişe

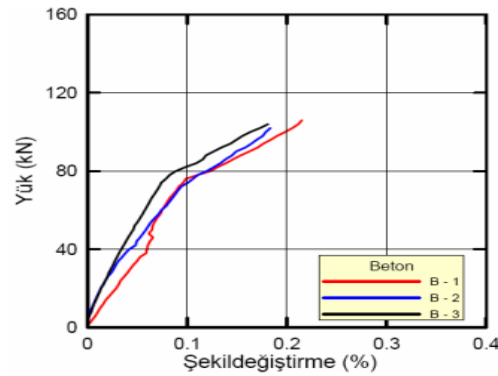
uygun olarak seçilmiş CFRP kompozitinin kirişlerin çekme bölgelerinde CFRP uygulama standartlarına uyularak yerleştirme yapıldığında kirişlerin eğilme dayanımlarını ciddi şekilde arttırdığı sonucuna varmışlardır.



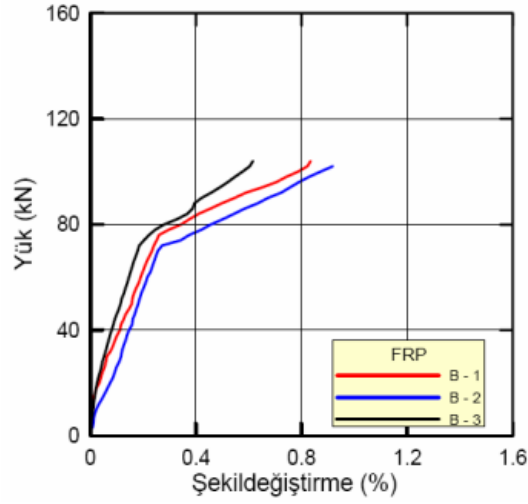
Şekil 2.5. Kontrol kirişi (Grup-A) ve Grup-B kirişlerinden elde edilen yük-yer değiştirme değişim grafikleri (Özcan ve Yöntem 2005).



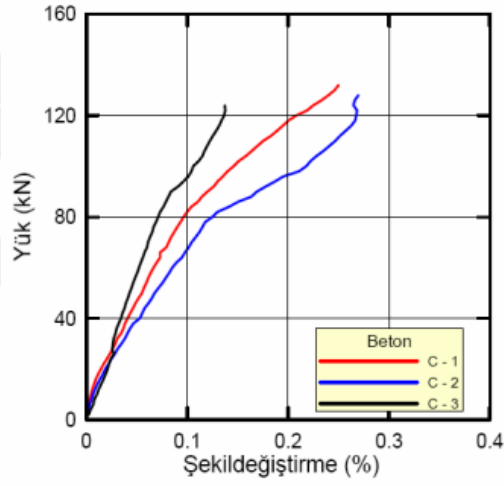
Şekil 2.6. Kontrol kirişi (Grup-A-2) ve Grup-C kirişlerinden elde edilen yük-yer değiştirme değişim grafikleri (Özcan ve Yöntem 2005).



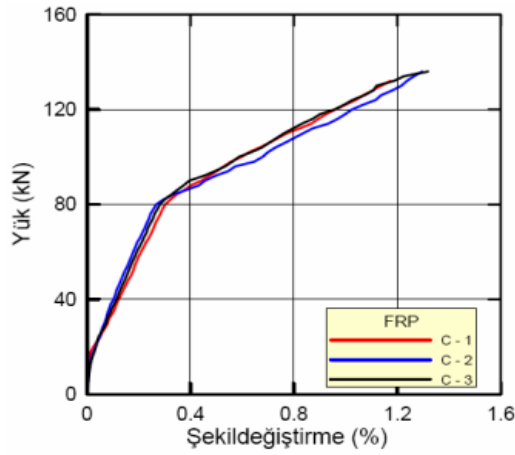
Şekil 2.7. Grup-B kirişlerinde, numune yüzeyinde yük-basınç şekil değiştirme değişim grafikleri (Özcan ve Yöntem 2005).



**Şekil 2.8.** Grup-B kirişlerinde, FRP yüzeyinde yük-çekme şekil değiştirme değişim grafikleri (Özcan ve Yöntem 2005).



**Şekil 2.9.** Grup-C kirişlerinde, numune yüzeyinde yük-basınç şekil değiştirme değişim grafikleri (Özcan ve Yöntem 2005).



**Şekil 2.10.** Grup-C kirişlerinde, FRP yüzeyinde yük-çekme şekil değiştirme değişim grafikleri (Özcan ve Yöntem 2005).

**Gökdemir ve ark. (2013)** tarafından gerçekleştirilen çalışmada, toplam beş adet kolon-kiriş birleşim numunesi üretilmiş; bunlardan dört adedi Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozitleri ile güçlendirilmiş, bir adedi ise güçlendirme uygulanmamış referans numunesi olarak kullanılmıştır.

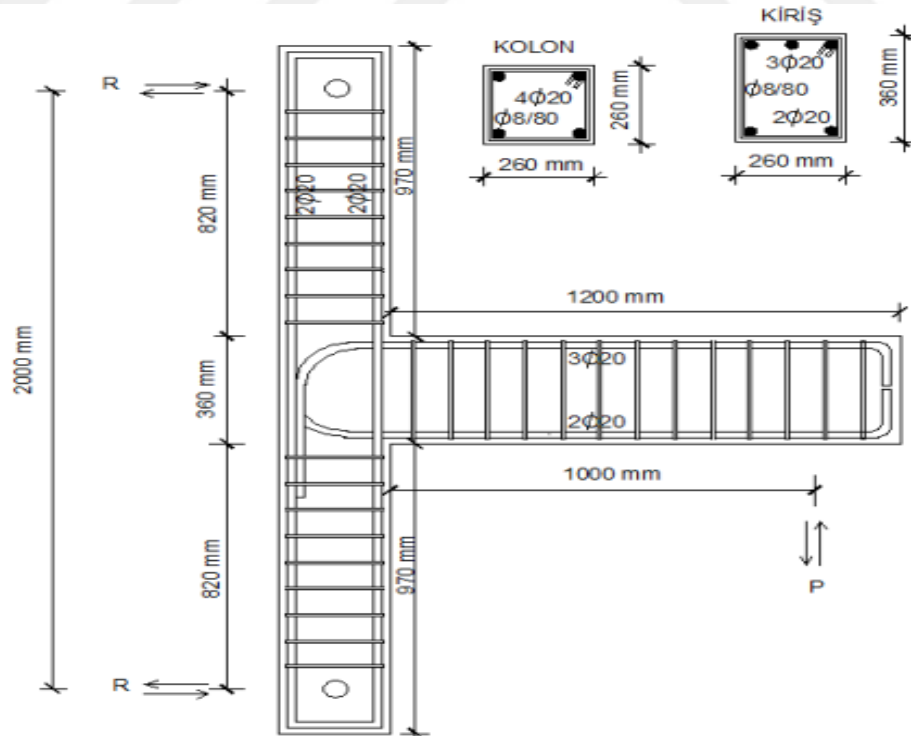
Deney numunelerinde kolon boyutları  $26 \times 26 \times 200$  cm, kiriş boyutları ise  $26 \times 36 \times 200$  cm olarak tasarlanmıştır. Güçlendirme uygulamaları, kolon-kiriş birleşim bölgelerine çapraz bağlar şeklinde yerleştirilen CFRP kompozit malzemelerle gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelerde C20 sınıfı beton kullanılmıştır.

Donatı düzenlemeleri şu şekilde yapılmıştır:

- Kolonlar: Boyuna donatılar S420 sınıfında  $4\phi 20$ , enine donatılar  $\phi 8/80$  mm aralıkla yerleştirilmiştir.
- Kirişler: Üst donatılar  $3\phi 20$ , alt donatılar ise  $2\phi 20$  olarak düzenlenmiştir.

Tüm numuneler TS 500 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine uygun şekilde üretilmiş olup, birleşim bölgelerinde etriye donatısı kullanılmamıştır.

Deney elemanlarının kesit özellikleri ve donatı düzenlemeleri Şekil 2.11 ve Çizelge 2.1’de detaylı olarak sunulmuştur.



**Şekil 2.11.** Deney elemanlarının boyutları ve donatı düzeni (Birleşim bölgesi donatısı gösterilmemiştir) (Gökdemir ve ark.,2013)

Çalışmada CFRP kompozitlerle yapılan güçlendirme uygulamasını ankrajlama yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Ankrajlama işlemi kapsamında, deney numunelerinde belirli noktalara delikler açılmış; bu deliklerin iç yüzeylerine epoksi reçine uygulanarak CFRP kompozitlerin yerleştirilmesi sağlanmıştır (Çizelge 2.1).

Kullanılan CFRP kompozitler, MBT MBRACE C10 tipi olup 0.165 mm kalınlığındadır. 180 mm genişliğindeki CFRP tabakalar, öncelikle epoksi reçineye batırılmış; ardından çelik donatıların etrafına rulo formunda sarılacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan CFRP ruloları, birleşim bölgesindeki boşluklardan çapraz doğrultuda geçirilmiş ve bu boşluklar epoksi reçine ile doldurularak ankrajlama tamamlanmıştır.

Ruloların yerleştirilmesinin ardından uç kısımları açılarak, birleşim bölgesindeki kolon ve kiriş yüzeylerine sargılama işlemi uygulanmış; böylece güçlendirme işlemi tamamlanmıştır.

**Çizelge 2.1.** Deney dizileri ve eleman özellikleri (Gökdemir ve ark.,2013)

| Diziler                 | Deney Elemanları | Birleşim Bölgesi Donatıları   | Birleşim Bölgesi Güçlendirme | Açıklama/Ankraj                            |
|-------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
| Referans                | RU               | Etriye, $\varnothing 8/50$ mm | -                            | Referans                                   |
|                         | CF               | -                             | 2 × 2 rulo diyag.            | Yelpazeli + epoksi                         |
| CFRP rulolu Güçlendirme | CFW1             | -                             | 2 × 2 rulo diyag.            | Sargılanmış yelpazeli + epoksi             |
|                         | CFW2             | -                             | 2 × 2 rulo diyag.            | Sargılanmış yelpazeli + epoksi             |
|                         | CFWL             | -                             | 2 × 2 rulo diyag.            | Sargılanmış yelpazeli + epoksi, bindirmeli |

Çizelge 2.2’de yer alan CFW1 numunesinde donatının akma davranışı gözlemlenmiş olmasına rağmen, numune beklenen eğilme kapasitesine ulaşamamıştır. Bu durumun nedeni deneysel belirsizlikler nedeniyle net olarak anlaşılamamış; bu nedenle deney tekrarlanarak CFW2 numunesi üzerinde yeniden uygulamışlardır. CFW2 deneyinde ise teknik olarak kabul edilebilir performans değerlerine ulaşmışlardır.

Aynı çizelgenin son sütununda, tek doğrultuda kullanılan CFRP kompozit malzemenin, ilgili yönetmeliklerde belirtilen minimum güçlendirme gerekliliklerinin kaç katına karşılık geldiği oranlı olarak gösterilmiştir. Bu değerlendirme, uygulanan CFRP miktarının yönetmelik şartlarıyla karşılaştırmalı analizine olanak sağlamıştır.

**Çizelge 2.2.** Deney elemanlarının sonuçları(Gökdemir ve ark.,2013)

| Deney Dizileri          | Deney Elemanları | Birleşim Bölgesi Donatısı | $P_{maks}$ (kN) | Kapasite Oranı $P_{maks} / P_y$ | $\delta y$ (m) | Süneklik Oranı $\delta 60 / \delta y$ | Rijitlik Oranı (kN/m) | Kiriş Eğilme Donatısı | Genel Başarı     | Birleşim Bölgesi Donatısı Yönetmelik Eşdeğeri |
|-------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------------------------|
| Referans                | RU               | Ş8/50mm etriye            | 144             | 1,02                            | -22            | -4,1                                  | -12                   | Aktı                  | Kabul edilebilir | 2 × Yönetmelik donatısı                       |
|                         | CF               | 2x2 rulo diyagonal        | 124             | 0,89                            | -20            | -2,3                                  | -10                   | Aktı                  | Kabul edilebilir | 2 × Yönetmelik donatısına eşdeğer             |
| CFRP Rulolu Güçlendirme | CFW1             | 2x2 rulo diyagonal        | 104             | 0,74                            | -22            | -2,8                                  | -13                   | Aktı                  | Yetersiz         | Şüpheli deney sonuçları                       |
|                         | CFW2             | 2x2 rulo diyagonal        | 123             | 0,89                            | -22            | -2,9                                  | -12                   | Aktı                  | Kabul edilebilir | 2 × Yönetmelik donatısına eşdeğer             |
|                         | CFWL             | 2x2 rulo diyagonal        | 126             | 0,9                             | -22            | -2,9                                  | -11                   | Aktı                  | Kabul edilebilir | 2 × Yönetmelik donatısına eşdeğer             |

Deney elemanlarında, kolon-kiriş birleşim bölgelerine her bir doğrultuda, ilgili yönetmeliklerde öngörülen minimum kesme donatısı miktarının yaklaşık iki katına eşdeğer CFRP ruloları yerleştirilerek çapraz yerleşim sağlanmıştır. Deneysel gözlemler, bu uygulamanın taşıma kapasitesi ve şekil değiştirme performansı açısından oldukça başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Özellikle CFRP kompozitlerin çapraz doğrultuda yerleştirilmesinin, birleşim bölgesinde kesme donatısı benzeri bir davranış sergileyerek sistemin genel performansını artırdığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, CFRP uygulamasının geleneksel etriye donatısının yerini tam anlamıyla alamayacağı da vurgulanmıştır. Zira etriyelerin sağladığı sargılama etkisi, CFRP kompozit malzemelerde aynı düzeyde elde edilememektedir.

Dolayısıyla CFRP uygulamaları, birleşim bölgesine özgü geleneksel donatı düzenlemelerinin yerine geçmekten ziyade, tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Sonuç olarak, yeterli miktarda CFRP kompozit malzemenin birleşim bölgelerine yerleştirilmesi ve uçlarının uygun şekilde ankrajlanması durumunda, birleşim bölgesi performansında kayda değer bir iyileşme sağlanabileceği sonucuna varmışlardır (Gökdemir ve ark., 2013).

**Köksal ve arkadaşları (2017)**, çalışmalarında Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozit malzemelerle güçlendirilmiş toplam yedi adet betonarme kiriş numunesi üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deney numuneleri 15×25×150 cm boyutlarında olup, iki farklı beton basınç dayanımına sahip olacak

şekilde üretilmiştir. İlk grup numuneler ortalama 25,7 MPa, ikinci grup ise 6,8 MPa beton basınç dayanımına sahiptir. Her iki grup için birer adet kontrol numunesi oluşturmuşlardır.

Güçlendirme uygulamaları kapsamında, bir numunenin yalnızca alt yüzeyine CFRP kompozit uygulanırken, diğer bir numunede CFRP malzeme hem alt hem de yan yüzeylere, çekme donatısını da kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. Tüm numuneler, ACI 440.2R-08 yönetmeliğinde belirtilen esaslara uygun olarak teste tabi tutulmuş ve elde edilen deneysel veriler ilgili yönetmelik kriterleriyle karşılaştırmışlardır.

Sonuçlar, beton basınç dayanımının CFRP elyaflarının yüzeye yapışma kapasitesini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, alt ve yan yüzeylerin birlikte CFRP ile güçlendirilmesinin kirişin taşıma kapasitesini belirgin şekilde yükselttiği ve göçme yüklerinin ACI 440.2R-08 yönetmeliğinde hesaplanan tasarım yüklerini sağladığını tespit etmişlerdir (Köksal ve arkadaşları (2017)).

**Unjoh ve arkadaşları (2000)**, Japonya'da 1923 Hyogo-Ken Nanbu depremi sonrasında yapı güvenliğini artırmaya yönelik geliştirilen yönetmeliklerin genel bir çerçevesini sunmuş ve depremler sonrası oluşan hasarların güçlendirme gerekliliklerine etkisini istatistiksel olarak incelemişlerdir. Yürüttükleri deneysel çalışmalarda, kare kesitli betonarme köprü ayakları hem çelik manto hem de Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) elyaflarla güçlendirilmiştir.

- Çelik manto uygulamaları sonucunda, eğilme rijitliğinde ve taşıma kapasitesinde artış sağlanmış; süneklik değerlerinde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir.
- CFRP kompozitlerle yapılan güçlendirme uygulamaları ise gevrek kesme göçmelerini önlemiş; CFRP sarım sayısının artırılmasıyla birlikte enerji yutma kapasitesinde ve taşıma gücünde anlamlı artışlar elde edilmiştir (Unjoh ve ark,2000).

**Sümer (2010)**, hasar görmüş betonarme kirişlerin Fiber Takviyeli Polimer (FRP) ile güçlendirilmesine yönelik sayısal bir modelleme çalışması gerçekleştirmiştir. Analizlerde ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış; hasarlı deney elemanları, literatürdeki deneysel veriler doğrultusunda modellenmiştir. Modellemede gözlemlenen çatlaklar dikkate alınarak farklı çatlak yüksekliğine sahip kirişler değerlendirilmiş ve toplamda 192 farklı model ile parametrik analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çatlak yüksekliğinin moment taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip

olduğunu; buna karşılık çatlak genişliği ve çatlak aralığının sonuçlar üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymuştur.

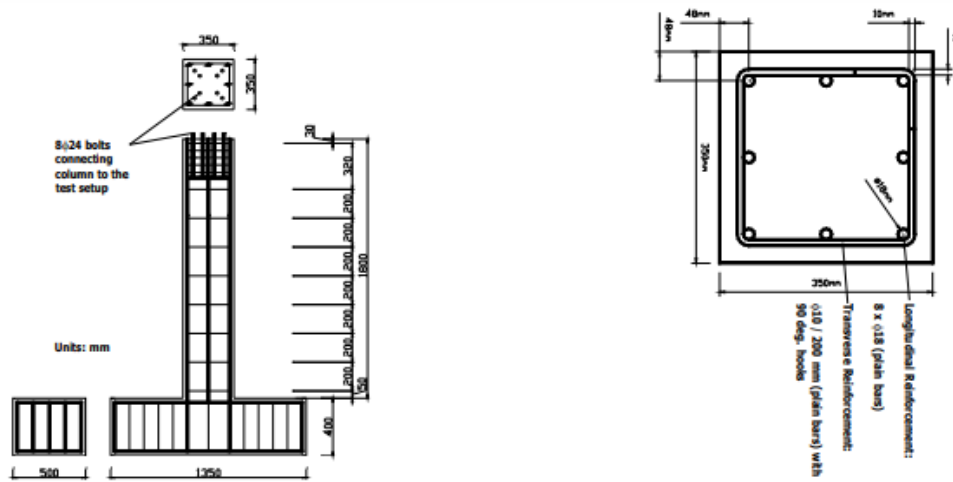
**Nadeem ve arkadaşları (2001)**, eğilmeye karşı yeterli, kesmeye karşı zayıf üç betonarme kiriş üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

- Birinci numune, güçlendirme uygulanmadan kontrol kirişi olarak test etmişlerdir.
- İkinci numune, 90° açılı CFRP şeritlerle kesme yönünde güçlendirmişlerdir.
- Üçüncü numune ise 30° açılı CFRP şeritlerle kesme yönünde güçlendirmişlerdir.

Elde edilen bulgular, her iki CFRP uygulamasının da kesme taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Özellikle 30° açılı CFRP şeritlerin, çapraz çatlakların ilerlemesini daha etkin biçimde engellediği; bu nedenle hem taşıma gücünü hem de deplasman kapasitesini daha fazla artırdığı belirlenmiştir. Kontrol numunesinde göçme, kesme çatlağının 45° açıyla ilerlemesi sonucu meydana gelmiştir.

**Özcebe ve ark. (2006)**, nervürsüz düz donatılı, yetersiz enine donatıya sahip ve düşük dayanımlı betonarme kolonların plastik mafsallı bölgelerine uygulanan CFRP kompozitinin etkisini ve CFRP katman sayısının güçlendirmeye olan etkisini incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan numuneler, 135×50×40 cm ölçülerinde kolon temeline bağlı, 35×35×200 cm boyutlarındadır. Şekil 2.12’de numune detayları gösterilmiştir. Numuneler, gerçek döküm koşullarını temsil etmek amacıyla kolon ve temel birlikte, dik olarak aynı anda dökülmüştür. Türkiye’de yaygın olan yetersiz detaylandırmayı simüle etmek için boyuna donatı olarak 8 adet 18 mm çapında düz nervürsüz donatı ve enine donatı olarak 90° kancalı, 10 mm çapında ve 200 mm aralıklı düz donatı kullanılmıştır. Beton karışımı 28 günlük basınç dayanımı 15 MPa olacak şekilde tasarlanmış ve Portland çimentosu ile maksimum 15 mm dane çapına sahip agregası tercih edilmiştir. Betonun homojenliğini sağlamak için kalıplara vibratör uygulanarak segregasyonu önlenmiştir. Donatının mekanik özellikleri ise 293 MPa akma gerilmesi ve 420 MPa kopma gerilmesi olarak ölçmüştür. Temelin donatısı ise, test bölgesi dışında hasarı önlemek amacıyla, çekme ve basınç bölgelerinde 4’er adet 16 mm çapında nervürlü boyuna donatı ve 8 mm çapında enine donatılardan oluşturmuşlardır.





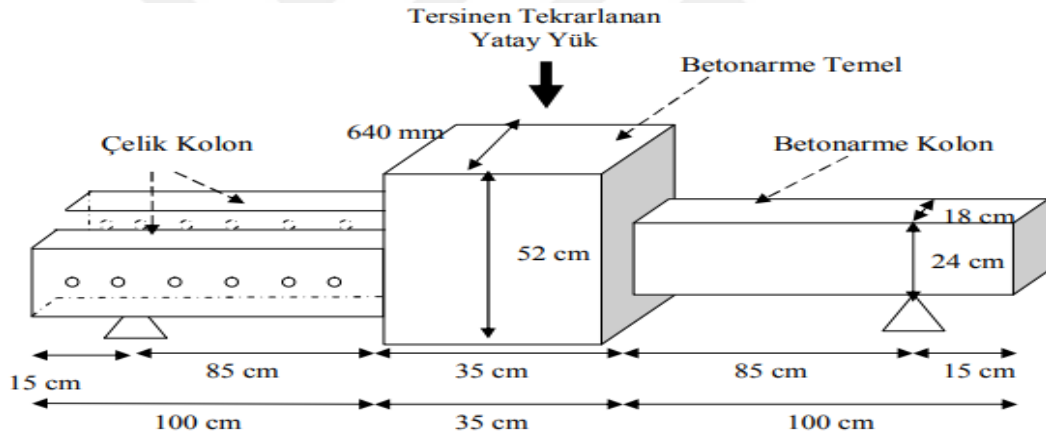
Şekil 2.12. Numune detayları (Özcebe ve ark. (2006))

Deneylerde numuneler, deprem etkilerini simüle etmek için sabit eksenel yük ile yüklenmiş ve tekrarlı yatay yüklerle test etmişlerdir. Yatay yük uygulanmadan önce, numuneler deney düzeneğine sabitlenerek eksenel yüke maruz bırakılmıştır. CFRP ile güçlendirme, yük altında yapılmış ve ardından numuneler bir hafta boyunca eksenel yük altında bekletilmiştir. Daha sonra, numuneler yatay yük altında test edilerek yer değiştirme oranları %0,5'lik artışlarla %3'e kadar uygulanmış ve her yük seviyesinde üçer tekrar yapmışlardır. Ardından %1'lik artışlarla iki tekrar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, düşük dayanımlı ve yetersiz donatılı numunelerin plastik mafsallık bölgelerinin CFRP ile güçlendirilmesinin, sismik davranışlar açısından dayanım, yer değiştirme ve süneklikte önemli artışlar sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, eksenel yük altında güçlendirme yapılmasının dayanımda belirgin bir artış yaratmadığı ve eksenel yük uygulanmamış kolonlarla güçlendirme sonrası kolonların dayanımlarının benzer çıktığı vurgulanmıştır. Sonuç olarak, yetersiz betonarme kolonların güçlendirilmesinde donatı sıyrılması etkilerinin göz önünde bulundurulması ve buna bağlı yer değiştirmelere dikkat edilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Özcebe ve ark., 2006).

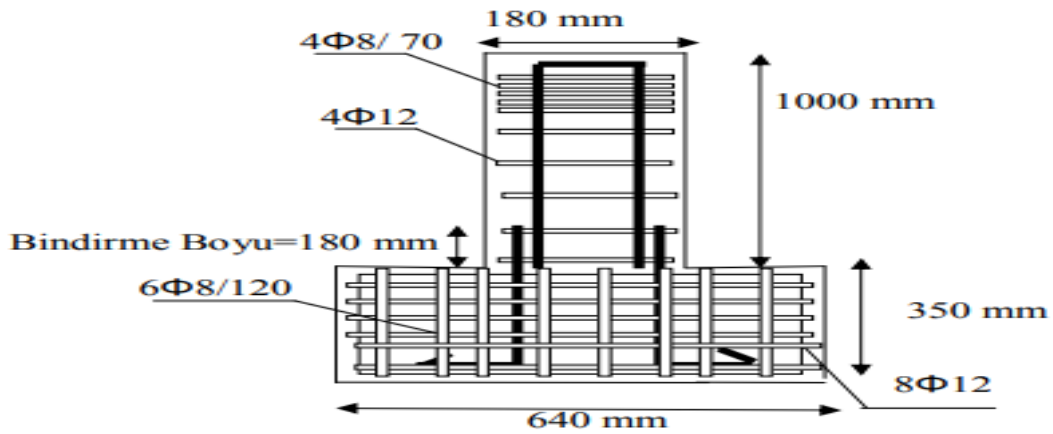
**Yıldız (2006)**, deneysel çalışmasında betonarme kolonlara uygulanan Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) kompozit güçlendirmesinin moment kapasitesindeki artışları incelemiştir. Moment kapasitesindeki artışın kesme kuvvetine karşı yeterli olması amacıyla, numunelere ek olarak enine yapıştırılan Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan kolon numuneleri, sabit eksenel yük

altında tutulmuş ve üzerine artan yükler uygulamışlardır. Deney numuneleri, 18×24 cm enkesit ölçülerinde toplam 8 adet kolon şeklinde üretilmiştir. Deneyde, aynı beton kalitesi ve donatı özelliklerine sahip dört adet referans kontrol numunesi kullanılmıştır; bunların ikisi sürekli boyuna donatıya sahipken, diğer ikisi bindirmeli boyuna donatı ile donatılmıştır. Ayrıca, CFRP kompozitinin ankrajı için temel üzerine 12 mm çapında ve 120 mm uzunluğunda delikler açılarak ankraj elemanları yerleştirmişlerdir. Deney sırasında, ankrajların açılması ve patlaması sonucunda numunelerde göçmeler meydana gelmiş ve gücü tüketmişlerdir. Sonuç olarak, bindirmeli ekli donatının güçlendirilmesinde CFRP elyaflarının yeterli dayanımı sağlamadığı ve bu nedenle güçlendirme uygulamasının beklenen performansı gösteremediğini tespit etmişlerdir (Yıldız, 2006).

Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te sırasıyla numunelerin genel görünümü ve donatı iskeletinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.13. Numunelerin genel görünümü (Yıldız,2006).



Şekil 2.14. Numune donatı iskeletinin şematik görünümü (Yıldız,2006).

**Kandemir (2018)**, çalışmasında kare kesitli (15×15×50 cm) betonarme kolon numunelerinin Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kompozitlerle güçlendirilmesi sonucunda eksenel yük kapasitesinde meydana gelen değişimi incelemiştir. Bu amaçla, yönetmelik standartlarına uygun olmayan ve düşük basınç dayanımına sahip betonlardan oluşan toplam 11 adet kısa kolon numunesi üretilmiştir. Güçlendirme uygulamaları CFRP kompozitlerle gerçekleştirilmiş; kolonların eksenel taşıma kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada temel değişkenler olarak CFRP kompozitlerin genişliği, uzunluğu ve uygulama aralıkları dikkate alınmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilerle yük-deplasman grafikleri, deplasman sünelik oranları ve taşıma kapasitesi gibi yapısal performans parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kısa kolonlarda eksenel taşıma kapasitesinde %53, başlangıç rijitliğinde ise %70 oranında artış sağlandığı rapor edilmiştir (Kandemir, 2018).

**Haroun ve ark. (2001)**, gerçekleştirdikleri deneysel çalışmayı iki aşamalı olarak planlamışlardır. İlk aşamada, kesme dayanımı ve sargılama etkisini artırmak amacıyla CFRP kompozitlerle enine doğrultuda sarılmış daire ve dikdörtgen kesitli kısa kolonlar üretilmiş ve test edilmiştir. Kontrol numunesinde gözlemlenen gevrek kesme kırılması, CFRP ile güçlendirme sonrası önlenmiş; numune ileri düzeyde sünelik davranış sergileyerek eğilme kırılması ile göçmüştür. İkinci aşamada ise, bindirmeli ekli kolonlara CFRP kompozit malzeme enine doğrultuda sarılarak güçlendirme uygulanmıştır. Dikdörtgen kesitli kolonlarda sınırlı performans artışı gözlemlenirken, daire kesitli kolonlarda aderans çözünmesinden kaynaklanan erken göçme davranışı CFRP uygulaması ile engellenmiştir (Haroun ve ark. (2001)).

## **2.2. Korozyon Hasarlı Betonarme Kolon ve Kirişlerin Güçlendirilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar**

**Kalyoncuoğlu ve ark. (2013)**, çalışmalarında nervürsüz düz donatılı ve düşük dayanımlı betondan üretilmiş dört adet deney numunesinin deprem etkileri altındaki performansını incelemişlerdir. Numunelerden biri kontrol referans numunesi olarak kullanılırken, diğer üçü korozyon hasarına maruz bırakılmıştır. Korozyon hasarına uğrayan numunelerden biri test edilmiş, diğer iki numune ise korozyon sonrası onarım yapılarak güçlendirilmiştir. Numunelerde kullanılan nervürsüz düz donatının ve düşük

beton dayanımının, korozyon nedeniyle beton ile donatı arasındaki aderansın kaybolmasına sebep olduğu ve bunun sonucunda teorik eğilme dayanımına ulaşamadığını tespit etmişlerdir. Korozyon sonrası yapılan yapısal tamir harcı uygulaması ve ardından FRP ile güçlendirme, deney numunesinin dayanım ve sünekliğinde önemli artışlar sağlamışlardır (Kalyoncuoğlu ve ark., 2013).

**Ghaffari ve ark. (2013)**, korozyon hasarına uğramış kolonların ekonomik güçlendirme yöntemleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kontrol numunesi dahil toplam dört kolon numunesi üretilmiş, referans dışındaki üç numune laboratuvar ortamında hızlandırılmış korozyona tabi tutularak donatı kesitlerinde %46 kayıp oluşturulmuştur. Korozyon hasarlı numunelerden ikisi güçlendirilmiş; düşük maliyetli bir teknik olarak, donatı filizlerinde oluşan korozyon kaynaklı kütle kaybı kaynakla doldurulmuş ve filizler birbirine kaynatılarak uygulama tamamlanmıştır. Güçlendirilmiş numuneler tersinir tekrarlı yatay yükler altında test edilmiş, elde edilen yük-deplasman verileri ile yapısal grafikleri oluşturmuşlardır. Sonuç olarak yük taşıma kapasitelerinde sınırlı bir artışa karşın dayanım, rijitlik, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesinde kayda değer iyileşmeler olmadığını göstermişlerdir (Ghaffari ve ark., 2013).

**Yalçiner ve ark. (2019)**, deneysel çalışmalarında 1:1 ölçekli beş adet betonarme kolon numunesini farklı seviyelerde hızlandırılmış korozyon işlemine tabi tutmuşlardır. Korozyona maruz kalan numuneler, eksenel yük altında test edilerek akma, süneklik ve enerji sönümleme gibi yapısal davranışları değerlendirilmiştir. Numunelerin kırımından sonra donatılar çıkarılarak tartılmış ve korozyon oranlarını hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlarda, artan korozyon oranıyla birlikte süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi gibi yapısal parametrelerin azaldığını ortaya koymuşlardır (Yalçiner ve ark., 2019).

**Lee ve ark. (2003)**, CFRP levhalarla güçlendirilmiş, farklı seviyelerde korozyona uğramış betonarme kolon numuneleri üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çevrimsel yüklemeler altında gerçekleştirilen testler sonucunda, yapısal davranıştaki bozulmanın temel nedeninin kabuk betonun dökülmesi ve donatıların mekanik özelliklerinin korozyon nedeniyle zayıflaması olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek korozyon hasarı görülen enine donatılarda burkulma nedeniyle ani ve gevrek kesme kırılmaları gözlenmiştir. Karbon elyaf levhalarla kesme dayanımı artırılan numunelerde, bağ çözümleri ve kesme çatlaklarının ilerlemesi engellenmiş, bu sargı etkisi sayesinde süneklikte belirli bir artış sağlamışlardır (Lee ve ark., 2003).

### 3.METERYAL VE YÖNTEM

Bu deneysel çalışmada korozyon hasarına maruz kalan betonarme kolon kiriş birleşim bölgelerinin CFRP kompozitler ile güçlendirilip depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yatay yükler altında davranışlarının test edilmesi amaçlanmıştır.

#### 3.1. Deney Numuneleri

Numunelerin boyutlandırılması, donatı detaylandırması ve malzeme özellikleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY, 2018) ile TS-500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500-2000) standardı dikkate alınarak belirlenmiştir. Böylece, deneysel verilerin mühendislik uygulamalarına referans olabilmesi ve gerçek yapı sistemlerini temsil edecek nitelikte olması amaçlanmıştır.

##### 3.1.1. Deney numunelerinin özellikleri

Çalışmanın amacı doğrultusunda toplam 6 adet betonarme kolon-kiriş birleşim numunesi üretilmiştir. Tüm deney elemanlarında geometrik boyutlar ve donatı detayları özdeşdir. Kiriş boyutları 125 x 250 mm, kolon boyutları 250 x 250 mm ve kiriş ve kolonların uzunlukları 1000 mm olarak üretilmiştir. Kiriş elemanlarında kesme davranışında en önemli faktörlerden birisi olan “kesme açıklığı/etkili derinlik” ( $a/d$ ) 3,74 olarak belirlenmiştir. Deneyde kullanılan kolon ve kiriş elemanlarının boyut ve donatı detayları Şekil 3.1. 'de gösterilmiştir.

$$L_{top(kolon)} = 1000 \text{ mm}$$

$$L_{top(kiriş)} = 1000 \text{ mm}$$

$$a = 860 \text{ mm}$$

$$d = 230 \text{ mm}$$

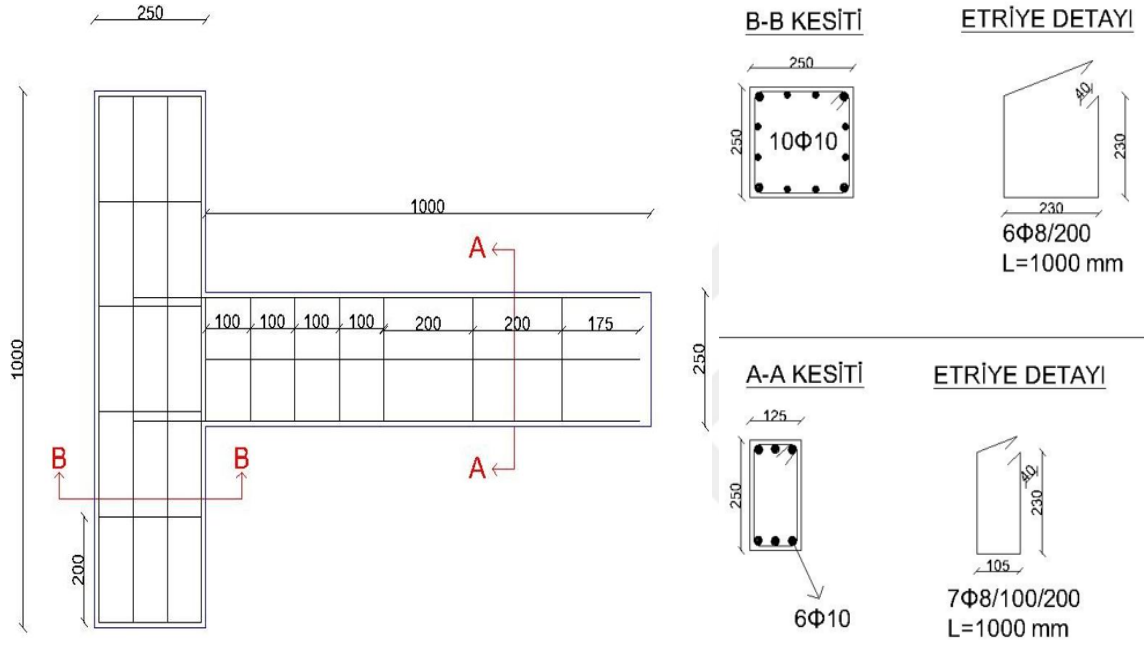
$$b_w = 125 \text{ mm}$$

$$h = 250 \text{ mm}$$

$$d' = 10 \text{ mm}$$

$$a/d = 3.74$$

Deney elemanlarının kiriş bölgesinde  $6\phi 10$  mm boyuna donatı ve  $7\phi 8/100/200$  mm aralıklı enine donatı yerleştirilmiş ve kolonlarında ise  $10\phi 10$  mm boyuna donatı ve  $6\phi 8/200$  enine donatı kullanılmıştır. Donatıların tasarlanmasında kolon ve kiriş etriyelerinin kancaları TBDY-2018 şartlarına göre ( $135^\circ$ ) bükülmüştür. Numune isimleri, kolon ve kirişlerin donatı detayları, güçlendirme malzemesinin türü çizelge 3.1’de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı detayı (Ölçüler mm cinsindendir)

**Çizelge 3.1.** Kiriş deney numunelerinin kesit ve donatı detayları

| Numune Adı             | Kiriş                  |           |           |               |                    |                 |                          | Kolon                  |           |           |                  |                 |                          |                            |
|------------------------|------------------------|-----------|-----------|---------------|--------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------|-----------|------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|
|                        | b <sub>w</sub><br>(mm) | h<br>(mm) | L<br>(mm) | Ana<br>Donatı | Montaj<br>Donatısı | Enine<br>Donatı | Güçlendirme<br>Malzemesi | b <sub>w</sub><br>(mm) | h<br>(mm) | L<br>(mm) | Boyuna<br>donatı | Enine<br>Donatı | Güçlendirme<br>Malzemesi | Korozyon<br>Miktarı<br>(%) |
| REF                    | 125                    | 250       | 1000      | 3φ10          | 3φ10               | 7φ8/100<br>/200 | -                        | 250                    | 250       | 1000      | 10φ10            | 6φ8/200         | -                        | 0                          |
| REF+CFRP               | 125                    | 250       | 1000      | 3φ10          | 3φ10               | 7φ8/100<br>/200 | CFRP                     | 250                    | 250       | 1000      | 10φ10            | 6φ8/200         | CFRP                     | 0                          |
| REF+%20COR             | 125                    | 250       | 1000      | 3φ10          | 3φ10               | 7φ8/100<br>/200 | -                        | 250                    | 250       | 1000      | 10φ10            | 6φ8/200         | -                        | 20                         |
| CFRP+%20 COR           | 125                    | 250       | 1000      | 3φ10          | 3φ10               | 7φ8/100<br>/200 | CFRP                     | 250                    | 250       | 1000      | 10φ10            | 6φ8/200         | CFRP                     | 20                         |
| %20 COR+CFRP           | 125                    | 250       | 1000      | 3φ10          | 3φ10               | 7φ8/100<br>/200 | CFRP                     | 250                    | 250       | 1000      | 10φ10            | 6φ8/200         | CFRP                     | 20                         |
| %10COR+CFRP+<br>%10COR | 125                    | 250       | 1000      | 3φ10          | 3φ10               | 7φ8/100<br>/200 | CFRP                     | 250                    | 250       | 1000      | 10φ10            | 6φ8/200         | CFRP                     | 10+10                      |

- REF: Güçlendirme işlemi yapılmamış referans numunesi
- REF+CFRP: CFRP ile güçlendirilmiş referans numunesi
- REF+%20COR: 64 gün hızlandırılmış korozyona uğratılmış (%20) korozyon referans numunesi
- CFRP+%20COR: CFRP ile güçlendirildikten sonra %20 hızlandırılmış korozyon hasarına uğratılmış numune
- %20 COR+CFRP: 64 gün hızlandırılmış korozyona uğratılmış (%20) ve sonrasında CFRP ile güçlendirilmiş numune
- %10COR+CFRP+%10 COR: 32 gün %10 korozyona uğratılmış sonrasında CFRP ile güçlendirilmiş ve tekrar 32 gün hızlandırılmış %10 korozyona uğratılmış numune

### 3.2. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri

#### 3.2.1. Beton mekanik özellikleri

Çimento, agrega, su ve gerek duyulduğunda ilave katkı maddelerini bir araya getirilip karışım oranlarına dikkat edilerek karıştırılmasıyla elde edilmiş ve uygun bakım koşulları altında sertleşmeye bırakılmış kompozit malzemeye beton denilmektedir.

Bu deneysel çalışmada özdeş 6 adet numune geleneksel beton kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan geleneksel betonun basınç dayanımını tespit etmek için, beton döküm sırasında deney numunelerinden TS EN 12350-1, TS EN 12390-1, TS EN 12390-2 ve TS-500 standartlarına uygun olarak beton basınç dayanımını tespit etmeye yönelik 15x15x15 boyutlarında altı adet küp numune alınmıştır. Alınan numuneler Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Araştırma Laboratuvarında 28 gün kür uygulanması için kür havuzunda bekletilmiştir. 28 günün sonunda havuzdan çıkartılıp beton basınç dayanımının belirlenmesi için numuneler beton test pres makinesinde test edilmiştir. Şekil 3.2’de beton basınç dayanımı test cihazındaki numune görüntüsü, Şekil 3.3’de ise dayanım testleri tamamlanmış numunelerin görseli verilmiştir.



Şekil 3.2. Beton basınç dayanımı test cihazındaki numune görüntüsü





**Şekil 3.3.** Dayanım testi tamamlanmış numuneler

Çizelge 3.2’de beton basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Her numune için küp dayanımının 0.85’i alınarak silindir dayanımları bulunmuştur. Yapılan testlere göre ortalama küp numune beton basınç dayanımı 39 MPa ve silindir dayanımı 33,25 MPa ölçülmüştür.

**Çizelge 3.2.** Beton basınç dayanımı sonuçları

| Numune No | Maximum yük (KN) | Küp Dayanımı | Silindir Dayanımı |
|-----------|------------------|--------------|-------------------|
| 1         | 92,50            | 41,11        | 34,94             |
| 2         | 80,90            | 35,95        | 30,56             |
| 3         | 89,80            | 39,91        | 33,92             |
| 4         | 88,90            | 39,51        | 33,58             |
| 5         | 87,60            | 38,93        | 33,09             |
| 6         | 88,40            | 39,28        | 33,39             |
| Ortalama  | 88,01            | 39,11        | 33,25             |

### 3.2.2. Donatı mekanik özellikleri

Deney elemanlarında kullanılan donatılardan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini elde etmek için 4’er adet 500 mm uzunluğa sahip kupon numuneler üzerinde çelik

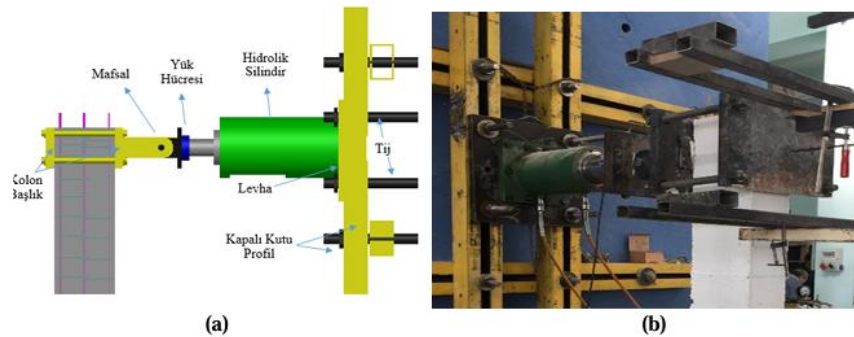
çekme deneyi yapılmıştır. Donatı çeliklerinin TS-708’de verilen sınır değerleri sağladıkları görülmüştür. (TS708, 2016). Kuponlara yapılan çelik çekme test deneyinde, boyuna donatıların ortalama akma dayanımları 435 MPa, enine donatıların ortalama akma dayanımları 422 MPa değerinde olduğu görülmüştür. Boyuna donatının ortalama kopma dayanımı 572 MPa, enine donatıların ortalama kopma dayanımı 569 MPa olarak elde edilmiştir.

### 3.3. Deney Düzeneği ve Ölçme Tekniği

Deneyisel çalışmada kullanılmak üzere üretilen toplam 6 adet deney numunesi tersinir-tekrarlanır yatay yüklemeye maruz bırakılmak için Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Araştırma Laboratuvarında test edilmek üzere hazırlanmıştır.

#### 3.3.1. Deney düzeneği

Kolon kiriş birleşim noktasının performansı araştırıldığı için deney elemanlarının kolon uç bölgeleri kaymayı önlemek adına deney düzeneğine sabitlenmiştir. Deney düzeneğinin uç mafsalsal kısmı ise kiriş başlığına yerleştirilerek 550 kN basınç ve 550 kN çekme kapasiteli bir hidrolik silindir aracılığıyla yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4’de yükleme düzeneğinin şematik ve deneysel görünümü verilmiştir.



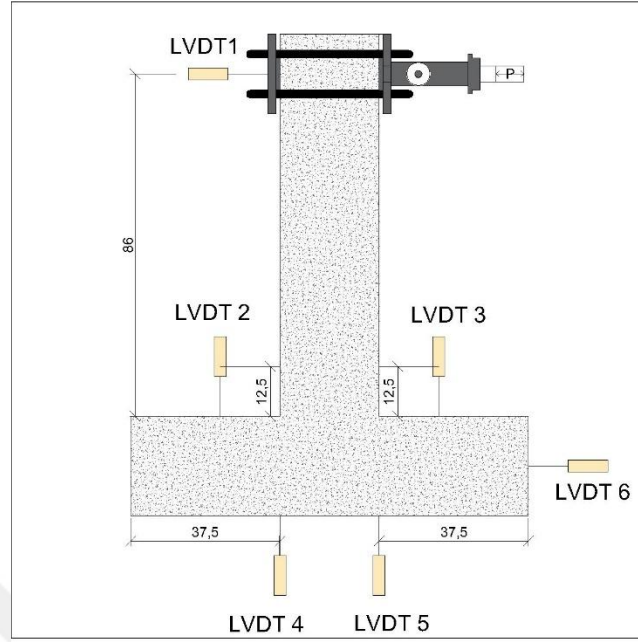
Şekil 3.4. Yükleme sisteminin (a) şematik, (b) deneysel görünümü (Koçer,2020)

### 3.3.2. Ölçme tekniği

Deney elemanlarında oluşan deformasyonların ölçülebilmesi için numunelerin çeşitli yerlerinden potansiyometrik cetveller ile deplasman ölçümü yapılmıştır. Hidrolik silindirin ucuna koyulan yük hücresinden pozitif (+) ve negatif (-) yük değerleri loadcell ve LVDT 'den elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney elemanlarına itme ve çekme şeklinde hidrolik krika ile uygulanan yük, yük hücresi (loadcell) ile yük ölçümleri ise LVDT (Lineer variable differential transformer) cihaz ile yapılmıştır. Deneyisel çalışma sırasında yükleme hızı 0.50 mm/sn olarak uygulanmıştır. Şekil 3.5'de ise laboratuvar ortamındaki yükleme düzeneği görüntüsü verilmiştir. Deneyler sırasında yük hücreleri ve potansiyometrik cetvellerden elde edilen veriler, 125 milisaniye (ms) aralıklar ile deplasman ve yük ölçümleri bilgisayar ortamına aktararak kaydedilmiş ve kayıt altına alınmıştır. LVDT cihazlarının deney numuneleri üzerindeki konumlandırılması Şekil 3.6'daki görselde gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Deney düzeneği görüntüsü



**Şekil 3.6.** LVDT cihazlarının deney numuneleri üzerindeki konumlandırılması

- LVDT 1: Yükleme başlığına yerleştirilmiş olup uygulanan yük altındaki toplam deplasmanı ölçmek amacıyla kullanılmıştır.
- LVDT 2 ve LVDT 3: Kiriş-kolon birleşim bölgesine, kolon yüzeyine yakın noktalara yerleştirilmiştir. Bu iki LVDT, kolon yüzeyinde oluşan yer değiştirmeleri ölçerek birleşim bölgesindeki eğrilik ve dönme davranışını tespit etmeye yöneliktir.
- LVDT 4 ve LVDT 5: Kirişin alt yüzeyine, kolon ekseninden eşit uzaklıklara (37,5 cm) yerleştirilmiştir. Bu sensörler, kiriş ucundaki deplasman ve dönme miktarını belirlemek için kullanılır.
- LVDT 6: Kiriş ucuna yerleştirilmiş olup serbest uca yakın bölgede meydana gelen net deplasmanı ölçmeyi amaçlamaktadır.

### 3.3.3. Yükleme protokolü

Deneysel çalışmada 6 adet numunenin birleşim noktaları tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Yüklemede a/d oranı 3,74 olarak belirlenmiştir. Tüm deney elemanlarına aynı yükleme adımları uygulanmıştır. Yapılan yükleme adımları şu şekildedir;

• Numuneler, 550 kN kapasiteli yük hücresi kullanılarak 550 kN basınç ve 550 kN çekme kapasiteli bir hidrolik silindir vasıtasıyla yüklenmiştir.

• Her deney elemanı için göçme noktasına ulaşana dek ileri (+) ve geri (-) olarak çevrimler uygulanmıştır. Her çevrim ikişer kez tekrarlanmıştır.

• Deneysel çalışma sırasında yükleme hızı 0.50 mm/sn olarak uygulanmıştır.

• Her numuneye göreli kat ötelemesine göre özdeş yükleme protokolü uygulanmıştır

Deney elemanlarına uygulanan yükleme protokolü Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Yükleme protokolü

| Çevrim No | Görelî Kat<br>Ötelemesi<br>(mm/mm) | Deplasman(mm) |
|-----------|------------------------------------|---------------|
| a/d=3,74  |                                    |               |
| +1        | 0,005                              | 4,30          |
| -1        | 0,005                              | 4,30          |
| +1        | 0,005                              | 4,30          |
| -1        | 0,005                              | 4,30          |
| +2        | 0,01                               | 8,60          |
| -2        | 0,01                               | 8,60          |
| +2        | 0,01                               | 8,60          |
| -2        | 0,01                               | 8,60          |
| +3        | 0,015                              | 12,90         |
| -3        | 0,015                              | 12,90         |
| +3        | 0,015                              | 12,90         |
| -3        | 0,015                              | 12,90         |
| +4        | 0,02                               | 17,20         |
| -4        | 0,02                               | 17,20         |
| +4        | 0,02                               | 17,20         |
| -4        | 0,02                               | 17,20         |
| +5        | 0,025                              | 21,50         |
| -5        | 0,025                              | 21,50         |
| +5        | 0,025                              | 21,50         |
| -5        | 0,025                              | 21,50         |
| +6        | 0,03                               | 25,80         |
| -6        | 0,03                               | 25,80         |
| +6        | 0,03                               | 25,80         |
| -6        | 0,03                               | 25,80         |
| +7        | 0,035                              | 30,10         |
| -7        | 0,035                              | 30,10         |
| +7        | 0,035                              | 30,10         |
| -7        | 0,035                              | 30,10         |
| +8        | 0,04                               | 34,40         |
| -8        | 0,04                               | 34,40         |
| +8        | 0,04                               | 34,40         |
| -8        | 0,04                               | 34,40         |
| +9        | 0,045                              | 38,70         |
| -9        | 0,045                              | 38,70         |
| +9        | 0,045                              | 38,70         |
| -9        | 0,045                              | 38,70         |

|     |       |       |
|-----|-------|-------|
| +10 | 0,05  | 43,00 |
| -10 | 0,05  | 43,00 |
| +10 | 0,05  | 43,00 |
| -10 | 0,05  | 43,00 |
| +11 | 0,055 | 47,30 |
| -11 | 0,055 | 47,30 |
| +11 | 0,055 | 47,30 |
| -11 | 0,055 | 47,30 |
| +12 | 0,06  | 51,60 |
| -12 | 0,06  | 51,60 |
| +12 | 0,06  | 51,60 |
| -12 | 0,06  | 51,60 |

### 3.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması

#### 3.4.1. Deney elemanları kalıplarının üretimi

Bu çalışma kapsamında, toplam altı adet deney numunesinin üretimi amacıyla plywood esaslı ahşap kalıp tercih edilmiştir. Kalıpların beton dökümü sırasında sızdırmazlığını sağlamak ve şekil stabilitesini korumak amacıyla, birleşim noktaları belirli aralıklarla akıllı vida kullanılarak mekanik olarak sabitlenmiştir. Deney elemanları için hazırlanan kalıpların görüntüsü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Deney elemanları için hazırlanan kalıplar

#### 3.4.2. Deney elemanları donatılarının hazır hale getirilmesi

Laboratuvar ortamında gerçekleşen donatıların işlenme sürecinde, öncelikle proje kapsamında belirlenen donatı ölçülerine uygunluk esas alınmıştır. Bu doğrultuda, donatı hassasiyetle ölçülerek ve demir kesme makinesi kullanılarak kesim işlemi

gerçekleştirilmiştir. Kesim sonrası donatılar, işlem kolaylığı ve düzen sağlamak amacıyla sehpa üzerine yerleştirilmiştir. Ardından, donatılara projesinde belirtilen şekil ve açılar doğrultusunda, gerekli bükme işlemleri dikkatlice uygulanmıştır. Son aşamada, şekillendirilen donatılar, yapısal bütünlüğün sağlanması amacıyla bağ teli ile sıkıca bağlanarak, deney numunesinin donatı iskeleti oluşturulmuştur.

### 3.4.3. Donatıların kalıplara yerleştirilmesi

Donatıların kalıplara yerleştirilmesi aşamasında öncelikle kalıpların iç yüzeyleri betonun yapışmasını önlemek amacıyla kalıp ayırıcı yağ ile kaplanmıştır. Hazırlanan donatı iskeletleri, proje detaylarına uygun şekilde kalıpların içine yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında donatıların doğru konumda ve açıda olmasına dikkat edilmiştir; böylece donatının tasarımı öngörülen mesafeleri yani paspayı ve donatı düzeni korunmuştur. Donatının kalıp içinde hareket etmesini önlemek amacıyla, donatı bağ teli ve plastik paspayı ayırıcı kullanılarak sabitleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Donatının kalıplara yerleştirilmesi işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler beton döküm işlemine hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.9’da donatıları yerleştirilmiş beton dökümüne hazır haldeki görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Donatıları yerleştirilmiş deney numuneleri

### 3.4.4. Deney elemanlarının üretilmesi

Hazır beton santralinden C30 beton sınıfına uygun olarak 1 m<sup>3</sup> hazır beton siparişi verilmiştir. Beton dökümü esnasında, betonun homojenliğini ve sıkışmasını sağlamak amacıyla vibrasyon işlemleri uygulanmış, böylece betonun kalıp içerisindeki



bütünlüğü sağlanmıştır. Numuneler prizini tamamladıktan sonra, kalıplardan dikkatlice çıkarılmış ve kür havuzlarında bakımları yapılmıştır. Kür havuzundan çıkartılan numuneler hızlandırılmış korozyon deneylerinin uygulanabilmesi için laboratuvarında bulunan kayar vinç yardımıyla uygun bir alanda beklemeye alınmıştır. Şekil 3.9'da betonu dökülmüş deney numuneleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.9.** Betonu dökülmüş deney numuneleri

### 3.5. Hızlandırılmış Korozyon Deneyleri

Referans ve referans+CFRP numunesi haricinde kalan diğer 4 adet betonarme numuneye hızlandırılmış korozyon deneyleri uygulanacağı için elektroliz çözeltisi hazırlanmıştır. Bu deneylerde, elektroliz ortamı oluşturmak için endüstriyel tipli ve kütlece %5 oranında sodyum klorür (NaCl) çözeltisi kullanılmıştır. NaCl çözeltisinin hazırlanış süreci, deneylerin tekrarlanabilirliği ve doğruluğu açısından önem arz etmekte olup, bu hazırlık aşaması Şekil 3.10.'da görsel olarak verilmiştir. Korozyonun etkin ve kontrollü biçimde oluşturulabilmesi için deneylerde dış akım metodu tercih edilmiş ve numuneler, 1000 mm × 1000 mm × 1250 mm ölçülerinde hazırlanan



korozyon havuzuna belirli sıralamalar ile yerleştirilmiştir. Kolon yüzeyinde korozyon hasarının yoğunlaşacağı öngörüsüyle, bu su haznesi %5'lik NaCl çözeltisi ile haznenin zemininden 25 cm yükselecek şekilde doldurularak elektroliz ortamı oluşturulmuştur. Elektroliz ortamının detaylı görünümü ve düzenek, Şekil 3.11.'de verilmiştir. Bu şekilde, kolon bölgesinin 25 cm'lik kısmı doğrudan NaCl çözeltisi içerisinde kalmış ve bu birleşim noktasında bulunan betonarme elemanın hem boyuna hem de enine donatıları korozyona maruz bırakılmıştır. Korozyon deneylerinde kullanılan deney düzeneğinin genel görünümü ve donanımları, Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. NaCl çözeltisinin hazırlanması



Şekil 3.11.%5'lik NaCl çözeltisi ile oluşturulan elektroliz ortam



Şekil 3.12.Korozyon deneyleri için hazırlanan deney düzeneği

Hedef korozyon seviyeleri (%10+%10 ve %20) esas alınarak, deneylerde ulaşılması hedeflenen teorik kütle kayıpları belirlenmiştir. Donatılarda korozyon nedeniyle meydana gelen kütle (ağırlık) kayıplarının nicel olarak belirlenebilmesi için, hızlandırılmış korozyon deneyi süresince deney düzeneğinden geçen elektrik sabit akımdan deney süresi belirlenmiştir.

Deneyler boyunca akım değeri sabit olarak 1 A uygulanmış ve numuneler, belirlenen teorik kayıplara ulaşana kadar NaCl çözeltisi içerisindeki elektroliz ortamında bekletilmiştir. Deney süresince akım, zaman ve voltaj gibi parametreler düzenli aralıklarla ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Bu veriler kullanılarak, donatılarda meydana gelen korozyon kaynaklı kütle kayıpları Faraday Yasası çerçevesinde değerlendirilmiştir. Faraday denklemi (Denklem 3.1) kullanılarak, elektroliz süresince geçen toplam yük miktarı ile numune başına düşen teorik korozyon miktarı hesaplanmıştır.

$$Ağırlık Kaybı = \frac{t(s) \times I(A) \times 55,847 (g/mol)}{2 \times 96487 (coulomb)} \quad (3.1)$$

Faraday yasasına göre, korozyon sürecinde meydana gelen teorik kütle kaybının hesaplanabilmesi için süre (t) biriminin saniye (s), akımın (I) amper (A) cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bu hesaplamalarda kullanılan diğer sabitlerden, demirin atomik ağırlığı 55,847 g/mol, değeri 2 ( $Fe^{2+}$ ) ve Faraday sabiti 96.487 C/mol olarak

alınmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyleri sırasında numunelerde hedeflenen teorik kütle kaybı oranları %10 ve %20 olacak şekilde belirlenmiş ve bu oranlara ulaşıldığında deneyler sonlandırılmıştır. İlgili ağırlık kaybı oranlarına karşılık gelen deney süreleri sırasıyla 32 gün (46.280 saniye) ve 64 gün (92.160 saniye) olarak tespit edilmiştir. Bu süreler boyunca sabit 1A akım uygulanmış ve Faraday denklemi yardımıyla, numunelerde meydana gelen teorik korozyon miktarları hesaplanmıştır. Böylece, elde edilen veriler ile korozyonun ilerleme düzeyi değerlendirilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon deneyleri, başlangıçta dört farklı deney grubu üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk korozyon numunesi olan REF + %20 COR, 64 gün boyunca hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmış ve %20 teorik kütle kaybına ulaşması hedeflenen referans korozyon numunesini temsil etmektedir. İkinci korozyon numunesi olan %20 COR + CFRP, benzer şekilde 64 gün süresince %20 oranında hızlandırılmış korozyona uğratılmış, üçüncü korozyon deney numunesi olan %10 COR + CFRP + %10 COR ise iki aşamalı olarak korozyona maruz bırakılmıştır. Bu numune önce 32 gün boyunca %10 teorik korozyon seviyesine ulaşana kadar hızlandırılmış korozyona uğratılmış, ardından CFRP ile güçlendirilmiş ve son olarak tekrar 32 gün boyunca %10 düzeyinde ilave korozyona maruz bırakılmıştır. Dördüncü korozyon numunesi olan CFRP+%20 COR numunesi, ilk olarak CFRP malzemesi ile güçlendirilmiş daha sonra 64 gün süresince %20 oranında hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanmıştır. Tüm korozyon deney numunelerinde hedeflenen ağırlık kaybı oranlarına ulaşıldığında korozyon deney süreci sonlandırılmıştır.

Betonun ve CFRP malzemesinin geçirimsizlik özelliklerinin korozyonun ilerleme düzeyine olan etkisi değerlendirilmiş ve farklı maruziyet senaryolarında meydana gelen korozyon hasarının yapısal performans üzerindeki yansımaları detaylı biçimde araştırılmıştır. Deneyin başlangıç aşamasına ait görsel veriler, numunelerin elektroliz ortamına yerleştirilmeden önceki durumlarını göstermektedir. Şekil 3.13’de görüldüğü üzere, bu aşamada numunelerin donatı yüzeylerinde herhangi bir gözle görülür korozyon belirtisi bulunmamaktadır. Numuneler, gözle görülür şekilde tamamen sağlam ve korozyonsuz durumda olup, bu safha ilerleyen zamanlarda meydana gelecek korozyon etkilerinin karşılaştırmalı analizi açısından referans niteliğindedir. Deneyin ilerleyiş sürecine ilişkin görseller sırasıyla korozyonun zamana bağlı gelişimini göstermektedir. Tüm bu aşamalar, korozyonun zamana bağlı etkilerini hem görsel hem

de yapısal olarak değerlendirme açısından kritik öneme sahiptir. Böylece, deney süreci boyunca korozyonun ilerleyişi ve bu ilerlemenin betonarme elemanlar üzerindeki fiziksel etkileri görsellerde verilmiştir.



**Şekil 3.13.**Korozyon deneyleri başlangıcı

Şekil 3.14’te sunulan 7. gün korozyon deneyleri görüntüsünde, beton yüzeylerinde korozyonun ilk izleri gözlemlenmeye başlanmıştır. Özellikle kolon-kiriş birleşim bölgesinde, su haznesi içerisinde kalan donatıların yüzeylerinde hafif paslanmalar meydana gelmiştir. Bu aşamada oluşan korozyon, daha çok yüzeysel olup, henüz beton örtüsünde herhangi bir çatlak ya da ayrışma gözlenmemiştir. Elektroliz ortamında sabit akım altında geçen süre boyunca oluşan korozyon, donatı yüzeyinde ince bir tabaka hâlinde birikmeye başlamıştır. Gözlemler, korozyon sürecinin ilerleyişinin başladığını ve deney düzeneğinin planlandığı şekilde çalıştığını göstermiştir.



**Şekil 3.14.** Korozyon Deneylerinde 7.gün

Sürecin 14. gününe ait görsellerde (Şekil 3.15) ise beton üzerinde yüzeysel pas oluşumlarının belirginleştiği görülmektedir. Deneyin 14. gününde, belirgin korozyon belirtileri ortaya çıkmıştır. Özellikle kolon-kiriş birleşim bölgesinin yüzeylerinde paslanma ve korozyon ürünlerinin birikimi gözlemlenmiştir. Bu dönemde, korozyonun ilerlemesiyle birlikte beton örtüsünde küçük çatlaklar oluşmaya başlamış, ancak yapısal bütünlük açısından henüz ciddi bir hasar gözlenmemiştir. Elektroliz ortamında uygulanan sabit akım altında korozyon süreci devam etmekte olup, korozyonun artış hızı gözlemlenmiştir.



**Şekil 3.15.** Korozyon deneylerinde 14.gün



Korozyon sürecinin 21. gününde çekilen ve Şekil 3.16’da yer alan görsellerde, beton üzerindeki korozyon ürünlerinin yoğunlaştığı, yer yer beton yüzeyinde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Deneyin 21. gününde, korozyonun ilerlemesi belirgin şekilde artmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde yer alan donatıların yüzeylerinde kalın korozyon tabakaları oluşmuş, korozyon ürünlerinin birikimi nedeniyle beton örtüsünde çatlaklar ve yer yer örtü dökülmeleri gözlemlenmiştir. Elektroliz ortamında sabit akım uygulaması altında gerçekleşen bu korozyon süreci, yapısal hasarın artışı göstermiştir.



**Şekil 3.16.** Korozyon deneylerinde 21.gün

Deneyin 32. gününde, numunelerde yoğun ve yaygın korozyon hasarları gözlemlenmiştir. Deneyin 32. gününe ait veriler Şekil 3.17’de verilmiş olup, bazı bölgelerde beton örtüsünde yer yer dökülme ve ayrışmalar gözlenmiştir. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde kalın korozyon tabakaları oluşmuş, beton örtüsünde yaygın çatlaklar ve örtü dökülmeleri meydana gelmiştir. Bu aşamada, korozyonun betonarme elemanın yapısal dayanıklılığı üzerinde ciddi olumsuz etkileri belirginleşmiş, donatı kesitlerinde önemli ölçüde kütle kayıpları yaşanmıştır. Sabit akım altında gerçekleştirilen elektroliz deneyleri sonucunda elde edilen bulgular, korozyonun ilerleyişinin kritik seviyelere ulaştığını göstermiştir.



**Şekil 3.17.** Korozyon deneylerinde 32.gün

32. gün korozyon deneylerinde, %10 COR + CFRP + %10 COR isimli numune, CFRP ile güçlendirilmek üzere çözelti haznesinden kayar vinç yardımıyla çıkarılarak laboratuvar ortamında uygun sehpalar üzerine yerleştirilmiştir. Korozyon haznesinden çıkarılan numuneye ait görüntü Şekil 3.18’de verilmiştir.



**Şekil 3.18.** %10COR+CFRP+%10 COR numunesinin 32. günde korozyon hasarı

Deney kapsamında REF + %20 COR isimli numune, 64 gün boyunca %20 oranında hızlandırılmış korozyona maruz bırakılacak olan referans numunesi ile %20 COR + CFRP numunesi, 64 gün hızlandırılmış korozyon sonrası CFRP ile güçlendirilecek numunelerin deneylerine devam edilmiştir.

Bu numunelerin korozyon sürecindeki performansları ve hasar ilerleyişi, farklı zaman noktalarında gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Korozyon hasarlarının gelişimi ve yayılımı 32. gün, 50. gün ve 64. gün itibarıyla değerlendirilmiş olup, bu süreçte elde edilen görseller sırasıyla Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



**Şekil 3.19.** REF+%20COR ve %20 COR+CFRP numunelerinin 32.gün korozyon hasarları



**Şekil 3.20.** REF+%20COR ve %20 COR+CFRP numunelerinin 50.gün korozyon hasarları





**Şekil 3.21.** REF+%20COR ve %20 COR+CFRP numunelerinin 64.gün korozyon hasarları

Korozyon deneylerinde, REF + %20 COR grubu olarak tanımlanan ve 64 gün boyunca %20 oranında hızlandırılmış korozyona maruz bırakılan korozyon referans numunesi; %20 COR + CFRP uygulanacak numune korozyon sürecinin tamamlanmasının ardından çözelti haznesinden çıkarılmıştır.

REF + %20 COR ve %20 COR + CFRP numunelerinin korozyon hasarlarının tamamlanmış hali Şekil 3.22’de, korozyon sonrası numunelerin genel görüntüleri ise Şekil 3.23’te verilmiştir. Bu görseller, her iki numunenin korozyon sürecinde maruz kaldığı yüzeysel ve yapısal bozulmaları açıkça göstermektedir.



**Şekil 3.22.** REF+%20COR ve %20 COR+CFRP numunelerinin korozyon hasarlarının tamamlanmış görüntüsü



**Şekil 3.23.** REF+%20COR ve %20 COR+CFRP numunelerinin deney sonu görüntüleri

%10 COR + CFRP + %10 COR numunesi ile CFRP + %20 COR numunesinin CFRP ile güçlendirme uygulaması yapıldıktan sonra hızlandırılmış korozyon deneylerine tabi tutulması planlandığından, öncelikle bu numunelerin CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) ile güçlendirilmesi gerekmektedir. CFRP güçlendirme işleminin etkinliğinin sağlanabilmesi için kapsamlı ön hazırlık aşamalarına başlanmıştır.

Güçlendirme işlemleri tamamlanan numunelerden birisi 32 gün diğer ise 64 gün hızlandırılmış korozyon deneylerine tabi tutulacaktır. Bu deneyler süresince, CFRP kaplama altındaki donatının korozyona karşı korunma etkisi ayrıntılı olarak incelenecektir.

### **3.6.Deney Numunelerinin CFRP Kompoziti ile Güçlendirilmesi**

Numuneler laboratuvar ortamında uygun alanlara yerleştirilmiş ve yüzey hazırlık işlemlerine başlanmıştır. İlk aşamada, yüzeyde bulunan gevşek malzemeler ve kirleticileri gidermek için büyük boy taşlama makinesine tel fırça aparatı takılarak yüzey mekanik olarak temizlenmiştir. Bu işlem sayesinde, özellikle pas tabakası ve kir gibi aderansı azaltan yüzey kalıntıları etkin bir şekilde uzaklaştırılmıştır.

Yüzey temizliğinin ardından, beton dökümü sırasında segregasyona maruz kalmış ve yapısal bütünlüğü zarar görmüş deney numunelerinin onarımı için MasterEmaco® S 488 tamir harcı tercih edilmiştir. Tamir harcının hazırlanması aşamasında ise öncelikle temiz ve kontrollü sıcaklıktaki su, hassas bir ölçek yardımıyla

karıştırma kabına alınmıştır. Daha sonra MasterEmaco® S 488 harcı yavaş ve kontrollü bir şekilde suya ilave edilerek, 500 devir/dakika hızındaki mekanik karıştırıcı ile yaklaşık 4 dakika boyunca homojen bir kıvam elde edilene kadar karıştırılmıştır. Karışımın homojenliği sağlandıktan sonra, 4 dakikalık dinlendirme süreci uygulanmış ve ardından tekrar 30 saniye kısa bir karıştırma işlemi ile malzeme uygulama için hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan tamir harcı, yüzeye optimum yapışmayı sağlamak amacıyla çelik mala ile tek katman halinde ve yaklaşık 25 mm kalınlıkta uygulanmıştır (Şekil 3.24). Uygulama sırasında harcın düzgün dağılımı ve yüzeye tam temasının sağlanması için özel dikkat gösterilmiştir. Uygulama sonrası harcın kürlenme sürecinde ortamın sıcaklık ve nem koşulları kontrol edilerek, malzemenin maksimum mekanik performans ve dayanıklılığa ulaşması sağlanmıştır.

MasterEmaco® S 488'in teknik özellikleri, bileşim detayları, mekanik dayanım değerleri ve kullanım koşulları Şekil 3.25'de (MasterEmaco® S 488 Teknik Bilgi Föyü) detaylı olarak verilmiştir.



**Şekil 3.24.** Tamir harcı ile onarımı yapılan numune

|                                                        |                                                                   |                                                                                     |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Malzemenin Yapısı                                      | Mineral Dolgular, Elyaf ve Polimer Takviyeli Özel Çimento İçerir. |                                                                                     |
| Renk                                                   | Gri                                                               |                                                                                     |
| *Basınç Dayanımı (TS EN 12190)                         |                                                                   |                                                                                     |
| 1 gün                                                  | >25 N/mm <sup>2</sup>                                             |                                                                                     |
| 7 gün                                                  | >50 N/mm <sup>2</sup>                                             |                                                                                     |
| 28 gün                                                 | >70 N/mm <sup>2</sup>                                             |                                                                                     |
| *Eğilme Dayanımı (28 gün) (TS EN 196)                  | >8,0 N/mm <sup>2</sup>                                            |                                                                                     |
| Yapışma (Çekme) Dayanımı (TS EN 1542) (Beton) (28 gün) | >2,0 N/mm <sup>2</sup>                                            |                                                                                     |
| *Elastisite Modülü (28 gün)                            | >20.000 N/mm <sup>2</sup>                                         | MK                                                                                  |
| Kapiler Su Absorbsiyonu (TS EN 13057)                  | <0,5 kg.m <sup>-2</sup> .saat <sup>0.5</sup>                      |  |
| Uygulama Kalınlığı                                     | Min. 10 mm Maks. 50 mm                                            |                                                                                     |
| Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı                          | +5°C +30°C                                                        |                                                                                     |
| Servis Sıcaklığı                                       | -20°C +400°C                                                      |                                                                                     |
| Kullanma Süresi (+20°C)                                | 30 dak.                                                           |                                                                                     |
| Üzerinde Yürünebilme Süresi (+20°C)                    | 24 saat                                                           |                                                                                     |
| Tam Kurlenme Süresi (+20°C)                            | 28 gün                                                            |                                                                                     |

\*Tipik değerler: +23°C'de, %50 bağıl nem koşullarında 4x4x16 cm harç prizmasında yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklar süreleri kısaltır. düşük sıcaklıklar uzatır.

**Şekil 3.25.** MasterEmaco® S 488 Teknik özellikleri (MasterEmaco S 488 Teknik Bilgi Föyü)

CFRP elyaflarının performansını maksimum düzeye çıkarmak amacıyla, 90° açılı yüzeylerde meydana gelen kopmaların önüne geçilmesi gerekmektedir. Literatürde belirtildiği üzere, CFRP elyafları 90° açılarda beklenen mekanik dayanımı tam olarak sağlayamayarak lif kopmalarına sebep olmaktadır. Bu sorunları minimize etmek amacıyla, deney numunelerinin 90°'lik köşe yüzeyleri, elyafların daha verimli çalışabilmesi için 135°'lik açıya getirilmiştir. Bu doğrultuda, numunelerin 90°'lik köşe yüzeylerine, taşlama makinesi ucuna takılan 125x50XM14 konik çanak taşı kullanılarak pahlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.27). Pahlama işlemi sonrasında oluşan beton tozları, yüzey aderansını olumsuz etkilememesi için kompresör yardımıyla basınçlı hava ile temizlenmiştir (Şekil 3.28). Tüm numunelerin 135°'lik pahlama işlemleri tamamlandıktan sonra, yüzeyler CFRP kompozitiyle güçlendirme işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Pahlama sonrası ve güçlendirmeye hazır durumdaki numunelerin görünümü Şekil 3.29'da verilmiştir.

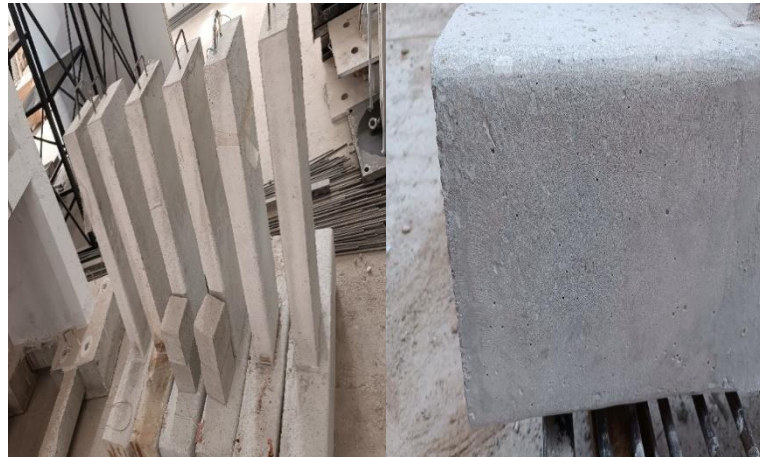




Şekil 3.27. Deney elemanlarının 135° pahlama işlemleri

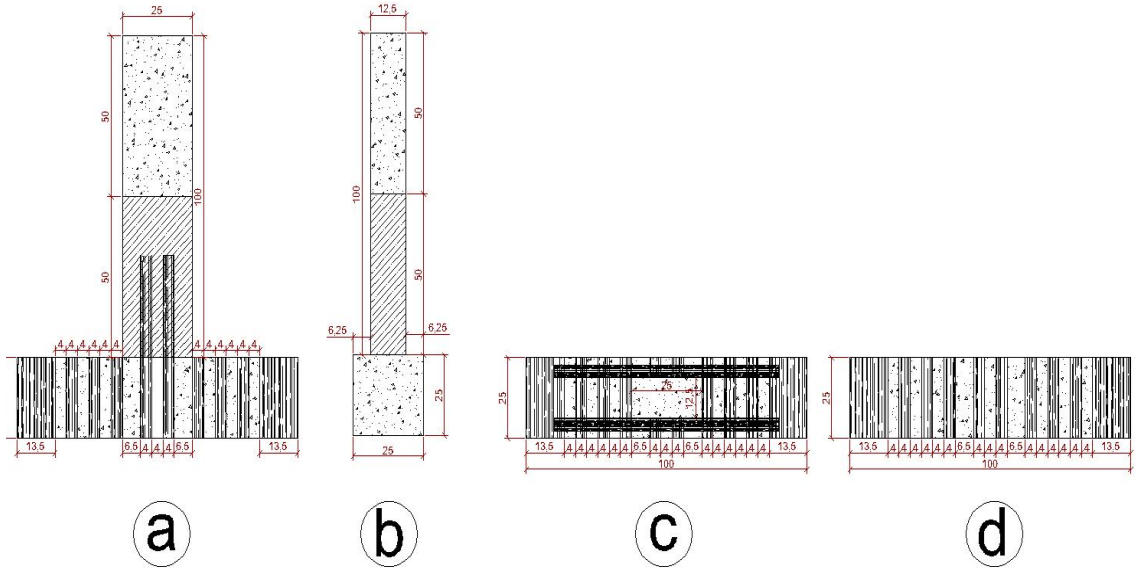


Şekil 3.28. Numune yüzeylerinin hava yardımıyla temizlenme işlemi



Şekil 3.29. CFRP Elyafı ile güçlendirilmeye hazır numuneler

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, FRP elyaflarının enine yerleşim biçimi yapısal performans açısından kritik öneme sahiptir. Sürekli yerleşim, malzeme sürekliliğini sağlayarak yük aktarımında etkinliği artırırken; boşluklu yerleşim ise maliyet ve işçilik açısından avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, CFRP şeritlerinin şeritler halinde yerleştirilmesi tercih edilmiştir; böylece elyaflar en iyi ve en etkin şekilde kullanılabilmiştir. Kolonlarda kullanılan CFRP şeritlerinin 40 mm aralıklarla yerleştirilmesi, sargılama işlemi sırasında yeterli aderans ve dayanım sağlamaya yönelik optimum bir düzen olarak seçilmiştir. Şeritlerin 40 mm genişliğinde olması ise uygulama kolaylığı ve yapısal dayanımın kazanılabilmesi açısından uygun bulunmuştur. Kolon numunesinin üst yüzeyinde, kolon eksenine paralel olarak 800 mm uzunluğunda ve 600 gr/m<sup>2</sup> yüzey yoğunluğuna sahip CFRP şeritler kullanılarak güçlendirme planlanmıştır. Uygulamada kullanılacak olan CFRP malzemesi, yüksek çekme dayanımı ( $\geq 3500$  MPa), düşük elastik modülü ( $\sim 230$  GPa) ve hafifliği sayesinde yapıya minimum ek yük getirmemekte ve yüksek düzeyde mukavemet kazandırmaktadır. Şeritlerin kolon etrafında sargılanması sırasında, kolon genişliği boyunca 100 mm üst üste bindirmeli ek ile birleştirme yapılmıştır. Bu bindirme uzunluğu, CFRP tabakasının kopma ve betondan ayrışma risklerini minimize etmekte, aynı zamanda yük dağılımını homojen hâle getirmektedir. Ayrıca, kiriş boyunca birleşim bölgesinden başlayarak 500 mm tam sargılama uygulanmıştır. Bu detaylı sargılama, birleşim bölgesindeki moment ve kesme kuvvetlerinin etkilerini azaltarak sistem rijitliğini arttırması düşünülmüştür. Şekil 3.30'da numunelere ait güçlendirme detayları, CFRP şeritlerin yerleşim geometrisi, bindirme uzunlukları, uygulama şekli ve genel görünüşleri görsel olarak verilmiştir.



**Şekil 3.30.** Numunelere ait güçlendirme detayları a) Ön ve Arka Görünüş, b) Yan görünüş, c) Üst görünüş, d) Alt görünüş

Numunelere uygulanan CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) kompozit sistem güçlendirmesine ilişkin detaylar, farklı açılardan görsel olarak verilmiştir. Bu kapsamda yapılan uygulamalar, CFRP şeritlerin yerleşim yönü, bindirme bölgeleri ve sargılama uzunluklarını açıkça göstermektedir.

Şekil 3.30’da verilen görselin detayları aşağıda açıklanmıştır:

- **a) Ön ve Arka Görünüş:** Numunenin uzun eksenini boyunca CFRP şeritlerinin yerleştirildiği, kolon çevresinde 100 mm üst üste bindirme yapılarak sargılama sağlandığı ve birleşim bölgesine doğru CFRP şeritlerinin kiriş yüzeyine 500 mm taşırıldığı görülmektedir.
- **b) Yan Görünüş:** Bu görünüşte, CFRP şeritlerinin kirişin her iki yan yüzeyini çevreleyecek şekilde sarıldığı görülmektedir.
- **c) Üst Görünüş:** Numunenin üst yüzeyinden bakıldığında, şeritlerin kolonun enine kesitine göre dizildiği ve eksenel doğrultuda 800 mm boyunca uygulandığı görülmektedir.
- **d) Alt Görünüş:** Numunenin alt kısmından elde edilen bu görünüşte ise, CFRP şeritlerinin kolonun alt yüzeyini şeritler halinde tamamen saracak şekilde uzatılmıştır.

Deney numunelerinde tüm hazırlıkların yapılp işlem sırasının projelendirilmesinden sonra CFRP uygulamasının ilk aşaması olan astar (primer) uygulamasına geçilmiştir. Astar olarak, FRP sistemleri için özel olarak formüle edilmiş epoksi esaslı MasterBrace® P 3500 ürünü tercih edilmiştir. Bu iki bileşenli, düşük viskoziteli epoksi astar, beton yüzeye derinlemesine nüfuz ederek CFRP ile beton arasında yüksek aderans sağlayan bir bağlayıcı tabaka oluşturmaktadır. Uygulama öncesinde, A (baz reçine) ve B (sertleştirici) bileşenleri üretici tavsiyelerine uygun oranlarda karıştırılmış; homojenlik sağlandıktan sonra fırça ve rulo yardımıyla yüzeye eşit şekilde uygulanmıştır. Uygulama sırasında ortam sıcaklığı  $+10^{\circ}\text{C}$  ile  $+35^{\circ}\text{C}$  arasında, bağıl nem ise %80'in altında tutulmuş; bu koşulların astarın penetrasyon ve kürlenme performansı üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak laboratuvar ortamı uygun hale getirilmiştir. MasterBrace® P 3500 astarının uygulama anına ait görsel Şekil 3.31 gösterilmiştir.



**Şekil 3.31.** MasterBrace® P 3500 FRP (Lifli Polimer) Sistemi için Geliştirilmiş Epoksi Esaslı Astar

Malzeme, üretici firma tarafından kullanıma hazır şekilde 4 kg'lık setler halinde temin edilmiştir. Karışım işlemine başlamadan önce hem deney numuneleri hem de epoksi bileşenleri yaklaşık  $+25^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilerek ortam sıcaklığına uyumları sağlanmıştır. Karıştırma sürecinde önce A bileşeni düşük hızda ( $\sim 300$  dev/dk) 30 saniye boyunca karıştırılmış, ardından B bileşeni eklenerek toplam 1,5 dakika boyunca uygun karıştırma ucu ile homojen bir karışım elde edilmiştir (Şekil 3.32). Epoksi esaslı astar (MasterBrace® P 3500), karışım işlemlerinin tamamlanmasının ardından kullanıma hazır hale getirilmiş ve uygulama aşamasına geçilmiştir. Uygulama öncesinde, tüm



deney numuneleri uygun yükseklikteki ayaklı sehpa üzerine yerleştirilerek hem uygulama kolaylığı sağlanmış hem de yüzeylerin dış etkenlerden izole bir şekilde işlem görmesi temin edilmiştir. Uygulamanın kontrollü ve homojen şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla, yüzey hazırlık sürecinin bir parçası olarak CFRP kompozitinin uygulanacağı bölgeler, işlem öncesinde mavi renkli beyaz tahta kalem ile numune yüzeyleri üzerinde işaretlenmiştir. Bu yöntem, malzeme ve iş gücü kaybını önlemek, aynı zamanda CFRP yerleşiminde yön ve sınır bütünlüğünü sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Astar uygulamasında, 2 numaralı ince kestirme fırçası ve parmak tipi rulo kullanılarak, CFRP uygulamasına hazırlanan yüzeylere ince bir astar tabakası tatbik edilmiştir. MasterBrace® P 3500 astarının karışım oranları Şekil 3.33'te, deney numuneleri için kullanılan toplam malzeme miktarı Çizelge 3.4'te ve teknik özellikleri ile performans parametreleri Şekil 3.34'te, epoksi esaslı astar uygulamasına hazırlık 3.35 ve epoksi esaslı astar uygulama görüntüsü 3.36'da gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Epoksi esaslı astar hazırlama işlemi

| MasterBrace® P 3500 | Bileşen A     | Bileşen B |
|---------------------|---------------|-----------|
| Karışım Miktarı     | 2,76 kg       | 1,24 kg   |
| Karışım Yoğunluğu   | 1,08 kg/litre |           |

Şekil 3.33.MasterBrace® P 3500 karışım oranları

|                                                                                                |                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Malzeme Yapısı<br><b>MasterBrace® P 3500</b> Bileşen A<br><b>MasterBrace® P 3500</b> Bileşen B | Epoksi Reçine<br>Epoksi Sertleştirici       |
| Renk                                                                                           | Şeffaf                                      |
| Karışım Yoğunluğu                                                                              | 1,08 ± 0,024 kg/litre                       |
| Katı Madde Oranı                                                                               | %100                                        |
| * Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)                                                          | > 20 N/mm <sup>2</sup>                      |
| Yapışma Dayanımı (beton) (7 gün)                                                               | >otc (betondan kopma)                       |
| Uygulanacak zeminin sıcaklığı                                                                  | +5°C - +30°C                                |
| Kullanma Süresi<br>-1°C<br>+7°C<br>+21°C<br>+32°C                                              | 8 saat<br>2 saat<br>45 dak.<br>25 dak.      |
| Uygulama Kalınlığı                                                                             | 0,1 – 0,2 mm                                |
| Yeniden Kaplanabilme Süresi                                                                    | Min. 20 saat                                |
| <b>MasterBrace® FRP</b> ile kaplanma<br>-1°C<br>+7°C<br>+21°C<br>+32°C                         | 9 saat<br>5 saat<br>3 saat<br>Maks. 48 saat |
| Tam Kurlenme Süresi (+20°C)                                                                    | 7 gün                                       |

**Şekil 3.34.** MasterBrace® P 3500 FRP (Lifli Polimer) sistemi için geliştirilmiş epoksi esaslı astar teknik özellikleri

**Çizelge 3.4.** Astar sarfiyatı

| P3500 Astar Metrajı                                |                           |                           |                            |
|----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                                                    | Bileşen<br>A (Kg)         | Bileşen<br>B (Kg)         | A+B Toplam (Kg)            |
| Karışım Miktarı:                                   | 2,76                      | 1,24                      | 4                          |
| Malzeme Sarfiyatı:                                 | 0,2                       | Kg/m <sup>2</sup>         |                            |
| 1 Adet Numune İçin Sarfiyat:                       | 0,91                      | Kg                        |                            |
| 1 Adet Numune İçin A+B Toplam Bileşen<br>İhtiyacı: | 0,91                      | Kg                        |                            |
| 1 Adet Numune İçin Sarfiyat:                       | Bileşen A İhtiyaç<br>(Gr) | Bileşen B İhtiyaç<br>(Gr) | A+B Toplam<br>İhtiyaç (Gr) |
|                                                    | 628,2                     | 282,2                     | 910,4                      |



**Şekil 3.35.** Epoksi esaslı astar uygulamasına hazırlık



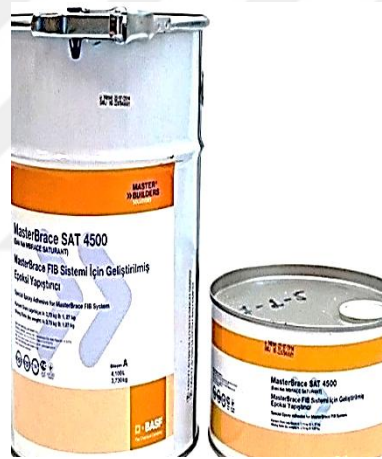
**Şekil 3.36.** Epoksi esaslı astar uygulama görüntüsü

Astarın yeterli derecede priz almasının ardından, daha önce mavi renkli beyaz tahta kalem ile işaretlenmiş olan CFRP kompozitinin uygulanacağı yüzeyler, kalıntı ve tozdan arındırmak amacıyla nemli bez yardımıyla tekrar temizlenmiştir.

Epoksi yapıştırıcı olarak, CFRP sistemleri için özel olarak geliştirilen MasterBrace® SAT 4500 kullanılmıştır (Şekil 3.37). Bu ürün, iki bileşenli, solventsiz, yüksek yapışma dayanımlı, epoksi esaslı özel bir yapıştırıcıdır. Malzeme, üretici firma tarafından 5 kg'lık setler hâlinde temin edilmiştir. Uygulama öncesinde hem deney numuneleri hem de epoksi bileşenleri yaklaşık +25°C ortam sıcaklığında belirli bir süre bekletilerek malzeme viskozitesi optimum seviyeye getirilmiş ve kimyasal reaksiyonun sağlıklı ilerlemesi sağlanmıştır.

Karışım işlemine geçmeden önce, A bileşeni yaklaşık 30 saniye süreyle düşük devirde ön karıştırmaya tabi tutulmuş, ardından B bileşeni teknik bilgi föyünden alınan oranlara göre A bileşenine ilave edilmiştir. İki bileşen, 300 dev/dakika hızla çalışan karıştırıcı ve uygun karıştırma ucu yardımıyla 1,5 dakika boyunca homojen kıvam elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Karışım sonucunda hem elyafı doyurabilecek hem de yüzeye etkili şekilde yapışabilecek nitelikte yüksek performanslı bir reçine elde edilmiştir. Astar uygulanmış yüzeylere, ortalama 1 mm kalınlık oluşturacak şekilde epoksi yapıştırıcı yüzeye tatbik edilmiş ve aynı anda, daha önceden kesilmiş ve hazırlanmış CFRP kompozit lifleri bu yapıştırıcı ile doyurulmuştur. Uygulama sırasında parmak tipi rulo yardımıyla lif yönü boyunca kuvvetlice bastırılarak epoksi liflerin içine tamamen nüfuz edinceye kadar işlem sürdürülmüştür.

Tamamen doyurulan CFRP lifleri, numune üzerinde işaretlenen alanlara dikkatlice yerleştirilmiş, düzgün şekilde gerdirilerek yüzeye tam temas sağlanmıştır. Liflerin yüzeye düzgün yapışması ve yapısal bütünlük oluşturabilmesi amacıyla hava kabarcığı kalmayacak şekilde uygulama tamamlanmıştır. Uygulamanın ardından numuneler, yapışma işleminin prizini alması için kontrollü laboratuvar koşullarında, yaklaşık +20–25°C sıcaklıkta, doğrudan güneş ışığı ve nemden korunmuş bir ortamda beklemeye alınmıştır. MasterBrace® P 4500 epoksi yapıştırıcı karışım oranları Şekil 3.38’de, deney numuneleri için kullanılan toplam malzeme miktarı Çizelge 3.5’te ve teknik özellikleri ile performans parametreleri Şekil 3.39’da, epoksi yapıştırıcı uygulama görüntüsü Şekil 3.40 epoksi yapıştırıcı uygulamasının bitmiş görüntüsü 3.41’de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. MasterBrace® FRP (FIB) Lifli Polimer Sistemi için Geliştirilmiş Epoksi Yapıştırıcı

| MasterBrace® SAT 4500 | Bileşen A     | Bileşen B |
|-----------------------|---------------|-----------|
| Karışım Miktarı       | 3,73 kg       | 1,27 kg   |
| Karışım Yoğunluğu     | 1,02 kg/litre |           |

Şekil 3.38. Karışım Oranları

Çizelge 3.5. MasterBrace® FRP (FIB) Lifli Polimer Sistemi için Geliştirilmiş Epoksi Yapıştırıcı Metrajı

| P4500 Epoksi Metrajı |                |                   |                 |
|----------------------|----------------|-------------------|-----------------|
|                      | Bileşen A (kg) | Bileşen B (kg)    | A+B toplam (kg) |
| Karışım Miktarı:     | 3,73           | 1,27              | 5               |
| Malzeme Sarfıyatı:   | 1              | Kg/m <sup>2</sup> |                 |

|                                                 |                          |                          |                           |
|-------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 Adet Numune İçin Sarfiyat:                    | 4,552                    | Kg                       |                           |
| 1 Adet Numune İçin A+B Toplam Bileşen İhtiyacı: | 4,552                    | Kg                       |                           |
| 6 Adet Numune İçin Sarfiyat:                    | Bileşen A ihtiyaç (gram) | Bileşen B ihtiyaç (gram) | A+B toplam ihtiyaç (gram) |
|                                                 | 3395,8                   | 1156,2                   | 4552                      |

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

Şekil 3.39.MasterBrace® FRP (FIB) lifli polimer sistemi için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcı teknik özellikleri



Şekil 3.40 Epoksi ve CFRP uygulama görüntüleri



Şekil 3.41.CFRP kompozitinin deney numuneleri üzerine epoksi ile yapıştırılmış ve epoksi işlemi tamamlanmış görüntüsü



CFRP kompozitlerinin beton yüzeylerine uygulanmasının ardından, epoksi reçinenin tam priz alarak maksimum mekanik dayanımını kazanabilmesi için numuneler, kontrollü koşullar altında kürlenmeye bırakılmıştır. Bu amaçla, tüm deney numuneleri, doğrudan güneş ışığından ve nem değişimlerinden izole edilmiş şekilde +25°C oda sıcaklığında, üretici teknik dokümanlarında önerilen sürede bekletilmiştir.

Priz süresinin tamamlanmasının ardından, önceden tanımlanmış korozyon senaryolarına göre ilerlenmiştir. Bu kapsamda;

- %10 COR + CFRP + %10 COR adlı numune, daha önce %10 oranında hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmış, ardından CFRP ile güçlendirilmiş ve bu işlemi takiben geriye kalan %10 oranındaki korozyon hasarına tekrar maruz bırakılmak üzere hazırlanmıştır.
- CFRP + %20 COR olarak adlandırılan deney numunesi ise CFRP güçlendirmesi tamamlandıktan sonra, %20 oranında korozyon hasarı oluşturulmak üzere korozyon haznesine alınmıştır. (Şekil 3.42).

Deney protokolüne uygun olarak, %10 COR + CFRP + %10 COR numunesi toplamda 32 gün, CFRP + %20 COR numunesi ise toplamda 64 gün süresince hızlandırılmış korozyon ortamında tutulmuştur (Şekil 4.43). Bu süre sonunda, önceden belirlenen teorik kütle kaybı oranlarına ulaşıldığı tespit edilmiş ve korozyon deneyleri tamamlanmıştır.

Korozyon deneylerinin tamamlanmasının ardından, tüm numuneler korozyon havuzundan dikkatli şekilde çıkarılmış ve mekanik davranışlarının değerlendirilmesi amacıyla deney düzeneğine yerleştirilmek üzere laboratuvarındaki test alanına taşınmıştır. Bu aşama, numunelerin artık yalnızca korozyon dayanımı değil, aynı zamanda taşıyıcı kapasiteleri, rijitlikleri ve enerji sönümleme özellikleri açısından da test edilmesini sağlayacak bir sonraki deney evresi sürecine geçilmiştir (Şekil 4.44).



Şekil 3.42. Deney numunelerinin korozyon havuzuna yerleştirilme görüntüleri



Şekil 3.43. Deney elemanlarının korozyon deneylerine başlama görüntüleri



Şekil 3.44. Deney elemanlarının yükleme deneylerine hazır haldeki görüntüleri

#### 4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, güçlendirme ve korozyon etkilerine sahip biri referans numune olmak üzere toplamda 6 adet deney elemanının deprem etkilerini simüle eden tersinir-tekrarlanır yatay yükler altında mekanik performansları irdelenmiştir. Deney sırasında, yük ölçümleri yüksek hassasiyetli yük hücresi (loadcell) kullanılarak gerçekleştirilmiş, yer değiştirme ölçümleri ise Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) sensörleri aracılığıyla kayıt altına alınmış ve entegre veri toplama sistemleri vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan veriler temelinde Microsoft Excel programı kullanılarak çeşitli analiz grafikleri oluşturulmuştur. İlave olarak her yük çevrimi esnasında numunelerde gözlemlenen çatlaklar, deformasyonlar ve yapısal hasarlar detaylı şekilde kaydedilmiş ve “çatlak rapor defteri” ne sistematik olarak not edilmiştir. Bu dokümantasyon, deneylerin ilerleyen safhalarında meydana gelen hasar mekanizmalarının anlaşılması ve yapısal davranış değişikliklerinin analizinde kritik bir rol oynamıştır.

DeneySEL verilerin daha anlamlı yorumlanabilmesi ve karşılaştırılabilmesi için çeşitli grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerin nasıl elde edildiği ve elde edilen verilerin karşılaştırılması bu bölümde yapılmıştır.

##### Yük-Deplasman grafiği:

Yük-deplasman grafiği, bir yapının, elemanın ya da malzemenin üzerine uygulanan yük ile bu yük altında meydana gelen şekil değişimi (deplasman) arasındaki ilişkiyi gösteren en temel ve önemli yapısal davranış grafiklerinden biridir. Bu grafikte genellikle yatay eksen deplasman (mm veya cm), dikey eksen ise uygulanan yük (kN veya N) yer alır. Yapının davranışı, bu iki parametre arasındaki ilişkiye göre değerlendirilir. Grafiğin başlangıcında yer alan doğrusal bölge, elastik davranışın hâkim olduğu kısmı temsil eder ve bu alanda yapı üzerindeki yük kalktığında eski haline geri dönebilir. Bu doğrusal bölgenin eğimi, yapının rijitliğini (stiffness) gösterir. Yük arttıkça yapı plastik davranışa geçer, eğri yataylaşmaya başlar ve artık kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Bu kısımda rijitlik azalır ve yapı sünek davranış sergilemeye başlar. Bazı durumlarda grafik ani bir düşüş göstererek kırılma veya göçmeyi de gösterebilir. Yük-deplasman grafiği üzerinden maksimum taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik, enerji sönmüleme kapasitesi gibi birçok mekanik parametre



belirlenebilir. Bu nedenle, özellikle deneysel çalışmalarda veya yapısal analizlerde yapının genel davranışını değerlendirmek için yük–deplasman grafiği temel bir araç olarak kullanılır. Deney sırasında yük hücreleri ve potansiyometrik cetvellerden elde edilen deney verileri yük-deplasman grafikleri elde edilmek üzere doğrudan bilgisayar ortamına aktararak Yük-Deplasman grafikleri elde edilmiştir. Deneyde toplam 6 adet potansiyometrik cetvel kullanılmıştır. Potansiyometrik cetveller yardımıyla elde edilen verilen bilgisayar ortamında kayıt altına alınarak yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir.

#### Rijitlik grafiği:

Rijitlik grafiği, bir yapının ya da malzemenin dış yükler altında ne kadar şekil değiştirdiğini, yani deformasyona karşı gösterdiği direnci görsel olarak ifade eden bir araçtır. Genellikle rijitlik, birim deplasman başına düşen yük miktarı olarak tanımlanır ve birimi kN/mm, N/m gibi değerlerle ifade edilir. Rijitlik grafiği çoğunlukla yük–deplasman verilerinden elde edilir. Bu tür bir grafikte, düşey ekseninde yük (kN), yatay ekseninde ise deplasman (mm) yer alır. Eğrinin eğimi, rijitlik değerini gösterir. Başlangıçta eğrinin doğrusal olduğu bölüm, elastik davranış bölgesidir ve rijitliğin sabit olduğu varsayılır. Bu doğrusal bölgedeki eğim, sistemin ilk rijitliği olarak kabul edilir. Yük arttıkça eğri yataylaşırsa, bu durum rijitliğin azaldığını ve yapının plastik davranışa geçtiğini gösterir. Bazı çalışmalarda rijitlik, zamana veya döngü sayısına bağlı olarak da incelenir. Özellikle korozyon, yorgunluk veya güçlendirme gibi durumların etkisini değerlendirmek amacıyla zamanla değişen rijitlik değerleri karşılaştırmalı olarak sunulur. Bu durumda grafikte yatay ekseninde zaman, çevrim sayısı ya da numune türü; dikey ekseninde ise rijitlik değeri yer alır. Rijitlik grafiği, yapının dayanım kapasitesi, sünekliği ve genel performans özellikleri hakkında önemli bilgiler sunar. Deney elemanları için ayrı ayrı rijitlik grafikleri çizilmiştir. Rijitlik grafikleri her yüklemedeki yükün, o noktadaki deplasman değerine bölünmesiyle ortaya çıkmaktadır. Tüm deney elemanları için yapılan yüklemelerin rijitlik değerleri ileri ve geri çevrimler sayesinde ortaya çıkan veriler yardımıyla grafiğe aktarılmıştır.

#### Enerji grafiği:

Enerji grafiği, bir yapı elemanının dış yükler altında ne kadar enerji absorbe ettiğini ya da depoladığını gösteren, yapısal davranışın önemli bir göstergesidir. Bu grafik genellikle yük–deplasman grafiğinden türetilir ve özellikle sünekliğin, dayanımın

ve enerji sönümlleme kapasitesinin değerlendirilmesinde kullanılır. Yük–deplasman eğrisi altında kalan alan, uygulanan yükler karşısında yapının ne kadar enerji absorbe ettiğini ifade eder ve buna süneklik enerjisi, sönümlleme enerjisi ya da toplam enerji denir. Bu enerji, genellikle birim olarak joule (J) ya da  $\text{Knmm}$  şeklinde ifade edilir. Enerji grafiğinde yatay eksenle çoğunlukla zaman, çevrim sayısı ya da deplasman, düşey eksenle ise birikimli enerji yer alır. Özellikle tersinir-tekrarlanır yükler altında yapılan deneylerde, her yükleme döngüsünde elde edilen enerji birikimli olarak grafiğe yansıtılır. Bu grafik sayesinde numunelerin enerji sönümlleme kapasitesi karşılaştırılabilir. Örneğin, CFRP ile güçlendirilmiş bir elemanın, korozyona uğramış veya referans numuneye göre daha fazla enerji absorbe ettiği gözlemlenebilir. Bu da güçlendirme yönteminin yapıya kazandırdığı süneklik ve dayanımın bir göstergesidir. Sonuç olarak enerji grafiği, yalnızca yapının dayanımını değil aynı zamanda yük altında ne kadar güvenli deformasyon yapabildiğini ve enerji sönümleyebildiğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Her bir yükleme için yük-deplasman grafiğinin altında kalan alan hesaplanarak yüklemelerin enerji grafikleri oluşturulur. Her çevrimden elde edilen veriler toplanarak kümülatif tüketilen enerjiler toplanarak enerji grafiği oluşturulmuştur.

#### Süneklik değerlerinin belirlenmesi:

Süneklik değerlerinin belirlenmesi, bir yapı elemanının elastik sınırı aştıktan sonra ne kadar şekil değiştirebildiğini nicel olarak ortaya koymak amacıyla yapılır. Yapısal süneklik özellikle depreme dayanıklı tasarım açısından büyük önem taşır çünkü sünek yapı elemanları, yük altında ani kırılmadan önce önemli miktarda deformasyon yaparak enerji sönümleyebilir ve yapının göçmesini geciktirir. Süneklik genellikle deplasman sünekliği katsayısı ile ifade edilir ve bu katsayı, yapının maksimum ulaştığı deplasmanın, elastik davranış bölgesindeki akma deplasmanına oranı şeklinde hesaplanır. Bu oran, sünekliğin en temel göstergesi olarak kullanılır. Deneysel çalışmalarda öncelikle yük–deplasman verileri elde edilir, ardından eğrinin elastik doğrusal bölgesinden sapma yaptığı nokta, yani akma noktası belirlenir. Bu noktadaki deplasman "akma deplasmanı", grafikteki en yüksek deplasman ise "maksimum deplasman" olarak alınır. Süneklik katsayısı da bu iki değer in oranı ile bulunur. Ayrıca, yapı elemanının yalnızca deplasman değil, dönme davranışı da önemliyse, dönme sünekliği katsayısı hesaplanarak benzer bir değerlendirme yapılabilir. Tersinir-

tekrarlanır yükler altında yapılan deneylerde ise süneklik, yalnızca şekil değiştirme kapasitesiyle değil, aynı zamanda histeretik döngülerde sönümlenen enerji ile de değerlendirilir. Bu tür enerji temelli süneklik analizleri, yapının yük altında ne kadar enerji sönümleyebildiği ve dolayısıyla ne ölçüde güvenli bir davranış sergilediğini ortaya koyar. Sonuç olarak süneklik değerleri, yapıların rijitlikten ziyade esneklik ve dayanıklılık özelliklerini değerlendirmek için vazgeçilmez bir kriterdir.

Grafiklerden hangi değerleri elde edeceğimiz aşağıda madde madde özetlenmiştir.

- *Yük Geçmişi Grafiği*: Numuneye uygulanan zamana bağlı yük değişimleri,
- *Deplasman Geçmişi Grafiği*: Numunenin ilgili noktasındaki yer değiştirme değişimleri,
- *Enerji Tüketim Grafiği*: Her yük çevriminde numunenin tükettiği enerji miktarı,
- *Zarf Eğrisi (Histerezis Eğri)*: Yük ve deplasman ilişkisini göstererek numunenin sünekliği ve enerji sönümleme kapasitesini ortaya koyar,
- *Rijitlik Grafiği*: Çevrimler boyunca numunenin rijitliğindeki değişimlerin gözlemlenmesi,
- *Kümülatif Toplam Tüketilen Enerji Grafiği*: Deney boyunca toplam enerji tüketiminin artış oranını vermektedir.

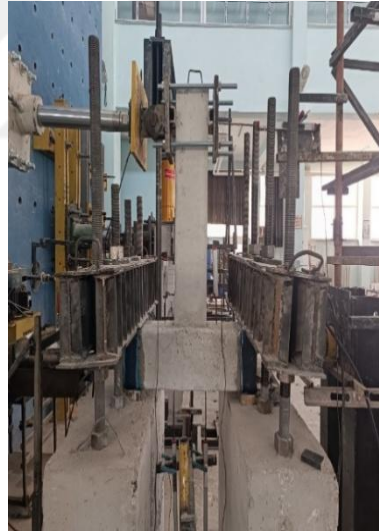
Bu grafiklerin karşılaştırmalı analiziyle, CFRP kompozitleri kullanılarak güçlendirilen kolon-kiriş birleşim bölgelerinin yapısal dayanım ve rijitlik parametrelerindeki gelişmeler detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Özellikle, korozyon kaynaklı dayanım kayıplarının CFRP uygulaması ile ne oranda telafi edildiği, bu güçlendirmelerin yapısal elemanların kapasite artışına katkısı ve rijitlikteki değişimler niceliksel olarak ortaya konmuştur.

#### 4.1. Deney Sonuçları

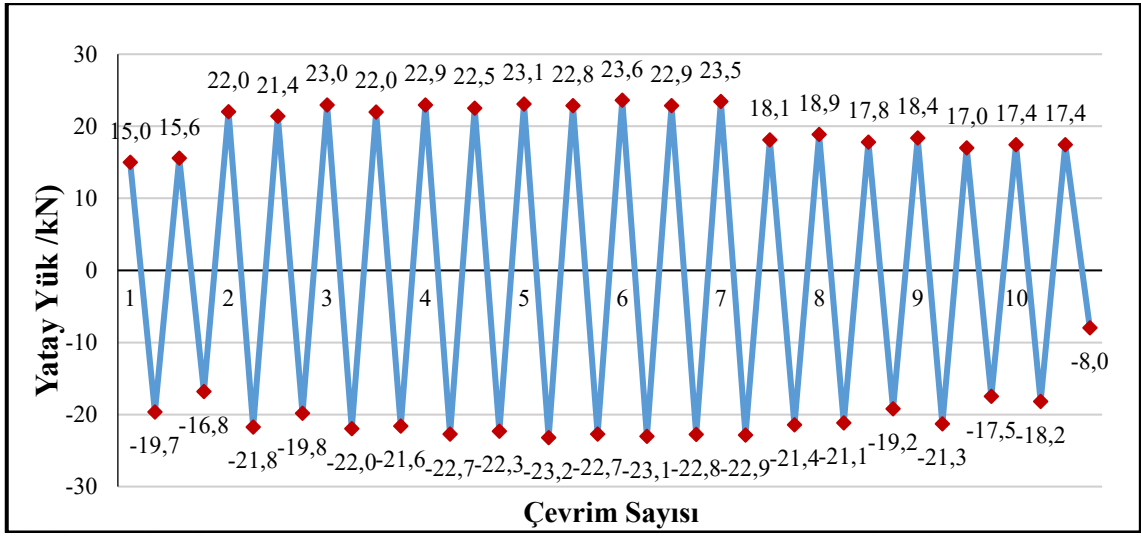
##### 4.1.1. Birinci deney Referans Deneyi (REF)

Bu deney elemanı, referans numune olarak üretilmiştir. Kolon uç mesnet bölgeleri dışında, bu numuneye CFRP ile güçlendirme işlemi veya herhangi bir hızlandırılmış korozyon işlemi uygulanmamıştır. Referans numunenin deney

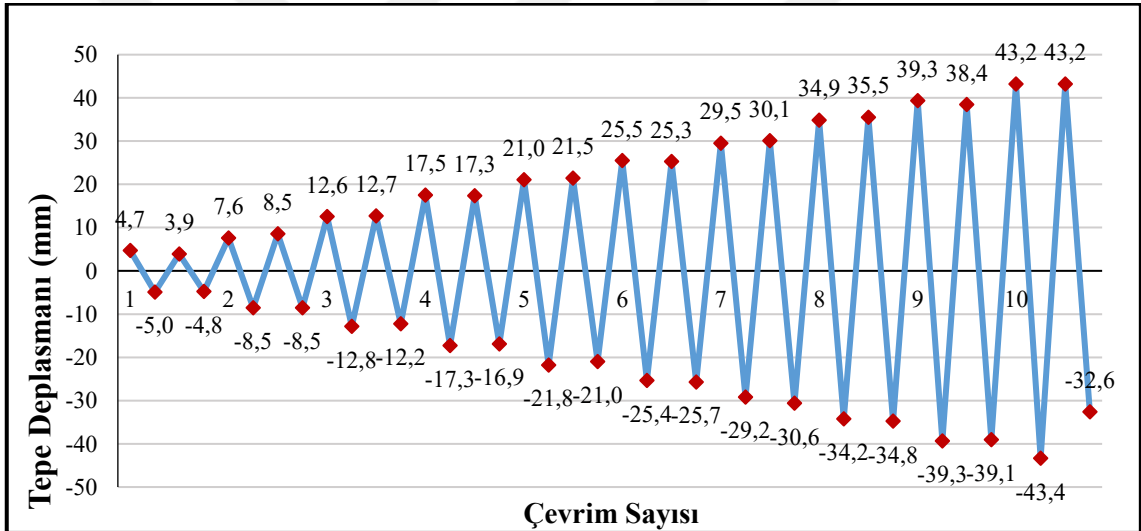
başlangıcından hemen önceki genel durumunu gösteren görüntü Şekil 4.1’de yer almaktadır. Referans deney elemanı, diğer numunelere uygulanan korozyon ve/veya güçlendirme işlemlerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla kullanılmıştır. Bu doğrultuda, yük hücreleri ve deplasman ölçerler aracılığıyla elde edilen veriler kullanılarak çeşitli karşılaştırma grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.2 'de referans deney elemanına uygulanan yükleme geçmişi, Şekil 4.3'de ise ilgili deplasman geçmişi grafiksel olarak verilmiştir. Deney süresince uygulanan yükler ve artan deplasmanlar sonucunda numune üzerinde gözlemlenen çatlakların konumları ve oluşum anları Çizelge 4.1’de sistematik biçimde raporlanmıştır. Deney sırasında elde edilen görsellerde yer alan renkli işaretlemeler, yükleme yönünü belirtmek amacıyla kullanılmıştır; bu kapsamda mavi renkli çizgiler itme (pozitif yönlü) kuvvetleri, kırmızı renkli çizgiler ise çekme (negatif yönlü) kuvvetleri temsil etmektedir.



**Şekil 4.1.** Referans numunenin deney başlamadan önceki ilk görüntüsü



Şekil 4.2. REF deney numunesinin yük geçmişi grafiği



Şekil 4.3. REF deney numunesinin deplasman geçmişi grafiği

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, referans deney numunesine tüm yükleme çevrimlerinde deplasman kontrollü bir yükleme protokolü uygulanmıştır. Şekil 4.3'de verilen yükleme çevrimlerinde yatay yük seviyesinin sabit kalmasına rağmen, artan deplasman talepleri nedeniyle numune, çekme bölgesindeki kiriş donatısında meydana gelen kopma sonucunda göçme durumuna ulaşmıştır.

Çizelge 4.1'de ise her bir yükleme adımı için referans deney numunesinde gözlemlenen hasar türleri ve bunların konumlarına ilişkin ölçümler detaylı şekilde raporlanmıştır.

**Çizelge 4.1.** Yüklemlerde oluşan deney elemanına ait hasar ölçümleri

| Çevrim No | Yük(kg) | Drift/Deplasman %/(mm) | Açıklama                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------|---------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +1        | 1115    | 4,30                   | Deney numunesinde toplam beş adet çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. 1 numaralı çatlak, birleşim bölgesinde yer almakta olup 0,3 mm açıklığa sahiptir. 2 numaralı çatlak, birleşim bölgesinden 14,5 cm yukarıda konumlanmış olup 0,3 mm açıklığında ölçülmüştür. 3 numaralı çatlak, 23 cm yukarıda, 0,2 mm açıklığa sahiptir. 4 numaralı çatlak, birleşim bölgesinden 35,5 cm yukarıda ve 0,1 mm açıklığındadır. 5 numaralı çatlak ise birleşim bölgesinden 45,5 cm yukarıda yer almakta ve 0,1 mm açıklığa sahiptir. |
| -1        | -2250   | 4,30                   | Deney sırasında, 1 numaralı temel çatlağın açıklığı 0,2 mm'ye ulaşmış olup ilerleyerek birleşme göstermiştir. 2 numaralı çatlak, birleşim bölgesinden 7,5 cm yukarıda konumlanmış olup 0,2 mm açıklığa sahiptir. 3 numaralı çatlak, 21,5 cm yükseklikte ve 0,1 mm açıklığında gözlemlenmiştir. 4 numaralı çatlak, birleşim bölgesinden 28,5 cm yukarıda 0,1 mm açıklıkla; 5 numaralı çatlak ise 34,0 cm yüksekliğinde ve 0,1 mm açıklığa sahip olarak kaydedilmiştir.                                              |
| +2        | 1700    | 8,60                   | Kolonun giriş hizasında, 0,1 mm açıklığa sahip 7 numaralı çatlak ile girişin birleşim bölgesinden 53 cm yukarıda konumlanan ve yine 0,1 mm açıklığa sahip 6 numaralı çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Mevcut çatlaklarda açıklık artışı tespit edilmiştir; bu kapsamda 1 numaralı çatlak 0,5 mm, 2 numaralı çatlak 0,4 mm, 3 numaralı çatlak 0,3 mm, 4 numaralı çatlak 2,0 mm ve 5 numaralı çatlak 1,0 mm açıklığa ulaşmıştır.                                                                                      |
| -2        | 2470    | 8,60                   | Kolonun giriş hizasında, 0,1 mm açıklığa sahip 7 numaralı yeni bir çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Mevcut çatlak açıklıklarında ise artış ve değişim kaydedilmiştir. Bu kapsamda; 1 numaralı çatlağın açıklığı 1,0 mm'ye ulaşmıştır. 2 numaralı çatlak 0,2 mm, 3 numaralı çatlak 0,1 mm, 4 numaralı çatlak 0,1 mm, 5 numaralı çatlak 0,1 mm ve 6 numaralı çatlak ise 0,1 mm açıklığa sahip olacak şekilde ölçülmüştür.                                                                                             |
| +3        | 1780    | 12,90                  | Çatlak açıklıklarında artış gözlemlenmiştir. Buna göre; 1 numaralı çatlak 1,5 mm, 2 numaralı çatlak 0,4 mm, 3 numaralı çatlak 0,3 mm, 4 numaralı çatlak 0,2 mm, 5 numaralı çatlak 0,1 mm ve 6 numaralı çatlak da 0,1 mm açıklığa sahip olacak şekilde ölçülmüştür.                                                                                                                                                                                                                                                 |
| -3        | 2460    | 12,90                  | 1 numaralı çatlağın açıklığının 2 mm'yi aştığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, 2 numaralı çatlağın açıklığı 0,2 mm olarak ölçülmüştür.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| +4        | 1850    | 17,20                  | Kirişin birleşim bölgesinden 6 cm yukarıda, 0,4 mm açıklığa sahip ve 8 numara ile tanımlanan yeni bir çatlak oluşumu kaydedilmiştir. Ayrıca mevcut çatlakların açıklıklarında artış gözlemlenmiştir; bu kapsamda 1 numaralı çatlak açıklığı 2,0 mm'ye ulaşmış, 2 numaralı çatlak 0,6 mm, 3 numaralı çatlak 0,4 mm, 4 numaralı çatlak 0,3 mm ve 5 numaralı çatlak ise 0,2 mm açıklıkla ölçülmüştür.                                                                                                                 |
| -4        | 2530    | 17,20                  | Kirişin birleşim bölgesinden 4 cm yükseklikte 8 numaralı 0,4 mm kalınlığa sahip yeni çatlak oluşumu kaydedilmiştir. 1 numaralı çatlak kalınlığı 4,0 mm'ye ulaşmıştır.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|     |      |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +5  | 1900 | 21,50 | 8 numaralı kolonun çatlağında uzamalar kaydedildi                                                                                                                                                                                                                                         |
| -5  | 2600 | 21,50 | Kiriş elemanında oluşan çatlakların ilerleyerek birbirleriyle birleştiği ve sürekli çatlak hatları oluşturduğu gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                           |
| +6  | 1930 | 25,80 | Basınç bölgesinde betonun ezilerek plastik deformasyon sergilediği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                                       |
| -6  | 2580 | 25,80 | Basınç bölgesinde betonun ezilerek plastik deformasyon sergilediği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                                       |
| +7  | 1920 | 30,10 | Basınç bölgesinde yer alan beton yüzeyinde dökümlerin başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kolon elemanında 0,1 mm genişliğe sahip ve 9 numara ile işaretlenen yeni bir çatlak oluşumu tespit edilmiştir.                                                                                   |
| -7  | 2580 | 30,10 | Deney süreci boyunca beton dökümlerinin ilerleyerek devam ettiği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                                         |
| +8  | 1460 | 34,40 | Deney sırasında çekme donatısının burkulma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                                         |
| -8  | 2405 | 34,40 | "Deney sırasında, çekme bölgesindeki donatının burkulma eğilimi gösterdiği ve eş zamanlı olarak kabuk betonda yerel dökümlerin devam ettiği gözlemlenmiştir.                                                                                                                              |
| +9  | 1420 | 38,70 | Deney sürecinde, kabuk beton üzerinde yerel dökümlerin ilerleyerek devam ettiği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                          |
| -9  | 2400 | 38,70 | Deney sürecinde, kabuk beton üzerinde yerel dökümlerin ilerleyerek devam ettiği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                          |
| +10 | 1324 | 43,00 | Basınç bölgesinde meydana gelen beton dökümleri nedeniyle, çekme bölgesindeki donatılarda kopma meydana gelmiştir.                                                                                                                                                                        |
| -10 | 2110 | 43,00 | Basınç bölgesinde meydana gelen beton dökümleri ve ezilmeler sonucunda, çekme donatılarında kopma oluşmuş ve bu durum numunenin taşıma kapasitesini kaybederek göçme konumuna ulaşmasına neden olmuştur. Bu aşamada yapısal bütünlüğün sağlanamaması nedeniyle yüklemeye son verilmiştir. |

Deney sırasında numunede oluşan çatlakların detaylı dağılımı ve konumları Şekil 4.4'te verilmiştir.





**Şekil 4.4.** Referans numunenin deney başladıktan sonraki ilk çatlak oluşumları

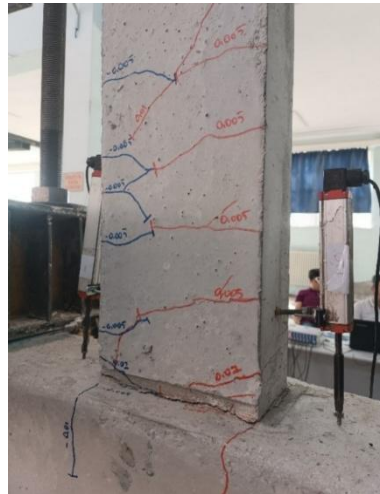
Referans numunede, kolonda meydana gelen ilk çatlak birinci çevrimin itme yönlü yüklemesi sırasında oluşmuş ve açıklığı 0,2 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.5). İkinci çevrimin çekme yönünde ise kolonda oluşan çatlaklara ait görsel Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Çatlakların birleşerek ilerlemesi ve uzamaya devam etmesi, beşinci çevrimin çekme yönünde gözlemlenmiş olup, ilgili görüntü Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Aynı zamanda, basınç bölgesinde meydana gelen ezilme durumu, Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Kabuk betonun dökülmeye başlaması ise yedinci çevrimde, 29,5 mm'lik deplasman seviyesinde meydana gelmiş olup, görüntüsü Şekil 4.9'da verilmiştir. Referans deney elemanının + çevrimde 23.59 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 25.51 mm deplasman yapmıştır. – Çevrimde ise 23.2 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 21.79 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanında + çevrimde 22.05 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 7.77 mm deplasman meydana gelmiştir. Deney elemanında- çevrimde 20.18 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 5.84 mm deplasman meydana gelmiştir. Göçme noktası ise + çevrimde 20.05 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 33.48 mm deplasman meydana gelmiştir. - Çevrimde ise göçme noktası 19.72 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 41.37 mm deplasman meydana gelmiştir. Donatıların burkulması Şekil 4.10'da donatıların kopması ve deneyin sonlanmasına ilişkin görüntü ise Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.5.Kolonda itme anında meydana gelen ilk çatlak



Şekil 4.6.Kolonda çekme anında meydana gelen ilk çatlak



Şekil 4.7.Çatlakların birleşip uzamaya devam etmesi



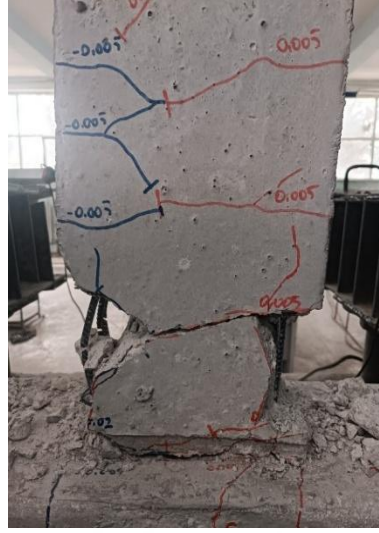
Şekil 4.8. Basınç bölgesinin ezilmesi



Şekil 4.9. Kabuk betonun dökülmesi

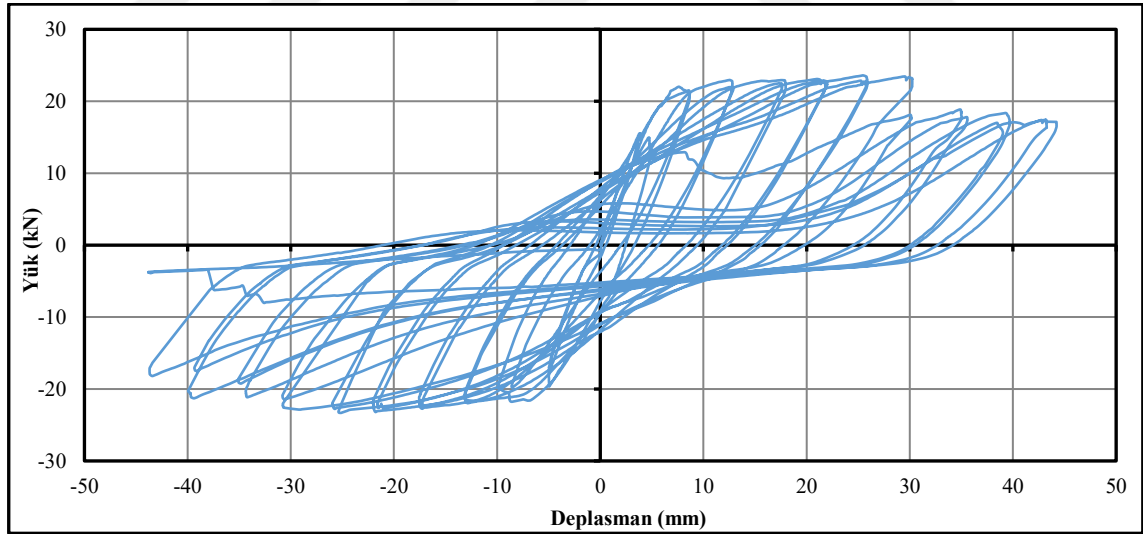


Şekil 4.10. Donatıların burkulmaya başlaması

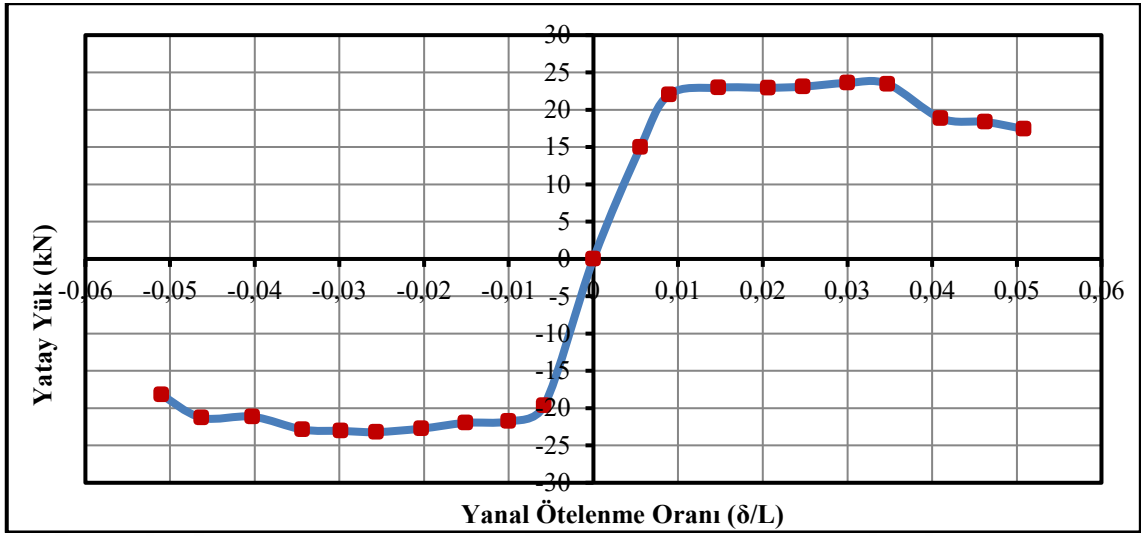


Şekil 4.11. Donatıların kopup deneyin sonlandırılması

Referans numunesine ait yatay yük – yer değiştirme çevrimsel histerezis eğrisi Şekil 4.12’de, her bir çevrimdeki maksimum yatay yük ile bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değerlerinden elde edilen dayanım zarfı ise Şekil 4.13’te verilmiştir.

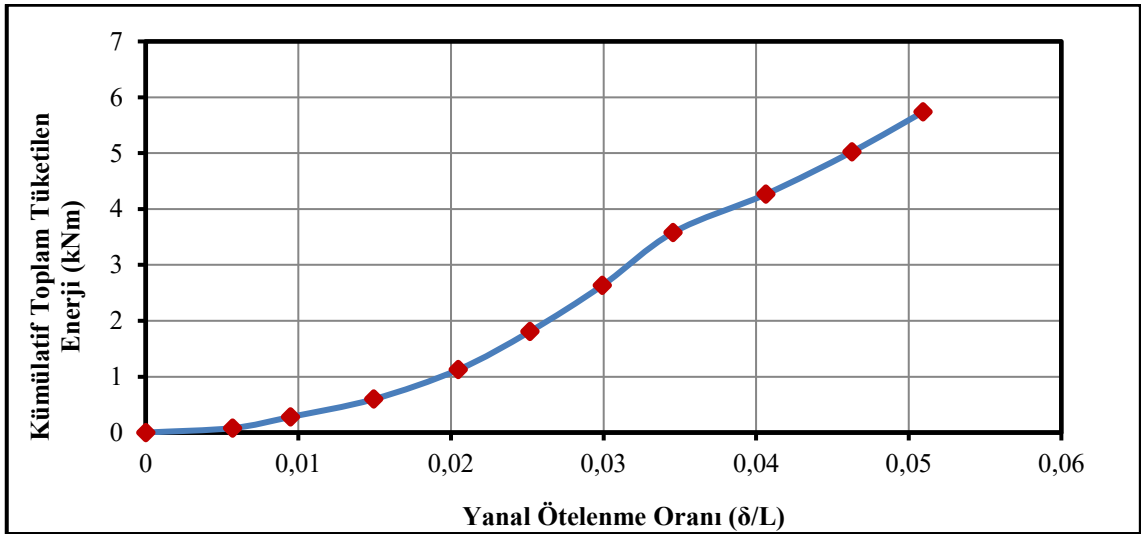


Şekil 4.12. Referans numunesinin Yatay Yük-Deplasmanı histerezis eğrisi



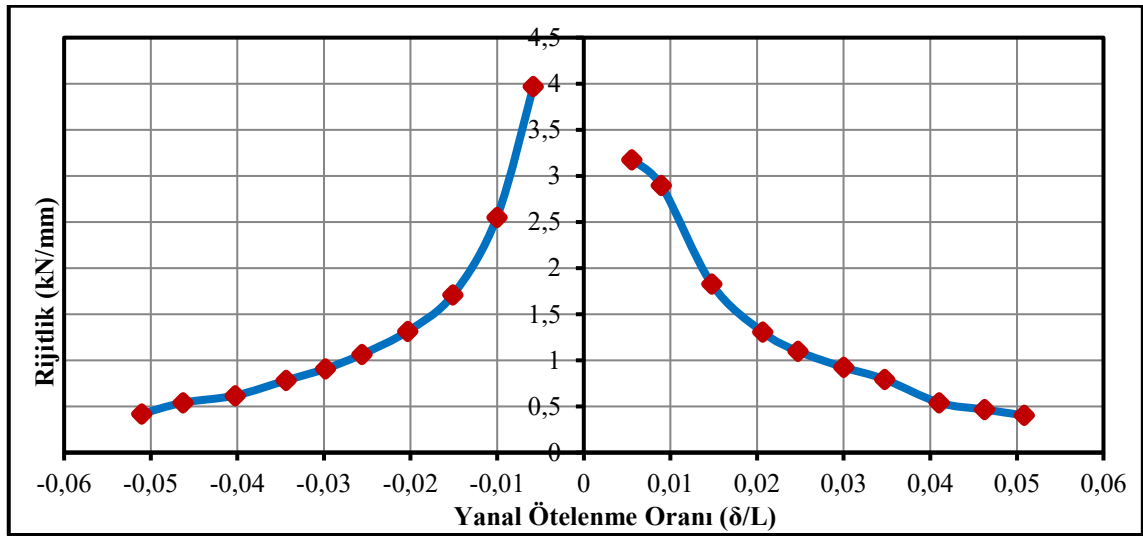
Şekil 4.13. Referans numunesine ait dayanım zarfı

Referans numunesine ait yatay yük–yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanarak, çevrimsel enerji tüketimleri belirlenmiş ve bu değerlerin kümülatif toplamı ile numunenin enerji tüketme kapasitesine ilişkin ötelenme oranı grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik Şekil 4.14’te verilmiştir. Kümülatif tüketilen enerji değerleri + ve – çevrim değerleri ortalaması alınarak oluşturulmuş olup Referans deney numunesi için kümülatif tüketilen enerji değeri 5.74 kNm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.14. Referans numunesine ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

Referans numunesine ait rijitlik azalımı grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir. Söz konusu grafikte, eğrinin sol tarafında yer alan alanlar itme yönlü çevrimlerde hesaplanan rijitlik değerlerini, sağ tarafında kalan alanlar ise çekme yönlü çevrimlerde elde edilen rijitlik değerlerini temsil etmektedir. Deney numunesinin + çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri 3.17 kN/mm, - çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri ise 3.97 kN/mm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.15. Referans numunesinin rijitlik azalımı grafiği

#### 4.1.2. İkinci deney Referans Korozyon Deneyi (REF+%20COR)

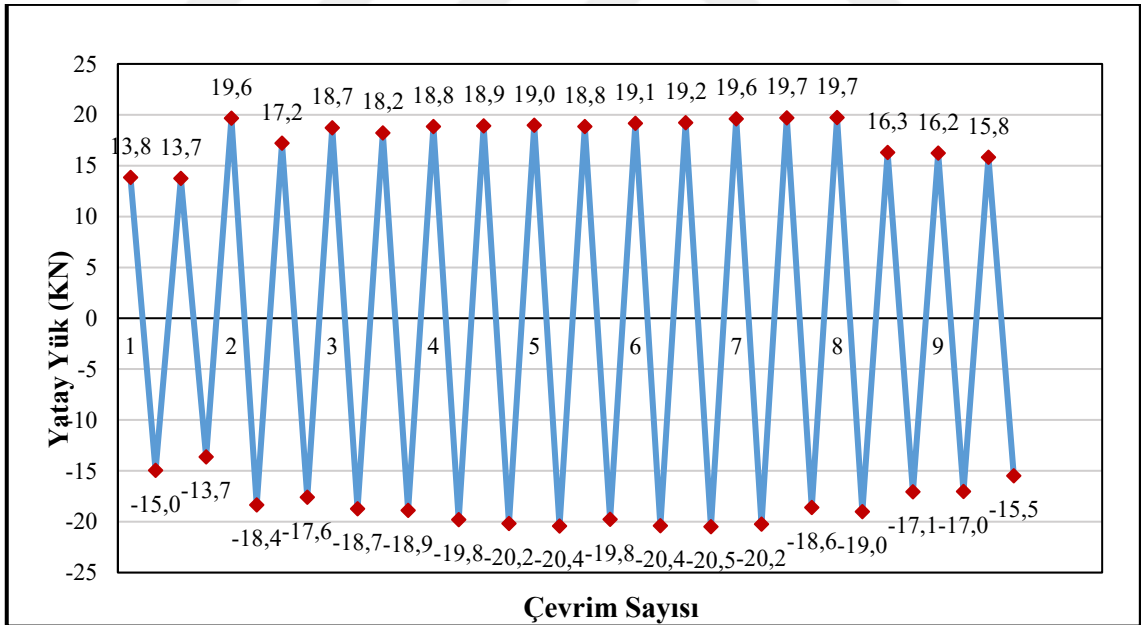
Bu deney elemanı, referans korozyon deney numunesi olarak üretilmiş olup CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) ile güçlendirme uygulanmamıştır. Numune, %20 oranında hızlandırılmış korozyon ortamında toplam 64 gün süreyle maruz bırakılmıştır. Deney numunesinin deney başlangıcından hemen önceki genel durumunu gösteren görüntü Şekil 4.16’da yer almaktadır. Deney sırasında yük hücreleri ve deplasman ölçer cihazlar aracılığıyla elde edilen veriler, çeşitli grafikler yardımıyla analiz edilerek yapısal davranış değişimleri incelenmiştir.

Deney sürecine ilişkin olarak, Şekil 4.17’de numuneye uygulanan yük geçmişi, Şekil 4.18’de ise deplasman geçmişi grafiksel olarak verilmiştir. Deney sırasında uygulanan çevrimsel yatay yükler sonucunda oluşan çatlaklar, çatlakların yerleri, yönleri ve şiddetleri gözlemlenmiş; bu bulgular Çizelge 4.2’de sistematik olarak raporlanmıştır. Deney esnasında elde edilen görsellerde kullanılan mavi renkli

işaretlemeler itme yönlü yüklemeleri (+), kırmızı renkli işaretlemeler ise çekme yönlü yüklemeleri (-) temsil etmektedir.

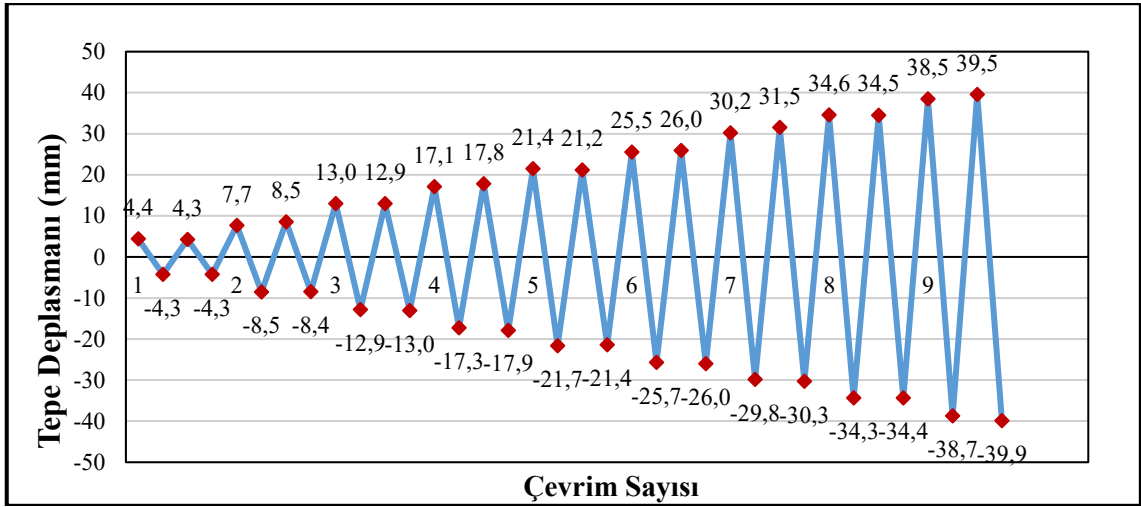


Şekil 4.16. REF+%20COR numunenin deney başlamadan önceki görüntüsü



Şekil 4.17.REF+%20COR deney numunesinin yük geçmişi grafiği





Şekil 4.18. REF+%20COR deney numunesinin deplasman geçmişi grafiği

Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, REF+%20COR deney numunesine tüm yükleme çevrimlerinde deplasman kontrollü bir yükleme protokolü uygulanmıştır. Şekil 4.18'de verilen yükleme çevrimlerinde yatay yük seviyesinin sabit kalmasına rağmen, artan deplasman talepleri nedeniyle numune, çekme bölgesindeki kiriş donatısında meydana gelen kopma sonucunda göçme durumuna ulaşmıştır.

Çizelge 4.2'de ise her bir yükleme adımı için referans korozyon deney numunesinde gözlemlenen hasar türleri ve bunların konumlarına ilişkin ölçümler detaylı şekilde raporlanmıştır.

Çizelge 4.2. Yüklemelemlerde oluşan deney elemanına ait hasar ölçümleri

| Çevrim No | Yük(kg) | Drift/Deplasman %/(mm) | Açıklama                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------|---------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +1        | 782     | 4,30                   | İlgili çevrimde, deney numunesinde toplam 6 adet yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. 1 numaralı çatlak birleşim bölgesinde meydana gelmiş olup 0,1 mm kalınlığa sahiptir. 2 numaralı çatlak, birleşim bölgesinden 5,5 cm yukarıda ve 0,1 mm kalınlığındadır. 3 numaralı çatlak 15 cm, 4 numaralı çatlak 24,0 cm, 5 numaralı çatlak 33,0 cm, 6 numaralı çatlak ise 45,0 cm mesafede yer almakta olup, her biri 0,1 mm kalınlığında gözlemlenmiştir. |



|    |       |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|-------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -1 | -2500 | 4,30  | Bu çevrimde deney numunesinde toplam 4 adet yeni çatlak oluşumu tespit edilmiştir. 1 numaralı çatlak, birleşim bölgesinden 4 cm yukarıda ve 0,1 mm kalınlığında; 2 numaralı çatlak, 22 cm yukarıda ve 0,1 mm kalınlığında; 3 numaralı çatlak ise 42,5 cm yukarıda ve yine 0,1 mm kalınlığında gözlemlenmiştir. 4 numaralı çatlak ise kolonda, giriş hizasında oluşmuş olup 0,1 mm kalınlığındadır.                                                                                                                                                                                                                        |
| +2 | 1400  | 8,60  | “Bu çevrimde deney numunesinde iki yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. 7 numaralı çatlak, kolonda giriş hizasında meydana gelmiş olup kalınlığı 0,1 mm’dir. 8 numaralı çatlak ise girişin birleşim bölgesinden 56 cm yukarıda oluşmuş ve kalınlığı 0,1 mm olarak ölçülmüştür. Mevcut çatlakların ilerleyerek genişlemeye devam ettiği görülmüştür. Bu kapsamda; 1 numaralı çatlağın kalınlığı 0,4 mm, 2 numaralı çatlağın kalınlığı 0,2 mm, 3 numaralı çatlağın kalınlığı 0,2 mm, 4 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm, 5 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm ve 6 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm olarak ölçülmüştür. |
| -2 | -2800 | 8,60  | Bu çevrimde deney numunesinde iki adet yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Birleşim bölgesinden 55 cm yukarıda 0,1 mm kalınlığında 5 numaralı çatlak ile birleşim bölgesinde 0,5 mm kalınlığa sahip 6 numaralı çatlak meydana gelmiştir. Mevcut çatlakların kalınlıklarında da değişimler kaydedilmiştir. Bu kapsamda; 1 numaralı çatlağın kalınlığı 0,4 mm, 2 numaralı çatlağın kalınlığı 0,2 mm, 3 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm ve 4 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm olarak ölçülmüştür.                                                                                                                      |
| +3 | 1350  | 12,90 | Bu çevrimde mevcut çatlakların genişliklerinde artış gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlere göre; 1 numaralı çatlağın kalınlığı 1,6 mm’ye ulaşmıştır. Diğer çatlakların güncel kalınlıkları ise şu şekildedir: 2 numaralı çatlak 0,2 mm, 3 numaralı çatlak 0,2 mm, 4 numaralı çatlak 0,1 mm, 5 numaralı çatlak 0,1 mm, 6 numaralı çatlak 0,1 mm, 7 numaralı çatlak 0,1 mm ve 8 numaralı çatlak 0,1 mm olarak ölçülmüştür.                                                                                                                                                                                                     |
| -3 | -2920 | 12,90 | Bu çevrimde çatlak genişliklerinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Ölçümler sonucunda; 1 numaralı çatlağın kalınlığı 0,8 mm, 2 numaralı çatlağın kalınlığı 0,3 mm, 3 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm, 4 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm, 5 numaralı çatlağın kalınlığı 0,1 mm ve 6 numaralı çatlağın kalınlığı 1,2 mm olarak ölçülmüştür.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| +4 | 1350  | 17,20 | 1 numaralı çatlak kalınlığı 2.5 mm'ye ulaşmıştır.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| -4 | -2800 | 17,20 | Yapılan güncel ölçümlerde, 1 numaralı çatlağın kalınlığının 2 mm’ye ulaştığı, 2 numaralı çatlağın kalınlığının 0,4 mm olduğu, 6 numaralı çatlakta ise 2 mm’yi aşan bir genişleme meydana geldiği tespit edilmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| +5 | 1360  | 21,50 | Yapılan gözlemler sonucunda, mevcut çatlaklarda sadece kalınlık artışı değil, aynı zamanda çatlak boylarında da belirgin uzamalar meydana geldiği tespit edilmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| -5 | -3080 | 21,50 | Önceki yüklemelerde meydana gelen çatlakların boylarında uzamalar gözlemlenmiştir. Aynı zamanda çatlak genişliklerinde de artışlar meydana gelmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|    |       |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +6 | 1365  | 25,80 | Kiriş bölgesinde, birleşim bölgesinden 12 cm yukarıda konumlanan 0,2 mm kalınlığında 9 numaralı yeni bir çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                              |
| -6 | -3000 | 25,80 | Yükleme çevrimlerinin ilerlemesiyle birlikte, daha önce oluşmuş çatlakların hem kalınlıklarında (genişliklerinde) hem de boylarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                |
| +7 | 1450  | 30,10 | Yükleme çevrimlerinin ilerlemesiyle birlikte, daha önce oluşmuş çatlakların hem kalınlıklarında (genişliklerinde) hem de boylarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                |
| -7 | -3000 | 30,10 | "Basınç bölgesinde yer alan beton örtüsünde dökülmelerin başladığı gözlemlenmiştir. Aynı çevrimde, kolonda 1,8 mm kalınlığa sahip 7 numaralı yeni bir çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Bu çatlak, basınç bölgesindeki malzeme bozulmasının ilerlediğini ve elemanın dayanımının azalmaya başladığını göstermektedir. |
| +8 | 1500  | 34,40 | Basınç bölgesinde yer alan kabuk beton örtüsünde dökülmeler başlamıştır.                                                                                                                                                                                                                                              |
| -8 | -3000 | 34,40 | Boyuna donatıların burkulduğu gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| +9 | 1100  | 38,70 | Donatıda burkulma ve kabuk betonda dökülmelerin devam ettiği gözlemlenmiştir.                                                                                                                                                                                                                                         |
| -9 | -2700 | 38,70 | Basınç bölgesinde oluşan kabuk betonunun dökülmesi sonucunda çekme donatılarında kopmalar meydana gelmiş ve numune, göçme yüküne ulaşmıştır. Bu nedenle deney numunelerindeki yüklemeler sonlandırılmıştır.                                                                                                           |

Deney elemanında gözlemlenen ilk çatlaklar ve oluşum bölgeleri detaylı şekilde Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Bu çatlakların oluşumu, numunenin rijitlik ve dayanımında azalmaya işaret etmekte olup, ilerleyen çevrimlerde yapısal performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



Şekil 4.19.REF+%20COR deney numunesinin deney başladıktan sonraki ilk çatlak oluşumları

Referans korozyon numunesinde kolonda meydana gelen ilk çatlak, -1. çevrim anında oluşmuş ve çatlak açıklığı 0,1 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.20). İkinci çevrimde, +2. çevrim sırasında kolonda gelişen çatlağın görsel kayıtları Şekil 4.21’de verilmiştir. Çatlakların birleşerek uzamaya devam etmesi, özellikle 5. çevrimde çekme etkisinin yoğun olduğu aşamada gerçekleşmiş olup bu durum Şekil 4.22’de açıkça gözlemlenmiştir. Basınç bölgesinde betonun ezilmesi olayı Şekil 4.23’de görülürken, kabuk betonunun dökülmeye başlaması 7. çevrimde, yaklaşık -17,3 mm deplasman seviyesinde tespit edilmiştir. Referans korozyon deney elemanı + çevrimde 19.7 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 34.56 mm deplasman yapmıştır. – Çevrimde ise 20.44 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 21.67 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanında + çevrimde 17.73 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 6.61 mm deplasman meydana gelmiştir. Deney elemanında - çevrimde 16.59 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 6.3 mm deplasman meydana gelmiştir. Göçme noktası ise + çevrimde 19.7 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 37.86 mm deplasman meydana gelmiştir. - Çevrimde ise göçme noktası 17.37 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 37.9 mm deplasman meydana gelmiştir. Donatıların burkulma evresi Şekil 4.24’de görüntülenmiş olup, donatı kopmaları ve deneyin sonlanma anına ait görseller sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.



**Şekil 4.20.** Kolonda -1 çevriminde meydana gelen ilk çatlak



Şekil 4.21. Kolonda +2 çevriminde meydana gelen ilk çatlak



Şekil 4.22. Çatlakların birleşip uzamaya devam etmesi



Şekil 4.23. Basınç bölgesinin ezilmesi



Şekil 4.24. Kabuk betonun dökülmesi

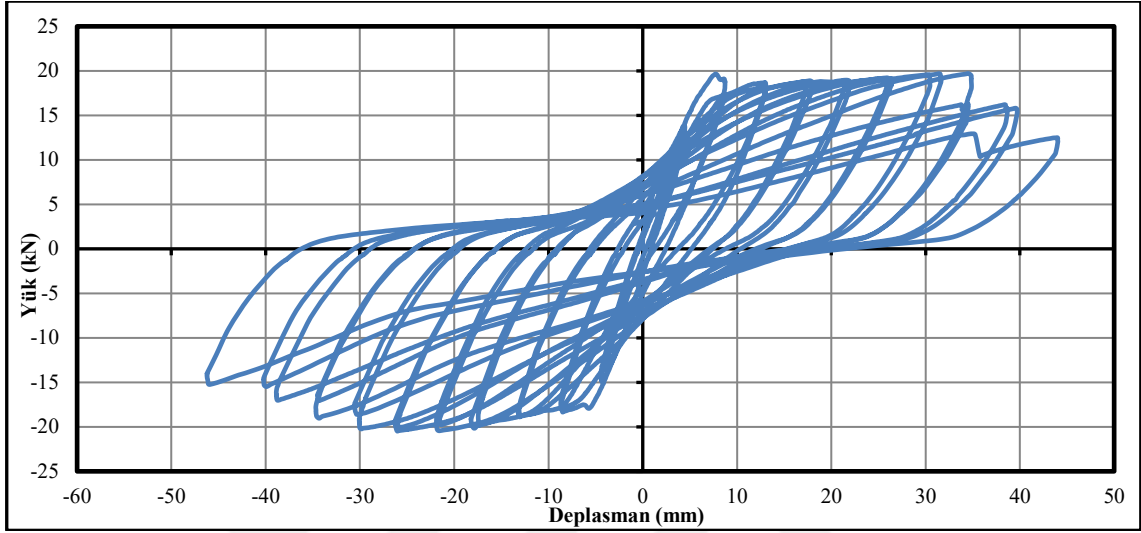


Şekil 4.25. Donatıların burkulmaya başlaması



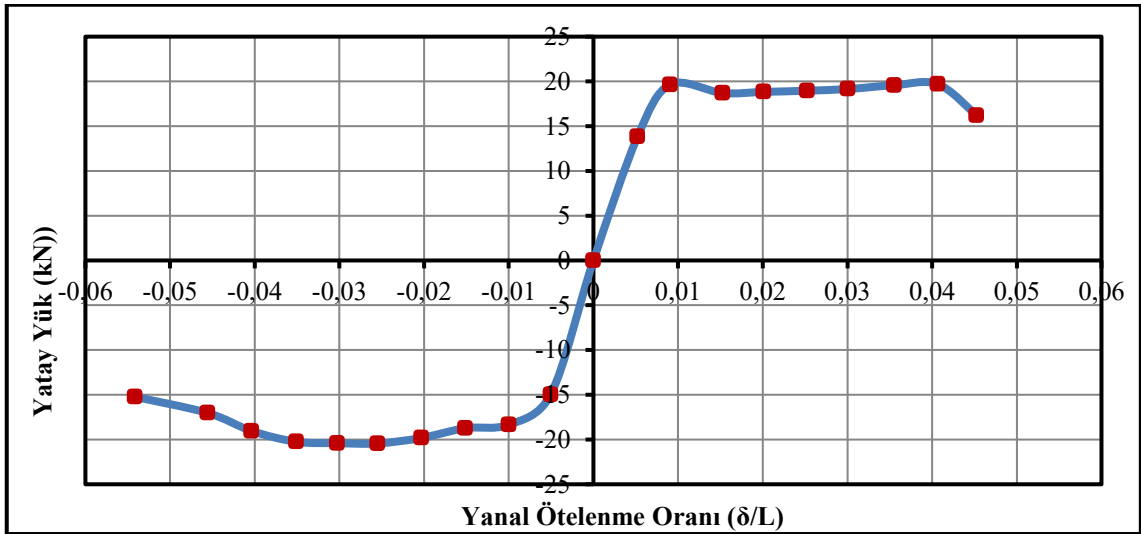
Şekil 4.26. Donatıların kopup deneyin sonlandırılması

Korozyon referans numunesine ait yatay yük – yer değiştirme çevrimsel histerezis eğrisi Şekil 4.27’de, her bir çevrimdeki maksimum yatay yük ile bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değerlerinden elde edilen dayanım zarfı ise Şekil 4.28’de verilmiştir.



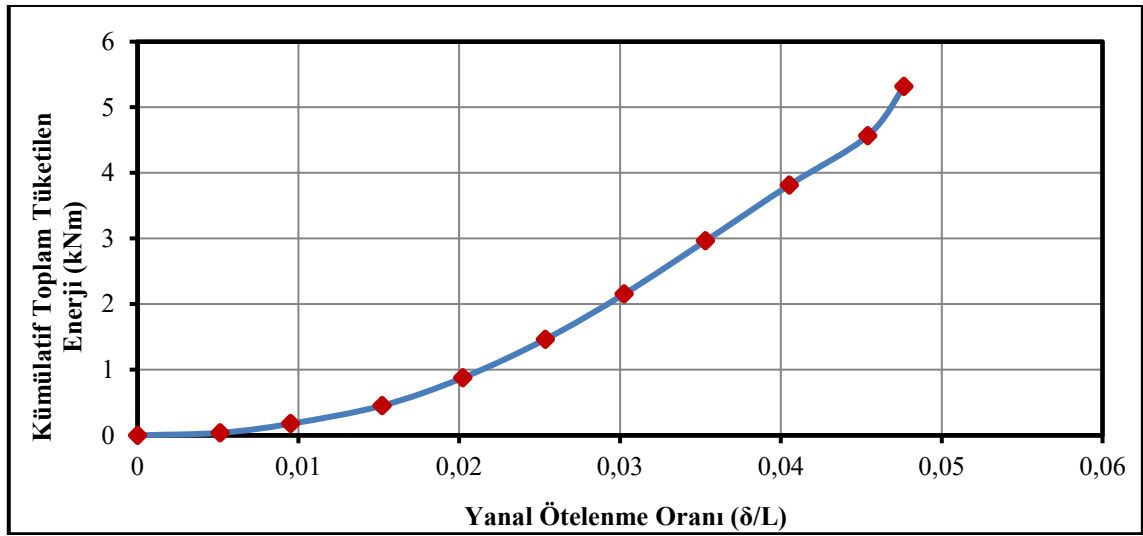
Şekil 4.27. REF+%20COR numunesinin Yatay Yük-Deplasmanı histerezis eğrisi

Referans korozyon numunesine ait dayanım zarfı grafiği, numunenin farklı çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerlerinin işaretlenip birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 4.28. REF+%20COR numunesine ait dayanım zarfı

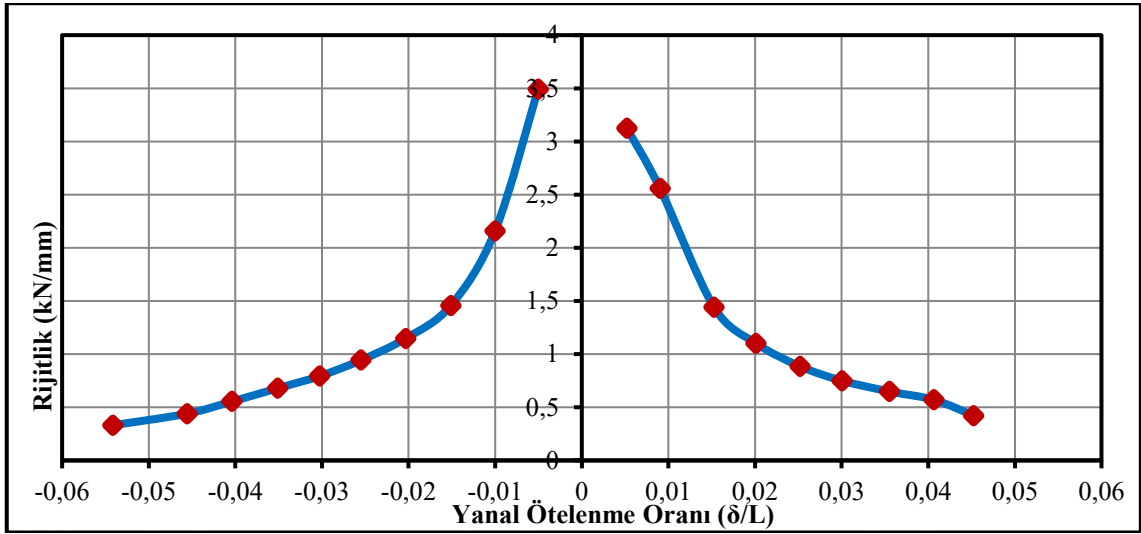
Referans korozyon numunesine ait yatay yük–yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanarak, çevrimsel enerji tüketimleri belirlenmiş ve bu değerlerin kümülatif toplamı ile numunenin enerji tüketme kapasitesine ilişkin ötelenme oranı grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik Şekil 4.29’da verilmiştir. Kümülatif tüketilen enerji değerleri + ve – çevrim değerleri ortalaması alınarak oluşturulmuş olup Referans Korozyon Deney numunesi için kümülatif tüketilen enerji değeri 5.32 kNm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.29. REF+%20COR numunesine ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

Referans Korozyon deney numunesine ait rijitlik azalımı grafiği Şekil 4.30’da verilmiştir. Söz konusu grafikte, eğrinin sol tarafında yer alan alanlar itme yönlü çevrimlerde hesaplanan rijitlik değerlerini, sağ tarafında kalan alanlar ise çekme yönlü çevrimlerde elde edilen rijitlik değerlerini temsil etmektedir. Deney numunesinin + çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri 3.12 kN/mm, - çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri ise 3.49 kN/mm olarak meydana gelmiştir.





Şekil 4.30.REF+%20COR numunesinin rijitlik azalımı grafiği

#### 4.1.3. Üçüncü deney %20Korozyon+CFRP Deneyi(%20COR+CFRP)

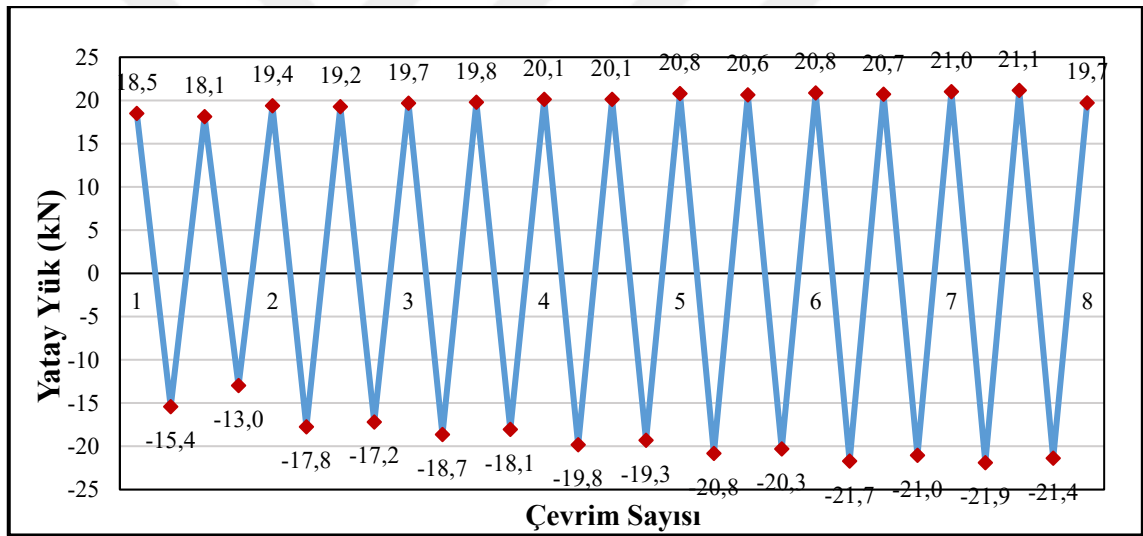
Bu deney elemanı, %20 oranında hızlandırılmış korozyona tabi tutulduktan sonra karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmek üzere hazırlanmıştır. Hızlandırılmış korozyon işlemi, numunenin %20 ağırlık kaybına ulaşması hedeflenerek 64 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. %20 Korozyon+ CFRP deney numunesinin deney başlangıcından hemen önceki genel durumunu gösteren görüntü Şekil 4.31’de yer almaktadır. Güçlendirme işlemi sonrası, bu deney elemanının yapısal davranışındaki değişim, diğer deney elemanlarına uygulanan korozyon ve güçlendirme şartlarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir. Yapısal performans değerlendirmeleri, yük hücreleri ve deplasman ölçerler vasıtasıyla elde edilen verilerin analiziyle gerçekleştirilmiş ve çeşitli grafiklerle görselleştirilmiştir.

Şekil 4.32’de söz konusu deney elemanına ait yük geçmişi grafiği, Şekil 4.33’de ise deplasman geçmişi grafiği sunulmaktadır. Deney sürecinde numunede gözlemlenen çatlaklar, yer değiştirmeler ve uygulanan yükler arasındaki ilişki Çizelge 4.3’te detaylandırılmıştır. Görsellerde mavi renkli çizgiler itme (pozitif yükleme) etkilerini, kırmızı renkli işaretlemeler ise çekme (negatif yükleme) etkilerini göstermektedir.

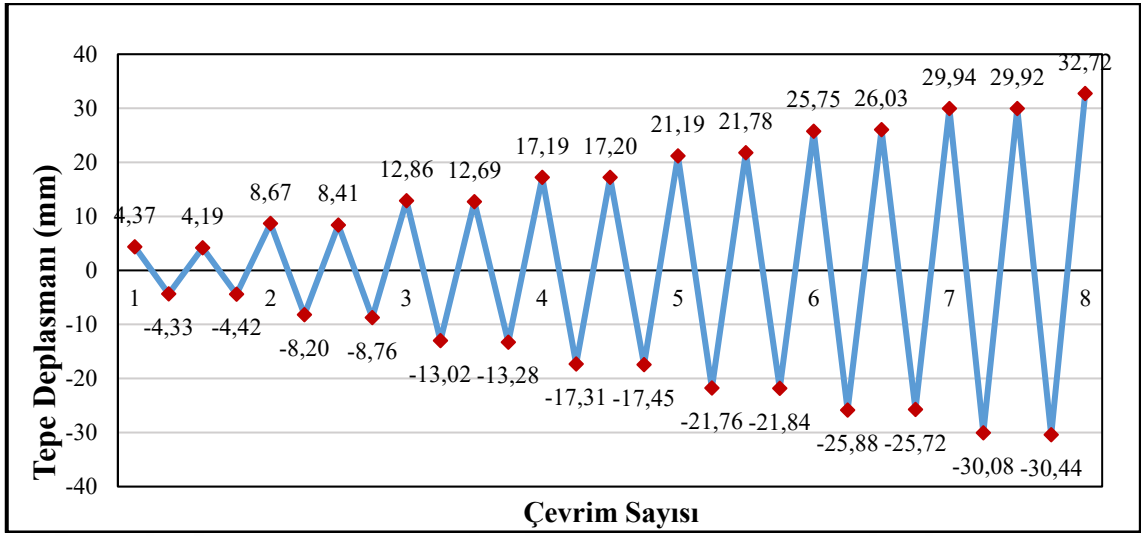




Şekil 4.31. %20COR+CFRP numunenin deney başlamadan önceki görüntüsü



Şekil 4.32. %20COR+CFRP deney numunesinin yük geçmişi grafiği



Şekil 4.33. %20COR+CFRP deney numunesinin deplasman geçmişi grafiği

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere, deney numunesine tüm çevrimlerde deplasman kontrollü yükleme uygulanmıştır. Devam eden çevrimlerde yatay yük sabit tutulduğundan, numune deplasman kontrollü yükleme sayesinde kirişin çekme donatısında meydana gelen kopma ile yapısal göçme konumuna ulaşmıştır.

Çizelge 4.3. Yüklmelerde oluşan deney elemanına ait hasar ölçümleri

| Çevrim No | Yük(kg) | Drift/Deplasman %/(mm) | Açıklama                                                                                              |
|-----------|---------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +1        | 1000    | 4,30                   | Numunede hasar oluşumu yoktur.                                                                        |
| -1        | -2537   | 4,30                   | Numunede hasar oluşumu yoktur.                                                                        |
| +2        | 1140    | 8,60                   | Birleşim bölgesinde uygulanan CFRP yüzeyinde, 1 numaralı kılcal çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. |
| -2        | -2770   | 8,60                   | Numunede herhangi değişikliğe rastlanmamıştır.                                                        |
| +3        | 1150    | 12,90                  | Numunede herhangi değişikliğe rastlanmamıştır.                                                        |
| -3        | -2975   | 12,90                  | Numunede herhangi değişikliğe rastlanmamıştır.                                                        |

|    |       |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----|-------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +4 | 700   | 17,20 | Kirişte, birleşim noktasından itibaren 2 numaralı çatlak, 55 cm yükseklikte ve yaklaşık 0,1 mm kalınlığında, ayrıca kolonun kiriş hizasında 3 numaralı çatlak da benzer kalınlıkta (0,1 mm) gözlemlenmiştir.                                                                                |
| -4 | -3100 | 17,20 | Kirişte, birleşim noktasından itibaren 1 numaralı çatlak 55 cm yükseklikte ve yaklaşık 0,1 mm kalınlığında; ayrıca 2 numaralı çatlak, kolonun kiriş hizasında ve yine yaklaşık 0,1 mm kalınlığında olmak üzere yeni çatlaklar gözlemlenmiştir.                                              |
| +5 | 717   | 21,50 | Birleşim bölgesinde bulunan 1 numaralı CFRP tabakasında meydana gelen açılmaların genişliği 2 mm'yi aşmıştır.                                                                                                                                                                               |
| -5 | -3200 | 21,50 | CFRP kompozitindeki açılmalar gözlemlenmeye devam etmektedir.                                                                                                                                                                                                                               |
| +6 | 700   | 25,80 | CFRP kompozitindeki açılmalar gözlemlenmeye devam etmektedir.                                                                                                                                                                                                                               |
| -6 | 3250  | 25,80 | Birleşim bölgesinde CFRP üzerinde 0,3 mm kalınlığında 3 numaralı yeni bir açılma oluşmuştur. Ayrıca, 2 numaralı çatlakın kalınlığı 0,3 mm'ye ulaşmıştır. Çekme donatısında kopma meydana gelmiş ve numune yapısal göçme konumuna ulaşmıştır. Bu nedenle, deneyde yüklemeye son verilmiştir. |

Deney numunesinin kiriş bölgesinde ortaya çıkan ilk kılcal çatlaklar Şekil 4.34'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.34. %20COR+CFRP numunesinin deney başladıktan sonraki ilk çatlak oluşumları

Bu deney numunesinde, +4. çevrim anında meydana gelen çatlak 0,1 mm kalınlığında ölçülmüştür. Çatlak anındaki numunenin görüntüsü Şekil 4.35te verilmiştir. Birleşim bölgesinde yer alan 1 numaralı CFRP tabakasındaki açılmaların genişliğinin 2 mm'yi aştığı, ilgili görselde Şekil 4.36'da verilmiştir. %20COR+CFRP deney elemanı + çevrimde 20.99 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 29.94 mm deplasman

yapmıştır. – Çevrimde ise 21.9 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 30.08 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanında + çevrimde 18.6 yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 4.96 mm deplasman meydana gelmiştir. Deney elemanında- çevrimde 16.43 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 7.99 mm deplasman meydana gelmiştir. Göçme noktası ise + çevrimde 17.84 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 32.72 mm deplasman meydana gelmiştir. - Çevrimde ise göçme noktası 18.62 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 30.08 mm deplasman meydana gelmiştir. CFRP'deki açılmaların devam ettiği görüntü Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 'de, donatıların kopup deney sonu görüntüleri Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Numunede +4 çevriminde meydana gelen ilk çatlak oluşumu



Şekil 4.36. Numunede meydana gelen ikinci çatlak oluşumu



Şekil 4.37. CFRP'de oluşan ayrılmalar



Şekil 4.38. CFRP'de oluşan ayrılmalar



Şekil 4.39. Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması



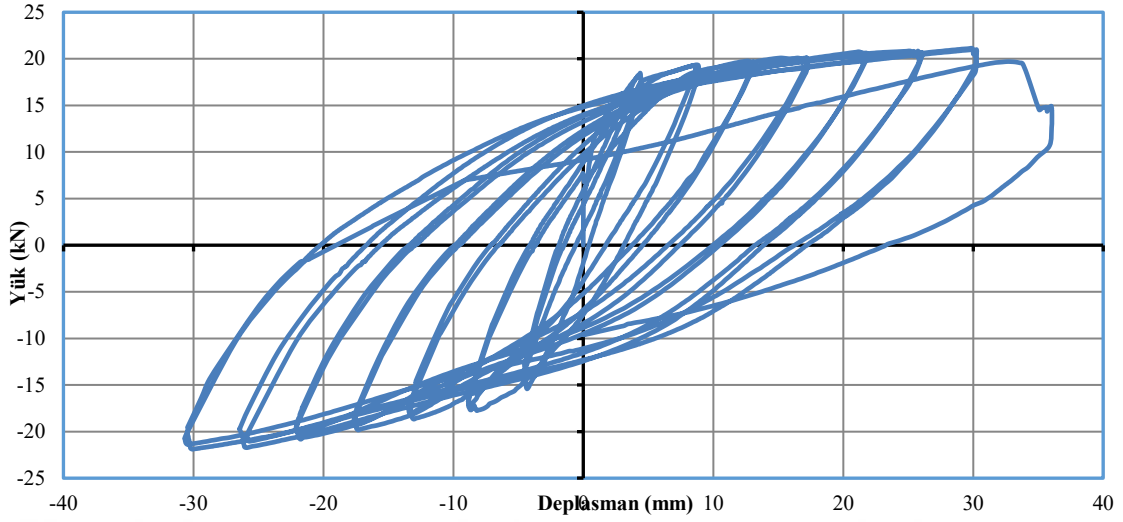
**Şekil 4.40.** Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması



**Şekil 4.41.** Donatıların kopup deneyin sonlandırılması

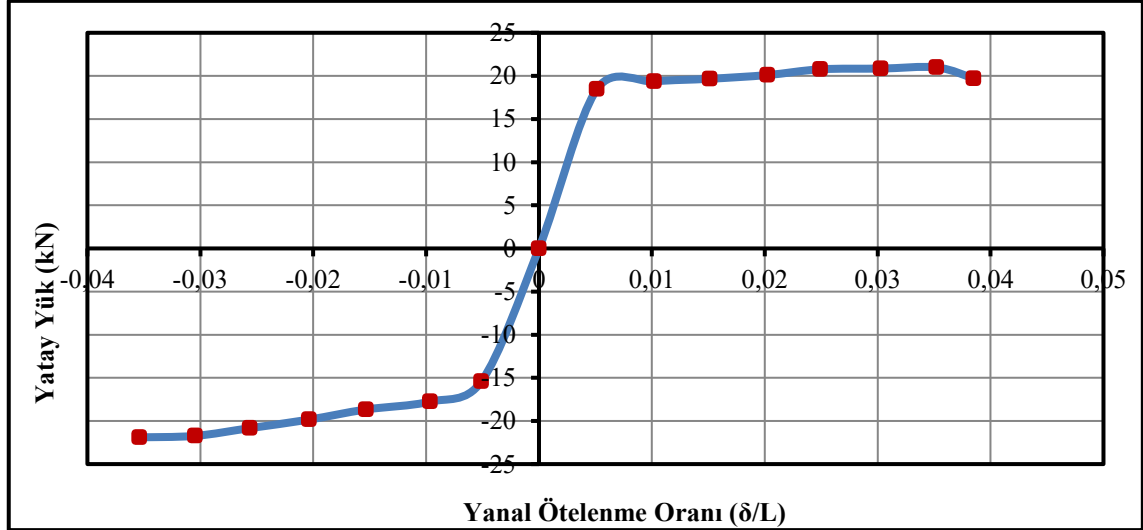
%20COR+CFRP numunesine ait yatay yük – yer değiştirme çevrimsel histerezis eğrisi Şekil 4.42’de, her bir çevrimdeki maksimum yatay yük ile bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değerlerinden elde edilen dayanım zarfı ise Şekil 4.43’de verilmiştir.





Şekil 4.42. %20COR+CFRP numunesinin Yatay Yük-Deplasmanı histerezis eğrisi

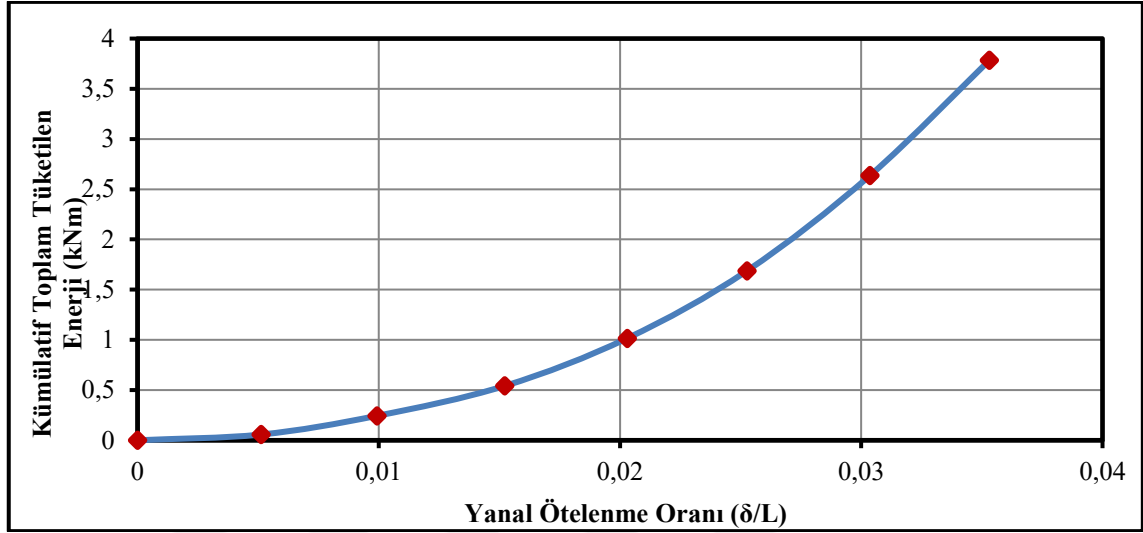
%20COR+CFRP numunesine ait dayanım zarfı grafiği, numunenin farklı çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerlerinin işaretlenip birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 4.43.%20COR+CFRP numunesine ait dayanım zarfı

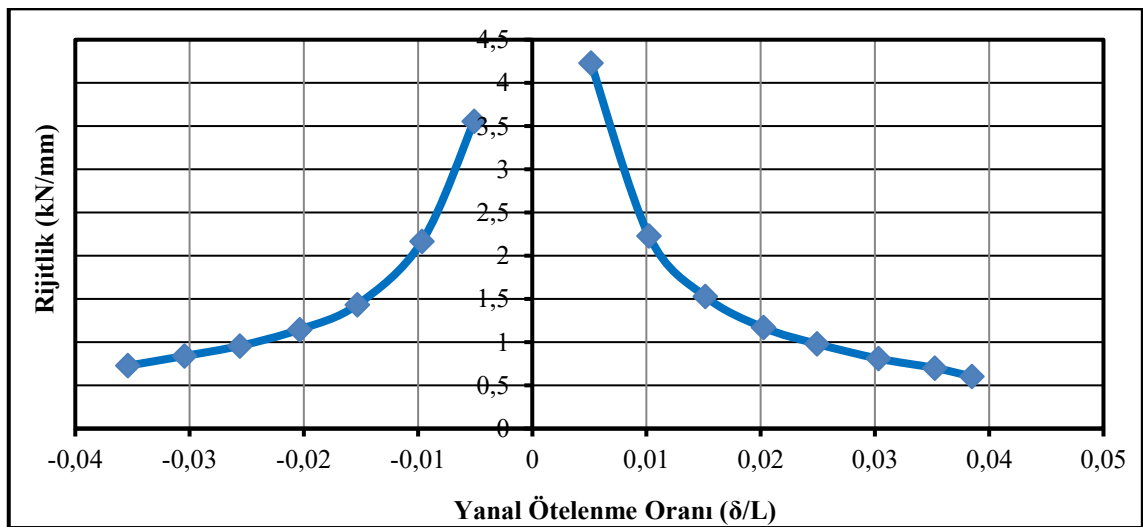
%20COR+CFRP numunesine ait yatay yük–yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanarak, çevrimsel enerji tüketimleri belirlenmiş ve bu değerlerin kümülatif toplamı ile numunenin enerji tüketme kapasitesine ilişkin ötelenme oranı grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik Şekil 4.44’de verilmiştir. Kümülatif tüketilen enerji değerleri + ve – çevrim değerleri ortalaması alınarak oluşturulmuş olup

%20COR+CFRP deney numunesi için kümülatif tüketilen enerji değeri 3.78 kNm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.44. %20COR+CFRP numunesine ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

%20COR+CFRP deney numunesine ait rijitlik azalımı grafiği Şekil 4.45'te verilmiştir. Söz konusu grafikte, eğrinin sol tarafında yer alan alanlar itme yönlü çevrimlerde hesaplanan rijitlik değerlerini, sağ tarafında kalan alanlar ise çekme yönlü çevrimlerde elde edilen rijitlik değerlerini temsil etmektedir. Deney numunesinin + çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri 4.23 kN/mm, - çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri ise 3.56 kN/mm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.45. %20COR+CFRP numunesinin rijitlik azalımı grafiği

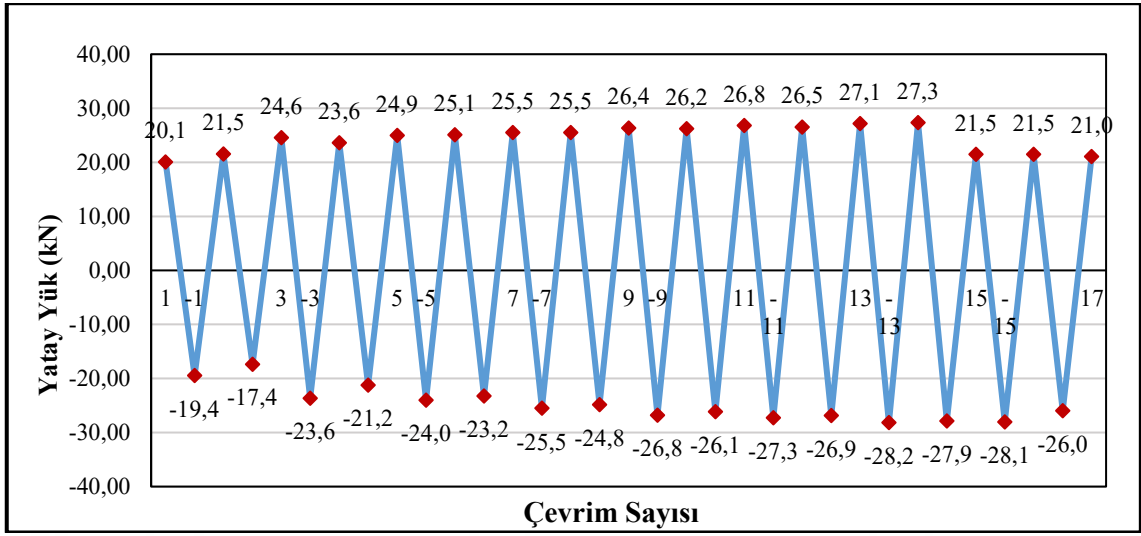


#### 4.1.4. Dördüncü deney CFRP+%20 Korozyon Deneyi (CFRP+%20COR)

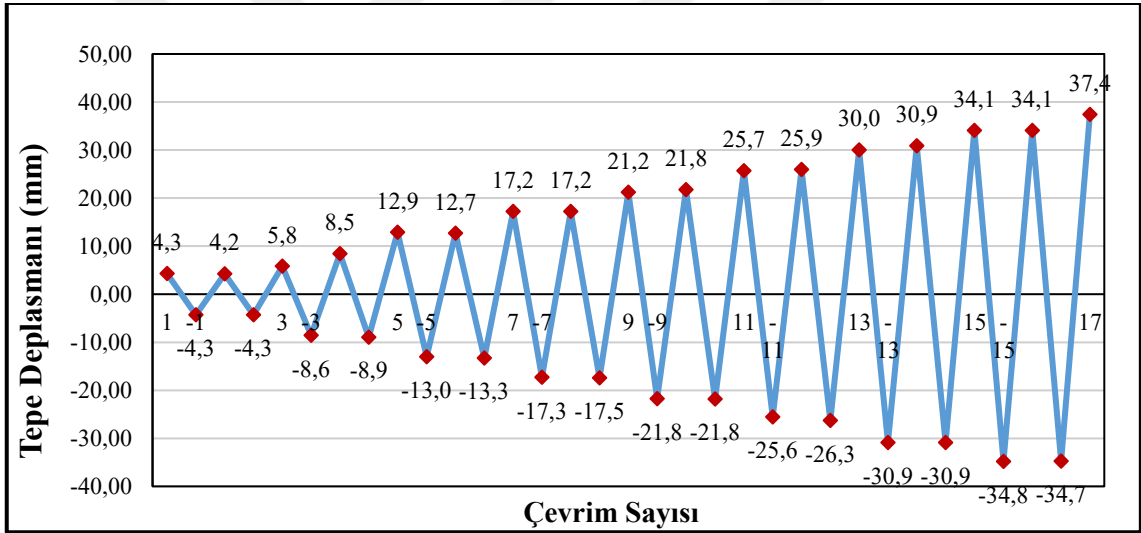
Bu deney elemanı, CFRP ile güçlendirilmiş ve ağırlıkça %20 oranında hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmak üzere korozyon havuzunda 64 gün süreyle bekletilmiştir. %20 korozyon+ CFRP deney numunesinin deney başlangıcından hemen önceki genel durumunu gösteren görüntü Şekil 4.46'da yer almaktadır. Deney elemanının yapısal davranışındaki değişimlerin, diğer deney elemanlarına uygulanan korozyon ve güçlendirme etkileriyle karşılaştırılabilmesi amacıyla; yük hücreleri ve deplasman ölçerler aracılığıyla elde edilen veriler kullanılarak çeşitli grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4.47'de deney elemanının yük geçmişi grafiği, Şekil 4.48'de ise deplasman geçmişi grafiği sunulmaktadır. Deney sürecinde oluşan çatlaklar, yer değiştirmeler ve uygulanan yükler doğrultusunda gözlemlenen çatlaklar ise Çizelge 4.4'te detaylandırılmıştır. Görsellerde kullanılan mavi renkli çizgi işaretlemeleri itme yönündeki (+) hareketleri, kırmızı renkli işaretlemeler ise çekme yönündeki (–) hareketleri ifade etmektedir.



Şekil 4.46. CFRP+%20COR numunenin deney başlamadan önceki görüntüsü



Şekil 4.47.CFRP+%20COR deney numunesinin yük geçmişi grafiği



Şekil 4.48.CFRP+%20COR deney numunesinin deplasman geçmişi grafiği

Şekil 4.47’de görüldüğü üzere, deney numunesine tüm çevrimler boyunca deplasman kontrollü yükleme uygulanmıştır. Devam eden çevrimlerde yatay yük sabit tutulduğundan, deney numunesi deplasman kontrollü yükleme ile kirişin çekme donatısında meydana gelen kopma sonucu göçme konumuna ulaşmıştır. Çizelge 4.4’te ise, CFRP+%20COR deney elemanında her bir yükleme aşamasında gözlemlenen hasar ölçümleri detaylı olarak sunulmaktadır. Kiriş bölgesinde meydana gelen bu ilk çatlakların konumu ve yayılımı, Şekil 4.49’da verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Yüklemelerde oluşan deney elemanına ait hasar ölçümleri

| Çevrim No | Yük(kg) | Drift/Deplasman %/(mm) | Açıklama                                                                                                                                                                                      |
|-----------|---------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +1        | 950     | 4,30                   | Numunede herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.                                                                                                                                       |
| -1        | -2500   | 4,30                   | Kirişte, birleşim noktasından itibaren 53 cm yükseklikte, 1 numaralı bölgede 0,1 mm kalınlığında yeni bir çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.                                                     |
| +2        | 1380    | 8,60                   | Birleşim bölgesinde, 1 numaralı konumda 0,1 mm kalınlığında kılcal çatlaklar oluşmuştur.                                                                                                      |
| -2        | -2925   | 8,60                   | Birleşim bölgesinde, 2 numaralı konumda 0,1 mm kalınlığında ve 3 numaralı konumda, birleşim noktasından 63 cm yükseklikte kirişte 0,1 mm kalınlığında yeni çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. |
| +3        | 1380    | 12,90                  | Numunede herhangi değişiklik gözlemlenmemiştir.                                                                                                                                               |
| -3        | -2970   | 12,90                  | Birleşim bölgesinde yer alan 1 numaralı çatlağın kalınlığı 1,1 mm'ye ulaşmıştır.                                                                                                              |
| +4        | 1500    | 17,20                  | Numunede herhangi değişiklik görülmemiştir.                                                                                                                                                   |
| -4        | -3000   | 17,20                  | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlak kalınlığı 2 mm 'yi geçmiştir.                                                                                                                         |
| +5        | 1520    | 21,50                  | Numunede herhangi değişiklik görülmemiştir.                                                                                                                                                   |
| -5        | -3100   | 21,50                  | Kolonda giriş hizasında 4 numaralı 0.1 mm kalınlığında yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.                                                                                                   |
| +6        | 1550    | 25,80                  | Birleşim bölgesindeki CFRP tabakasının betondan ayrıştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kolonda yer alan 4 numaralı çatlakta uzama meydana geldiği kaydedilmiştir.                               |
| -6        | -3200   | 25,80                  | Numunede herhangi değişiklik gözlemlenmemiştir.                                                                                                                                               |

|    |       |       |                                                                                                                        |
|----|-------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +7 | 1550  | 30,10 | Kolondaki çatlak kalınlığı 0.2 mm'ye ulaşmıştır.                                                                       |
| -7 | -3400 | 30,10 | Çatlaklarda uzama devam etmekte olup, CFRP üzerindeki açılmalar da ilerlemektedir.                                     |
| +8 | 1050  | 34,40 | Çatlaklarda uzama devam etmekte olup, CFRP üzerindeki açılmalar da ilerlemektedir.                                     |
| -8 | -3300 | 34,40 | Birleşim bölgesinde ayrılmalar tespit edilmiştir ve basınç bölgesindeki donatının kopması gözlemlenmiştir.             |
| +9 |       | 38,70 | Donatılarda kopmalar meydana gelmiş ve numune göçme konumuna ulaşmıştır. Bu aşamada deneyde yüklemeye son verilmiştir. |



**Şekil 4.49.** CFRP+%20COR numunesinin deney başladıktan sonraki ilk çatlak oluşumları

CFRP ile güçlendirilmiş ve %20 oranında hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmış deney numunesinde, -1. çevrimde oluşan çatlak 0,1 mm kalınlığında ölçülmüştür. Ölçüm anındaki deney numunesinin görüntüsü Şekil 4.50'de verilmiştir. Birleşim bölgesinde yer alan 1 numaralı CFRP tabakasında, -4. çevrim sırasında açılmalar 2 mm'yi aşmış ve bu durum Şekil 4.51'de detaylı olarak görselleştirilmiştir. CFRP'deki açılmaların ilerleyişi Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'deki görüntülerle desteklenmiştir. Kopma ve sonrasındaki numune durumu ise Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'de açıkça gösterilmektedir.

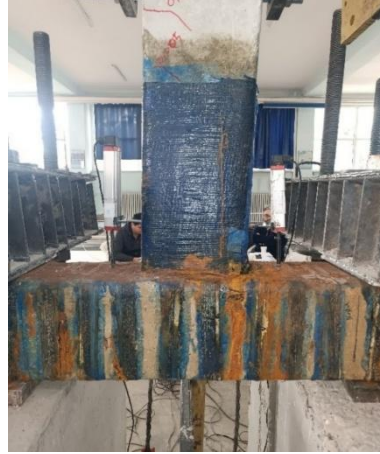
CFRP+%20COR deney elemanı + çevrimde 27.13 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 30.02 mm deplasman yapmıştır. – Çevrimde ise 28.18 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 30.92 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanında + çevrimde 24.58 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 5.85 mm deplasman meydana gelmiştir. Deney elemanında- çevrimde 23.11 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 8.01 mm deplasman meydana gelmiştir. Göçme noktası ise + çevrimde 23.06 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 32.794 mm deplasman meydana gelmiştir. - Çevrimde ise göçme noktası 23.95 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 39.12 mm deplasman meydana gelmiştir.



**Şekil 4.50.** Numunede-1. çevriminde meydana gelen ilk çatlak oluşumu



**Şekil 4.51.**Numunede meydana gelen CFRP'deki açılmaların 2 mm'yi geçtiği görülen -4 çevriminin görseli



**Şekil 4.52.** +5. Çevrimde CFRP'deki açılmalar



**Şekil 4.53.** +6. Çevrimde CFRP'deki açılmalar

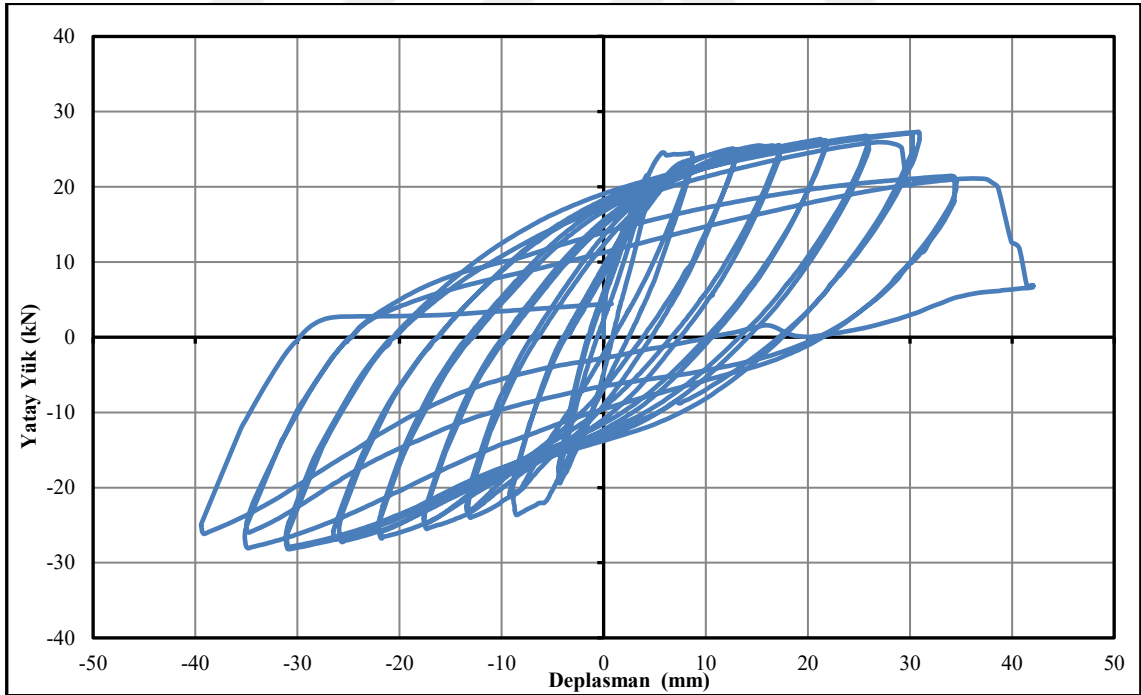


**Şekil 4.54.** Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması



Şekil 4.55. Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması

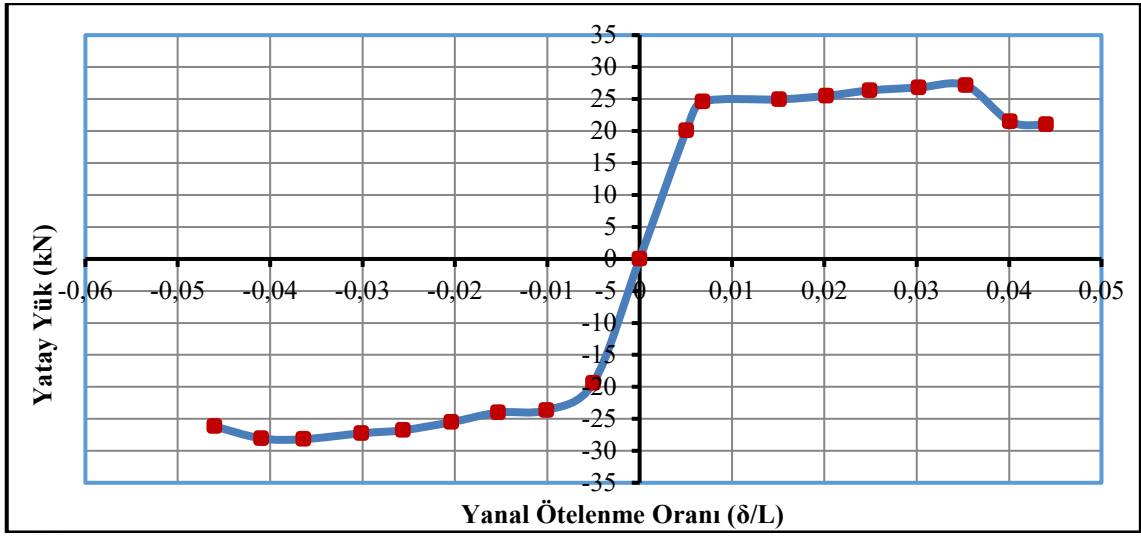
CFRP+%20COR numunesine ait yatay yük – yer değiştirme çevrimsel histerezis eğrisi Şekil 4.56’da her bir çevrimdeki maksimum yatay yük ile bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değerlerinden elde edilen dayanım zarfı ise Şekil 4.57’de verilmiştir.



Şekil 4.56. CFRP+%20COR numunesinin Yatay Yük-Deplasmanı histerezis eğrisi

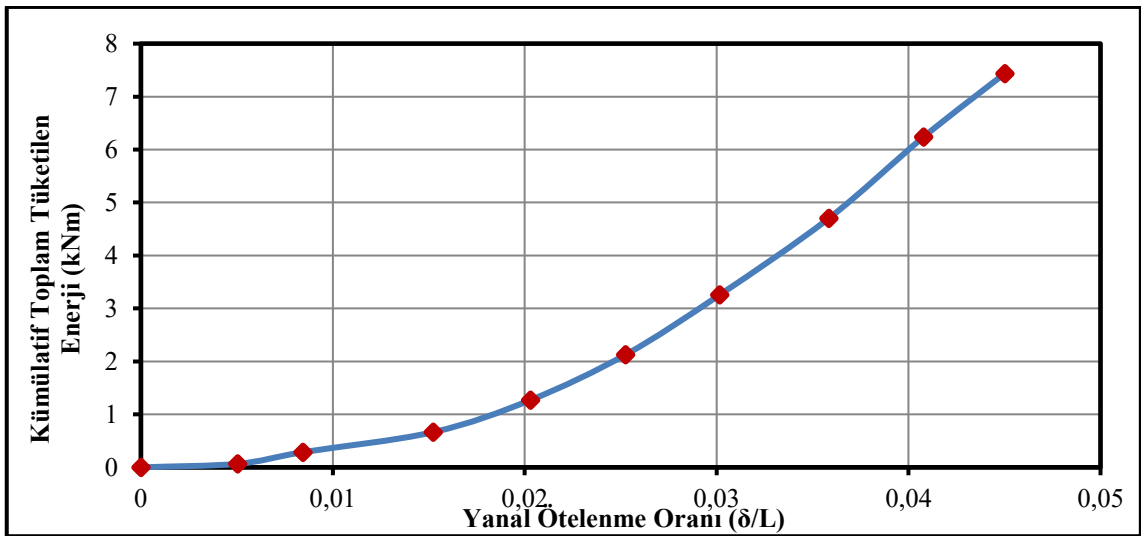
CFRP+%20COR numunesine ait dayanım zarfı grafiği, numunenin farklı çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerlerinin işaretlenip birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.





Şekil 4.57. CFRP+%20COR numunesine ait dayanım zarfı

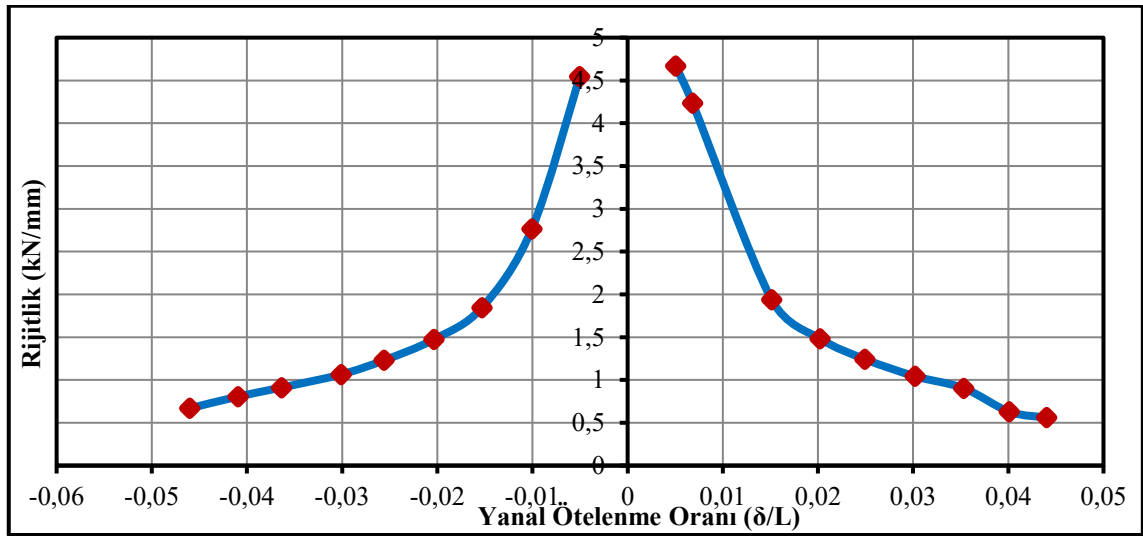
CFRP+%20COR numunesine ait yatay yük–yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanarak, çevrimsel enerji tüketimleri belirlenmiş ve bu değerlerin kümülatif toplamı ile numunenin enerji tüketme kapasitesine ilişkin ötelenme oranı grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik Şekil 4.58’de verilmiştir. Kümülatif tüketilen enerji değerleri + ve – çevrim değerleri ortalaması alınarak oluşturulmuş olup CFRP+%20COR deney numunesi için kümülatif tüketilen enerji değeri 7.44 kNm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.58. CFRP+%20COR numunesine ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği



CFRP+%20COR deney numunesine ait rijitlik azalımı grafiği Şekil 4.59’da verilmiştir. Söz konusu grafikte, eğrinin sol tarafında yer alan alanlar itme yönlü çevrimlerde hesaplanan rijitlik değerlerini, sağ tarafında kalan alanlar ise çekme yönlü çevrimlerde elde edilen rijitlik değerlerini temsil etmektedir. Deney numunesinin + çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri 4.67 kN/mm, - çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri ise 4.54 kN/mm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.59. CFRP+%20COR numunesinin rijitlik azalımı grafiği

#### 4.1.5. Beşinci deney %10 Korozyon+CFRP+%10 Korozyon Deneyi (%10 COR+CFRP+%10 COR)

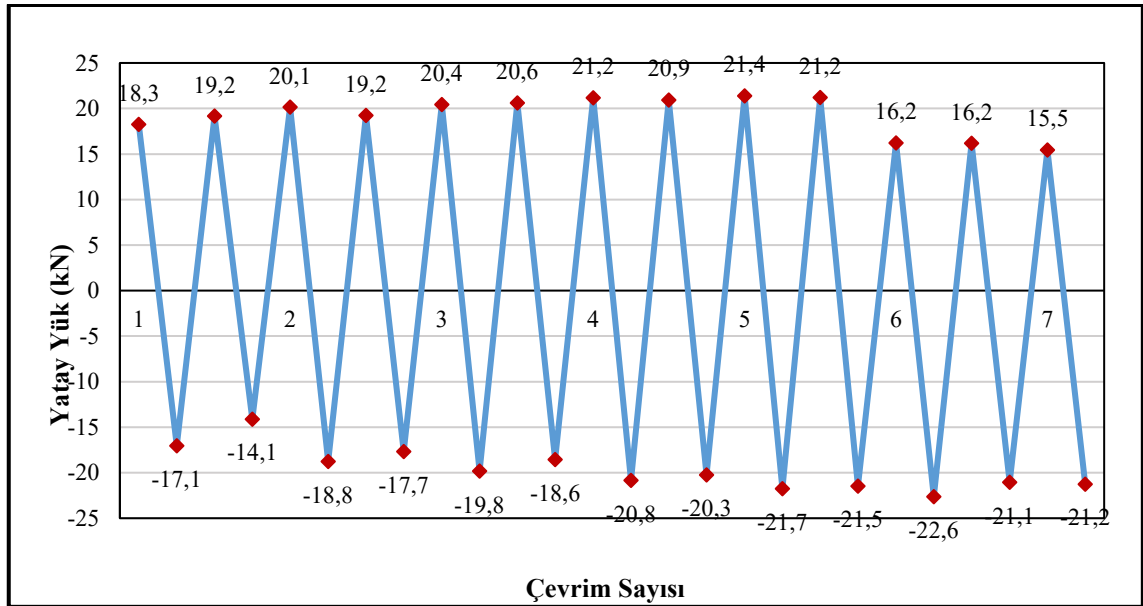
Bu deney elemanı, ağırlıkça %10 oranında hızlandırılmış korozyona 32 gün süreyle maruz bırakılmış, ardından CFRP ile güçlendirilmiş ve sonrasında tekrar %10 ağırlık kaybı hedefiyle 32 gün daha hızlandırılmış korozyona tabi tutulmuştur. Numunenin deney öncesindeki durumu Şekil 4.60’de verilmiştir. Bu süreç sonucunda, deney elemanının korozyon ve güçlendirme uygulamalarına bağlı olarak yapısal davranışındaki değişiklikleri değerlendirmek amacıyla, yük hücreleri ve deplasman ölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak çeşitli grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4.61’de deney elemanına ait yük geçmişi grafiği; Şekil 4.62’de ise deplasman geçmişi grafiği verilmiştir. Deney süreci boyunca numunede meydana gelen çatlaklar, uygulanan yer değiştirmeler ve yükler dikkate alınarak detaylı şekilde izlenmiş ve gözlemler Çizelge 4.5’te raporlanmıştır. Görsellerde mavi renkli çizgi işaretlemeleri

itme (+) yönündeki çatlakları, kırmızı renkli işaretlemeler ise çekme (–) yönündeki çatlakları göstermektedir.

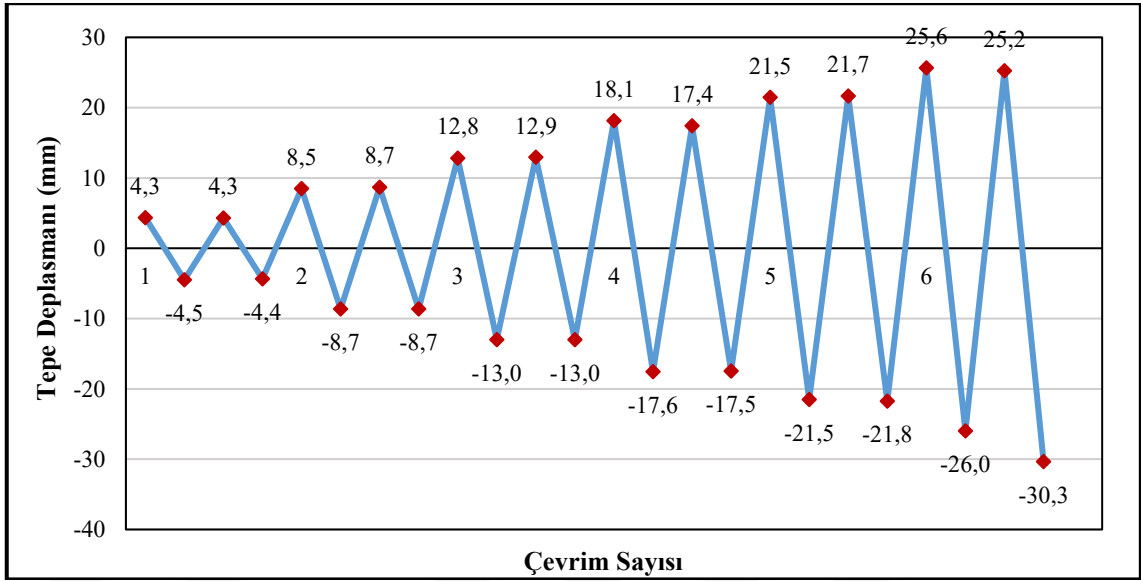
Şekil 4.61’de görüldüğü üzere, deney numunesine tüm yükleme çevrimlerinde deplasman kontrollü yükleme uygulanmıştır. İlerleyen çevrimlerde yatay yük sabit kalmış, bu durum sonucunda numune, deplasman kontrollü yükleme altında kirişin çekme donatısında oluşan kopma ile göçme noktasına ulaşmıştır. Çizelge 4.5’te ise her bir yükleme aşamasında %10 COR+CFRP+%10 COR deney elemanında meydana gelen hasar ölçümleri detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 4.60. %10 COR+CFRP+%10 COR numunenin deney başlamadan önceki görüntüsü



Şekil 4.61. %10 COR+CFRP+%10 COR deney numunesinin yük geçmişi grafiği



Şekil 4.62. %10 COR+CFRP+%10 COR deney numunesinin deplasman geçmişi grafiği

Çizelge 4.5. Yüklemlerde oluşan deney elemanına ait hasar ölçümleri

| Çevrim No | Yük(kg) | Drift/Deplasman<br>%/(mm) | Açıklama                                                                                  |
|-----------|---------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| +1        | 1100    | 4,30                      | Yükleme anında çatlak gözlemlenmemiştir                                                   |
| -1        | -2500   | 4,30                      | Yükleme anında çatlak gözlemlenmemiştir                                                   |
| +2        | 1180    | 8,60                      | Birleşim bölgesinde 1 numaralı bölgede 0,9 mm kalınlığında çatlak oluşumu gözlemlenmiştir |
| -2        | 2700    | 8,60                      | Birleşim bölgesinde 1 numaralı bölgede 0,4 mm kalınlığında çatlak oluşumu gözlemlenmiştir |
| +3        | 1250    | 12,90                     | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlağın kalınlığı 2 mm'ye ulaşmıştır                    |
| -3        | -2800   | 12,90                     | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlağın kalınlığı 0,9 mm'ye ulaşmıştır                  |

|    |       |       |                                                                                                                                                                                                 |
|----|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| +4 | 1270  | 17,20 | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlak kalınlığı 2,5 mm kalınlığa ulaşmıştır                                                                                                                   |
| -4 | -2900 | 17,20 | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlak kalınlığı 2,5 mm'yi aşmıştır. Ayrıca birleşim bölgesinden 57 cm yükseklikte kirişte 0,1 mm kalınlığında 2 numaralı yeni çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. |
| +5 | 1300  | 21,50 | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlak kalınlığı 4 mm'ye ulaşmıştır.                                                                                                                           |
| -5 | -3000 | 21,50 | Çatlak uzunlukları artarak devam etmektedir.                                                                                                                                                    |
| +6 | 760   | 25,80 | Donatılarda kopma meydana gelmiş ve numune göçme konumuna ulaşmıştır. Bu nedenle deneyde yüklemeye son verilmiştir.                                                                             |

%10 COR+CFRP+%10 COR numunesinde +2. çevrimde oluşan çatlak 0.9 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerde görülen numunedeki çatlak görüntüsü Şekil 4.63'de verilmiştir. Birleşim bölgesindeki 1 numaralı CFRP'de açılmaların 2 mm'yi aştığı +3. çevrime ait görsel Şekil 4.64'te verilmiştir. CFRP'deki açılmaların devamına ilişkin görüntüler Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da yer almakta olup, 6. çevrimde donatıların kopması ve deney sonu durumuna ait görüntüler ise Şekil 4.67, Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da verilmiştir.

%10 COR+CFRP+%10 COR deney elemanı + çevrimde 21.38 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 21.45 mm deplasman yapmıştır. – Çevrimde ise 22.63 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 26.28 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanında + çevrimde 18.59 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 5.08 mm deplasman meydana gelmiştir. Deney elemanında- çevrimde 18.79 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 8.81 mm deplasman meydana gelmiştir. Göçme noktası ise + çevrimde 18.17 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 24.2 mm deplasman meydana gelmiştir. - Çevrimde ise göçme noktası 19.24 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 30.35 mm deplasman meydana gelmiştir.



**Şekil 4.63.** Numunede +2. çevriminde meydana gelen 0.9 mm kalınlığa sahip çatlak görüntüsü



**Şekil 4.64.** Numunede meydana gelen CFRP'deki açılmaların 2 mm'yi geçtiği görülen +3 çevriminin görüntüsü



**Şekil 4.65.** +4. Çevrimde birleşim bölgesindeki çatlağın 2 mm kalınlığa ulaştığı görüntü



**Şekil 4.66.** +5. Çevrimde birleşim bölgesindeki çatlağın 2 mm kalınlığa ulaştığı görüntü



**Şekil 4.67.** Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması

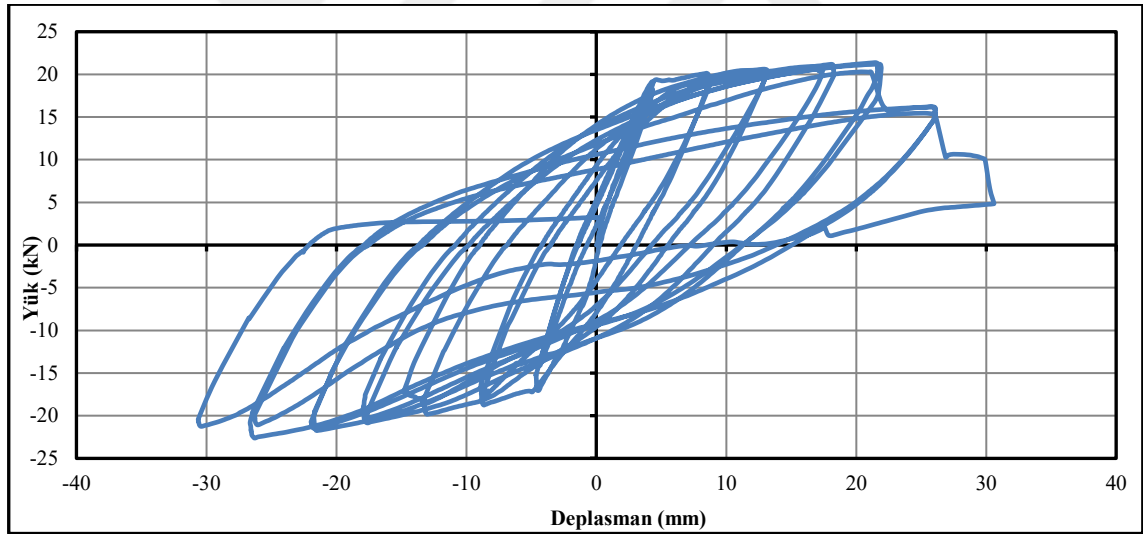


**Şekil 4.68.** Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması



Şekil 4.69. Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması

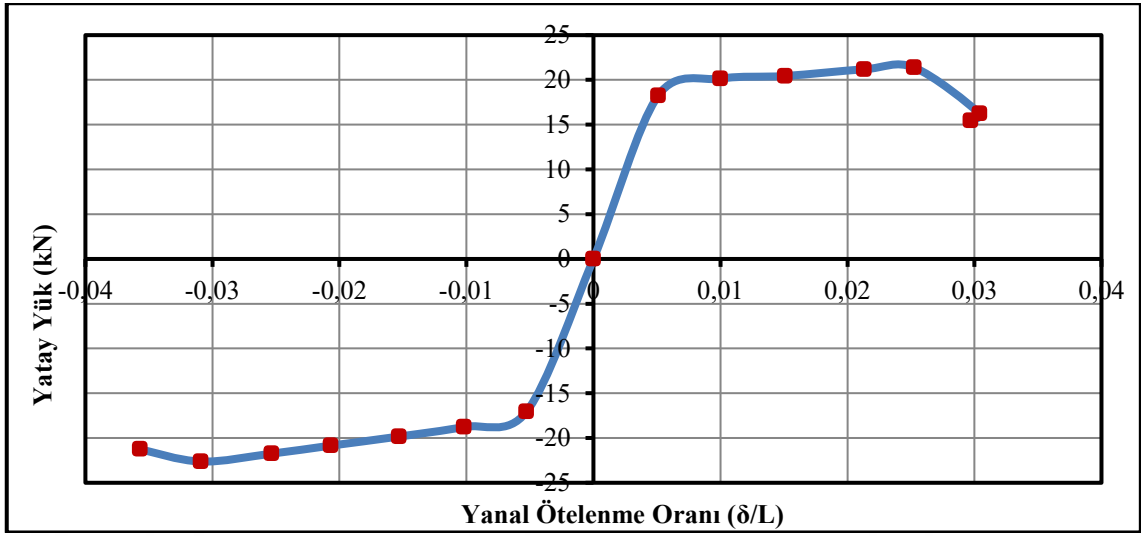
%10 COR+CFRP+%10 COR numunesine ait yatay yük – yer değiştirme çevrimsel histerezis eğrisi Şekil 4.70’de verilmiştir.



Şekil 4.70. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesinin Yatay Yük-Deplasmanı histerezis eğrisi

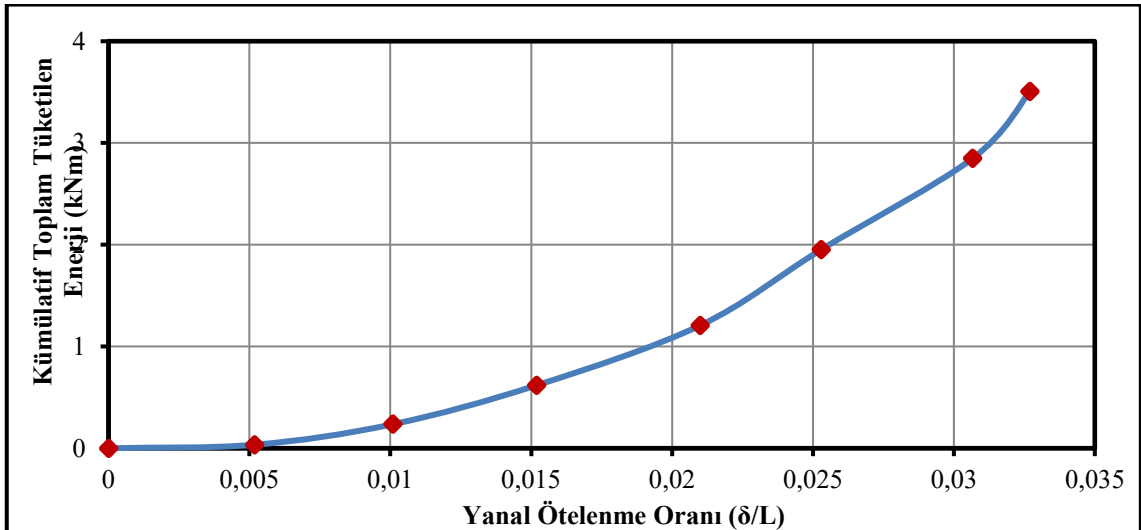
%10 COR+CFRP+%10 COR numunesine ait dayanım zarfı grafiği, numunenin farklı çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerlerinin işaretlenip birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 4.71’de dayanım zarfı grafiği verilmiştir.





Şekil 4.71. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesine ait dayanım zarfı

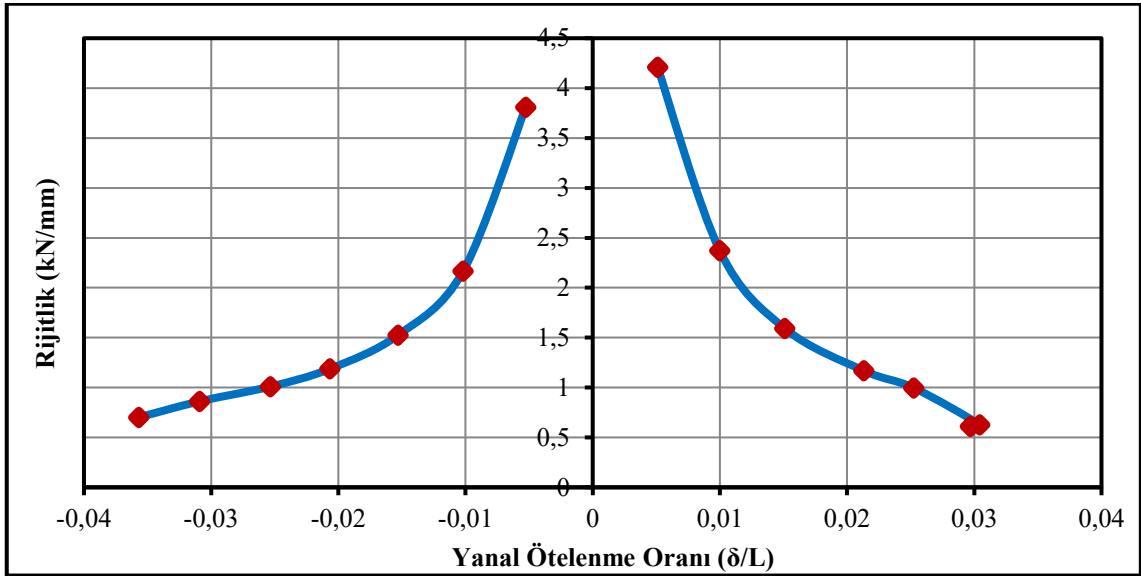
%10 COR+CFRP+%10 COR numunesine ait yatay yük–yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanarak, çevrimsel enerji tüketimleri belirlenmiş ve bu değerlerin kümülatif toplamı ile numunenin enerji tüketme kapasitesine ilişkin ötelenme oranı grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik Şekil 4.72’de verilmiştir. Kümülatif tüketilen enerji değerleri + ve – çevrim değerleri ortalaması alınarak oluşturulmuş olup %10 COR+CFRP+%10 COR Deney numunesi için kümülatif tüketilen enerji değeri 3.51 kNm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.72. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesine ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği



%10 COR+CFRP+%10 COR deney numunesine ait rijitlik azalımı grafiği Şekil 4.73’de verilmiştir. Söz konusu grafikte, eğrinin sol tarafında yer alan alanlar itme yönlü çevrimlerde hesaplanan rijitlik değerlerini, sağ tarafında kalan alanlar ise çekme yönlü çevrimlerde elde edilen rijitlik değerlerini temsil etmektedir. Deney numunesinin + çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri 4.21 kN/mm, - çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri ise 3.81 kN/mm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.73.%10 COR+CFRP+%10 COR numunesinin rijitlik azalımı grafiği

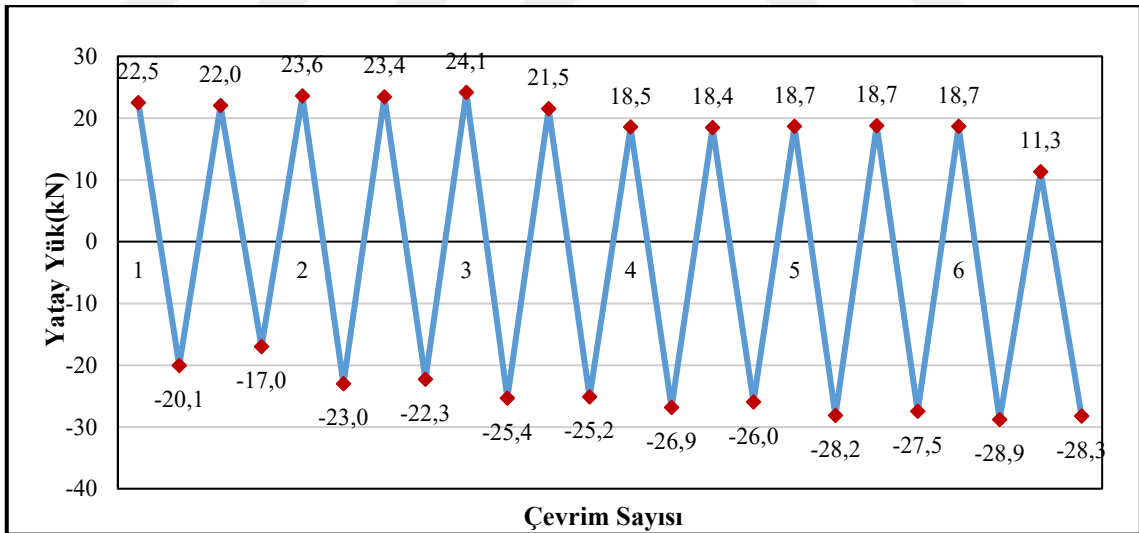
#### 4.1.6. Altıncı deney Referans CFRP Deneyi (REF+CFRP)

Bu deney elemanı, CFRP ile güçlendirilmiş referans numune olarak üretilmiştir. Numuneye herhangi bir hızlandırılmış korozyon işlemi uygulanmamış, yalnızca CFRP ile güçlendirme gerçekleştirilmiştir. Numunenin deney başlamadan hemen önceki görüntüsü Şekil 4.74’de yer almaktadır.

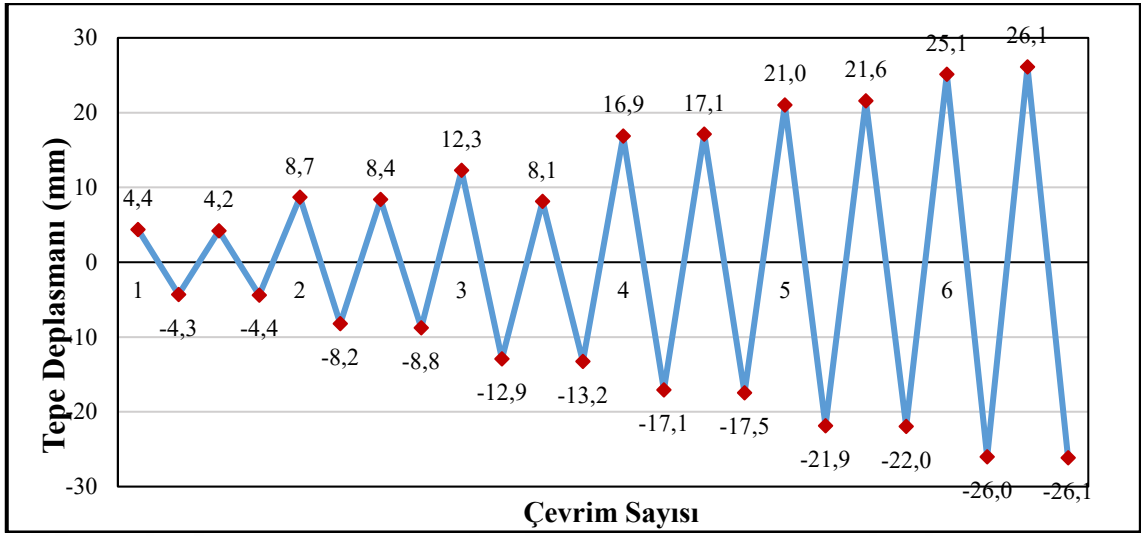


Şekil 4.74. REF+CFRP numunenin deney başlamadan önceki görüntüsü

Şekil 4.75’de deney elemanına ait yük geçmişi grafiği, Şekil 4.76’da ise deplasman geçmişi grafiği verilmiştir. Deney süresince oluşan çatlaklar, meydana gelen yer değiştirmeler ve uygulanan yükler ışığında gözlemlenen çatlaklar Çizelge 4.6’da detaylı şekilde verilmiştir. Deney sırasındaki görsellerde mavi renkli çizgi işaretlemeleri itmeyi (+), kırmızı renkli işaretlemeler ise çekmeyi (-) göstermektedir.



Şekil 4.75.REF+CFRP deney numunesinin yük geçmişi grafiği



Şekil 4.76. REF+CFRP deney numunesinin deplasman geçmişi grafiği

Şekil 4.75’de görüldüğü üzere deney numunesine tüm çevrimlerde deplasman kontrollü yükleme uygulanmıştır. Çevrimler ilerledikçe yatay yük sabit kalmış olup, bu durum deney numunesinin deplasman kontrollü olarak kirişin çekme donatısında kopma meydana gelmesi sonucu göçme durumuna ulaşmasına neden olmuştur.

Çizelge 4.6’da ise her bir yükleme aşamasında REF+CFRP deney elemanında gözlemlenen hasar ölçümleri detaylı olarak verilmiştir. Kiriş bölgesinde gözlemlenen ilk çatlaklar Şekil 4.77’de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Yükleme aşamalarında oluşan deney elemanına ait hasar ölçümleri

| Çevrim No | Yük(kg) | Drift/Deplasman %/(mm) | Açıklama                                                                     |
|-----------|---------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| +1        | 1100    | 4,30                   | Yükleme anında çatlak gözlemlenmemiştir                                      |
| -1        | -2500   | 4,30                   | Yükleme anında çatlak gözlemlenmemiştir                                      |
| +2        | 1180    | 8,60                   | Birleşim bölgesinde 1 numaralı 0.5 mm kalınlığında çatlak meydana gelmiştir. |

|    |       |       |                                                                                                           |
|----|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -2 | 2700  | 8,60  | Birleşim bölgesinde 1 numaralı 0.2 mm kalınlığında çatlak meydana gelmiştir.                              |
| +3 | 1250  | 12,90 | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı 1 mm kalınlığına ulaşmıştır.                                             |
| -3 | -2800 | 12,90 | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlak kalınlığı 0.6 mm kalınlığa ulaşmıştır.                            |
| +4 | 1270  | 17,20 | Birleşim bölgesindeki 1 numaralı çatlak kalınlığı 0.7 mm kalınlığa ulaşmıştır                             |
| -4 | -2900 | 17,20 | Birleşim bölgesindeki CFRP'de betondan ayrılmalar gözlemlenmiştir.                                        |
| +5 | 1461  | 21,50 | Birleşim bölgesindeki CFRP'de betondan ayrılmalar gözlemlenmiştir.                                        |
| -5 | -3150 | 21,50 | Donatılarda kopma meydana gelmiş ve numune göçme konumuna ulaşmıştır. Bu aşamada deney sonlandırılmıştır. |



**Şekil 4.77.** REF+CFRP numunesinin deney başladıktan sonraki ilk çatlak oluşumları

REF+CFRP numunesinde, +2. çevrimde yatay yük etkisi altında kirişte oluşan çatlak kalınlığı 0.5 mm olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.78’de kirişte oluşan çatlak görseli verilmiştir. Bu çatlak, birleşim bölgesinde yer alan 1 numaralı CFRP tabakasında meydana gelen açılmaların başlangıcını temsil etmektedir. İlerleyen çevrimlerde, özellikle +4. çevrimde, birleşim bölgesindeki CFRP tabakasında açılmalar belirgin şekilde artarak 0.7 mm’yi aşmıştır; bu durum Şekil 4.79’da ayrıntılı görsel

olarak verilmiştir. Şekil 4.80 ve Şekil 4.81’de ise CFRP tabakasındaki açılmaların devam eden çevrimlerdeki gelişimi ve yayılımı ayrıntılı biçimde gözlemlenmektedir. Bu açılmalar, numunenin mekanik performansında kademeli azalmaya işaret etmektedir. Numunedeki kopma sonucu oluşan yapısal hasar ve numunenin son durumu Şekil 4.82, Şekil 4.83, Şekil 4.84,’de deney sonunda elde edilen görüntüler ile desteklenmiştir. Bu görsellerde, donatı kopması ve CFRP tabakasındaki ayrışmalar net olarak görülmekte, böylece güçlendirme ve korozyon etkilerinin yapısal davranış üzerindeki etkisi açıkça ortaya konmaktadır.

REF+CFRP deney elemanı + çevrimde 24.13 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 12.28 mm deplasman yapmıştır. – Çevrimde ise 28.86 kN maksimum yük taşımıştır ve bu yük altında 26.01 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanında + çevrimde 22.54 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 4.69 mm deplasman meydana gelmiştir. Deney elemanında- çevrimde 23.18 kN yük altında akma gerçekleşmiş ve bu değerde 8.55 mm deplasman meydana gelmiştir. Göçme noktası ise + çevrimde 20.51 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 15.23 mm deplasman meydana gelmiştir. - Çevrimde ise göçme noktası 24.53 kN yük altında görülmüştür ve bu noktada 26.01 mm deplasman meydana gelmiştir.



**Şekil 4.78.** Numunede +2. çevriminde meydana gelen ilk çatlak oluşumu



**Şekil 4.79.**CFRP'deki açılmaların 0.7 mm'yi geçtiği görülen +4 çevriminin görseli



**Şekil 4.80.** Numunede meydana gelen CFRP'deki açılmalar



**Şekil 4.81.** Numunede meydana gelen CFRP'deki açılmalar





Şekil 4.82. Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması

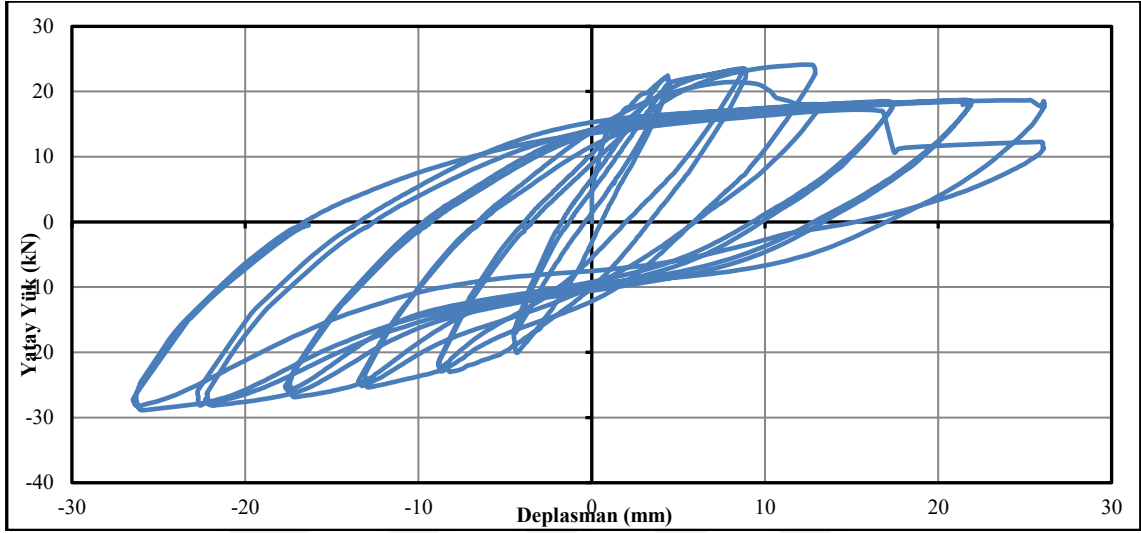


Şekil 4.83. Donatıların kopup deney sonuna ulaşılması



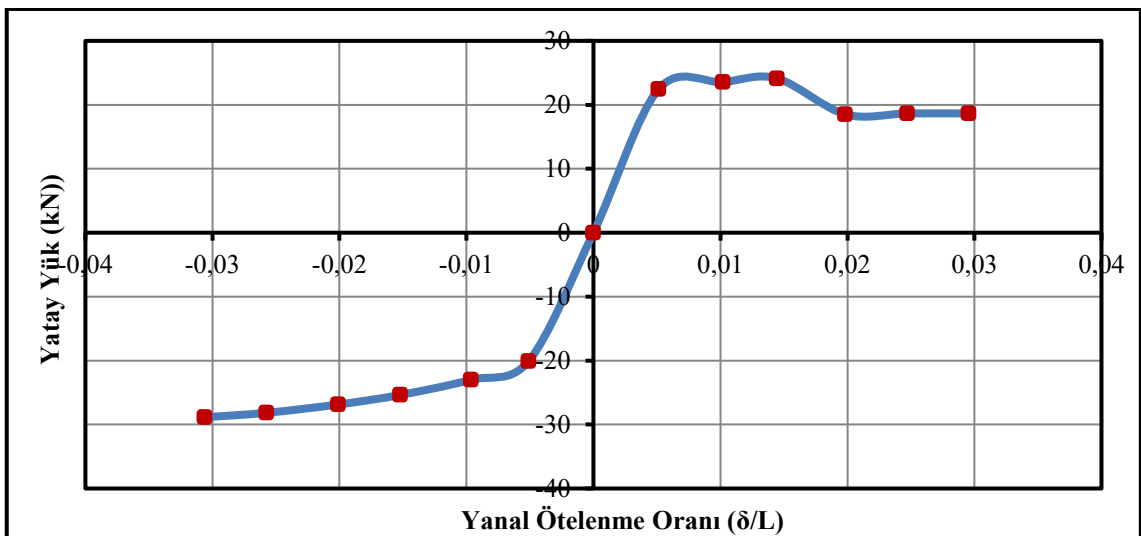
Şekil 4.84. Donatıların kopup deneyin sonlandırılması

REF+CFRP numunesine ait yatay yük – yer değiştirme çevrimsel histerezis eğrisi Şekil 4.85’de her bir çevrimdeki maksimum yatay yük ile bu yüke karşılık gelen yer değiştirme değerlerinden elde edilen dayanım zarfı ise Şekil 4.86’da verilmiştir.



Şekil 4.85. REF+CFRP numunesinin Yatay Yük-Deplasmanı histerezis eğrisi

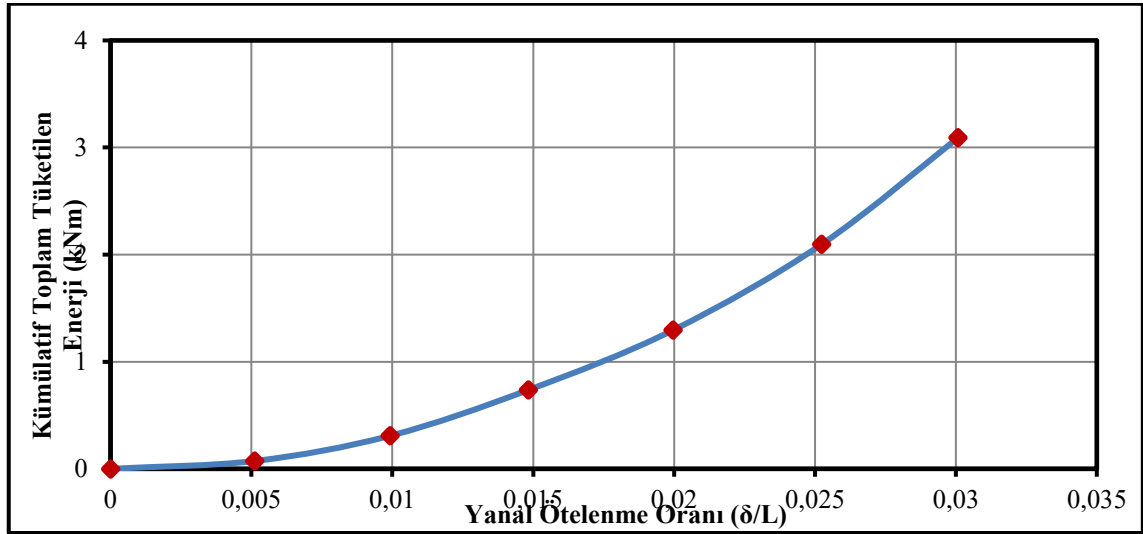
REF+CFRP numunesine ait dayanım zarfı grafiği, numunenin farklı çevrimlerde ulaştığı maksimum yatay yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerlerinin işaretlenip birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 4.86’da dayanım zarfı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.86. REF+CFRP numunesine ait dayanım zarfı

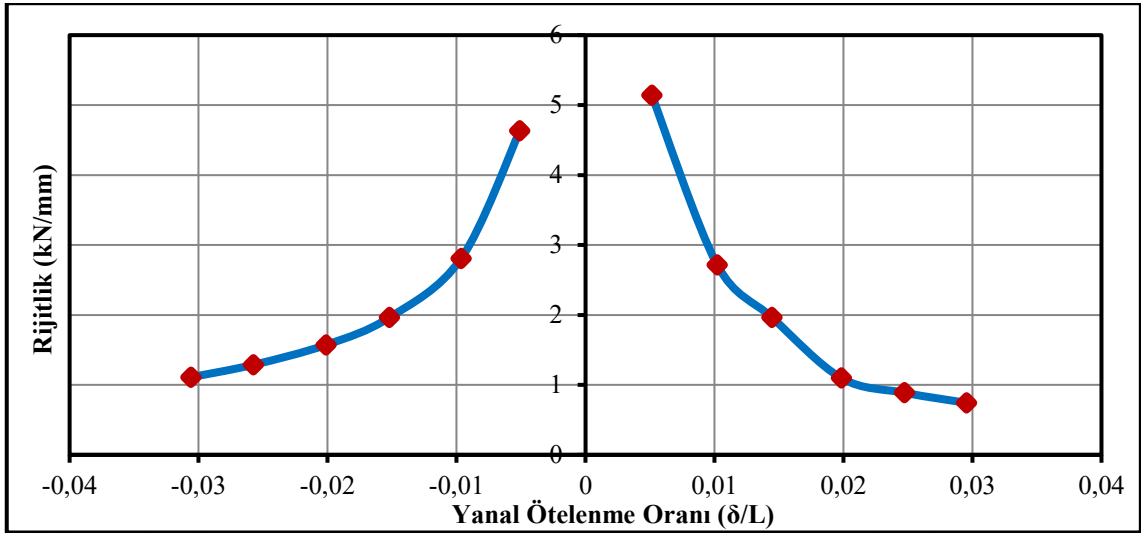


REF+CFRP numunesine ait yatay yük–yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar hesaplanarak, çevrimsel enerji tüketimleri belirlenmiş ve bu değerlerin kümülatif toplamı ile numunenin enerji tüketme kapasitesine ilişkin ötelenme oranı grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik şekil 4.87’de verilmiştir. Kümülatif tüketilen enerji değerleri + ve – çevrim değerleri ortalaması alınarak oluşturulmuş olup REF+CFRP Deney numunesi için kümülatif tüketilen enerji değeri 3.09 kNm olarak meydana gelmiştir.



şekil 4.87. REF+CFRP numunesine ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

REF+CFRP deney numunesine ait rijitlik azalımı grafiği şekil 4.88’de verilmiştir. Söz konusu grafikte, eğrinin sol tarafında yer alan alanlar itme yönlü çevrimlerde hesaplanan rijitlik değerlerini, sağ tarafında kalan alanlar ise çekme yönlü çevrimlerde elde edilen rijitlik değerlerini temsil etmektedir. Deney numunesinin + çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri 5.14 kN/mm, - çevrimdeki başlangıç rijitliği değeri ise 5.63 kN/mm olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.88. REF+CFRP numunesinin rijitlik azalımı grafiği

#### 4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasının bu bölümünde, deneysel kapsamda incelenen altı adet kolon-kiriş birleşim noktası, uygulanan korozyon hasar seviyesi ve CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) güçlendirme detayları temelinde sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Araştırmanın temel amacı, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde meydana gelen korozyon hasarlarının, CFRP ile güçlendirilmesi ve CFRP ile güçlendirilmiş birleşim noktalarında kapasite değişiminin sayısal ve grafiksel olarak ortaya konmasıdır. Ayrıca, CFRP güçlendirme sonrası yapıda korozyonun devam etmesi durumunda yapısal davranıştaki değişimlerin ve güçlendirmenin etkinliğinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Deneysel verilerin değerlendirilmesi sürecinde, altı adet deney numuneleri toplamda 3 ana gruba ayrılarak Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Korozyon ve CFRP etkisi altında yapısal değişimlerin meydana getirdiği davranış değişimleri elde edilen grafikler ile kıyaslama yapılarak analiz edilmiş ve aşağıda açıklanan gruplama grafikleri oluşturulmuştur.

Çizelge 4.7. Gruplandırılan deney numuneleri

| Grup No | Kullanılan Deney Elemanı |
|---------|--------------------------|
| 1       | a) REF                   |
|         | b) REF+%20 COR           |
|         | c) REF+CFRP              |
| 2       | a) REF+%20 COR           |
|         | b) CFRP+%20COR           |

|   |                                                                             |
|---|-----------------------------------------------------------------------------|
|   | c) %20 COR+CFRP                                                             |
| 3 | a) REF+CFRP<br>b) %10 COR+CFRP+%10 COR<br>c) CFRP+%20COR<br>d) %20 COR+CFRP |

Oluşturulmuş olan grafiklerden elde edilecek veriler yardımıyla;

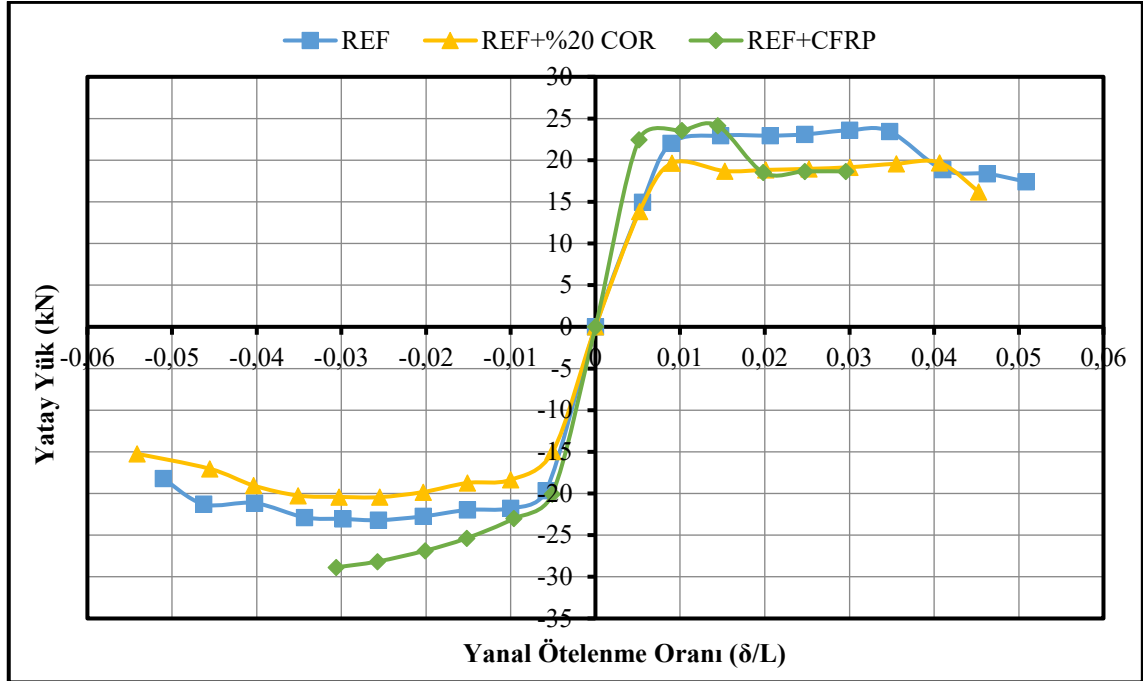
- Korozyonun yapısal dayanım, süneklik ve rijitlik üzerindeki negatif etkileri,
- CFRP güçlendirmenin bu etkileri ne ölçüde azalttığı veya giderdiği,
- CFRP uygulaması sonrası devam eden korozyonun yapısal performans üzerindeki muhtemel olumsuz etkileri, detaylı olarak incelenmiştir.

Böylece, farklı uygulama senaryolarının yapısal güvenlik ve hizmet ömrü açısından avantajları ve sınırlılıkları kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

#### 4.2.1. Grup-1 Referans numunelerinin korozyon ve güçlendirme karşısındaki davranış değişimi

Grup-1'e ait deney elemanlarının maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri incelenmiş ve Şekil 4.89'da verilmiştir. Referans (REF) numunesi ileri çevrimde 23.59 kN, geri çevrimde ise 23.20 kN; REF+%20 COR numunesi ileri çevrimde 19.70 kN, geri çevrimde ise 20.44 kN taşıma kapasitesine ulaşmıştır. REF+CFRP numunesi ise ileri çevrimde 24.13 kN, geri çevrimde 28.86 kN ile en yüksek taşıma kapasitesini göstermiştir. Maksimum yük kapasitesi bakımından REF+CFRP numunesi referans alınarak yapılan karşılaştırmada; ileri çevrimlerde REF ve REF+%20 COR numunelerinde sırasıyla %2.24 ve %18,34 oranlarında azalma gözlenmiştir. Geri çevrimlerde ise bu düşüş oranları sırasıyla %19,61 ve %29,17 olarak hesaplanmıştır. Grup-1 deney elemanlarının maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde, CFRP ile güçlendirilmiş REF+CFRP numunesinin hem ileri hem de geri çevrimlerde en yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, CFRP güçlendirmesinin yapısal elemanın taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. REF ve REF+%20 COR numunelerinde, REF+CFRP numunesine kıyasla özellikle geri çevrimde belirgin düşüşler gözlenmiştir. Geri çevrim yük taşıma kapasitesindeki %19,61 ve %29,17'lik azalma, korozyonun yapısal performans üzerinde önemli bir olumsuz etkisi CFRP ile güçlendirmenin ise numunede kapasite artışı

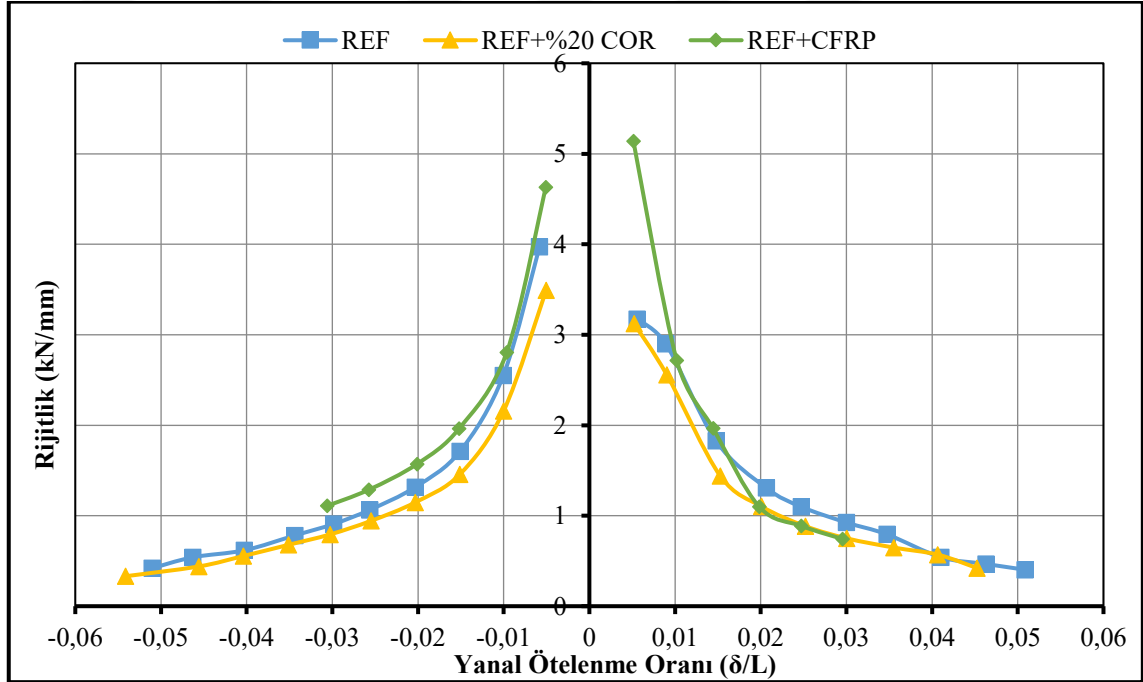
meydana getirdiğini ortaya koymaktadır. Grup-1'e ait zarf eğrisi Şekil 4.89'da verilmiştir.



Şekil 4.89. Grup-1'e ait zarf eğrisi

Grup-1 deney elemanlarının rijitlik grafikleri Şekil 4.90'da verilmiştir. Referans (REF) deney elemanının başlangıç rijitliği ileri çevrimde 3,17 kN/mm, geri çevrimde ise 3,97 kN/mm olarak ölçülmüştür. Referans korozyon (REF+%20 COR) deney elemanı için bu değerler ileri çevrimde 3,12 kN/mm, geri çevrimde 3,49 kN/mm'dir. Korozyon uygulanmadan CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanı (REF+CFRP) ise ileri çevrimde 5,14 kN/mm, geri çevrimde 4,63 kN/mm rijitlik değerlerine sahiptir. İleri ve geri çevrimlerde en yüksek başlangıç rijitliği REF+CFRP numunesinde gözlemlenmiştir. REF+CFRP numunesi referans alınarak yapılan karşılaştırmalarda, ileri çevrimde REF ve REF+%20 COR numunelerinde sırasıyla %38,33 ve %39,30 oranlarında azalma; geri çevrimde ise sırasıyla %14,24 ve %24,62 oranlarında azalma tespit edilmiştir. REF+CFRP numunesinin diğer deney elemanlarına göre belirgin şekilde daha yüksek başlangıç rijitliği göstermesi, CFRP güçlendirme uygulamasının yapısal rijitliği artırmadaki etkinliğini ortaya koymaktadır. Fakat REF+CFRP numunesinin yanal ötelenme oranı ( $\delta/L$ ) 0.03 mertebesinde iken, REF ve REF+%20COR numunelerinin yanal ötelenme oranları ( $\delta/L$ ) 0.05 mertebesinde elde edilmiştir. CFRP ile güçlendirilen

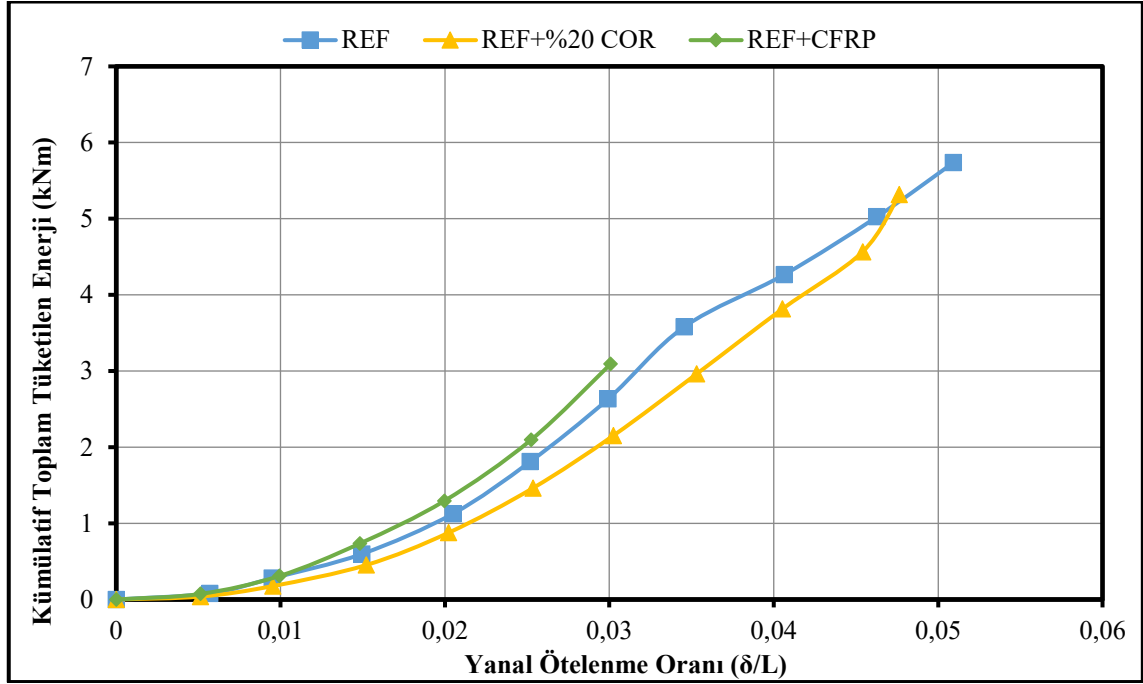
numunenin yatay yük taşıma kapasitesinde meydana gelen artış, yanal ötelenme oranında, yani elemanın sünekliğinde belirgin bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. REF+%20 COR numunesinde gözlemlenen ileri çevrim rijitliklerindeki yaklaşık %39 oranındaki azalma, korozyonun elemanın elastik davranışını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Geri çevrimlerdeki rijitlik azalmalarının daha düşük oranlarda gerçekleşmesi, elemanların yük geri çekildiğinde nispeten daha iyi toparlandığını ancak yine de güçlendirilmiş numunenin belirgin üstünlüğünü koruduğunu işaret etmektedir. Bu sonuçlar, CFRP güçlendirmesinin korozyon etkilerini dengeleyerek yapı elemanlarının dayanım ve servis ömrünü artırmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 4.90. Grup-1'e ait rijitlik grafiği

Deney elemanlarına ait kümülatif toplam enerji tüketimi Şekil 4.91'de verilmiştir. Referans (REF) numunesi 5,74 kNm enerji tüketme kapasitesiyle en yüksek değere sahiptir. Korozyona maruz bırakılan REF+COR numunesinin enerji tüketim kapasitesi 5,32 kNm olup, REF numunesine kıyasla %7,32 oranında azalma göstermiştir. Hiçbir korozyon işlemi yapılmadan doğrudan CFRP ile güçlendirilen REF+CFRP numunesi ise 3,09 kNm enerji tüketmiş ve REF numunesine göre %46,17 oranında daha düşük enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuştur. Bu sonuçlar,

korozyonun enerji tüketim kapasitesini sınırlı düzeyde azalttığını, ancak CFRP güçlendirmesinin enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Güçlendirme işlemine rağmen REF+CFRP numunesindeki bu azalma, elemanın sünek davranış kapasitesinin zayıfladığını ve enerji tüketimi bakımından daha kırılgan bir davranış sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.91. Grup-1'e ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

REF, REF+%20 COR ve REF+CFRP numuneleri arasındaki ileri ve geri çevrimin ortalama süneklik değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek süneklik 5,88 mm/mm ile REF+%20 COR numunesinde ölçülmüştür. Bu değer, referans numunesine (REF – 5,70 mm/mm) göre yaklaşık %3,2 oranında artış göstermektedir. REF numunesi 5,70 mm/mm süneklik değeriyle ikinci sırada yer almakta ve yapının enerji yutma kapasitesini koruduğunu göstermektedir. Bu durum, korozyonun taşıyıcı kesitte yarattığı rijitlik kaybının numunenin daha fazla şekil değiştirmesine izin vermesinden kaynaklanmaktadır yani %20 oranında korozyon numunede taşıma kapasitesini düşürürken, aynı zamanda yapının göçme öncesinde daha büyük deplasmanlara ulaşmasına yol açmıştır. Öte yandan REF+CFRP numunesinde süneklik değeri 3,15 mm/mm olarak ölçülmüş ve bu, REF numunesine kıyasla %44,7 oranında azalma anlamına gelmektedir. REF+%20 COR numunesi süneklik açısından en iyi sonucu

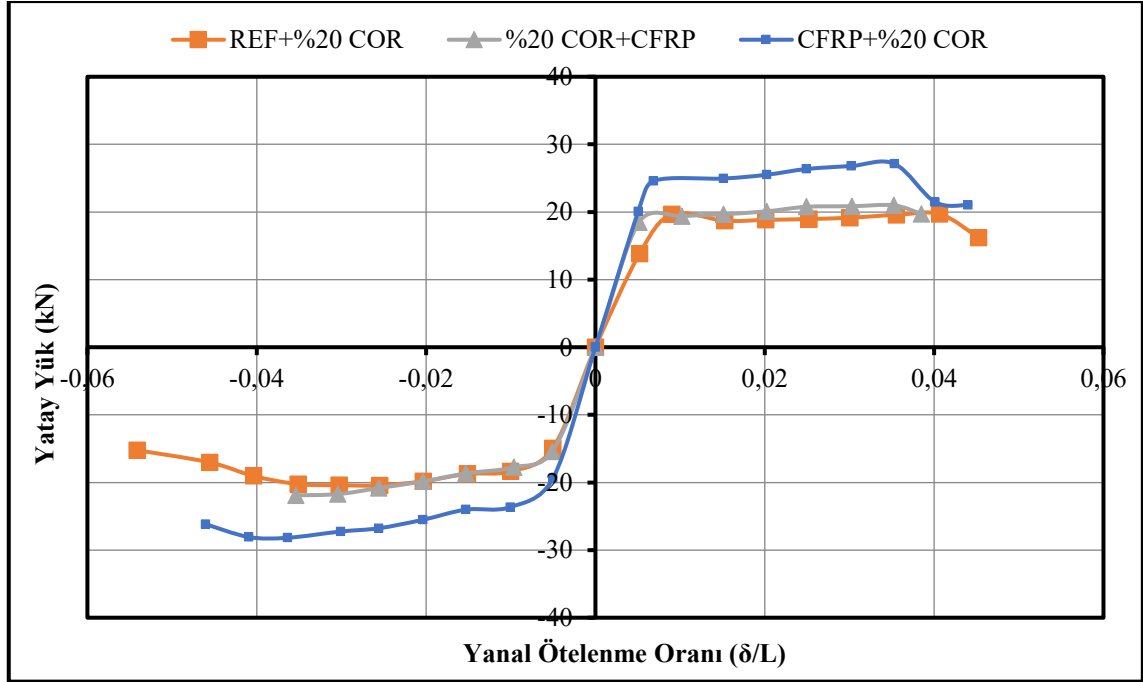
verirken, CFRP uygulamasının tek başına olduğu REF+CFRP numunesinde süneklik belirgin şekilde azalmıştır. Bu durum, REF+%20 COR numunesinde, korozyonun meydana getirdiği aderans kaybı ile daha büyük bir birim boyda meydana gelen donatı uzaması ile oluştuğu ve hasarın yayılmasının neden olduğu düşünülürken, REF+CFRP numunesinde CFRP takviyesinden dolayı meydana gelen yatay yük dayanım seviyesinde oluşan CFRP hasarından sonra numunenin bu yatay yük talebine karşılık verememesi üzerine daha düşük deplasmanlarda oluşan hasarın neden olduğu görülmüştür.

#### **4.2.2. Grup-2 Korozyon hasarına maruz kalmış numunelerinin korozyon ve güçlendirme karşısındaki davranış değişimi**

Grup-2'ye ait deney elemanlarının maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri incelenmiş ve Şekil 4.92'de verilmiştir. REF+%20 COR numunesi ileri çevrimde 19.70 kN, geri çevrimde ise 20.44 kN, %20 COR+CFRP numunesi ileri çevrimde 20.99 kN, geri çevrimde 21.90 kN, CFRP+%20 COR numunesi ise ileri çevrimde 27,13 kN, geri çevrimde 28.18 kN ile en yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir. En yüksek taşıma kapasitesi, CFRP ile güçlendirilip ardından korozyona maruz bırakılan CFRP+%20 COR numunesinde elde edilmiş olup; ileri çevrimde 27,13 kN, geri çevrimde ise 28,18 kN taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bu numune referans alınarak yapılan karşılaştırmalarda, korozyon uygulanmış fakat güçlendirme yapılmamış REF+%20 COR numunesinde ileri çevrimde %27,37, geri çevrimde ise %27,44 oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Öte yandan, önce korozyon uygulanıp sonrasında CFRP ile güçlendirilmiş olan %20COR+CFRP numunesinde ise ileri çevrimde %22,63, geri çevrimde %22,30 oranlarında düşüş tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, CFRP uygulamasının korozyona maruz kalmış yapı elemanlarının yatay yük taşıma kapasitesini anlamlı düzeyde artırdığını ve güçlendirme sonrasında meydana gelen korozyon etkilerine karşı da yapısal etkinliğini sürdürdüğünü ortaya koymaktadır. CFRP+%20 COR numunesinde, güçlendirme öncesinde herhangi bir korozyon hasarının bulunmaması ve CFRP ile beton arasında olumsuz bir etkileşime yol açabilecek bir durumun mevcut olmaması, bu performansın sürekliliğini destekleyen önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Güçlendirme işleminin ardından



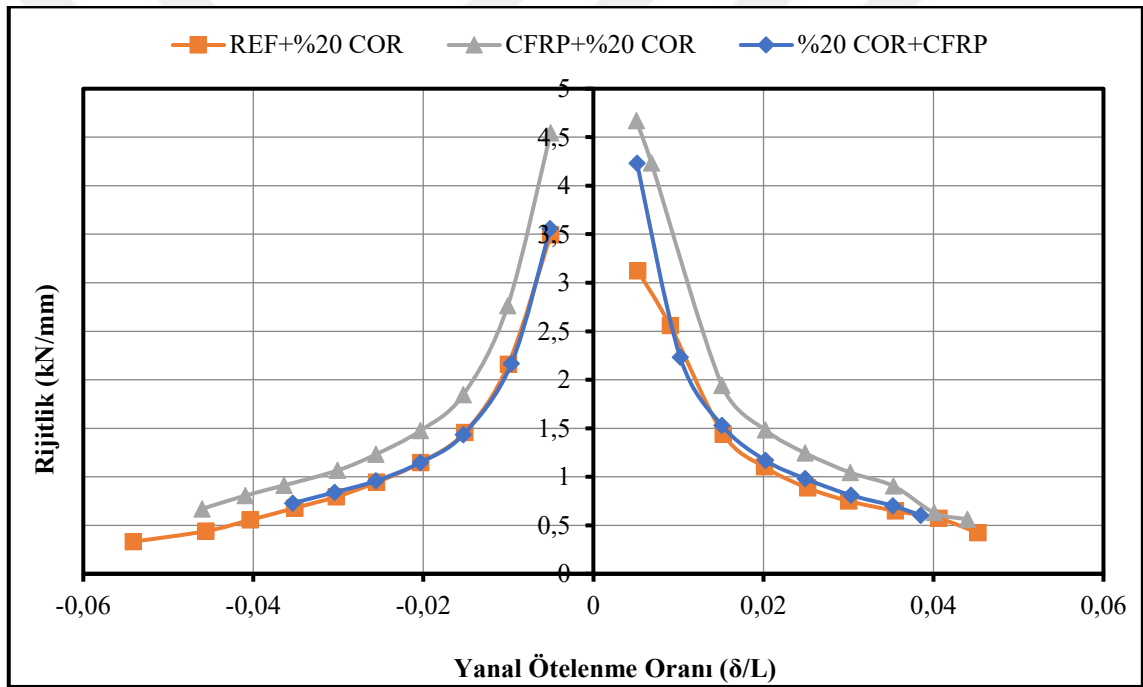
uygulanan hızlandırılmış korozyon deneyine rağmen, tam CFRP sargısına sahip numunenin beton yüzeyinde oluşan korozyon hasarlarından olumsuz etkilenmediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.92. Grup-2'ye ait zarf eğrisi

Grup-2 deney elemanlarının rijitlik grafikleri Şekil 4.93'de verilmiştir. REF+%20 COR deney elemanının başlangıç rijitliği ileri çevrimde 3,12 kN/mm, geri çevrimde ise 3,49 kN/mm olarak ölçülmüştür. %20 COR+CFRP deney elemanı için bu değerler ileri çevrimde 4,23 kN/mm, geri çevrimde 3,56 kN/mm ve CFRP+%20 COR numunesi ise ileri çevrimde 4,67 kN/mm, geri çevrimde 4,54 kN/mm rijitlik değerlerine sahiptir. İleri ve geri çevrimlerde en yüksek başlangıç rijitliği CFRP+%20 COR numunesinde gözlemlenmiştir. Bu numunenin elde ettiği 4,67 kN/mm (ileri çevrim) ve 4,54 kN/mm (geri çevrim) rijitlik değerleri, diğer deney elemanlarıyla karşılaştırıldığında CFRP uygulamasının rijitlik üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. En yüksek rijitlik değeri olan CFRP+%20 COR numunesi referans alındığında, %20 COR+CFRP numunesinde ileri çevrimde %9,42, geri çevrimde %21,54 oranında azalma gözlemlenmiştir. REF+%20 COR numunesinde ise bu azalma ileri çevrimde %33,19, geri çevrimde %23,13 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, korozyonun yapısal rijitliği olumsuz etkilediğini göstermektedir. Geri çevrimlerde

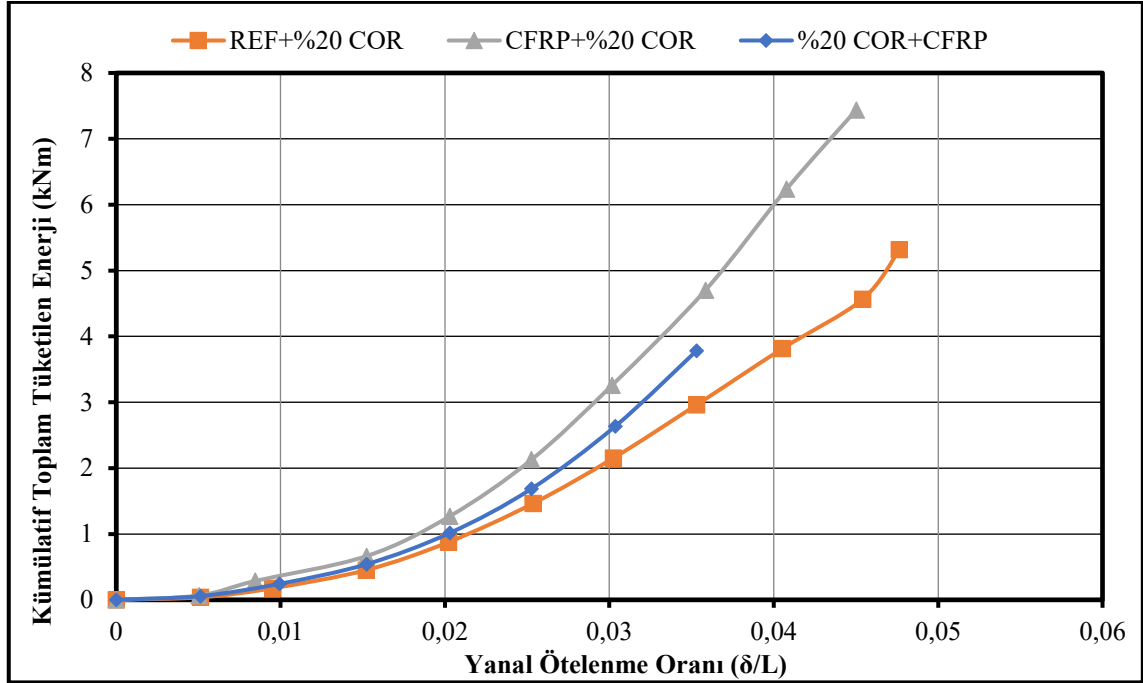
rijitlik azalmasının daha düşük oranlarda gerçekleşmesi, yapı elemanlarının yük geri çekildiğinde nispeten daha iyi toparlandığını; ancak yine de CFRP ile güçlendirilmiş numunenin belirgin üstünlüğünü koruduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, CFRP uygulamasının sadece rijitliği artırmakla kalmadığını, aynı zamanda korozyonun sebep olduğu yapısal zayıflamaları da büyük ölçüde telafi edebildiğini göstermektedir. Bu yönüyle CFRP ile yapılan dıştan sarma güçlendirmesi hem rijitlik hem de dayanım açısından performansı artırmakta; korozyona maruz kalmış yapı elemanlarının taşıyıcılığını ve servis ömrünü uzatmada kritik bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmıştır.



Şekil 4.93. Grup-2'ye ait rijitlik grafiği

Deney elemanlarına ait kümülatif toplam enerji tüketimi Şekil 4.94'de verilmiştir. En yüksek enerji tüketim kapasitesi, 7,44 kNm ile CFRP+%20 COR numunesinde ölçülmüştür. Bu değer hem korozyona uğramış hem de CFRP ile güçlendirilmiş elemanların, sönümleme ve enerji yayma kapasitesinin belirgin şekilde arttığını göstermektedir. CFRP+%20 COR numunesi referans alındığında, REF+%20 COR numunesinin enerji tüketim kapasitesi %28,49 oranında daha düşük (5,32 kNm), %20 COR+CFRP numunesinin ise %49,19 oranında daha düşük (3,78 kNm) olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, korozyonun yapısal enerji tüketimi üzerinde önemli

ölçüde olumsuz etkiler yarattığını, ancak CFRP ile güçlendirmenin bu olumsuzluğu büyük ölçüde telefi edildiği görülmüştür.



Şekil 4.94. Grup-2'ye ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

REF+%20 COR numunesi 5,88 mm/mm süneklik değeri ile bu üçlü karşılaştırmada en yüksek sünekliği sağlamıştır. CFRP+%20 COR numunesi 5,26 mm/mm süneklik değeriyle, REF+%20 COR'a kıyasla yaklaşık %10,5 oranında daha düşük süneklik göstermektedir. Benzer şekilde, %20 COR+CFRP numunesinin sünekliği 5,18 mm/mm olarak ölçülmüş ve bu da REF+%20 COR numunesine göre %11,9 oranında azalmaya karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar, %20 oranında korozyon içeren numunelerde CFRP takviyesinin sünekliği bir miktar düşürdüğünü göstermektedir.

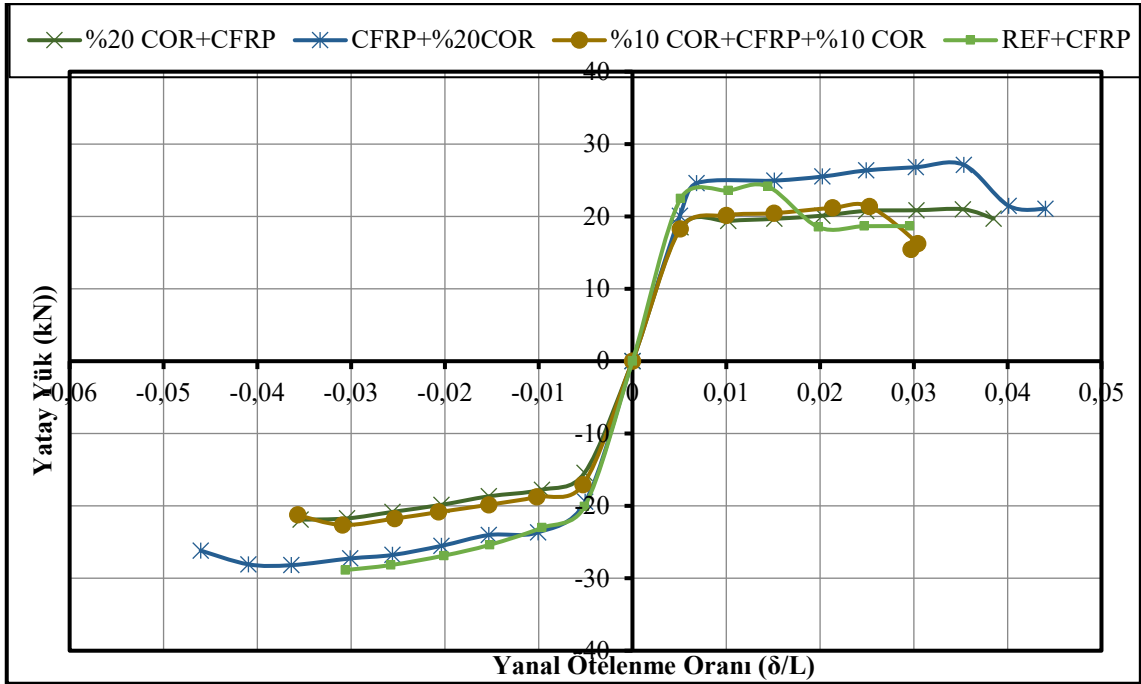
#### 4.2.3. Grup-3 Deney numunelerinin güçlendirme karşısındaki davranış değişimi

Grup-3 deney elemanlarının maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri Şekil 4.95'de gösterilmiştir. En yüksek taşıma kapasitesi, geri çevrimde 28,86 kN ve ileri çevrimde 24,13 kN ile REF+CFRP numunesinde elde edilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla 27,13 kN (ileri çevrim) ve 28,18 kN (geri çevrim) değerleriyle CFRP+%20 COR

numunesi takip etmektedir. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesi ise ileri çevrimde 21,38 kN, geri çevrimde 22,63 kN değerleriyle orta düzeyde bir performans sergilerken; en düşük taşıma kapasitesi 20,99 kN (ileri çevrim) ve 21,90 kN (geri çevrim) ile %20 COR+CFRP numunesinde gözlemlenmiştir.

REF+CFRP numunesi referans alındığında, CFRP+%20 COR numunesinin ileri çevrim taşıma kapasitesi %4,15, geri çevrim taşıma kapasitesi ise yalnızca %2,36 oranında daha düşük gerçekleşmiştir. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesi ise ileri çevrimde %11,39, geri çevrimde %21,57 oranında daha düşük taşıma kapasitesi sergilemiştir. En düşük performansa sahip olan %20 COR+CFRP numunesinde ise bu düşüş ileri çevrimde %13,01, geri çevrimde ise %24,09 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, CFRP ile güçlendirme uygulamasının taşıma kapasitesi üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. REF+CFRP ve CFRP+%20 COR numunelerinin yüksek yük taşıma kapasiteleri, CFRP'nin hem korozyonsuz hem de korozyona maruz kalmış elemanlarda etkinliğini koruduğunu göstermektedir. Buna karşın, %10 COR+CFRP+%10 COR ve %20 COR+CFRP numunelerinde gözlemlenen belirgin kapasite kayıpları, korozyonun taşıyıcılık üzerinde ciddi zayıflatıcı etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

CFRP+%20COR, %20COR+CFRP ve 10COR+CFRP+10COR deney elemanlarında akma noktası en yüksek CFRP+%20COR numunesinde daha sonra %10COR+CFRP+%10COR numunesinde ve en düşük %20COR+CFRP numunesinde meydana gelmiştir. Bu durum korozyona uğramadan güçlendirilmiş numunenin korozyona uğrayarak güçlendirilmiş numuneye göre korozyon miktarının sınırlandırılması ve dayanım kaybının bir miktar önüne geçilmesini sağlamıştır. %10COR+CFRP+%10COR numunesi diğer her iki numuneye göre karşılaştırıldığında %20 COR+CFRP numunesine göre %6,26 yükseliş ve CFRP+%20 COR numunesine göre %27,6 azalma meydana gelmiştir. Numuneler arasında akma kapasitesinde büyük farklar olmasına rağmen deplasman değerleri birbirine çok yakın kalmıştır. Bu durum CFRP'nin korozyondan önce uygulanmasının dayanımda artış meydana getirdiğini göstermiştir fakat korozyon halindeki numunenin güçlendirilip tekrar korozyon halinin devam etmesi durumunda %20 COR+CFRP numunesine göre akma dayanımı daha yüksek çıkmıştır.



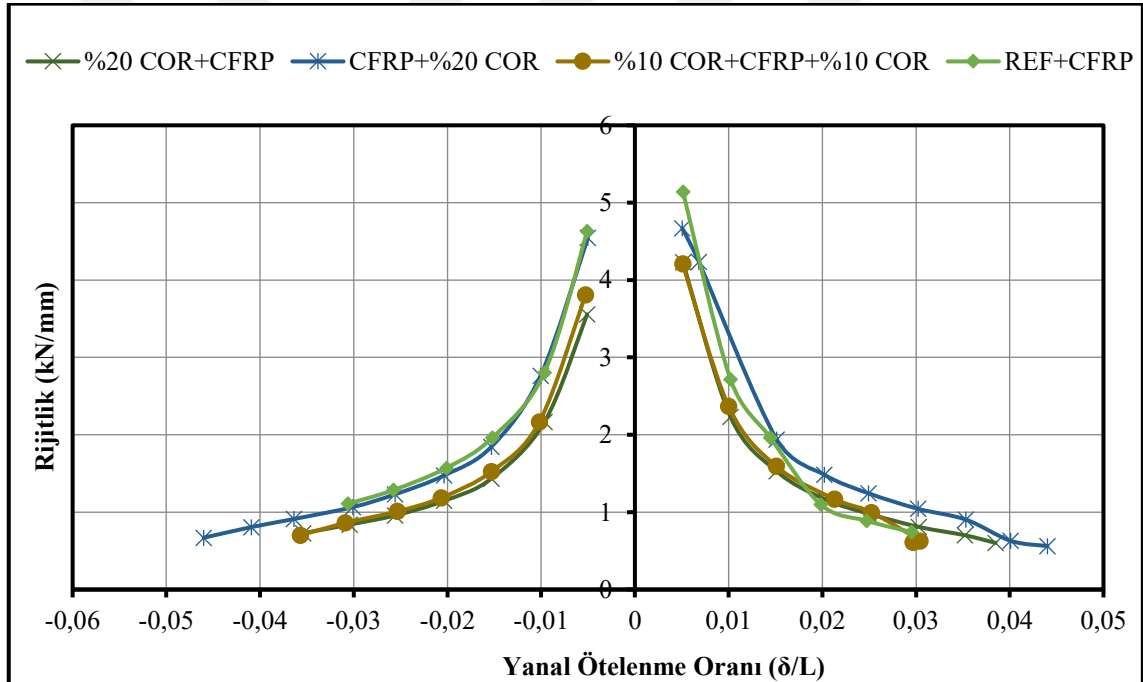
Şekil 4.95. Grup-3'e ait zarf eğrisi

Grup-3 deney elemanlarının rijitlik grafikleri Şekil 4.96'da verilmiştir. REF+CFRP deney elemanının başlangıç rijitliği ileri çevrimde 5,14 kN/mm, geri çevrimde ise 4,63 kN/mm olarak ölçülmüştür. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesi için bu değerler ileri çevrimde 4,21 kN/mm, geri çevrimde 3,81 kN/mm; %20 COR+CFRP deney elemanında ise ileri çevrimde 4,23 kN/mm, geri çevrimde 3,56 kN/mm olarak belirlenmiştir. CFRP+%20 COR numunesi ise ileri çevrimde 4,67 kN/mm, geri çevrimde 4,54 kN/mm rijitlik değerlerine sahiptir. İleri ve geri çevrimlerde en yüksek başlangıç rijitliği, ileri çevrimde 5,14 kN/mm ile REF+CFRP numunesinde; geri çevrimde ise 4,63 kN/mm ile yine aynı numunede gözlemlenmiştir. Bu numunenin elde ettiği değerler, diğer deney elemanlarıyla karşılaştırıldığında CFRP uygulamasının rijitlik üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

En yüksek rijitlik değeri olan REF+CFRP numunesi referans alındığında, CFRP+%20 COR numunesinde ileri çevrimde %9,15, geri çevrimde %1,94; %20 COR+CFRP numunesinde ileri çevrimde %17,69, geri çevrimde %23,08; %10 COR+CFRP+%10 COR numunesinde ise ileri çevrimde %18,07, geri çevrimde %17,71 oranında azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, korozyonun etkilerinin yapısal rijitlik üzerinde olumsuz etkiler yarattığını; ancak CFRP ile yapılan güçlendirmenin bu olumsuzlukları belirli ölçüde dengelediğini göstermektedir. Geri çevrimlerde rijitlik azalmasının genellikle

daha düşük oranlarda gerçekleşmesi, yapı elemanlarının yük geri çekildiğinde nispeten daha iyi toparlandığını; ancak yine de CFRP ile güçlendirilmiş numunenin belirgin üstünlüğünü koruduğunu ortaya koymaktadır.

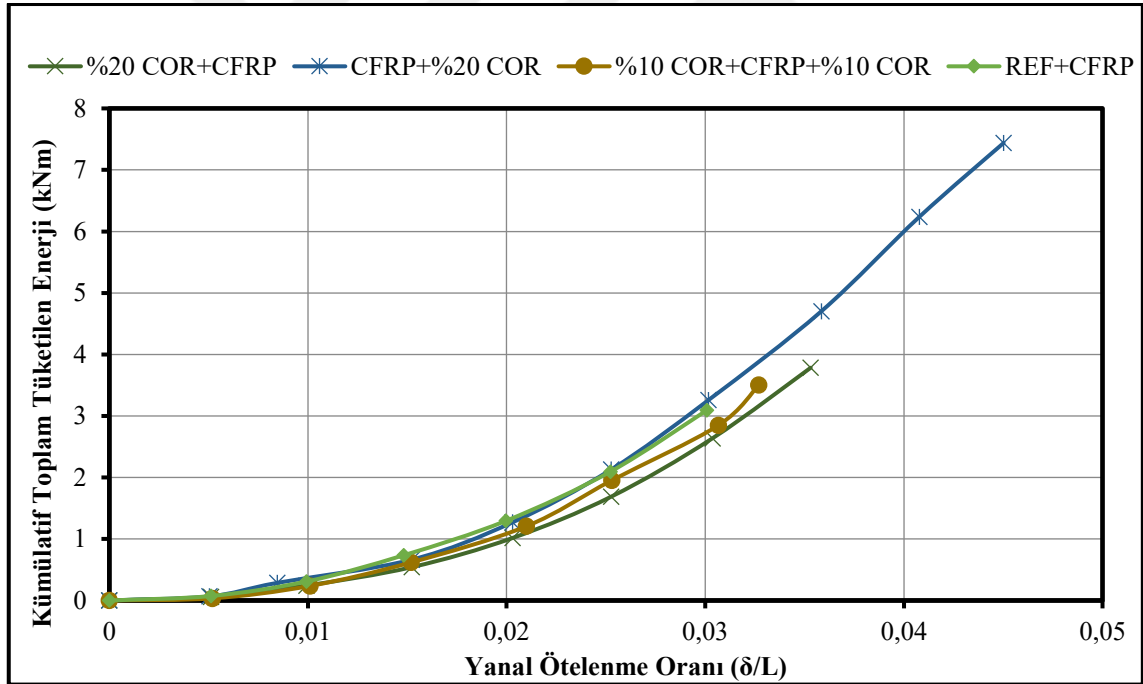
Elde edilen veriler, CFRP uygulamasının yalnızca rijitliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda korozyonun neden olduğu yapısal zayıflamaları büyük ölçüde telafi edebildiğini de göstermektedir. Bu yönüyle CFRP ile gerçekleştirilen dıştan sarma güçlendirme yöntemi hem rijitlik hem de dayanım açısından performansı artırmakta; özellikle korozyona maruz kalmış yapı elemanlarının taşıma kapasitesini ve servis ömrünü artırmada etkili ve sürdürülebilir bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.96. Grup-3'e ait rijitlik grafiği

Deney elemanlarının kümülatif toplam enerji tüketimleri Şekil 4.97'de verilmiştir. En yüksek enerji tüketimi, 7,44 kNm ile CFRP+%20 COR numunesinde ölçülmüştür. Bu numune referans alındığında; %20 COR+CFRP numunesinin enerji tüketimi %49,19 azalarak 3,78 kNm, %10 COR+CFRP+%10 COR numunesinde %52,82 azalarak 3,51 kNm ve REF+CFRP numunesinde ise %58,29 azalarak 3,10 kNm olarak belirlenmiştir.

Elde edilen enerji tüketim verileri, CFRP+%20 COR numunesinin diğer deney elemanlarına kıyasla en yüksek enerji tüketimine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, CFRP uygulamasının özellikle korozyona maruz kalmış ve güçlendirilmiş numunelerde yapısal performansı artırarak enerji soğurma kapasitesini yükselttiğine işaret etmektedir. %20 COR+CFRP, %10 COR+CFRP+%10 COR ve REF+CFRP numunelerindeki belirgin enerji tüketim düşüşleri ise korozyonun ve korozyonun farklı bölgelerde etkisinin, yapının enerji tüketim kapasitesi üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir. Buna karşın, CFRP güçlendirmesi bu kayıpların bir kısmını telafi ederek yapı elemanlarının dayanım ve sünekliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, CFRP ile yapılan dıştan sarma güçlendirme yöntemi, korozyonun yol açtığı performans kayıplarını önemli ölçüde azaltmakta ve yapısal elemanların enerji soğurma kapasitesini iyileştirmektedir.



Şekil 4.97. Grup-3'e ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği

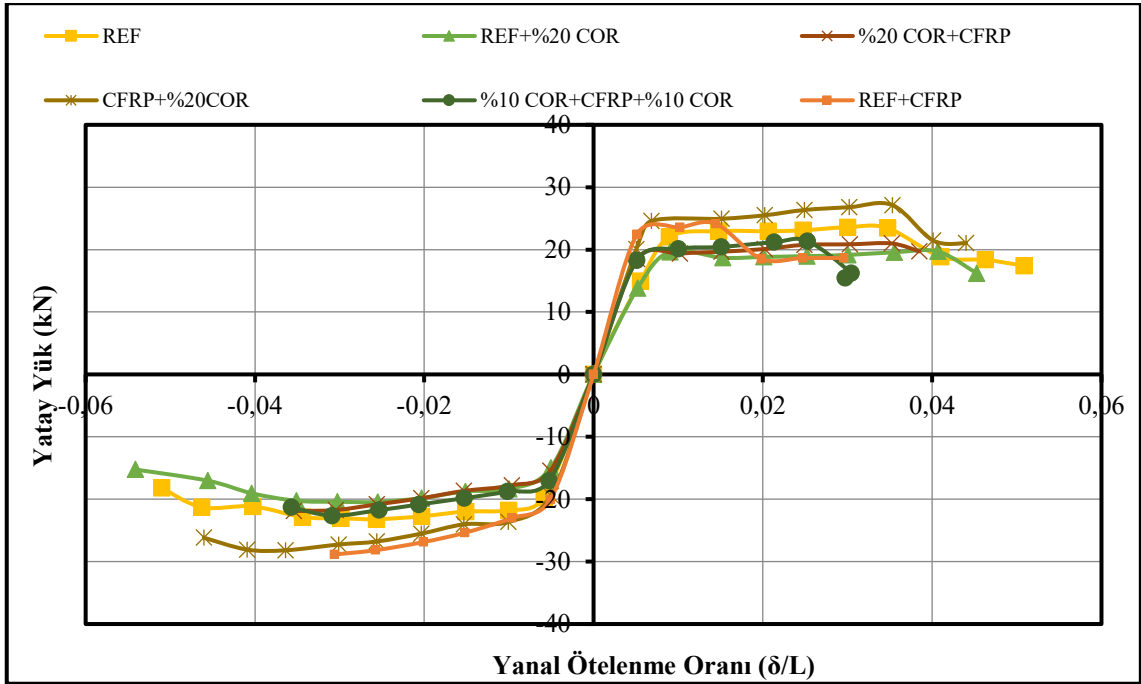
REF+CFRP, %10 COR+CFRP+%10 COR, CFRP+%20 COR ve %20 COR+CFRP numuneleri arasında süneklik açısından yapılan karşılaştırmada, en yüksek süneklik 5,26 mm/mm ile CFRP+%20 COR numunesinde elde edilmiştir. Bu numune, korozyon etkisiyle birlikte CFRP takviyesinin sünekliğe olumlu katkı sağlayabildiğini göstermektedir. %20 COR+CFRP numunesi ise 5,18 mm/mm ile ikinci sırada yer

almakta olup, CFRP+%20 COR numunesine göre yalnızca %1,5 oranında daha düşük süneklik sergilemiştir. %10 COR+CFRP+%10 COR numunesi 4,10 mm/mm süneklik değeri ile sıralamada üçüncü sıradadır ve en yüksek değere göre %22 oranında azalma göstermektedir. REF+CFRP numunesi ise yalnızca 3,15 mm/mm süneklikle en düşük değere sahip olup, CFRP+%20 COR numunesine göre %40,1 daha düşük süneklik sergilemiştir. Bu veriler, CFRP takviyesinin doğrudan REF numunesine uygulanmasının sünekliği düşürdüğünü; ancak korozyonla birlikte kullanıldığında bu etkinin hafiflediğini göstermektedir.

#### 4.2.3. Tüm deney elemanlarının karşılaştırılması

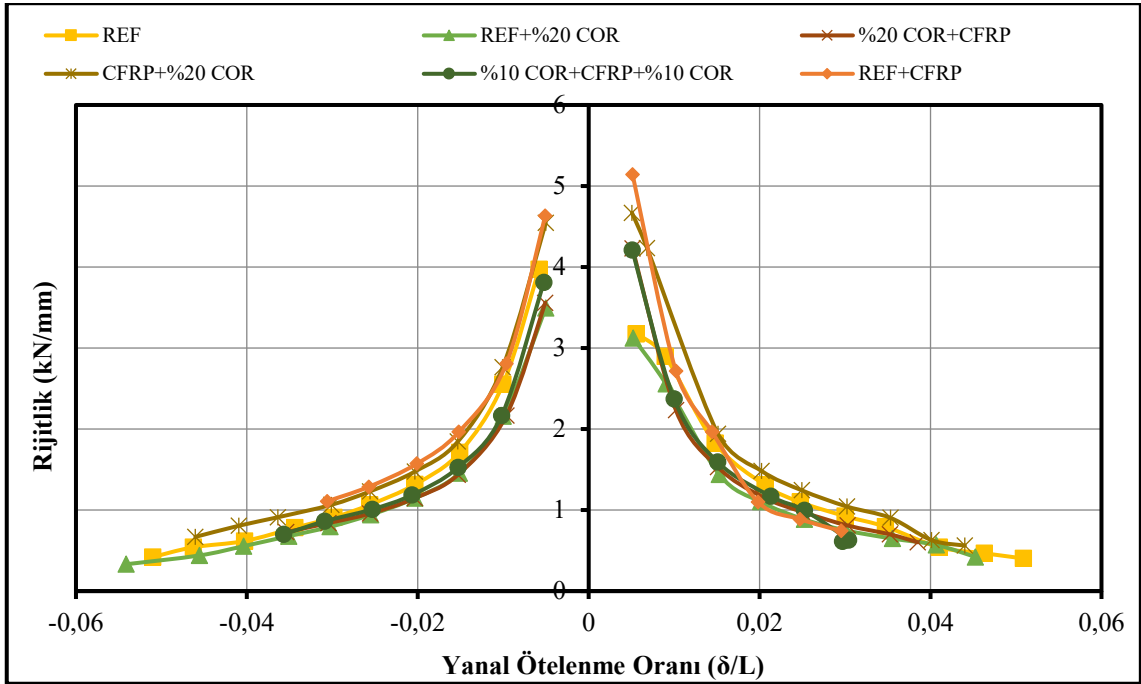
Tüm deney elemanlarına ait zarf eğrileri Şekil 4.98’de verilmiştir. Şekil 4.98 incelendiğinde ve deney elemanlarının maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri değerlendirildiğinde, en yüksek taşıma kapasitesine CFRP+%20 COR numunesi ulaşmıştır. Bu numune, ileri çevrimde 27,13 kN, geri çevrimde ise 28,18 kN yük taşıyarak ortalama 27,66 kN seviyesinde bir kapasite göstermiştir. Bu değer, CFRP takviyesinin taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkı sunduğunu göstermektedir. REF numunesi ortalama 23,40 kN ile referans düzeyde bir kapasite sergilerken, %10 COR+CFRP+%10 COR ve %20 COR+CFRP numuneleri sırasıyla 22,01 kN ve 21,45 kN seviyelerinde performans göstermiştir. REF+%20 COR numunesi ise 20,07 kN ortalama kapasitesi ile yük taşıma açısından en düşük değerlere sahip gruplardan biri olmuştur. Bu veriler, CFRP uygulamasının yapısal elemanların yatay yük taşıma kapasitesini artırmada etkili bir yöntem olduğunu; ancak bu etkinliğin korozyonun derecesi ve yüzey koşullarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.





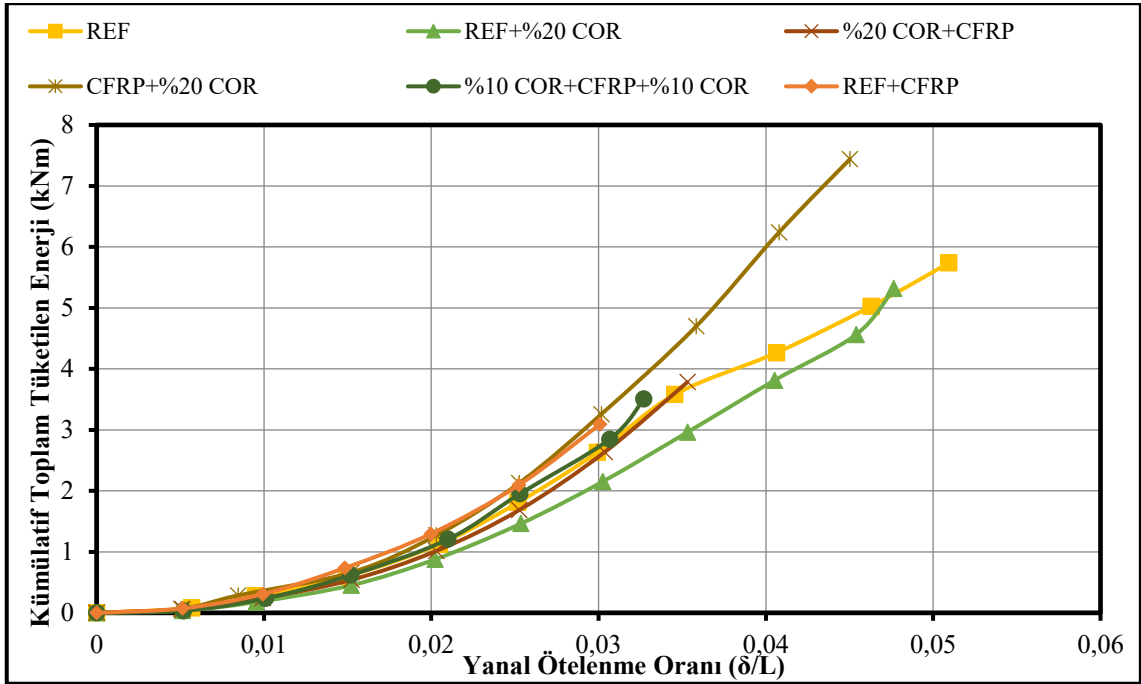
Şekil 4.98. Tüm deney elemanlarına ait zarf eğrisi

Tüm deney elemanlarına ait rijitlik grafiği Şekil 4.99’da verilmiştir. Şekil 4.99 incelendiğinde, deney elemanlarının rijitlik değerleri en yüksek ortalama rijitlik CFRP+%20 COR numunesinde 4,88 kN/mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, CFRP uygulamasının elemanın başlangıç rijitliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. %20 COR+CFRP numunesinde rijitlik 3,76 kN/mm, %10 COR+CFRP+%10 COR numunesinde 3,44 kN/mm, REF+%20 COR numunesinde ise 3,49 kN/mm olarak belirlenmiştir. Referans eleman olan REF numunesi 3,97 kN/mm ile bu gruplar arasında orta seviyede bir rijitlik göstermiştir. En düşük rijitlik değeri ise 3,04 kN/mm ile REF+CFRP numunesinde kaydedilmiştir. Bu değer, CFRP'nin yapıya tek başına uygulandığında her zaman rijitlik üzerinde doğrudan olumlu bir etki yaratmadığını, yapısal bütünlük ve ön işlem koşullarının da bu etkiyi değiştirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.99. Tüm deney elemanlarına ait rijitlik grafiği

Tüm deney elemanlarına ait kümülatif toplam tüketilen enerji grafiği Şekil 4.100'de verilmiştir. Şekil 4.100 incelendiğinde ve deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde en yüksek enerji sönümleme kapasitesi CFRP+%20 COR numunesinde ölçülmüş ve bu numune toplamda 7,44 kNm enerji tüketmiştir. Bu, sistemin yapısal sönümleme açısından en etkin numunesi olduğunu göstermektedir. REF numunesi 5,74 kNm enerji tüketimi ile referans düzeyinde kalırken, REF+%20 COR 5,32 kNm ile benzer bir performans sergilemiştir. %20 COR+CFRP ve %10 COR+CFRP+%10 COR numunelerinde enerji tüketimi sırasıyla 3,78 kNm ve 3,51 kNm olarak ölçülmüştür. En düşük enerji tüketimi ise 3,09 kNm ile REF+CFRP numunesinde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, CFRP takviyesinin enerji sönümleme yeteneğini kısıtladığını, ancak korozyon ile birlikte uygulandığında bu etkinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.100. Tüm deney elemanlarına ait Kümülatif Toplam Tüketilen Enerji grafiği

Çizelge 4.9 incelendiğinde, deney elemanlarının süneklik değerleri karşılaştırıldığında en yüksek sünekliğe 5,88 mm/mm ile REF+%20 COR numunesi ulaşmıştır. Bu değer, sistemin korozyon etkisi altındayken bile plastik şekil değiştirme yeteneğini koruyabildiğini göstermektedir. REF numunesi 5,70 mm/mm ile ikinci sırada yer alırken, CFRP+%20 COR ve %20 COR+CFRP numuneleri sırasıyla 5,26 mm/mm ve 5,18 mm/mm süneklik değerlerine ulaşmıştır. Üçlü takviyeye sahip %10 COR+CFRP+%10 COR numunesi 4,10 mm/mm ile daha sınırlı bir sünek davranış sergilemiştir. En düşük süneklik değeri ise 3,15 mm/mm ile REF+CFRP numunesinde görülmüştür. Bu durum, CFRP takviyesinin doğrudan uygulandığı elemanlarda sünekliği sınırlandırabildiğini; ancak korozyonla birlikte kombine edildiğinde sünekliğin dengelenebildiğini göstermektedir. Çizelge 4.8’de deney numunelerinin kritik yük seviyelerindeki deney sonuçları tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.8. Kritik yük seviyelerindeki deney sonuçları

| Deney Adı          | Akma Noktası |               |             |               |             |               | Maksimum Yük |               |             |               |             |               | Göçme Noktası |               |             |               |             |               |
|--------------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
|                    | +            |               | -           |               | Ort.        |               | +            |               | -           |               | Ort.        |               | +             |               | -           |               | Ort.        |               |
|                    | Yük<br>(kN)  | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN) | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN) | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN)  | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN) | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN) | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN)   | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN) | Depl.<br>(mm) | Yük<br>(kN) | Depl.<br>(mm) |
| REF                | 22.05        | 7.77          | 20.18       | 5.84          | 21.12       | 6.81          | 23.59        | 25.51         | 23.2        | 21.79         | 23.40       | 23.65         | 20.05         | 33.48         | 19.72       | 41.37         | 19.89       | 37.43         |
| REF+%20 COR        | 17.73        | 6.61          | 16.59       | 6.3           | 17.16       | 6.46          | 19.7         | 34.56         | 20.44       | 21.67         | 20.07       | 28.12         | 19.7          | 37.86         | 17.37       | 37.98         | 18.54       | 37.92         |
| %20 COR+CFRP       | 18.6         | 4.96          | 16.43       | 7.99          | 17.52       | 6.48          | 20.99        | 29.94         | 21.9        | 30.08         | 21.45       | 30.01         | 17.84         | 32.72         | 18.62       | 30.08         | 18.23       | >31.40        |
| CFRP+%20 COR       | 24.58        | 5.85          | 23.11       | 8.01          | 23.85       | 6.93          | 27.13        | 30.02         | 28.18       | 30.92         | 27.66       | 30.47         | 23.06         | 32.94         | 23.95       | 39.12         | 23.51       | >36.03        |
| %10COR+CFRP+%10COR | 18.59        | 5.08          | 18.79       | 8.81          | 18.69       | 6.95          | 21.38        | 21.45         | 22.63       | 26.28         | 22.01       | 23.87         | 18.17         | 24.2          | 19.24       | 30.35         | 18.71       | >27.28        |
| REF+CFRP           | 22.54        | 4.69          | 23.18       | 8.55          | 22.86       | 6.62          | 24.13        | 12.28         | 28.86       | 26.01         | 26.50       | 19.15         | 20.51         | 15.23         | 24.53       | 26.01         | 22.52       | >20.62        |

Çizelge 4.9. Deney elemanlarının yapısal davranış sonuçları

| Deney adı           | Kümülatif Tüketilen Enerji<br>(kN.m) | Başlangıç Rijitliği<br>(kN/mm) |      |      | Süneklik<br>(mm/mm) |       |       |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------|------|---------------------|-------|-------|
|                     |                                      | +                              | -    | Ort. | +                   | -     | Ort.  |
| REF                 | 5.74                                 | 3.17                           | 3.97 | 3.57 | 4.31                | 7.08  | 5.7   |
| REF+%20 COR         | 5.32                                 | 3.12                           | 3.49 | 3.31 | 5.73                | 6.03  | 5.88  |
| %20 COR+CFRP        | 3.78                                 | 4.23                           | 3.56 | 3.90 | 6.60                | >3.76 | >5.18 |
| CFRP+%20 COR        | 7.44                                 | 4.67                           | 4.54 | 4.61 | 5.63                | >4.88 | >5.26 |
| %10 COR+CFRP+%10COR | 3.51                                 | 4.21                           | 3.81 | 4.01 | 4.76                | >3.44 | >4.10 |
| REF+CFRP            | 3.09                                 | 5.14                           | 4.63 | 4.89 | 3.25                | >3.04 | >3.15 |

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Özdeş donatı düzenine ve aynı güçlendirme detayına ve farklı korozyon uygulamalarına sahip birleşim noktaları üzerinde deneysel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Numuneler arasında yalnızca korozyon hasarlarının numunelere CFRP uygulanmadan veya uygulandıktan sonra ne tür yapısal davranışların gerçekleştiği ve bu davranışların birleşim noktalarına etkileri araştırılmıştır. Deneylerde yük taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik ve kümülatif enerji tüketimi parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiş, korozyonun numuneler üzerinde performansa etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bu bulgular, birleşim noktalarının nihai performansını anlamak ve korozyon hasarlı yapılardaki hasarın giderilmesinde ve yapısal dayanımın geri kazanılmasına dair önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

### 5.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışma sonucu 6 adet deney numunesinden elde edilen bulgular aşağıda yer almaktadır.

- %10COR+CFRP+%10COR numunesi ne aşırı rijit ne de aşırı sünek bir sistem davranışı göstermiştir; her iki özelliği optimum düzeyde birleştirmiştir. Bu denge hem taşıma kapasitesi hem de deformasyon kabiliyeti açısından mühendislik açısından istenen performansı sunmuştur.
- %10 oranındaki korozyon, donatının tamamını zayıflatacak seviyede olmadığı için CFRP tabakası etkili bir taşıyıcı rol üstlenebilmiştir. Lif tabakası, çatlakların yön değiştirmesini sınırlamış ve yükü daha geniş bir yüzeye yaymıştır. Bu durum, sistemin yük altındaki deformasyon hızını düşürerek enerji tüketimini artırmıştır.
- %20 COR+CFRP numunesi rijitlik açısından olumlu bir iyileşme sergilemiştir. Ancak bu artış, enerji tüketimine doğrudan yansımamıştır. Sınırlı enerji kapasitesi, güçlendirmenin yapısal bütünlük üzerindeki etkisinin tam olarak istenen düzeyde olmadığını göstermektedir.

- %20 COR+CFRP numunesinde yük-deplasman eğrileri dengeli bir dağılım göstermiştir. Hem ileri hem geri çevrimlerde benzer tepkiler elde edilmiştir. Bu durum, CFRP'nin etkili bir biçimde deney elemanı ile bütünleştiğini göstermektedir.
- CFRP+%20 COR numunesi, önce CFRP ile güçlendirilip ardından korozyona maruz bırakıldığı için, korozyonun CFRP altındaki donatıya etkisi kısmen sınırlandırılmıştır. CFRP tabakası, beton yüzeyinde fiziksel bir bariyer oluşturarak agresif iyon geçişini azaltmıştır. Bu sayede numune, tamamen korozyona uğramış elemanlara göre daha kararlı bir davranış sergilemiştir. Korozyon CFRP uygulamasından sonra gerçekleştiği için, aderans kaybı sınırlı düzeyde kalmıştır. Lif takviyesi altında kalan bölgelerde pas ürünlerinin yayılması engellenmiş, donatı-beton bağı kısmen korunmuştur. Bu durum, sistemin rijitlik kaybını yavaşlatmış ve yük aktarımını düzenlemiştir.
- CFRP'nin yüksek rijitliği, yükleme sürecinde yapının daha sert bir tepki vermesine yol açmıştır. Ancak bu rijit davranış, korozyon etkisiyle zayıflayan donatının ani kopma eğilimini kısmen engellemiştir. Böylece göçme, ani değil kademeli bir biçimde gerçekleşmiştir.
- CFRP+%20COR numunesinde taşıma kapasitesi korunmuş olsa da, süneklik oranı korozyonsuz numunelere kıyasla daha düşüktür. Bunun nedeni, korozyonun çelik çekme bölgesinde plastisiteyi kısıtlamasıdır. Yani CFRP takviyesi hasarı sınırlandırmış, ancak deformasyon potansiyelini tam olarak geri kazandıramamıştır.
- CFRP+%20 COR numunesi, korozyonun başlatılmasından önce güçlendirme yapılması halinde bile dayanım kayıplarının tamamen önlenemediğini, ancak geciktirilebildiğini ortaya koymuştur. Bu numune, CFRP'nin koruyucu bir tabaka olarak etkili olduğunu; ancak uzun vadeli korozyon altında etkinliğinin zamanla azalabileceğini göstermiştir.
- %20COR+CFRP numunesi, CFRP+%20COR numunesine kıyasla daha yüksek deformasyon kabiliyeti göstermiştir. Bunun temel nedeni, CFRP'nin korozyon sonrası uygulanmasıyla birlikte sistemin zayıf bölgelerinde yük dağılımının yeniden düzenlenmesidir. Böylece sistem hasar sonrasında bile yüksek süneklik potansiyelini koruyabilmiştir. Korozyon nedeniyle zayıflamış donatının yük

taşıma katkısı azalmış olsa da CFRP'nin yüksek çekme kapasitesi bu kaybı büyük ölçüde telafi etmiştir. Lif tabakası, çatlak uçlarında gerilme birikimini dağıtarak çatlakların birleşmesini engellemiştir. Bu sayede numune, yüksek rijitlik ve sünekliği birlikte sergileyebilmiştir.

- %20COR+CFRP numunesi, korozyonun neden olduğu yapısal zayıflıkların CFRP ile büyük oranda giderilebileceğini kanıtlamıştır. CFRP, hasar sonrası yapılan güçlendirme uygulamalarında sistemin yük taşıma kapasitesini geri kazandırmış, deformasyon kabiliyetini artırmıştır.
- REF isimli referans numunesi, korozyon etkisi bulunmayan birleşim bölgesiyle en dengeli yapısal davranışlardan birini göstermiştir. Taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik yönünden yüksek değerlere ulaşmıştır.
- REF numunesi süneklik açısından deneyin en yüksek değerlerinden birini sergilemiştir. Bu durum, korozyon hasarı olmadığında yapı elemanlarının şekil değiştirme kabiliyetinin güçlü olduğunu göstermektedir. Sünekliğin korunması, güvenli yapı davranışı açısından oldukça önemlidir.
- REF numunesinde beton ile donatı arasındaki aderansın tam olması, yük aktarımının homojen şekilde gerçekleşmesini sağlamıştır. Bu durum, yapısal davranışın elastik bölgede uzun süre korunmasına neden olmuştur. Numunede gözlenen çatlak oluşumları, çekme bölgesinde düzgün aralıklarla gelişmiş ve genişlikleri kontrol edilebilir düzeyde kalmıştır. Bu davranış, betonun yüksek aderans kapasitesine ve donatının düzgün yerleşimine bağlıdır. Böylece sistem, göçme anına kadar kararlı bir deformasyon eğrisi göstermiştir.
- REF numunesinde gözlemlenen yük altında uzama davranışı, rijitlik kaybının belirginleştiği bölgeye kadar doğrusal kalmıştır. Bu doğrusal davranış aralığı, betonun iç yapısında enerji birikiminin kontrollü olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla sistemin dayanım kaybı ani değil, kademeli olmuştur.
- REF +%20 COR numunesi korozyon sonucu donatı kesitinin azalması, elemanın yük taşıma kapasitesinde belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Bu azalma, donatı etkinliğini sınırlamış ve betonun tek başına yük taşıma payını artırmıştır.
- REF +%20 COR numunesi donatı yüzeyindeki paslanma, yük aktarımı sırasında sürtünmeyi azaltarak aderans gerilmesinin dengesiz dağılmasına neden olmuştur. Bu da kesitteki gerilme bölgeleri arasında kopukluk oluşmasına yol

açmıştır. Korozyon etkisiyle betonun yüzeyinde gözlenen küçük kabarmalar, içsel basıncın bir göstergesi olmuştur.

- REF+%20 COR numunesinde korozyonun rijitliği düşürdüğü, ancak sünekliği sınırlı oranda etkilediği gözlenmiştir. Güçlendirme uygulanmadığında bile belirli bir deformasyon kapasitesinin korunabildiği anlaşılmıştır. Ancak dayanımda ciddi kayıplar mevcuttur.
- REF+%20 COR numunesinde yalnızca korozyon etkisi gözlenmiş, herhangi bir güçlendirme uygulanmamıştır. Bu durum taşıma kapasitesinde ve rijitlikte belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Süneklik açısından ise referans numuneye yakın davranış göstermiştir.
- REF+%20 COR numunesinin taşıma kapasitesi, korozyonun olumsuz etkisiyle zayıflamıştır. Ancak birleşim bölgesinin deformasyon kabiliyeti korunabilmiştir. Bu durum, korozyonun sünekliği her zaman doğrudan azaltmadığını göstermiştir.
- REF+%20COR numunesinin genel davranışı, korozyonun betonarme yapı elemanlarında yalnızca dayanımı değil, sünekliği ve enerji sönümleme kapasitesini de ciddi biçimde azalttığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak bu numune, donatı korozyonunun betonarme sistemlerin güvenilirliğini doğrudan zayıflattığını; uzun süreli dayanım ve rijitlik açısından ciddi riskler oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, güçlendirme veya koruyucu önlemlerin gerekliliğini açık biçimde ortaya koymuştur.
- REF+CFRP numunesi taşıma kapasitesi ve rijitlik açısından iyi performans göstermesine rağmen, deformasyon kapasitesi düşüktür. Bu numunede rijitliğin artması sünekliği sınırlamıştır.
- REF+CFRP numunesi, güçlendirme ile taşıma kapasitesini artırsa da sünekliğini azaltmıştır.
- REF+CFRP numunesi, korozyon etkisi olmayan bir birleşim bölgesine CFRP uygulanarak elde edilmiştir. Rijitlikte belirgin bir artış sağlanmış, taşıma kapasitesi de yükselmiştir. Ancak süneklik değeri bu numunede düşük seviyelerde kalmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, farklı korozyon oranlarına ve CFRP ile güçlendirme türlerine sahip numunelerin davranışları karşılaştırıldığında, betonarme



elemanların yapısal performanslarının hem korozyon derecesinden hem de uygulanan güçlendirme yönteminden doğrudan etkilendiği açıkça görülmüştür. Referans numunesi, hasarsız ve güçlendirilmemiş yapısıyla en dengeli yük-deformasyon ilişkisini sergileyerek, betonarme elemanların doğal süneklik ve rijitlik özelliklerini temsil etmiştir. %20 oranında korozyona maruz bırakılan REF+%20COR numunesinde, çelik donatı kesit kaybı ve aderans zayıflığı nedeniyle hem yük taşıma kapasitesinde hem de enerji sönümleme kabiliyetinde belirgin azalmalar meydana gelmiş, bu durum korozyonun betonarme sistemlerdeki en kritik zafiyetlerden biri olduğunu göstermiştir. Korozyonun neden olduğu bu dayanım kayıpları, CFRP ile yapılan dıştan güçlendirme uygulamalarıyla kısmen giderilebilmiş, özellikle %20COR+CFRP numunesinde karbon fiber takviyesinin çekme bölgesinde ilave bir yük taşıma mekanizması oluşturarak rijitliği artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, CFRP'nin yalnızca korozyon sonrası değil, korozyon öncesi uygulanmasının da yapısal performans üzerinde önemli etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. CFRP+%20COR numunesinde, CFRP kaplamanın numune yüzeyinde koruyucu bir bariyer görevi üstlenmesi, korozyonun ilerlemesini geciktirmiş ve elemanın hem dayanımını hem de deformasyon kapasitesini korumasına katkı sağlamıştır. Bu durum, güçlendirme uygulamasının zamanlamasının yapısal davranış üzerinde ne kadar belirleyici olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur. %10COR+CFRP+%10COR numunesinde ise, yarı korozyonlu yüzeylerin CFRP ile birlikte çalışması sonucu tam korozyonlu güçlendirilmiş numunelere kıyasla daha dengeli bir davranış sergilediği, yük aktarımının hem donatı hem CFRP arasında daha etkin şekilde paylaşıldığı görülmüştür. Bu numune, kısmi korozyonun CFRP ile birlikte uygulandığında optimum bir rijitlik-süneklik dengesi oluşturabileceğini göstermiştir. Diğer yandan REF+CFRP numunesinde CFRP takviyesinin hasarsız bir elemanda uygulanması, yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış sağlamış, ancak aşırı rijitlik artışı nedeniyle deformasyon kapasitesinde sınırlı bir azalma yaratmıştır. Bu durum, CFRP uygulamalarında rijitlik artışının sünek davranışı kısmen baskıladığını göstermektedir. Genel olarak tüm numuneler karşılaştırıldığında, korozyonun yapısal dayanımı zayıflatığı, CFRP'nin ise bu olumsuz etkileri büyük ölçüde giderdiği; ancak uygulama öncesi hasar düzeyinin CFRP'nin etkinliğini belirleyen en önemli parametre olduğu sonucuna varılmıştır. CFRP ile yapılan güçlendirmelerin donatı aderansını koruduğu, çatlak genişliklerini sınırladığı ve yük altında daha kararlı deformasyon

biçimleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca korozyonun ilerlediği durumlarda CFRP'nin yalnızca dıştan sarım olarak değil, sistemin enerji tüketim kapasitesini artırıcı bir eleman olarak da işlev gördüğü belirlenmiştir.

### 5.1. Öneriler

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar karşısında, aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğu 1/2 ölçekli olarak gerçekleştirildiğinden, bu çalışmada da deneyler 1/2 ölçekli numuneler üzerinde yürütülmüştür. İleride yapılacak çalışmalarda ise deneylerin 1/1 ölçekli numuneler üzerinde tekrarlanması ve elde edilen sonuçların 1/2 ölçekli numunelerle karşılaştırılması, ölçek etkisinin yapısal davranış üzerindeki farklılıkları incelenebilir.
- Kullanılan CFRP kompozitinin boyutlarının ve konumlandırılma şeklinin değiştirilmesi, deneysel veriler üzerinde etkili olabilir ve farklı dayanım artışları sağlayabilir. Bu nedenle, ileride yapılacak çalışmalarda CFRP uygulama detaylarının çeşitlendirilmesi önerilmektedir.
- CFRP ile beton arasındaki aderansın kimyasal malzemeler kullanılarak artırılması, CFRP'nin betondan ayrışmasını engelleyebilir ve böylece dayanımsal parametrelerin daha doğru şekilde elde edilmesine katkı sağlayabilir.
- Korozyon hasarlı kolon-kiriş birleşim noktalarının farklı güçlendirme metodlarıyla ele alınması hem maliyet hem de uygulanabilirlik açısından karşılaştırmalı veriler sağlayarak ileride yapılacak çalışmalar için yol gösterici olabilir.
- Güçlendirme uygulamasına geçilmeden önce yapılacak detaylı hasar tespit çalışmaları, doğru yöntem seçimine katkı sağlayarak güçlendirme etkinliğini artıracaktır.
- Numuneler üzerinde donatı düzeninin, boyutlarının ve kullanılan beton sınıfının değiştirilmesi, deneysel bulgular üzerinde doğrudan etki yaratabilir. Bu değişiklikler, taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik gibi dayanımsal ölçütlerin hem pozitif hem de negatif yönde farklılık göstermesine neden olabilir.

- CFRP ile yapılan güçlendirme uygulamaları, yalnızca mevcut hasar sonrası değil, önleyici bir müdahale olarak da yapı stokuna uygulanabilir; bu sayede yapısal dayanım ve güvenlik artırılırken, uzun vadede bakım ve onarım maliyetleri de azaltılabilir.



## KAYNAKLAR

- ACI 440, (1996). Guide for the design and strengthening of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, USA.
- Balendran, R. V., Rana, T. M., & Nadeem, A. (2001). Strengthening of concrete structures with FRP sheets and plates. *Structural Survey*, 19(4), 185-192.
- Corrosion", (1992), ASM Handbook, 13:1220 – 1251, 174 – 222, 901 – 941.
- Dalyan, İ. (2019), Lifli Polimerle Farklı Biçimlerde Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Performanslarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Doğan, M., 2009, Betonarme yapılarıdaki deprem hasarlarına korozyonun etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (1), 147 168.
- Ghaffari, P., Kalyoncuoglu, A., Goksu, C., İlki, A. , 2013, An attempt to repair corrosion damaged reinforced concrete column using a low cost method. Vienna Congress 304 on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics (VEESD 2013). Vienna, Austria Paper No. 547.
- Gökdemir, H., Tankut, T., & Aydın, R. (2013). Kiriş-Kolon Birleşim Bölgesinin CFRP Rulolarla Depreme Karşı Güçlendirilmesi. *Anadolu University Journal of Science and Technology A -Applied Sciences and Engineering*, 14(2), 153-164.
- Göksu, C. ve İlki, A., 2016, Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Corroded Deformed Reinforcing Bars, *Acı Structural Journal*, 113 (5), 1053 1064.
- Haroun, M. A., Mosallam, A. S., Feng, M. Q., and Elsanadedy, H. M., "Experimental Investigation of seismic Repair and Retrofit of Bridge Columns by Composite Jackets" *FRP Composites in Civil Engineering*, 838- 857, (2001).
- Housner G.W., Jennings P.C., (1982). Earthquake design criteria. Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland, CA.
- Kalyoncuoglu, A., Ghaffari, P., Goksu, C. ve İlki, A., (2013), Rehabilitation of corrosion-damaged substandard RC columns using FRP sheets, *Advanced Materials Research*, 1096-1103
- Kandemir, G. (2018). CFRP şeritler ile güçlendirilen betonarme kolonların eksenel yük etkisi altındaki davranışının deneysel olarak incelenmesi (Master's thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Koçer M. (2020), Korozyon Etkisi Altındaki, Mineral Katkı İle Üretilen Kolonların Tersinir Tekrarlanır Yatay Yük Altındaki Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Köksal H.O., Altınsoy F., Aktan S., Karahan N.Ş., Çankaya R., (2017). "Üç Noktalı Eğilme Altındaki Betonarme Kirişlerde Karbon Lifli Polimerin Etkin ve Ekonomik Kullanımı", Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt.3, 1-16.
- Lee, H.-S., Kage, T., Noguchi, T. ve Tomosawa, F., (2003), An experimental study on the retrofitting effects of reinforced concrete columns damaged by rebar corrosion strengthened with carbon fiber sheets, Cement and concrete research, 33 (4), 563-570.
- Masri, Y. (2022), Yüksek Şekil Değiştirme Kapasitesine Sahip Lif Donatılı Betonların Konsol Kiriş Elemanlardaki Yapısal Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- MasterEmaco S 488 Teknik Bilgi Föyü- Revizyon Tarihi: 10/2015
- Özcan, Z., & Yöntem, K. (2005). Betonarme kirişlerin kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Özcebe, G., Binici, B., & Akyüz, U. (2006). Mevcut yapıların FRP ile güçlendirilmesi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnönü Bulvarı, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarı, 06531, Ankara.
- Öztürk, H. (2024) Yapıların süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı şekilde tasarlanmasının yapının deprem performansı açısından irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul
- Sümer, Y. (2010). FRP elemanlarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analizi (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- TBDY, 2018, Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı.
- TS EN 12350-1 "Taze Beton Deneyleri- Bölüm 1: Numune Alma"
- TS EN 12390-2 "Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Numunelerin Yapımı ve Kürü"
- TS EN 12390-3 "Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini"
- TS500, 2000, TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Ankara, Türk standartları Enstitüsü.

TS708, 2016, Çelik- Betonarme için- Donatı çeliği. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü.

Unjoh, S., Tereyama, T., Adachi, Y., and Hoshikuma, J., “Seismic Retrofit of Existing Highway Bridge Columns in Japan”, Cement and Concrete Composites, 52- 62, (2000).

Url1:[Deltek A.Ş. Modern İzolasyon Yalıtım İnşaat Uygulamaları \(deltekinsaat.com.tr\)](http://deltekinsaat.com.tr)  
Erişim Tarihi: 22.01.2024.

Yalçiner, Hakan &Kumbasaroglu, Doç. Dr. Atila &Mermiç, Mehmet &Kohistani, Rameen& Karimi, Aqludin. (2019). Paslanmaya Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonların Monotonik Yükleme Etkisi Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi: Korozyon Çalışmaları İçin Öneriler. 12. 695-713. 10.18185/erzifbed.478287.

Yıldız, H. A. (2006). Bindirme problemi olan betonarme kolonların eğilme dayanımının boyuna frp takviyesi ile artırılması (Master'sthesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Zhang, R., Castel, A., and François, R., 2009, The corrosion pattern of reinforcement and itsinfluence on serviceability of reinforced concrete members in chloride environment, Cement and Concrete Research, 39(11), 1077-1086pp.