



**BA ELEMENLARDA KARBON LAMALARLA BOYUNA DONATILARIN  
BİNDİRMELİ EKİ**

**Oğuzhan SÜMER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2023**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Oğuzhan SÜMER

01/02/2023

## BA ELEMANLARDA KARBON LAMALARLA BOYUNA DONATILARIN

## BİNDİRMELİ EKİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuzhan SÜMER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2023

## ÖZET

Ülkemizin büyük bir kısmı deprem bölgesinde yer almaktadır. Bu nedenle hasar görmüş veya yetersizliği anlaşılmış binaların onarımı/güçlendirilmesi sıklıkla gündeme gelebilmektedir. Özellikle kiriş gibi eğilme elemanlarının güçlendirilmesinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri de çekme yüzüne karbon fiber plakaların yapıştırılmasıdır. Uygulamada bu yöntem ile yapılan güçlendirme işlerinde bazı durumlarda karbon plakalar ile mevcut donatıların bindirmeli olarak eklendiği görülmüştür. Karbon plakalardan mevcut donatılara yük aktarımının sadece adezyon kuvvetlerine ve betonun çekme dayanımına bağlı olduğu bu bindirmeli ek tekniği konusunda ciddi kaygılar bulunmaktadır. Bu nedenle konunun deneysel olarak araştırılmasına karar verilmiştir. Araştırmanın temel konusu, uygulamadaki şekli ile, karbon plakalardan mevcut donatılara yük aktarımının mümkün olup olmadığının belirlenmesidir. Çalışmada ikisi referans kirişi olmak üzere toplam 10 adet 1/1 ölçekli deney elemanı hazırlanıp test edilmiştir. Referans elemanlarının tüm donatıları sürekli olacak şekilde üretilmiştir. Diğer elemanlarda ise etriye köşelerindeki 2Ø8 donatıların haricindeki çekme donatıları kiriş orta bölgesinde kesilerek süreksizlik oluşturulmuştur. Bu elemanlarda kiriş orta bölgesini ortalayacak şekilde karbon plakalar yapıştırılarak plakadan donatıya yük aktarımı incelenmiştir. Çalışmada çekme donatısı alanı ile bindirme boyu değişken olarak ele alınmıştır. Çalışma sonunda karbon plakaların mevcut donatılarla yapılan bindirmeli eklerinin oldukça kötü bir davranış sergilediği, elemanların tamamının hedef dayanıma ulaşmadan çok daha önce plakaların yüzeyden ayrılması sonucunda gevrek olarak kırıldığı görülmüştür. Çalışmada karbon plakalar ile mevcut donatılar arasındaki yük aktarımının ilave önlem alınmadan sadece bindirme boyunu arttırarak sağlanamayacağı da görülmüştür.

Bilim Kodu : 91130

Anahtar Kelimeler : Karbon lama, bindirme boyu, BA elemanlar

Sayfa Adedi : 113

Danışman : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Eray ÖZBEK

# LAPPED SPLICE OF LONGITUDINAL BARS BY CARBON PLATES IN RC MEMBERS

(M. Sc. Thesis)

Oğuzhan SÜMER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2023

## ABSTRACT

A large part of our country is located in the earthquake zone. For this reason, the repair/reinforcement of buildings that have been damaged or whose inadequacy has been understood often come to the fore. One of the most frequently used methods for the reinforcement of bending elements such as beams is the bonding of carbon fiber plates to the tension face. In practice, it has been observed that in some cases, carbon plates and existing reinforcements are added as overlapping in reinforcement works made with this method. There are serious concerns about this lapped splice technique, where load transfer from carbon plates to existing reinforcement depends only on the adhesion forces and the tensile strength of the concrete. Therefore, it was decided to investigate the subject experimentally. The main subject of the research is to determine whether it is possible to transfer the load from the carbon plates to the existing reinforcements as in practice. In the study, a total of 10 1/1 scale test elements, two of which are reference beams, were prepared and tested. All reinforcements of reference elements are produced to be continuous. In the other elements, discontinuity is created by cutting the tension reinforcements in the middle of the beam, except for the 2Ø8 reinforcements at the stirrup corners. In these elements, the load transfer from the plate to the reinforcement was investigated by sticking carbon plates in the middle of the beam. In the study, tensile reinforcement area and overlap length are considered as variables. At the end of the study, it was observed that the lapped splices of the carbon plates made with the existing reinforcements demonstrated poor behavior, and brittle fracture occurred in all of the elements as a result of the separation of the plates from the surface long before reaching the target strength. In the study, it has also been seen that the load transfer between carbon plates and existing reinforcement can not be achieved by simply increasing the overlap length without taking additional precautions.

Science Code : 91130

Key Words : CFRP, carbon plates, lap splice, RC members

Page Number : 113

Supervisor : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ

Co-Supervisor : Dr. Lecturer Eray ÖZBEK

## TEŞEKKÜR

Bu tez, beni bugünlere kadar getiren ve hayatım boyunca benden maddi manevi desteklerini bir an bile esirgemeyen annem Fatma SÜMER'e ve babam Ramazan SÜMER'e; beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aldığım her kararda, yaptığım her işte destekçim olan, beni kendisinden daha fazla düşünen kardeşim Emirhan SÜMER'e adanmıştır.

Tez çalışmamı yöneten, fikirleriyle beni yönlendiren hem lisans hem de yüksek lisans dönemimde üzerimde emeği çok olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ'a ve tez çalışmam sırasında katkı ve yardımlarını esirgemeyen ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Eray ÖZBEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Meryem BÖCEK'e ve Uzman Hüseyin KALKAN'a çok teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte her zaman yakın desteğini hissettiğim, bir amirden daha çok bir abim olarak gördüğüm Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdür Yardımcısı Muhammed Kerem YEĞNİDEMİR'e de çok teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerde kullanılan karbon plaka ve epoksi malzemelerinin temininde yardımcı olan Tekno Yapı Kimyasalları firmasına da ayrıca teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                             | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                  | iv    |
| ABSTRACT.....                                                               | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                               | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                           | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                   | xi    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                     | xii   |
| RESİMLERİN LİSTESİ.....                                                     | xiv   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                | xvii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                               | 1     |
| 2. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR.....                                               | 3     |
| 2.1. CFRP Malzemelerle Betonarme Kiriş Güçlendirme Yöntemleri.....          | 3     |
| 2.2. Toutanji, Zhao ve Zhang'ın (2006) Çalışması.....                       | 7     |
| 2.3. Balamuralikrishnan ve Jeyasehar'ın (2009) Çalışması.....               | 7     |
| 2.4. Acar'ın (2014) Çalışması.....                                          | 8     |
| 2.5. Wang ve Diğerleri'nin (2013) Çalışması.....                            | 8     |
| 2.6. Hashemi ve Diğerleri'nin (2009) Çalışması.....                         | 9     |
| 2.7. Aktan ve Diğerleri'nin (2017) Çalışması.....                           | 10    |
| 2.8. Rashid ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması.....                          | 10    |
| 2.9. Deng ve Diğerleri'nin (2019) Çalışması.....                            | 11    |
| 2.10. Haghani ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması.....                        | 11    |
| 2.11. Zhou ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması.....                           | 12    |
| 2.12. Al-Shamayleh, Al-Saoud, Abdel-Jaber ve Alqam'ın (2022) Çalışması..... | 12    |
| 2.13. Norris, Saadatmanesh ve Ehsani'nin (1997) Çalışması.....              | 13    |

|                                                                    | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.14. Erkan, Aksoylu, Alshlash ve Arslan'ın (2019) Çalışması ..... | 14           |
| 2.15. Grace, Sayed, Soliman ve Saleh'in (1999) Çalışması.....      | 14           |
| 2.16. Jiang, Fang ve Diğerleri'nin (2020) Çalışması.....           | 15           |
| 2.17. Fayyadh ve Razak'ın (2012) Çalışması .....                   | 15           |
| 2.18. Yong-Chang ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması .....           | 16           |
| 2.19. Tarigan, Patra ve Sitorus'un (2018) Çalışması.....           | 16           |
| 2.20. Ercan, Arısoy ve Çiftçioğlu'nun (2018) Çalışması.....        | 17           |
| 2.21. Elwan, Elsayed, Refaat ve Lotfy'nin (2017) Çalışması.....    | 17           |
| 2.22. Al-Khafaji, Salim ve El-Sisi'nin (2021) Çalışması.....       | 18           |
| 2.23. El-Sayed ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması.....              | 19           |
| 2.24. Zhang ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması .....                | 19           |
| 2.25. Abdalla ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması.....               | 20           |
| 2.26. Kurtipek'in (2007) Çalışması .....                           | 20           |
| 2.27. Al-Fakih ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması.....              | 21           |
| 2.28. Garcia ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması.....                | 21           |
| 2.29. Mousavi ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması .....              | 22           |
| 2.30. Shihata'nın (2011) Çalışması .....                           | 23           |
| 2.31. Makhoulouf'un (2019) Çalışması.....                          | 23           |
| 2.32. Harajli'nin (2006) Çalışması .....                           | 24           |
| 2.33. Hamad, Rteil, Salwan ve Soudki'nin (2004) Çalışması .....    | 24           |
| 2.34. Hamad, Soudki, Harajli ve Rteil'in (2004) Çalışması .....    | 25           |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>                                   | <b>27</b>    |
| 3.1. Deney Elemanları .....                                        | 27           |
| 3.2. Kullanılan Malzeme Bilgileri.....                             | 31           |

|                                                    | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------|--------------|
| 3.2.1. Beton.....                                  | 31           |
| 3.2.2. Donatı .....                                | 32           |
| 3.2.3. Karbon fiber plaka .....                    | 33           |
| 3.2.4. Epoksi .....                                | 34           |
| 3.3. Deney Elemanlarının Hazırlanma Aşamaları..... | 35           |
| 3.3.1. Kalıp hazırlama süreci .....                | 35           |
| 3.3.2. Donatı hazırlama süreci .....               | 37           |
| 3.3.3. Beton döküm süreci .....                    | 39           |
| 3.3.4. Karbon fiber plaka montaj süreci.....       | 42           |
| 3.4. Deney Sistemi .....                           | 45           |
| 3.5. Ölçüm Düzeni .....                            | 46           |
| 4. DENEYSEL SÜREÇ .....                            | 49           |
| 4.1. Referans Eleman Deneyleri .....               | 49           |
| 4.1.1. RS50 deney elemanı .....                    | 49           |
| 4.1.2. RS100 deney elemanı .....                   | 53           |
| 4.2. Güçlendirme Elemanı Deneyleri .....           | 58           |
| 4.2.1. S50/0.75 deney elemanı.....                 | 59           |
| 4.2.2. S50/1.00 deney elemanı.....                 | 63           |
| 4.2.3. S50/1.25 deney elemanı.....                 | 68           |
| 4.2.4. S50/1.50 deney elemanı.....                 | 72           |
| 4.2.5. S100/0.75 deney elemanı.....                | 76           |
| 4.2.6. S100/1.00 deney elemanı.....                | 80           |
| 4.2.7. S100/1.25 deney elemanı.....                | 84           |
| 4.2.8. S100/1.50 deney elemanı.....                | 88           |

|                                                  | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------|--------------|
| 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....    | 95           |
| 5.1. Genel .....                                 | 95           |
| 5.2. Temel Ölçütlere Göre Değerlendirmeler ..... | 102          |
| 5.2.1. Dayanım.....                              | 102          |
| 5.2.2. Süneklik.....                             | 103          |
| 5.2.3. Rijitlik.....                             | 104          |
| 5.2.4. Enerji dönüştürme kapasitesi .....        | 105          |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                        | 107          |
| 6.1. Sonuçlar .....                              | 107          |
| 6.2. Öneriler .....                              | 108          |
| KAYNAKLAR .....                                  | 109          |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                    | 113          |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Deney elemanlarına ait parametreler.....                                                                                                   | 29    |
| Çizelge 3.2. Beton basınç dayanımı sonuçları .....                                                                                                      | 32    |
| Çizelge 3.3. Ø8 donatısı çekme deneyi sonuçları.....                                                                                                    | 32    |
| Çizelge 3.4. Ø16 donatısı çekme deneyi sonuçları.....                                                                                                   | 33    |
| Çizelge 3.5. Ø22 donatısı çekme deneyi sonuçları.....                                                                                                   | 33    |
| Çizelge 3.6. Karbon fiber plaka teknik bilgileri .....                                                                                                  | 33    |
| Çizelge 3.7. Epoksi macunu teknik bilgileri .....                                                                                                       | 35    |
| Çizelge 5.1. 50 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dayanım değerleri ve referans elemana göre göreceli dayanım oranları.....                     | 102   |
| Çizelge 5.2. 100 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dayanım değerleri ve referans elemana göre göreceli dayanım oranları.....                    | 103   |
| Çizelge 5.3. Referans deney elemanlarındaki süneklik oranları.....                                                                                      | 104   |
| Çizelge 5.4. Referans deney elemanlarındaki rijitlik değerleri.....                                                                                     | 104   |
| Çizelge 5.5. 50 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dönüştürülen toplam enerji değerleri ve referans elemana göre göreceli enerji oranları .....  | 105   |
| Çizelge 5.6. 100 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dönüştürülen toplam enerji değerleri ve referans elemana göre göreceli enerji oranları ..... | 105   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                     | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Deney elemanları donatı detayları .....                        | 4     |
| Şekil 2.2. Bindirme bölgesi güçlendirme teknikleri .....                  | 5     |
| Şekil 2.3. Deney sonuçları .....                                          | 6     |
| Şekil 3.1. Deney elemanları kesitleri .....                               | 28    |
| Şekil 3.2. Deney sistemi.....                                             | 46    |
| Şekil 4.1. RS50 deney elemanının donatı detayı .....                      | 50    |
| Şekil 4.2. RS50 deney elemanının genel çatlak haritası .....              | 53    |
| Şekil 4.3. RS50 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....      | 53    |
| Şekil 4.4. RS100 deney elemanının donatı detayı .....                     | 54    |
| Şekil 4.5. RS100 deney elemanının genel çatlak haritası .....             | 57    |
| Şekil 4.6. RS100 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....     | 58    |
| Şekil 4.7. S50/0.75 deney elemanının donatı detayı.....                   | 60    |
| Şekil 4.8. S50/0.75 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....        | 63    |
| Şekil 4.9. S50/0.75 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....  | 63    |
| Şekil 4.10. S50/1.00 deney elemanının donatı detayı.....                  | 64    |
| Şekil 4.11. S50/1.00 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....       | 67    |
| Şekil 4.12. S50/1.00 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği ..... | 68    |
| Şekil 4.13. S50/1.25 deney elemanının donatı detayı.....                  | 69    |
| Şekil 4.14. S50/1.25 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....       | 71    |
| Şekil 4.15. S50/1.25 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği ..... | 72    |
| Şekil 4.16. S50/1.50 deney elemanının donatı detayı.....                  | 73    |
| Şekil 4.17. S50/1.50 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....       | 75    |
| Şekil 4.18. S50/1.50 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği ..... | 76    |

| <b>Şekil</b>                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.19. S100/0.75 deney elemanının donatı detayı.....                                   | 77           |
| Şekil 4.20. S100/0.75 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....                        | 80           |
| Şekil 4.21. S100/0.75 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....                  | 80           |
| Şekil 4.22. S100/1.00 deney elemanının donatı detayı.....                                   | 81           |
| Şekil 4.23. S100/1.00 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....                        | 84           |
| Şekil 4.24. S100/1.00 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....                  | 84           |
| Şekil 4.25. S100/1.25 deney elemanının donatı detayı.....                                   | 85           |
| Şekil 4.26. S100/1.25 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....                        | 88           |
| Şekil 4.27. S100/1.25 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....                  | 88           |
| Şekil 4.28. S100/1.50 deney elemanının donatı detayı.....                                   | 89           |
| Şekil 4.29. S100/1.50 deney elemanının açıklık çatlak haritası .....                        | 92           |
| Şekil 4.30. S100/1.50 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği .....                  | 93           |
| Şekil 5.1. Karbon plaka yapıştırılan 1. grup elemanların yük-yer değiştirme grafikleri..... | 96           |
| Şekil 5.2. Karbon plaka yapıştırılan 2. grup elemanların yük-yer değiştirme grafikleri..... | 97           |
| Şekil 5.3. 1. gruptaki tüm elemanların yük-yer değiştirme grafikleri .....                  | 98           |
| Şekil 5.4. 2. gruptaki tüm elemanların yük-yer değiştirme grafikleri .....                  | 99           |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 3.1. Kalıp yağlama işlemi .....                                                 | 36    |
| Resim 3.2. Kurulumu yapılan deney kirişlerinin kalıpları .....                        | 36    |
| Resim 3.3. Büküm işlemi yapılmış donatılar .....                                      | 37    |
| Resim 3.4. Hazırlanan donatı kafesleri .....                                          | 38    |
| Resim 3.5. Çekme bölgesi için süreksizlik oluşturulan donatılar .....                 | 38    |
| Resim 3.6. Kalıplara yerleştirilen donatı kafesleri .....                             | 39    |
| Resim 3.7. Deney numunelerinin beton döküm işlemleri .....                            | 40    |
| Resim 3.8. Küp numuneler .....                                                        | 40    |
| Resim 3.9. Beton dökümü tamamlanan elemanlar .....                                    | 41    |
| Resim 3.10. Betonun hava koşullarından etkilenmemesi için yalıtım işlemleri .....     | 41    |
| Resim 3.11. Yeterli dayanıma ulaştıktan sonra kalıplarından çıkarılan elemanlar ..... | 42    |
| Resim 3.12. Karbon fiber plakaların yapıştırılacağı yüzeyin taşlanması işlemi .....   | 43    |
| Resim 3.13. Epoksi sürülecek bölgelerin teller ile sınırlandırılması .....            | 43    |
| Resim 3.14. Epoksinin A ve B bileşenlerinin karıştırılması .....                      | 44    |
| Resim 3.15. Hazırlanan epoksinin kiriş alt yüzeyine sürülmesi .....                   | 44    |
| Resim 3.16. Karbon fiber plakaların epoksi harcının üzerine yapıştırılması .....      | 45    |
| Resim 3.17. Yer değiştirme ölçerlerin deney numunesine yerleştirilmiş hali .....      | 47    |
| Resim 4.1. RS50 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali .....            | 50    |
| Resim 4.2. RS50 deney elemanının deney sonrası durumu .....                           | 52    |
| Resim 4.3. RS50 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....                    | 52    |
| Resim 4.4. RS100 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali .....           | 54    |
| Resim 4.5. RS100 deney elemanının deney sonrası durumu .....                          | 56    |
| Resim 4.6. RS100 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....                   | 57    |

| <b>Resim</b>                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.7. S50/0.75 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali .....   | 60           |
| Resim 4.8. S50/0.75 deney elemanının deney sonrası durumu .....                  | 62           |
| Resim 4.9. S50/0.75 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....           | 62           |
| Resim 4.10. S50/1.00 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali .....  | 65           |
| Resim 4.11. S50/1.00 deney elemanının deney sonrası durumu .....                 | 66           |
| Resim 4.12. S50/1.00 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....          | 67           |
| Resim 4.13. S50/1.25 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali .....  | 69           |
| Resim 4.14. S50/1.25 deney elemanının deney sonrası durumu .....                 | 70           |
| Resim 4.15. S50/1.25 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....          | 71           |
| Resim 4.16. S50/1.50 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali .....  | 73           |
| Resim 4.17. S50/1.50 deney elemanının deney sonrası durumu .....                 | 74           |
| Resim 4.18. S50/1.50 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....          | 75           |
| Resim 4.19. S100/0.75 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali ..... | 77           |
| Resim 4.20. S100/0.75 deney elemanının deney sonrası durumu .....                | 79           |
| Resim 4.21. S100/0.75 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....         | 79           |
| Resim 4.22. S100/1.00 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali ..... | 82           |
| Resim 4.23. S100/1.00 deney elemanının deney sonrası durumu .....                | 83           |
| Resim 4.24. S100/1.00 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....         | 83           |
| Resim 4.25. S100/1.25 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali ..... | 86           |
| Resim 4.26. S100/1.25 deney elemanının deney sonrası durumu .....                | 87           |
| Resim 4.27. S100/1.25 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....         | 87           |
| Resim 4.28. S100/1.50 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali ..... | 90           |
| Resim 4.29. S100/1.50 deney elemanının deney sonrası durumu .....                | 91           |
| Resim 4.30. S100/1.50 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu .....         | 92           |

| <b>Resim</b>                                                     | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 5.1. Sıyrılma yapan karbon fiber plaka.....                | 100          |
| Resim 5.2. Deney sonrası karbon fiber plakaların durumları ..... | 101          |
| Resim 5.3. Güçlendirme elemanları ana eğilme çatlakları.....     | 102          |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

|            |                                               |
|------------|-----------------------------------------------|
| $f_{ctd}$  | Beton tasarım eksenel çekme dayanımı          |
| $f_{yd}$   | Boyuna donatı tasarım akma dayanımı           |
| kN         | Kilonewton                                    |
| $l_b$      | Kenetlenme boyu                               |
| $l_{b16}$  | Ø16 donatılardaki ana kenetlenme boyu         |
| $l_{b22}$  | Ø22 donatılardaki ana kenetlenme boyu         |
| m          | Metre                                         |
| mm         | Milimetre                                     |
| MPa        | Megapascal                                    |
| Ø          | Boyuna donatı çapı                            |
| $\delta_u$ | Dayanımın %15 kaybedildiği deformasyon değeri |
| $\delta_y$ | Akma deformasyonu                             |

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

|       |                                                |
|-------|------------------------------------------------|
| BA    | Betonarme                                      |
| CFRP  | Karbon elyaf takviyeli polimer                 |
| FRP   | Elyaf takviyeli polimer                        |
| GFRP  | Cam elyaf takviyeli polimer                    |
| LVDT  | Elektronik yer değiştirme ölçer                |
| RC    | Betonarme                                      |
| TS500 | Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları |

## 1. GİRİŞ

Önemli bir deprem kuşağı üzerinde olan ülkemizde hasar görmüş binaların onarımı veya yetersizliği anlaşılmış binaların güçlendirilmesi sıklıkla gündeme gelebilmektedir. Özellikle eğilme elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde en sık kullanılan malzemelerden biri de karbon plakalardır. Genellikle eğilme kapasitesinin yetersiz olduğu anlaşılan eğilme elemanlarının çekme yüzüne yüksek dayanımlı karbon plakalar (lamalar) yapıştırılarak eğilme elemanının kapasitesi arttırılmaya çalışılır. Bazen de belirli bir bölgede yeterli sayıda sağlanmış olan mevcut boyuna donatıların karbon plakalar ile bindirmeli eki yapılarak eğilme kapasitesi yüksek bölgenin uzatılmasına çalışılır. Bu çalışmada davranışı konusunda ciddi kaygılar bulunan bu tür bindirmeli eklerin davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu nedenle kapsamı sadece karbon plakalar ile mevcut donatıların bindirmeli eklerinin incelenmesi olan bu çalışma ile karbon plakalarla güçlendirilmiş eğilme elemanların davranışını inceleyen çalışmalar karıştırılmamalıdır. Ancak çalışmadan elde edilen sonuçların karbon plakalar ile güçlendirilmiş kirişlerin davranışına doğrudan ışıktutacağı da bilinmelidir.

Eğilme dayanımı yetersiz olan kirişler karbon plakalarla güçlendirilirken kiriş çekme yüzü pürüzlerden arındırıldıktan sonra karbon lamalar çekme yüzüne epoksi ile doğrudan yapıştırılır. Birçok durumda sadece bu işlem ile yetinilir. Ancak bazı durumlarda karbon plakaların uçlardan ayrılmasını önlemek için ankraj gibi ilave önlemler alınır. Ancak bu işlem sırasında mevcut boyuna donatıların kesilmesi yüksek ihtimal dahilindedir. Karbon plakaların yüzeyden ayrılmasını önlemek için sıklıkla başvurulan diğer bir yöntem ise karbon plakaları üstten saracak şekilde kirişin üç yüzüne karbon kumaş yapıştırılmasıdır. Bu yöntem birçok durumda kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde de kullanılmaktadır. Bu çalışma, uygulamada birçok durumda olduğu gibi, karbon plakaların uç ayrılmalarını engellemek için herhangi bir önlem alınmamış karbon plakalar ile boyuna donatıların bindirmeli eklerinin davranışının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Çalışmada temel olarak karbon plakalardan mevcut donatıya aktarılabilecek yükün büyüklüğü ile bu yükün aktarılabilmesi için gerekli olan asgari bindirme boyunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle çalışmada çekme donatısı alanı ile bindirme boyu uzunluğu temel değişken olarak ele alınmıştır.

Bu amaçla 1/1 ölçekli bir dizi deney elemanı hazırlanarak test edilmiştir. Deneyler Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonunda ulaşılan sonuçlar ve öneriler bu tez kapsamında sunulmuştur.

## 2. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. CFRP Malzemelerle Betonarme Kiriş Güçlendirme Yöntemleri

Yapı sisteminde taşıyıcı eleman görevi üstlenen betonarme kirişlerin CFRP malzemelerle güçlendirilmesi veya onarılmasının, güçlendirme ya da onarım yapılmayan elemanlara oranla elemanların dayanımına katkı sağladığı daha önce yapılan araştırmalar ortaya koymuştur [1-33].

CFRP malzemelerin uygulandığı betonarme kirişlerin CFRP malzeme kullanılmayan betonarme kirişlere göre gösterdiği davranışların kıyaslanabilmesi amacıyla oldukça fazla araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda CFRP malzeme uygulanan elemanlardaki değişken parametreler genel olarak aşağıdaki gibi gruplara ayrılabilir.

- CFRP katman sayılarının güçlendirme üzerindeki etkisi [1-4]
- CFRP uygulanan elemanlardaki donatı oranının güçlendirme üzerindeki etkisi [5-6]
- CFRP'ye verilen ön germe kuvvetinin güçlendirme üzerindeki etkisi [7-10]
- CFRP'nin kirişe uygulama metodunun güçlendirme üzerindeki etkisi [11-12]
- CFRP uygulanan elemanlardaki ön hasar seviyesinin güçlendirme üzerindeki etkisi [13, 15-17]
- CFRP uygulanan elemanlardaki CFRP süreklilik ve bindirme durumunun güçlendirme üzerindeki etkisi [20]
- CFRP uygulanan elemanlardaki yükleme tipinin güçlendirme üzerindeki etkisi [21-23]
- CFRP uygulanan elemanlardaki ankraj kullanımının güçlendirme üzerindeki etkisi [24]
- CFRP uygulanan elemanlarda çekme donatısındaki bindirmeli ek durumunun güçlendirme üzerindeki etkisi [27-31]
- CFRP uygulanan elemanlardaki beton basınç dayanımlarının güçlendirme üzerindeki etkisi [32-33]

Geçmişte yapılan araştırmalardaki parametreler bu kadarla sınırlı kalmamaktadır. Burada yer alan parametreler daha önce yapılan araştırmaların genelini oluşturanlar olarak ele alınmıştır. Araştırmadaki çeşitliliğinin fazla olmasının ana nedeni CFRP malzemelerin güçlendirme ve onarım uygulamalarında günümüzde sıkça kullanılmaya başlanmış olması

ve bu malzemenin yapı elemanı üzerindeki etkinliğinin daha net olarak belirlenmesi istegidir.

Geçmiş çalışmaları incelendiğinde betonarme kirişlerin çekme bölgesinde yer alan donatı çeliğinin bindirmeli eke sahip olması durumunda, donatı bindirme bölgesinde CFRP malzeme kullanımının eleman üzerinde ne gibi etkilere sahip olduğunun araştırıldığı görülmüştür [27-31].

Yapılan bu araştırmalardan örnek olarak Makhoul (2019)'un çalışmasında, çekme donatısında bindirmeli eke sahip elemanlarda bindirme bölgesine farklı yöntemlerde FRP malzemelerle güçlendirme yapılmış, çekme donatısında bindirmeli eki olan güçlendirme elemanlarıyla çekme donatısı sürekli olarak devam eden referans eleman arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Çalışmada yer alan referans (bindirmeli eki olmayan) eleman ve bindirmeli eki olan güçlendirme deney elemanlarına ait detaylar Şekil 2.1'de, bindirme bölgesinin FRP malzemeler ile güçlendirme teknikleri Şekil 2.2'de ve deney elemanlarına ait sonuçlar Şekil 2.3'de yer almaktadır [30].

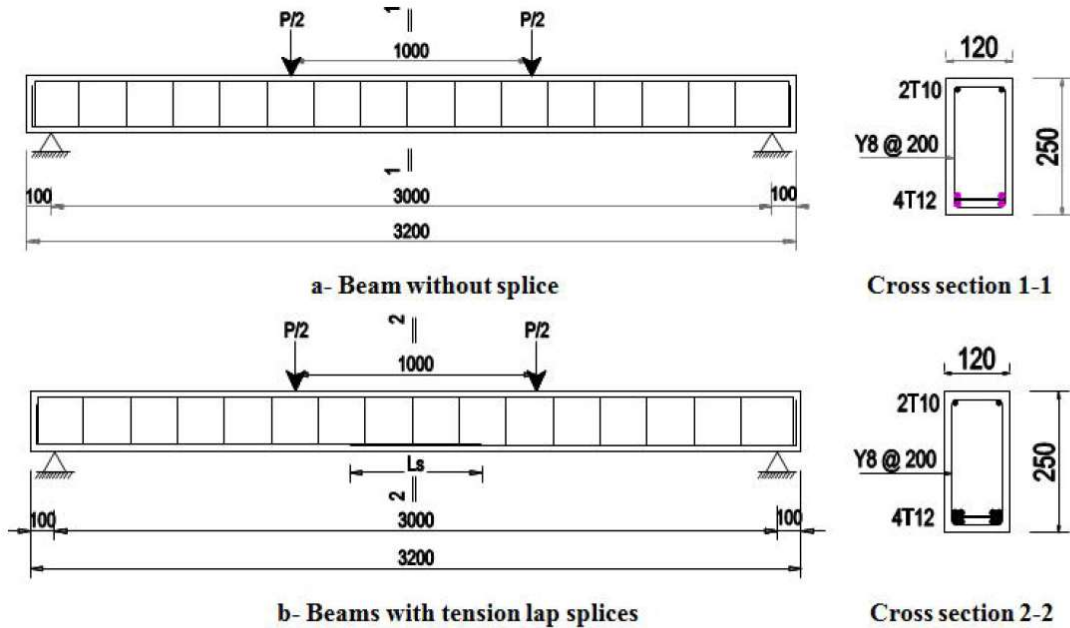
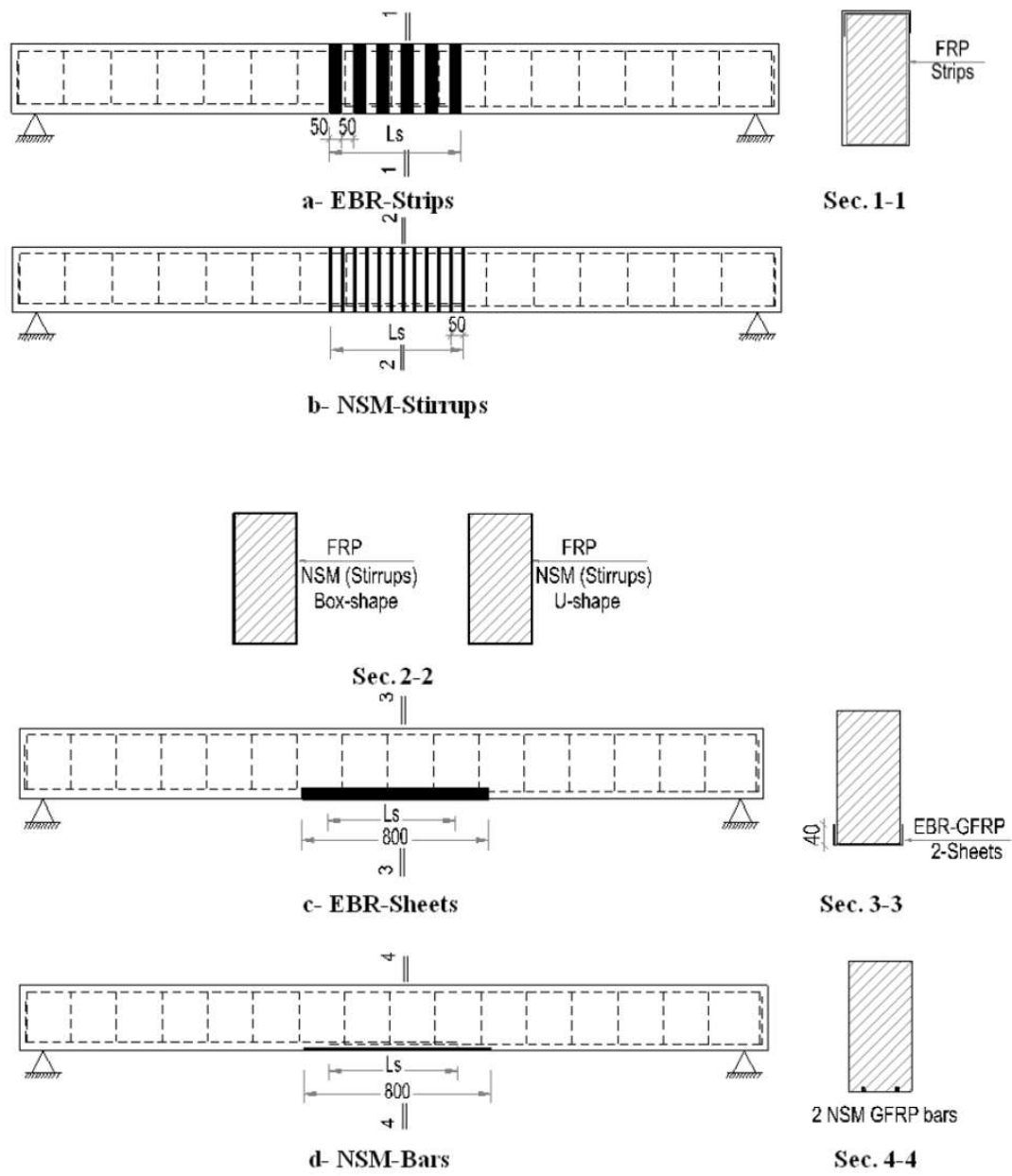


Fig. 1. Longitudinal and cross section details of beam specimens  
(Note: all dimensions in mm)

Şekil 2.1. Deney elemanları donatı detayları [30]



**Fig. 4. Description of different FRP techniques**  
(Note: all dimensions in mm)

Şekil 2.2. Bindirme bölgesi güçlendirme teknikleri [30]

Table 3. Summary of test results

| Beam code | $P_{cr}$ (kN) | $P_u$ (kN) | $\Delta_y$ (mm) | $\Delta_u$ (mm) | $\Delta_{max}$ (mm) | Ductility factor $\mu$ | Steel stress $f_s$ MPa | Bond stress $u_t$ MPa | Bond ratio | Mode of failure                                           |
|-----------|---------------|------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------|-----------------------------------------------------------|
| B0        | 30            | 76         | 21              | 27              | 42                  | 2.00                   | 413                    | NA                    | NA         | Flexure                                                   |
| B0-55     | 24            | 67         | 21              | 24              | 30                  | 1.42                   | 365                    | 1.99                  | 1.00       | Splitting                                                 |
| B0-32     | 22            | 52         | 19              | 20              | 23                  | 1.21                   | 283                    | 1.544                 | 0.78       | Splitting                                                 |
| BG-55-ST1 | 28            | 75         | 20              | 27              | 40                  | 2.00                   | 409.4                  | 2.233                 | 1.12       | Debonding of externally bonded GFRP strips                |
| BG-55-ST2 | 30            | 79         | 20              | 26              | 43                  | 2.15                   | 431.2                  | 2.352                 | 1.18       | Flexure                                                   |
| BG-55-ST3 | 30            | 81         | 20              | 25              | 44                  | 2.20                   | 442.2                  | 2.412                 | 1.21       | Flexure                                                   |
| BC-55-ST2 | 30            | 80         | 20              | 24.3            | 44                  | 2.20                   | 436.7                  | 2.382                 | 1.20       | Flexure                                                   |
| BG1-55-NS | 30            | 72         | 22              | 32              | 42                  | 1.91                   | 393.1                  | 2.144                 | 1.08       | Flexure                                                   |
| BG2-55-NS | 26            | 67.3       | 23              | 35              | 40                  | 1.73                   | 367.4                  | 2.004                 | 1.01       | Debonding of NSM GFRP U-stirrups                          |
| BC-55-NS  | 31            | 73.5       | 22              | 30              | 44                  | 2.00                   | 401.2                  | 2.188                 | 1.10       | Flexure                                                   |
| BG1-55-SH | 25            | 70         | 20              | 22              | 32                  | 1.60                   | 382.1                  | 2.084                 | 1.05       | Debonding of externally bonded GFRP sheet at tension side |
| BG2-55-NR | 24            | 68         | 20              | 23              | 31                  | 1.55                   | 371.2                  | 2.025                 | 1.02       | Splitting                                                 |

Where,  $u_t = f_s d_s / 4l_s$ ,  $P_{cr}$ : 1st. crack load,  $P_u$ : Ultimate load,  $\Delta_y$ : Deflection at yield load,  $\Delta_u$ : Deflection at  $P_u$ ,  $\Delta_{max}$ : Deflection at 80%  $P_u$

### Şekil 2.3. Deney sonuçları [30]

Deney sonuçlarından da görüldüğü üzere çekme donatısında bindirmeli eki olan elemanlarda FRP malzemeler kullanılarak bindirme bölgesine farklı uygulamaların yapıldığı ve bu uygulamaların kiriş elemanlarının dayanımına katkı sağlayarak donatının sürekli olarak devam ettiği referans eleman dayanımına yaklaştırdığı tespit edilmiştir [30].

Ancak donatı çeliğinin herhangi bir nedenle süresiz hale gelmesi ve bindirmeli eki bulunmaması durumunda (sahada yapılan uygulama hatası vb. nedenlerle) CFRP malzemenin kirişin sadece alt yüzeyine uygulanarak donatıdaki bu süresizliği giderip gideremeyeceğinin, CFRP malzemedan donatıya yük aktarımının olup olamayacağının ve CFRP uygulanan elemanın donatının sürekli devam ettiği eleman gibi davranış sergileyip sergilemeyeceğinin belirlenmesi üzerine geçmişte bir çalışma ortaya koyulmadığı gözlenmiştir.

Ayrıca güçlendirme ve onarım çalışmalarının oldukça sıklaştığı günümüzde, donatının herhangi bir nedenle süresiz olduğu, donatının olmadığı veya yetersiz olduğu kiriş elemanlarında geçmişte yapılan bir çalışmaya dayanmadan, CFRP malzemelerin katkısının ne yönde olduğu üzerine bilgi sahibi olmadan, donatı çeliği görevini üstleneceği düşünülerek bilinçsizce kullanılması ve bu uygulama neticesinde güçlendirme yapıldığı kanaatine varılması hususlarının deneysel metotlarla teyit edilmesi isteği mevcut çalışmanın temellerini oluşturmuştur.

Buradan yola çıkarak çekme donatısında süresizliği bulunan betonarme kirişlere CFRP malzemeler uygulanarak CFRP malzemedan donatılara yük aktarımı sağlanıp sağlanamama durumunun daha önce incelenmemiş olması ve saha uygulamalarında da bu

yönde bilinçsizce uygulamaların görülmüş olması mevcut çalışmanın gerekçesini oluşturmıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında çekme donatısında süreksizliği bulunan kiriş elemanlarının alt yüzeyine CFRP malzemeler uygulanmış ve kiriş alt yüzeyindeki CFRP malzemenin çekme donatılarına yük aktarımı olup olmayacağı araştırılmıştır.

## **2.2. Toutanji, Zhao ve Zhang'ın (2006) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere CFRP malzemelerle güçlendirme yapılması ve CFRP malzeme katman sayılarının elemandaki etkilerinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişlere yapıştırılan CFRP malzemelerin katman sayıları deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 1800x160x108 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 8 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 7 tanesi ise CFRP ile güçlendirilmiş elemandır. 7 adet güçlendirme elemanlarından 1 tanesinde 3 katman, 2 tanesinde 4 katman, 2 tanesinde 5 katman, 2 tanesinde 6 katman CFRP malzeme kullanılmıştır. Elemanlardan referans eleman eğilme göçme moduna ulaşmış, 3 ve 4 katmanlı CFRP malzemeli elemanlar CFRP malzemenin kopmasıyla göçme moduna ulaşmış, 5 ve 6 katmanlı CFRP malzemeli elemanlar CFRP malzemenin sıyrılmasıyla göçme moduna ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar CFRP malzeme katmanının artmasıyla yük taşıma kapasitesinin referans elemanın %170,2 kadarına ulaşabildiğini göstermiştir. Ancak güçlendirme elemanlarının süneklik oranlarının referans elemana göre önemli ölçüde düşük olduğu gözlenmiştir [1].

## **2.3. Balamuralikrishnan ve Jeyasehar'ın (2009) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere CFRP malzemelerle güçlendirme yapılması ve CFRP malzeme katman sayılarının elemandaki etkilerinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişlere yapıştırılan CFRP malzemelerin katman sayıları ve yükleme tipi deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 3200x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 10 adet deney elemanının 2 tanesi referans eleman, 8 tanesi CFRP ile güçlendirilmiş elemandır. Referans elemanlarından bir tanesi statik yükleme tipinde yüklenmiş, diğeri tekrarlanır yükleme tipinde yüklenmiştir. 8 adet güçlendirme elemanlarının 4 tanesi tek katman CFRP ile güçlendirilmiş, bu 4 elemanın 2 tanesi statik yükleme tipinde yüklenmiş, 2 tanesi tekrarlanır yükleme tipinde yüklenmiştir. Geriye kalan 4 güçlendirme elemanı ise 2 kat CFRP ile güçlendirilmiş, bu 4

elemanın 2 tanesi statik yükleme tipinde yüklenmiş, 2 tanesi tekrarlanır yükleme tipinde yüklenmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre CFRP malzemelerin betonarme kirişin çekme yüzeyine uygun bir şekilde yapıştırılması durumunda eğilme dayanımını önemli ölçüde artırabileceği tespit edilmiştir. Tek katmanlı CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemana göre %18 ila %20 eğilme dayanımı artışı, 2 katmanlı CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemana göre %40 ila %45 eğilme dayanımı artışı sağladığı gözlenmiştir. Ayrıca güçlendirilmiş elemanların rijitliklerinin artmasından dolayı deformasyonların da önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Referans elemanların maksimum yük seviyesinde, güçlendirilmiş elemanların deformasyon değerleri referans elemanların deformasyon değerlerine oranla %80'e kadar azalış göstermiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında güçlendirme yapılan elemanlarda istenilen sonuçlara ulaşmak için en az 2 kat CFRP malzeme yapıştırılmasının gerektiği tespit edilmiştir [2].

#### **2.4. Acar'ın (2014) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlerin karbon kumaşlar ve çelik levhalarla güçlendirilerek elde edilecek davranış ve dayanımlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Karbon kumaş katman sayısı, çelik levha sayısı ve alanı, betonarme kirişe yapışma yüzeyi ve katmanların sıralaması deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 3200x300x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 11 adet deney elemanının 1 tanesi yalın eleman, 2 tanesi referans eleman ve 8 tanesi güçlendirme elemanıdır. Elde edilen sonuçlarda çelik levhalar ve karbon kumaşların beraber kullanıldığı elemanların yalın elemana göre kıyaslanması neticesinde taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve tokluk modülü değerlerinin değişen oranlarda arttığı gözlenmiştir. Ayrıca karbon kumaşla çelik levhanın birlikte kullanıldığı kompozit elemanların sadece karbon kumaş kullanılan elemanlara göre taşıma gücü ve tokluk modülü açısından daha fazla değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Kompozit malzeme kullanılan elemanlarda betonun yüzeyine yapıştırılan en üst katmanın, deney elemanının davranışını değiştiren en önemli değişken olduğu gözlenmiştir [3].

#### **2.5. Wang ve Diğerleri'nin (2013) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere CFRP ve GFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme ve kesme-eğilme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak güçlendirme için kullanılan malzemenin türü, güçlendirmenin amacı (eğilme, eğilme-kesme), beton basınç dayanımı, kiriş yüksekliği, donatı oranı, CFRP katman sayısı, beton pas payı, elemanda oluşturulan ön çatlakların genişliği, etriye oranı ve kesme açıklığı ele alınmıştır. Deney elemanlarının uzunluğu 1700 mm, genişliği 150 mm, yüksekliği ise deney elemanına göre 250 mm ve 300 mm olarak seçilmiştir. Dikdörtgen kesite sahip toplam 14 adet deney elemanı iki ana gruba ayrılmıştır. İlk gruptaki elemanlar sadece eğilmeye karşı güçlendirmede test edilen elemanlar, ikinci gruptaki elemanlar ise eğilme ve kesmeye karşı güçlendirmede test edilen elemanlardır. İlk gruptaki elemanlardan 1 tanesi referans eleman, 6 tanesi eğilmeye karşı güçlendirme elemanı, ikinci gruptaki elemanlardan 2 tanesi referans eleman, 5 tanesi eğilme ve kesmeye karşı güçlendirme elemanıdır. Eğilmeye karşı güçlendirilen elemanlarda kirişin alt yüzeyine CFRP yapıştırılmış ve uç noktalardan sıyrılmayı önlemek için uç kısımlar CFRP malzeme ile sargılanmıştır. Eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilen elemanlarda ise kirişin alt yüzeyine CFRP yapıştırılmış ve ayrıca kesmeye karşı U tipi ve L tipi olarak kiriş boyunca aralıklarla CFRP ile sargılama yapılmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP ve GFRP ile güçlendirmenin kirişlerin eğilme ve kesme dayanımı kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Yalnızca eğilmeye karşı güçlendirilen elemanlarda referans elemana göre dayanımda %41 ve %125 arasında artış görülmüştür. Eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilen elemanların sadece eğilmeye karşı güçlendirilen elemanlara göre yük taşıma kapasitesi ve rijitlik açısından daha etkili olduğu görülmüştür. Elemana uygulanan CFRP katman sayısındaki artışın elemanın yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkı sağladığı görülmüştür [4].

## **2.6. Hashemi ve Diğerleri'nin (2009) Çalışması**

Bu çalışmada yüksek dayanımlı beton kullanılan betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme dayanımına katkısının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak uygulanan CFRP malzemenin katman sayısı ve kirişlerde kullanılan çekme donatısı oranı ele alınmıştır. 3000x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 6 adet deney elemanının 2 tanesi farklı donatı oranlarına sahip referans eleman, 4 tanesi farklı donatı oranlarına ve farklı CFRP katman sayılarına sahip güçlendirilmiş elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP malzemenin kirişlerin eğilme dayanımına önemli ölçüde katkı sağladığını

göstermiştir. Nihai eğilme dayanımındaki artışın düşük donatı oranına sahip kirişlerde daha fazla olduğu görülmüştür [5].

### 2.7. Aktan ve Diğerleri'nin (2017) Çalışması

Bu çalışmada farklı beton basınç dayanımlarına ve farklı donatı oranlarına sahip betonarme kirişlere farklı uygulamalarda CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak beton basınç dayanımı, donatı oranı ve CFRP malzeme uygulama metodu ele alınmıştır. 1500x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 7 adet deney elemanı iki gruba ayrılmıştır. İlk grupta yer alan 4 adet elemanın 1 tanesi referans eleman, 1 tanesi kirişin sadece alt yüzeyine güçlendirme yapılan, 1 tanesi kirişin alt yüzeyinin tamamında ve yan yüzeylerinde 50 mm'e kadar güçlendirme yapılan, 1 tanesi kirişin alt yüzeyinin tamamında ve yan yüzeylerinde 175 mm'e kadar U şeklinde güçlendirme yapılan elemandır. İkinci grupta yer alan 3 adet elemanın 1 tanesi referans eleman, 1 tanesi kirişin sadece alt yüzeyine güçlendirme yapılan, 1 tanesi kirişin alt yüzeyinin tamamında ve yan yüzeylerinde 50 mm'e kadar güçlendirme yapılan elemandır. İlk grup elemanlardaki ortalama beton basınç dayanımı 25,7 MPa iken, ikinci grup elemanların beton basınç dayanımlarının eski yapıların beton dayanımlarını yansıtmaması adına düşük seçilmiş ve ortalama 6,8 MPa olarak tespit edilmiştir. Deneyde elde edilen sonuçlar beton basınç dayanımı düşük olan numunelerdeki eğilme dayanımı artışının beton basınç dayanımı yüksek olan numunelerdeki eğilme dayanımı artışına göre çok daha az olduğunu göstermiştir. CFRP malzeme etkinliğinin beton basınç dayanımıyla bağlantılı olduğu görülmüştür. Ayrıca kirişin alt yüzeyinin tamamında ve yan yüzeylerde 50 mm'e kadar CFRP uygulama tekniğinin, sadece alt yüzeyin tamamında CFRP uygulama tekniğine göre daha etkili olduğu ve alt yüzeyin tamamında ve yan yüzeylerde 175 mm'e kadar CFRP uygulama tekniğine göre daha ekonomik olduğu görülmüştür [6].

### 2.8. Rashid ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması

Bu çalışmada dikdörtgen ve T kesite sahip betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP plaka yapıştırılarak kirişlerin eğilme kapasitesinin ve CFRP plakaların ön germe kayıplarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzemeye uygulanan ön germe kuvveti ve betonarme kirişlerin kesit ve

boyutları ele alınmıştır. 2800x300x160 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 3 adet deney elemanında CFRP plakaya CFRP plakanın maksimum taşıyacağı yükün %0, %20 ve %40 oranında ön germe kuvvetleri uygulanarak yapıştırılmıştır. 5000 mm uzunluğa, 400 mm flanş genişliğine, 100 mm flanş derinliğine, toplam 400 mm derinliğe ve 160 mm alt yüzey genişliğine sahip 3 adet deney elemanında CFRP plakaya CFRP plakanın maksimum taşıyacağı yükün %0, %20 ve %40 oranında ön germe kuvvetleri uygulanarak yapıştırılmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar ön germe kuvvetinin artmasıyla çatlama, akma ve nihai momentlerin arttığını, nihai momentlerdeki artış oranlarının küçük ölçekli numunelerde büyük ölçekli numunelere göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Büyük ölçekli numunelerin yük-yer değiştirme eğrilerinde CFRP plakaların uç kısımlardan sıyrılmasıyla ani düşüşler olduğu, küçük ölçekli numunelerde bu durumun görünür bir şekilde oluşmadığı görülmüştür. Epoksi yapıştırıcının gerçek ölçekli numunelerde rijitliğe katkı sağladığı ancak küçük ölçekli numunelerde bu durumun gözlenmediği tespit edilmiştir [7].

## **2.9. Deng ve Diğerleri'nin (2019) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP plaka yapıştırılarak kirişlerin eğilme kapasitesinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzemeye uygulanan ön germe kuvveti ele alınmıştır. 2800x275x160 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 6 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 5 tanesi CFRP plakaya %0, %20 ve %40 oranında ön germe kuvvetleri uygulanarak güçlendirilmiş elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP plakaya uygulanan ön germe kuvvetinin artmasıyla CFRP plakayla güçlendirilen kirişlerin çatlama, akma ve nihai yüklerinin arttığını, kirişlerde oluşan deformasyonların ve kirişlerin sünekliliğinin azaldığını göstermiştir [8].

## **2.10. Haghani ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme kapasitesinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzemeye uygulanan ön germe ele alınmıştır. 4500x300x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 3 adet deney

elemanının 1 tanesi referans eleman, 1 tanesi ön germe uygulanmış CFRP malzeme ile güçlendirilmiş eleman, 1 tanesi ön germe uygulanmamış CFRP malzeme ile güçlendirilmiş elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar referans elemanda kirişin basınç bölgesinde betonun ezilmesiyle göçme moduna ulaşıldığını, güçlendirme elemanlarında ise CFRP malzemenin yüzeyden sıyrılma yaparak göçme moduna ulaşıldığını göstermiştir. CFRP ile güçlendirilen elemanlarda yük taşıma kapasitesi ve rijitliğin arttığı gözlenmiştir. CFRP malzemede ön germe uygulamanın elemanın yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırdığı, elemanda oluşan çatlakların genişliğini azalttığı görülmüştür [9].

### **2.11. Zhou ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması**

Bu çalışmada ön germeli CFRP malzeme ve H tipi uç ankrajları kullanılarak hazırlanan betonarme kirişlerin statik ve çarpma yükleri etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak yükleme sistemi, CFRP malzemeye uygulanan ön germe değeri, CFRP malzemenin beton yüzeyine bağlılığı ve ankrajlarda kullanılan germe çubuğunun çapı ele alınmıştır. 3500x500x250 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 7 adet deney elemanının 2 tanesi referans eleman, 5 tanesi CFRP malzemeler ile güçlendirilmiş elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar statik yüklemde yer alan deney numunelerinde CFRP malzemeye verilen öngerme miktarının artmasının elemanın dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ayrıca CFRP malzemeyle güçlendirilen elemanlarda referans elemana göre ilk çatlama yükü ve rijitliğinin arttığı görülmüştür. Dinamik çarpma yüklemesi yapılan elemanlarda referans elemanda oluşan çatlakların CFRP ile güçlendirilen elemanlardaki çatlaklara göre daha belirgin olduğu, referans elemanda açıklıkta oluşan düşey yer değiştirmenin güçlendirilmiş elemanlara göre %10,6 daha fazla olduğu gözlenmiştir. 14 mm çapında germe çubuğu kullanılan deney elemanının 16 mm çapında germe çubuğu kullanılan elemana göre daha etkili olduğu görülmüştür. Uygun germe çubuğu tasarımı ile etkili ve sünek bir eleman davranışı sağlanabileceği değerlendirilmiştir [10].

### **2.12. Al-Shamayleh, Al-Saoud, Abdel-Jaber ve Alqam'ın (2022) Çalışması**

Bu çalışmada farklı beton basınç dayanımlarına sahip betonarme kirişlere farklı türde ve uygulamada CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme ve kesme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak

betonarme kiriş elemanlarının beton basınç dayanımları, araştırılacak davranış türü (eğilme ve kesme), CFRP malzeme türü ve CFRP malzeme uygulama metodu ele alınmıştır. 2000x300x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 24 adet deney elemanının 6 tanesi CFRP ile güçlendirme yapılmayan referans eleman, 18 tanesi ise araştırılacak farklı davranış türüne, farklı beton basınç dayanımlarına, farklı CFRP malzeme türüne ve farklı CFRP uygulama metotlarına sahip güçlendirme elemanıdır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP malzemelerin elemanların kesme ve eğilme dayanımlarını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. CFRP malzemelerin elemana dayanım yönünden etkisinin betonun basınç dayanımıyla ters orantılı olduğu görülmüştür. Eğilmeye karşı güçlendirilen elemanlarda dayanıma en çok katkı sağlayan yöntemin CFRP kumaşla kiriş alt ve yan yüzeylerinin U şeklinde sargılanması yöntemi olduğu görülmüştür. Eğilmeye karşı güçlendirilen elemanlarda CFRP plakanın kiriş alt yüzeyine yapıştırılması yönteminde ise plaka boyunun uzun olan elemanın plaka boyu kısa olan elemana göre dayanıma katkı açısından daha etkili olduğu görülmüştür [11].

### **2.13. Norris, Saadatmanesh ve Ehsani'nin (1997) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere CFRP malzemeler yapıştırılarak güçlendirilen kirişlerdeki eğilme ve kesme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak elemanların güçlendirilme amacı (eğilme veya kesme), kullanılan epoksi türü, kirişe uygulanan CFRP'deki liflerin yönü ve güçlendirilecek kirişlere güçlendirme öncesinde çatlama dayanımından fazla yük uygulanıp uygulanmaması durumu ele alınmıştır. 19 adet deney elemanının 13 tanesi eğilme davranışı, 6 tanesi kesme davranışı incelenmesi amacıyla üretilmiştir. 2440x203x127 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 13 adet eğilme deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 12 tanesi yukarıda sayılan farklı değişkenlerin uygulandığı elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar kirişlerin çekme bölgesine ve yan yüzeylerine uygulanan CFRP malzemenin kirişin dayanımı ve rijitliğinde artış sağladığını göstermiştir. Dayanımdaki, rijitlikteki artışın büyüklüğü ve elemanlarda oluşan göçme modunun CFRP'deki liflerin yönüyle ilişkili olduğu görülmüştür. CFRP liflerinin kiriş elemanındaki çatlaklara dik olarak yerleştirilmesi durumunda rijitlik ve dayanımda önemli artışın sağlandığı, çatlaklara eğik olarak yerleştirilmesi durumunda ise rijitlik ve dayanımda az bir artışın sağlandığı tespit edilmiştir [12].

#### 2.14. Erkan, Aksoylu, Alshlash ve Arslan'ın (2019) Çalışması

Bu çalışmada eğilme kirişlerinin farklı ön hasarlı yüklemeleri sonucunda CFRP malzeme ile onarım ve güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kirişlerde oluşturulan farklı ön hasar yüklemeleri deney değişkeni olarak ele alınmıştır. 2500x125x250 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 4 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman 3 tanesi güçlendirme elemanıdır. Referans kiriş göçme yüküne kadar test edilmiştir. Güçlendirme yapılacak kirişlerin güçlendirme yapılmadan önce sırasıyla %1, %2 ve %3 yer değiştirme hasar seviyelerine kadar test edilmiştir. Sonrasında CFRP malzeme ile güçlendirmesi yapılarak teste devam edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda ön hasar seviyesi %1, %2 ve %3 olan deney elemanlarının CFRP ile güçlendirilmesi neticesinde referans deney elemanına göre sırasıyla %20, %0 (deney hatası) ve %23 değerinde kapasite artışı olduğu gözlenmiştir. %1 ve %2 ön hasar seviyesi olan elemanlarda referans elemana göre süneklik gözlenmemişken, %3 ön hasar seviyeli elemanda süneklik kat sayısı 2,75 olarak hesaplanmıştır. Enerji dönüştürme kapasiteleri incelendiğinde ön hasarlı elemanların referans elemanın enerji dönüştürme kapasitesine ulaşamadığı tespit edilmiştir. Başlangıç rijitlik değerleri incelendiğinde ise ön hasar seviyeleri %1, %2 ve %3 olan elemanların referans elemana göre başlangıç rijitlik değerlerinin sırasıyla 1,64 kat, 0 kat (deney hatası) ve 0,65 kat olduğu tespit edilmiştir [13].

#### 2.15. Grace, Sayed, Soliman ve Saleh'in (1999) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlere farklı uygulama türlerinde CFRP ve GFRP malzemelerle eğilme ve kesmeye karşı güçlendirme yapılarak kiriş elemanlarının davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak güçlendirme için kullanılan malzemenin türü (CFRP kumaş, GFRP kumaş ve CFRP plaka), malzeme katman sayısı, güçlendirme yöntemi, kullanılan epoksi malzemesi ele alınmıştır. 2743x292x152 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 14 adet deney elemanın 1 tanesi güçlendirme yapılmayan referans eleman, 13 tanesi güçlendirme tekniklerine göre 5 gruba ayrılan güçlendirme elemanıdır. Deney elemanları çatlama yüküne kadar yüklendikten sonra güçlendirme işlemleri yapılmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar FRP malzemelerin elemanlarda oluşan yer değiştirmeleri azalttığını ve yük taşıma kapasitelerini artırdığını göstermiştir. Elemanların nihai yük taşıma kapasitesinin uygun

epoksi malzemesinin kullanılması ve uygun düşey-yatay FRP kombinasyonu ile 2 katına çıkabileceği belirtilmiştir. CFRP plakaların kirişin hem alt yüzeyinde hem de yan yüzeylerinde birlikte kullanımının, sadece alt yüzeyde kullanımına göre daha etkili olduğu görülmüştür. FRP ile güçlendirilen bütün elemanların gevrek bir davranış sergilediği bu nedenle tasarımda güvenlik faktörünün yüksek tutulması önerilmiştir [14].

#### **2.16. Jiang, Fang ve Diğerleri'nin (2020) Çalışması**

Bu çalışmada farklı ön hasar seviyelerine sahip betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme kapasitesinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak betonarme kirişlere uygulanan ön hasar seviyesi, CFRP malzeme katman sayısı ve kirişteki çekme donatısı oranı ele alınmıştır. 2100x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 10 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 9 tanesi CFRP malzemeler ile güçlendirilmiş elemandır. İlk olarak referans eleman test edilmiştir. Farklı donatı oranları ve CFRP katman sayılarına sahip kirişlerde ön hasar parametresi olarak 0,4 ve 0,8 kat sayıları kullanılmıştır. Güçlendirme elemanları, ön hasar parametreleri olarak belirlenen sayıların referans elemanın akma dayanımı ile çarpılması sonucunda elde edilen yük değerlerine kadar yüklenerek ön hasar verilmiştir. Daha sonrasında CFRP malzemeler ile güçlendirme işlemleri yapılmış ve teste devam edilmiştir. Deneyde elde edilen sonuçlar ön hasarlı elemanlarda CFRP malzemenin kopması ve sıyrılması şeklinde 2 tip göçme moduna ulaşıldığını göstermiştir. Güçlendirme yapılan elemanlarda CFRP malzemenin katman sayısının veya donatı oranının artmasıyla kirişlerin eğilme kapasitesi artarken, ön hasar seviyesinin artmasıyla kirişlerin eğilme kapasitesinde azalış görülmüştür [15].

#### **2.17. Fayyadh ve Razak'ın (2012) Çalışması**

Bu çalışmada farklı ön hasar seviyelerine sahip betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme rijitliğinin iyileştirilmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak kiriş elemanlarına verilen ön hasar yükleri ele alınmıştır. 2200x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 4 adet deney elemanının 1 tanesi CFRP ile güçlendirilmemiş referans eleman, 3 tanesi sırasıyla tasarım yükü, akma yükü ve nihai yük kadar yüklenerek ön hasar verilen ve CFRP ile güçlendirilen elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP ile güçlendirilen

elemanların referans elemana göre rijitliğinin arttığını göstermiştir. Ayrıca CFRP plakalarda sıyrılma meydana gelen elemanların tekrardan güçlendirilebileceği, tekrardan güçlendirilen elemanların rijitliğinin sıyrılma anındaki rijitlikten fazla olacağı da tespit edilmiştir. CFRP ile güçlendirmenin elemanın yük taşıma kapasitesini de artırdığı görülmüştür [16].

### **2.18. Yong-Chang ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması**

Bu çalışmada farklı ön hasar seviyelerine sahip betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak kiriş elemanlarına verilen ön hasar seviyeleri, kesme açıklığının kiriş derinliğine oranı ve CFRP malzemenin kalınlığı ele alınmıştır. 2200x200x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 25 adet deney elemanı bahsedilen deney değişkenlerinin uygulandığı elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP malzemenin ön hasarlı kirişlerde eğilme yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Kirişlere verilen ön hasar seviyesinin CFRP ile güçlendirilen kirişlerin rijitliğinde, akma ve nihai yüklerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Ayrıca kesme açıklığının kiriş derinliğine oranının CFRP ile güçlendirilen kirişlerdeki göçme modu ve yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Kesme açıklığının kiriş derinliğine oranı azaldıkça kirişlerdeki göçme modunun CFRP malzemenin uç kısımlardan sıyrılmasından CFRP malzemenin beton örtüsüyle birlikte ayrılmasına dönüştüğü görülmüştür. Sıyrılma davranışı görülen elemanlarda daha fazla CFRP kullanımının yük taşıma kapasitesi ve eğilme rijitliğini artırabileceği ancak CFRP malzemenin beton örtüsüyle birlikte ayrıldığı elemanlarda bu durumun olmayacağı değerlendirilmiştir. CFRP malzeme kalınlığının güçlendirilen elemanların sünekliğini azaltacağı da ifade edilmiştir [17].

### **2.19. Tarigan, Patra ve Sitorus'un (2018) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere CFRP malzemeler, GFRP malzemeler ve çelik plakalarla güçlendirmelerin etkilerinin araştırılması üzerine deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Güçlendirmede kullanılan malzemeler deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 3200x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 4 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 1 tanesi CFRP ile güçlendirilmiş eleman, 1 tanesi

GFRP ile güçlendirilmiş eleman, 1 tanesi ise çelik plakalarla güçlendirilmiş elemandır. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre CFRP kullanılan elemanlarda referans elemana göre 1,44 kat, GFRP kullanılan elemanlarda referans elemana göre 1,33 kat, çelik plaka kullanılan elemanlarda referans elemana göre 1,16 kat daha fazla dayanım elde edilmiştir. CFRP malzemelerin GFRP malzemeler ve çelik plakalara göre güçlendirme açısından daha etkili olduğu gözlenmiştir [18].

## **2.20. Ercan, Arısoy ve Çiftçioğlu'nun (2018) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere CFRP malzemelerle ve çelik plakalarla güçlendirmelerin etkilerinin araştırılması üzerine deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Güçlendirmede kullanılan malzemeler deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 1500x150x250 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 7 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 3 tanesi ise CFRP ile güçlendirilmiş eleman, 3 tanesi ise çelik plakalarla güçlendirilmiş elemandır. Elemanlardan referans eleman eğilme göçme moduna ulaşmış, güçlendirme elemanları genel olarak kesme göçme moduna ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar güçlendirme elemanlarının eğilme momenti kapasitesi ve eğilme dayanımının artış gösterdiğini ancak kesme göçme moduna ulaştığını göstermiştir. Eğilme güçlendirmesiyle birlikte uygun kesme güçlendirmesi yapılması halinde elemanların daha fazla yük taşıma kapasitesine ulaşabileceği tespit edilmiştir. CFRP ile güçlendirilen elemanların eğilme dayanımı ve eğilme performansı açısından daha iyi davranış gösterdiği gözlenmiştir [19].

## **2.21. Elwan, Elsayed, Refaat ve Lotfy'nin (2017) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere yapıştırılan ve kiriş çekme bölgesinde sürekli olan CFRP plakaların, kiriş orta noktasında süreksiz olan CFRP plakaların ve kiriş çekme bölgesinde bindirme yapılarak devam eden CFRP plakaların eleman üzerindeki etkilerinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişlere yapıştırılan CFRP plakaların süreklilik durumu ile CFRP plakaların bindirme boyları deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 2100x400x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 7 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 6 tanesi CFRP plakalar ile güçlendirilmiş elemandır. Referans deney elemanına herhangi bir CFRP yapıştırma işlemi

uygulanmamıştır. Güçlendirme elemanlarından bir tanesinde CFRP plaka açıklık boyunca sürekli olacak şekilde, bir tanesinde kirişin tam orta noktasında süreksiz olacak şekilde, diğer 4 tanesinde kirişin tam orta noktasında süreksiz olacak ve üzerlerine 300, 450, 600 ve 900 mm bindirme boyu olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre sürekli devam eden CFRP plakalı deney elemanı ve CFRP plaka ile bindirmeli ek yapılan deney elemanları referans elemana göre kıyaslandığında ilk çatlama yükünde ve maksimum dayanım yükünde önemli artışlar göstermiştir. CFRP plaka ile güçlendirilmiş deney elemanları ilk çatlama yükü ve maksimum yükte sırasıyla ortalama %22,6 ve %40,5 artış göstermiştir. Kiriş ortasında süreksizlik olan deney elemanı ile referans deney elemanı ilk çatlama yüküne yaklaşık aynı yükte ulaşmıştır. CFRP plaka ile bindirmeli ek yapılan deney elemanları, CFRP plakanın sürekli devam ettiği deney elemanları ile yaklaşık aynı dayanım değerlerine sahip olmuştur. Ancak CFRP plakanın kirişin orta noktasında süreksiz olduğu deney elemanı, sürekli elemana göre aynı değerlere ulaşamamıştır. Referans eleman ile CFRP plakanın orta noktada süreksiz olduğu deney elemanı eğilme göçme moduna ulaşırken, plakanın sürekli olduğu ve bindirmeli ek olan diğer deney elemanları CFRP plakanın sıyrılması sonucu göçme moduna ulaşmıştır [20].

## **2.22. Al-Khafaji, Salim ve El-Sisi'nin (2021) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlere uygulanan uzun süreli ve kısa süreli yüklerin, CFRP malzeme ile güçlendirilen kiriş elemanlarına etkisinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak kiriş elemanlarında kullanılan boyuna çelik donatısı oranı, CFRP malzeme uygulama metodu ve uygulanan yüklerin süresi ele alınmıştır. 1219,2x203,2x101,6 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 12 adet deney elemanının 2 tanesi referans eleman, 10 tanesi farklı yük uygulama sürelerine, farklı donatı oranlarına ve farklı CFRP uygulama tekniklerine sahip güçlendirilmiş elemandır. Uzun süreli yüklere maruz kalacak 5 adet deney elemanı, kirişin statik kapasitesinin %60 civarında yüklemeye maruz bırakılmış ve 332 günün sonunda değerlendirilmiştir. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP ile güçlendirilmiş kiriş elemanlarında çelik donatısı olmasının önemli olduğunu göstermiştir. Çelik donatısına sahip olmayan CFRP ile güçlendirilmiş kiriş elemanının 44 günlük sürekli yük etkisinde göçmeye ulaştığı gözlenmiştir. CFRP malzeme kullanımının kirişlerin statik kapasitesinin artırmada etkili olduğu gözlenmiştir. Çekme bölgesinde boyuna yapıştırmanın yanında

ayrıca U şeklinde CFRP malzeme sargılamasının kiriş dayanımını geliştirdiğini ancak göçme modunun yine gevrek bir şekilde oluştuğu tespit edilmiştir [21].

### 2.23. El-Sayed ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin kısa süreli ve uzun süreli yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak kiriş elemanlarına uygulanan yükün süresi ve uzun süreli yüke maruz kalacak elemanlarda yükün miktarı ele alınmıştır. 5300x250x500 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 5 adet deney elemanı iki ana gruba ayrılmış olup, ilk grupta kısa süreli statik yüklemeye maruz kalacak 2 eleman, ikinci grupta 600 gün boyunca sabit yüke maruz bırakılacak 3 eleman bulunmaktadır. İlk grup elemanlarından biri CFRP ile güçlendirilen diğeri CFRP kullanılmayan eleman, ikinci grup elemanlarından iki tanesi CFRP ile güçlendirilen bir tanesi CFRP ile güçlendirilmeyen elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP plakaların kirişlerdeki ani deformasyonları ve çatlak genişliklerini önemli ölçüde azalttığını ancak uzun dönemli deformasyonlar ve çatlak genişliklerini azaltmada bu şekilde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. 600 gün boyunca uygulanan sabit yük seviyesindeki artışın CFRP ile güçlendirilen elemanlarda hem ani olarak gelişen, hem de uzun dönemli gelişen deformasyonları artırdığını göstermiştir [22].

### 2.24. Zhang ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine CFRP malzemeler yapıştırılarak dinamik çarpma yükü etkisi altında kirişlerin eğilme kapasitesinin ve dinamik davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzemenin uzunluğu, genişliği, katman sayısı ve dinamik çarpma yükü uygulayacak çekicinin düşme yüksekliği ele alınmıştır. 2000x300x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 8 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 7 tanesi farklı CFRP uzunluğu, genişliği, katman sayısı ve farklı düşme yüksekliğine sahip güçlendirilmiş elemandır. Deneyde yüksek çözünürlüklü kamera kullanılarak elemanlardaki çatlakların çarpma yükü etkisiyle gelişimi izlenmiştir. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP malzemelerin kirişlerde oluşan çatlak genişliklerini ve düşey yer değiştirmeyi azalttığını, kirişlerin çarpma yüküne karşı eğilme dayanımlarını artırdığını

göstermiştir. Daha uzun, geniş ve fazla katman CFRP kullanmanın eğilme dayanımını artırma açısından etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca CFRP kullanmanın çarpma yükünü sönümleme ve elemanda oluşan çatlakları azaltma açısından etkili olduğu gözlenmiştir [23].

### **2.25. Abdalla ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine yapıştırılan CFRP malzemelere uygulanan CFRP mekanik ankraj tekniğinin kiriş elemanları üzerindeki etkisinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzeme türü ve kullanılan ankraj ele alınmıştır. Çalışmada 16 eleman üretilmiş ancak 5 elemanın sonuçlarına yer verilmiştir. 1840x240x120 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 5 adet deney elemanının 1 tanesi CFRP ile güçlendirilmemiş referans eleman, 2 tanesi CFRP malzemeye güçlendirilmiş ancak ankrajı olmayan, 2 tanesi CFRP malzemeye güçlendirilmiş ve ankrajı olan elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar ankrajlı elemanların ankrajsız elemanlara göre daha fazla yük taşıma kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir. Referans eleman en yüksek süneklik değerine sahipken ankrajlı güçlendirilmiş elemanların süneklik değerlerinin en düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca ankrajların elemanın eğilme rijitliğine önemli bir katkı sağlamadığı görülmüştür [24].

### **2.26. Kurtipek'in (2007) Çalışması**

Bu çalışmada beton ile CFRP şeritler arasındaki kayma gerilmesi dağılımının incelenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. CFRP şeritlerin genişliği, CFRP şeritlerin etkili yapıştırma uzunluğu ve beton basınç dayanımı deney değişkenleri olarak ele alınmıştır. 1300x200x150 mm boyutlarında toplamda 16 adet kiriş deney elemanı üretilmiştir. Bu kiriş elemanlarının alt çekme bölgelerine farklı uzunluklarda ve farklı genişliklerde CFRP malzemeler yapıştırılarak deney elemanlarının davranışları gözlenmiştir. Deney sonucunda ele alınan değişkenlerden olan CFRP şerit genişliğinin, beton basınç dayanımı ve CFRP yapıştırma boyu değişkenlerine göre göçme yükünün artmasında çok daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanlarındaki etkili CFRP yapıştırma boyunun, beton basınç dayanımı 15 MPa olan deney elemanlarından %23 daha fazla çıktığı görülmüştür. Bu sonuç beton basınç dayanımını yüksek tutmanın yapıştırılan CFRP şeridinin etkili uzunluğunu

artırdığını göstermiştir. CFRP şerit genişliğinin artması, CFRP şeridinin etkili uzunluğunun artmasını sağladığını da göstermiştir. Deney sonucuna göre 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerinin, 50 mm genişliğindeki şeritlerden %17 daha etkili boya sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca deney sonucunda elde edilen göçme yüklerinin, analitik yöntemle el edilen değerlerden yaklaşık %10 fazla çıktığı görülmüştür [25].

### **2.27. Al-Fakih ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması**

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine yapıştırılan CFRP plakaların deniz kumu kullanılan kirişler üzerindeki çatlak davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak güçlendirme elemanlarında ince agrega olarak kullanılan normal kum ve deniz kumu ele alınmıştır. 1600x150x100 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 3 adet deney elemanının 1 tanesi referans eleman, 2 tanesi CFRP plakalar ile güçlendirilmiş elemandır. Referans deney elemanına CFRP plaka ile herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Güçlendirme elemanlarında kirişin açıklık bölgesinde 1400 mm uzunluğunda CFRP plaka yapıştırılmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP plakanın, normal kum kullanılan güçlendirme elemanında referans elemana göre dayanımda artışa neden olduğunu göstermiştir. Deniz kumu kullanılan güçlendirme elemanında ise dayanımda az bir artış gözlenmiştir. Çatlak sayıları incelendiğinde normal kum kullanılan güçlendirme elemanındaki çatlak sayılarının diğer elemanlara göre az olduğu görülmüştür. CFRP plaka kullanılan elemanların referans elemana göre daha rijit olduğu görülmüştür. CFRP plaka kullanılan elemanların uçtan sıyrılma yaparak göçme moduna ulaştığı, referans elemanın ise açıklık bölgesinde betonun ezilmesiyle göçme moduna ulaştığı gözlenmiştir. Aynı zamanda betonarme kirişlerde CFRP plaka kullanmanın kirişin çatlak performansını geliştirebildiği değerlendirilmiştir [26].

### **2.28. Garcia ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması**

Bu çalışmada çekme donatısında yetersiz bindirme boyuna sahip betonarme kirişlerde donatı bindirme bölgesine farklı güçlendirme teknikleri uygulanarak donatıların bindirilmesiyle sağlanan dayanımın iyileştirilmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak, donatı çapı, pas payı, bindirme bölgesinde kullanılan etriye, CFRP ve CFRP katman sayısı ele alınmıştır. 2500x250x150 mm

boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 12 adet deney elemanı pas payına göre üç gruba ayrılmıştır. Her grupta 1 adet güçlendirme yapılmayan referans eleman, 1 adet bindirme bölgesinde etriye kullanılan eleman, bir tanesi tek katmanlı bir tanesi iki katmanlı olmak üzere 2 adet CFRP ile güçlendirilmiş eleman bulunmaktadır. Deneyde elde edilen sonuçlar referans kirişlerin bindirme bölgesinde gevrek bir davranış meydana geldiğini göstermiştir. Bindirme bölgesinde etriye kullanılarak güçlendirilen elemanların dayanım artışının referans elemana göre az olduğu gözlenmiştir. Bindirme bölgesinde CFRP kullanılarak güçlendirilen elemanların referans elemana göre dayanımda önemli artış gösterdiği görülmüştür [27].

## **2.29. Mousavi ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması**

Bu çalışmada çekme donatısında yetersiz bindirme boyuna sahip betonarme kirişlerde donatı bindirme bölgesine farklı güçlendirme teknikleri uygulanarak donatıların bindirilmesiyle sağlanan dayanımın iyileştirilmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak pas payı ve güçlendirmedeki GFRP çubuk uzunluğu ile bindirme bölgesinde CFRP kumaş kullanımı ele alınmıştır. 2300x200x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 8 adet deney elemanı pas payına göre iki gruba ayrılmıştır. Her grupta 1 adet güçlendirme yapılmayan referans eleman, güçlendirme için çekme bölgesinde 800 mm GFRP çubuk kullanılan eleman, çekme bölgesinde 800 mm GFRP çubukla beraber bindirme bölgesinde CFRP kumaş kullanılan eleman ve çekme bölgesinde 1300 mm GFRP çubuk kullanılan eleman bulunmaktadır. Güçlendirme elemanlarında GFRP çubukların hepsinin uç kısmı 100 mm CFRP kumaşla sargılanmış, ekstra CFRP kullanılan güçlendirme elemanında ise 200 mm'lik donatı bindirme bölgesinin sağ ve sol uçları 50 mm'lik CFRP kumaşla sargılanmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar çekme bölgesinin GFRP çubuklar ile güçlendirilmesinin referans elemana göre yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme, süneklik ve enerji tüketim kapasitesi açısından katkı sağladığını göstermiştir. Donatı bindirme bölgesindeki ekstra CFRP kumaş sargılamasının yük taşıma kapasitesine katkısının az olduğu ancak süneklik ve enerji tüketim kapasitesine katkısının kayda değer olduğu görülmüştür [28].

### 2.30. Shihata'nın (2011) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesindeki bindirmeli ek yapılan donatıda oluşan korozyonun CFRP malzeme ile güçlendirme yapılarak kiriş elemanlarının davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak pas payının donatı çapına oranı, donatıdaki korozyon oranı ve CFRP ile güçlendirme durumu ele alınmıştır. 2000x300x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 18 adet deney elemanı pas payının donatı çapına oranına göre üç gruba ayrılmıştır. Her grupta %0, %2,5 ve %5 oranında korozyona sahip CFRP ile güçlendirilmemiş 3 tane, CFRP ile güçlendirilmiş 3 tane olmak üzere toplam 6 eleman bulunmaktadır. Çekme donatılarında kirişin orta noktasında 300 mm olacak şekilde bindirmeli ek yapılmıştır. Güçlendirilen elemanlar ise kirişin ortasında simetrik olacak şekilde 600 mm olarak CFRP ile sargılanmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP ile güçlendirme yapılan bütün elemanlarda güçlendirme yapılmayan elemanlara göre dayanım açısından önemli artışlar tespit edildiğini göstermiştir. Donatı bindirme bölgesindeki CFRP uygulamasının eleman üzerinde güçlendirme açısından etkili olduğu görülmüştür [29].

### 2.31. Makhlouf'un (2019) Çalışması

Bu çalışmada çekme donatısında bindirmeli eki bulunan betonarme kirişlerin bindirme bölgesine farklı tekniklerle FRP güçlendirmesi yapılarak kiriş elemanlarının eğilme performanslarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak bindirmeli ekin uzunluğu, FRP türü (CFRP veya GFRP) ve bindirme bölgesindeki güçlendirme tekniği ele alınmıştır. 3200x250x120 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 12 adet deney elemanı dört gruba ayrılmıştır. İlk grupta yer alan 3 adet eleman, güçlendirme yapılmayan ve donatıdaki bindirme boyları 0, 320 ve 550 mm olan elemanlardır. İkinci grupta yer alan 4 adet eleman, donatı bindirme bölgesinin 50 mm aralıklarla 50 mm genişliğindeki 2 katmanlı CFRP ve 1, 2 ve 3 katmanlı GFRP şeritlerle sargılandığı elemandır. Üçüncü grupta yer alan 3 adet eleman, donatı bindirme bölgesinin 50 mm aralıklarla CFRP ve GFRP etriyelerle U şeklinde ve kutu şeklinde sargılandığı elemandır. Dördüncü grupta yer alan 2 adet eleman, donatı bindirme bölgesinin U şeklinde 2 katlı GFRP kumaş ile güçlendirildiği ve donatı bindirme bölgesinin 2 adet GFRP çubukla güçlendirildiği elemandır. Deneyde elde edilen sonuçlar donatı bindirme bölgesinde FRP malzemelerle yapılan sargılamaların elemanın daha sünek

davranmasına katkı sağladığını göstermiştir. Bu tekniklerin ayrıca elemanın yer değiştirme yapma davranışını olumlu yönde etkilediği ve donatılardaki kenetlenme dayanımına da katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca üçüncü gruptaki uygulamaların uygulama kolaylığı, uygulamadan sonra düz yüzey elde etme durumu, düşük maliyet açısından ve elemanın rijitliğini, sünekliğini, eğilme dayanımını iyileştirme açısından öne çıkan yöntem olduğu görülmüştür [30].

### **2.32. Harajli'nin (2006) Çalışması**

Bu çalışmada çekme donatısında yetersiz bindirmeli eki bulunan betonarme kirişlerin bindirme bölgesine farklı tekniklerle güçlendirmeler yapılarak kiriş elemanlarının davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak donatı çapı, pas payının donatı çapına oranı ve farklı güçlendirme teknikleri ele alınmıştır. 1200x200x200 mm boyutlarında kare kesite sahip toplam 14 adet deney elemanı donatı çapı ve pas payının donatı çapına oranına göre iki gruba ayrılmıştır. Bütün deney elemanlarında donatıdaki bindirmeli ek uzunluğu, kullanılan çekme donatısı çapının 5 katı olacak şekilde belirlenmiştir. Her iki gruptaki elemanlarda 1'er adet referans eleman ve CFRP ile sargılama, çelik donatıyla güçlendirme tekniklerine sahip diğer güçlendirme elemanları bulunmaktadır. Bütün deney elemanları tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Deneyde elde edilen sonuçlar güçlendirme yapılmayan referans elemanlarda donatıdaki yetersiz bindirme nedeniyle tekrarlanır yükleme altında dayanım kayıplarının hemen oluştuğunu göstermiştir. Bindirme bölgesinin CFRP ile sargılama yapılarak güçlendirilmesinin donatıdaki bindirmeli ek dayanımının artmasına ve dolayısıyla elemanın yük taşıma kapasitesinin artışına katkı sağladığı görülmüştür [31].

### **2.33. Hamad, Rteil, Salwan ve Soudki'nin (2004) Çalışması**

Bu çalışmada çekme donatısında bindirmeli eki bulunan normal basınç dayanımına sahip betonarme kirişlerin bindirme bölgesine 3 farklı yöntemde CFRP malzeme yapıştırılarak kiriş elemanları davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzemenin uygulanma yöntemi ve uygulanan CFRP malzemenin katman sayısı ele alınmıştır. Deney elemanlarının çekme donatılarında 305 mm bindirmeli ek yapılmıştır. 2000x305x240 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 7 adet deney elemanının 1 tanesi CFRP ile

güçlendirilmemiş referans eleman, 6 tanesi CFRP ile güçlendirilmiş elemandır. Güçlendirme yapılan 6 adet deney elemanı CFRP malzemenin katman sayısına göre (1 katmanlı ve 2 katmanlı) iki gruba ayrılmıştır. Güçlendirme yöntemi olarak ilk yöntemde kiriş elemanları, 76 mm genişliğindeki CFRP malzeme kullanılarak kirişin bindirme bölgesinde tam ortada kirişin alt yüzeyini ve yan yüzeylerini kapsayacak şekilde (U yöntemiyle) sargılanmıştır. İkinci güçlendirme yönteminde kiriş elemanları, 2 adet 76 mm genişliğindeki CFRP malzeme kullanılarak kirişin bindirme bölgesinde U yöntemiyle sargılanmıştır. Üçüncü güçlendirme yönteminde kiriş elemanları, bindirme bölgesi boyunca sürekli olan CFRP malzeme kullanılarak kirişin bindirme bölgesinde U yöntemiyle sargılanmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP ile güçlendirilmeyen referans elemanın çekme donatılarının bulunduğu bölgede çatlaklar oluşmaya başladıktan hemen sonra göçmeye ulaştığını göstermiştir. CFRP ile güçlendirme yöntemiyle kiriş donatılarındaki bindirmeli ek dayanımının arttığı görülmüştür. Ayrıca CFRP kullanılan elemanlardaki göçme modunun referans elemana göre daha sünek olduğu görülmüştür. Ayrıca bindirme bölgesine uygulanan CFRP malzeme miktarının artmasıyla bindirmeli ek dayanımının daha da arttığı görülmüştür [32].

### **2.34. Hamad, Soudki, Harajli ve Rteil'in (2004) Çalışması**

Bu çalışmada çekme donatısında bindirmeli eki bulunan yüksek basınç dayanımına sahip betonarme kirişlerin bindirme bölgesine 3 farklı yöntemde CFRP ve GFRP malzeme yapıştırılarak kiriş elemanları davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni olarak CFRP malzemenin uygulanma yöntemi ve uygulanan CFRP malzemenin katman sayısı ele alınmıştır. Deney elemanlarının çekme donatılarında 305 mm bindirmeli ek yapılmıştır. 2000x305x240 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 10 adet deney elemanının 1 tanesi güçlendirilmemiş referans eleman, 9 tanesi CFRP ve GFRP malzemelerle farklı güçlendirme teknikleri ve farklı CFRP-GFRP katman sayıları ile güçlendirilmiş elemandır. CFRP ve GFRP ile güçlendirme tekniğinde bindirme bölgesi CFRP veya GFRP tek şeritle, CFRP veya GFRP çift şeritle, CFRP veya GFRP sürekli şeritle kirişin alt yüzeyi ve yan yüzeyleri U şeklinde sargılanacak şekilde güçlendirilmiştir. Kullanılan malzemelerdeki katman sayıları 1 ve 2 olarak uygulanmıştır. Deneyde elde edilen sonuçlar CFRP ve GFRP malzemelerin bindirme bölgesini güçlendirmede oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca CFRP ve GFRP malzemelerin elemanlardaki nihai dayanımı ve sünekliği artırdığı görülmüştür [33].

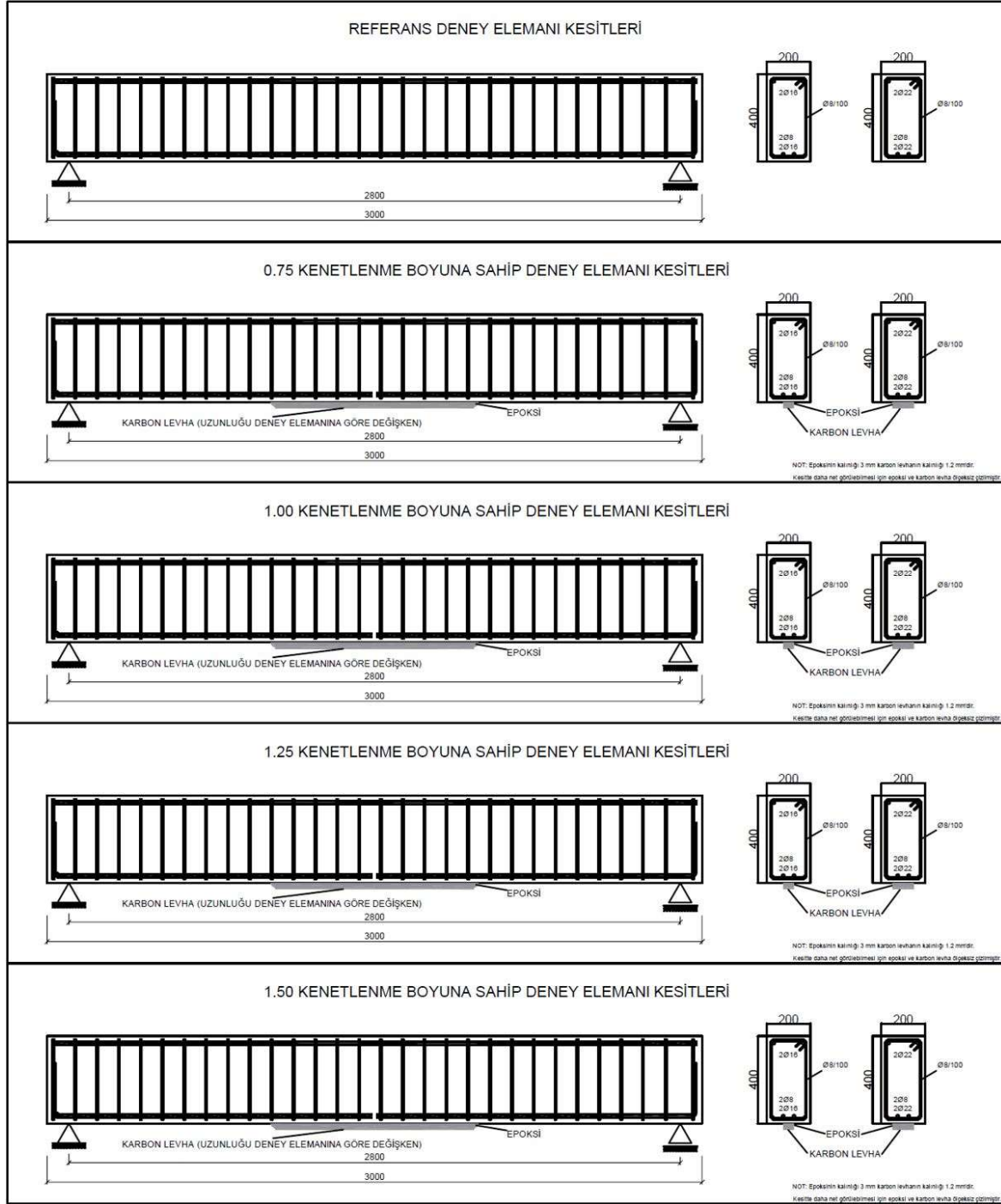


### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde tez çalışması kapsamında hazırlanan deney elemanları, deney elemanlarında kullanılan malzeme özellikleri, elemanların hazırlanış aşamaları ve deneyin yapılması için kullanılan sistemlerle ilgili bilgiler kısımlar halinde aktarılmıştır.

#### 3.1. Deney Elemanları

Çalışmada gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edebilmek için betonarme kiriş numuneleri 1/1 ölçekli olarak hazırlanmıştır. Kiriş uzunluğu 3 m, kiriş genişliği 200 mm ve kiriş yüksekliği ise 400 mm olarak seçilmiştir. Deney elemanları karbon plakadan donatıya aktarılabacak yük bakımından 2 gruba ayrılmıştır. Bir grup elemandaki çekme donatısı alanı toplamda 2Ø8+2Ø16 iken diğer gruptaki çekme donatısı alanı 2Ø8+2Ø22 olarak seçilmiştir. Kiriş basınç donatıları ise yukarıdaki sıraya göre 2Ø16 ve 2Ø22 olarak seçilmiştir. Deney elemanlarının hepsinde kesme kırılması olmayacak şekilde, tüm kiriş boyunca, Ø8/100 mm etriye kullanılmıştır. 2 tanesi referans kirişi olmak üzere toplam 10 adet deney elemanı hazırlanmıştır. Referans elemanlarının biri Ø16 donatılı diğeri ise Ø22 donatılı elemanların karşılaştırılması için hazırlanmıştır. Referans kirişlerinin hepsinde boyuna donatılar tek parça ve sürekli olarak kullanılmıştır. Diğer elemanlarda ise çekme bölgesindeki 2Ø8 donatının haricindeki çekme donatıları kiriş boyunun orta bölgesinde kesilerek çekme donatısında süreksizlik oluşturulmuştur. Ek yapılan tüm elemanlarda deney güvenliği için 2Ø8 donatılar kesilmeden sürekli olarak kullanılmıştır. Şekil 3.1’de deney elemanları kesitleri yer almaktadır.



Şekil 3.1. Deney elemanları kesitleri

Karbon plakalar ile boyuna donatıların bindirmeli ekinin yapıldığı tüm elemanlarda plaka boyu kiriş ortasını ortalayacak şekilde yapıştırılmıştır. Temel olarak iki tip karbon plaka kullanılmıştır. Bunlardan ilkinin kesiti 1,2/50 mm diğeri ise 1,2/100 mm ölçülerinde seçilmiştir. Karbon plaka kesiti, kesilen ana donatılar ile yaklaşık aynı dayanımda olacak şekilde seçilmiştir. Bu hesap ilerleyen bölümlerde verilecektir. Karbon plaka bindirmeli ek boyu sırasıyla Ø16 ve Ø22 lik donatıların temel kenetleme boyu temel alınarak değışken

tutulmuştur. Kiriş ortasından sola ve sağa devam eden kenetleme boyu Ø16 ve Ø22 donatılı elemanlar için temel kenetlenme boyunun 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 katı olarak imal edilmiştir. Deneylerde temel kenetlenme boyunun verilen katlarında bindirmeli ekleri yapılan karbon plakaların ana donatıya yükü aktarıp aktaramayacağı ve referans kiriş davranışına ne ölçüde yaklaşılabileceği ana hedef olarak araştırılmıştır. Çizelge 3.1’de deney elemanlarına ait özellikler ve parametreler topluca sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Deney elemanlarına ait parametreler

| Deney Elemanı | Tip         | Çekme Donatısı Süreksizliği | Süreksizlik Olan Çekme Donatısı (Ø) | Karbon Fiber Plaka Genişliği (mm) | Karbon Fiber Plaka Kenetlenme Boyu Oranı | Karbon Fiber Plaka Boyu (mm) |
|---------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|
| RS50          | Referans    | yok                         | -                                   | -                                 | -                                        | -                            |
| RS100         | Referans    | yok                         | -                                   | -                                 | -                                        | -                            |
| S50/0.75      | Güçlendirme | var                         | 16                                  | 50                                | 0,75                                     | 912                          |
| S50/1.00      | Güçlendirme | var                         | 16                                  | 50                                | 1,00                                     | 1216                         |
| S50/1.25      | Güçlendirme | var                         | 16                                  | 50                                | 1,25                                     | 1520                         |
| S50/1.50      | Güçlendirme | var                         | 16                                  | 50                                | 1,50                                     | 1824                         |
| S100/0.75     | Güçlendirme | var                         | 22                                  | 100                               | 0,75                                     | 1254                         |
| S100/1.00     | Güçlendirme | var                         | 22                                  | 100                               | 1,00                                     | 1672                         |
| S100/1.25     | Güçlendirme | var                         | 22                                  | 100                               | 1,25                                     | 2090                         |
| S100/1.50     | Güçlendirme | var                         | 22                                  | 100                               | 1,50                                     | 2508                         |

Çizelgede referans deney elemanlarının adları RS ile başlamaktadır. Bu harfler İngilizce “Reference Specimen” kelimelerinin baş harflerinden alınmıştır. Takip eden 2 rakam ise güçlendirme elemanlarında kullanılan karbon plaka genişliğini mm cinsinden göstermektedir. Dolayısıyla RS50 güçlendirme elemanlarında karbon plaka genişliği 50 mm olan elemanların referans kirişini, RS100 ise güçlendirme elemanlarında karbon plaka genişliği 100 mm olan elemanların referans kirişini göstermektedir. “S” başlayan diğer tüm elemanlar bindirmeli ek yapılan güçlendirme elemanlardır ve “S” harfi İngilizce “Specimen” kelimesinin baş harfinden alınmıştır. Bu elemanlarda “/” işaretinden önceki rakamlar kullanılan karbon plaka genişliğini mm cinsinden göstermektedir. “/” işaretinden sonraki rakamlar ise uygulanan kenetleme boyunun temel kenetlenme boyuna oranını göstermektedir. Örneğin S100/1.25 adlandırması ile karbon plaka genişliğinin 100 mm, karbon plaka kenetlenme boyunun ise temel kenetlenme boyunun 1,25 katı olduğu anlaşılmalıdır. Karbon plaka toplam uzunluğunun kenetlenme boyunun 2 katı kadar olduğu unutulmaması gereken diğer bir husustur.

Temel kenetlenme boyu hesabında TS500 “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”nda yer alan çekme donatısının düz kenetlenme tipinde nervürlü donatıların hesabında kullanılan Eş. 3.1’den faydalanılmıştır [34].

$$l_b = 0,12 (f_{yd} / f_{ctd}) \emptyset \geq 20\emptyset \quad (3.1)$$

$l_b$  : Temel kenetlenme boyu

$f_{yd}$  : Boyuna donatı tasarım akma dayanımı

$f_{ctd}$  : Beton tasarım eksenel çekme dayanımı

$\emptyset$  : Boyuna donatı çapı

Deney elemanlarında kullanılan S420 (BÇIII) sınıfındaki donatının tasarım akma dayanımı yaklaşık olarak 365,21 MPa, kullanılan C25/30 sınıfındaki betonun çekme dayanımı 1,167 MPa olarak alındığında donatının temel kenetlenme boyu;

$$l_b = 0,12 (365,21/1,167) \emptyset \geq 20\emptyset$$

$$l_b = 38\emptyset \geq 20\emptyset \quad (3.2)$$

olarak Eş. 3.2’deki gibi hesaplanmıştır.

Karbon plaka kesitleri yaklaşık olarak kenetlenme yapılan donatılar ile eşdeğer dayanım verecek şekilde hesaplanmıştır. Dolayısıyla boyuna donatılar için kullanılan temel kenetlenme boylarının karbon plakalar için de geçerli olduğu varsayılmıştır. Karbon plakaların kenetlenme boyu kirişin tam ortasından hem sağa hem de sola uzanacak şekilde hesaplanmıştır. Dolayısıyla karbon plakaların toplam boyu kenetlenme boyunun 2 katına eşit olmaktadır.

Bu nedenle Ø16 çaplı donatı kullanılan elemanlardaki karbon plaka temel kenetlenme boyu;

$$l_{b16} = 38\emptyset \times 2 = 38 \times 16 \times 2 = 1216 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Çekme donatısı olarak Ø22 kullanılan elemanlardaki karbon plakaların temel kenetlenme boyu ise;

$$l_{b22} = 38\emptyset \times 2 = 38 \times 22 \times 2 = 1672 \text{ mm} \quad (3.4)$$

olarak Eş. 3.3 ve 3.4'deki gibi hesaplanmıştır.

Güçlendirme elemanları için hesaplanan bu kenetlenme boyları 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 kat sayıları ile çarpılarak hangi kenetlenme oranının uygun davranış göstereceği araştırılmıştır.

### 3.2. Kullanılan Malzeme Bilgileri

#### 3.2.1. Beton

Deney elemanlarında kullanılacak beton C25/30 sınıfında seçilmiştir. Betonarme yapılarda kullanılan donatıların kenetlenme boyu hesabında betonun dayanımının da hesaba girmesi deney elemanlarında kullanılacak olan betonun 28 günlük basınç dayanımının seçilen sınıfa uygun olmasının önemini artırmıştır.

Bu doğrultuda kullanılacak olan betonun hazır beton tesisinden temin edilmesi uygun görülerek tek mikserde bütün deney elemanlarının beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Beton döküm yerinin açık alan olması sebebiyle gece soğukunda etkilenmemesi için naylon ve yün ile üstü kapatılmış ve çadır serilmiştir. Her gün sulama yapılmış ve gereken kür koşulları sağlanmıştır.

Betonun dayanımının daha doğru tespit edilebilmesi adına 150 mm'lik küp numune kalıbının mümkün mertebe fazla olması tercih edilmiş ve 42 adet 150 mm'lik küp numune kalıbı kullanılmıştır. 42 adet küp numunenin 14 tanesi 7. günde, 14 tanesi 28. günde ve 14 tanesi de deneyin yapıldığı tarihlerde test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen beton basınç dayanımları Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

Çizelge 3.2. Beton basınç dayanımı sonuçları

| 150/150/150 mm Küp Numunesi Beton Basınç Dayanımı Sonuçları |                        |                         |                          |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Numune                                                      | 7 Günlük Dayanım (MPa) | 28 Günlük Dayanım (MPa) | Deney Günü Dayanım (MPa) |
| 1                                                           | 21,70                  | 32,00                   | 36,10                    |
| 2                                                           | 20,73                  | 31,50                   | 35,60                    |
| 3                                                           | 21,84                  | 32,10                   | 38,60                    |
| 4                                                           | 20,50                  | 30,70                   | 38,90                    |
| 5                                                           | 21,83                  | 31,90                   | 39,40                    |
| 6                                                           | 24,13                  | 30,30                   | 38,30                    |
| 7                                                           | 22,16                  | 32,50                   | 33,90                    |
| 8                                                           | 18,06                  | 30,40                   | 34,40                    |
| 9                                                           | 23,89                  | 27,10                   | 36,40                    |
| 10                                                          | 23,24                  | 31,40                   | 35,30                    |
| 11                                                          | 23,30                  | 25,60                   | 39,90                    |
| 12                                                          | 24,23                  | 32,00                   | 38,80                    |
| 13                                                          | 23,79                  | 30,20                   | 37,50                    |
| 14                                                          | 23,94                  | 31,40                   | 36,30                    |
| Ortalama                                                    | 22,38                  | 30,65                   | 37,10                    |
| Standart Sapma                                              | 1,77                   | 1,98                    | 1,92                     |

### 3.2.2. Donatı

Deney kirişlerinde kullanılan donatı sınıfı S420 (BÇ III) olarak seçilmiştir. Elemanlarda Ø8, Ø16 ve Ø22 olmak üzere 3 farklı çapta donatı kullanılmıştır. Üretim tesisinden temin edilen donatılar beton döküm tarihine kadar özenle muhafaza edilmiştir. Kullanılan farklı çaplardaki donatılara ait donatı çekme deneyi sonuçları Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Ø8 donatısı çekme deneyi sonuçları

| Ø8 Donatı Numuneleri | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1                    | 500                 | 620                  |
| 2                    | 498                 | 615                  |
| 3                    | 499                 | 624                  |

Çizelge 3.4. Ø16 donatısı çekme deneyi sonuçları

| Ø16 Donatı Numuneleri | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
|-----------------------|---------------------|----------------------|
| 1                     | 489                 | 653                  |
| 2                     | 498                 | 638                  |
| 3                     | 487                 | 640                  |

Çizelge 3.5. Ø22 donatısı çekme deneyi sonuçları

| Ø22 Donatı Numuneleri | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
|-----------------------|---------------------|----------------------|
| 1                     | 523                 | 682                  |
| 2                     | 533                 | 691                  |
| 3                     | 515                 | 666                  |

### 3.2.3. Karbon fiber plaka

Karbon fiber plakalar yapı malzemeleri sektöründe önemli bir yere sahip malzeme türüdür. Kiriş, kolon, döşeme vb. gibi yapı elemanlarının güçlendirilmesinde veya onarılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Dayanımının yüksek, uygulamasının genellikle kolay ve hafif olması başlıca tercih sebepleridir.

Tez çalışması kapsamındaki güçlendirme deneylerinde 50 mm genişliğinde, 1,2 mm kalınlığında ve 100 mm genişliğinde, 1,2 mm kalınlığında olmak üzere 2 tip karbon fiber plaka kullanılmıştır. Üretici firmadan alınan karbon fiber plakaya ait teknik bilgiler Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Karbon fiber plaka teknik bilgileri

| Genel Bilgiler    |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| Renk              | Siyah                          |
| En                | 50 mm ve 100 mm                |
| Boy               | 100 m'lik rulo                 |
| Kalınlık          | 1,2 mm - 1,4 mm                |
| Yoğunluk          | 1,50 kg/lt                     |
| Raf Ömrü          | Kuru Depo Şartlarında Sınırsız |
| Alevlenme Noktası | 180 °C                         |
| Çekme Mukavemeti  | ≥ 3000 MPa                     |
| Elastiklik Modülü | ≥ 165000 MPa Kopmadaki         |
| Kopmada Uzama     | 1,4%                           |

Güçlendirme deneylerinde kullanılan karbon fiber plakaların kalınlığı ve genişliği, kirişin çekme bölgesinde süreksizlik oluşturulan donatılardaki akma kuvvetini yaklaşık olarak karşılayacak şekilde seçilmiştir. Bu kuvvetin hesabı pratik bir yöntemle aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Tip 1 güçlendirme deneyinde çekme bölgesinde süreksizlik oluşturulan donatı:

2Ø16 (401,92 mm<sup>2</sup>)

Donatının yaklaşık akma dayanımı : 450 MPa

Donatının karşılayacağı kuvvet :  $450 \times 401,92 = 180,864 \text{ kN}$

Tip 1 güçlendirme deneyinde kullanılan karbon fiber plaka kalınlığı ve genişliği:

1,2 mm x 50 mm (60 mm<sup>2</sup>)

Karbon fiber plakanın çekme dayanımı : 3000 MPa

Karbon fiber plakanın karşılayacağı kuvvet :  $3000 \times 60 = 180,000 \text{ kN}$

Tip 2 güçlendirme deneyinde çekme bölgesinde süreksizlik oluşturulan donatı:

2Ø22 (759,88 mm<sup>2</sup>)

Donatının yaklaşık akma dayanımı : 450 MPa

Donatının karşılayacağı kuvvet :  $450 \times 759,88 = 341,946 \text{ kN}$

Tip 2 güçlendirme deneyinde kullanılan karbon fiber plaka kalınlığı ve genişliği:

1,2 mm x 100 mm (120 mm<sup>2</sup>)

Karbon fiber plakanın çekme dayanımı : 3000 MPa

Karbon fiber plakanın karşılayacağı kuvvet :  $3000 \times 120 = 360,000 \text{ kN}$

### 3.2.4. Epoksi

Çalışma kapsamında kullanılan karbon fiber plakaların kirişe yapıştırılması için epoksi macunu kullanılmıştır. Epoksi macunu da karbon fiber plakaların alındığı üreticiden temin

edilmiş olup çalışmada kullanılan epoksi macununa ait teknik bilgiler Çizelge 3.7’de yer almaktadır.

Çizelge 3.7. Epoksi macunu teknik bilgileri

| Genel Bilgiler                        |                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Renk                                  | Gri (karışım)                                       |
| Karışım Yoğunluğu                     | 1,65 kg/litre                                       |
| Karışım Oranı                         | 1 Birim A Bileşeni : 1 Birim B Bileşeni (Ağırlıkça) |
| Ambalaj                               | 5 kg set                                            |
| Uygulama Bilgileri                    |                                                     |
| Sarfıyat                              | 1 m <sup>2</sup> plaka yapıştırmak için 3-4 kg      |
| Raf Ömrü                              | Açılmamış orjinal ambalajında 12 Ay                 |
| Kap Ömrü                              | 30 dakika (20 °C)                                   |
| Temizlenebilme Süresi                 | 45 dakika (20°C)                                    |
| Yeniden Kaplanabilme Süresi           | 2-7 gün                                             |
| Tam Mukavemet                         | 7 gün                                               |
| Performans Bilgileri                  |                                                     |
| Yapışma (çeliğe ve betona)            | > 4 N/mm <sup>2</sup>                               |
| Eğilmede Çekme Dayanımı (TS EN 196-1) | > 25 N/mm <sup>2</sup>                              |
| Basınç Dayanımı (TS EN 196-1)         | > 90 N/mm <sup>2</sup>                              |

### 3.3. Deney Elemanlarının Hazırlanma Aşamaları

Bu bölümde deney elemanlarının başından sonuna kadar hazırlanma aşamaları verilmiştir.

#### 3.3.1. Kalıp hazırlama süreci

Öncelikle deney için oluşturulacak kiriş elemanlarının kalıpları hazırlanmıştır. Kalıp malzemeleri olarak ahşap kontrplaklar kullanılmıştır. Kalıplar kiriş elemanlarına göre 200 mm genişliğinde, 400 mm yüksekliğinde ve 3 m boyunda olacak şekilde teşkil edilmiştir. Oluşturulan kalıplarda beton dökümünde açılmalar olmaması için ilave önlemler alınarak kiriş boyutlarının değişmeden üretilmesi sağlanmıştır. Kullanılan kalıplar yağlandıktan sonra beton dökmeye hazır hale getirilmiştir (Resim 3.1 ve Resim 3.2).



Resim 3.1. Kalıp yağlama işlemi



Resim 3.2. Kurulumu yapılan deney kirişlerinin kalıpları

### 3.3.2. Donatı hazırlama süreci

Deney elemanları için kullanılacak donatıların donatı detaylarında belirtilen özelliklere göre bükümleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.3). Daha sonrasında hazırlanan etriyeler boyuna donatılara bağ telleri ile bağlanarak donatı kafesleri oluşturulmuştur (Resim 3.4). Güçlendirme deney elemanları için çekme bölgesinde 10 mm süreksizlik oluşturulacak donatılar donatı kafesi oluşturulduktan sonra kesilmiştir (Resim 3.5). Hazırlanan donatı kafesleri kalıplara yerleştirilmiş ve deney elemanları beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Resim 3.6).



Resim 3.3. Büküm işlemi yapılmış donatılar



Resim 3.4. Hazırlanan donatı kafesleri



Resim 3.5. Çekme bölgesi için süreksizlik oluşturulan donatılar



Resim 3.6. Kalıplara yerleştirilen donatı kafesleri

### 3.3.3. Beton döküm süreci

Deney elemanlarının betonu hazır beton tesisinden sipariş edilmiştir. Vibratör kullanımına azami ölçüde dikkat edilerek beton dökümü gerçekleştirilmiştir (Resim 3.7). Döküm yapılırken aynı zamanda basınç dayanımı testi için küp beton numuneleri alınmıştır (Resim 3.8). Döküm tamamlandıktan sonra hava şartlarının betonu etkilememesi için betonun üstü naylon, yün ve çadırla kapatılmıştır (Resim 3.10). Beton prizini aldıktan sonra sulama işlemi günde 2 sefer olmak üzere 14 gün boyunca devam etmiştir.



Resim 3.7. Deney numunelerinin beton döküm işlemleri



Resim 3.8. Küp numuneler



Resim 3.9. Beton dökümü tamamlanan elemanlar



Resim 3.10. Betonun hava koşullarından etkilenmemesi için yalıtım işlemleri



Resim 3.11. Yeterli dayanıma ulaştıktan sonra kalıplarından çıkarılan elemanlar

### 3.3.4. Karbon fiber plaka montaj süreci

Karbon fiber plakalar laboratuvar ortamında muhafaza edilmiş ve deney elemanlarında kullanılacak boylara göre kesimleri yapılmıştır. Daha sonrasında deney elemanlarının alt yüzeyine epoksi macununun iyi aderans sağlayabilmesi için taşlama yapılmış, pürüzsüz hale getirilmiş ve kompresör yardımıyla üzerindeki toz, pis vb. maddeler temizlenmiştir (Resim 3.12). Pürüzsüz yüzey tiner ile silinmiş ve kuruması için beklenmiştir.

Her eleman için plakaların yapışacağı yerler kalemle işaretlenmiş ve bu noktalara epoksi macunun düzgün bir şekilde sürülebilmesi amacıyla 3 mm çapındaki uzun teller yerleştirilmiştir (Resim 3.13).

Epoksi macunun A ve B bileşenleri Çizelge 3.7’de verilen karışım oranları doğrultusunda 2 - 3 dakika boyunca homojen gri bir renk elde edilene kadar karıştırılmıştır (Resim 3.14). Hazırlanan karışım güçlendirme yapılacak olan kirişlerin alt yüzeylerine sürülerek karbon fiber plakalar sürülen epoksi macunun üzerine hafif baskı yaparak yapıştırılmıştır (Resim

3.15 ve Resim 3.16). Plakaların açma yapmaması için üzerine plaka boyunca hafif ağırlıklar yerleştirilmiştir.



Resim 3.12. Karbon fiber plakaların yapıştırılacağı yüzeyin taşlanması işlemi



Resim 3.13. Epoksi sürülecek bölgelerin teller ile sınırlandırılması



Resim 3.14. Epoksinin A ve B bileşenlerinin karıştırılması



Resim 3.15. Hazırlanan epoksinin kiriş alt yüzeyine sürülmesi

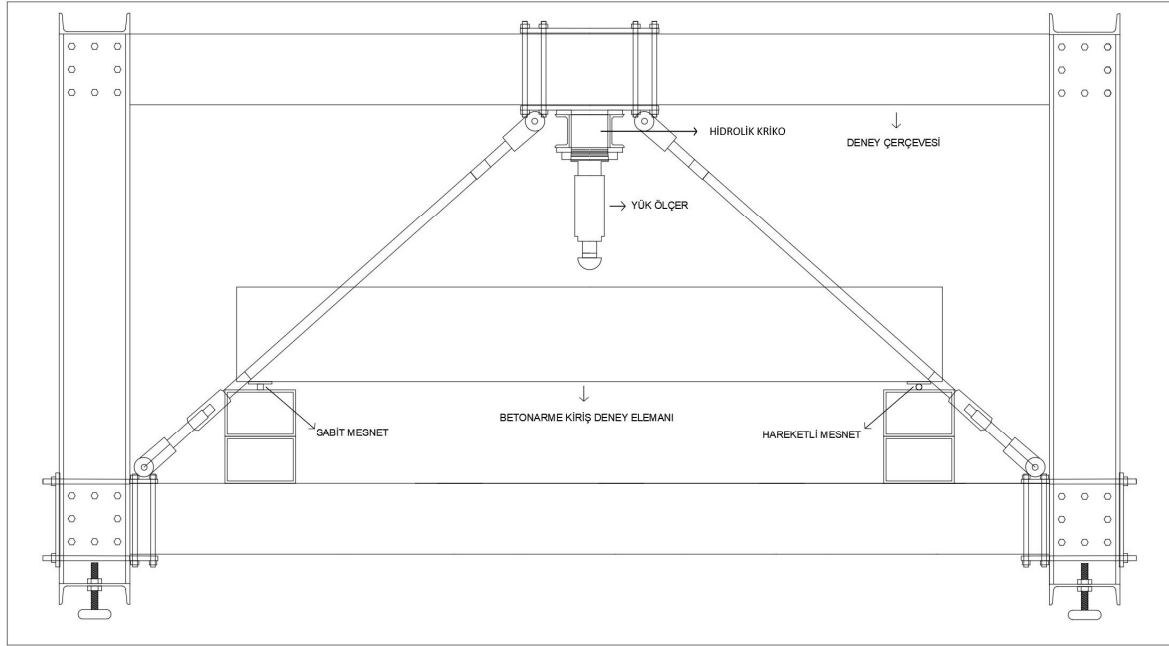


Resim 3.16. Karbon fiber plakaların epoksi harcının üzerine yapıştırılması

Epoksinin yeterli dayanıma ulaşmasından sonra hazırlanan elemanların deney süreçlerine başlanılmıştır.

### 3.4. Deney Sistemi

Deney elemanlarının testleri için laboratuvarında bulunan çelik deney çerçevesi kullanılmıştır. Çelik çerçeve üzerinde hidrolik krikoy ve krikoya bağlı yük hücresi bulunmaktadır. Yük hücresinin altında kiriş numunelerine tam orta noktada tekil yük verecek şekilde yarım silindirik kesitinde çelik eleman kullanılmıştır. Kiriş elemanlarının mesnetleri sol kısımda sabit mesnet ve sağ kısımda hareketli mesnet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme için laboratuvarında bulunan elektrikli hidrolik pompa kullanılmıştır. Deney sistemine ait görsel çizim Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Deney Sistemi

### 3.5. Ölçüm düzeni

Deney elemanlarında oluşacak deformasyonları ölçebilmek için üç adet yer değiştirme ölçer LVDT (Linear variable differential transformer) kullanılmıştır. Bu cihazlardan alınan deformasyon değerleri elektronik olarak bilgisayara aktarılmış ve deney elemanının yük yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Yer değiştirme ölçerler her deney öncesinde sabit bir şekilde yerleştirilmiş ve hareket etmemesi için gerekli önlemler alınmıştır. Yer değiştirme ölçerlerden yük-yer değiştirme grafiğine esas teşkil eden LVDT-1 kiriş numunesinin tam orta noktasında kirişin üst yüzünden 100 mm aşağıda olacak şekilde, LVDT-2 ise LVDT-1'in 400 mm soluna, LVDT-3 ise LVDT-1'in 400 mm sağına olacak şekilde konumlandırılmıştır. Yer değiştirme ölçerlerin deney numunesine yerleştirilmiş hali Resim 3.17'de gösterilmiştir.



Resim 3.17. Yer değiştirme ölçerlerin deney numunesine yerleştirilmiş hali



## 4. DENEYSEL SÜREÇ

Bu bölümde 2 adet referans eleman ve 8 adet güçlendirme elemanı olmak üzere toplamda 10 adet deney elemanının teknik detayları, deney esnasında meydana gelen olayları, resimleri ve grafikleri kısımlar halinde aktarılmıştır.

Deneye hazır hale getirilen bütün elemanlar deney aşamalarında özenli bir şekilde deney çerçevesine yerleştirilmiş, yer değiştirme okuyucuların doğru ölçebildiği deney öncesinde kontrol edilmiş ve gereken hazırlıklar yapılarak bu doğrultuda deneylere başlanılmıştır. Tüm elemanlara kapasite sınırlarına kadar tekdüze yük uygulanmıştır.

### 4.1. Referans Eleman Deneyleri

Bu bölümde RS50 ve RS100 isimlerine sahip 2 adet deney elemanının bilgileri aktarılmıştır.

#### 4.1.1. RS50 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø16

Çekme donatısı : 2Ø16 + 2Ø8

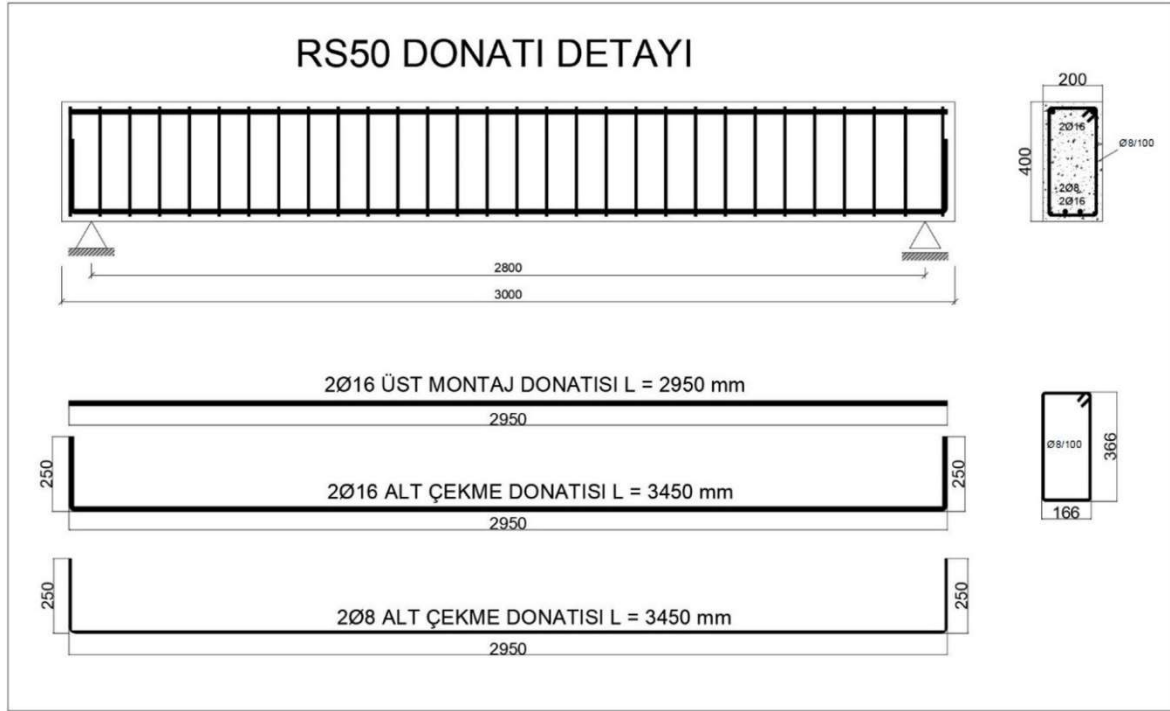
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø16) süreksizlik durumu : yok

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : yok

Karbon plaka bindirme boyu : yok

RS50 deney elemanına ait donatı detayı Şekil 4.1 'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. RS50 deney elemanının donatı detayı



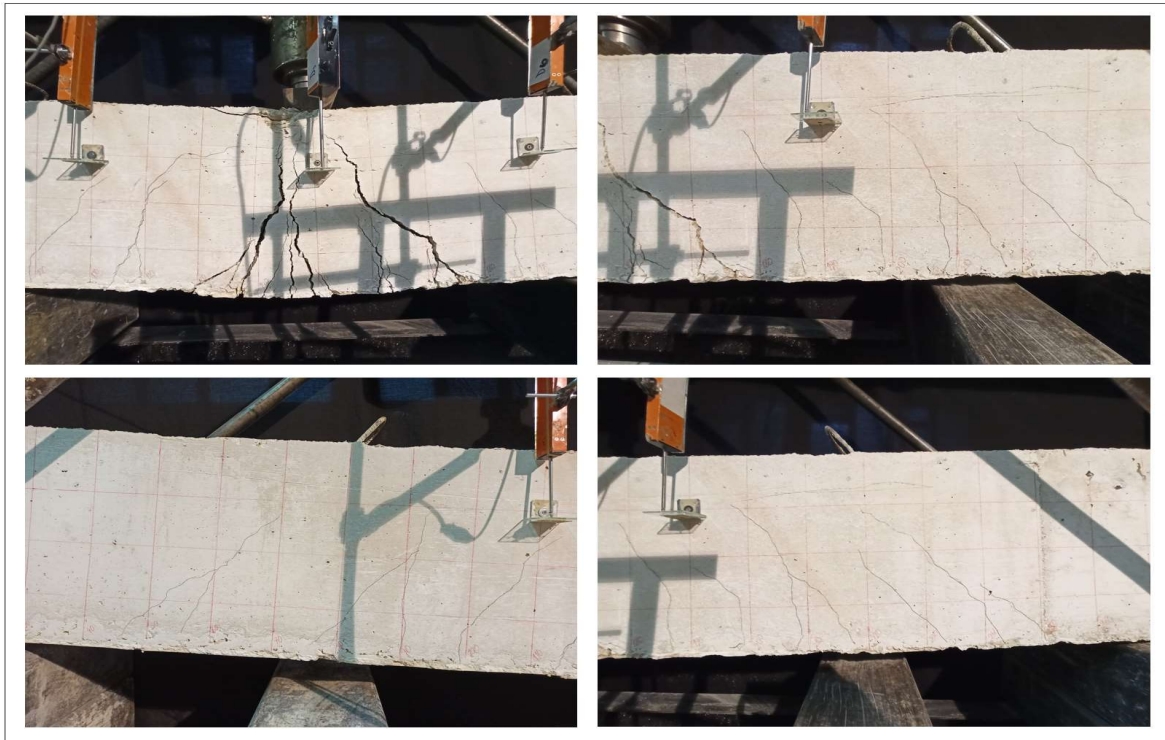
Resim 4.1. RS50 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

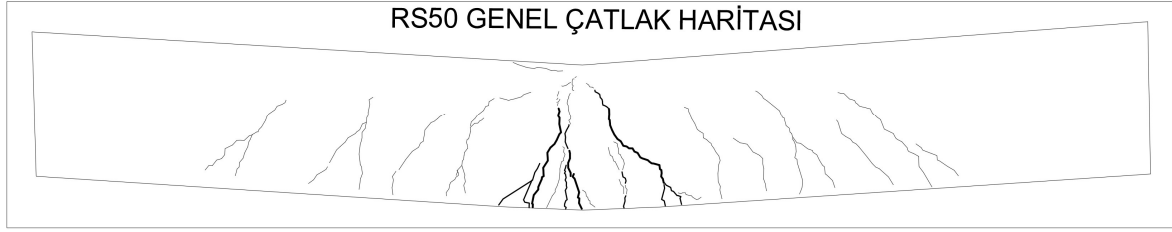
- 20 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 25 kN yükte ilk çatlak eğilme çatlağı olarak kirişin orta bölgesinde oluşmuştur.
- 45 kN yükte elemanın orta bölgesinde tipik eğilme çatlakları gözlemlenmiştir.
- 76 kN yükte eğilme çatlakları kökleşmeye başlamıştır. Çatlaklar kılcal düzeyde oluşmuştur. Herhangi bir kesme çatlağı gözlenmemiştir.
- 125 kN yükte; 14,5 mm yer değiştirmede eleman akmaya başlamıştır.
- 128 kN yükte orta bölgedeki eğilme çatlaklarının genişliği 1 mm civarında oluşmuştur. Tipik çatlaklardan 2 tane gözlenmiş olup 1 tanesi kökleşmiş olarak tespit edilmiştir.
- Kirişin sol tarafından 600 mm ile 700 mm arasında kesme ile karışık bir çatlak oluşmuştur.
- Simetrik olarak 2300 mm ile 2400 mm arasında yine kesme ile karışık bir çatlak oluşmuştur.
- Yükleme noktasının altında ana 2 adet eğilme çatlağıyla kiriş deformasyona devam etmiştir.
- 134 kN yükte çatlakların açılması eğilme çatlakları üzerinden devam etmiştir.
- Oluşmuş olan kesme çatlaklarında herhangi bir ilerleme gözlenmemiştir.
- 138 kN yükte yükleme noktası altında ezilme belirtisi gözlenmiştir.
- 142 kN yükte eğilme çatlaklarının açıklığı 4 mm olarak genişlemiştir.
- 150 kN yükte eğilme çatlaklarının açıklığı 10 mm olarak genişlemiştir.
- Kiriş ortasında oluşan 100 mm'lik yer değiştirme ve yükleme hücresinin uzama kapasitesinin bitmiş olması nedeniyle deney sonlandırılmıştır.



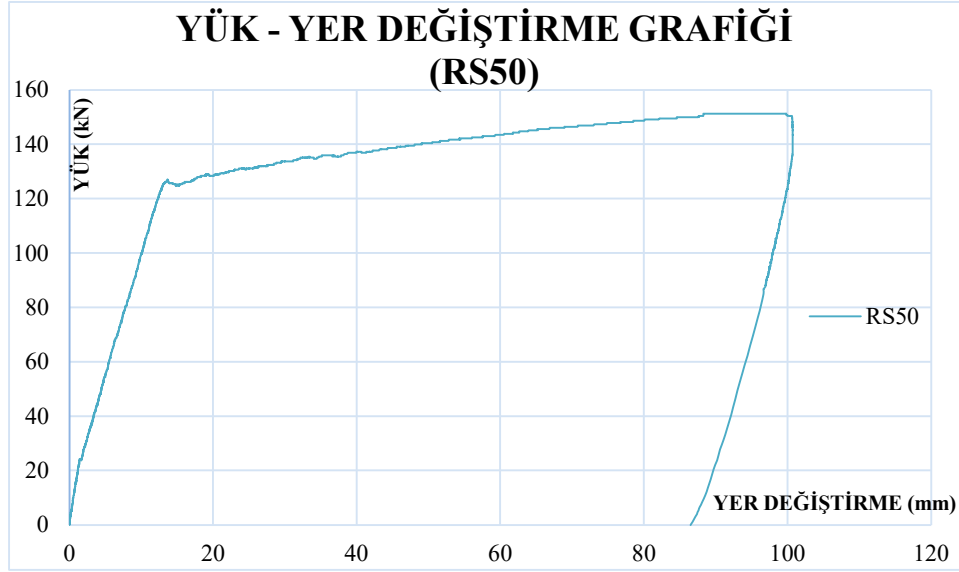
Resim 4.2. RS50 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.3. RS50 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.2. RS50 deney elemanının genel çatlak haritası



Şekil 4.3. RS50 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.1.2. RS100 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø22

Çekme donatısı : 2Ø22 + 2Ø8

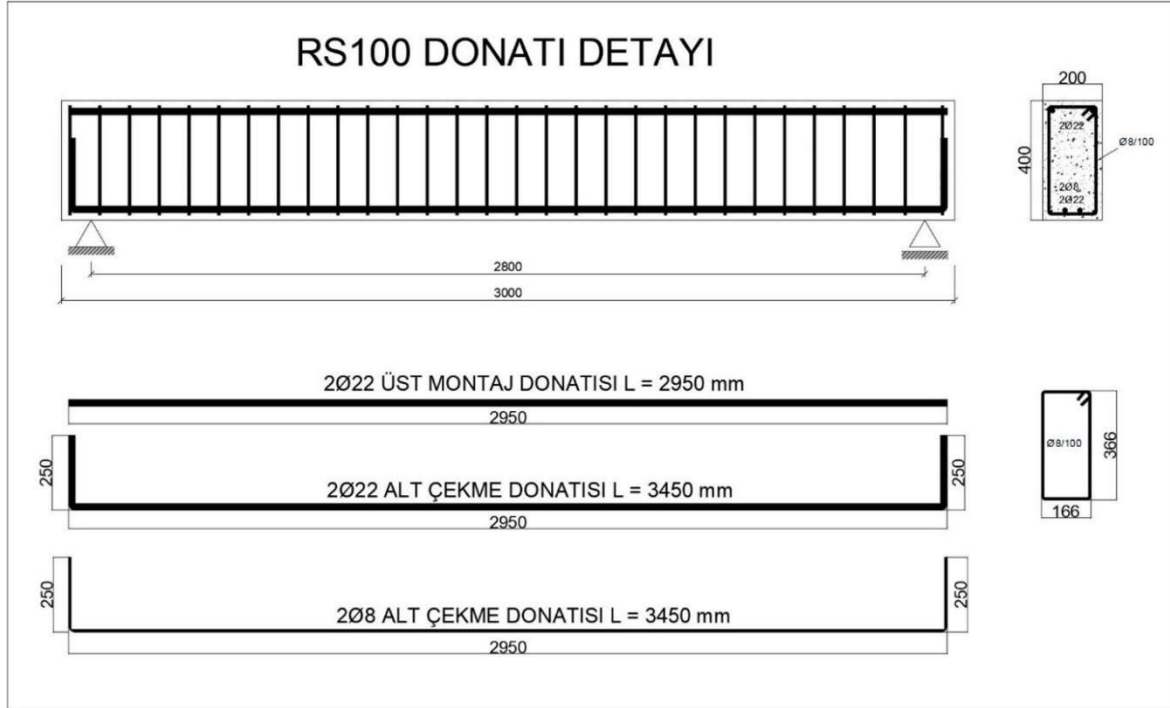
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø22) süreksizlik durumu : yok

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : yok

Karbon plaka bindirme boyu : yok

RS100 deney elemanına ait donatı yerleşimi Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. RS100 deney elemanının donatı detayı



Resim 4.4. RS100 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

- 40 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 50 kN yükte 1100 mm’de, 1350 mm’de ve 1650 mm’de yaklaşık 0,2 mm genişliğinde eğilme çatlakları oluşmuştur.
- 60 kN yükte 2100 mm’de 0,15 mm genişliğinde eğilme çatlakları oluşmuştur.
- 65 kN yükte 800 mm’de 0,15 mm genişliğinde eğilme çatlakları oluşmuştur.
- Kiriş çekme bölgesindeki donatı kesik olmadığı için güçlendirme elemanlarına göre çatlaklar yaygın bir şekilde oluşmuştur.
- 73 kN yükte 2380 mm’de 0,1 mm genişliğinde eğilme çatlakları oluşmuştur.
- 80 kN yükte 1650 mm’de maksimum çatlak genişliği 0,25 mm maksimum çatlak boyu 290 mm olarak gözlenmiştir.
- 87 kN yükte 580 mm’de genişliği 0,15 mm olan yatayla yaklaşık 60 derece açı yapan kesme çatlakları oluşmuştur.
- 127 kN yükte 1350 mm’de maksimum çatlak genişliği 0,4 mm 1650 mm’de çatlak genişliği 0,35 mm olarak gözlenmiştir.
- 137 kN yükte 2450 mm’de genişliği 0,25 mm olan kesme çatlakları oluşmuştur.
- 150 kN yükte 350 mm’den başlayan çatlak genişliği 0,3 mm olan kesme çatlakları, 580 mm’den başlayan çatlak genişliği 0,3 mm olan kesme çatlakları, 800 mm’de kesme ve eğilme çatlakları, 1000 mm’de kesme ve eğilme çatlakları gözlenmiştir.
- 160 kN yükte 1350 mm’deki çatlakların genişliği 0,5 mm 1600 mm’deki çatlakların genişliği 0,4 mm olarak gözlenmiştir.
- Kirişin orta kısmında çatlaklar eğilme karakterinde, mesnet bölgelerinde ise kesme karakterinde oluşmuştur.
- 195 kN yükte 300 mm’den başlayan kesme çatlakları 0,4 mm genişliğinde, 800 mm’den başlayan kesme çatlakları 0,5 mm genişliğinde, 1350 mm’deki eğilme çatlakları 0,6 mm genişliğinde, 1600 mm’deki eğilme çatlakları 0,5 mm genişliğinde, 1950 mm’den başlayan kesme çatlakları 0,4 mm genişliğinde, 2200 mm’den başlayan kesme çatlakları 0,35 mm genişliğinde, 2400 mm’den başlayan kesme çatlakları 0,3 mm genişliğinde, 2500 mm’den başlayan kesme çatlakları 0,2 mm genişliğinde gözlenmiştir.
- 215 kN yükte en büyük çatlak olan 1550 mm’deki eğilme çatlakları 2,5 mm genişliğinde, 1300 mm’deki eğilme çatlakları 0,8 mm genişliğinde, 1700 mm’deki eğilme çatlakları 0,8 mm genişliğinde, 2900 mm’deki çatlak 0,5 mm genişliğinde, 2200 mm’deki çatlak 0,4

mm genişliğinde, 2400 mm'deki çatlaklar 0,3 mm genişliğinde, 300 mm'deki kesme çatlağı 0,5 mm genişliğinde, 580 mm'deki kesme çatlağı 0,35 mm genişliğinde, 800 mm'deki kesme ve eğilme çatlağı 0,5 mm genişliğinde, 1000 mm'deki kesme ve eğilme çatlağı 0,35 mm genişliğinde gözlenmiştir.

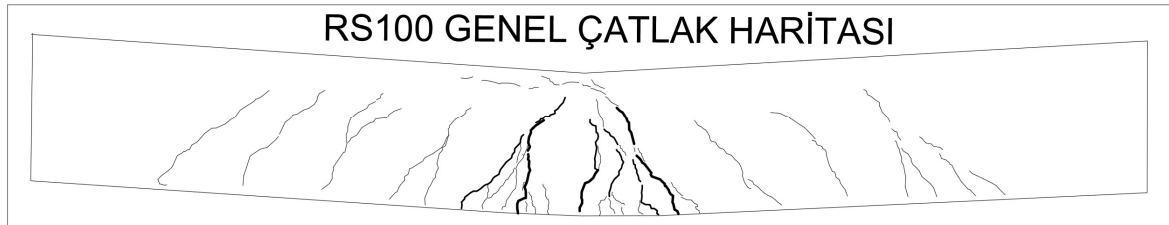
- 220 kN yükte yüklemenin yapıldığı noktada betonda ezilme gözlenmiştir.
- 222 kN yükte kirişin ortasındaki 500 mm'lik bölgede çatlaklar yaklaşık 3,5 mm genişliğinde gözlenmiştir.
- Kirişin ortasındaki 600 mm'lik bölgede çatlaklar aşağıdan başlayıp yüklemenin yapıldığı noktaya doğru yukarıya yönelme gözlenmiştir.
- Kesme çatlakları sabit kalmaya başlamış olup kirişin orta noktasındaki ezilme belirginleşmeye başlamıştır.
- En büyük kesme çatlağı 300 mm'de 0,5 mm genişliğinde gözlenmiştir.
- Kiriş ortasında oluşan 100 mm'lik yer değiştirme ve yükleme hücresinin uzama kapasitesinin bitmiş olması nedeniyle deney sonlandırılmıştır.



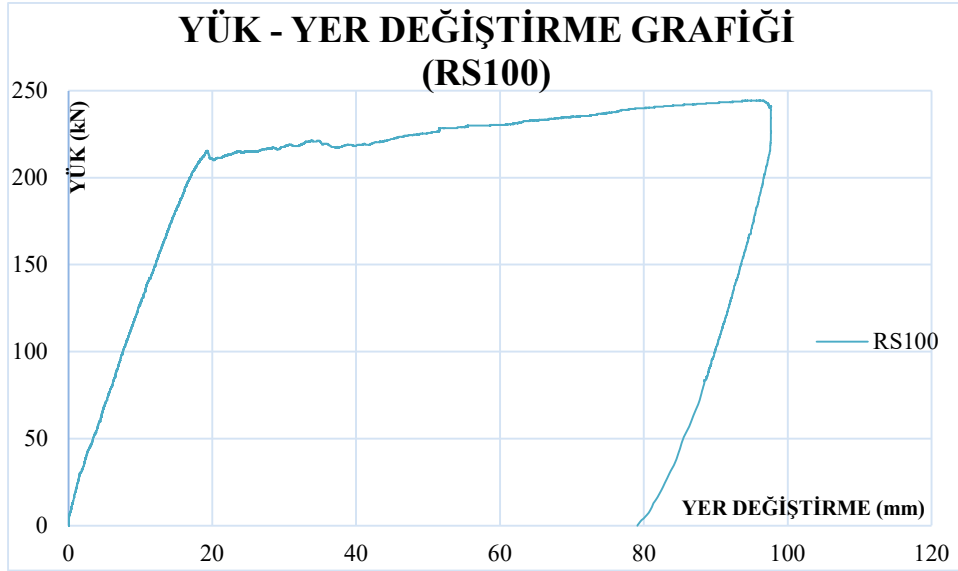
Resim 4.5. RS100 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.6. RS100 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu.



Şekil 4.5. RS100 deney elemanının genel çatlak haritası



Şekil 4.6. RS100 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2. Güçlendirme Elemanı Deneyleri

Bu bölümde S50/0.75, S50/1.00, S50/1.25 ve S50/1.50 1. grup deney elemanları; S100/0.75, S100/1.00, S100/1.25 ve S100/1.50 2. grup deney elemanları olacak şekilde toplamda 8 adet deney elemanının özellikleri ve deneyleri esnasında gerçekleşen olaylar aktarılmıştır.

Güçlendirme deney elemanlarından S50/0.75, S50/1.00, S50/1.25 ve S50/1.50 deney elemanının basınç bölgesinde 2Ø16 basınç donatısı, çekme bölgesinde ise 2Ø8 ve 2Ø16 çekme donatısı kullanılmıştır. Yükleme esnasında elemanda kesme kırılması oluşmaması için etriye donatısı olarak 30Ø8/100 kullanılmıştır.

Çekme donatılarında Ø16 çekme donatısı kirişin tam ortasında 10 mm boşluk oluşturulacak şekilde kesilmiş ve çekme bölgesindeki Ø16 donatılarında süreksizlik oluşturulmuştur.

Çekme bölgesindeki Ø16 donatılarının taşıyacağı yüke karşılık kiriş orta noktasının sağında ve solunda donatılarla ilgili Standartta belirtilen bindirme boyunun 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 katı olacak şekilde hesaplanan boy uzunluğunda 50 mm genişliğindeki karbon fiber plakalar epoksi harcı kullanılarak kiriş numunesinin alt yüzüne yapıştırılmıştır.

Güçlendirme deney elemanlarından S100/0.75, S100/1.00, S100/1.25 ve S100/1.50 deney elemanının basınç bölgesinde 2Ø22 basınç donatısı, çekme bölgesinde ise 2Ø8 ve 2Ø22 çekme donatısı kullanılmıştır. Yükleme esnasında elemanda kesme kırılması oluşmaması için etriye donatısı olarak 30Ø8/100 kullanılmıştır.

Çekme donatılarında Ø22 çekme donatısı kirişin tam ortasında 10 mm boşluk oluşturulacak şekilde kesilmiş ve çekme bölgesindeki Ø22 donatılarında süreksizlik oluşturulmuştur.

Çekme bölgesindeki Ø22 donatılarının taşıyacağı yüke karşılık kiriş orta noktasının sağında ve solunda donatılarla ilgili Standartta belirtilen bindirme boyunun 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 katı olacak şekilde hesaplanan boy uzunluğunda 100 mm genişliğindeki karbon fiber plakalar epoksi harcı kullanılarak kiriş numunesinin alt yüzüne yapıştırılmıştır.

#### **4.2.1. S50/0.75 deney elemanı**

Basınç donatısı : 2Ø16

Çekme donatısı : 2Ø16 + 2Ø8

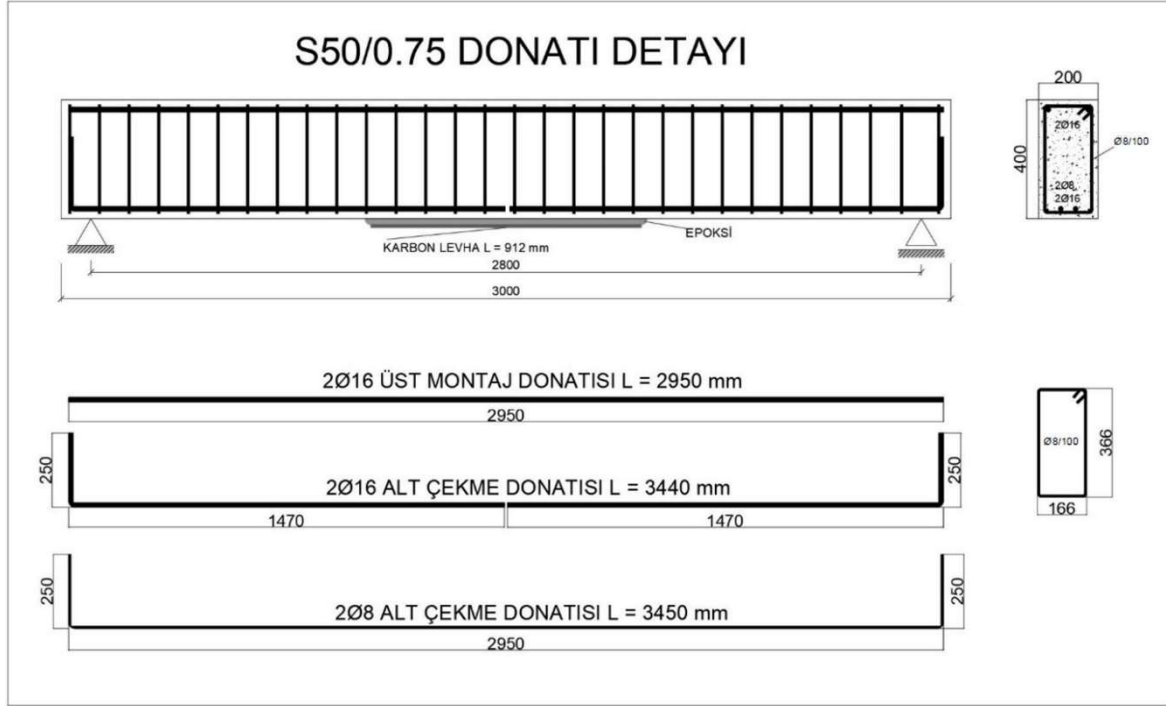
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø16) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 50 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 0,75Lb ( $0,75 \times 38 \times 16 \times 2 = 912$  mm)

S50/0.75 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. S50/0.75 deney elemanının donatı detayı



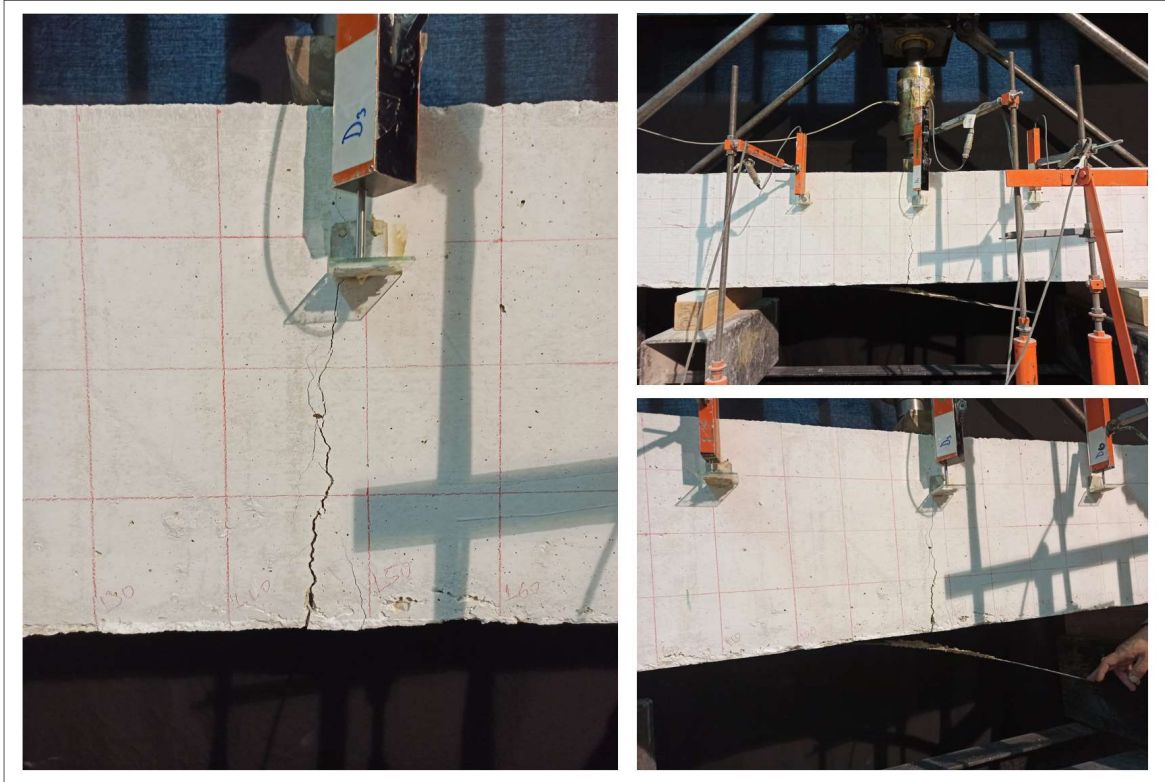
Resim 4.7. S50/0.75 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

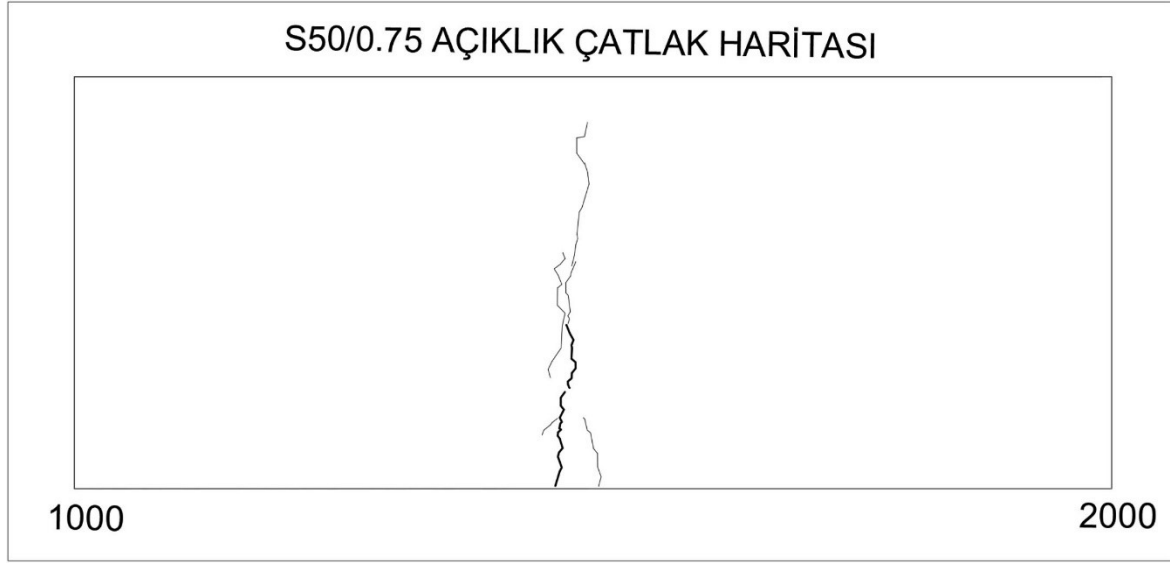
- 25 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 28 kN yükte 1350 mm'de elemanda ilk çatlak kılcal eğilme çatlağı olarak gözlenmiştir.
- 30 kN yükte 2,5 mm yer değiştirme oluşmuş olup 2. çatlak eğilme karakterinde 1450 mm'de gözlenmiştir.
- 32 kN yükte 3. çatlak eğilme karakterinde 1600 mm'de oluşmuştur. Çatlağın genişliği 0,15 mm boyu 250 mm olarak gözlenmiştir.
- 35 kN yükte 1870 mm'de eğilme çatlağı oluşmuştur.
- 40 kN yükte 1150 mm'de ve 1950 mm'de çatlaklar oluşmuştur. Maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlenmiştir.
- 44 kN yükte elemanda 4,6 mm yer değiştirme ölçülmüştür.
- 45 kN yükte maksimum çatlak genişliği 0,35 mm maksimum çatlak boyu 300 mm olarak gözlenmiştir.
- Yük aniden 46 kN'dan 42 kN'a düşmüştür. Maksimum çatlak genişliği 1 mm olarak gözlenmiştir. Karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- Karbon fiber plaka elemanın sağ ucundan sıyrılma yapmış ve yük aniden 25 kN'a düşmüştür. Yer değiştirme değeri 7,7 mm olarak okunmuştur. Elemandaki maksimum çatlak genişliği yaklaşık 3 mm olarak gözlenmiştir.
- Elemanda ana çatlak olarak 1450 mm'de başlayan çatlak gözlenmiştir. Diğer çatlaklar arka plana düşmüştür.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



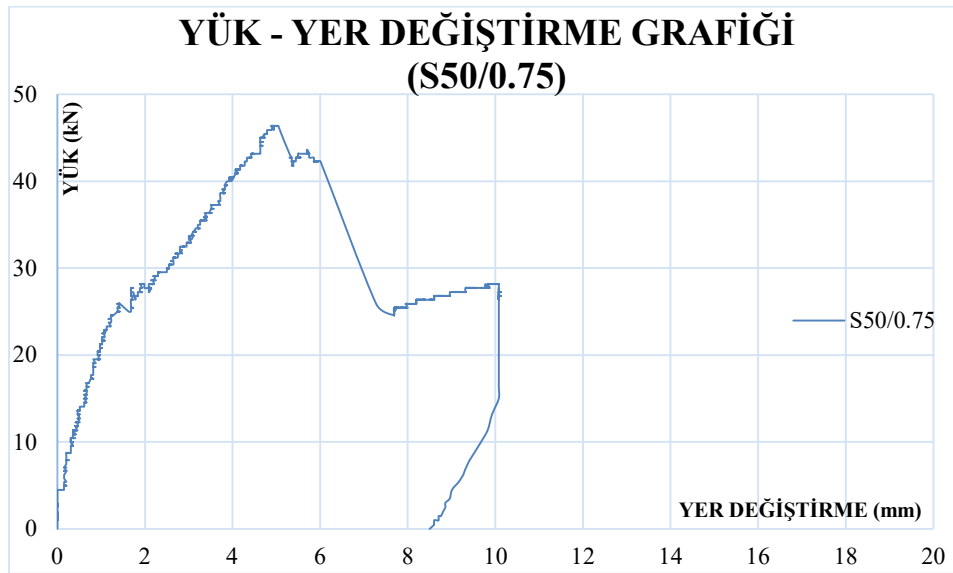
Resim 4.8. S50/0.75 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.9. S50/0.75 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.8. S50/0.75 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.9. S50/0.75 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.2. S50/1.00 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø16

Çekme donatısı : 2Ø16 + 2Ø8

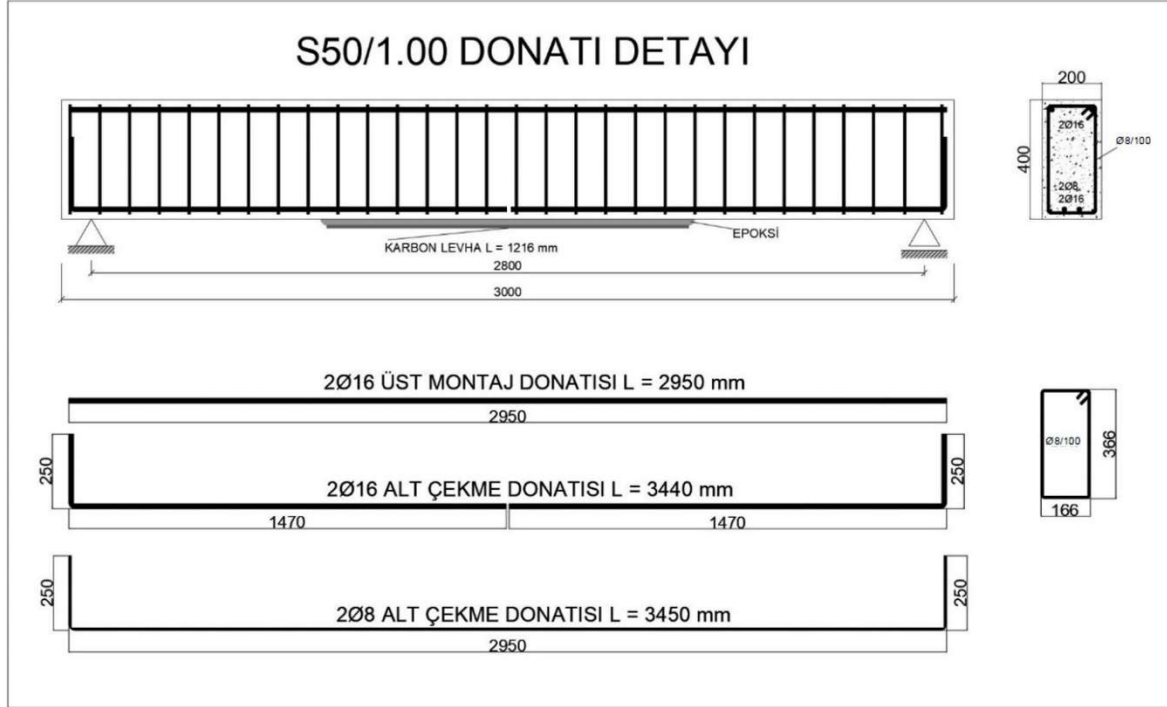
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø16) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 50 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 1,00Lb (1,00x38x16x2 = 1216 mm)

S50/1.00 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. S50/1.00 deney elemanının donatı detayı



Resim 4.10. S50/1.00 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

- 25 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 27 kN yükte 1250 mm'de 0,05 mm genişliğinde, 1450 mm'de 0,05 mm genişliğinde, 1550 mm'de 0,05 mm genişliğinde, 1600 mm'de 0,05 mm genişliğinde kılcak eğilme çatlakları oluşmuştur. Maksimum çatlak boyu 1600 mm'de 280 mm olarak gözlenmiştir.
- 30 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1600 mm'de 0,2 mm olarak gözlenmiştir.
- 34 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1600 mm'de 0,35 mm çatlak boyu 300 mm olarak gözlenmiştir.
- 36 kN yükte 1500 mm'den başlayıp 1600 mm'ye doğru giden 0,30 mm genişliğinde eğik çatlak oluşmuştur.
- 42 kN yükte elemanda 5 mm yer değiştirme okunmuş olup maksimum çatlak genişliği 1500 mm'den 1600 mm'ye doğru giden çatlakta 0,4 mm olarak gözlenmiştir.

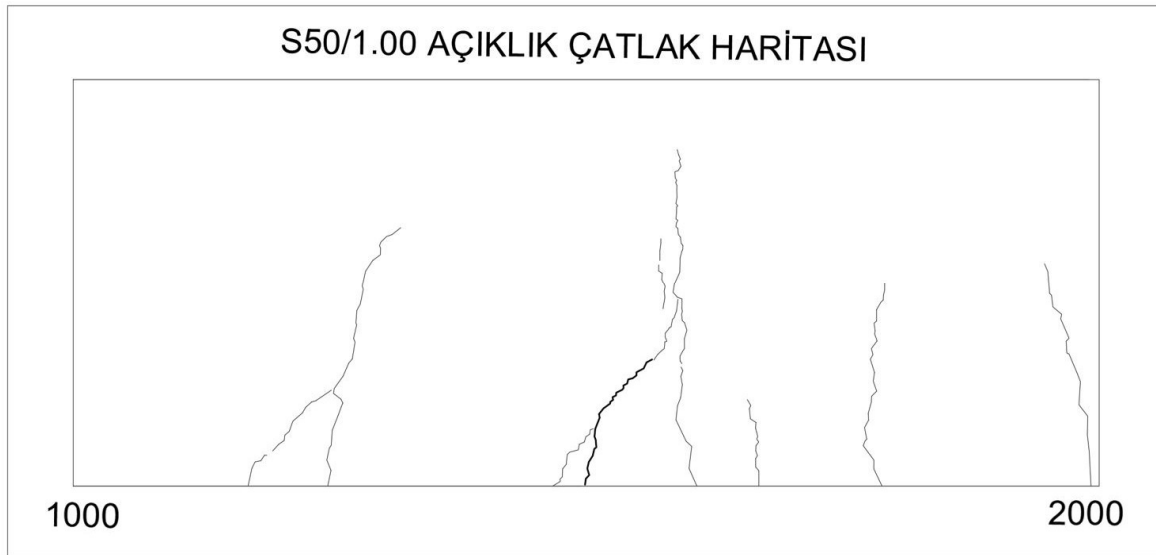
- Yük 42 kN'dan 40 kN'a düşmüştür. Maksimum atlak genişliği 1500 mm'den 1600 mm'ye doğru giden çatlakta 0,7 mm olarak gözlenmiştir.
- Eleman tekrardan yk almaya başlamış ve yük 42 kN'a çıkmıştır.
- Karbon fiber plaka elemanın sol ucundan sıyrılma yapmış ve yk aniden 26 kN'a düşmüştür. Elemandaki maksimum çatlak genişliği 1500 mm'den 1600 mm'ye doğru giden çatlakta yaklaşık 1,5 mm olarak gözlenmiştir.
- Elemanda ezilme oluşmamıştır.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



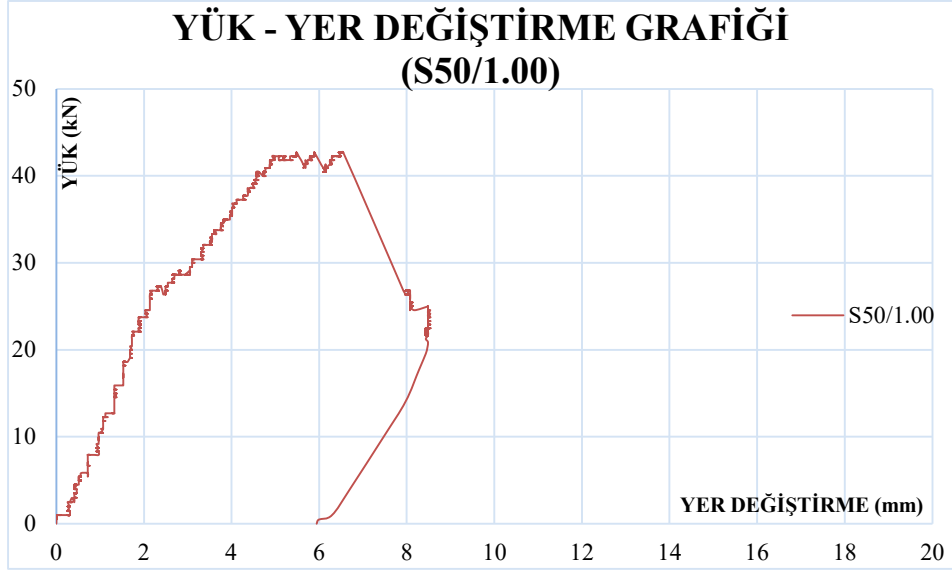
Resim 4.11. S50/1.00 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.12. S50/1.00 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.11. S50/1.00 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.12. S50/1.00 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.3. S50/1.25 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø16

Çekme donatısı : 2Ø16 + 2Ø8

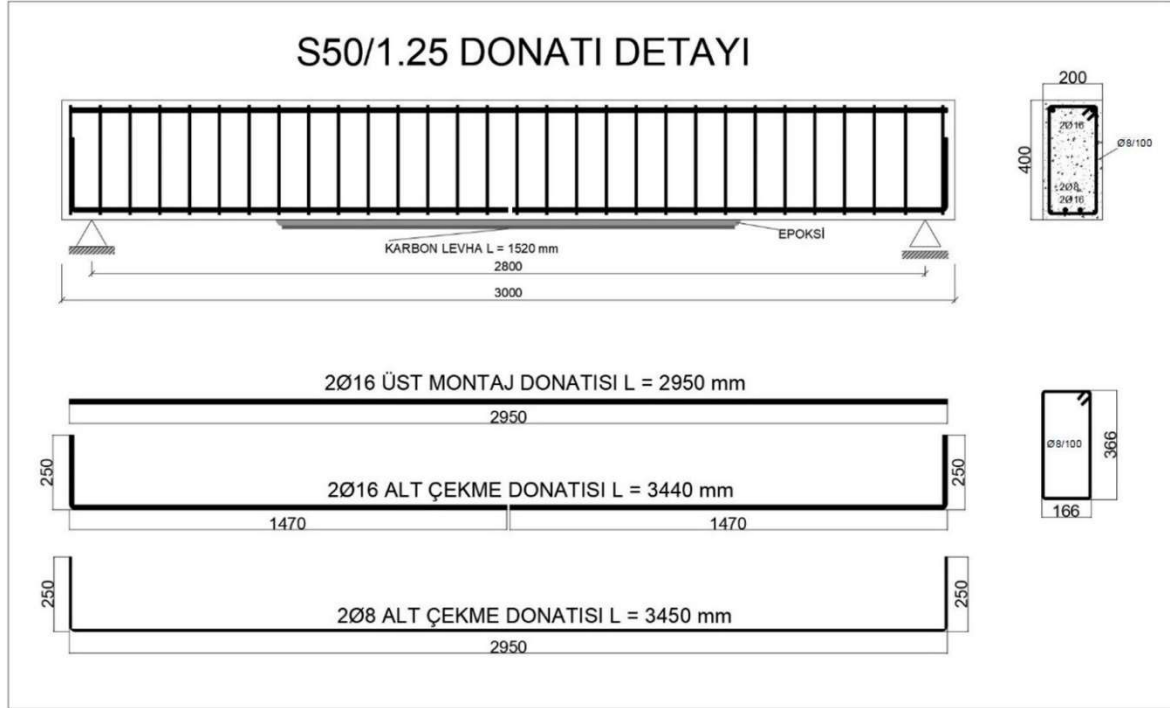
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø16) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 50 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 1,25Lb (1,25x38x16x2 = 1520 mm)

S50/1.25 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.13. S50/1.25 deney elemanının donatı detayı



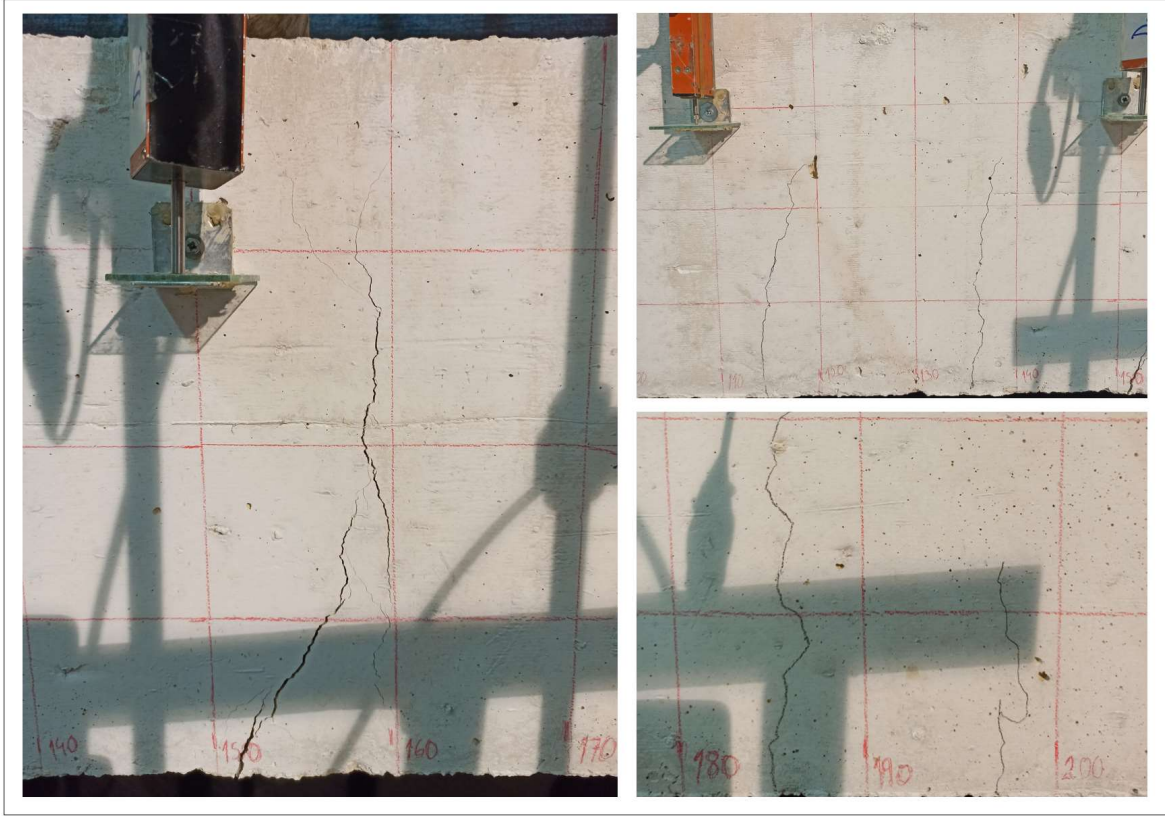
Resim 4.13. S50/1.25 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

- 20 kN yükte kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 23 kN yükte ilk çatlak 1370 mm’de 0,01 mm genişliğinde kılcal eğilme çatlağı olarak gözlenmiştir.
- 27 kN yükte 1600 mm’de 0,05 mm genişliğinde yaklaşık 270 mm boyunda eğilme çatlağı oluşmuştur.
- 30 kN yükte maksimum çatlak genişliği 0,3 mm olarak gözlenmiştir.
- 33 kN yükte maksimum çatlak boyu 300 mm maksimum çatlak genişliği 0,35 mm olarak gözlenmiştir. 1350 mm’de ve 1600 mm’deki 2 adet çatlakla eleman yük almaya devam etmiştir.
- 39 kN yükte maksimum çatlak genişliği 0,5 mm olarak gözlenmiştir.
- 42 kN yükte 1500 mm’de maksimum çatlak genişliği 1,5 mm olarak gözlenmiş olup karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- Karbon fiber plaka sıyrılma yapmış ve yk aniden 44 kN’dan 26 kN’a dşmştir.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



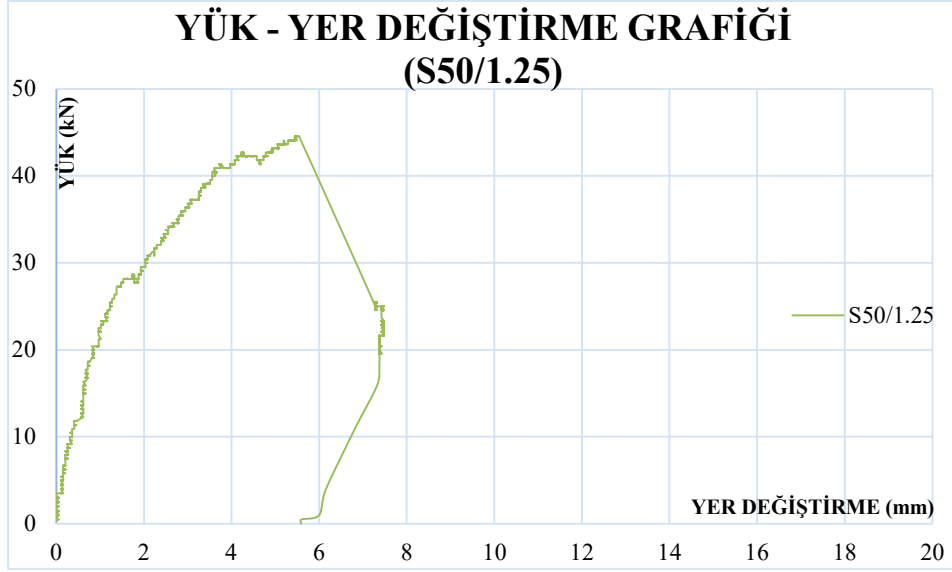
Resim 4.14. S50/1.25 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.15. S50/1.25 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.14. S50/1.25 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.15. S50/1.25 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.4. S50/1.50 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø16

Çekme donatısı : 2Ø16 + 2Ø8

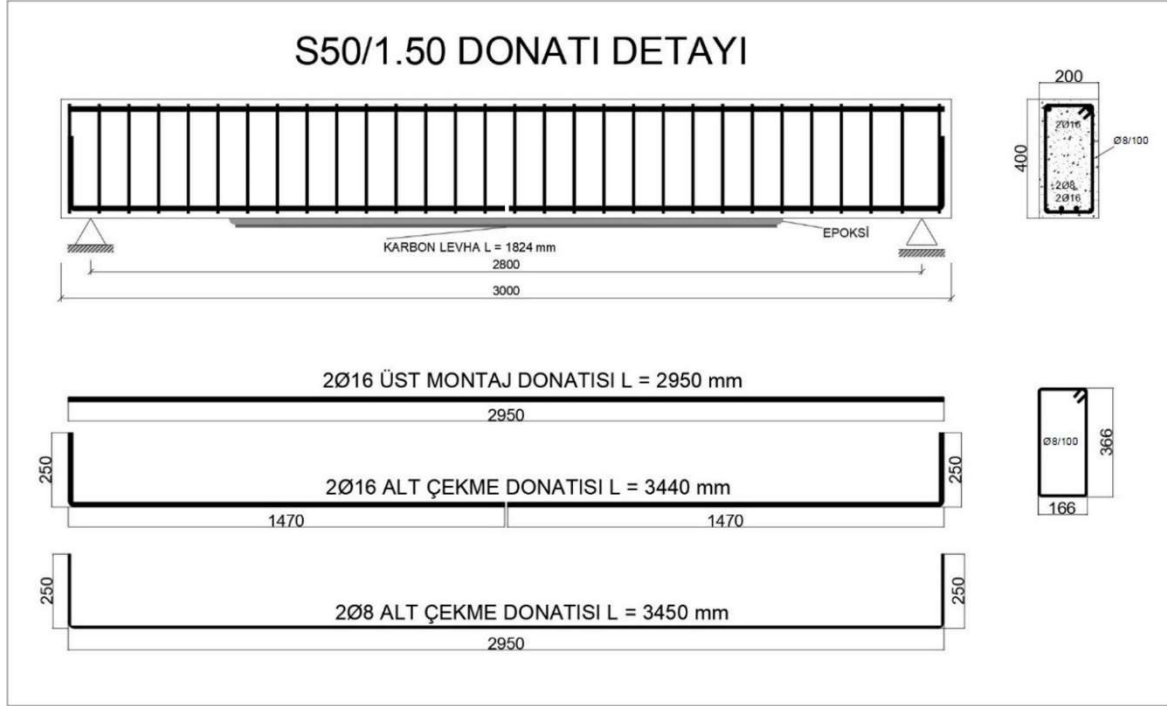
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø16) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 50 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 1,50Lb (1,50x38x16x2 = 1824 mm)

S50/1.50 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.16. S50/1.50 deney elemanının donatı detayı



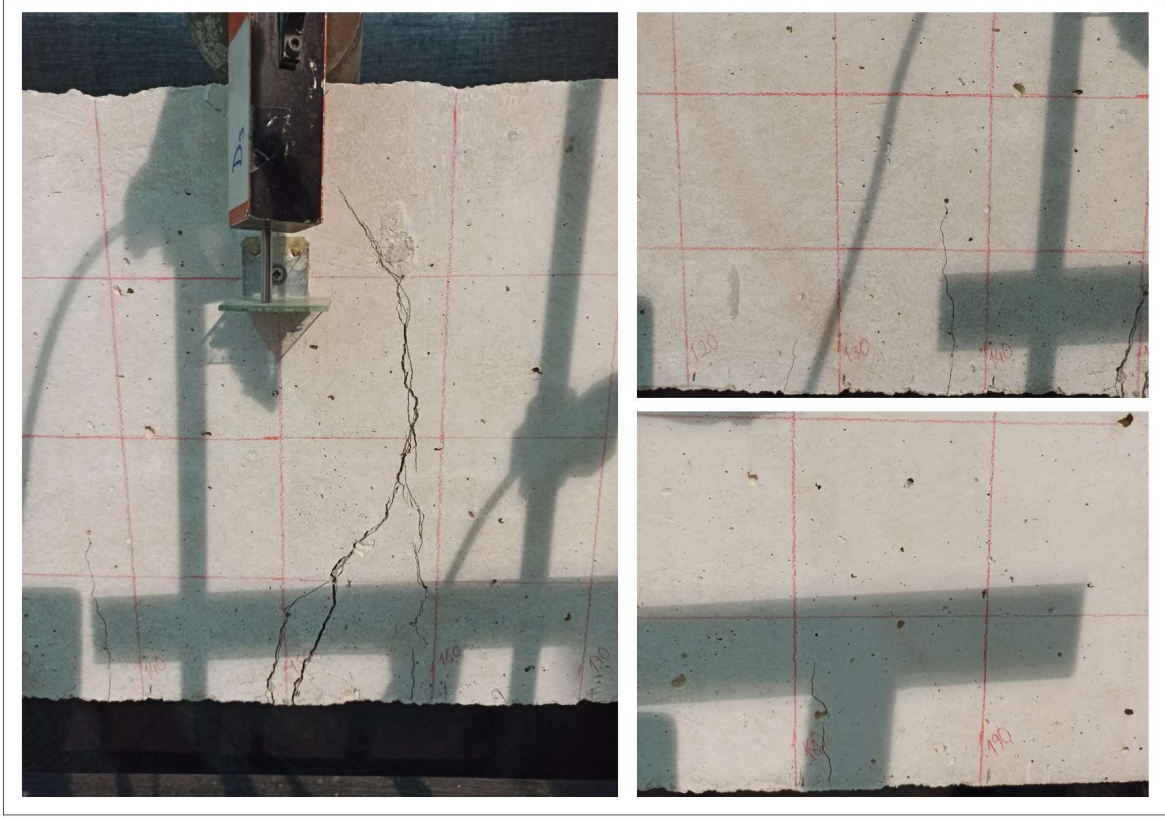
Resim 4.16. S50/1.50 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

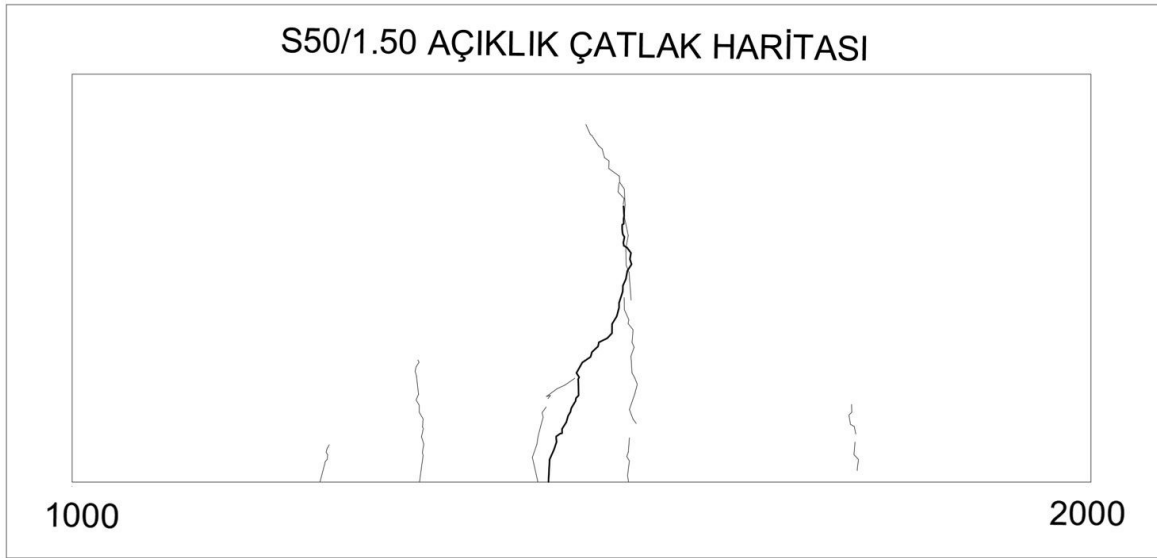
- 25 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 26 kN yükte ilk çatlak 1600 mm’de kılcal eğilme çatlağı olarak gözlenmiştir.
- 29 kN yükte ikinci çatlak 1400 mm’de kılcal eğilme çatlağı olarak gözlenmiştir.
- 31 kN yükte 1500 mm’de başka bir çatlak oluşmuştur.
- 35 kN yükte çatlaklar kılcal düzeyde olup yaklaşık 0,1 mm genişliğinde gözlenmiştir.
- 36 kN yükte 1800 mm’de başka bir çatlak oluşmuştur.
- 40 kN yükte 1600 mm’deki çatlak 0,2 mm olarak genişlemiştir.
- 42 kN yükte 1600 mm’deki eğilme çatlağının genişliği 1 mm olarak kirişin st bölgelerine ilerlemiştir. Karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- Karbon fiber plaka sıyrılma yapmış ve yk aniden 43 kN’dan 27 kN’a dşmştir.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



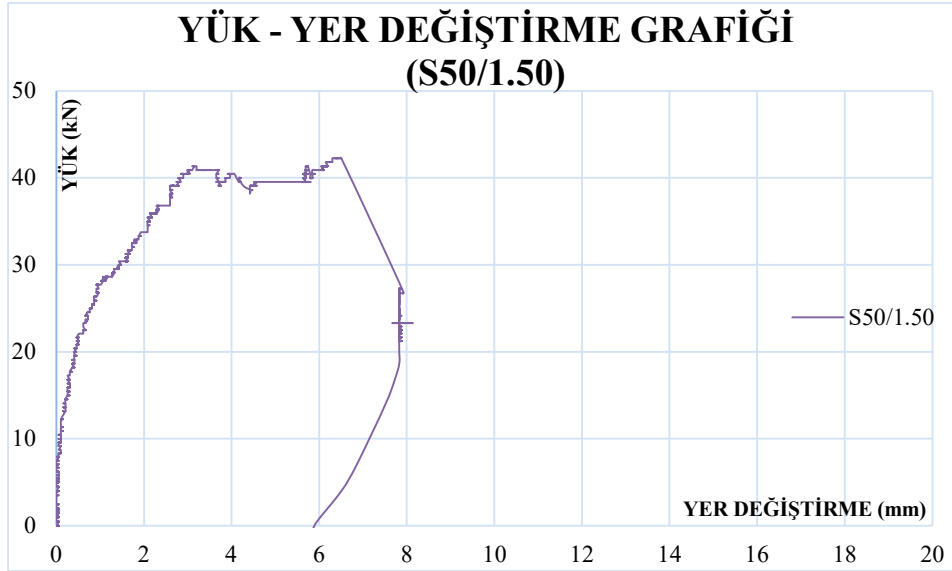
Resim 4.17. S50/1.50 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.18. S50/1.50 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.17. S50/1.50 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.18. S50/1.50 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.5. S100/0.75 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø22

Çekme donatısı : 2Ø22 + 2Ø8

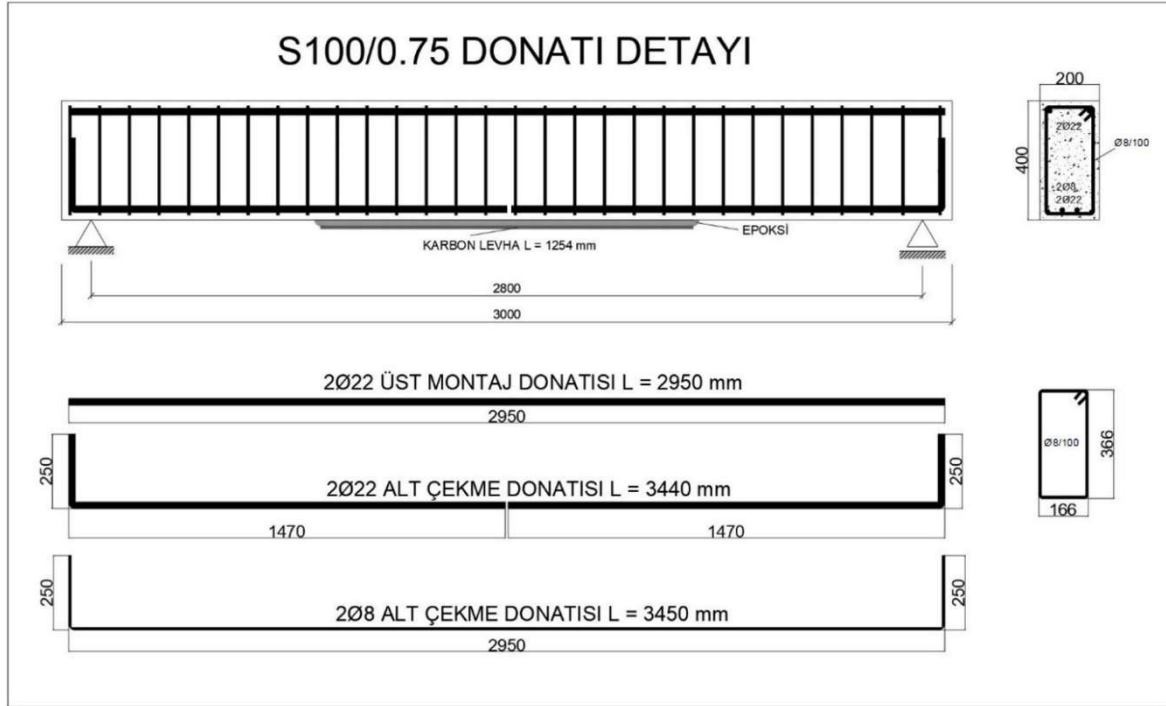
Etriye donatısı : 3Ø8/100

Çekme donatısı (Ø22) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 100 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 0,75Lb ( $0,75 \times 38 \times 22 \times 2 = 1254$  mm)

S100/0.75 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



Şekil 4.19. S100/0.75 deney elemanının donatı detayı



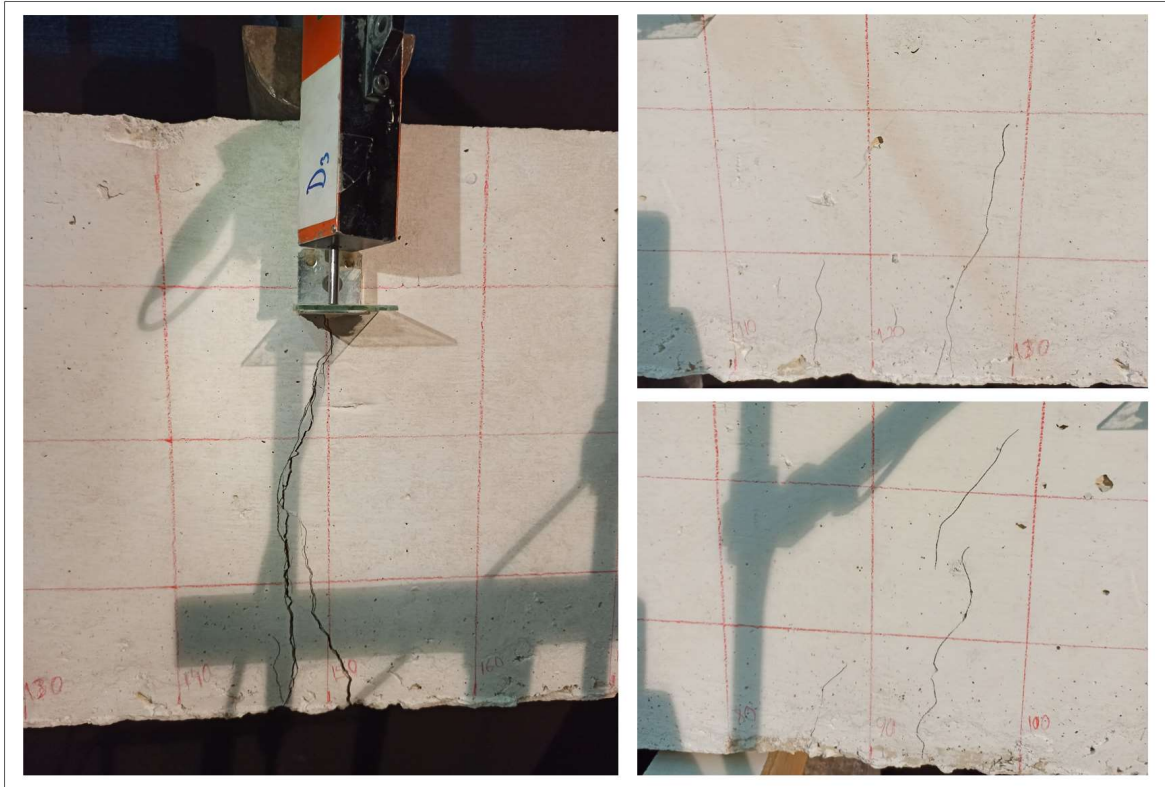
Resim 4.19. S100/0.75 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

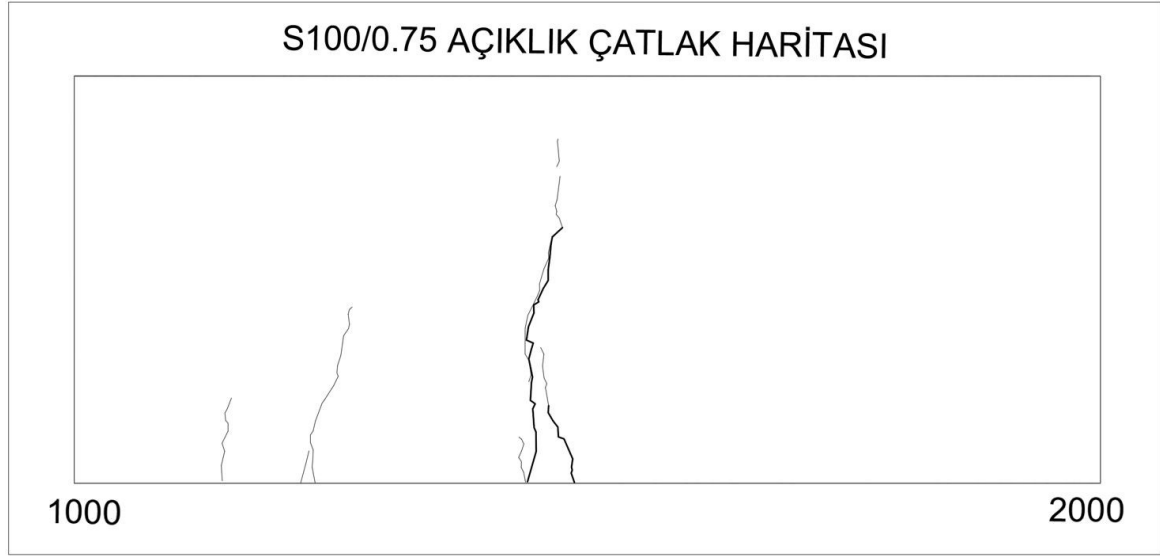
- 30 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 33 kN yükte ilk çatlak 1200 mm ile 1300 mm arasında kılcal eğilme çatlağı olarak gözlenmiştir. 1480 mm’de ikinci çatlak oluşmuştur.
- 36 kN yüke kadar çatlaklar kirişin orta kısmının solunda gerçekleşmiş olup maksimum çatlak genişliği 0,2 mm’dir.
- 40 kN yükte 1480 mm’deki çatlak 0,5 mm olarak genişlemiştir.
- 50 kN yükte 950 mm’de genişliği yaklaşık 0,1 mm olan yeni bir çatlak oluşmuştur.
- 52 kN yükte 1480 mm’deki çatlak 0,7 mm olarak genişlemiştir.
- 53 kN yükte 1480 mm’deki çatlak 1,0 mm olarak genişlemiştir. 850 mm’de kılcal çatlak gözlenmiştir.
- Yük aniden 55 kN’dan 50 kN’a dşmştir.
- Eleman tekrar yk almaya devam etmiş yük 50 kN’dan 53 kN’a çıkmıştır. Karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- Karbon fiber plaka sıyrılma yapmış ve yk aniden 53 kN’dan 23 kN’a dşmştir.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



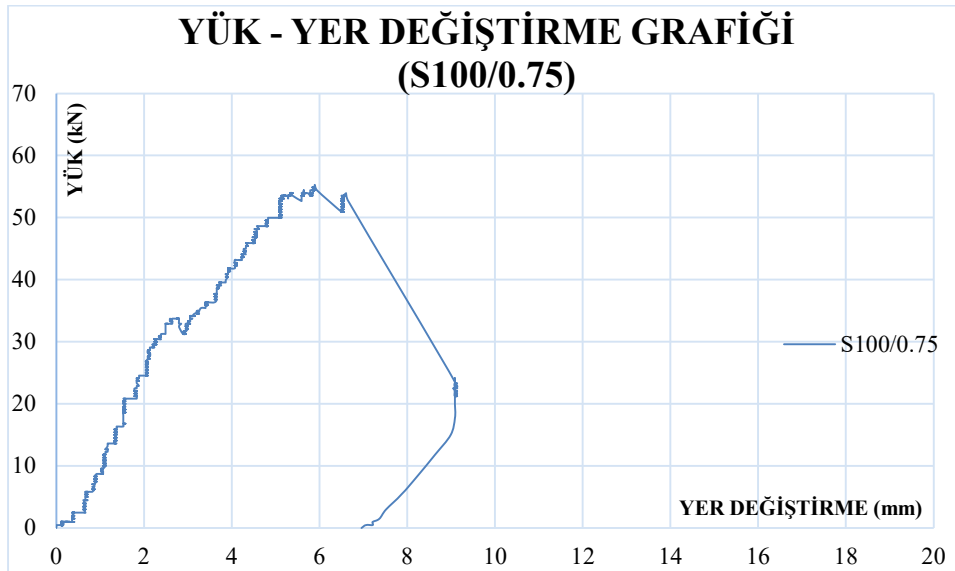
Resim 4.20. S100/0.75 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.21. S100/0.75 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.20. S100/0.75 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.21. S100/0.75 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.6. S100/1.00 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø22

Çekme donatısı : 2Ø22 + 2Ø8

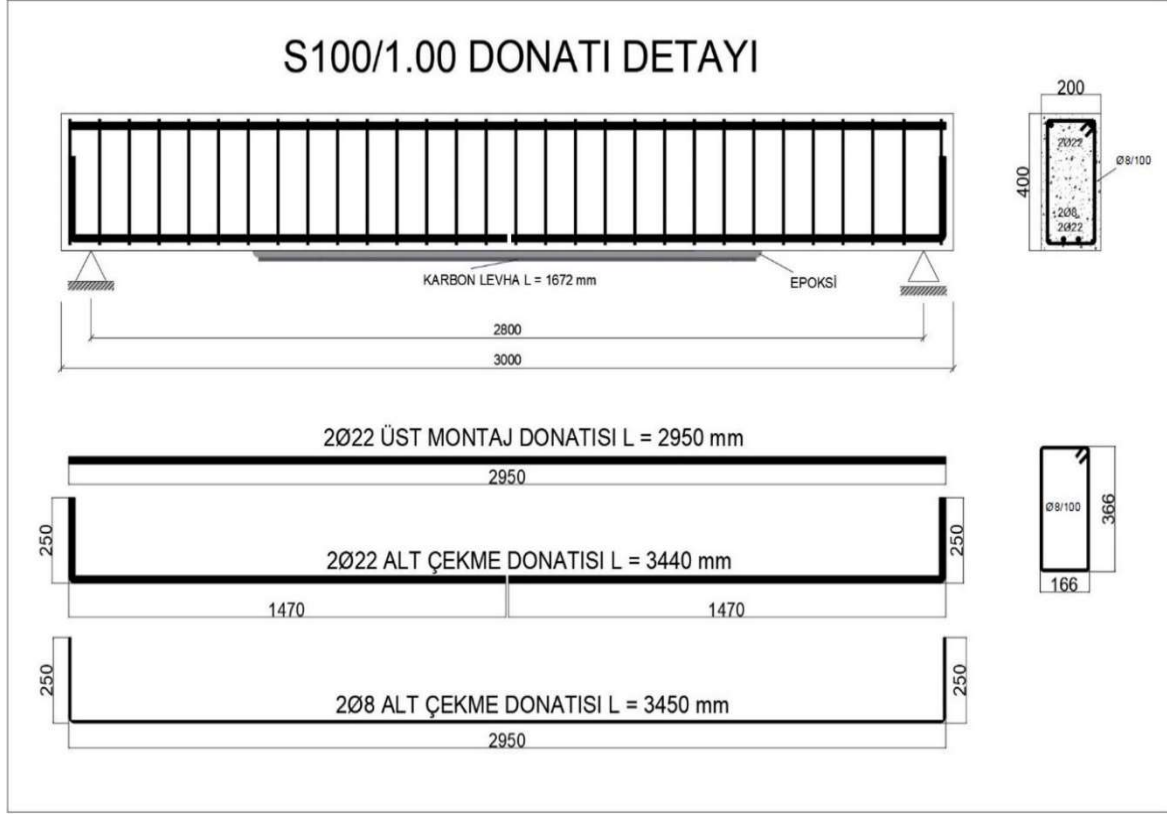
Etriye donatısı : 3Ø8/100

Çekme donatısı (Ø22) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 100 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 1,00Lb (1,00x38x22x2 = 1672 mm)

S100/1.00 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.22. S100/1.00 deney elemanının donatı detayı



Resim 4.22. S100/1.00 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

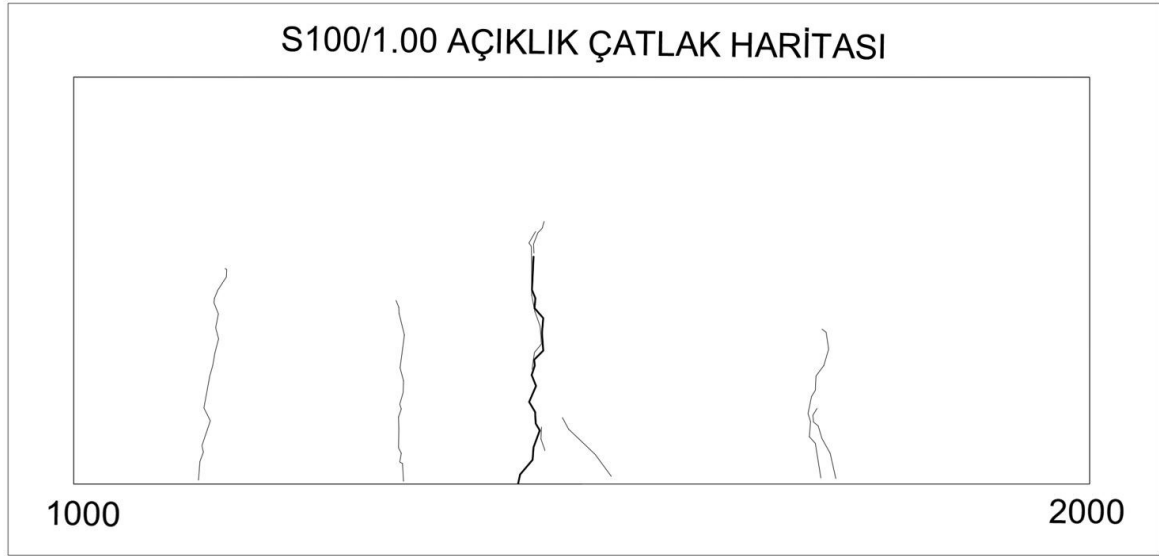
- 35 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 38 kN yükte ilk çatlak 1150 mm'de kılcal eğilme çatlakları olarak gözlenmiştir.
- 42 kN yükte 1750 mm'de ve 1350 mm'de kılcal düzeyde eğilme çatlakları oluşmuştur.
- Yük 38 kN'a düşmüş olup 1480 mm'de 0,1 mm genişliğinde çatlak gözlenmiştir.
- Eleman tekrardan yük almaya devam etmiştir.
- 46 kN yükte 1480 mm'deki çatlak 0,2 mm olarak genişlemiştir.
- 48 kN yükte 1750 mm'deki çatlak genişlemeye başlamıştır.
- 50 kN yükte 1480 mm'deki çatlak 0,3 mm olarak genişlemiştir.
- 53 kN yükte 1480 mm'deki çatlak kiriş üst yüzeyine doğru ilerlemiştir.
- 54 kN yükte 1480 mm'deki çatlak 0,5 mm olarak genişlemiştir.
- Yük 54 kN'da sabit devam ederken 1480 mm'deki çatlak 1,0 mm olarak genişlemiştir. Karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- Karbon fiber plaka sıyrılma yapmış ve yük aniden 56 kN'dan 24 kN'a düşmüştür.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



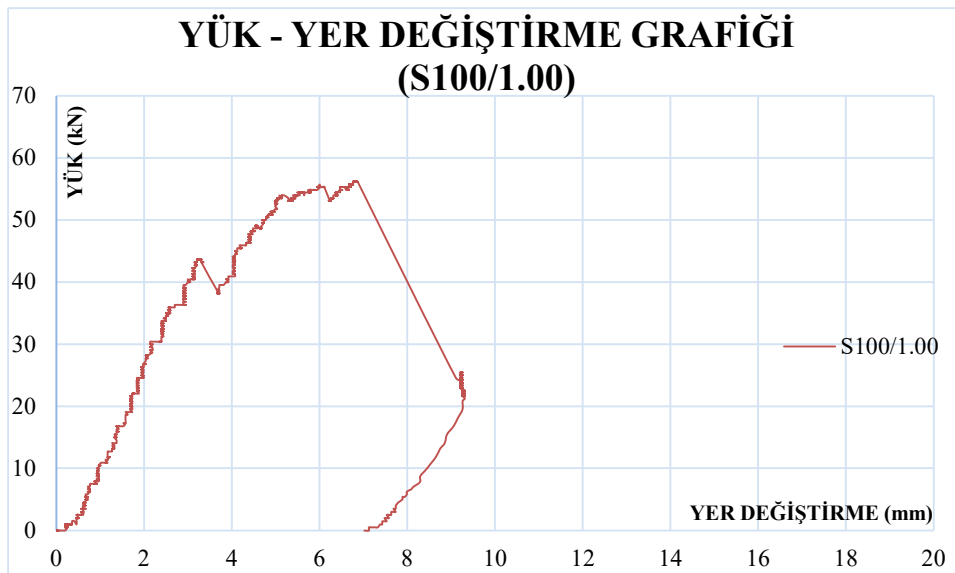
Resim 4.23. S100/1.00 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.24. S100/1.00 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.23. S100/1.00 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.24. S100/1.00 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.7. S100/1.25 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø22

Çekme donatısı : 2Ø22 + 2Ø8

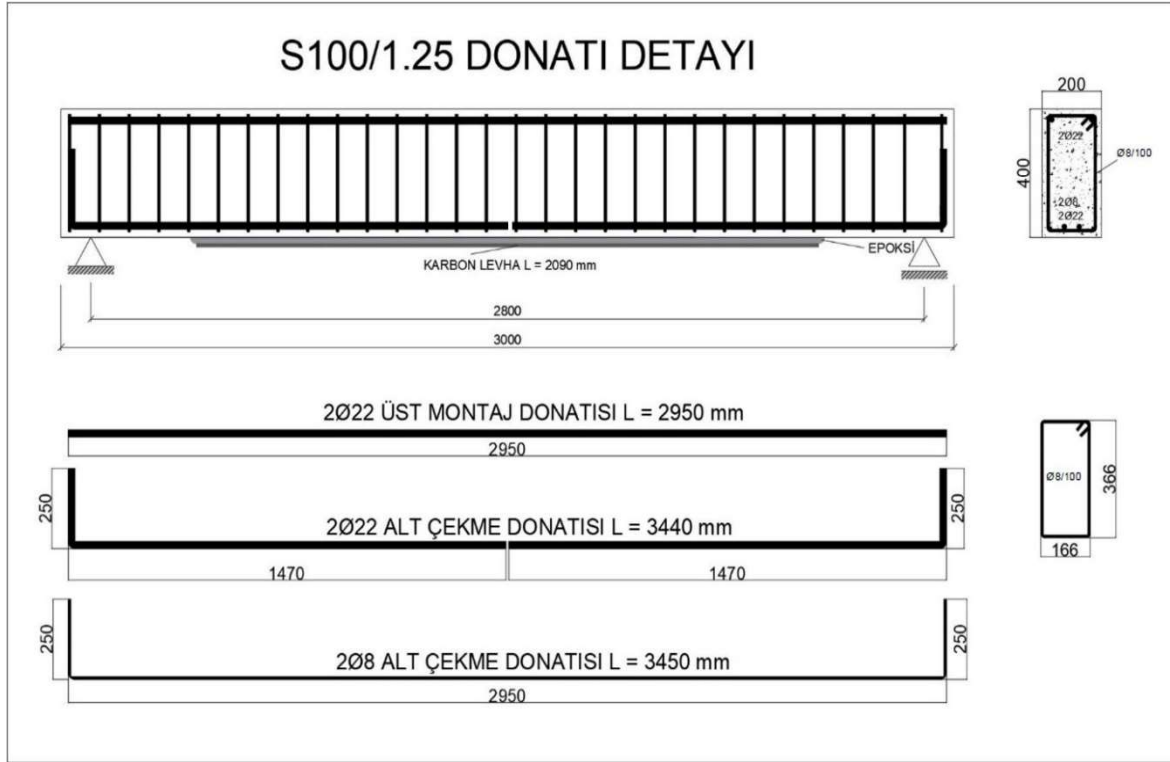
Etriye donatısı : 30Ø8/100

Çekme donatısı (Ø22) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 100 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 1,25Lb (1,25x38x22x2 = 2090 mm)

S100/1.25 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.25’de gösterilmektedir.



Şekil 4.25. S100/1.25 deney elemanının donatı detayı



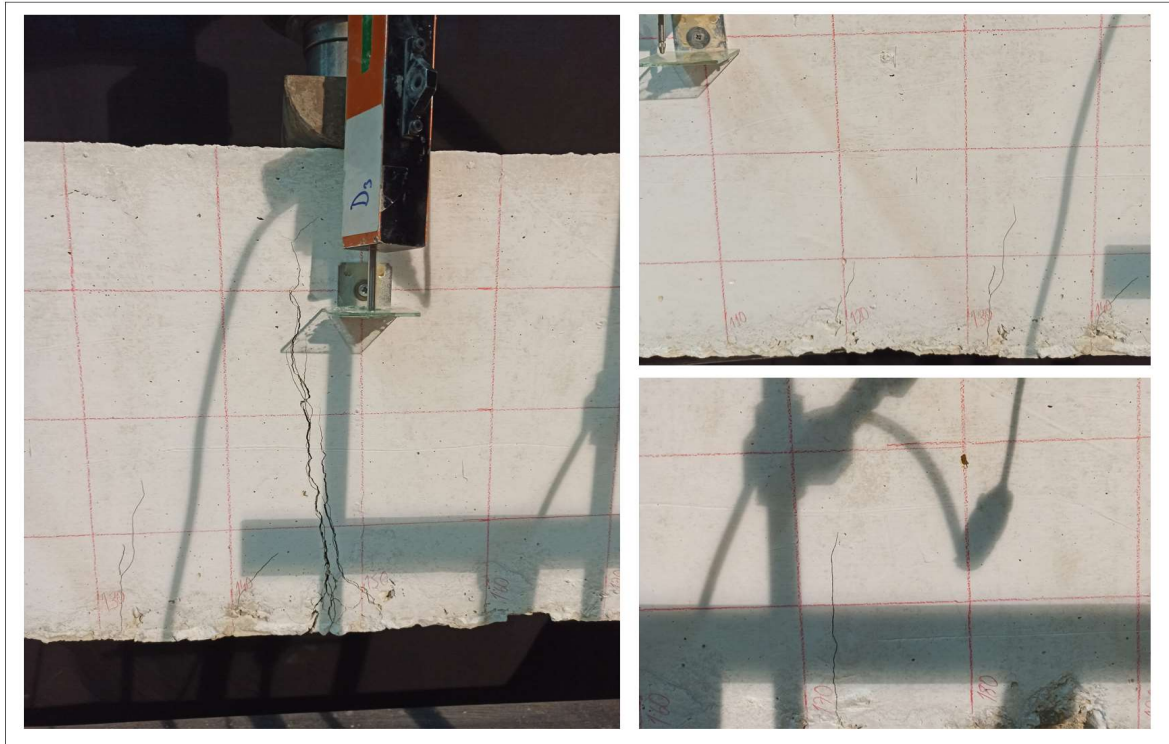
Resim 4.25. S100/1.25 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

Deneyde gerçekleşen olaylar:

- 30 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 35 kN yükte 1350 mm'de ve 1750 mm'de kılcal eğilme çatlakları gözlenmiştir.
- 38 kN yükte 1480 mm'de eğilme çatlağı oluşmuştur.
- 40 kN yükte 1480 mm'deki eğilme çatlağının genişliği 0,1 mm'dir.
- 48 kN yükte 1480 mm'deki eğilme çatlağı genişlemeye başlamıştır. Diğer çatlaklarda bir gelişme olmamıştır.
- 51 kN yükte 1400 mm'de boyuna çatlak gözlenmiştir.
- Kiriş ortasındaki ana çatlak ek çatlaklarla beraber ilerlemiştir.
- 57 kN yükte 1480 mm'deki eğilme çatlağının genişliği 0,3 mm olarak gözlenmiştir.
- 60 kN yükte 1480 mm'deki eğilme çatlağının genişliği 0,5 mm olarak gözlenmiştir. Karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- Karbon fiber plaka sıyrılma yapmış ve yük aniden 58 kN'dan 29 kN'a düşmüştür.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



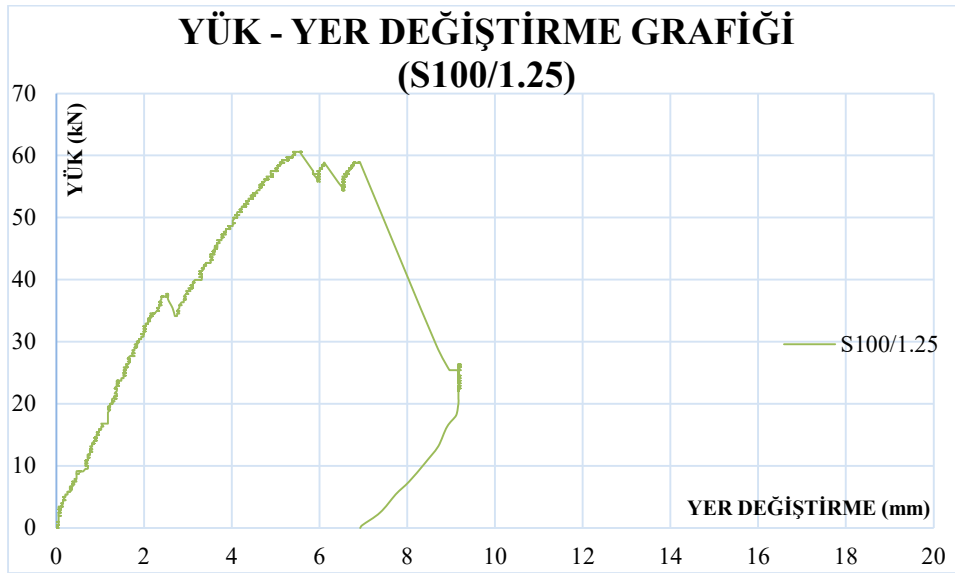
Resim 4.26. S100/1.25 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.27. S100/1.25 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.26. S100/1.25 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.27. S100/1.25 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği

#### 4.2.8. S100/1.50 deney elemanı

Basınç donatısı : 2Ø22

Çekme donatısı : 2Ø22 + 2Ø8

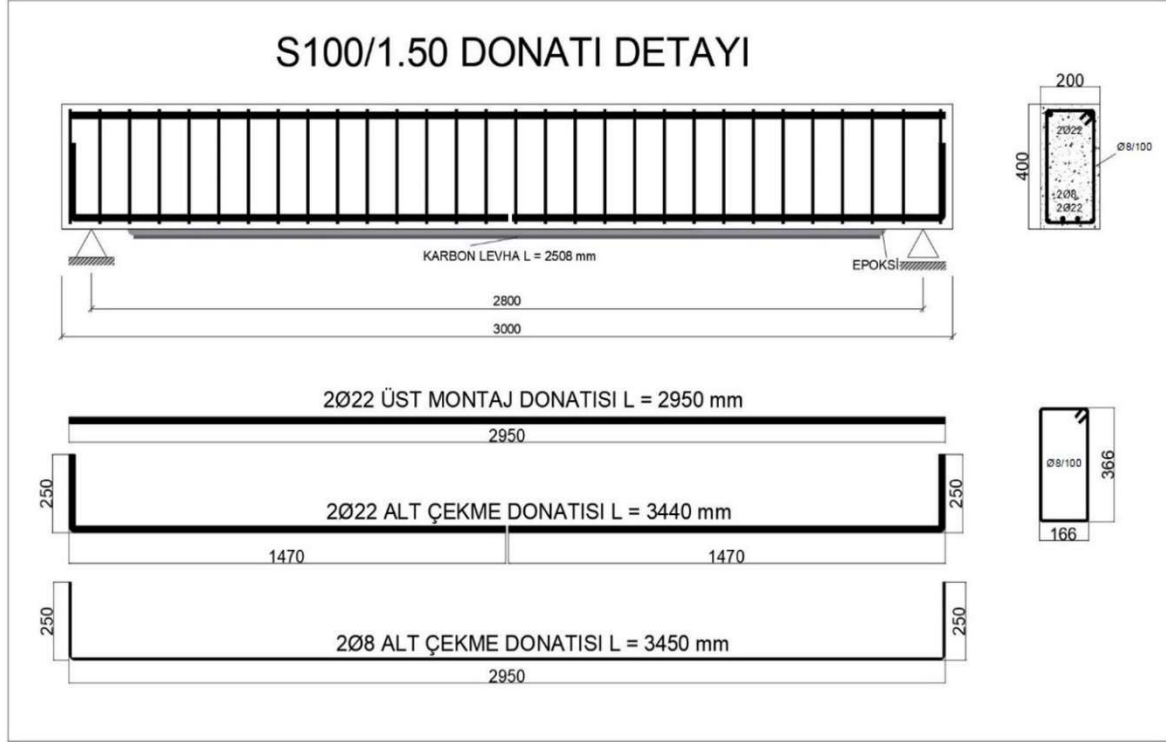
Etriye donatısı : 3Ø8/100

Çekme donatısı (Ø22) süreksizlik durumu : var

Karbon plaka kalınlığı ve genişliği : 1,2 mm / 100 mm

Karbon Plaka Bindirme Boyu : 1,50Lb (1,50x38x22x2 = 2508 mm)

S100/1.50 deney elemanına ait donatı ve karbon fiber plaka yerleşimi Şekil 4.28’de gösterilmektedir.



Şekil 4.28. S100/1.50 deney elemanının donatı detayı



Resim 4.28. S100/1.50 deney elemanının deney sistemine yerleştirilmiş hali

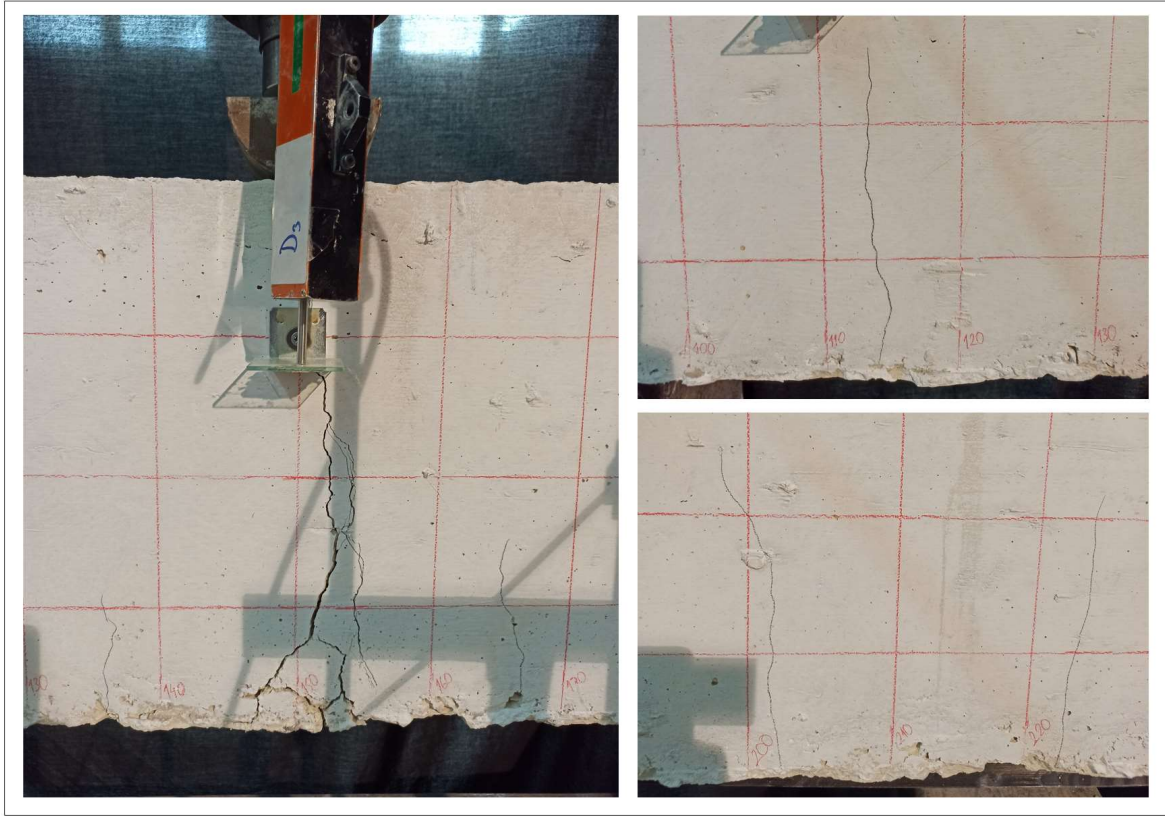
Deneyde gerçekleşen olaylar:

- 30 kN yüke kadar elemanda herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.
- 35 kN yükte ilk çatlak 1350 mm'de 0,05 mm genişliğinde 180 mm uzunluğunda oluşmuştur.
- 38 kN yükte ikinci çatlak 1530 mm'de 0,25 mm genişliğinde 300 mm uzunluğunda oluşmuştur.
- 40 kN yükte başka bir çatlak 1670 mm'de 0,1 mm genişliğinde 150 mm uzunluğunda oluşmuştur.
- 45 kN yükte başka bir çatlak 1100 mm'de 0,1 mm genişliğinde 210 mm uzunluğunda oluşmuştur.
- 50 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1530 mm'de 0,35 mm maksimum çatlak boyu 390 mm olarak gözlenmiştir.
- 53 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1530 mm'de 0,4 mm maksimum çatlak boyu 390 mm olarak gözlenmiştir.
- 57 kN yükte 1800 mm'de kılcal eğilme çatlağı oluşmuştur.

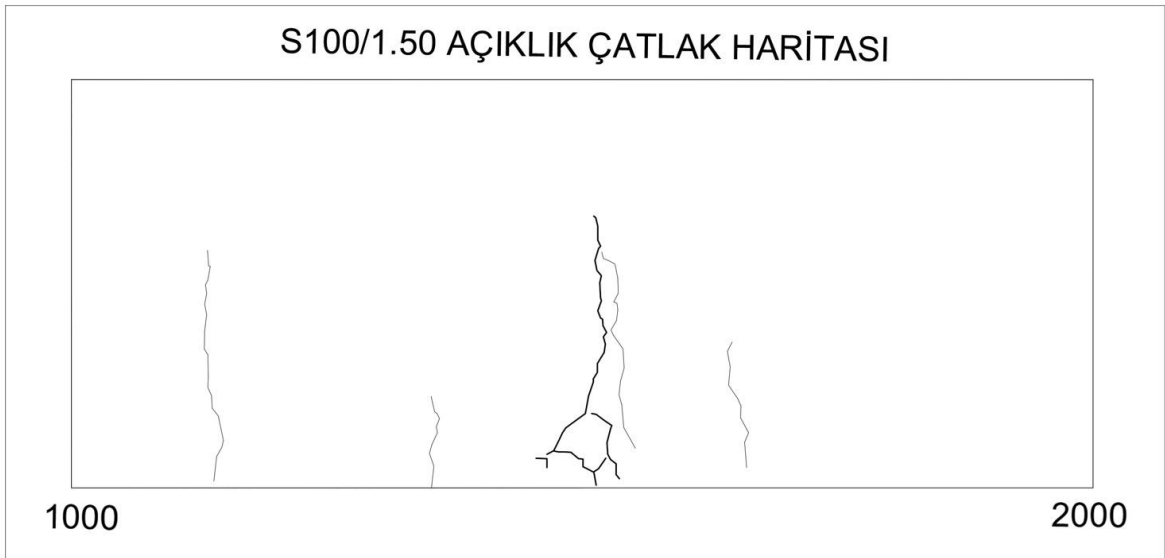
- 60 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1530 mm’de 0,5 mm maksimum çatlak boyu 390 mm olarak gözlenmiştir.
- 2000 mm’de başka bir çatlak oluşmuştur.
- Yük düşmeye başlamış olup 54 kN yükte 1530 mm’deki çatlak 0,8 mm olarak genişlemiştir.
- Yük tekrar artışa geçmiş olup 57 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1530 mm’de 1,5 mm olarak gözlenmiştir. Karbon fiber plakada çatırdama sesleri meydana gelmeye başlamıştır.
- 64 kN yükte maksimum çatlak genişliği 1530 mm’de 2,0 mm olarak gözlenmiştir.
- Karbon fiber plaka sıyrılma yapmış ve yük aniden 65 kN’dan 24 kN’a düşmüştür.
- Yük boşaltılmaya başlanmış olup deneye son verilmiştir.



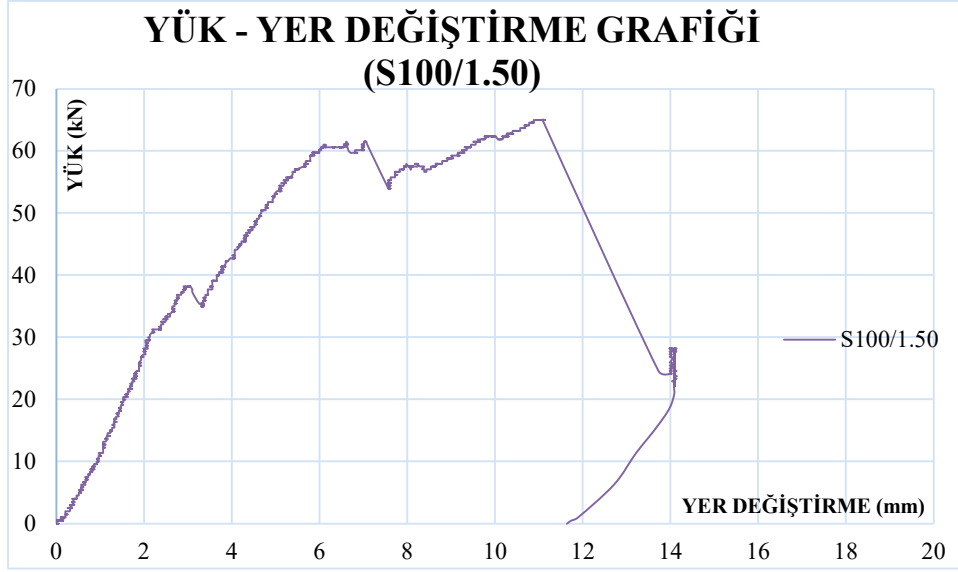
Resim 4.29. S100/1.50 deney elemanının deney sonrası durumu



Resim 4.30. S100/1.50 deney elemanının yakın görünüş çatlak durumu



Şekil 4.29. S100/1.50 deney elemanının açıklık çatlak haritası



Şekil 4.30. S100/1.50 deney elemanına ait yük-yer değiştirme grafiği



## 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1. Genel

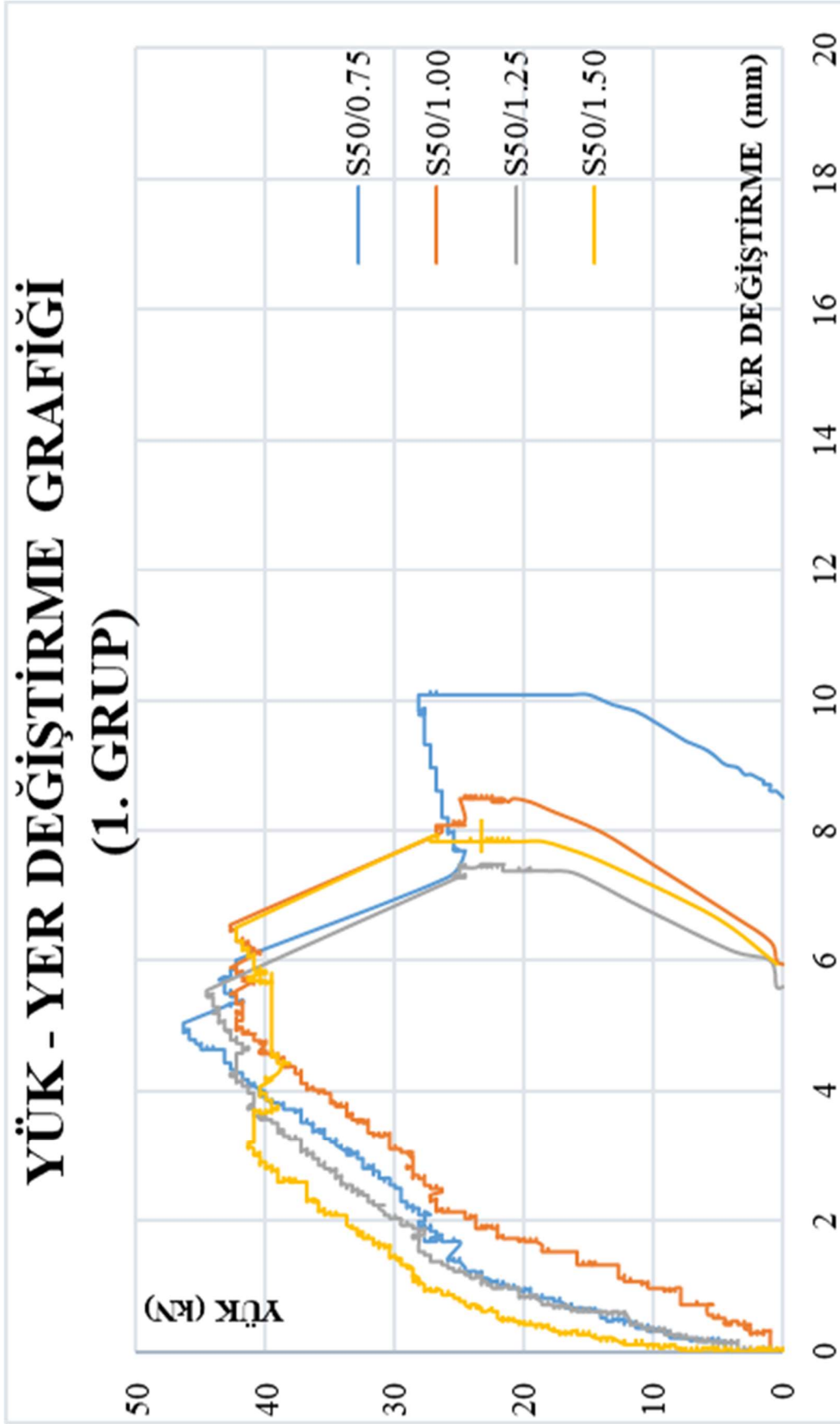
Bu bölümde deneylerde elde edilen gözlemler genel olarak yorumlanmış ve aktarılmıştır. Deney elemanlarında dayanım, süneklik, enerji dönüştürme kapasitesi ve rijitlik gibi kriterlere ait değerlendirmeler Bölüm 5.2’de yer almaktadır.

Öncelikle karbon fiber plakalar ile betonarme kiriş elemanları içerisindeki donatıların kenetlenmesi ve karbon plakadan donatıya yük aktarımının sağlanıp sağlanamayacağının deneysel olarak incelenmesi amacıyla oluşturulan 10 adet deney elemanının 2 adedi referans eleman ve 8 adedi karbon fiber plakayla güçlendirme yapılan elemandır.

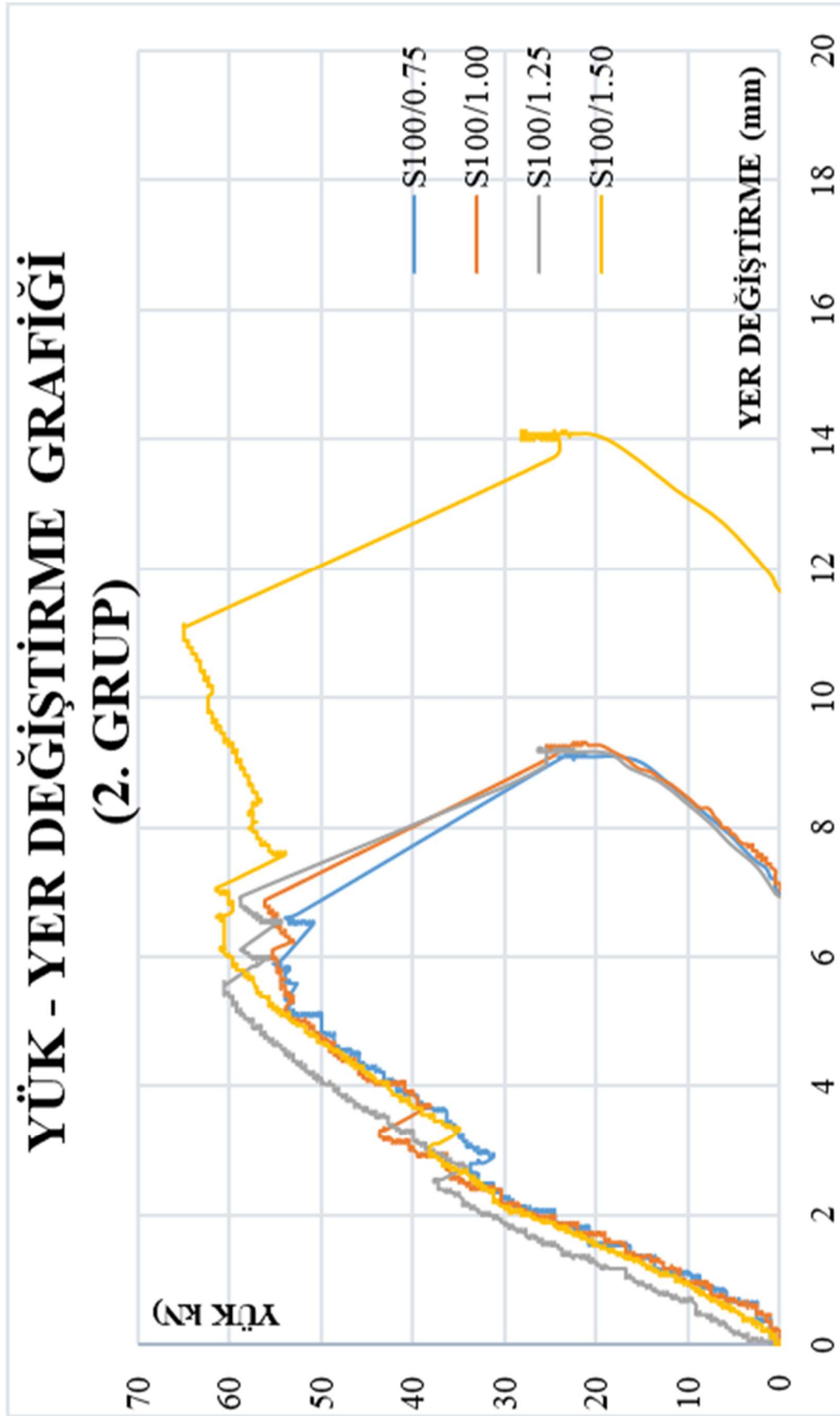
Tüm güçlendirme deneylerinde gerçekleşen tip davranış, kiriş elemanlarının çekme bölgesinde yer alan ve sürekli olarak devam eden 2 adet Ø8 donatısının belli bir yüke kadar elemanın yük taşımasını sağlaması, karbon fiber plakaların bir miktar yük taşıyıp çatırdama sesleriyle elemanın bir ucundan sıyrma yapması ve yükün aniden düşerek deformasyonun artması davranışdır.

Şekil 5.1 ve 5.2’de karbon plaka yapıştırılan 1. grup ve 2. grup elemanların kendi aralarında yük-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere karbon plaka bindirme boylarındaki değişim dayanımda önemli bir etkiye sahip olmamıştır.

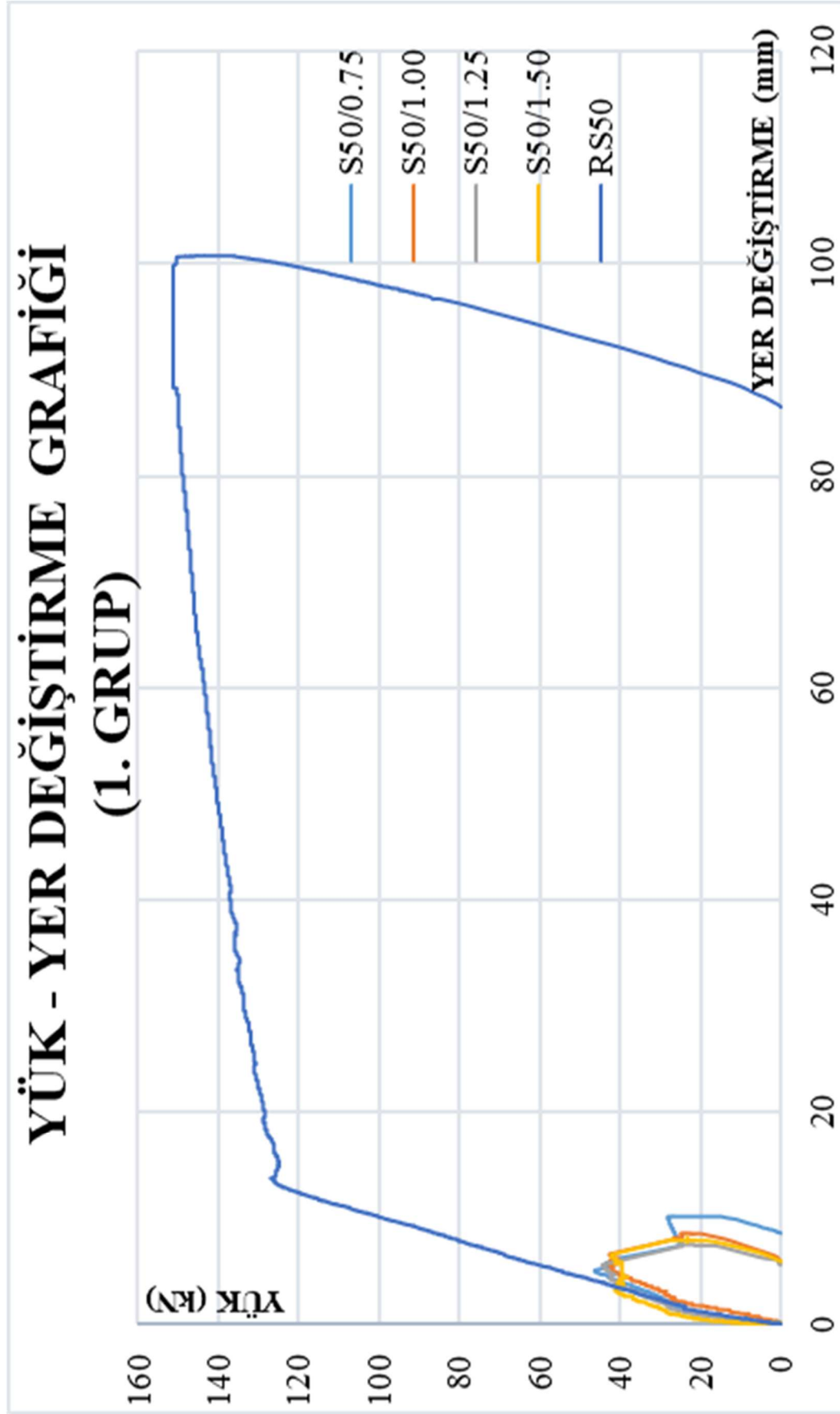
Şekil 5.3 ve 5.4’de 1. grup ve 2. grup olmak üzere karbon plaka yapıştırılan elemanlar ve referans deney elemanlarının toplu halde yük-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere karbon plaka yapıştırılan elemanlar dayanım, süneklik ve enerji dönüştürme kapasitesi gibi kriterler açısından referans elemana göre düşük değerlere sahip olmuştur. Bu durumun ana sebebi karbon plaka yapıştırılan elemanlarda sıyrılma davranışı meydana gelmesidir.



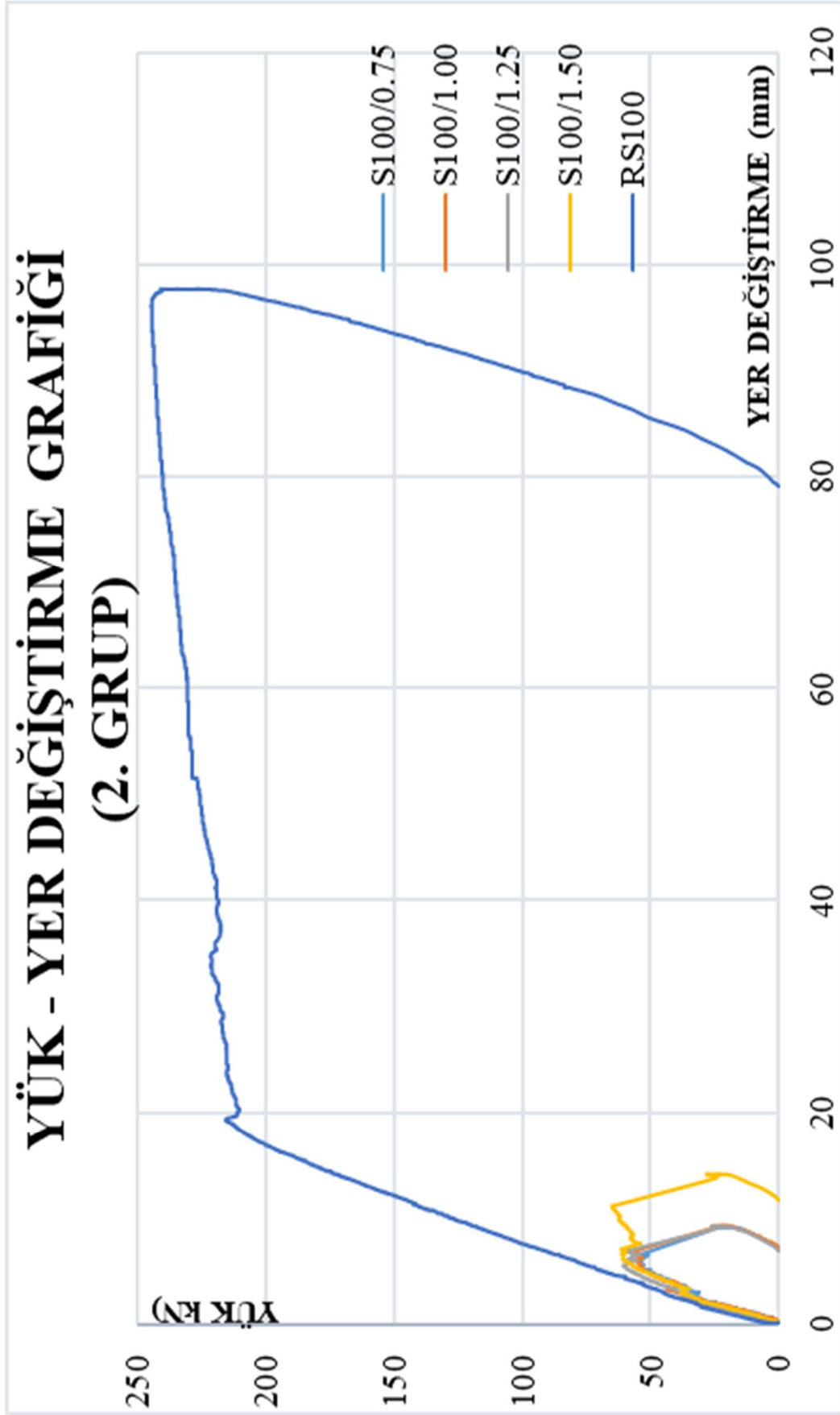
Şekil 5.1. Karbon plaka yapıştırılan 1. grup elemanların yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 5.2. Karbon plaka yapıştırılan 2. grup elemanların yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 5.3. 1. gruptaki tüm elemanların yük-yer değiştirme grafikleri



Şekil 5.4. 2. gruptaki tüm elemanların yük-yer değiştirme grafikleri

Karbon fiber plakaların elemanın bir ucundan sıyırılması durumu güçlendirme elemanlarının hepsinde görülmüştür. Bu davranış deney esnasında gevrek bir şekilde gerçekleşmiştir. Karbon fiber plaka sıyırılma yapmadan hemen önce çatırdama sesleriyle sıyırılma yapacağını belli etmiştir. Resim 5.1’de karbon fiber plakanın sıyırıldığı bir deney elemanı görülmektedir.



Resim 5.1. Sıyırılma yapan karbon fiber plaka

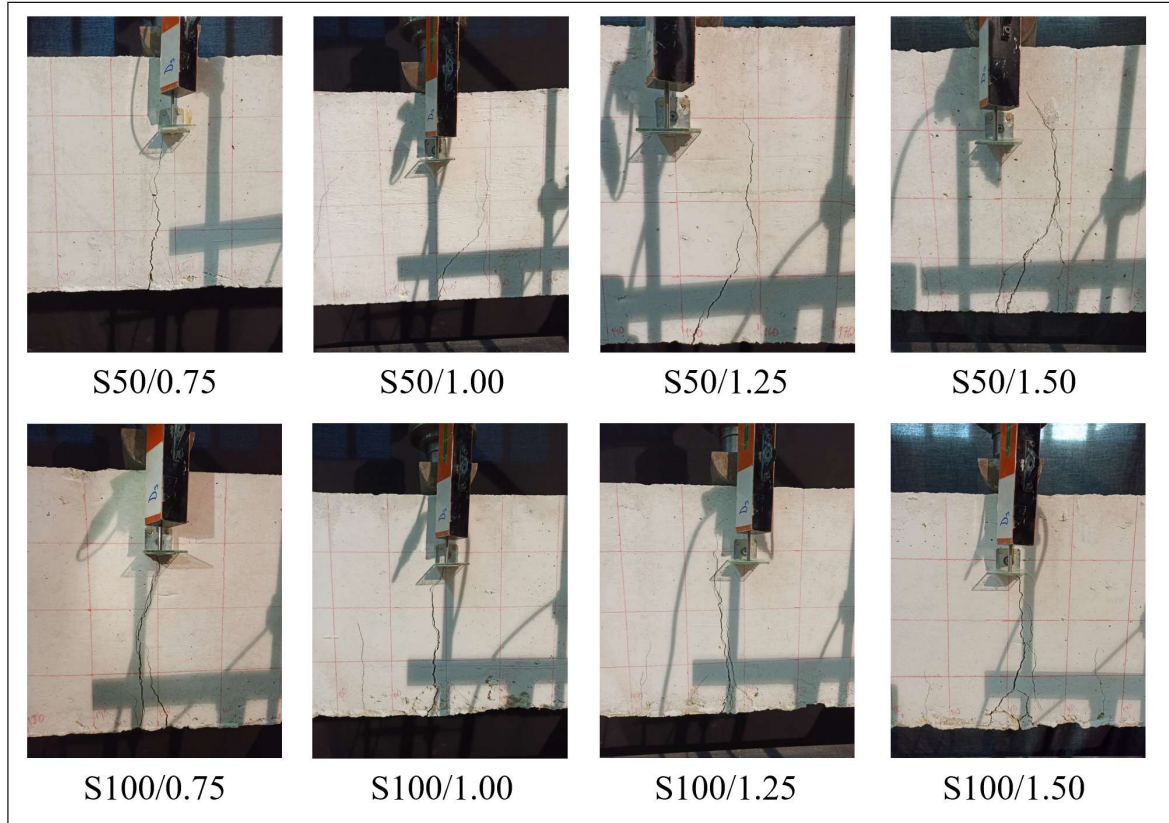
Ayrıca sıyırılma olayı gerçekleştikten ve karbon fiber plakalar kirişin altından çıkarıldıktan sonra yapışan yüzey incelenmiş olup sıyırılma olan kısımdaki yüzeylerin beton ve epoksi macunu kalıntısı olmadan pürüzsüz bir şekilde çıktığı, ancak karbon fiber plakaların orta bölgesinde beton kalıntısı olduğu gözlemlenmiştir. Sıyırılma olan yüzeylerdeki epoksi harcının beton yüzeyde kalmış olması ve karbon fiber plakalarda herhangi bir epoksi harcı kalıntısı olmaması güçlendirme yapılırken karbon fiber plakaların sıyırılma yapmaması için gerekli önlemlerin alınması gerektiğini göstermektedir.

Resim 5.2’de karbon fiber plakaların deney sonrasındaki durumu yer almaktadır.



Resim 5.2. Deney sonrası karbon fiber plakaların durumları

Ayrıca güçlendirme elemanlarının hemen hemen hepsinde gözlenen bir başka olay, donatının 10 mm süreksiz olduğu ve tekil yüklemenin yapıldığı kirişin orta noktasında belirgin ana eğilme çatlaklarının oluşmasıdır. Bunun dışında güçlendirme elemanlarında belirgin olan başka çatlaklar oluşmamıştır. Resim 5.3’de güçlendirme deney elemanlarının orta bölgesindeki ana eğilme çatlakları gösterilmiştir.



Resim 5.3. Güçlendirme elemanları ana eğilme çatlakları

## 5.2. Temel Ölçütlere Göre Değerlendirmeler

### 5.2.1. Dayanım

Deney elemanlarının dayanım kriterine göre değerlendirilmesi için elemanların deney esnasında bilgisayar ortamına aktarılan yük-yer değiştirme grafiklerinden yararlanılmıştır. Her bir deney elemanının taşıdığı maksimum yük değerleri baz alınarak Çizelge 5.1 ve 5.2’de kıyaslamalar yapılmıştır.

Çizelge 5.1. 50 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dayanım değerleri ve referans elemana göre göreceli dayanım oranları

| Deney Elemanı | Tip         | Maksimum Dayanım (kN) | Göreceli Dayanım Referans Elemana Göre (kN/kN) |
|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------------------------|
| RS50          | Referans    | 151,30                | 1,00                                           |
| S50/0.75      | Güçlendirme | 46,36                 | 0,31                                           |
| S50/1.00      | Güçlendirme | 42,73                 | 0,28                                           |
| S50/1.25      | Güçlendirme | 44,55                 | 0,29                                           |
| S50/1.50      | Güçlendirme | 42,27                 | 0,28                                           |

Çizelge 5.2. 100 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dayanım değerleri ve referans elemana göre göreceli dayanım oranları

| Deney Elemanı | Tip         | Maksimum Dayanım (kN) | Göreceli Dayanım Referans Elemana Göre (kN/kN) |
|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------------------------|
| RS100         | Referans    | 244,78                | 1,00                                           |
| S100/0.75     | Güçlendirme | 55,29                 | 0,23                                           |
| S100/1.00     | Güçlendirme | 56,18                 | 0,23                                           |
| S100/1.25     | Güçlendirme | 60,59                 | 0,25                                           |
| S100/1.50     | Güçlendirme | 65,00                 | 0,27                                           |

Çizelge 5.1 ve 5.2 incelendiğinde güçlendirme elemanları dayanımlarının referans elemanlara göre düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni güçlendirme elemanlarında karbon fiber plakaların sıyrılması sonucu yükün aniden düşmesi ve elemanın yük taşıyamamasıdır. Güçlendirme elemanlarındaki 40 ila 60 kN civarındaki bu yük taşıma kapasitesine sahip olmasının sebebi ise elemanların çekme bölgesinde sürekli olarak devam eden 2 adet Ø8 donatısıdır.

Güçlendirme elemanları kendi aralarında mukayese edildiğinde dayanım değerlerinin birbirine yaklaşık olduğu ve karbon fiber plakaların farklı boylarda kullanılmasının elemanların sıyrılma davranışı göstermesi nedeniyle dayanıma önemli bir katkı veremediği görülmüştür.

Çizelge 5.1 ve 5.2’de yer alan göreceli dayanımlar incelendiğinde güçlendirme elemanlarında talep edilen dayanım arttıkça göreceli dayanımların azaldığı görülmektedir.

### 5.2.2. Süneklik

Süneklik tanım olarak bir elemanda dayanımda önemli bir kayıp olmadan elemanın deformasyon yapabilme yeteneğidir. Burada bahsedilen dayanımdaki önemli kayıp %15 civarında kabul görmektedir.

Elemanın süneklik oranı, elemanın ulaştığı maksimum yükün %85’i yükteki yer değiştirme değerinin elemanın akma yükündeki yer değiştirme değerine bölünmesiyle elde edilmektedir. Tez çalışması kapsamındaki deneylerde sadece referans elemanlar sünek davranış göstermiş olup güçlendirme elemanları ise gevrek bir davranış göstermiştir. Bu

doğrultuda referans deney elemanlarına ait süneklik oranları hesaplanmış olup Çizelge 5.3’de yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Referans deney elemanlarındaki süneklik oranları

| Deney Elemanı | Tip      | Akma Dayanımı (kN) | Akma Deformasyonu $\delta_y$ (mm) | Maksimum Dayanımın %15 Kaybedildiği Dayanım (kN) | Maksimum Dayanımın %15 Kaybedildiği Dayanım Değerindeki Deformasyon $\delta_u$ (mm) | Süneklik Oranı $\delta_u/\delta_y$ (mm/mm) |
|---------------|----------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| RS50          | Referans | 126,20             | 13,41                             | 128,60                                           | 100,27                                                                              | > 7,48                                     |
| RS100         | Referans | 215,50             | 19,17                             | 208,07                                           | 97,14                                                                               | > 5,07                                     |

Referans elemanlara ait süneklik oranları incelendiğinde süneklik oranlarında “>” işareti yer almaktadır. Bunun sebebi yük hücresinin uzama kapasitesinin aşılması nedeniyle deneye devam edilemeyerek deneyin sonlandırıldığı, bu nedenle elemanın gerçek süneklik oranı değerinin aslında daha büyük bir değere ulaşacak olmasından dolayı “>” işareti koyulmuştur. Güçlendirme elemanlarının sünek bir davranış göstermemiş olması nedeniyle süneklik oranları hesaplanamamıştır.

### 5.2.3. Rijitlik

Deney elemanlarının rijitliklerinin hesaplanması için deneylerde elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinden yararlanılmıştır. Elemanların rijitlikleri akma anındaki dayanımların akma anındaki deformasyona bölünmesiyle elde edilmiştir. Ancak elemanlardaki akma durumu net olarak sadece referans elemanlarında gözlemlendiği için sadece referans elemanların rijitlikleri hesaplanmıştır. Bu doğrultuda referans elemanların rijitliklerine ait değerler Çizelge 5.4’de yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Referans deney elemanlarındaki rijitlik değerleri

| Deney Elemanı | Tip      | Akma Dayanımı (kN) | Akma Deformasyonu $\delta_y$ (mm) | Rijitlik (kN/mm) |
|---------------|----------|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| RS50          | Referans | 126,20             | 13,41                             | 9,41             |
| RS100         | Referans | 215,50             | 19,17                             | 11,24            |

#### 5.2.4. Enerji dönüştürme kapasitesi

Deney elemanlarının enerji dönüştürme kapasitelerinin hesaplanması için deneylerde elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinden yararlanılmıştır. Elemanların enerji dönüştürme kapasitesi yük-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan hesaplanarak elde edilmiştir. Bu doğrultuda elemanların enerji dönüştürme kapasitelerine ait değerler Çizelge 5.5 ve 5.6’da yer almaktadır.

Çizelge 5.5. 50 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dönüştürülen toplam enerji değerleri ve referans elemana göre göreceli enerji oranları

| Deney Elemanı | Tip         | Dönüştürülen Toplam Enerji (Joule) | Göreceli Enerji Referans Elemana Göre (Joule/Joule) |
|---------------|-------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| RS50          | Referans    | 11411,00                           | 1,000                                               |
| S50/0.75      | Güçlendirme | 278,00                             | 0,024                                               |
| S50/1.00      | Güçlendirme | 198,00                             | 0,017                                               |
| S50/1.25      | Güçlendirme | 177,00                             | 0,016                                               |
| S50/1.50      | Güçlendirme | 203,00                             | 0,018                                               |

Çizelge 5.6. 100 mm plaka kullanılan deney elemanlarındaki dönüştürülen toplam enerji değerleri ve referans elemana göre göreceli enerji oranları

| Deney Elemanı | Tip         | Dönüştürülen Toplam Enerji (Joule) | Göreceli Enerji Referans Elemana Göre (Joule/Joule) |
|---------------|-------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| RS100         | Referans    | 16138,00                           | 1,0000                                              |
| S100/0.75     | Güçlendirme | 235,00                             | 0,015                                               |
| S100/1.00     | Güçlendirme | 246,00                             | 0,015                                               |
| S100/1.25     | Güçlendirme | 275,00                             | 0,017                                               |
| S100/1.50     | Güçlendirme | 531,00                             | 0,033                                               |

Çizelge 5.5 ve 5.6 incelendiğinde güçlendirme elemanlarında dönüştürülen toplam enerji değerlerinin referans elemanlara göre düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni elemanlarda karbon fiber plakaların sıyrılma yapması nedeniyle sünek bir davranış gösterememesi, deformasyon yapabilme yeteneğinin kısıtlı kalması ve referans elemanın dayanımına ulaşamamış olmasıdır.

Dönüştürülen toplam enerji değerlerinde S100/1.50 elemanının diğer güçlendirme elemanlarına göre yüksek olmasının sebebi S100/1.50 deneyinde ulaşılan deformasyon ve

yük değerlerinin diğerlerine göre fazla olması ve yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın diğerlerine göre fazla olmasıdır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, uygulamada güçlendirme ve onarım elemanı olarak kullanılan karbon fiber plakalar ile betonarme kiriş elemanları içerisindeki donatıların kenetlenmesi ve karbon plakadan donatıya yük aktarımının sağlanıp sağlanamayacağının değerlendirilmesi amacıyla laboratuvar ortamında deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

2 adet referans ve 8 adet güçlendirme olmak üzere toplam 10 adet deney elemanında elde edilen gözlemler ve verilere ait değerlendirmeler bu bölümde ele alınmış, uygulamada ve akademik alanda yapılacak çalışmalara katkı sağlamak için öneriler sunulmuştur.

Öncelikle güçlendirme ve onarım elemanı olarak kullanılan karbon fiber plakaların yüksek mukavemete sahip olduğu ancak malzemenin donatı çeliği gibi sünek bir davranış göstermediği, gevrek bir davranış gösterdiği, güçlendirme ve onarım projelerinde ve saha uygulamalarında malzemenin bu davranışının göz önünde bulundurulması gerektiği tespit edilmiştir.

Karbon fiber plakaların beton yüzeye sadece epoksi macunu kullanılarak yapıştırılması ve ek olarak başka işlem uygulanmaması durumunda, taşıyıcı elemanlara gelen yüklerde karbon fiber plakaların bir uçtan sıyrılma yapabildiği, bu durumun gevrek bir davranış oluşturduğu ve tehlike arz ettiği gözlenmiştir.

Özellikle şantiyelerde karşılaşılabilen, karbon fiber plakanın sadece epoksiyle yapıştırılması ve plakanın sıyrılma yapmaması için ekstra işlemler uygulanmaması durumunda her ne kadar güçlendirme yapıldığı kanaatine varılsa da taşıyıcı elemana gelebilecek ek yüklerde plakada sıyrılma oluşarak elemanda gevrek bir göçme davranışı görülebileceği unutulmamalıdır.

Karbon fiber plakalar gelen yükler karşısında sıyrılma olayı gerçekleşene kadar deformasyonu engellemekte ancak sıyrılma olduğu anda yük taşıma kapasitesi ani olarak düşmekte ve deformasyon büyük oranda artmaktadır.

Güçlendirme deney elemanlarındaki bütün karbon fiber plakaların sıyrılma yapması nedeniyle kenetlenme boylarındaki değişim elemanlar arasında büyük bir dayanım farkına neden olmamıştır. Sıyrılmanın alınabilecek farklı türdeki yöntemlerle önlenmesi halinde kenetlenme boyunun elemanlar arasında dayanımı ne ölçüde değiştirebileceğinin daha net anlaşılabilceğı düşünölmektedir.

Çekme donatısı süresiz olan, karbon fiber plakalar yapıştırılan ve giriş orta noktasında tekil yükleme yapılan 8 adet güçlendirme deney elemanında tipik olarak ana eğilme çatlağı girişin orta noktasında donatının 10 mm süresiz olduğı bölgede gerçekleşmiştir.

Ölkemizin deprem bölgesinde yer alıyor olması ve güçlendirme, onarım gibi işlemlerin yapılarda sıklıkla uygulanıyor olması açısından yapılan tez çalışması kapsamında karbon fiber plakaların göstermiş olduğı bu davranışların güçlendirme veya onarım yapılan ve yapılacak olan yapıların ne tür davranış göstereceğini öngörme açısından elde edilen veriler önemli bir yere sahiptir.

## 6.2. Öneriler

Uygulamada güçlendirme ve onarım çalışmalarındaki karbon fiber plakalar kullanılırken sadece epoksi macunu ile yapıştırılıp uygulamanın bitirildiğı görölebilmektedir. Ancak deney sonucunda elde edilen gözlemler ve veriler ışığında sadece epoksi macunuyla yapıştırmayla yapılan uygulamanın yeterli olmadığı, taşıyıcı elemana gelen yüklerde karbon fiber plakanın sıyrılma yapabildiğı görölmüştür. Bu nedenle karbon fiber plaka uygulaması yapılırken epoksi macunuyla yapıştırmaya ek olarak mekanik, kimyasal ankraj vb. yöntemlerle plakanın uç kısımlardan sıyrılma yapması önlenmelidir.

Karbon fiber plakaların sıyrılma yapmasının engellenmesi durumunda taşıyıcı elemana yük taşıma kapasitesinin artması ve deformasyonun engellenmesi açısından katkı sağlayacağı düşünölmektedir.

Ayrıca bu uygulamaların hassas ve önemli uygulamalar olması nedeniyle işçiliğın ve malzeme kalitesinin sahada kontrolüne azami ölçüde dikkat edilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Toutanji, H., Zhao, L. ve Zhang, Y. (2006). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened With CFRP Sheets Bonded With An Inorganic Matrix. *Engineering Structures*, 28, 557-566.
2. Balamuralikrishnan, R. ve Jeyasehar, C.A. (2009). Flexural Behavior of RC Beams Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabrics. *The Open Civil Engineering Journal*, 3, 102-109.
3. Acar, D. (2014). *Çelik Levha ve Karbon Kumaşlarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
4. Dong, J., Wang, Q. ve Guan, Z. (2013). Structural Behaviour of RC Beams With External Flexural and Flexural-Shear Strengthening by FRP Sheets. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 604-612.
5. Hashemi, S.H., Rahgozar, R. ve Maghsoudi, A.A. (2009). Flexural Testing of High Strength Reinforced Concrete Beams Strengthened With CFRP Sheets. *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, 22(2), 131-146.
6. Köksal, H.O., Altınsoy, F., Aktan, S., Karahan, Ş. ve Çankaya, R. (2017). Üç Noktalı Eğilme Altındaki Betonarme Kirişlerde Karbon Lifli Polimerin Etkin ve Ekonomik Kullanımı. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 1-16.
7. Deng, J., Rashid, K., Li, X., Xie, Y. ve Chen, S. (2021). Comparative Study on Prestress Loss and Flexural Performance of Rectangular and T Beam Strengthened by Prestressing CFRP Plate. *Composite Structures*, 262, 113340.
8. Rashid, K., Li, X., Deng, J., Xie, Y., Wang, Y. ve Chen, S., (2019). Experimental and Analytical Study on the Flexural Performance of CFRP-Strengthened RC Beams at Various Pre-Stressing Levels. *Composite Structures*, 227, 111323.
9. Yang, J., Johansson, M., Al-Emrani, M. ve Haghani, R. (2021). Innovative Flexural Strengthening of RC Beams Using Self-Anchored Prestressed CFRP Plates: Experimental and Numerical Investigations. *Engineering Structures*, 243, 112687.
10. Huang, Z., Deng, W., Li, R., Chen, J., Sui, L., Zhou, Y., Zhao, D., Yang, L. ve Ye, J. (2022). Multi-impact Performance of Prestressed CFRP-Strengthened RC Beams Using H-Typed End Anchors. *Marine Structures*, 85, 103264.
11. Al-Shamayleh, R., Al-Saoud, H., Abdel-Jaber, M. ve Alqam, M. (2022). Shear and Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams With Variable Compressive Strength Values Using Externally Bonded Carbon Fiber Plates. *Results in Engineering*, 14, 100427.

12. Norris, T., Saadatmanesh, H. ve Ehsani, M.R. (1997). Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams With Carbon Fiber Sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903-911.
13. Erkan, İ.H., Aksoylu, C., Alshlash, S. ve Arslan, M.H. (2019). *Eğilmeye Çalışan Betonarme Kirişlerde CFRP ile Onarım ve Güçlendirme Yöntemlerinin Deneysel Olarak İrdelenmesi*, IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi – Mühendislik Kızılay, Ankara, 163-171.
14. Grace, N.F., Sayed, G.A., Soliman, A.K. ve Saleh, K.R. (1999). Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. *ACI Structural Journal*, 188(8), 865-875.
15. Yu, F., Zhou, H., Jiang, N., Fang, Y., Song, J., Feng, C. ve Guan, Y. (2020). Flexural Experiment and Capacity Investigation of CFRP Repaired RC Beams Under Heavy Pre-Damaged Level. *Construction and Building Materials*, 230, 117030.
16. Fayyadh, M.M. ve Razak, H.A. (2012). Assessment of Effectiveness of CFRP Repaired RC Beams Under Different Damage Levels Based on Flexural Stiffness. *Construction and Building Materials*, 37, 125-134.
17. Jian-He, X., Yong-Chang, G., Yi-Feng, L. ve Gong-Fa, C. (2014). Experimental Study on Flexural Behaviour of Pre-Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened With CFRP. *Materiale Plastice*, 51(4), 370-375.
18. Tarigan, J., Patra, F.M. ve Sitorus T. (2018). Flexural Strength Using Steel Plate, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) on Reinforced Concrete Beam in Building Technology. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 126(1), 012025.
19. Ercan, E., Arısoy, B. ve Çiftçioğlu, Özyüksel, A. (2018). Experimental and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Beam Strengthened Using Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheets and Bolted Steel Plate. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(1), 231-248.
20. Elwan, S.K., Elsayed, T.A., Refaat, W. ve Lotfy, A.M. (2017). Experimental Behavior of RC Beams Strengthened by Externally Bonded CFRP With Lap Splice. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(3), 36-47.
21. Al-Khafaji, A., Salim, H. ve El-Sisi, A. (2021). Behavior of RC Beams Strengthened With CFRP Sheets Under Sustained Loads. *Structures*, 33, 4690-4700.
22. El-Sayed, A.K., Al-Zaid, R.A., Al-Negheimish, A.I., Shuraim, A.B. ve Alhozaimy, A.M. (2014). Long-Term Behavior of Wide Shallow RC Beams Strengthened With Externally Bonded CFRP Plates. *Construction and Building Materials*, 51, 473-483.
23. Lu, J., Zhang, Y., Duan, L., Huo, Y. ve Liu, H. (2022). Dynamic Behavior of CFRP Strengthen RC Beams Based on Digital Image Correlation Technology. *Engineering Fracture Mechanics*, 271, 108597.
24. Ali, A., Abdalla, J., Hawileh, R. ve Galal, K. (2014). CFRP Mechanical Anchorage for Externally Strengthened RC Beams Under Flexure. *Physics Procedia*, 55, 10-16.

25. Kurtipek, Y.F. (2007). *Beton ile CFRP Şeritler Arasındaki Kayma Gerilmesi Dağılımının DeneySEL Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. Al-Fakih, A., Hashim, M.H.M., Alyousef, R., Mutaft, A., Sabah, S.H.A. ve Tafsirojjaman, T. (2021). Cracking Behavior of Sea Sand RC Beam Bonded Externally With CFRP Plate. *Structures*, 33, 1578-1589.
27. Garcia, R., Helal, Y., Pilakoutas, K. ve Guadagnini, M. (2014). Bond Behaviour of Substandard Splices in RC Beams Externally Confined With CFRP. *Construction and Building Materials*, 50, 340-351.
28. Mousavi, S.R., Sohrabi, M.R., Moodi, Y. ve Gholamhosseini, E. (2022). Strengthening of Lap-Spliced RC Beams Using Near-Surface Mounting Method. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46, 251-259.
29. Shihata, A. (2011). *CFRP Strengthening of RC Beams With Corroded Lap Spliced Steel Bars*, MSc Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
30. Makhlof, M.H. (2019). Effectiveness of Various Techniques Using FRP for the Strengthening of R.C. Beams With Tension Lap Splices. *Journal of Engineering Research and Reports*, 6(1), 1-18.
31. Harajli, M.H. (2006). Effect of Confinement Using Steel, FRC, or FRP on the Bond Stress-Slip Response of Steel Bars Under Cyclic Loading. *Materials and Structures*, 39, 621-634.
32. Hamad, B.S., Rteil, A.A., Salwan, B.R. ve Soudki, K.A. (2004). Behavior of Bond-Critical Regions Wrapped With Fiber-Reinforced Polymer Sheets in Normal and High-Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 248-257.
33. Hamad, B.S., Soudki, K.A., Harajli, M.H. ve Rteil, A.A. (2004). Experimental and Analytical Evaluation of the Bond Strength of Reinforcement in FRP Wrapped HSC Beams. *ACI Structural Journal*, 101(6), 747-754.
34. TS 500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*