



**BETONARME KİRİŞLERİN KARBON PLAKA VE KUMAŞLARLA
GÜÇLENDİRİLMESİ**

Ahmet Kağan UZEL

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2024

Ahmet Kağan UZEL tarafından hazırlanan “BETONARME KİRİŞLERİN KARBON PLAKA VE KUMAŞLARLA GÜÇLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY

Mimarlık Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. İlker KALKAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 17 / 05 / 2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Uğur GÖKMEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Ahmet Kağan UZEL

17/05/2024

BETONARME KİRİŞLERİN KARBON PLAKA VE KUMAŞLARLA
GÜÇLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Kağan UZEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2024

ÖZET

Bu çalışma kapsamında; betonarme kirişlerin çekme bölgesine yapıştırılan karbon fiber (CFRP) plakalarla donatının kenetlenmesi ve karbon fiber plakadan donatıya yük aktarımının güvenli bir şekilde sağlanıp sağlanamayacağının değerlendirilmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel değişkenleri; kullanılan donatının çapı, CFRP plaka kalınlığı, CFRP plaka boyu, elemanın ön hasarlı olup olmaması ve elemanın ankrajlı olup olmaması durumudur. Bu doğrultuda 200x400x3000 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip 14 adet betonarme kiriş imal edilmiş olup bu kirişlerden sadece iki tanesinin çekme donatıları sürekli diğerlerinin ise çekme donatıları süreksizdir. Çekme bölgesindeki donatıları sürekli olan iki adet kiriş güçlendirilmeksizin referans eleman olarak kullanılmıştır. Çekme bölgesindeki donatıları süreksiz olan 12 adet kirişin 8'ine ön hasar verildikten sonra onarım yapılarak, 4'üne ise ön hasar verilmeksizin, çekme bölgelerine içerisinde kullanılan donatının çapına göre belirlenen iki farklı kalınlıkta ve farklı bindirme boylarında karbon fiber plakalar yapıştırılmıştır. Ayrıca çekme bölgesine uygulanan karbon fiber plaka takviyesi yapıldıktan sonra, belirli genişliğe sahip karbon fiber şeritlerle ve sabit aralıklarla plakayı bir uçtan diğer uca kadar içine alacak şekilde ve kiriş iki yan yüzü de dahil olmak üzere "U" biçiminde saracak iki katman sargılama yapılmıştır. Sonrasında ön hasar verilmemiş kirişlere fan tipi ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Onarım ve güçlendirme işlemleri sonrasında epoksi malzemenin kürlenme süresi beklenilerek deney aşamasına geçilmiştir. Yapılan üç noktalı eğilme testleri sonucunda güçlendirme elemanlarının tamamında hasar mekanizmasının karbon fiber (CFRP) plakanın sıyrılması sonucu elemanın gevrek kırılmaya maruz kalması şeklinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle güçlendirme elemanları; dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji dönüştürme kapasitesi temel ölçütleri bakımından referans elemanların ulaştığı değerlere ulaşamamıştır. Ayrıca CFRP plaka genişliğinin artırılmasının nihai dayanım ve enerji dönüştürme kapasitelerine olumlu etki ettiği görülmüş olup bu duruma genişleyen plaka ile birlikte birim yapışma yüzeyinin artmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Öte yandan laboratuvar deneyleri sonucunda CFRP plakanın boyu ile nihai dayanım ve enerji dönüştürme kapasiteleri arasında anlamlı bir ilişki kurulamamış olup, gereğinden uzun kullanılan CFRP plakanın yapışma yüzeyi kusurlarından kaynaklı olarak daha düşük yükler altında sınırlanabileceği ve eleman performansını olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 91130

Anahtar Kelimeler : BA Elemanlar, Bindirme Boyu, Karbon Lama

Sayfa Adedi : 139

Danışman : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CARBON PLATES AND FABRICS

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Kağan UZEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2024

ABSTRACT

In the scope of this study, experimental investigations were conducted to evaluate whether the bonding of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plates to the tension zone of reinforced concrete beams and the transfer of load from the CFRP plate to the reinforcement can be safely achieved. The experimental variables included the diameter of the reinforcement, thickness and length of the CFRP plate, presence of pre-existing damage in the element, and whether the element was anchored. In this context, 14 reinforced concrete beams with dimensions of 200x400x3000 mm were manufactured, out of which only two beams had continuous reinforcement in the tension zone while the others had discontinuous reinforcement. The two beams with continuous reinforcement in the tension zone were used as reference specimens without strengthening. Out of the 12 beams with discontinuous reinforcement in the tension zone, eight were subjected to prior damage and subsequently repaired, while four beams were not damaged initially and were strengthened by bonding CFRP plates of two different thicknesses and varying overlap lengths based on the diameter of the reinforcement used. After the application of CFRP plate reinforcement in the tension zone, two layers of wrapping were applied in a "U" shape to encase the plate from one end to the other, including both lateral sides of the beam, using carbon fiber strips of specific width and fixed intervals. Subsequently, fan-type anchorage was applied to the undamaged beams. After the completion of repair and strengthening procedures, the epoxy material was allowed to cure, and then the experimental phase commenced. The results of the three-point bending tests revealed that the failure mechanism in all strengthened specimens occurred due to the delamination of the carbon fiber (CFRP) plate, leading to brittle fracture of the element. Consequently, the strengthened elements failed to achieve the levels of strength, ductility, stiffness, and energy dissipation capacity attained by the reference specimens. Additionally, it was observed that increasing the width of the CFRP plate had a positive effect on the ultimate strength and energy dissipation capacities, which was attributed to the increase in the bonding surface area along with the widened plate. However, no significant relationship could be established between the length of the CFRP plate and the ultimate strength and energy dissipation capacities based on laboratory experiments. It was suggested that the use of excessively long CFRP plates could lead to lower load capacities due to defects in the bonding surface, thereby adversely affecting the performance of the element.

Science Code : 91130

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

Page Number : 139

Supervisor : Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ

TEŞEKKÜR

Bu tez, bugünlere kadar gelmemde maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Yasemin UZEL, ve babam İbrahim UZEL, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan en büyük destekçim ve hayat arkadaşım Cansu UZEL ile oğlum Akın UZEL'e adanmıştır.

Çalışmalarım boyunca tecrübesi ile yoluma ışık tutan, üzerimde büyük emekleri olan değerli büyüğüm ve tez danışmanım Prof. Dr. Sabahattin AYKAÇ'a, her daim yanımda olan ve çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan kıymetli arkadaşım Dr. Meryem BÖCEK'e ve Öğr. Gör. Dr. Hüseyin KALKAN'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen iş arkadaşım ve meslektaşım Ayşe ÖZTEPE ve kıymetli eşi Orhan ÖZTEPE'ye; yine tez çalışmalarım süresince iş yükümü hafifleterek elinden gelen tüm desteği sağlayan stajyer mühendis adayı Dilara ERSEN ile değerli dostlarım Anıl YILDIZHAN ve Arda ÇEŞMEBAŞI'na, teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Norris, Saadatmanesh ve Ehsani'nin (1997) Çalışması	3
2.2. Grace, Sayed, Soliman ve Saleh'in (1999) Çalışması.....	4
2.3. Hamad, Rteil, Salwan ve Soudki'nin (2004) Çalışması.....	4
2.4. Hamad, Soudki, Harajli ve Rteil'in (2004) Çalışması	5
2.5. Toutanji, Zhao ve Zhang'ın (2006) Çalışması	5
2.6. Harajli'nin (2006) Çalışması.....	5
2.7. Kurtipek'in (2007) Çalışması.....	6
2.8. Hashemi, Rahgozar ve Maghsoudi'nin (2009) Çalışması.....	6
2.9. Balamuralikrishnan ve Jeyasehar'ın (2009) Çalışması	7
2.10. Shihata'nın (2011) Çalışması	7
2.11. Fayyadh ve Razak'ın (2012) Çalışması	8
2.12. Dong, Wang ve Guan'ın (2013) Çalışması	8
2.13. Acar'ın (2014) Çalışması	9
2.14. Jian-He, Yong-Chang, Yi-Feng ve Gong-Fa'nın (2014) Çalışması	9
2.15. El-Sayed ve Diğerleri'nin (2014) Çalışması	9

Sayfa

2.16. Garcia, Helal, Pilakoutas ve Guadagnini'nin (2014) Çalışması	10
2.17. Ali, Abdalla, Hawileh ve Galal'nin (2014) Çalışması	10
2.18. Köksal, Altınsoy, Aktan, Karahan ve Çankaya'nın (2017) Çalışması.....	11
2.19. Elwan, Elsayed, Refaat ve Lotfy'nin (2017) Çalışması	11
2.20. Ercan, Arısoy, Çiftçioğlu-Özyüksel'in (2018) Çalışması	12
2.21. Tarigan, Patra ve Sitorus'un (2018) Çalışması	13
2.22. Erkan, Aksoylu, Alshlash ve Arslan'ın (2019) Çalışması	13
2.23. Rashid, Li, Deng, Xie, Wang ve Chen'in (2019) Çalışması	13
2.24. Makhlof'un (2019) Çalışması	14
2.25. Mashrei, Makki ve Sultan'nin (2019) Çalışması	14
2.26. Yu ve Diğerleri'nin (2020) Çalışması.....	15
2.27. Deng, Rashid, Li, Xie ve Chen'in (2021) Çalışması.....	16
2.28. Yang, Johansson, Emrani ve Haghani'nin (2021) Çalışması.....	16
2.29. Al-Khafaji, Salim ve El-Sisi'nin (2021) Çalışması.....	16
2.30. Al-Fakih ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması	17
2.31. Huang ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması	17
2.32. Al-Shamayleh, Al-Saoud, Abdel-Jaber ve Alqam'ın (2022) Çalışması	18
2.33. Lu, Zhang, Duan, Huo ve Liu'nun (2022) Çalışması	18
2.34. Mousavi, Sohrabi, Moodi ve Gholamhosseini'nin (2022) Çalışması	19
2.35. Sümer (2023) Çalışması	19
2.36. Assad, Hawileh, Karaki ve Abdalla'nın (2024) Çalışması	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	21
3.1. Deney Elemanları.....	21
3.2. Malzeme Bilgileri.....	37
3.2.1. Beton.....	37
3.2.2. Donatı	37

	Sayfa
3.2.3. Karbon fiber plaka	38
3.2.3. Karbon elyaf kumaş	38
3.2.4. Epoksi astar	39
3.2.5. Epoksi plaka macunu	39
3.2.6. Epoksi elyaf yapıştırıcısı	39
3.2.7. Kimyasal dübel	40
3.2.8. Yüksek mukavemetli yapısal tamir harcı	40
3.3. Ekipman Bilgileri	40
3.3.1. Epoksi macunu kalınlığı ayarlama aparatı	41
3.3.2. Kumaş hava boşluğu alma aparatı	41
3.3.3. Çift sıra elmaslı beton yüzeyi silme aparatı	42
3.3.4. Donatı tespit cihazı	43
3.4. DeneY Elemanlarının Hazırlık Aşamaları	44
3.4.1. Hasarlı olan kirişlerin tamir harcı uygulamasına hazır hale getirilmesi	44
3.4.2. DeneY numunelerinin kenarlarının pahlanması	46
3.4.3. DeneY numunesi yüzeylerinin epoksi uygulamasına hazır hale getirilmesi	46
3.4.4. Hasarlı olan kirişlere tamir harcı uygulaması	48
3.4.5. Epoksi astar uygulaması	48
3.4.6. Karbon fiber plakanın yapıştırılması	50
3.4.7. Ankraj deliklerinin açılması	54
3.4.8. Karbon fiber kumaş uygulanması	58
3.4.9. Fan tipi ankraj uygulaması	61
3.5. DeneY Sistemi	65
3.6. Ölçüm Sistemi	65
4. DENEY SÜRECİ	67

	Sayfa
4.1. Referans Elemanların Deneyleri	67
4.2. RS50 Deney Elemanı	67
4.2.1. RS100 deney elemanı	70
4.3. Güçlendirme Elemanlarının Deneyleri	73
4.3.1. SW50/0,75 güçlendirme elemanı.....	74
4.3.2. SW50/1,00 güçlendirme elemanı.....	77
4.3.3. SW50/1,25 güçlendirme elemanı.....	80
4.3.4. SW50/1,50 güçlendirme elemanı.....	82
4.3.5. SW100/0,75 güçlendirme elemanı.....	85
4.3.6. SW100/1,00 güçlendirme elemanı.....	88
4.3.7. SW100/1,25 güçlendirme elemanı.....	91
4.3.8. SW100/1,50 güçlendirme elemanı.....	95
4.3.9. SWA50/1,25 güçlendirme elemanı.....	98
4.3.10. SWA50/1,50 güçlendirme elemanı.....	101
4.3.11. SWA100/1,25 güçlendirme elemanı.....	104
4.3.12. SWA100/1,50 güçlendirme elemanı.....	108
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	113
5.1. Genel Değerlendirme	113
5.2. Genişliği 50 mm Olan Karbon Plakalarla Güçlendirilmiş Kirişler	115
5.2.1. Farklı bindirme boylarında CFRP kullanılmasının davranışa olan etkisi	116
5.2.2. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi	117
5.2.3. Sargılama yapılıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi	118
5.3. Genişliği 100 mm Olan Karbon Plakalarla Güçlendirilmiş Kirişler	119
5.3.1. Farklı bindirme boylarında CFRP kullanılmasının davranışa olan etkisi	119

Sayfa

5.3.2. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi	120
5.3.3. Sargılama yapılıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi	121
5.4. Karbon Plaka Genişliğinin Yük Kapasitesine Olan Etkisi.....	123
5.5. Güçlendirilmiş Elemanların ile Referans Elemanların Karşılaştırılması	123
5.6. Temel Ölçütlere Göre Değerlendirmeler.....	125
5.6.1. Dayanım.....	125
5.6.2. Süneklik	126
5.6.3. Rijitlik	127
5.6.4. Enerji dönüştürme kapasitesi	128
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	133
KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ	139

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Deney elemanlarının nitelikleri	21
Çizelge 3.2. Beton basınç dayanımı sonuçları	37
Çizelge 3.3. Donatı çekme deneyi sonuçları.....	38
Çizelge 3.4. Karbon fiber plakaya ait malzeme özellikleri.....	38
Çizelge 3.5. Karbon kumaşa ait malzeme özellikleri	39
Çizelge 3.6. Plaka epoksi macunu teknik özellikleri	39
Çizelge 3.7. Epoksi elyaf yapıştırıcısı teknik özellikleri	39
Çizelge 3.8. Kimyasal dübel teknik özellikleri.....	40
Çizelge 3.9. Yapısal tamir harcı teknik özellikleri	40
Çizelge 5.1. Farklı bindirme boylarına sahip 50 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla dayanım açısından karşılaştırılması	125
Çizelge 5.2. Farklı bindirme boylarına sahip 100 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla dayanım açısından karşılaştırılması	125
Çizelge 5.3. 50 mm genişliğinde CFRP plaka kullanılan deney elemanlarının süneklik oranları.....	126
Çizelge 5.4. 100 mm genişliğinde CFRP plaka kullanılan deney elemanlarının süneklik oranları.....	127
Çizelge 5.5. Referans deney elemanlarının rijitlik oranları	127
Çizelge 5.6. 50 mm genişliğinde karbon plaka kullanılan güçlendirme elemanlarının başlangıç rijitlikleri	128
Çizelge 5.7. 100 mm genişliğinde karbon plaka kullanılan güçlendirme elemanlarının başlangıç rijitlikleri	128
Çizelge 5.8. 50 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri ve referans elemana göre göreceli enerji yüzdeleri	131
Çizelge 5.9. 100 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri ve referans elemana göre göreceli enerji yüzdeleri	131

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. RS50 referans elemanı donatı detayı	23
Şekil 3.2. RS100 referans elemanı donatı detayı	23
Şekil 3.3. SW50-0,75 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	24
Şekil 3.4. SW50-1,00 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	25
Şekil 3.5. SW50-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	26
Şekil 3.6. SW50-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	27
Şekil 3.7. SW100-0,75 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	28
Şekil 3.8. SW100-1,00 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	29
Şekil 3.9. SW100-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	30
Şekil 3.10. SW100-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	31
Şekil 3.11. SWA50-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	33
Şekil 3.12. SWA50-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	34
Şekil 3.13. SWA100-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	35
Şekil 3.14. SWA100-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı.....	36
Şekil 4.1. RS50 deney elemanı donatı detayı	68
Şekil 4.2. RS50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi	69
Şekil 4.3. RS100 deney elemanı donatı detayı	70
Şekil 4.4. RS100 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi	73
Şekil 4.5. SW50-0,75 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	76
Şekil 4.6. SW50-1,00 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	79
Şekil 4.7. SW50-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	82
Şekil 4.8. SW50-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	85
Şekil 4.9. SW100-0,75 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	88
Şekil 4.10. SW100-1,00 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	91

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. SW100-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	94
Şekil 4.12. SW100-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	97
Şekil 4.13. SWA50-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	101
Şekil 4.14. SWA50-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	104
Şekil 4.15. SWA100-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	108
Şekil 4.16. SWA100-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi.....	111
Şekil 5.1. CFRP kullanımının farklı bindirme boyları ile karşılaştırılması	116
Şekil 5.2. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi.....	117
Şekil 5.3. Sargılama yapılıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi	119
Şekil 5.4. Farklı bindirme boylarında CFRP kullanılmasının davranışa olan etkisi.....	120
Şekil 5.5. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi.....	121
Şekil 5.6. Sargılama yapılıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi	122
Şekil 5.7. Karbon plaka genişliğinin yük kapasitesine olan etkisi.....	123
Şekil 5.8. Farklı bindirme boylarına sahip 50 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla karşılaştırılması	124
Şekil 5.9. Farklı bindirme boylarına sahip 100 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla karşılaştırılması	124
Şekil 5.10. Deney elemanlarının enerji dönüştürme grafikleri ve hesaplanması.....	130
Şekil 5.11. 50 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri grafiği	131
Şekil 5.12. 100 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri grafiği	132

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Epoksi macunu kalınlığı ayarlama aparatı.....	41
Resim 3.2. Kumaş hava boşluğu alma aparatı	42
Resim 3.3. Çift sıra elmaslı beton yüzeyi silme aparatı.....	43
Resim 3.4. Donatı tespit cihazı	43
Resim 3.5. İlk deneyden kalan plaka yapıştırıcısı kalıntılarının temizlenmesi.....	44
Resim 3.6. Yüzeyden kopan ve oynayan beton parçalarının kaldırılması.....	45
Resim 3.7. Beton parçalarından arındırılmış numune	45
Resim 3.8. Kenarları pahlanmış deney numunesi.....	46
Resim 3.9. Beton yüzeyinin konik beton taşı ile silinmesi	47
Resim 3.10. Tesviyesi henüz eşitlenmemiş olan deney elemanı	47
Resim 3.11. Tamir harcı uygulanmış deney numuneleri	48
Resim 3.12. Çift komponentli epoksi astarın A ve B bileşenlerinin karıştırılması.....	49
Resim 3.13. Epoksi astar uygulanması	49
Resim 3.14. Karbon fiber plakanın rulosundan kesilmesi	51
Resim 3.15. Epoksi esaslı plaka macunu komponentlerinin karıştırılması	51
Resim 3.16. Macun serimi gerçekleştirilerek taraklanan plaka yüzeyi	52
Resim 3.17. El ile basınç uygulanarak boşluğu alınan deney elemanları.....	53
Resim 3.18. Epoksi macunla yüzeyi kapatılan plaka.....	53
Resim 3.19. Kiriş donatı yerlerinin belirlenerek işaretlenmesi.....	55
Resim 3.20. Ankraj deliklerinin açılması	55
Resim 3.21. Ankraj deliği açma işlemleri sırasında oluşan deformasyonlar.....	56
Resim 3.22. Yüksek mukavemetli tamir harcı uygulanan yüzeyler	56
Resim 3.23. Deliklerin kapanmaması amacıyla yaş tamir harcı içerisinde tijle kanal açma.....	57
Resim 3.24. Onarılan yüzeylere epoksi astar sürülmesi	57

Resim	Sayfa
Resim 3.25. Karbon kumaşın kesilmesi.....	59
Resim 3.26. Epoksi Esaslı kumaş yapıştırıcı bileşenlerinin karıştırılması	59
Resim 3.27. Karbon fiber kumaş yapıştırma işlemi.....	60
Resim 3.28. İkinci kat karbon fiber kumaş uygulanması.....	60
Resim 3.29. Ankraj deliklerinin tozdan arındırılması.....	61
Resim 3.30. Ankraj imalatı için karbon kumaş kesilmesi	62
Resim 3.31. Karbon kumaşın ankraj deliğine yerleştirilmesi öncesinde kıvrılması.....	62
Resim 3.32. Karbon kumaşların ankraj deliklerindeki yerleşimi	63
Resim 3.33. Ankraj deliklerine epoksi enjekte edilmesi.....	63
Resim 3.34. Ankraj epoksisi uygulamasında delik arka yüzeyinden taşan bağlayıcı.....	64
Resim 3.35. Karbon kumaşın kollara ayrılarak beton ve sargı yüzeyine yapıştırılması.....	64
Resim 3.36. Deney ve ölçüm düzen.....	65
Resim 4.1. RS50 referans deney elemanı	68
Resim 4.2. RS100 referans deney elemanı	71
Resim 4.3. SW50-0,75 deney öncesi fotoğrafı	74
Resim 4.4. SW50-0,75 deney sonrası fotoğrafı	75
Resim 4.5. SW50-0,75 deney sonrası fotoğrafı	75
Resim 4.6. SW50-1,00 deney öncesi fotoğrafı	77
Resim 4.7. SW50-1,00 deney sonrası fotoğrafı	78
Resim 4.8. SW50-1,00 deney sonrası fotoğrafı	78
Resim 4.9. SW50-1,25 deney öncesi fotoğrafı	80
Resim 4.10. SW50-1,25 deney sonrası fotoğrafı	81
Resim 4.11. SW50-1,50 deney öncesi fotoğrafı	83
Resim 4.12. SW50-1,50 deney sonrası fotoğrafı	83
Resim 4.13. SW50-1,50 deney sonrası fotoğrafı	84
Resim 4.14. SW100-0,75 deney öncesi fotoğrafı	86

Resim	Sayfa
Resim 4.15. SW100-0,75 deney sonrası fotoğrafı	86
Resim 4.16. SW100-0,75 deney sonrası fotoğrafı	87
Resim 4.17. SW100-1,00 deney öncesi fotoğrafı	89
Resim 4.18. SW100-1,00 deney sonrası fotoğrafı	89
Resim 4.19. SW100-1,00 deney sonrası fotoğrafı	90
Resim 4.20. SW100-1,25 deney öncesi fotoğrafı	92
Resim 4.21. SW100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	92
Resim 4.22. SW100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	93
Resim 4.23. SW100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	93
Resim 4.24. SW100-1,50 deney öncesi fotoğrafı	95
Resim 4.25. SW100-1,50 deney sonrası fotoğrafı	96
Resim 4.26. SW100-1,50 deney sonrası fotoğrafı	96
Resim 4.27. SWA50-1,25 deney öncesi fotoğrafı	98
Resim 4.28. SWA50-1,25 deney sonrası fotoğrafı	99
Resim 4.29. SWA50-1,25 deney sonrası fotoğrafı	99
Resim 4.30. SWA50-1,25 deney sonrası fotoğrafı	100
Resim 4.31. SWA50-1,50 deney öncesi fotoğrafı	102
Resim 4.32. SWA50-1,50 deney sonrası fotoğrafı	102
Resim 4.33. SWA50-1,50 deney sonrası fotoğrafı	103
Resim 4.34. SWA100-1,25 deney öncesi fotoğrafı	105
Resim 4.35. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	105
Resim 4.36. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	106
Resim 4.37. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	106
Resim 4.38. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı	107
Resim 4.39. SWA100-1,50 deney öncesi fotoğrafı	109

Resim	Sayfa
Resim 4.40. SWA100-1,50 deney sonrası fotoğrafı	109
Resim 4.41. SWA100-1,50 deney sonrası fotoğrafı	110
Resim 4.42. SWA100-1,50 deney sonrası fotoğrafı	110



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

cm	Santimetre
fctd	Beton Tasarım Eksenel Çekme Dayanımı
fyd	Boyuna Donatı Tasarım Akma Dayanımı
kN	Kilonewton
lb	Kenetlenme Boyu
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
Ø	Donatı Çapı

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

Betonarme yapılarda proje yetersizlikleri, uygulama hataları, kullanım amacı değişikliğinden veya çevresel şartlardan dolayı yapılarda oluşan ek yükler ve bunlara benzer durumlar sonucu oluşan yapısal deformasyonlar nedeniyle yapı elemanlarında yetersizlikler ve/veya hasarlar oluşmaktadır. Böylelikle yapının veya yapı elemanlarının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Yapı elemanlarından yatay taşıyıcı olarak bilinen kirişlerde güçlendirme gereksinimi sıklıkla ortaya çıkan ve depremden bağımsız olarak da gerçekleşebilen durumlardan biridir. Geçmişten bugüne değin kirişlerin güçlendirilmesi üzerine birçok deneysel araştırma yapılmıştır (Acar, 2014; Harajli, 2006; Kurtipek, 2007; Makhlof, 2019; Shihata, 2011; Sümer, 2023). Güçlendirme tekniklerinin her biri kendi içerisinde olumlu ve olumsuz yönler barındırdığından bu çalışmalarda birçok güçlendirme malzemesi ve uygulama yöntemi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu yöntemlerden biri de eğilme elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde sıklıkla kullanılan karbon plakalar (CFRP) ile güçlendirme tekniğidir.

Karbon plaka ile yapılan güçlendirmelerde; eğilme kapasitesinin yetersiz olduğu bilinen çekme yüzeyine yüksek dayanımlı karbon plakaların yapıştırılmasıyla elemanın eğilme kapasitesi arttırılmaya çalışılır.

Yöntemin uygulamasında; kiriş alt yüzeyi zımparalanıp kalıpla temas eden yüzeyde biriken beton şerbeti silindikten sonra karbon plakanın doğrudan kiriş çekme bölgesine yapıştırıldığı görülmüştür. Bazı uygulamalarda ise karbon plakanın sıyrılmasının önlenmesi için kiriş yan yüzeyleri ve alt yüzeyine tutunan “U” şeklindeki karbon elyaf sargı uygulamalarının ve ankrajların yapıldığı görülmüştür. Ayrıca neredeyse uygulamaların tamamında uygulanacak olan karbon plakanın boyu eğilme elemanının net açıklığı kadar seçildiği ve uygulamayı yapan taraflarca bu şekilde güvenli tarafta kalındığının düşünüldüğü görülmektedir.

Karbon plakalarla boyuna donatının bindirmeli eki ve kiriş güçlendirme yöntemi üzerine yapılan geçmiş çalışmalarda; karbon plakanın uygulandığı kirişlerin karbon plaka kullanılmayan kirişlere göre gösterdiği davranışlar üzerinde durulmuştur. Bu deneylerde genellikle karbon plaka katman sayısı, karbon plakaya verilen ön germe kuvveti, karbon plakanın kirişe uygulama metodu, karbon plakanın süreklilik ve bindirme durumunun karbon

plaka uygulanan elemanlardaki yükleme tipi karbon plakaya uygulanan ankraj kullanımı gibi etkileri araştırılmıştır.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde genellikle güçlendirme ile elde edilen kapasite artışlarının ele alındığı ancak yapılan güçlendirme sonrası ulaşılan nihai kapasitenin tasarımda kullanılmaya yeter özelliklere sahip olup olmadığının sorgulanmadığı görülmüştür. Ulaşılan sonuçlarda karbon plakaların belirgin bir kalıcı deformasyona ulaşmadan kiriş yüzeyinden sıyırılması durumunun ele alınmadığı da ayrıca varılan bir diğer sonuçtur. Karbon plakalarla yapılan kiriş güçlendirme çalışmalarında görülen sıyırılma davranışı dolayısıyla oluşan tereddütler; bu konunun çalışma kapsamında ele alınmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada; hasar görmüş / görmemiş ve her iki grupta da çekme bölgesindeki donatısı kesik olarak imal edilmiş kirişler kullanılmıştır. Farklı bindirme boylarındaki karbon plakalarla güçlendirilmiş bu kirişler karbon elyaf kullanılarak sargılanmış ve bir bölümünde de sargılara ilave olarak fan tipi ankraj sistemleri kullanılmıştır. Deney elemanlarında gerçekleştirilen bu uygulamalar ile fan tipi ankraj ve kirişin üç yüzeyine uygulanan “U” tipi karbon elyaf sargının davranışı, sıyırılmaya olan etkisi, farklı bindirme boylarının davranışa olan etkisi ve minimum bindirme boyunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yukarıda bahsi geçen niteliklere haiz 1/1 ölçekli deney elemanlarının üç noktalı eğilme testleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar ile her ne kadar karbon lamalarla boyuna donatıların bindirmeli ekinin başarısı test edildiyse de; özellikle bindirme boyunun fazla olduğu elemanlarda (temel kenetlenme boyunun 1,25 katı ve 1,50 katı) CFRP malzeme kiriş alt yüzü boyunca devam ettiği için, bu elemanlar güçlendirilmiş eleman olarak düşünülebilir. Bu nedenle bu çalışmanın avantajlı bir yan ürünü olarak ele alınabilecek olan bu elemanlar; deneylerde kullanılan yöntemle yapılmış bir güçlendirme çalışmasının başarısını da test etmektedir.

Ulaşılan sonuçlar karbon plakalarla güçlendirilen eğilme elemanlarının davranış biçimini aydınlatma noktasında yararlı olacaktır. Ancak deney elemanlarının tamamı bindirmeli ekinin incelenmesine yönelik tasarlandığından bu çalışma; eğilme elemanlarında karbon plakalar vasıtasıyla yapılan güçlendirmelerin eğilme kapasitesine olan etkisini inceleyen diğer çalışmalar ile doğrudan karşılaştırılmamalıdır.

2. GEÇMİŞTEKİ ÇALIŞMALAR

Geçmişten günümüze CFRP plakalar ve kumaşlarla betonarme kirişlerde yapılan güçlendirmelere ilişkin oldukça fazla çalışma yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmalarda genellikle CFRP katman sayıları, ankraj kullanımı, farklı FRP türlerinin kullanılması, farklı güçlendirme tekniklerinin kullanımı, uygulanan CFRP nin sargılanıp sargılanmaması, CFRP plaka kalınlığı, kirişin ön hasar durumu, betonarme kirişin beton basınç dayanımı gibi deney değişkenleri ele alınarak incelenen bu durumların eleman davranışı üzerine etkileri değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında uygulanan deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup benzer çalışmaların yapıldığı deney ortamları ve deneyler ile ulaşılması planlanan hedefler değişkenlik gösterebilir.

Aşağıda CFRP malzemeler kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan bazılarını kronolojik sıraya göre yer verilmiştir.

2.1. Norris, Saadatmanesh ve Ehsani'nin (1997) Çalışması

Bu çalışmada CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme ve kesme dayanımı üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri kullanılan epoksi yapıştırıcının türü, CFRP liflerinin hangi doğrultuda olduğu, güçlendirilmenin eğilme veya kesme olmak üzere hangi amaca yönelik yapıldığı ve güçlendirme öncesi kirişlere ön hasar verilip verilmediği durumlarıdır. Bu çerçevede 19 adet 2440x203x127 mm boyutlarında kiriş imal edilmiş olup bunlardan 13 tanesi eğilme, 6 tanesi kesme davranışının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Eğilme davranışının belirlenmesi için kullanılan 13 elemandan 1 tanesi referans eleman diğer 12'si ise güçlendirme elemanıdır. Deneyler neticesinde kiriş çekme bölgesine ve yan yüzeylerine uygulanan CFRP malzemenin kirişin rijitliğine ve dayanımına olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür. CFRP liflerinin çatlak doğrultusuna dik yerleştirilmesi durumunda maksimum verimin sağlandığı, lif yönleri çapraz tutulduğunda ise elde edilen rijitlik ve dayanım artışının sınırlı olduğu görülmüştür.

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

Bu çalışmada betonarme kirişlere farklı tekniklerle uygulanan CFRP ve GFRP malzemelerin eğilme ve kesme davranışına etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri kullanılan malzemenin türü, katman sayısı, uygulama yöntemi ve epoksi malzemedir. Bu doğrultuda 2743 x 292 x 152 mm boyutlarında toplam 14 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bunlardan bir tanesi güçlendirme yapılmaksızın referans eleman olarak bırakılmıştır. Kalan 13 deney elemanı ise uygulanacak tekniğe göre 5 gruba ayrılmıştır. Güçlendirme öncesinde deney elemanları çatlama yüküne getirilmiş, uygulamalar ön yükleme sonrasında yapılmıştır. Deneysel neticesinde FRP malzemenin deplasmanları sınırladığı ve yük taşıma kapasitesini iki katına kadar çıkarabildiği görülmüştür. CFRP plakaların kiriş alt yüzü ile birlikte yan yüzeylere de uygulanmasının dayanımı arttırmada daha etkili olduğu ancak deney elemanlarının tamamının gevrek kırılmaya maruz kaldığı belirlenmiştir.

2.3. Hamad, Rteil, Salwan ve Soudki'nin (2004) Çalışması

Bu çalışmada çekme donatısında bindirmeli ek yapılmış olan normal basınç dayanımına sahip betonarme kirişlere yapılan farklı CFRP uygulamalarının eleman davranışı üzerine etkisi ele alınmıştır. Bu çerçevede 2000x305x240 mm ebatlarında çekme donatısında 305 mm bindirmeli ek yapılmış 7 adet kiriş imal edilmiştir. Deney değişkeni CFRP malzemenin uygulanış biçimi ve katman sayısıdır. İmal edilen kirişlerden birisi güçlendirilmeksizin referans eleman olarak ayrılmış, kalan 6 adet kiriş ise 1 veya 2 katmanlı CFRP uygulanan kirişler olmak üzere 3'er kirişten oluşan iki gruba ayrılmıştır. Her bir gruptaki 3 elemana da 3 farklı güçlendirme yöntemi uygulanmış olup bunlardan ilki 76 mm genişliğindeki CFRP malzemeyi kiriş bindirme bölgesinin ortasında kiriş yan yüzeylerini içine alacak şekilde "U" biçiminde sargılamaktır. İkinci yöntemde ise 76 mm genişliğindeki iki adet CFRP malzeme yine aralarında 76 mm boşluk bırakılacak şekilde birer atlamalı olarak ilk yöntemle aynı şekilde "U" biçiminde kirişe sargılanmıştır. Üçüncü yöntemde ise 305 mm'lik donatı bindirme bölgesini kenarlardan 38 mm taşacak şekilde komple içine alan 380mm genişliğindeki CFRP malzeme ile yine aynı şekilde "U" biçiminde sargılanmıştır. Deney sonucunda referans elemanın çekme donatılarının bulunduğu bölgede çatlaklar oluştuğundan hemen sonra göçmeye ulaştığı, CFRP kullanımının bindirmeli ek dayanımını artırdığı ve elemana süneklik sağladığı, kullanılan CFRP miktarının artırılması ile birlikte bindirmeli ek dayanımının olumlu etkilendiği görülmüştür.

2.4. Hamad, Soudki, Harajli ve Rteil'in (2004) Çalışması

Bu çalışmada çekme donatısında bindirmeli ek yapılmış olan yüksek basınç dayanımına sahip betonarme kirişlere yapılan farklı CFRP ve GFRP uygulamalarının eleman davranışı üzerine etkisi ele alınmıştır. Bu çerçevede 2000x305x240 mm ebatlarında çekme donatısında 305 mm bindirmeli ek yapılmış 10 adet kiriş imal edilmiştir. Deney değişkeni kullanılan FRP türü, CFRP ve GFRP malzemenin uygulanış biçimi ve katman sayısıdır. İmal edilen kirişlerden birisi güçlendirilmeksizin referans eleman olarak ayrılmış, kalan 9 adet kiriş ise farklı katmanlarda CFRP ve GFRP malzemeler kullanılarak farklı yöntemlerle güçlendirilmiştir. Bu kapsamda bindirme bölgesi CFRP veya GFRP kullanılmak suretiyle orta noktada tek şeritle, orta bölgede simetrik iki şeritle ve son olarak bindirme bölgesini içine alan sürekli şeritle kirişin alt yüzeyi ve yan yüzeyleri U şeklinde sargılanacak biçimde güçlendirilmiştir. Deneyler neticesinde CFRP ve GFRP malzeme ile yapılan güçlendirmenin bindirmeli ekin dayanımını arttırmada, sünekliği arttırmada ve nihai dayanımı geliştirme noktasında son derece etkili olduğu görülmüştür.

2.5. Toutanji, Zhao ve Zhang'ın (2006) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlere uygulanan CFRP katman sayılarının eleman davranışına olan etkisinin belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni CFRP malzemenin katman sayısıdır. Bu doğrultuda 1800x160x108 mm boyutlarında 8 adet betonarme kiriş imal edilmiş bunlardan 1 tanesi güçlendirilmeksizin referans olarak bırakılmıştır. Kalan yedi elemanın birine üç katman, ikisine dörder katman, diğer ikisine beşer katman ve son ikisine ise altışar katman olacak şekilde CFRP malzeme uygulanmıştır. 3 ve 4 katmanlı güçlendirme elemanları CFRP'nin kopması ile göçme moduna ulaşırken, 5 ve 6 katmanlı güçlendirme elemanları CFRP'nin sıyrılması ile göçme moduna ulaşmıştır. Yapılan uygulamalarla yük taşıma kapasitesinin referans elemanın %170 katı mertebelerine çıkarılabildiği ancak süneklik oranlarının referans elemana göre son derece düşük olduğu görülmüştür.

2.6. Harajli'nin (2006) Çalışması

Bu çalışmada çekme bölgesinde yer alan donatısında yeterli bindirmeli eke sahip olmayan betonarme kirişlerin bindirme bölgesinde yapılacak olan farklı güçlendirme yöntemlerinin

eleman davranışına olan etkisinin belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede bindirmeli ek uzunluğu kullanılan donatı çapının 5 katı olan 1200x200x200 mm boyutlarında toplam 14 adet kiriş imal edilmiştir. Deneysel değişkeni ise donatı çapı, pas payının donatı çapına oranı ve kullanılan güçlendirme tekniğidir. Elemanlar iki gruba ayrılmış olup her grupta 1 adet güçlendirilmemiş referans eleman ile CFRP ve çelik donatılarla güçlendirilmiş güçlendirme elemanları bulunmaktadır. Tüm kirişler tekrarlanır yükler altında teste tabi tutulmuştur. Deneysel sonucunda referans elemanlarda yükleme sonunda dayanım kaybının hemen oluştuğu, CFRP ile sargılama yapılan elemanlarda ise donatıdaki yük taşıma kapasitesinin artış gösterdiği görülmüştür.

2.7. Kurtipek'in (2007) Çalışması

Bu çalışmada beton ile CFRP şeritler arasındaki kayma gerilmesi dağılımının deneysel olarak incelenmesi konusu ele alınmıştır. Deneysel değişkenleri; CFRP şerit genişliği, CFRP şerit etkili yapıştırma uzunluğu ve beton basınç dayanımıdır. Bu doğrultuda 16 adet 1300x200x150 mm boyutlarında kiriş üretilmiş olup bu elemanların çekme bölgelerine farklı uzunluk ve genişliğe sahip CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Gerçekleştirilen dört noktalı yükleme deneyleri neticesinde CFRP şerit genişliğinin, beton basınç dayanımı ve CFRP yapıştırma boyu değişkenlerine nazaran göçme yükünün artmasında daha büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca beton basınç dayanımı arttıkça yapıştırılan CFRP şeridin etkili uzunluğunun arttığı ve 100 mm genişlikteki CFRP şeritlerin 50 mm genişlikteki şeritlere göre %17 daha etkili boya sahip olduğu görülmüştür.

2.8. Hashemi, Rahgozar ve Maghsoudi'nin (2009) Çalışması

Bu çalışmada yüksek beton basınç dayanımına sahip olan betonarme kirişlerin çekme bölgelerine uygulanan CFRP plakaların kirişlerin eğilme dayanımına olan etkisinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel değişkeni betonarme kirişlerde kullanılan donatı pürsantajı ve CFRP malzemesinin katman sayısıdır. Bu doğrultuda 3000x250x150 mm boyutlarında 6 adet betonarme kiriş imal edilmiş bunlardan farklı donatı oranına sahip olan 2 tanesi referans olarak bırakılmıştır. Kalan kirişlere ise farklı katmanlarda CFRP uygulanmıştır. Deneyler neticesinde CFRP malzemenin kiriş eğilme dayanımına olumlu katkı sağladığı ve yük kapasitesini artırdığı, düşük donatı oranına sahip kirişlerdeki dayanım artışının daha yüksek olduğu görülmüştür.

2.9. Balamuralikrishnan ve Jeyasehar'ın (2009) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlere uygulanan CFRP katman sayılarının eleman davranışına olan etkisinin belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni yükleme tipi ve CFRP katman sayısıdır. Bu doğrultuda 3200x250x150 mm boyutlarında 10 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden 2 tanesi referans eleman olarak bırakılmış kalan 8'i ise 4 tanesi tek katman 4 tanesi çift katman olacak şekilde CFRP ile güçlendirilmiştir. Sonrasında referans eleman, tek katmanlı CFRP uygulanan eleman ve çift katmanlı CFRP uygulanan eleman olmak üzere her gruptaki elemanın yarısına statik yükleme diğer yarısına ise tekrarlanır tipte yükleme yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde CFRP malzemenin eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırabileceği uygulanan katman sayısı arttıkça eğilme dayanımının artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca güçlendirme elemanlarının deformasyonlarının referanslara göre sınırlı olduğu görülmüş, elde edilen verilere göre en az 2 katman CFRP uygulaması yapılması gerektiği belirlenmiştir.

2.10. Shihata'nın (2011) Çalışması

Bu çalışmada çekme bölgesinde bindirmeli ek yapılmış olan betonarme kirişlerde; bindirmeli ek yapılan donatıda meydana gelen korozyona karşı bu bölgede CFRP malzeme ile güçlendirme yapılarak kirişin güçlendirilmesi durumunda davranışın belirlenmesi üzerine deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri CFRP ile güçlendirilip güçlendirilmeme durumu, pas payının donatı çapına oranı ve donatının korozyon oranıdır. Bu çerçevede 2000x300x200 mm boyutlarında toplam 18 adet kiriş üretilmiş olup bu kirişler üç gruba ayrılmıştır. Her grupta %5, %2,5 ve %0 oranında korozyona sahip CFRP ile güçlendirilen 3 adet ve CFRP ile güçlendirilmeyen 3 adet olmak üzere toplam 6 adet eleman yer almaktadır. Çekme donatıları kiriş orta noktasında 300 mm olacak şekilde bindirilerek ek yapılmış olup güçlendirilen elemanların tamamı kiriş orta noktasında simetrik olacak şekilde 600mm olarak CFRP ile sargılanmıştır. Deney sonuçlarına göre CFRP ile sargılanan elemanların sargılanmayan elemanlara göre önemli ölçüde dayanım artışı gösterdiği görülmüştür.

2.11. Fayyadh ve Razak'ın (2012) Çalışması

Bu çalışmada farklı hasar mertebelerindeki betonarme kirişlerin çekme bölgelerine CFRP malzemeler yapıştırılarak yapılan bu güçlendirme işleminin kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 2200x250x150 mm boyutlarındaki 4 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üretilmiştir. Elemanlardan bir tanesi güçlendirilmeksizin referans olarak bırakılmış kalan 3 kirişe ise sırasıyla tasarım yükü, akma yükü ve nihai yük kadar yükleme yapılarak kirişlere ön hasar verilmiştir. Sonrasında CFRP ile güçlendirilen bu elemanlar eğilme testlerine tabi tutulmuş olup; CFRP ile güçlendirilen elemanların referans elemana göre rijitliğinin artmış olduğu, CFRP ile güçlendirmenin elemanın yük taşıma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca sıyrılmaya meydana gelen elemanlarda tekrar CFRP ile yapılan güçlendirme sonrasındaki rijitliğin sıyrılmaya anındaki rijitliğe göre yüksek olacağı belirlenmiştir.

2.12. Dong, Wang ve Guan'ın (2013) Çalışması

Bu çalışmada CFRP ve GFRP uygulanan betonarme kirişlerin eğilme ve kesme-eğilme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri, güçlendirme malzemesi türü, güçlendirme yöntemi, beton basınç dayanımı, kiriş yüksekliği, donatı oranı, CFRP katman sayısı, pas payı, güçlendirme öncesi çatlak genişliği, etriye oranı ve kesme açıklığıdır. Dikdörtgen kesite sahip 14 adet betonarme eleman üretilmiş olup bunların yarısı eğilme davranışına yönelik kullanılan ilk grup; diğer yarısı ise eğilme ve kesme davranışının belirlenmesine yönelik kullanılan ikinci gruptaki deney elemanlarıdır. İlk gruptan bir ikinci gruptan ise iki eleman güçlendirilmeksizin referans olarak ayrılmıştır. İlk gruptaki elemanların alt yüzeylerine CFRP uygulandıktan sonra uç noktaları CFRP ile sargılanmıştır. İkinci gruptaki elemanların alt yüzeylerine CFRP uygulandıktan sonra kesme için U ve L şekillerinde kiriş boyunca devam eden aralıklı CFRP sargı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda; CFRP ve GFRP ile yapılan güçlendirmelerin eğilme ve kesme kapasitesine olumlu etki ettiği, sadece eğilmeye karşı güçlendirilen kirişlerin referans elemanlara göre %41 ve %125 arasında dayanım artışına ulaştığı görülmüştür. Eğilme ve kesme için güçlendirme yapılan elemanların sadece eğilme için güçlendirme yapılan elemanlara göre hem taşıma kapasitesi hem de rijitlik bakımından daha olumlu sonuçlar verdiği, katman sayısının artırılmasının nihai yük kapasitesini artırma noktasında yararlı olduğu görülmüştür.

2.13. Acar'ın (2014) Çalışması

Bu çalışmada çelik levha ve karbon kumaş malzemeler ile güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel değişkeni çelik levha sayısı, karbon kumaş katman sayısı, yapışma yüzeyi ve katmanların uygulanma sırasıdır. Bu doğrultuda 3200x300x150 mm boyutlarında 11 adet kiriş imal edilmiş olup bunlardan 1 tanesi referans olarak, 2 tanesi ise çelik levha veya karbon kumaştan birinin tercih edildiği yalın eleman, geriye kalan 8 tanesi ise iki malzemenin beraberce kullanıldığı güçlendirme elemanlarıdır. Deneyler neticesinde iki malzemenin beraberce uygulandığı elemanların yalın elemanlara göre taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve tokluk modülü değerlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Betona yapışan ilk tabakanın hangi malzeme olduğuna bağlı olarak sonuçların değişkenlik gösterdiği ve bu değişkenin davranışı etkileyen en önemli unsur olduğu görülmüştür.

2.14. Jian-He, Yong-Chang, Yi-Feng ve Gong-Fa'nın (2014) Çalışması

Bu çalışmada farklı hasar mertebelerindeki betonarme kirişlerin çekme yüzlerine CFRP malzemeler yapıştırılarak yapılan bu güçlendirme işleminin kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 2200x200x150 mm boyutlarındaki 25 adet dikdörtgen kesitli kirişe farklı kalınlıklarda CFRP malzeme uygulanmıştır. Deneyler neticesinde ön hasarlı kirişlerin yük taşıma kapasitesinin ciddi oranda arttığı ve ön hasar seviyesinin güçlendirilen deney elemanlarının akma ve nihai yükleri ile rijitliğine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca kesme açıklığının kiriş derinliğine oranı azaldıkça göçme mekanizmasının CFRP malzemenin uç kısımlardan sıyrılmışından, CFRP malzemesinin beton kabuğu ile birlikte yüzeyden ayrılmasına dönüştüğü görülmüştür.

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

Bu çalışmada kirişlerin çekme bölgesine CFRP plakalar yapıştırılıp güçlendirilerek uzun ve kısa süreli yüklemdeki davranışlarının belirlenmesi doğrultusunda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel değişkenleri uygulanan yükün süresi ve uzun süre yük uygulanan kirişlere uygulanan yük miktarı olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda dikdörtgen kesite sahip 5 adet betonarme kiriş imal edilmiş olup kirişlerin boyutları 5300 x 250 x 500

mm'dir. İlgili deney elemanları iki ayrı grup altında incelenmiş olup; birinci grupta statik yüklemeye maruz bırakılan iki adet betonarme kiriş, ikinci grupta ise 600 gün boyunca sabit yüklemeye maruz bırakılacak olan 3 adet betonarme kiriş bulunmaktadır. Birinci grup elemanlarından biri CFRP ile güçlendirilirken diğerinde ise herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. İkinci grup elemanlarında ise yine bir adet eleman güçlendirme yapılmaksızın referans olarak bırakılırken kalan iki eleman CFRP ile güçlendirilmiştir. Deney sonucunda CFRP plakaların eğilme elemanlarındaki ani deformasyonları ve çatlak genişliklerini sınırlama noktasında etkili olduğu görülürken, uzun süreli deformasyonlarda ve çatlak genişliklerini azaltma noktasında bu denli etkili olmadığı görülmüştür. Uzun süreli (600 gün) uygulanan yük miktarı artış gösterdikçe CFRP ile güçlendirilen elemanların ani ve zamana bağlı deformasyonlarında da artış yaşandığı görülmüştür.

2.16. Garcia, Helal, Pilakoutas ve Guadagnini'nin (2014) Çalışması

Çalışma kapsamında yeterli bindirme boyuna sahip olmayan 250x150x2500 mm boyutlarına sahip dikdörtgen kesitli 12 adet kiriş paspayı mesafelerine göre üç ayrı gruba ayrılmaktadır. Her grupta yer alan dört elemandan biri kontrol elemanı olarak güçlendirilmeksizin bırakılmış, ikincisinin bindirme bölgesinde etriye kullanılmış, üçüncüsünde tek katmanlı, dördüncüsünde ise iki katmanlı CFRP kullanılmıştır. İlgili elemanların tamamı dört noktalı yükleme etkisi altında eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde kontrol elemanlarının gevrek kırıldığı görülmüştür. Bindirme bölgesinde etriye kullanılan elemanda ilave bir dayanım artışı sağlanmadığı anlaşılmıştır. Bindirme bölgesi CFRP ile güçlendirilen elemanların eğilme mukavemetinde %65 seviyelerini bulan artış sağlandığı gösterilmiştir.

2.17. Ali, Abdalla, Hawileh ve Galal'nin (2014) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgesine yapıştırılan CFRP plakalara uygulanan CFRP mekanik ankrajların kiriş davranışı üzerine etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen 16 adet 1840x240x120 mm boyutlarındaki deney elemanından 5'inin sonuçlarına yer verilmiş olup; beş elemandan bir tanesi herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmaksızın referans olarak bırakılmıştır. Kalan dört elemandan ikisi CFRP ile güçlendirilmiş ancak ankraj imal edilmemiş, diğer ikisi ise CFRP ile güçlendirildikten sonra ankraj imal edilmiş olan deney elemanlarıdır.

Deney sonuçlarına göre ankrajlı elemanların ankrajsız elemanlara nispeten daha fazla yük taşıma kabiliyetine sahip olduğu ancak ankrajların eğilme rijitliğine anlamlı bir katkı sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca en yüksek süneklik değerine sahip eleman referans elemanken ankrajlı elemanların ise en düşük sünekliğe sahip elemanlar olduğu görülmüştür.

2.18. Köksal, Altınsoy, Aktan, Karahan ve Çankaya'nın (2017) Çalışması

Bu çalışmada farklı basınç dayanımına sahip betonlar ve farklı donatı oranlarıyla imal edilen betonarme kirişlere farklı uygulama teknikleri ile yapıştırılan CFRP plakaların eleman davranışına etkisinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri beton basınç dayanımı, donatı porsantajı ve CFRP plakasının uygulanma tekniğidir. Bu doğrultuda 1500x250x150 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 7 adet betonarme kiriş üretilerek bunlar beton basınç dayanımlarına göre iki gruba ayrılmıştır. İlk grubun beton basınç dayanım ortalaması 25,7 MPa, ikinci grubunki ise 6,8 Mpa olarak tespit edilmiştir. İlk grupta yer alan dört elemandan bir tanesi güçlendirilmeksizin referans eleman olarak bırakılmış, bir diğerrinin sadece alt yüzüne CFRP uygulaması yapılmış, diğerrinin alt yüzeyinde tamamen yan yüzeylerinde ise 50 mm' çıkan kısma kadar olacak şekilde CFRP uygulanmış sonuncusunda ise alt yüzeyinde tamamen yan yüzeylerinde ise 175 mm' çıkan kısma kadar olacak şekilde CFRP uygulanmıştır. İkinci grupta yer alan üç adet elemanın ise bir tanesi referans olarak bırakılmış, ikincisinin alt yüzüne CFRP uygulanmış, sonuncusuna ise alt yüzeyin tamamı ve yan yüzeylerden 50 mm'e kadar CFRP uygulanmıştır. Deneyler sonucunda beton basınç dayanımı yüksek olan 1. gruptaki elemanların eğilme dayanım artışlarının basınç dayanımı düşük olan 2. gruptaki elemanlara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Kiriş yan yüzeylerinden 50 mm'ye kadar çıkan CFRP uygulama yönteminin sadece alt yüze uygulama yöntemine göre etkin, 175'mm ye kadar uygulama yöntemine göre ise ekonomik olduğu görülmüştür.

2.19. Elwan, Elsayed, Refaat ve Lotfy'nin (2017) Çalışması

Bu çalışmada kiriş çekme bölgelerine dışarıdan yapıştırılan CFRP plakaların süreklilik durumları irdelenmektedir. Bu doğrultuda CFRP plakaları kiriş boyunca sürekli olan, kiriş ortasında CFRP plakaları süreksiz olan ve kiriş çekme bölgesinde belirli bir miktar

bindirme yapılarak CFRP yapıştırılmış olan 2100x400x200 mm boyutlarında referans eleman dahil toplam 7 adet kiriş imal edilmiştir. Deney değişkenleri CFRP plakaların süreksizliği ve bindirme boyudur. Referans eleman herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmamıştır. Güçlendirme elemanlarından birinde CFRP plaka tüm açıklık boyunca sürekli olacak şekilde imal edilmiştir. Bir diğer güçlendirme elemanında ise kirişin tam orta noktasında CFRP plakada süreksizlik sağlanmıştır. Geriye kalan 4 adet deney elemanında ise kirişin orta noktasında süreksizlik oluşturulup bu bölgenin üzerine her iki yönde de sırasıyla 300 mm, 450 mm, 600 mm ve 900 mm bindirme boyu sağlanacak şekilde plaka yapıştırılmıştır. Süreksiz CFRP plakaya sahip deney elemanı haricinde güçlendirme işlemi gerçekleştirilen diğer tüm deney elemanların yük kapasitesinde referans elemana göre artış meydana gelmiş, CFRP plakasında süreksizlik bulunan elemanın yük kapasitesi ise referans elemanla benzerlik göstermiştir. Bindirme boyundan bağımsız olarak bindirmeli CFRP plakaya sahip olan tüm güçlendirme elemanları sürekli olan deney elemanı ile yaklaşık olarak aynı dayanım değerlerine ulaşmıştır. Referans eleman ve ile CFRP plakanın süreksiz olduğu deney elemanı eğilme göçme moduna ulaşırken, diğer deney elemanlarının tamamı CFRP'nin sıyrılması ile birlikte göçme moduna ulaşmıştır.

2.20. Ercan, Arısoy, Çiftçioğlu-Özyüksel'in (2018) Çalışması

Bu çalışmada CFRP plakalar ve çelik plakalar ile güçlendirme yapılmış betonarme kirişler üzerine yapılan deneysel ve analitik araştırmalar sunulmaktadır. Çalışmada, güçlendirmenin betonarme kirişlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenerek CFRP ve çelik plaka takviyesi arasındaki farklar eğilme dayanımı açısından belirtilmektedir. Deneysel çalışma için 1500x150x250 mm boyutunda yedi adet kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden biri "kontrol örneği" olarak kabul edilirken, üç örnek CFRP levhalar kullanılarak güçlendirilmiş ve diğer üç örnek ise çelik levhalar kullanılarak güçlendirilmiştir. Deney numuneleri dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuş ve kirişlerin düşey deplasmanları ölçülmüştür. Referans eleman eğilme kesme moduna ulaşırken; güçlendirme elemanlarının yük kapasitesinde artış meydana geldiği ve kesme göçme moduna ulaştığı görülmüştür. Güçlendirme elemanları kendi içerisinde kıyaslandığında ise CFRP kullanılan deney numunelerinin çelik plaka kullanılan deney numunelerine oranla eğilme dayanımı açısından daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

2.21. Tarigan, Patra ve Sitorus'un (2018) Çalışması

Bu çalışmada betonarme eğilme elemanlarında farklı malzemeler kullanılarak yapılan güçlendirmelerin davranışa olan etkisi araştırılmış ve bu doğrultuda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 3200x250x150 mm boyutlarındaki 4 adet kirişten ilki referans olarak tutulurken, ikincisi CFRP ile, üçüncüsü GFRP ile, sonuncusu ise çelik plakalar ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilen deney elemanları dört noktalı eğilme testlerine tabi tutulmuş olup; CFRP kullanılan elemanda referans elemana göre 1,44 kat, GFRP kullanılan elemanda referans elemana göre 1,33 kat, çelik plaka kullanılan elemanda referans elemana göre 1,16 kat daha fazla dayanım elde edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde güçlendirmede kullanılan CFRP malzemesin GFRP ve çelik plakaya göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

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

Bu çalışmada farklı ön hasar mertebelerine sahip kirişlerin CFRP malzemelerle güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni betonarme kirişlerin ön hasar seviyesidir. Bu doğrultuda 2500x125x250 mm boyutlarında 4 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden bir tanesi referans eleman olarak kullanılmış olup; referans kiriş göçme yüküne kadar yüklenmiştir. Güçlendirme elemanlarına ise CFRP uygulanmadan önce %1, %2 ve %3 yer değiştirme seviyelerine kadar hasar verilerek kirişler test edilmiş ve sonrasında CFRP uygulanmıştır. Deneyler neticesinde %1 ön hasar seviyesine sahip olan kirişin referans kirişe göre %20, %2 ön hasar seviyesine sahip olan kirişin %0 (deney hatası) ve %3 ön hasar seviyesine sahip olan kirişin ise referans kirişe göre %23 oranında kapasite artışına ulaştığı görülmüştür.

2.23. Rashid, Li, Deng, Xie, Wang ve Chen'in (2019) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgelerine yapıştırılan ön germeli CFRP plakaların elemanın eğilme davranışı üzerine etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni CFRP malzemeye uygulanan ön germe kuvvetidir. Bu doğrultuda 2800x275x160 mm boyutlarında toplam 6 adet betonarme kiriş üretilmiş olup bunlardan bir tanesi güçlendirilmeksizin referans eleman olarak bırakılmıştır. Kalan 5 adet güçlendirme elemanının ilkine yapıştırılan CFRP plakaya ön germe kuvveti

uygulanmaksızın, %20 oranında uygulanılarak ve %40 oranında uygulanılarak güçlendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde CFRP plakaya uygulanan ön germe kuvvetlerinin artırılmasıyla birlikte elemanın nihai yük kapasitesi ve çatlak performansında önemli ölçüde iyileşme sağlandığı bunun yanında sünekliğin azaldığı görülmüştür.

2.24. Makhlouf'un (2019) Çalışması

Bu çalışmada çekme donatısında bindirmeli ek yapılmış olan betonarme kirişlerin; bindirme bölgelerinde FRP ile güçlendirme yapılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri bindirmeli ekin uzunluğu, kullanılan FRP malzemesinin CFRP mi GFRP mi olduğu ve uygulanan güçlendirme tekniğidir. Bu çerçevede 3200x250x120 mm ebatında toplam 12 adet kiriş üretilmiştir. Üretilen kirişler dört gruba ayrılmış olup ilk grupta güçlendirme yapılmayan; bindirme boyu 0 mm, diğeri 320 mm ve sonuncusu 550 mm olan toplam üç adet güçlendirilmemiş kiriş bulunmaktadır. İkinci grupta; donatı bindirme bölgesinde 50mm genişliğinde 2 katmanlı CFRP şerit bulunan, 1 katmanlı GFRP şerit bulunan, 2 katmanlı GFRP şerit bulunan ve 3 katmanlı GFRP şerit bulunan 4 farklı kiriş yer almaktadır. Üçüncü grupta; donatı bindirme bölgesinin yine 50mm aralıklarla CFRP ve GFRP etriyelerle U ve kutu şeklinde sargılandığı 3 adet eleman yer almaktadır. Dördüncü grupta ise donatı bindirme bölgesi iki adet GFRP çubukla güçlendirilen toplam 2 adet kiriş yer almaktadır. Deney sonuçları bindirme bölgesinin FRP malzemelerle sargılanmasının elemanın sünekliğine olumlu yönde etki ettiği göstermiştir. Ayrıca üçüncü grupta yapılan uygulamanın, düşük maliyet, eleman rijitliği, süneklik, eğilme dayanımı, uygulama sonrası düz yüzey elde etme ve uygulanabilirliğin kolay olması yönlerinin diğer yöntemlere göre pozitif ayrıştığı görülmüştür.

2.25. Mashrei, Makki ve Sultan'nin (2019) Çalışması

Çalışma kapsamında 130x220x1190 mm ebatlarına sahip dikdörtgen kesitli 13 adet kiriş üzerlerine açılacak olan oluk tipi ve uygulanacak olan CFRP plaka katmanı sayısına göre 5 ayrı gruba ayrılmıştır. A grubunda yer alan bir adet deney elemanı referans olarak ayrılmış olup herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmamıştır. B grubunda yer alan iki adet deney elemanından bir tanesinin alt çekme bölgesine tek kat diğerine ise iki kat karbon

plaka uygulaması gerçekleştirilmiştir. C1 grubunda yer alan üç adet deney elemanının çekme bölgeleri üzerine kiriş boyunca uzanan 3'er adet dikdörtgen, üçgen ve kavisli oluklar açılmış ve karbon plakalar bu yüzey üzerine epoksi ile tek kat şeklinde yapıştırılmıştır. C2 grubunda yer alan 3 adet deney elemanında C1 deney grubu ile tamamen aynı şekilde ancak kumaşlar olukların içerisinde kıvrılarak yüzeye tutundurulacak şekilde uygulanmıştır. D grubunda yer alan 4 adet deney elemanın ikisinde dikdörtgen diğer ikisinde ise üçgen olmak üzere bu sefer kiriş kesiti boyunca devam eden 8'er adet oluk açılmış olup aynı oluk tipine sahip elemanlardan her birine birer ve ikişer katman CFRP uygulanmıştır. Deney sonuçlarında; oluk açılmayan A grubu elemanlarının sıyrılmaya maruz kaldığı, diğer tüm gruplarda ise beton kabuğu ile birlikte yüzeyden ayrılmanın olduğu belirlenmiş olup, en geniş yüzey alanına sahip geometriye sahip olan dikdörtgen olukların en yüksek performansı gösterdiği, oluklar içerisinde kıvrılarak yüzeye yapıştırılan CFRP'lerin normal yapıştırmaya göre daha yüksek performans gösterdiği, çift kat CFRP uygulamasında daha yüksek eğilme mukavemetine ulaşıldığı sonuçlarına varılmıştır.

2.26. Yu ve Diğerleri'nin (2020) Çalışması

Bu çalışmada farklı hasar mertebelerindeki betonarme kirişlerin çekme bölgelerine CFRP malzemeler yapıştırılarak yapılan bu güçlendirme işleminin kirişlerin eğilme davranışına olan etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri kirişlerin çekme donatısı oranı, ön hasar seviyeleri ve kullanılan CFRP malzemenin katman sayısıdır. Bu doğrultuda 2100x250x150 mm boyutlarında toplam 10 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden bir tanesi güçlendirilmeksizin referans eleman olarak bırakılmış kalan dokuz tanesi ise kirişlere ön hasar verildikten sonra CFRP malzemeler ile güçlendirilmiştir. Kirişlerin ön hasar seviyeleri ise 0,4 ve 0,8 katsayıları ile ifade edilmektedir. Güçlendirme elemanlarına bu katsayıların referans elemanın akma dayanımı ile çarpılması sonucu elde edilen yük değerine kadar yüklenerek hasar verilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında ön hasarlı elemanlarda CFRP malzemenin kopması ve sıyrılmaları olmak üzere 2 farklı türde göçme modu olduğu belirlenmiştir. Güçlendirme elemanlarında CFRP malzemenin katman sayısı ve donatı oranları arttıkça kirişlerin eğilme kapasitesinin arttığı, ön hasar seviyesi arttıkça kirişlerin eğilme kapasitesinin azaldığı görülmüştür.

2.27. Deng, Rashid, Li, Xie ve Chen'in (2021) Çalışması

Bu çalışmada "T" ve dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin çekme bölgelerine uygulanan ön germeli CFRP plakaların elemanın eğilme davranışına etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri kiriş boyutu, ön germe kuvveti ve kiriş kesitidir. Bu doğrultuda 2800x300x160 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli üç adet deney elemanından ilkinde ön germe kuvveti uygulanmamış, ikincisine plaka kapasitesinin %20'si kadar ön germe kuvveti uygulanmış, sonuncusuna ise %40'ı kadar ön germe kuvveti uygulanmıştır. Deneyler neticesinde ön germe kuvveti arttıkça elemanın yük taşıma kapasitesi ve ulaşılan momentlerin arttığı görülmüştür. Ayrıca küçük ölçekli güçlendirme elemanlarının büyük ölçeklilere göre daha yüksek momentlere ulaştığı, büyük ölçekli deney elemanlarında CFRP plakaların uçlardan sıyrılması sonucu oluşan yük değiştirme eğrilerindeki ani düşüş durumunun küçük ölçeklilerde belirgin şekilde yaşanmadığı görülmüştür. Gerçek ölçekli numunelerde epoksi yapıştırıcının rijitlik artışına katkı sağladığı görülmekle birlikte küçüklerde ise rijitlik artışı yaşanmamıştır.

2.28. Yang, Johansson, Emrani ve Haghani'nin (2021) Çalışması

Bu çalışmada betonarme kirişlerin çekme bölgelerine yapıştırılan ön germeli CFRP plakaların elemanın eğilme davranışı üzerine etkisi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni CFRP malzemeye uygulanan ön germe kuvvetidir. Bu doğrultuda 4500x300x200 mm boyutlarında toplam 3 adet betonarme kiriş üretilmiş olup bunlardan bir tanesi güçlendirilmeksizin referans eleman olarak bırakılmıştır. Güçlendirme elemanlarından ilki öngerme kuvveti uygulanmaksızın CFRP ile güçlendirilmiş, ikincisi ise öngerme kuvveti uygulanan CFRP malzeme ile güçlendirilmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda güçlendirme elemanlarında referans elemanlara göre nihai yük kapasitesinde ve rijitlikte artış meydana geldiği, ayrıca CFRP malzemeye öngerme uygulamanın dayanım ve rijitlik değerlerini arttırırken çatlak genişliklerini sınırladığı görülmüştür.

2.29. Al-Khafaji, Salim ve El-Sisi'nin (2021) Çalışması

Bu çalışmada CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlere uygulanan uzun süreli ve kısa süreli yüklerin; betonarme kirişlerin davranışına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

1219,2 x 203,2 x 101,6 mm boyutlarındaki toplam 12 adet betonarme kirişten ikisi referans eleman, on tanesi ise farklı yük uygulama süresi, farklı donatı oranı ve farklı CFRP plaka uygulama tekniğine sahip olan güçlendirme elemanıdır. Bunlardan uzun süreli yüklemeye tabi tutulacak 5 adet deney elemanı kendi kapasitesinin yaklaşık %60'ına denk gelen bir yük altında 332 gün bırakılıp bu sürenin sonunda değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda çelik donatıya sahip olamayan CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanının 44 günlük sürekli yük etkisinde göçmeye ulaştığı görülmüştür. CFRP malzeme kullanımının kirişlerin statik kapasitesinin arttırılması noktasında etkili olduğu ve çekme bölgesinde U şeklinde CFRP malzeme sargılanmasının kiriş dayanıma olumlu yönde etki ettiği görülmüş ancak göçme modunun yine de gevrek şekilde meydana geldiği belirlenmiştir.

2.30. Al-Fakih ve Diğerleri'nin (2021) Çalışması

Bu çalışmada deniz kumu kullanılarak imal edilmiş kirişlerin CFRP plakalarla güçlendirilmesi ele alınmıştır. Deney değişkeni betonarme kirişlerde kullanılan normal kum ve deniz kumudur. Çalışma kapsamında 1600x150x100 mm ebatlarında 3 adet kiriş imal edilmiş olup bunlardan bir tanesi güçlendirme yapılmayan referans eleman 2 tanesi ise CFRP plaka ile güçlendirilmiş deney elemanlarıdır. Deney sonuçlarına göre CFRP plakanın; normal kum kullanılan güçlendirme elemanında, deniz kumu kullanılan güçlendirme elemanına göre daha verimli bir dayanım artışı sağladığı, deniz kumu kullanılan elemandaki dayanımın referans elemana göre fazla olmakla birlikte bu farkın sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Normal kum kullanılan elemandaki çatlak sayılarının ise deniz kumu kullanılan elemana nazaran daha az olduğu görülmüş, CFRP plakalar uçlardan sıyrılarak göçme moduna ulaşmakla birlikte; betonarme kirişlerde CFRP plaka kullanımının çatlak performansına olumlu etki edebildiği değerlendirilmiştir.

2.31. Huang ve Diğerleri'nin (2022) Çalışması

Bu çalışmada H tipi uç ankrajları uygulanan ve ön germe kuvveti verilen CFRP malzemelerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik ve çarpma yükleri etkisi altında davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni, ön germe kuvveti, ankraj germe çubuğu çapı ve yükleme sistemidir. Bu doğrultuda 3500x500x250 mm boyutlarına 7 adet betonarme kiriş imal edilmiştir. İlgili kirişlerden 2 tanesi referans eleman olarak güçlendirilmeksizin bırakılmış olup kalan 5

tanesi ise güçlendirme elemanlarıdır. Deneyler neticesinde CFRP malzemeye uygulanan ön germe kuvvetinin artırılmasının dayanıma olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca CFRP ile güçlendirilen tüm elemanlarda ilk çatlamanın yaşandığı yük ve rijitliği arttığı belirlenmiştir. Dinamik çarpma yüklemesi yapılan deney elemanlarında CFRP ile güçlendirilen elemanlardaki çatlakların referans elemana göre daha sınırlı olduğu görülmüştür.

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

Bu çalışmada farklı basınç dayanımlarına sahip betondan üretilen betonarme kirişlere farklı teknikte üretilen farklı türde CFRP malzemeler yapıştırılarak kirişlerin eğilme ve kesme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri, beton basınç dayanımı, uygulama yöntemi, CFRP malzemesi türü ve incelenen davranışın türüdür. Bu çerçevede 2000x300x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip toplam 24 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden 6 tanesi güçlendirme yapılmaksızın bırakılan referans elemandır. Kalan 18 kiriş ise farklı metot ve farklı CFRP malzemelerle güçlendirilmiştir. Deneyler neticesinde CFRP malzemenin kesme ve eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığı, CFRP'nin dayanıma yaptığı katkının basınç dayanımı ile ters oranlı olduğu görülmüştür. CFRP plakanın kiriş alt çekme bölgesine yapıştırılmasında plaka boyunun uzatılmasının dayanıma katkı sağladığı, eğilme davranışına en çok kirişlerin CFRP kumaşla U şeklinde sargılanmasının olumlu yönde etki ettiği görülmüştür.

2.33. Lu, Zhang, Duan, Huo ve Liu'nun (2022) Çalışması

Bu çalışmada farklı uzunluk, genişlik ve katman sayılarına sahip CFRP plakalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin dinamik çarpma yükü etkisi altında eğilme kapasitesinin ve dinamik davranışlarının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çarpma yükü uygulayan çekicinin düşme yüksekliği ve kullanılan CFRP plakaların boyutları deney değişkenleri olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda 2000x300x150 mm boyutlarında 8 adet betonarme kiriş imal edilmiş olup bunlardan biri referans eleman olarak seçilmiş, diğer elemanlar ise farklı uzunluk, genişlik ve katman sayılarında CFRP plakalar ile güçlendirilerek farklı yükseklikten bırakılan çekiçler vasıtasıyla farklı dinamik yüklere maruz bırakılmıştır. Deneyler neticesinde CFRP malzemenin kirişlerde oluşan

çatlakları ve düşey deplasmanları sınırlandırdığı ve çarpma yüküne karşı eğilme dayanımını arttırdığı görülmüştür. Daha uzun, daha geniş ve daha fazla katman sayısına sahip CFRP malzeme ile güçlendirme yapıldığında eğilme dayanımında artış yaşandığı gözlemlenmiştir.

2.34. Mousavi, Sohrabi, Moodi ve Gholamhosseini'nin (2022) Çalışması

Çalışma kapsamında yeterli bindirme boyuna sahip olmayan 200x150x2300 mm ebatlarına sahip dikdörtgen kesitli 8 adet kiriş paspayı mesafelerine göre iki ayrı gruba ayrılmıştır. Her grupta yer alan dört adet elemandan biri kontrol elemanı olarak güçlendirilmeksizin bırakılmış, diğerlerinde ise GFRP malzemenin baştan ve sondan 100 mm'lik kısmı karbon elyaf malzeme ile sarılmak şartıyla; çekme bölgesinde 800mm GFRP, 1300 mm GFRP ve son olarak 800 mm GFRP'ye ek olarak bindirme bölgesinde karbon elyaf sargı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen dört noktalı yükleme deneyleri sonucunda karbon elyaf sargılamanın dayanım üzerine ciddi bir katkısının olmamakla birlikte süneklik ve enerji tüketebilme kapasitesinde artış sağladığı, GFRP çubuk kullanılan elemanların ise referans elemanlara kıyasla hem daha fazla yer değiştirme hem de yük kapasitesi bakımından daha yüksek performans gösterdiği anlaşılmıştır.

2.35. Sümer (2023) Çalışması

Çalışma kapsamında çekme bölgesinde donatıları kesit olarak imal edilmiş olan 8 adet 200x400x3000 mm ebatlarında kiriş ile yine aynı ebatlarda çekme bölgesindeki donatıları sürekli olan 2 adet kiriş imal edilmiştir. Bahse konu kirişlerin yarısında Ø22, diğer yarısında ise Ø16 çapında donatı kullanılmıştır. Deney grupları donatı çapına göre ikiye ayrılmıştır. Donatının akma ve karbon fiber plakanın çekme dayanımına göre yapılan hesaplamalar neticesinde Ø16 çapında donatı kullanılan elemanlarda 50 mm; Ø22 çapında donatı kullanılan elemanlarda ise 100 mm ebatlı karbon plakalar tercih edilerek güçlendirme yapılmıştır. Bu bağlamda donatısı sürekli iki adet referans eleman hariç donatısı kesik olarak imal edilmesi dolayısıyla bindirme boyu yetersiz olan diğer tüm deney elemanlarının alt çekme bölgesine karbon plakalar yapıştırılmıştır. Yapıştırılan karbon fiber plakalar sıyrılmayı azaltmaya yönelik herhangi bir ilave tedbir alınmaksızın bırakılmıştır. Her iki deney grubunda da grubun kendi donatısına göre temel kenetlenme boyu hesaplanarak sırasıyla bu kenetlenme boyunun 0,75 katı, 1,00 katı, 1,25 katı ve 1,50

katı kadar plaka boyları tercih edilmiştir. Deney elemanlarının tamamı üç noktalı yükleme testine tabi tutularak eğilme kapasiteleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda karbon fiber plaka ile bindirmeli ek yapılan kirişlere uygulanan plakalar hedef dayanıma ulaşmayan yükler altında yüzeyden sıyrıldığından; bindirme boyundan bağımsız olarak kirişlerin tamamı gevrek kırılmaya uğramış, sıyrılmayı önleyici ilave tedbirler önerilmiştir.

2.36. Assad, Hawileh, Karaki ve Abdalla'nın (2024) Çalışması

Bu çalışmada CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde karbon fiber püsküllü (spike) ankraj kullanımının elemanın eğilme davranışı üzerine etkilerinin araştırılması amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deney değişkeni; ankraj çapı ve ankrajın gömülme derinliğidir. Bu doğrultuda 2000x200x250 mm boyutlarında toplam 6 adet betonarme kiriş imal edilmiştir. Bu kirişlerden referans eleman olarak ayrılan ikisinden bir tanesinin çekme bölgesine CFRP malzeme yapıştırılmış ancak ankraj uygulanmamış, diğeri ise güçlendirilmeksizin bırakılmıştır. Güçlendirme elemanlarının çekme bölgelerine CFRP uygulanmadan önce ankraj delikleri açılarak farklı çap ve gömülme derinliklerinde ankrajlar CFRP malzeme ile birlikte uygulanmıştır. Gerçekleştirilen dört noktalı eğilme testleri neticesinde kiriş alt çekme yüzeylerine ankraj uygulanan elemanların yük taşıma kapasitelerinin uygulanmayanlara göre ortalama %19 artış gösterdiği, ankrajın sıyrılmayı önlemede etkili olduğu, anraj çapının arttırılmasının yük taşıma kapasitesine olumlu etki ettiği görülmüştür.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deney elemanlarının niteliği, deney elemanlarında kullanılan malzemelerin özellikleri, elemanların imal edilme aşamaları ve deney düzeneğine dair bilgiler verilmiştir.

3.1. Deney Elemanları

Sümer'in (2023) çalışmasında karbon fiber plakalarla güçlendirilerek test edilen ve plakaların sıyırılması dolayısı ile gevrek davranış gösteren hasarlı deney elemanları bu çalışmada onarıp ilave bir dizi tedbirle yeniden güçlendirilmiştir. Ayrıca Sümer'in (2023) çalışmalarının hazırlığı sırasında olası gevrek kırılma durumunun ön görülerek, aynı saha koşullarında imal edilmiş fakat belirtilen sebeple testleri yapılmamış hasarsız vaziyetteki dört adet deney elemanı da bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Deneyleerde kullanılan kirişler 200 mm genişlik, 400 mm yükseklik ve 3000 mm uzunluğa sahiptir. Deney elemanlarının yarısının basınç bölgesinde 2Ø16, çekme bölgesinde 2Ø8 + 2Ø16 donatı kullanılırken; diğer yarısının basınç bölgesinde 2Ø22, çekme bölgesinde 2Ø8 + 2Ø22 donatı kullanılmıştır. İmal edilen deney elemanlarının tamamında tüm kiriş boyunca devam eden Ø8/100 mm etriye bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yararlanılan deney elemanları donatı çapı ve ankrajlı olup olmaması durumlarına göre 4 ayrı grupta değerlendirilmiş olup toplam 14 adet kirişten oluşmaktadır. Referanslar haricinde güçlendirilen kirişlerin çekme bölgesindeki Ø16 ve Ø22 donatıları kiriş orta noktasına denk gelecek şekilde kesik olarak imal edilmiştir. Referans elemanlarda ise bu donatılar sürekli olarak devam etmektedir.

Çizelge 3.1. Deney elemanlarının nitelikleri

GRUP	Deney Elemanı	Deney No	Donatı	Karbon Fiber Plaka Genişliği (mm)	Karbon Fiber Plaka Kenetlenme Boyu Çarpanı	Karbon Fiber Plaka Boyu (mm)
A	RS01	RS50	Ø16	---	---	---
	RS02	RS100	Ø22	---	---	---
B	K01	SW50/0,75	Ø16	50	0,75	912
	K02	SW50/1,00	Ø16	50	1,00	1216
	K03	SW50/1,25	Ø16	50	1,25	1520
	K04	SW50/1,50	Ø16	50	1,50	1824

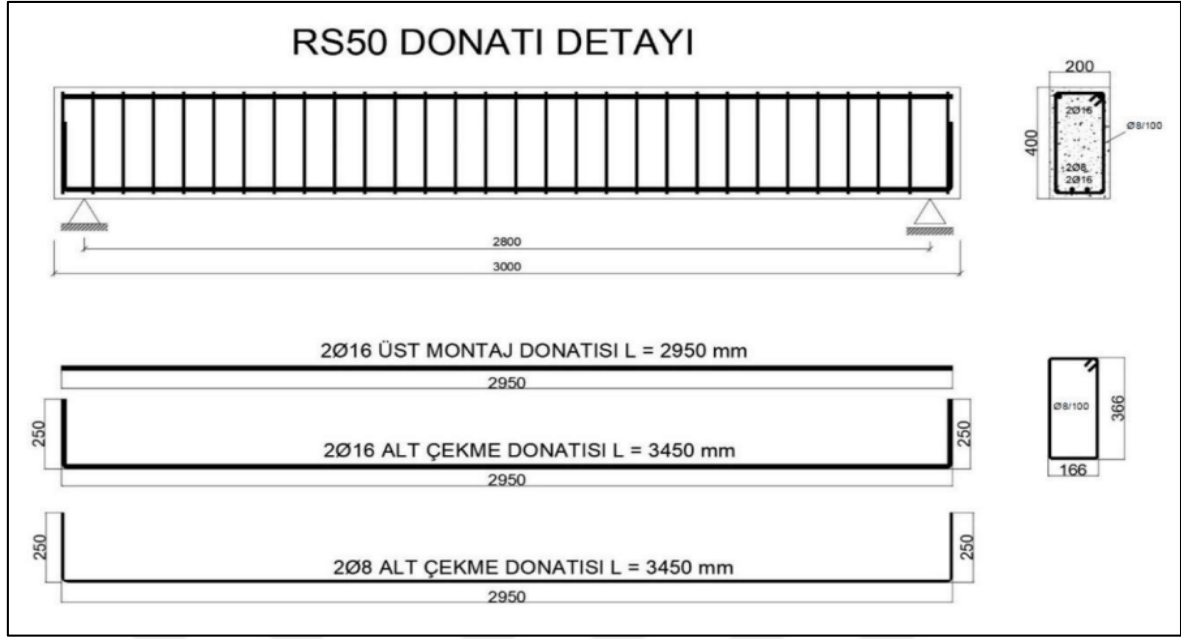
Çizelge 3.1. (devam) Deney elemanlarının nitelikleri

GRUP	Deney Elemanı	Deney No	Donatı	Karbon Fiber Plaka Genişliği (mm)	Karbon Fiber Plaka Kenetlenme Boyu Çarpanı	Karbon Fiber Plaka Boyu (mm)
C	K07	SW100/0,75	Ø22	100	0,75	1254
	K08	SW100/1,00	Ø22	100	1,00	1672
	K09	SW100/1,25	Ø22	100	1,25	2090
	K10	SW100/1,50	Ø22	100	1,50	2508
D	K05	SWA50/1,25	Ø16	50	1,25	1520
	K06	SWA50/1,50	Ø16	50	1,50	1824
	K11	SWA100/1,25	Ø22	100	1,25	2090
	K12	SWA100/1,50	Ø22	100	1,50	2508

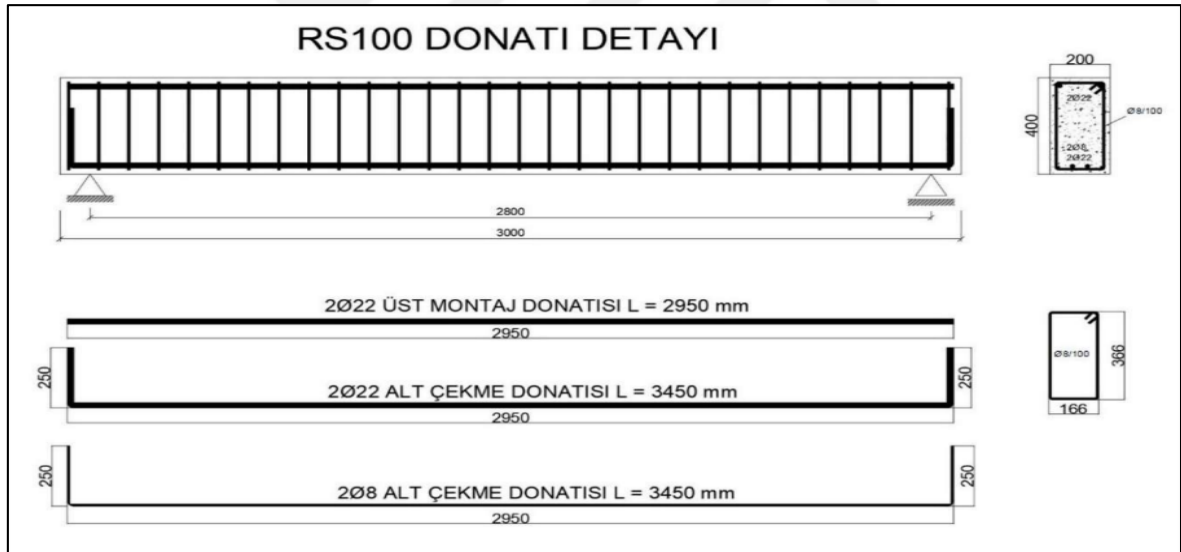
Deney elemanlarının isimlendirmesinde kullanılan harflerden R harfi İngilizce “reference”, S harfi İngilizce “specimen”, W harfi İngilizce “wrap”, A harfi ise İngilizce “anchor” kelimelerinden esinlenilmiştir. Harflerin yanına gelen iki rakam karbon plaka genişliğini, “/” işaretinden sonra gelen rakamlar ise elemanın kenetlenme boyunun; hesaplanan temel kenetlenme boyunun kaç kaçı kadar olduğunu belirtmektedir. Örneğin SWA50/1,50 isimlendirmesinden; 50 mm genişlikli ve kiriş orta noktasından hem sağa hem sola doğru temel kenetlenme boyunun 1,5 katı kadar uzanan boydaki bir karbon plaka ile güçlendirilen, U tipi sargıları ve fan tipi ankraj uygulaması yapılmış bir deney numunesi düşünülmelidir.

Çalışmada dikkate alınan temel kenetlenme boyları, Sümer’in (2023) çalışmasında TS500 “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”na göre hesaplanan temel kenetlenme boylarıdır. Ø16 çapa sahip donatı kullanılan elemanlar için bu değer 1216 mm iken Ø22 çapa sahip donatı kullanılan elemanlar içinse bu değer 1672 mm’dir.

Çizelge 3.1’ de A grubu başlığı altında tanımlanan deney elemanları, Sümer’in (2023) çalışmasında kullanılan, ayrıca bu çalışmada da faydalanılan iki adet referans kiriştir. Referans kirişlerden ilki çekme ve basınç bölgesinde Ø16 çapında donatılara sahipken ikincisi ise Ø22 çapında donatılara sahiptir. Bu iki elemanın boyuna donatılarının tümü sürekli olarak tek parça donatıdan imal edilmiştir. Elemanlar herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmamıştır (Şekil 3.1, Şekil 3.2).



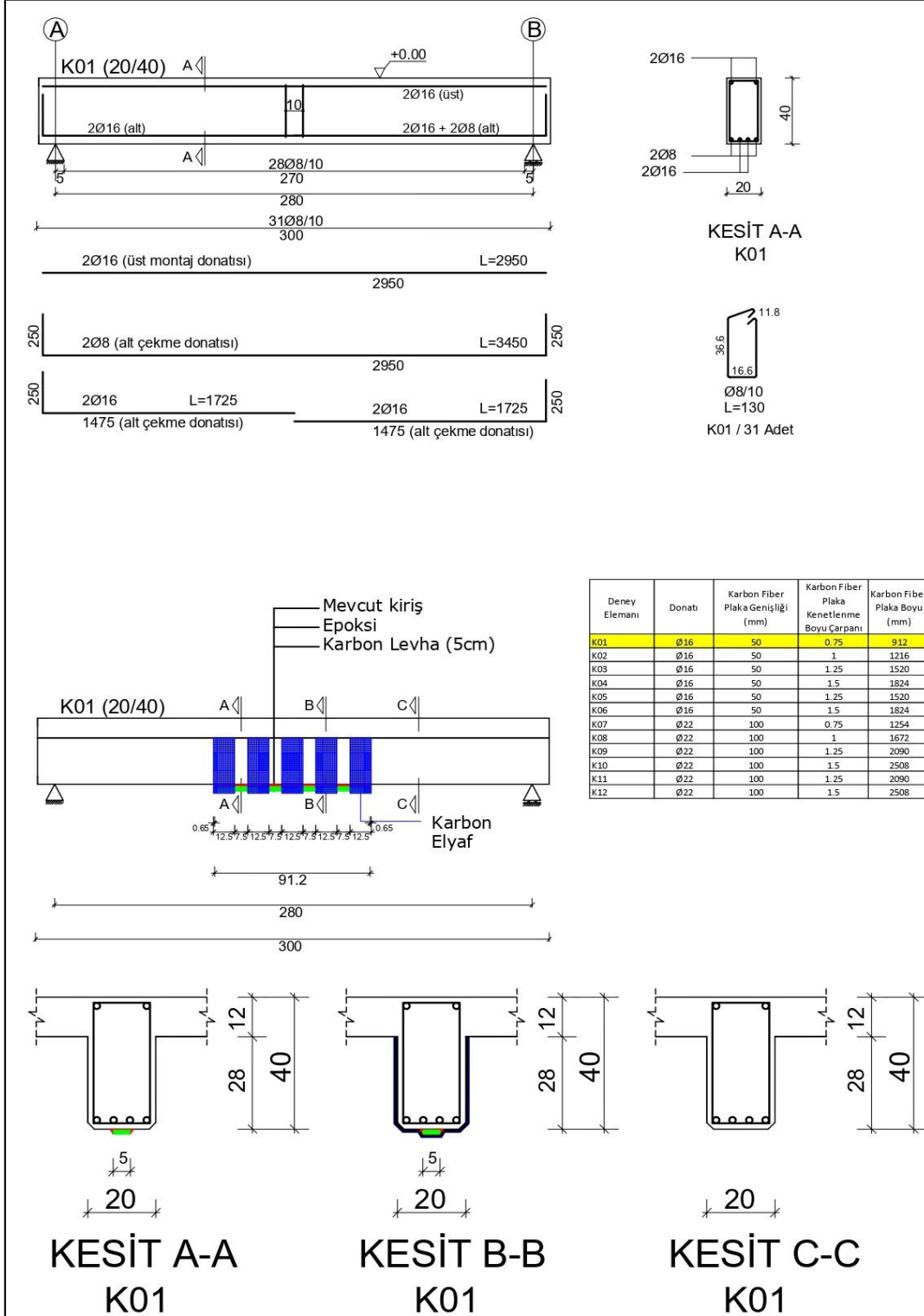
Şekil 3.1. RS50 referans elemanı donatı detayı



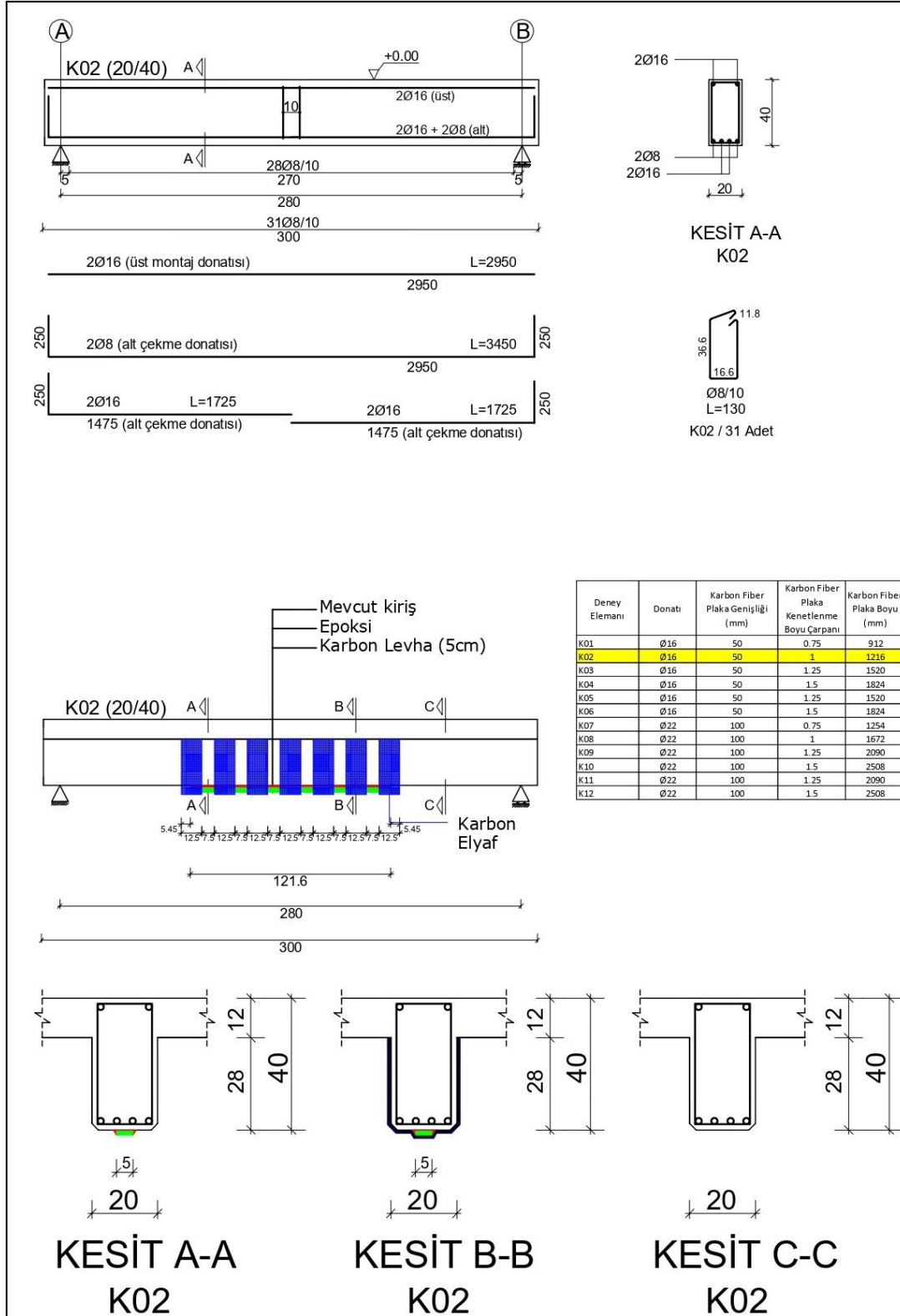
Şekil 3.2. RS100 referans elemanı donatı detayı

Çizelge 3.1’de B grubu başlığı altında tanımlanan deney elemanları ise $\text{Ø}16$ çapında donatıya sahip olan ve çekme bölgesindeki $\text{Ø}16$ çaplı donatıları orta noktasında kesik olarak imal edilen, üç nokta yükleme testleri ile daha önce kırılmış olan 4 adet hasarlı kirişten oluşmaktadır. Bu kirişlere sırası ile hesaplanan temel kenetlenme boyunun 0,75 katı, 1,00 katı, 1,25 katı ve 1,50 katı uzunluğunda 1,4 mm kalınlığında ve 50 mm genişliğinde karbon plaka yapıştırılmıştır. İşlem sonrasında 125 mm genişliğinde kesilen karbon elyaf kumaşlar; 75 mm ara ile kiriş üst yüzünden itibaren 120 mm’ lik mesafede

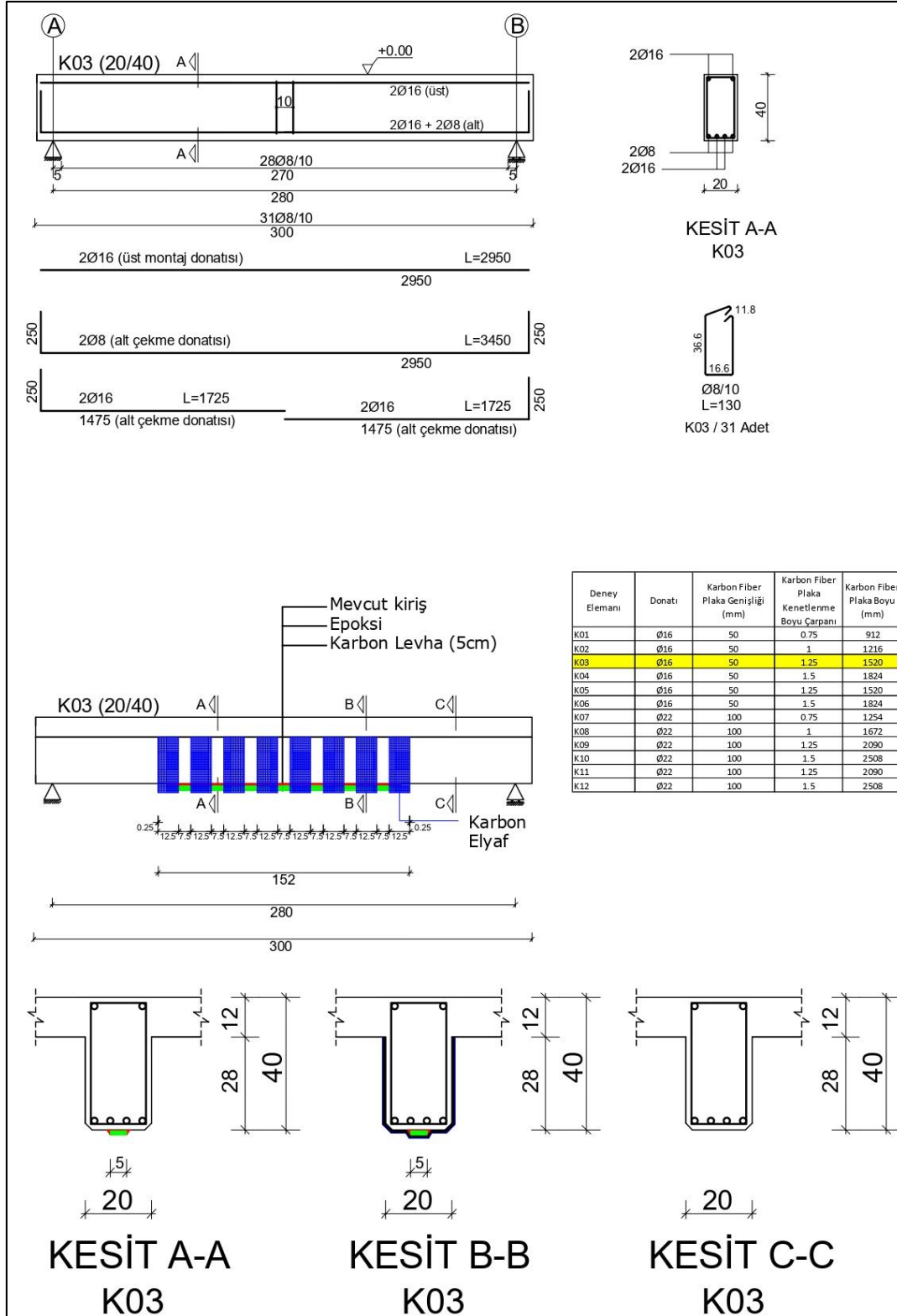
döşeme varmışçasına boş bırakılarak U şeklinde yapıştırılmış ve bu sargılama yöntemi plaka uzunluğu boyunca üst üste çift kat uygulanmıştır. Tüm işlemler öncesinde hasar alan bölge yüksek mukavemetli tamir harcı ile doldurularak onarılmıştır.



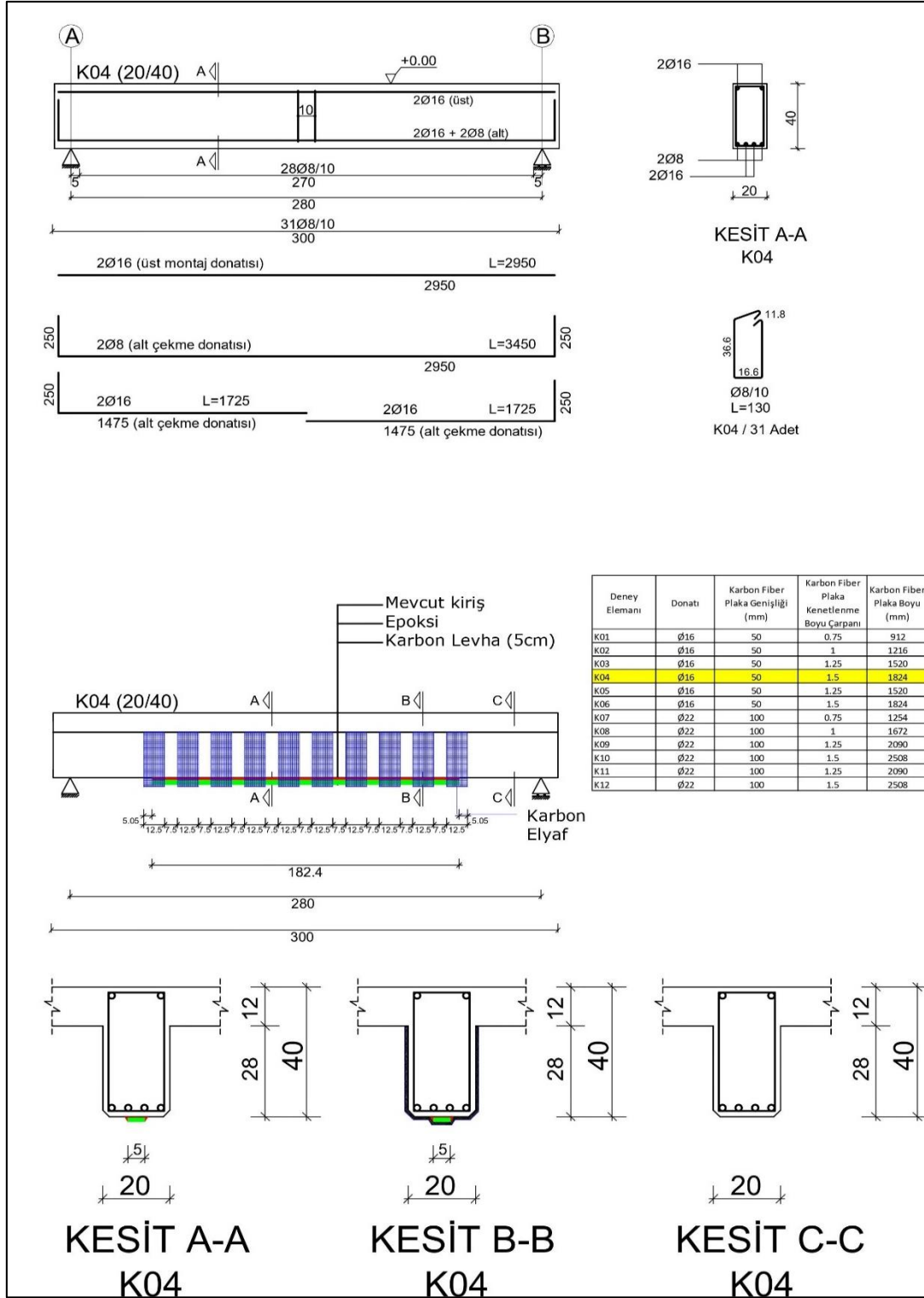
Şekil 3.3. SW50-0,75 güçlendirilmiş eleman donatı detayı



Şekil 3.4. SW50-1,00 güçlendirilmiş eleman donatı detayı



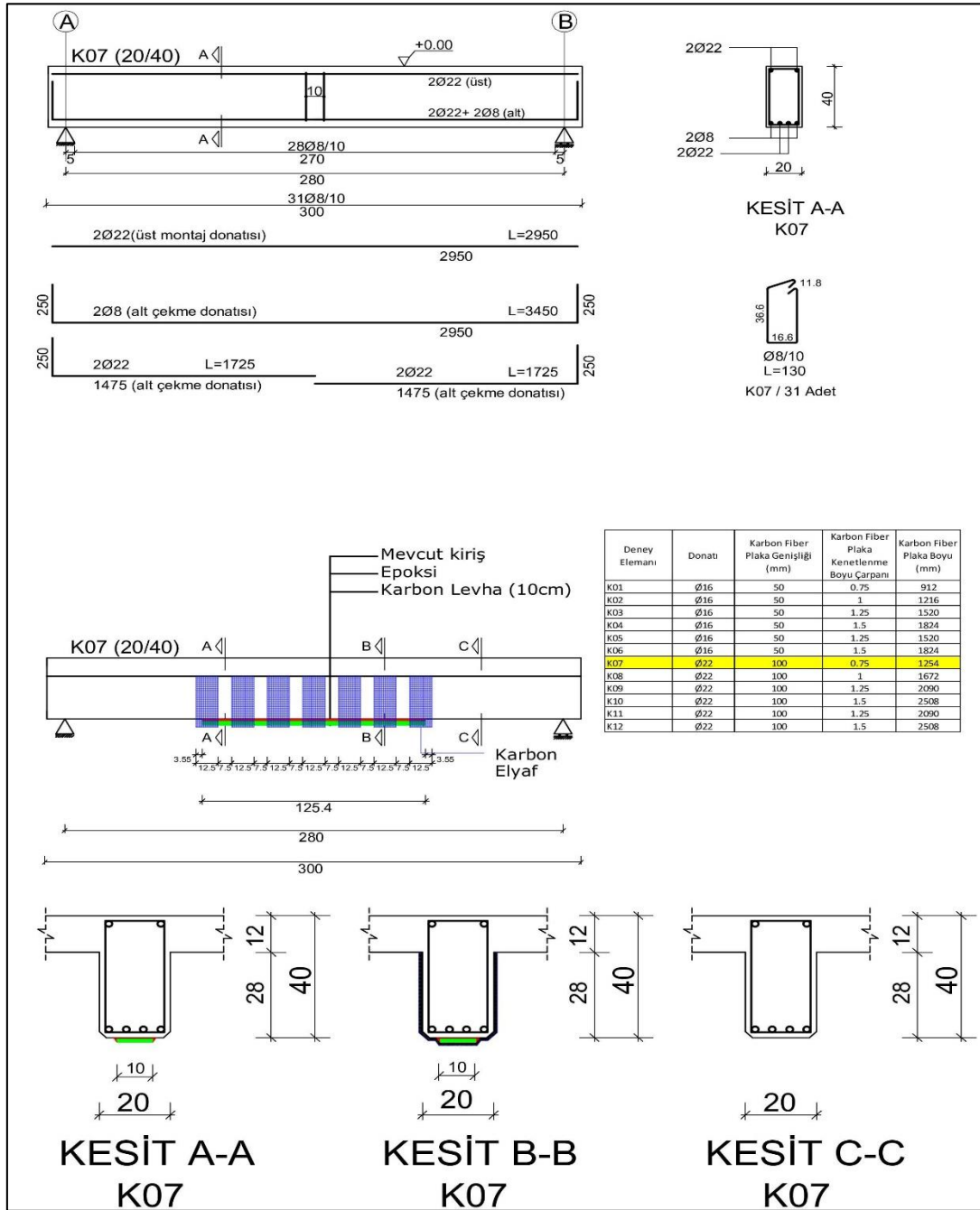
Şekil 3.5. SW50-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı



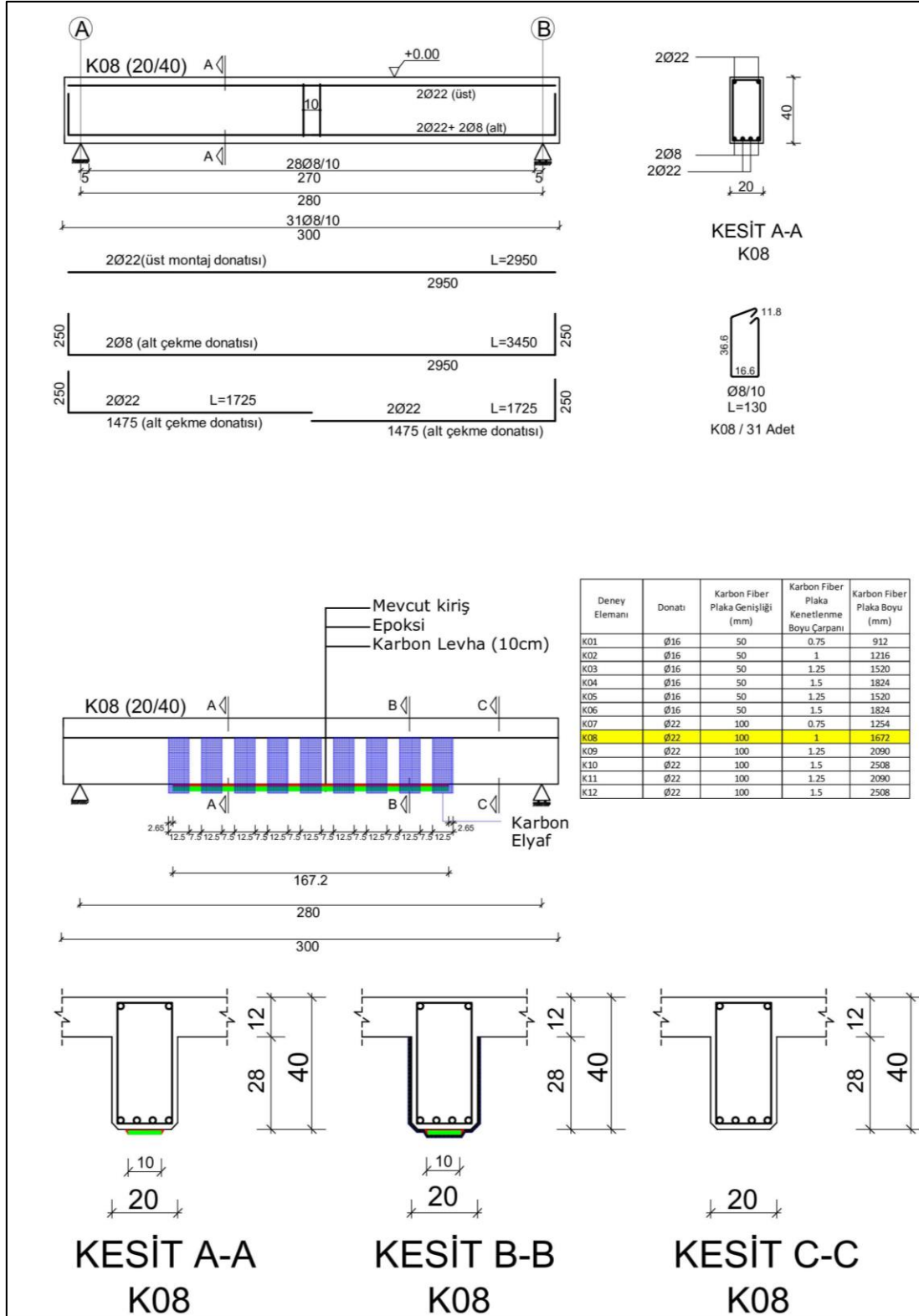
Şekil 3.6. SW50-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı

Çizelge 3.1’de C grubu başlığı altında tanımlanan deney elemanları Ø22 çapında donatıya sahip olan ve çekme bölgesindeki Ø22 çaplı donatıları orta noktasında kesik olarak imal edilen ve üç nokta yükleme testleri ile daha önce kırılmış olan 4 adet hasarlı kirişten ibarettir. Bu kirişlere sırası ile hesaplanan temel kenetlenme boyunun 0,75 katı, 1,00 katı,

1,25 katı ve 1,50 katı uzunluğunda 1,4 mm kalınlığında ve 100 mm genişliğinde karbon plaka yapıştırılmıştır. İşlem sonrasında 125 mm genişliğinde kesilen karbon elyaf kumaşlar; 75 mm ara ile kiriş üst yüzünden itibaren 120 mm' lik mesafede döşeme varmışçasına boş bırakılarak U şeklinde yapıştırılmış ve bu sargılama yöntemi plaka uzunluğu boyunca üst üste çift kat uygulanmıştır. Tüm işlemler öncesinde hasar alan bölge yüksek mukavemetli tamir harcı ile doldurularak onarılmıştır.

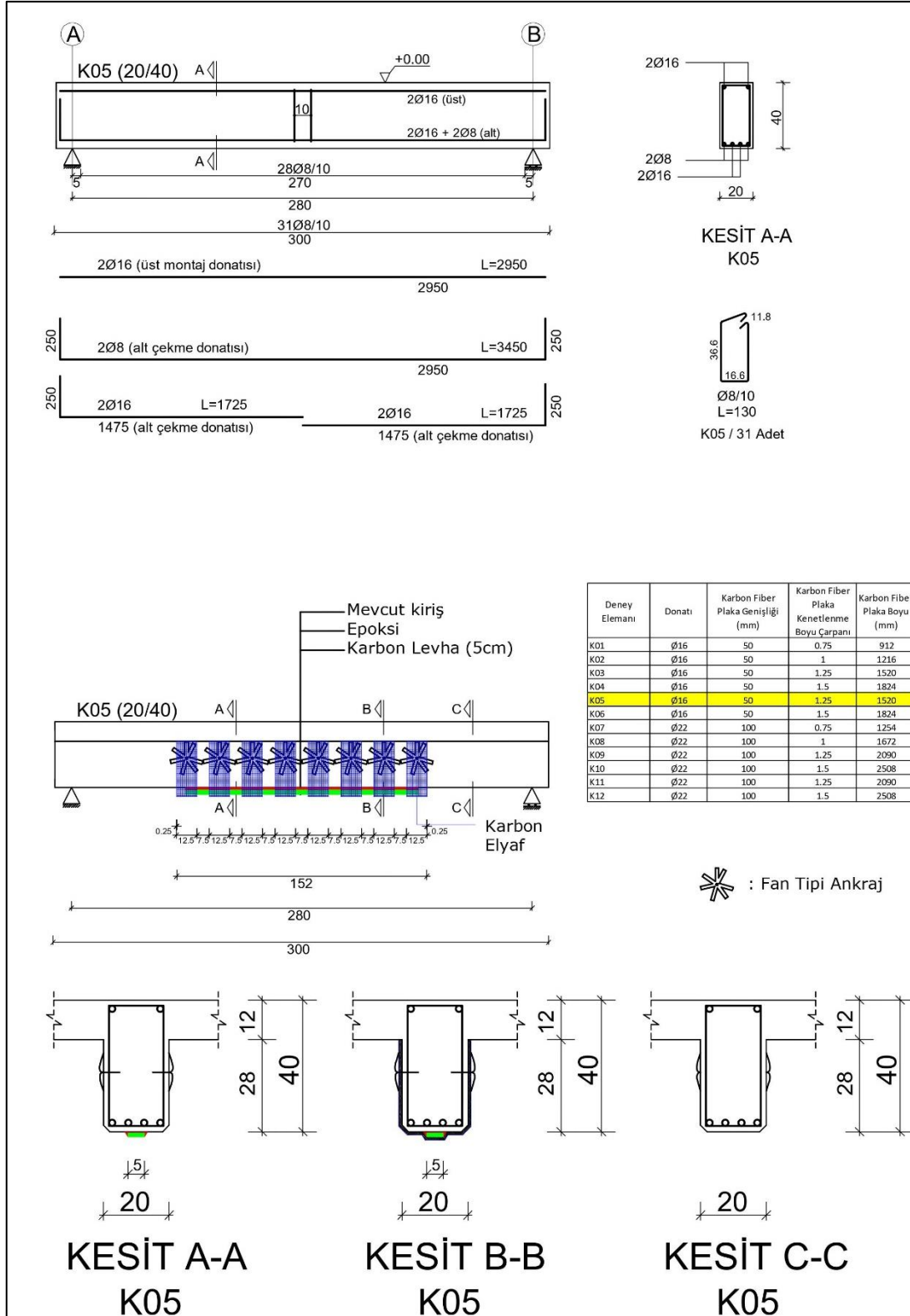


Şekil 3.7. SW100-0,75 güçlendirilmiş eleman donatı detayı

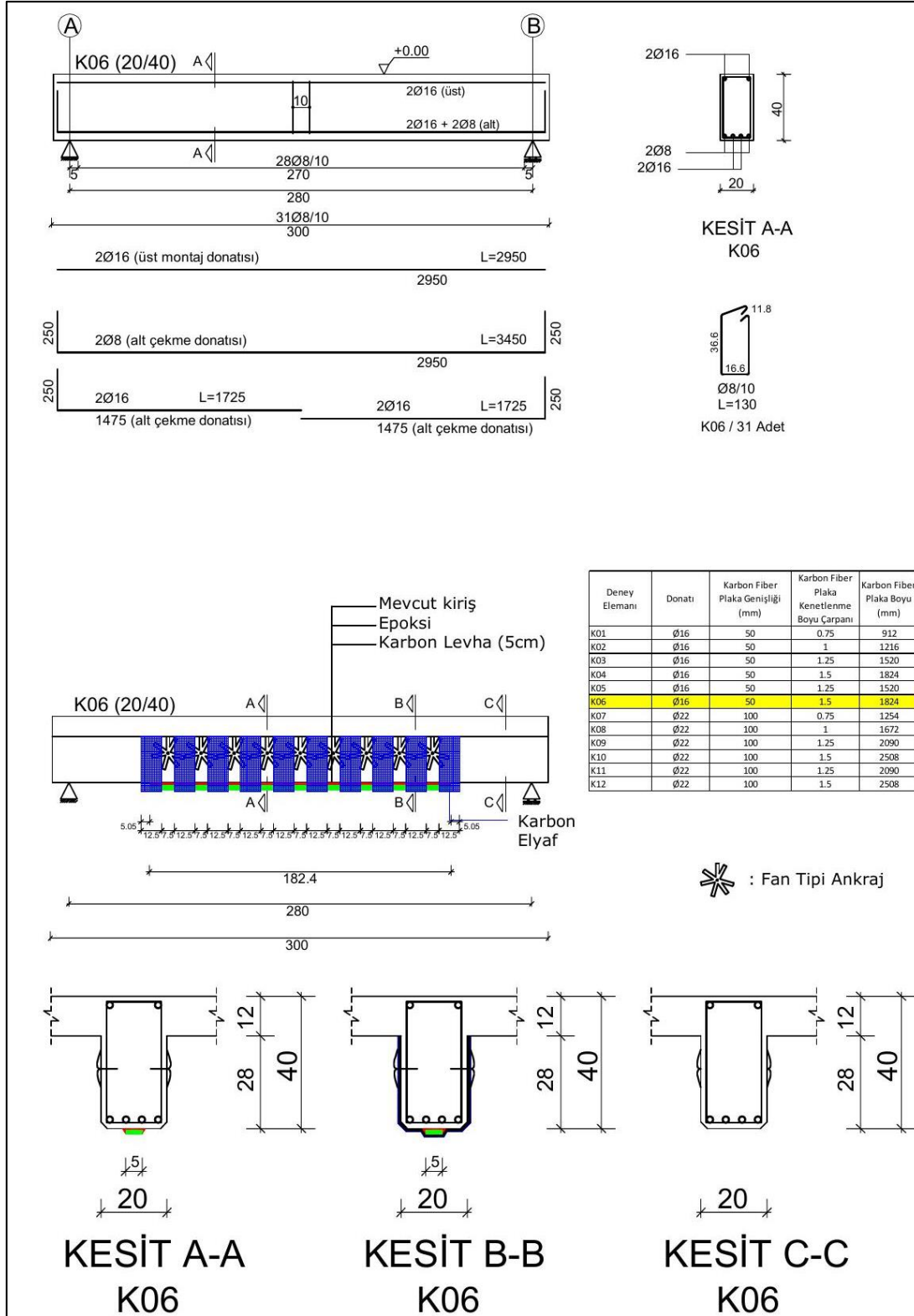


Şekil 3.8. SW100-1,00 güçlendirilmiş eleman donatı detayı

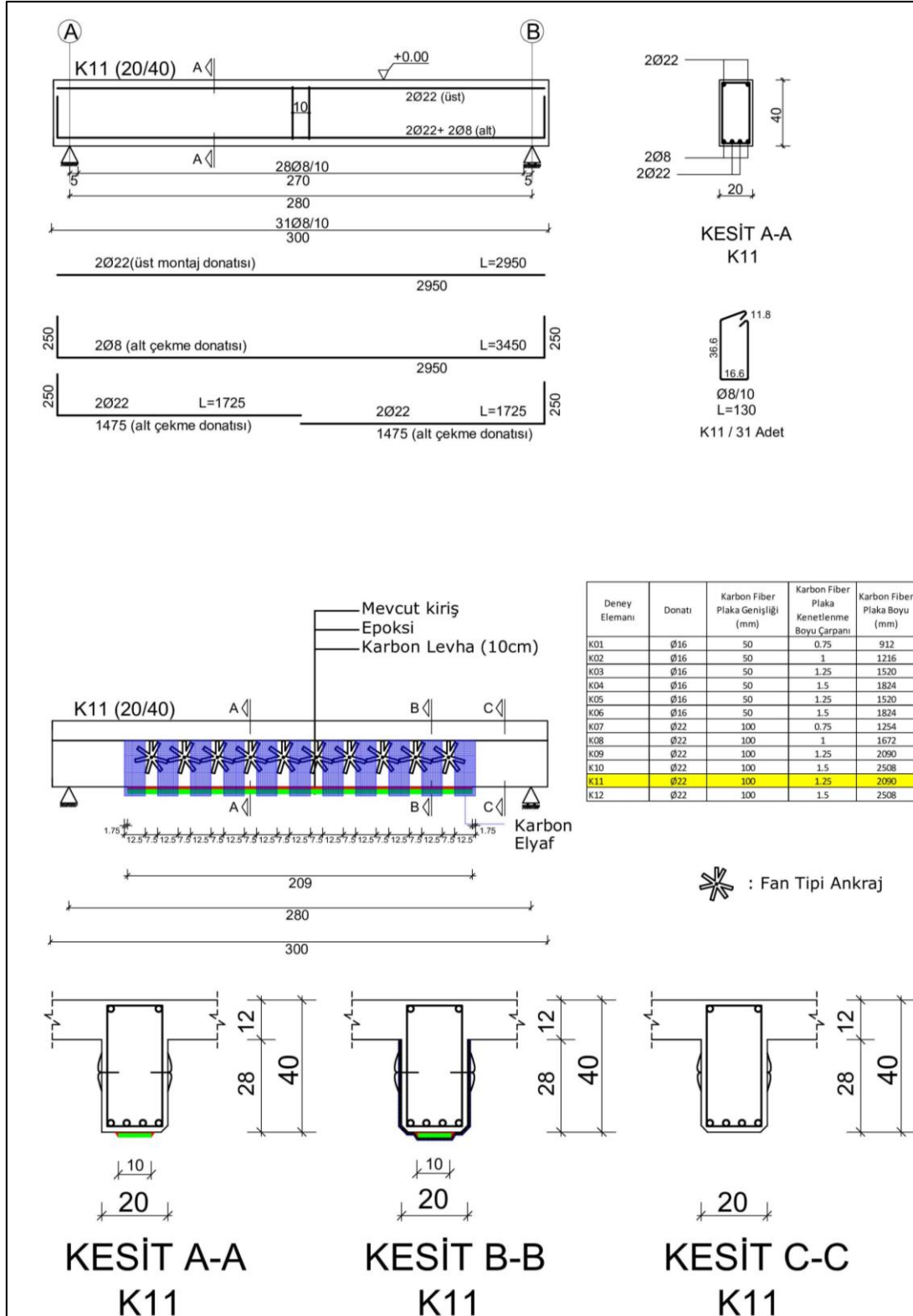
Çizelge 3.1’de D grubu başlığı altında tanımlanan dört adet deney elemanından ikisi Ø16 donatıya, diğer ikisi Ø22 donatıya sahiptir. B ve C gruplarında tanımlanan kirişlerin aksine bu elemanlar daha öncesinde deneylerde kullanılmayan hasarsız durumda fakat yine çekme bölgesindeki donatıları süreksiz olarak imal edilen ve güçlendirmesinde U sargılara ilave olarak fan tipi ankrajlar kullanılan kirişlerden oluşmaktadır. Bu kirişlere Ø16 ve Ø22 çapındaki donatı kesiti üzerinden hesaplanan temel kenetlenme boyunun 1,25 ve 1,50 katı uzunluğunda 1,4 mm kalınlığında ve çaplara göre sırasıyla Ø16 donatı için 50 mm; Ø22 donatı için 100 mm genişliğinde karbon plaka uygulaması gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrasında 125 mm genişliğinde kesilen karbon elyaf kumaşlar; 75 mm ara ile kiriş üst yüzünden itibaren 120 mm’ lik mesafede döşeme varmışçasına boş bırakılarak U şeklinde yapıştırılmış ve bu sargılama yöntemi plaka uzunluğu boyunca üst üste çift kat uygulanmıştır.



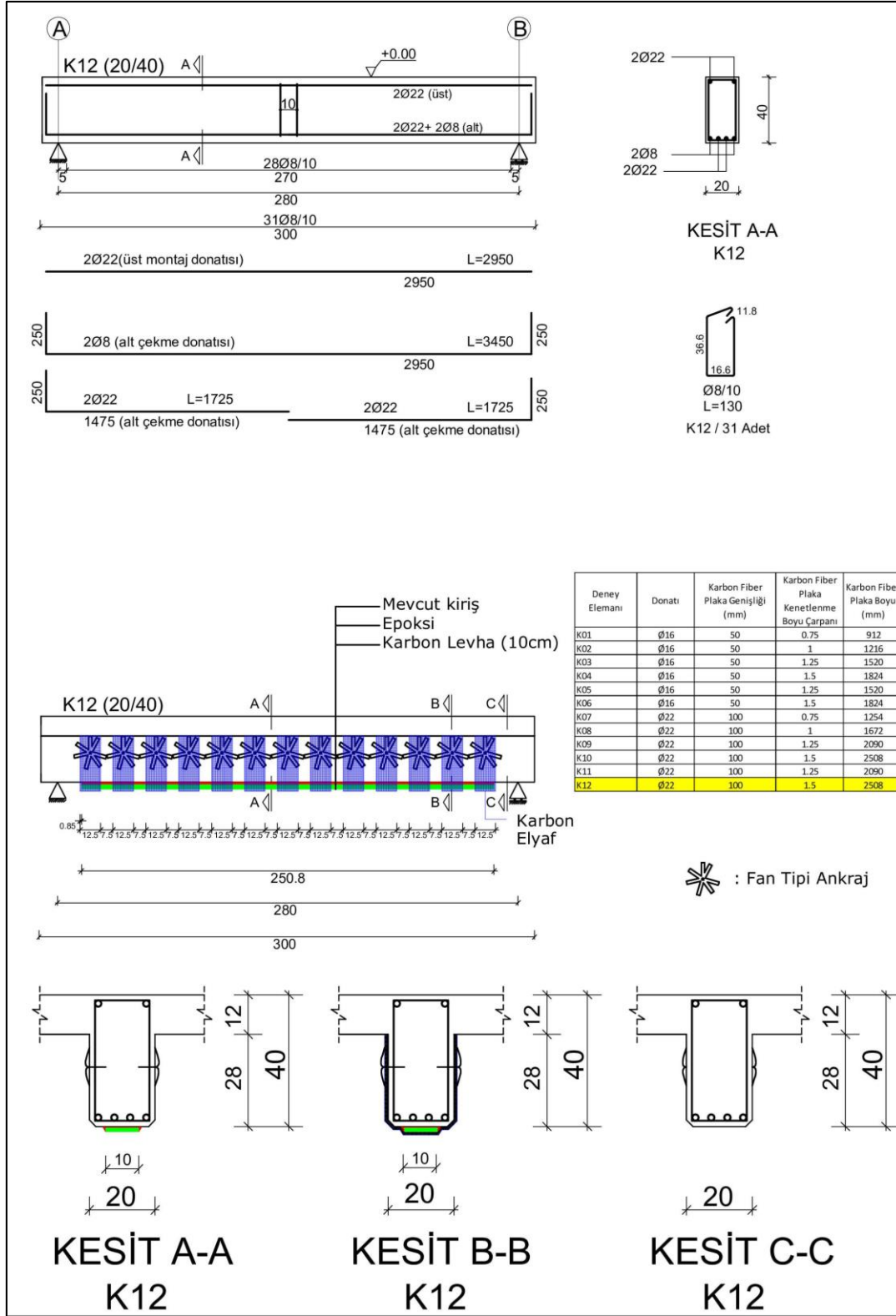
şekil 3.11. SWA50-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı



Şekil 3.12. SWA50-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı



Şekil 3.13. SWA100-1,25 güçlendirilmiş eleman donatı detayı



Şekil 3.14. SWA100-1,50 güçlendirilmiş eleman donatı detayı

3.2. Malzeme Bilgileri

Bu bölümde deney elemanlarında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri tanıtılmıştır.

3.2.1. Beton

Deney elemanlarının tamamında C25/30 sınıfı beton kullanılmış olup, aynı mikserden çıkan beton malzeme ile elemanlar imal edilmiştir.

Sümer (2023), çalışmasında da belirtildiği üzere deneyde kullanılan elemanların imalatları sırasında 42 adet küp numune alınmış ve her grupta 14 adet numune olmak üzere üç ayrı numune grubu sırasıyla; 7 gün, 28 gün ve deneyin yapıldığı tarihte kırılmıştır. Elemanların basınç dayanımlarına ilişkin sonuçlar Sümer'in (2023) çalışmasından alınmıştır.

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 elemanlarında Ø8, Ø16 ve Ø22 çaplarında S420 (BÇ III) sınıfı donatı kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan her donatı çapı başına üç adet olmak üzere toplam 9 adet çekme testi Sümer (2023) tarafından gerçekleştirilmiş olup test sonuçlarına aşağıda Çizelge 3.3'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.3. Donatı çekme deneyi sonuçları

Donatı Çapı	Numune No	Akma Mukavemeti	Çekme Mukavemeti
Ø8 donatı	1	500 Mpa	620 Mpa
	2	498 Mpa	615 Mpa
	3	499 Mpa	624 Mpa
Ø16 donatı	1	489 Mpa	653 Mpa
	2	498 Mpa	638 Mpa
	3	487 Mpa	640 Mpa
Ø22 donatı	1	523 Mpa	682 Mpa
	2	533 Mpa	691 Mpa
	3	515 Mpa	666 Mpa

3.2.3. Karbon fiber plaka (CFRP)

Tez çalışması kapsamında 50 mm ve 100 mm genişliklerinde ve 1,4 mm kalınlığında iki ayrı tip karbon fiber plaka kullanılmıştır. Kullanılan karbon fiber plakaya dair üretici firmadan temin edilen teknik bilgilere aşağıda Çizelge 3.4’de yer verilmiştir.

Çizelge 3.4. Karbon fiber plakaya ait malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri		
Elastisite Modülü	ASTM 3039	165.000 N/mm ²
Çekme Dayanımı	ASTM 3039	> 1.800 N/mm ²
Kopma Uzunluğu	ASTM 3039	% 0,9
Genişlik	---	50 mm, 100 mm
Kalınlık	---	1,4 mm
Sertlik	ROCKWELL	< 85 HRP
Su Emme	ISO 62	< % 0,1

Deney elemanlarında kullanılan karbon fiber plakaların Çizelge 3.4’de yer alan malzeme özellikleri ile plakanın kalınlığı ve genişliği üzerinden hesaplanan çekme dayanımının, donatılardaki akma dayanımına yakınsaması hedeflenmiş malzeme boyutları bu şekilde belirlenmiştir.

3.2.3. Karbon elyaf kumaş

Tez çalışması kapsamında kullanılan karbon kumaşlar 300 gr/m²’lik tek yönlü örüme sahip CFRP malzemedeki doğrultuları aynı yöne bakacak şekilde üst üste çift kat olacak şekilde uygulanmıştır. Kullanılan karbon kumaşların malzeme özelliklerine dair üretici firma tarafından sunulan teknik verileri aşağıda Çizelge 3.5’te yer verilmiştir.

Çizelge 3.5. Karbon kumaşa ait malzeme özellikleri

Örnek No	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
1	1101	132 890
2	1419	176 769
3	1377	119 625

3.2.4. Epoksi astar

Deneyleerde kullanılan astar; özel katkılı epoksi yapıştırıcı ve sertleştirici karışımından oluşan çift komponentli saydam bir malzemedir. Deney elemanıylaa karbon plaka arasındaki aderansı arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.

3.2.5. Epoksi plaka macunu

Deneyleer esnasına plaka yapıştırıcısı olarak iki bileşenli siyah renkli epoksi harç kullanılmış olup, üretici firma tarafından sunulan teknik föyde yer alan malzeme özelliklerine aşağıda Çizelge 3.6’da yer verilmiştir.

Çizelge 3.6. Plaka epoksi macunu teknik özellikleri

Plaka Epoksi Macunu Teknik Özellikleri	
Eğilme Dayanımı (ISO 527 – 1,2)	20-25 N/mm ²
Çekme Dayanımı (ISO 527 – 1,2)	15-20 N/mm ²
Yapışma(Betona) (ISO 527 – 1,2)	1,6 N/mm ²
Elastisite Modülü (ISO 527 – 1,2)	2.000 N/mm ²

3.2.6. Epoksi elyaf yapıştırıcısı

Deneyleer sırasında elyaf yapıştırıcısı olarak iki bileşenli sarı renkli epoksi reçine kullanılmış olup, üretici firma tarafından sunulan teknik föyde yer alan malzeme özelliklerine aşağıda Çizelge 3.7’de yer verilmiştir.

Çizelge 3.7. Epoksi elyaf yapıştırıcısı teknik özellikleri

Epoksi Elyaf Yapıştırıcısı Teknik Özellikleri	
Çekme Mukavemeti (ASTM D 638)	≥ 20 N/mm ²
Çekme Eğilme (ASTM D 638)	1,0 %
Basınç Dayanımı (ASTM D 638)	≥ 70 N/mm ²
Eğilme Dayanımı	≥ 25N/mm ²

3.2.7. Kimyasal dübel (Ankraj Epoksisi)

Fan tipi ankraj uygulamalarında kimyasal dübel kullanılmış olup kimyasal dübele ait malzeme özellikleri Çizelge 3.8’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.8. Kimyasal dübel (saf epoksi) teknik özellikleri

Kimyasal Dübel (Saf Epoksi) Teknik Özellikleri	
Basınç Dayanımı (ASTM D 695 – 96)	5 °C / 1 gün ----- 17 (±5) N/mm ² 5 °C / 7 gün ----- 89 (±5) N/mm ² 23 °C / 1 gün ----- 104 (±5) N/mm ² 23 °C / 7 gün ----- 114 (±5) N/mm ² 40 °C / 1 gün ----- 115 (±5) N/mm ² 40 °C / 7 gün ----- 127 (±5) N/mm ²
Çekme Dayanımı	Nihai Yük 70 kN, kayma<0,6mm Çelik kalitesi B500B Donatı Çapı 12mm Açılan Delik Çapı 22mm Ankraj Derinliği 120 mm

3.2.8. Yüksek mukavemetli yapısal tamir harcı (R4)

Deneyler sırasında hasar görmüş kirişlerin onarımında çekme bölgesindeki oynayan beton parçaları kaldırılarak R4 sınıfı yapısal tamir harcı ile dolgusu gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzemeye ilişkin teknik bilgiler aşağıda Çizelge3.9’da belirtilmiştir.

Çizelge 3.9. Yapısal tamir harcı teknik özellikleri

Yapısal Tamir Harcı Teknik Özellikleri	
Eğilme Mukavemeti (EN 12190)	1 gün ----- $\geq 3,0$ N/mm ² 7 gün ----- $\geq 5,0$ N/mm ²
Basınç Mukavemeti (EN 12190)	1 gün ----- $\geq 20,0$ N/mm ² 7 gün ----- $\geq 40,0$ N/mm ² 28 gün ----- $\geq 55,0$ N/mm ²
Elastisite Modülü (EN 13412)	$\geq 20\ 000$ N/mm ²
Betona Yapışma Mukavemeti (EN 13057)	$\geq 2,0$ N/mm ²

3.3. Ekipman Bilgileri

Bu bölümde deney elemanlarının hazırlığı aşamasında kullanılan ekipmanlar tanıtılmıştır.

3.3.1. Epoksi macunu kalınlığı ayarlama aparatı

Karbon plakayı yapıştırmakta kullanılan macunun 50 mm ve 100 mm kalınlığındaki iki farklı tipteki karbon plakaya yapıştırılabilmesi için; her bir plakanın genişliğine uygun ve 3 mm göz açıklığına sahip özel taraklar kullanılmıştır (Resim 3.1).



Resim 3.1. Epoksi macunu kalınlığı ayarlama aparatı

3.3.2. Kumaş hava boşluğu alma aparatı

Karbon kumaşın yapıştırıldığı yüzey ile kumaş arasında boşluk kalmasını önlemek amacıyla özel imalat alüminyum rulolar kullanılmıştır (Resim 3.2).



Resim 3.2. Kumaş hava boşluğu alma aparatı

3.3.3. Çift sıra elmalı beton yüzeyi silme aparatı

Uygulanacak olan güçlendirme malzemelerinin beton yüzeyine daha iyi tutunabilmesi amacıyla; beton yüzeyinde kalıp aşamasında biriken çimento şerbeti tabakaları aşındırılarak kaldırılıp agregaya ulaşarak aderansın artırılması sağlanmaktadır. Ayrıca bu işlem sırasında olası yüzey kusurları düzeltilerek yapışma yüzeyi tesviye edilmektedir. Bu işlemler gerçekleştirilirken, standart konik taşlama aparatlarıyla beraber; uygulama kolaylığı, uygulama hızının artırılması ve parçanın kendisinin daha uzun ömürlü olması dolayısı ile çift sıra elmasa sahip taşlama aparatları kullanılmıştır (Resim 3.3).



Resim 3.3. Çift sıra elmaslı beton yüzeyi silme aparatı

3.3.4. Donatı tespit cihazı

Ankraj imal edilecek olan elemanlarda ankraj deliklerinin açılması sırasında donatıya zarar verilmemesi amacıyla donatı tespit cihazı kullanılarak donatı yerleri belirlenmiştir (Resim 3.4).



Resim 3.4. Donatı tespit cihazı

3.4. Deney Elemanlarının Hazırlık Aşamaları

Deneyleerde kullanılacak kirişlerin tamamı gerçekleştirilecek olan güçlendirme işlemleri öncesinde *alt çekme bölgeleri üst yüze gelecek şekilde ters çevrilmiştir*. Deney elemanlarının hazırlık aşamaları bu bölümde maddeler halinde özetlenmiştir.

3.4.1. Hasarlı olan kirişlerin tamir harcı uygulamasına hazır hale getirilmesi

Sümer'in (2023) deneylerinde kullanılan referans elemanlar hariç sekiz adet hasarlı kirişin yüksek mukavemetli yapısal tamir harcı ile onarılması hedeflenmiştir.

Bu çerçevede kirişlerin donatı süreksizliğinin de bulunması dolayısı ile deneyler sırasında görece büyük çatlaklar meydana gelen orta bölgelerinde yüzeyden koparak oynayan ve kılcallanma gösteren tüm beton parçaları ile ilk deneyden kalan plaka yapıştırıcıları kırıcı yardımı ile yüzeyden temizlenmiştir (Resim 3.5 , Resim 3.6 , Resim 3.7).



Resim 3.5. İlk deneyden kalan plaka yapıştırıcısı kalıntılarının temizlenmesi



Resim 3.6. Yüzeyden kopan ve oynayan beton parçalarının kaldırılması



Resim 3.7. Beton parçalarından arındırılmış numune

3.4.2. Deney numunelerinin kenarlarının pahlanması

Karbon fiber kumaşın kiriş köşelerinde 90 derece ile dönerek uygulanması hem boşluk oluşarak tam yapışmanın sağlanamaması hem de yük altında keskin köşelerin epoksi ile kompozit hale gelen malzemeyi ezerek kopmalara sebebiyet verme riskini doğuracak olması nedeniyle deney elemanlarının köşe kısımları 1 cm çapında pahlanmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.8. Kenarları pahlanmış deney numunesi

3.4.3. Deney numunesi yüzeylerinin epoksi uygulamasına hazır hale getirilmesi

Epoksi ile betonun aderansını arttırarak birbirlerine tutunmasını kolaylaştırmak ve karbon fiber plakanın boşluksuz ve çıkıntısız düz bir yüzeye oturmasını sağlamak amacıyla beton yüzeyleri beton taşları vasıtasıyla silinmiştir. (Resim 3.9) Burada önemli olan noktalardan ilki kalıp aşamasında kalıp yüzeyine yakın kısımlarda biriken çimento şerbetinin oluşturduğu tabakayı alarak agregaya ulaşmak, ikincisi ise plakanın oturacağı alandaki tesviye farklılıklarını tamamen ortadan kaldırmaktır (Resim 3.10)



Resim 3.9. Beton yüzeyinin konik beton taşı ile silinmesi



Resim 3.10. Tesviyesi henüz eşitlenmemiş olan deney elemanı

3.4.4. Hasarlı olan kirişlere tamir harcı uygulaması

Onarımda kullanılan yüksek mukavemetli yapısal tamir harcı kullanım talimatlarına uyularak el mikseri aparatıyla karıştırılmıştır. Uygulamaya hazır hale getirilen hasarlı kirişlerin çatlak bölgeleri önce hava kompresörü ile tozlarından arındırılmış sonrasında ise yüzeyleri nemlendirilerek yapısal tamir harcı ile doldurulmuştur (Resim 3.11).



Resim 3.11. Tamir harcı uygulanmış deney numuneleri

3.4.5. Epoksi astar uygulaması

Plaka ve beton arasındaki aderansı arttırmak amacıyla kirişlerin tamamına epoksi astar uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda epoksi astarın A ve B komponentleri kullanım talimatlarına uyularak karıştırılmış, sonrasında tek tabaka olacak şekilde astar uygulanmıştır (Resim 3.12, Resim 3.13).



Resim 3.12. Çift komponentli epoksi astarın A ve B bileşenlerinin karıştırılması



Resim 3.13. Epoksi astar uygulanması

3.4.6. Karbon fiber plakanın yapıştırılması

Karbon fiber plakalar deneylerde hesaplanan bindirme boylarında kesilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Resim 3.14).

Epoksi esaslı çift komponentli plaka macunu herhangi bir hataya mahal vermemek için her iki bileşeninde tenekelerinin tamamı kullanılıp bitirilecek şekilde talimatlara uygun ve homojen olarak karıştırılmıştır (Resim 3.15).

Plakaların üzerine hazırlanan plaka yapıştırıcı macun dökülerek, uygulama için özel imal edilmiş olan 3mm göz açıklığına sahip taraklar vasıtasıyla plaka üzerine macun serimi gerçekleştirilmiştir (Resim 3.16).

Epoksi esaslı macun serimi gerçekleştirilen plakalar astar uygulaması gerçekleştirilen kirişler üzerine yapıştırılıp, yapışma yüzeyinde hava kalmadığından emin olunana kadar basınç uygulanmıştır (Resim 3.17).

Yüze tamamen yapıştığından emin olunan plakanın üst yüzeyine açıkta kalan kısımları da kapsayıp plaka üst yüzeyini kapatacak şekilde plaka macunu uygulanmıştır (Resim 3.18).



Resim 3.14. Karbon fiber plakannın rulosundan kesilmesi



Resim 3.15. Epoksi esaslı plaka macunu komponentlerinin karıştırılması



Resim 3.16. Macun serimi gerçekleştirilerek taraklanan plaka yüzeyi



Resim 3.17. El ile basınç uygulanarak boşluğu alınan deney elemanları



Resim 3.18. Epoksi macunla yüzeyi kapatılan plaka

3.4.7. Ankraj deliklerinin açılması

Ankraj delikleri açılmadan önce; matkap ucunun donatıya denk gelip zarar vermemesi amacıyla deliklerin açılacağı plaka boyunca etriye donatılarının yerleri donatı tespit cihazı ile belirlenerek beton yüzeyine işaretlenmiştir (Resim 3.19).

Fan tipi ankraj uygulanması planlanan deney elemanlarının gövde bölgelerinin ortasında uygulanan plaka boyunca 20'şer cm aralıklarla bir yan yüzden başlayıp kirişin diğer yan yüzünden çıkan 12 mm çapında delikler açılmıştır (Resim 3.20).

Piyasa koşullarında gerçekleştirilen imalatlarla laboratuvarında uygulanan imalatın birbirine yakınsaması amacıyla kirişlere delikler açılırken arka yüzey herhangi bir şekilde desteklenmemiş ve serbest bırakılmıştır. Bu nedenle kirişlerin üzerindeki epoksi astarın yüzey gerilimini arttırmasının da etkisiyle deliklerin çıkış bölümlerindeki beton kaplamada kısmi hasarlar oluşmuştur (Resim 3.21).

Delik arka yüzeylerinde oluşan bu deformasyonlar yüksek mukavemetli yapısal tamir harcı uygulanılarak doldurulmuş, ankraj deliklerinin kapanmaması amacıyla dolgu yapılırken delik içerisine tij konulmuştur (Resim 3.22 , Resim 3.23).

Tamir harcı uygulaması sonrasında onarılan yüzeylere tekrar epoksi astar uygulanmıştır (Resim 3.24).



Resim 3.19. Kiriş donatı yerlerinin belirlenerek işaretlenmesi



Resim 3.20. Ankraj deliklerinin açılması



Resim 3.21. Ankrage deliği açma işlemleri sırasında oluşan deformasyonlar



Resim 3.22. Yüksek mukavemetli tamir harcı uygulanan yüzeyler



Resim 3.23. Deliklerin kapanmaması amacıyla yağ tamir harcı içerisinde tijle kanal açma



Resim 3.24. Onarılan yüzeylere epoksi astar sürülmesi

3.4.8. Karbon fiber kumaş uygulanması

Karbon fiber kumaşlar, kirişin gerçek bir uygulamada 120 mm'lik kısmının tabliyenin içinde kalacağı varsayılarak, bu kısmın altında kalan yan yüzeylerini kapsayacak şekilde 760 mm uzunluğunda ve 125 mm genişliğinde kesilmiştir (Resim 3.25).

Epoksi esaslı çift komponentli karbon fiber kumaş yapıştırıcı kullanma talimatlarına uyularak el mikseri yardımıyla karıştırılmıştır (Resim 3.26).

Kesilen karbon kumaşlar plaka boyunca 75 mm aralıklarla kiriş yüzeyine kumaş yapıştırıcısı yardımı ile tutturulmuş ve sürülen epoksi yüzeye çıkana kadar gırgır tabir edilen ve uygulamaya özel imal edilen alüminyum başlıklı rulo yardımıyla üzerinden bastırılarak yapıştırılmıştır (Resim 3.27).

Aynı işlem tekrar edilerek yapıştırılan kumaşların üzerlerine denk gelecek şekilde ikinci kat karbon kumaş uygulaması gerçekleştirilmiştir (Resim 3.28).

Kullanılan 300gr/m²'lik tek yönlü karbon elyaf kumaş malzemenin uygulama yönü kiriş etriyeleri ile benzer şekildedir.



Resim 3.25. Karbon kumaşın kesilmesi



Resim 3.26. Epoksi Esaslı kumaş yapıştırıcı bileşenlerinin karıştırılması



Resim 3.27. Karbon fiber kumaş yapıştırma işlemi



Resim 3.28. İkinci kat karbon fiber kumaş uygulanması

3.4.9. Fan tipi ankraj uygulaması

Açılan ankraj delikleri içerisine kompresörle hava tutularak tozdan arındırılmıştır (Resim 3.29).

Fan tipi ankraj uygulamasında kullanılacak olan karbon kumaşlar 600 mm uzunluğunda ve 125 mm genişliğinde kesilmiştir (Resim 3.30).

Kesilen karbon kumaşlar kıvrılıp yuvarlanılarak, ankraj deliklerinden içeri doğru itilmiş, kumaşların her iki uçtan da 200 mm taşması sağlanmıştır (Resim 3.31 , Resim 3.32).

Deliklerden dışarı çıkarılan karbon kumaşların uçları maket bıçağı yardımıyla kollara ayrılmıştır. Kumaşlar kesildikten sonra ankraj deliklerinden içeri deliğin arka kısmından çıkana kadar ankraj epoksisi enjekte edilmiştir (Resim 3.33 , Resim 3.34).

Yıldız şeklinde açılan karbon kumaş kollar, plakayı ve betonu tutacak şekilde giriş yüzeyine epoksi yapıştırıcısı marifetiyle bağlanmıştır (Resim 3.35).



Resim 3.29. Ankraj deliklerinin tozdan arındırılması



Resim 3.30. Ankraj imalatı için karbon kumaş kesilmesi



Resim 3.31. Karbon kumaşın ankraj deliğine yerleştirilmesi öncesinde kıvrılması



Resim 3.32. Karbon kumaşların ankraj deliklerindeki yerleşimi



Resim 3.33. Ankraj deliklerine epoksi enjekte edilmesi



Resim 3.34. Ankragepoksi uygulamasında delik arka yüzeyinden taşan bağlayıcı



Resim 3.35. Karbon kumaşın kollara ayrılarak beton ve sargı yüzeyine yapıştırılması

3.5. Deney Sistemi

Üç noktalı eğilme testlerinde aşağıda Resim 3.36' da görseline yer verilen çelik çerçeve kullanılmıştır. Çerçeve üzerine hidrolik kriko ve krikonun hemen altında bulunan yük ölçer yerleştirilmiş olup yüklemelerde ise hidrolik pompadan faydalanılmıştır. Çerçeve içerisine yerleştirilen kirişlerin sağ ve sol ucundan 100 mm içeride olacak şekilde sol ucunda sabit, sağ ucunda hareketli mesnet kullanılmıştır.

3.6. Ölçüm Sistemi

Eğilme etkisi altında oluşacak olan deplasmanların ölçülebilmesi amacıyla üç adet LVDT (Linear variable differential transformer) kullanılmıştır. Cihazların her üçü de kiriş üst yüzünden 80 mm aşağıda olacak şekilde sırasıyla; kirişin orta noktasına orta noktanın 400 mm soluna ve 400 mm sağına yerleştirilmiştir. LVDT hareketli uçları kiriş üzerine sabitlenen köşebentler üzerine yapıştırılan cam parçalara oturtulmuştur. LVDT'ler ise sistem için özel imal edilen teleskobik kollar vasıtasıyla sabitlenmiştir.



Resim 3.36. Deney ve ölçüm düzeni



4. DENEY SÜRECİ

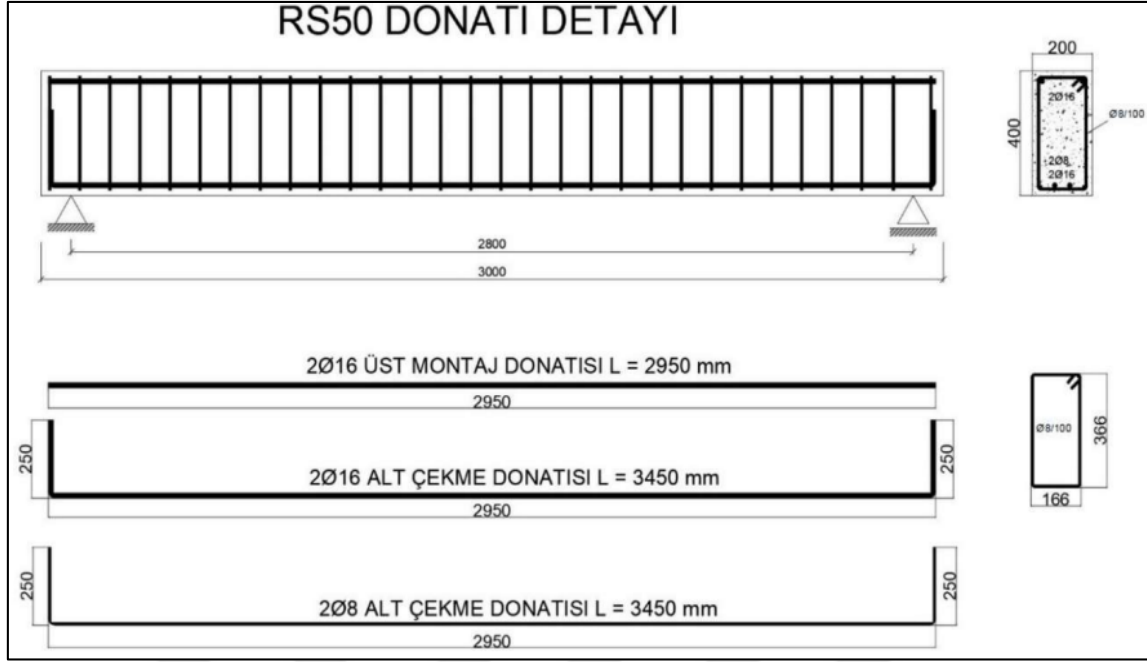
Bu bölümde referans elemanlar dahil 14 adet kirişe ait deney sonuçlarına yer verilmiştir. Deneye alınan tüm elemanların ölçüm düzeneklerinin konumu, düzgün ölçüm alıp almadığı, elemanların mesnetlerinin yeri ve kirişlerin simetrisi her deney öncesinde özenle kontrol edilmiştir.

4.1. Referans Elemanların Deneyleri

Referans elemanlar Sümer'in (2023) çalışmasında kullanılan kirişlerle ortak olduğundan bu bölümde yer alan RS50 ve RS100 referans elemanlarının içinde bulunduğu A grubu deney elemanlarına ait sonuçlar Sümer'in (2023) tez çalışmasından alınmıştır.

4.2. RS50 Deney Elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Yok
- Karbon plakanın bindirme boyu : Yok
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : Yok
- Karbon kumaş sargı : Yok
- Fan tipi ankraj : Yok



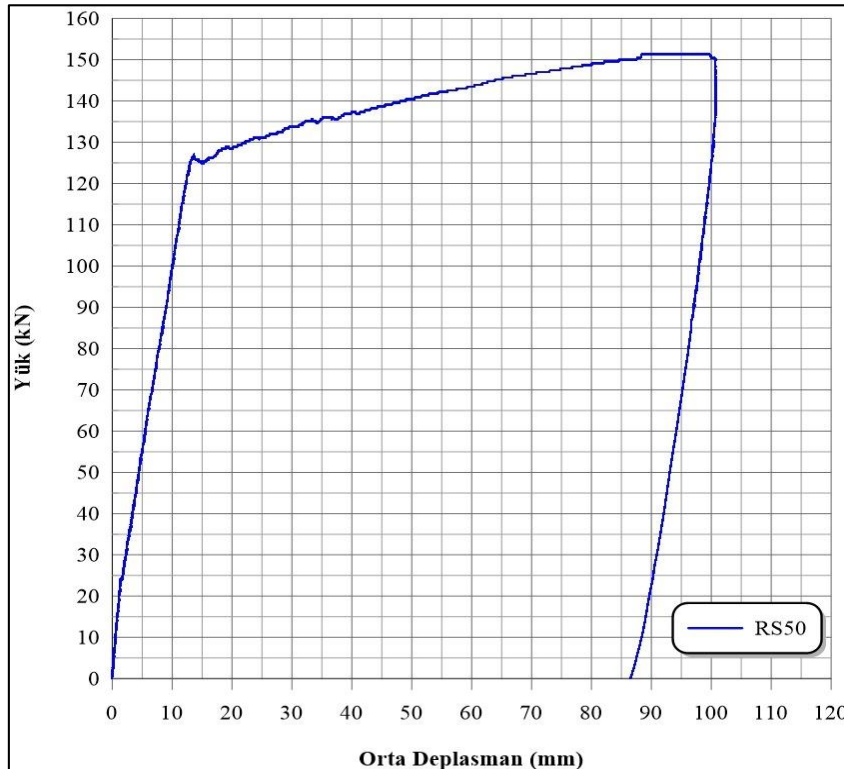
Şekil 4.1. RS50 deney elemanı donatı detayı



Resim 4.1. RS50 referans deney elemanı

Deneyin hikayesi;

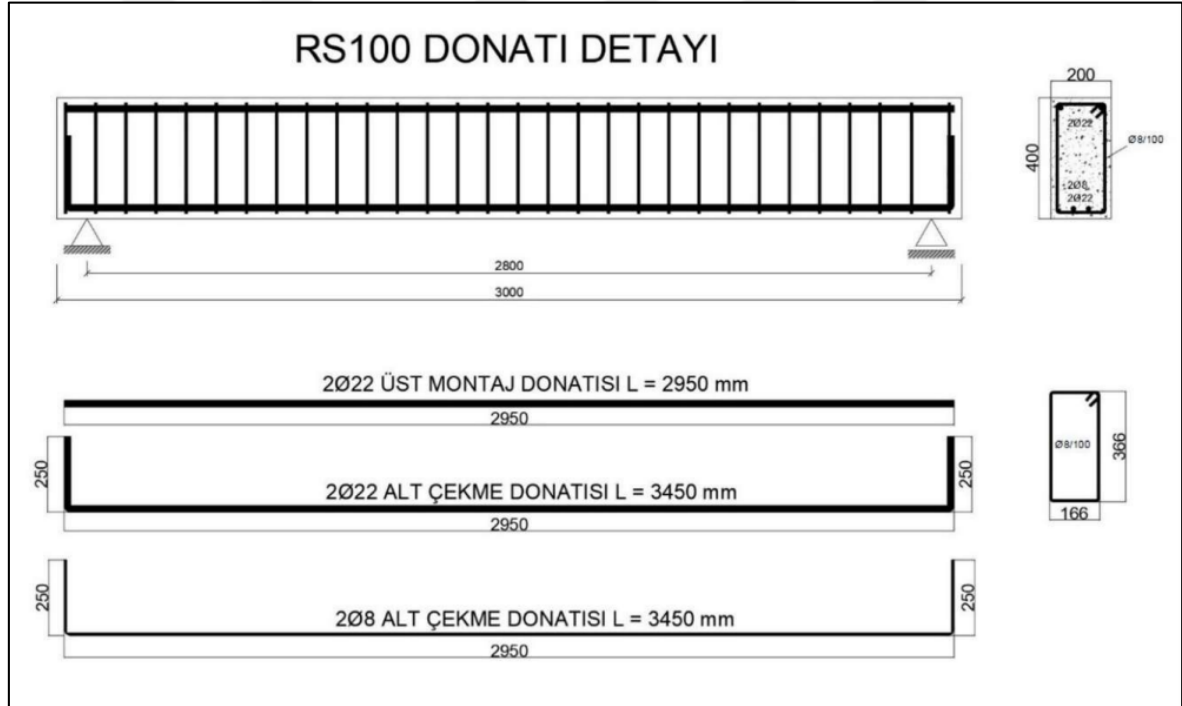
- 20 kN yüklemeye herhangi bir çatlak görülmemiştir.
- İlk eğilme çatlakları kiriş orta bölgesinde 25 kN yükte oluşmuştur.
- Eğilme çatlakları 76kN yükte kökleşmeye başlamış olup çatlaklar kılcal düzeydedir.
- 14,5 mm deplasman ve 125 kN yükte elemanda akma başlamıştır.
- 128 kN yüke gelindiğinde eğilme çatlakları 1mm genişliğe ulaşmıştır.
- Kirişin sol ucundan 600-700 mm içerde ve bunun simetriği olan 2300-2400mm içerde eğilme kesme karışımı çatlak oluşumları meydana gelmiştir.
- Yükleme noktasının hizasında 2 adet ana eğilme çatlakıyla birlikte kiriş deformasyon yapmaya devam etmiştir.
- 134 kN yükte eğilme çatlakları açılmaya devam etmiştir.
- 138 kN yüke gelindiğinde kesme çatlaklarında herhangi bir ilerleme oluşmamıştır.
- 142 kN yükte eğilme çatlakları 4 mm genişlikte ölçülmüştür.
- 150 kN yükte eğilme çatlakları 10 mm genişlikte ölçülmüştür.
- Yük hücresinin uzama kapasitesi kiriş ortasında oluşan deplasman 100 mm'yi bulduğunda tamamlanmış ve deney bu noktada sonlandırılmıştır.



Şekil 4.2. RS50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.2.1. RS100 deney elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Yok
- Karbon plakasının bindirme boyu : Yok
- Karbon plakasının genişliği ve et kalınlığı : Yok
- Karbon kumaş sargı : Yok
- Fan tipi ankraj : Yok



Şekil 4.3. RS100 deney elemanı donatı detayı

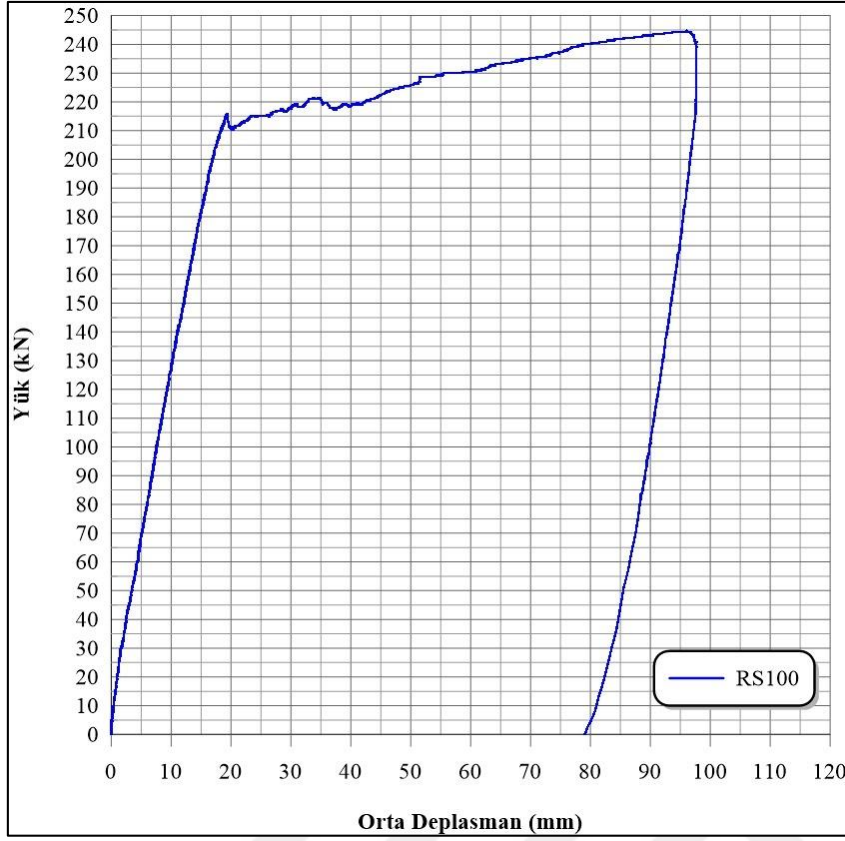


Resim 4.2. RS100 referans deney elemanı

Deneyin hikayesi;

- 40 kN yüklemde herhangi bir çatlak görülmemiştir.
- İlk eğilme çatlakları kiriş sol ucundan 1350mm ve 1650 mm mesafe uzaklıkta 50 kN yükte 0,2 mm genişliğinde oluşmuştur.
- 2100 mm'de 60 kN yüklemde 0,15 mm genişliğinde eğilme çatlağı meydana gelmiştir.
- 800 mm'de 65 kN yüklemde 0,15 mm genişliğinde eğilme çatlağı meydana gelmiştir.
- 2380 mm'de 73 kN yüklemde 0,1 mm genişliğinde eğilme çatlağı meydana gelmiştir.
- 1650 mm'de 80 kN yüklemde 0,25 mm genişliğinde eğilme çatlağı meydana gelmiştir.
- 580 mm'de 87 kN yüklemde 0,15 mm genişliğinde 60 derece yatayla açılı kesme çatlağı meydana gelmiştir.
- 1350 mm'de ve 1650 mm'de meydana gelen çatlakların genişlikleri 127 kN yüklemde 0,35mm olarak ölçülmüştür.
- 2450 mm'de 137 kN yüklemde 0,25 mm genişliğinde kesme çatlağı oluşmuştur.

- Yükleme 150 kN mertebesine çıkarıldıktan sonra 350 mm ve 580 mm'den başlayan 0,3 mm genişlikli kesme çatlakları ile 800 mm ve 1000 mm'de oluşan kesme ve eğilme çatlakları görülmüştür.
- 1350 mm'de meydana gelen çatlağın genişliği 160 kN yüklemde 0,5mm olarak ölçülürken aynı yüklemde 1650 mm'de ölçülen çatlağın genişliği 0,4 mm olarak ölçülmüştür.
- Yükleme 195 kN mertebelerine çıkarıldığında; 300 mm'den başlayan kesme çatlağı 0,4 mm genişliğine, 800 mm'den başlayan kesme çatlağı 0,5 mm genişliğine, 1350 mm'deki eğilme çatlağı 0,6 mm genişliğine, 1600 mm'deki eğilme çatlağı 0,5 mm genişliğine, 1950 mm'den başlayan kesme çatlağı 0,4 mm genişliğine, 2200 mm'den başlayan kesme çatlağı 0,35 mm genişliğine, 2400 mm'den başlayan kesme çatlağı 0,3 mm genişliğine, 2500 mm'den başlayan kesme çatlağı 0,2 mm genişliğine ulaşmıştır.
- Yükleme 215 kN mertebelerine çıkarıldığında; en büyük çatlak olan 1550 mm'deki eğilme çatlağı 2,5 mm genişliğine, 1300 mm'deki eğilme çatlağı 0,8 mm genişliğine, 1700 mm'deki eğilme çatlağı 0,8 mm genişliğine, 2900 mm'deki çatlak 0,5 mm genişliğine, 2200 mm'deki çatlak 0,4mm genişliğine, 2400 mm'deki çatlaklar 0,3 mm genişliğine, 300 mm'deki kesme çatlağı 0,5 mm genişliğine, 580 mm'deki kesme çatlağı 0,35 mm genişliğine, 800 mm'deki kesme ve eğilme çatlağı 0,5 mm genişliğine, 1000 mm'deki kesme ve eğilme çatlağı 0,35 mm genişliğine ulaşmıştır.
- Yükleme 220 kN'a çıkarıldığında yüklemenin yapıldığı bölgede ezilme meydana gelmiştir.
- Yükleme 222 kN'a çıkarıldığında 500 mm'lik bölgede çatlaklar 3,5 mm genişliğine ulaşmıştır.
- Kiriş ortasında 600 mm'de yer alan çatlaklarda aşağıdan başlayıp yüklemenin yapıldığı kısma doğru yönelim gözlemlenmiştir.
- Ezilme belirginleşmiş, kesme çatlakları sabit kalmıştır, en büyük kesme çatlağı ise 300 mm'de 0,5mm genişliğinde gözlemlenmiştir.
- Yük hücresinin uzama kapasitesi kiriş ortasında oluşan deplasman 100 mm'yi bulduğunda tamamlanmış ve deney bu noktada sonlandırılmıştır.



Şekil 4.4. RS100 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3. Güçlendirme Elemanlarının Deneyleri

Bu bölümde;

- SW50/0,75 , SW50/1,00 , SW50/1,25 , SW50/1,50 kirişlerinden oluşan B grubu deney elemanları,
- SW100/0,75 , SW100/1,00 , SW100/1,25 , SW100/1,50 kirişlerinden oluşan C grubu deney elemanları,
- SWA50/1,25 , SWA50/1,50 , SW100/1,25 , SW100/1,50 kirişlerinden oluşan D grubu deney elemanları

İnceleme konusu edilmiş, deneyler sırasında gerçekleşen olaylar ve grafikler sunulmuştur.

Deney elemanlarının neredeyse tümü daha önceden eğilme testlerine maruz kalmış kirişlerden teşkil olduğundan ve yüzeyleri de karbon kumaşlar ile epoksi yapıştırıcılardan

oluşan lamine bir malzemeyle kaplı olduğundan yükleme bazında çatlak genişliği takibi gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır.

4.3.1. SW50/0,75 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 0,751b (0,75x38x16x2=912 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 50 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.3. SW50-0,75 deney öncesi fotoğrafı



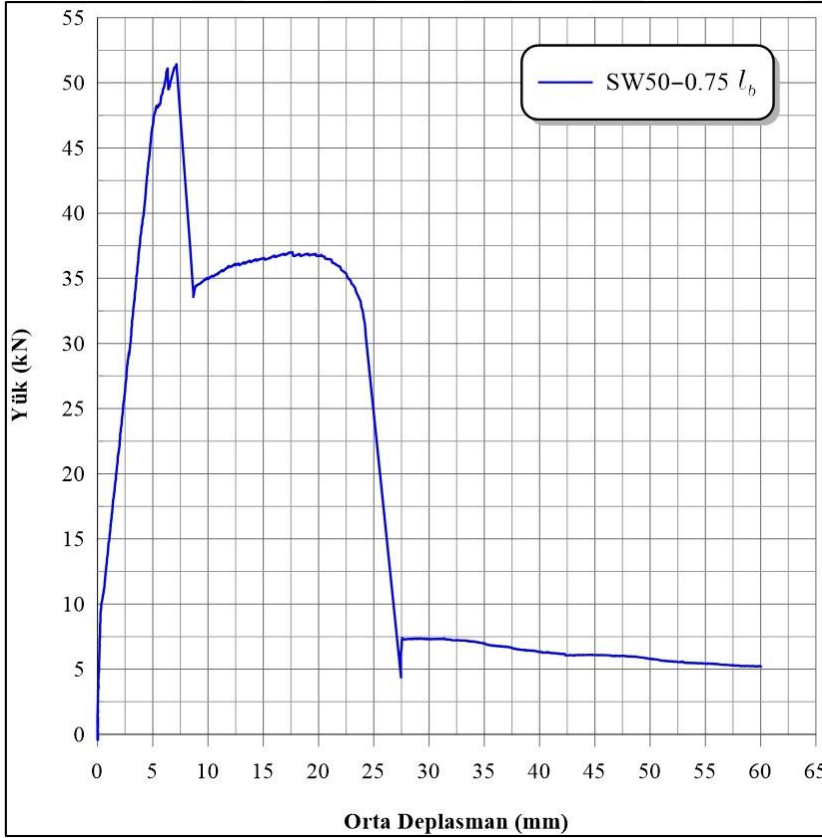
Resim 4.4. SW50-0,75 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.5. SW50-0,75 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 25 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 49 kN yüke kadar yükleme arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- 51,44 kN yüklemde 7,1 mm orta deplasman varken plakanın sıyrılması ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 34 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sonrasında kiriş yük almaya devam ederek 36 kN'a ulaşmış ve burada bir süre sabit kalarak Ø8 donatılar akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte donatıların her ikisi de koparak yükleme 7kN seviyelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 60 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.5. SW50-0,75 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.2. SW50/1,00 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 3Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,00lb (1,00x38x16x2=1216 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 50 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.6. SW50-1,00 deney öncesi fotoğrafı



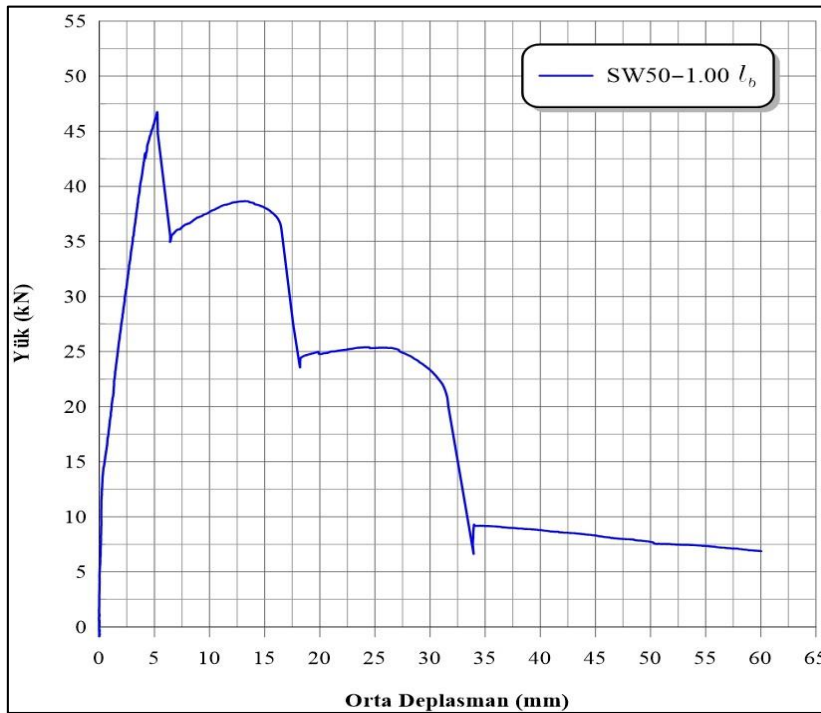
Resim 4.7. SW50-1,00 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.8. SW50-1,00 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 15 kN yüklemeye kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 40 kN yüke kadar yükleme arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülememiştir.
- 46,75 kN yüklemeye 5,0 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 35 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 38 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 15 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 25 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sonrasında kiriş yük almaya devam ederek 26 kN'a ulaşmış ve burada bir süre sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yükleme 8 kN seviyelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 60 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.6. SW50-1,00 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.3. SW50/1,25 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 3Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,25lb (1,25x38x16x2=1520 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 50 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.9. SW50-1,25 deney öncesi fotoğrafı

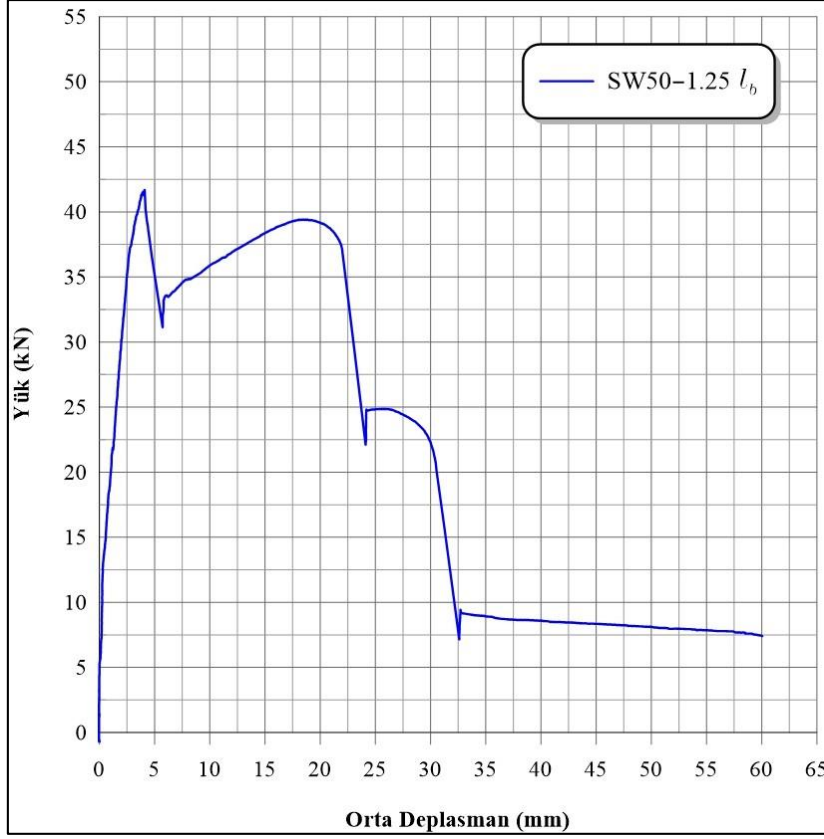


Resim 4.10. SW50-1,25 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 18 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 39 kN yüke kadar yüklem arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 41,69 kN yüklemde 4,1 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 33 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 39 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 20 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 22 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sonrasında kiriş yük almaya devam ederek 24 kN'a ulaşmış ve burada bir süre sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yüklem 9 kN seviyelerine düşmüştür.

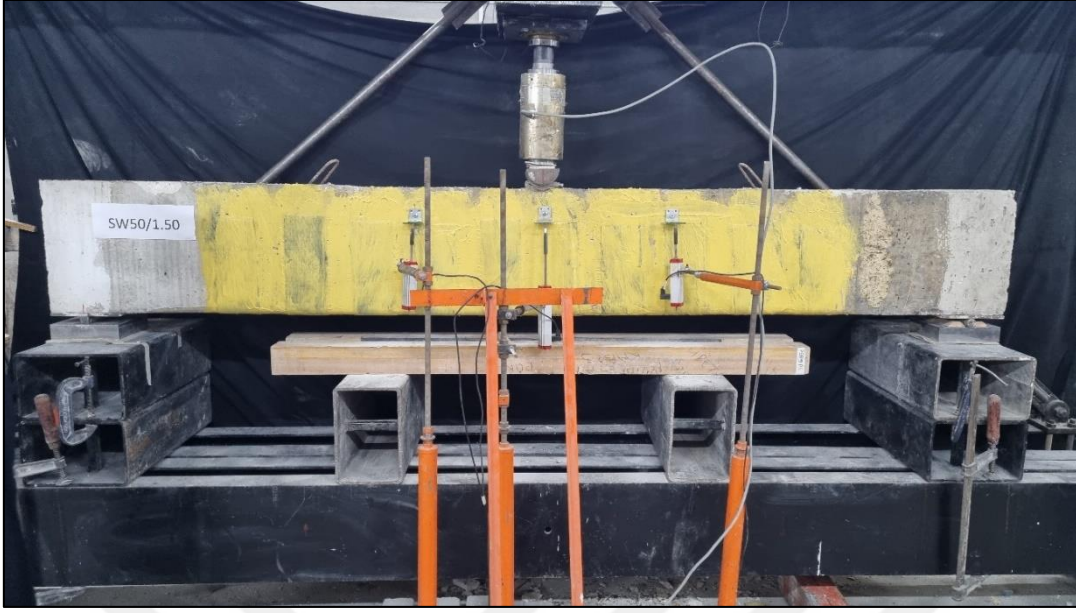
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 60 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.7. SW50-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.4. SW50/1,50 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,50lb (1,50x38x16x2=1824 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 50 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.11. SW50-1,50 deney öncesi fotoğrafı



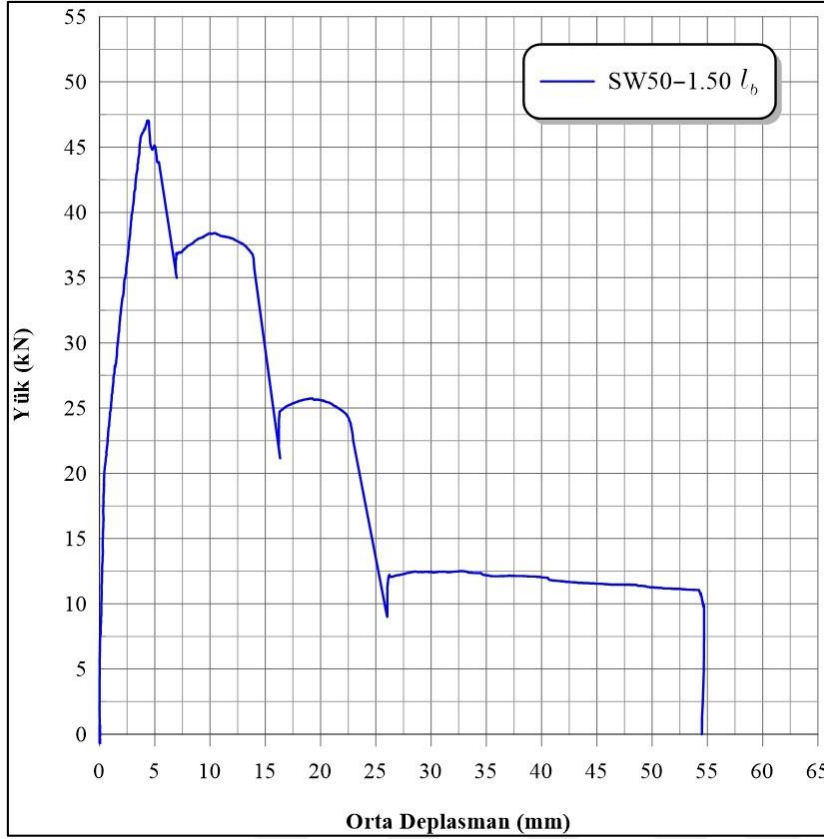
Resim 4.12. SW50-1,50 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.13. SW50-1,50 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 22 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 40 kN yüke kadar yükleme arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 47,05 kN yüklemde 4,4 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 36 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 38 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 14 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 22 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sonrasında kiriş yük almaya devam ederek 25 kN'a ulaşmış ve burada bir süre sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yükleme 10 kN seviyelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



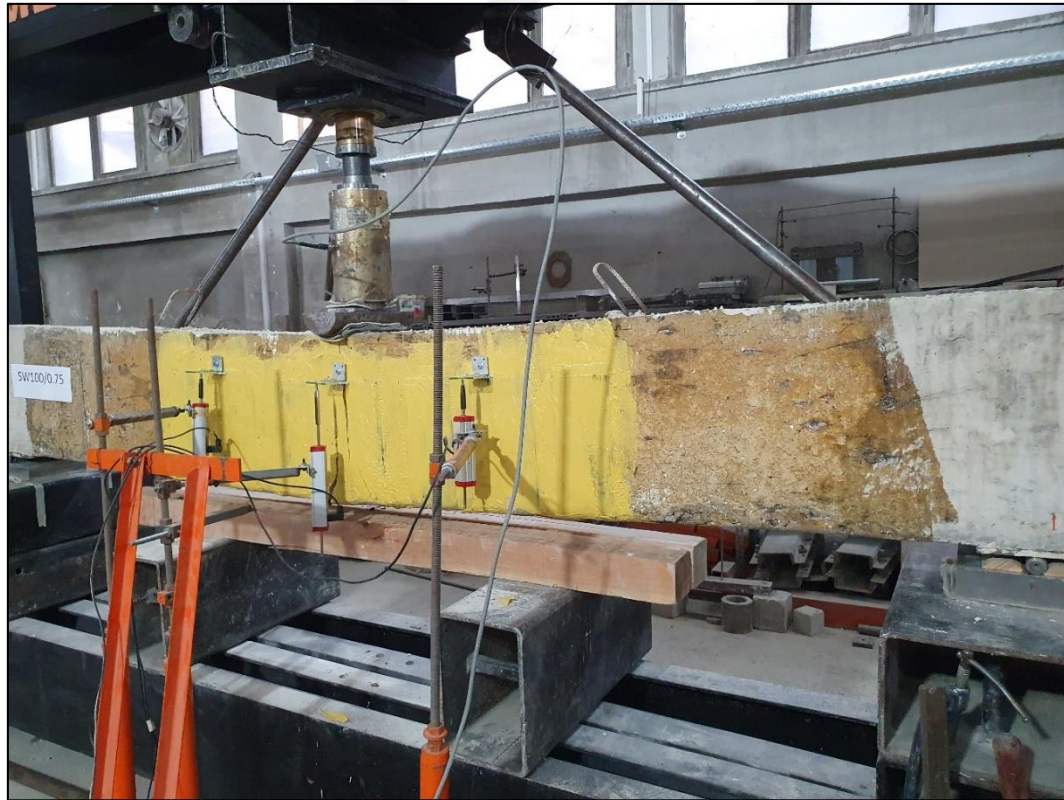
Şekil 4.8. SW50-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.5. SW100/0,75 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 0,75lb (0,75x38x22x2=1254 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 100 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.14. SW100-0,75 deney öncesi fotoğrafı



Resim 4.15. SW100-0,75 deney sonrası fotoğrafı

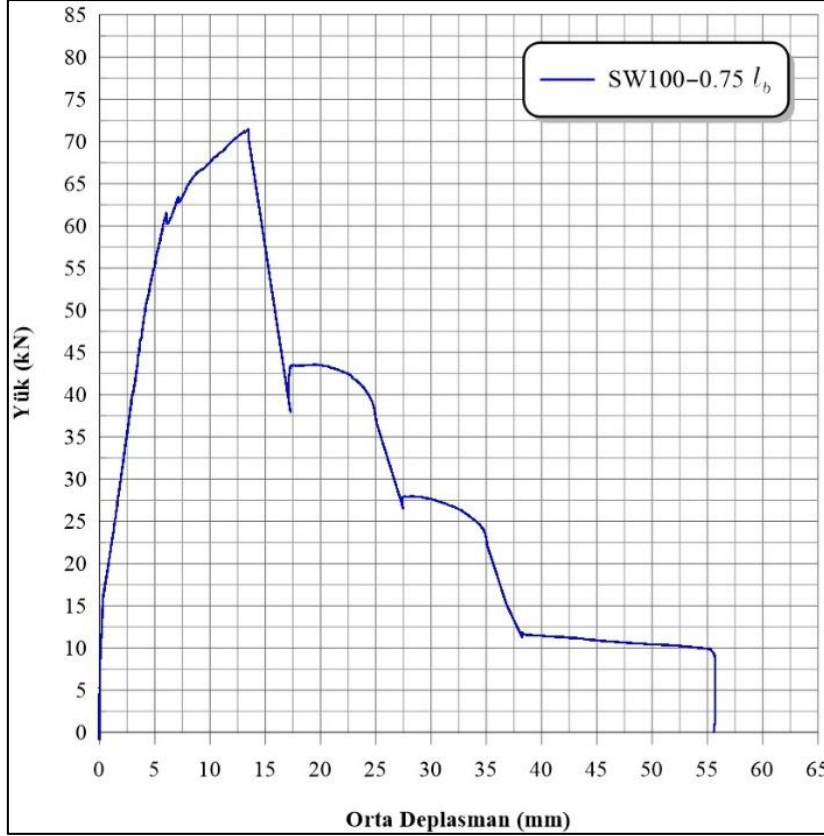


Resim 4.16. SW100-0,75 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 20 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 63 kN yüke kadar yüklem arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 71,43 kN yüklemde 13,5 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 38 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 43 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 24,9 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 27 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sonrasında kiriş yük almaya devam ederek 28 kN'a ulaşmış ve burada bir süre sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yüklem 11 kN seviyelerine düşmüştür.

- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.9. SW100-0,75 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.6. SW100/1,00 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,00lb (1,00x38x22x2=1672 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 100 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.17. SW100-1,00 deney öncesi fotoğrafı



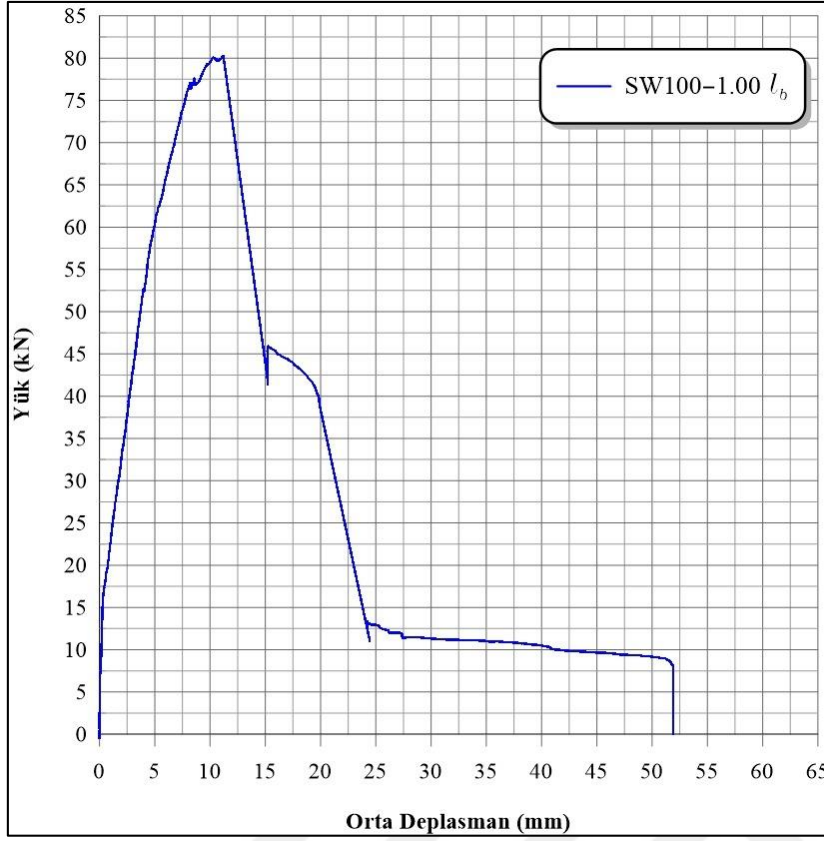
Resim 4.18. SW100-1,00 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.19. SW100-1,00 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 25 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 65 kN yüke kadar yüklem arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 80,27 kN yüklemde 11,21mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 41 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 44 kN mertebelerine ulaşmış ve yavaş yavaş 40 kN seviyelerine düşerek 19,9 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan her ikisi de kopmuştur.
- Yük 11 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.10. SW100-1,00 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.7. SW100/1,25 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,25lb (1,25x38x22x2=2090 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 100 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.20. SW100-1,25 deney öncesi fotoğrafı



Resim 4.21. SW100-1,25 deney sonrası fotoğrafı



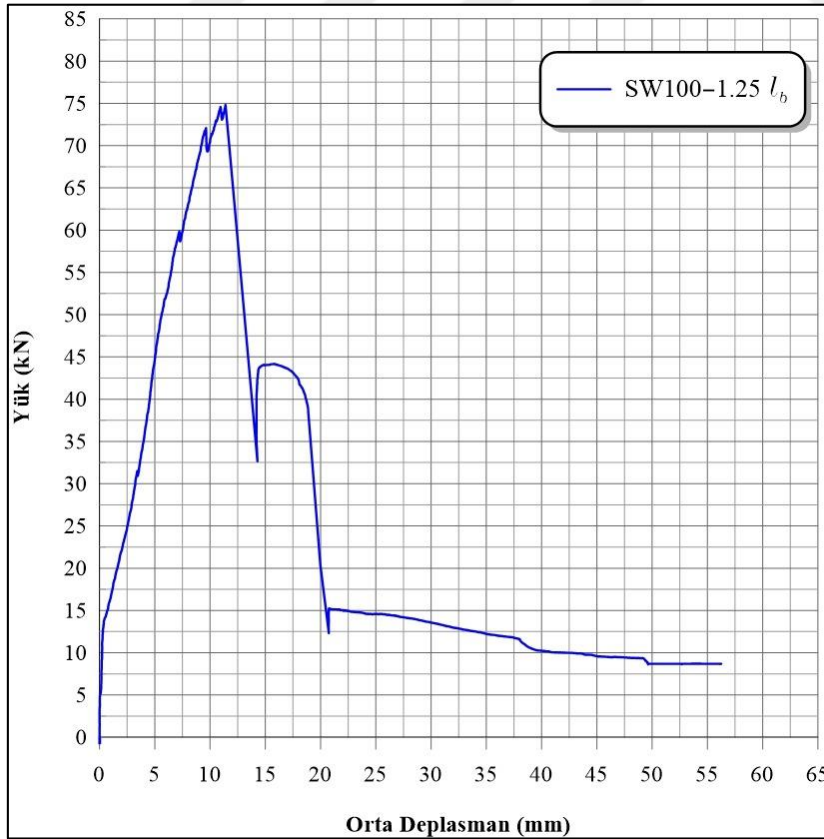
Resim 4.22. SW100-1,25 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.23. SW100-1,25 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 20 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 60 kN yüke kadar yükleme arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 74,82 kN yüklemde 11,4 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 33 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 44 kN mertebelerine ulaşmış ve yavaş yavaş 39 kN seviyelerine düşerek 19 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan her ikisi de kopmuştur.
- Yük 12 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.11. SW100-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.8. SW100/1,50 güçlendirme elemanı

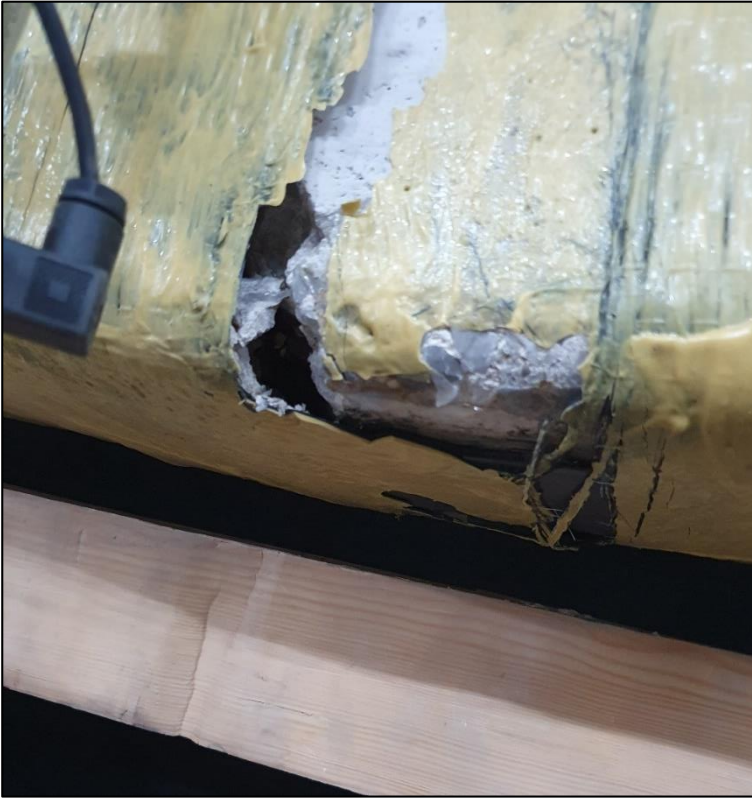
- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 3Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,50lb (1,50x38x22x2=2508 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 100 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Yok



Resim 4.24. SW100-1,50 deney öncesi fotoğrafı



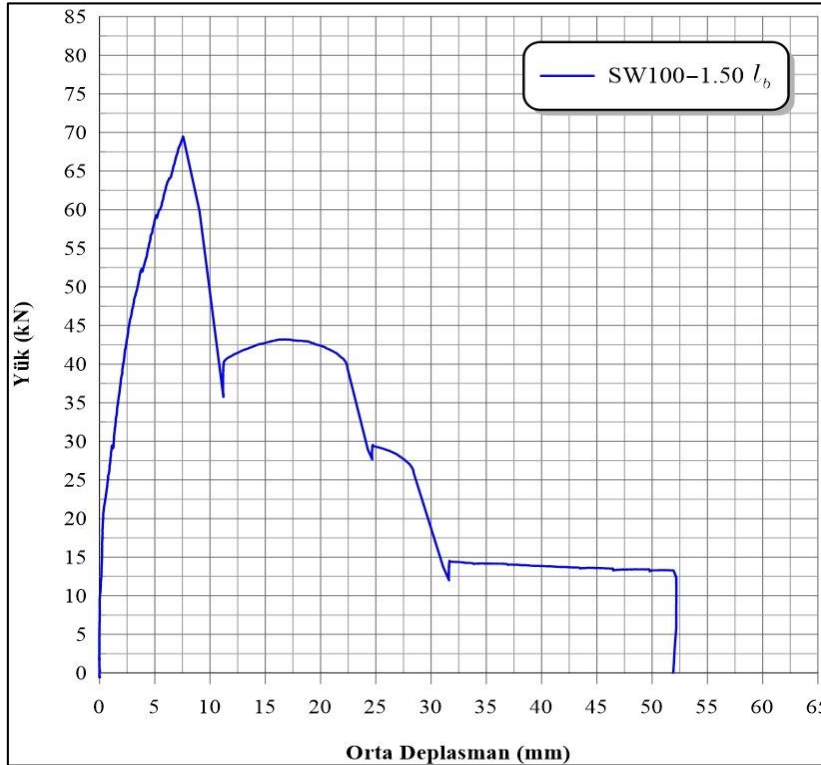
Resim 4.25. SW100-1,50 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.26. SW100-1,50 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 25 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 53 kN yüke kadar yükleme arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 69,49 kN yüklemde 7,5 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 36 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 43 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 22,4 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 28 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş bir süre 28 kN mertebelerinde sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yükleme 12 kN seviyelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.12. SW100-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.9. SWA50/1,25 güçlendirme elemanı

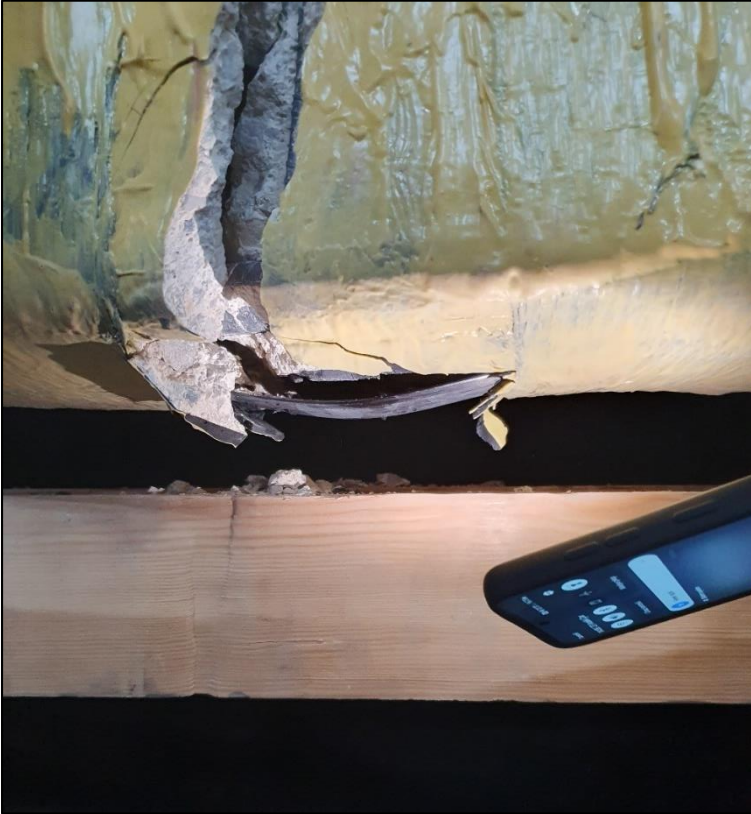
- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 3Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Var
- Karbon plakasının bindirme boyu : 1,25lb (1,25x38x16x2=1520 mm)
- Karbon plakasının genişliği ve et kalınlığı : 50 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Var



Resim 4.27. SWA50-1,25 deney öncesi fotoğrafı



Resim 4.28. SWA50-1,25 deney sonrası fotoğrafı



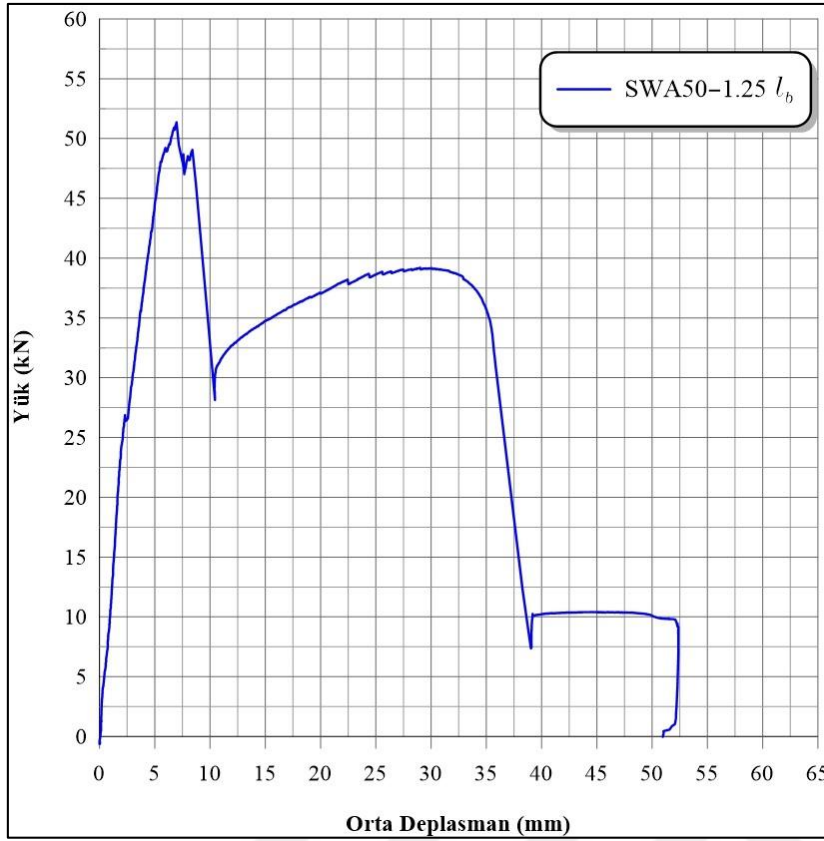
Resim 4.29. SWA50-1,25 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.30. SWA50-1,25 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 20 kN yüklemde kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 40 kN yüke kadar yüklem arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 51,37 kN yüklemde 6,9 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 28 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 39 kN mertebelerine ulaşmış ve yavaş yavaş 36 kN seviyelerine düşerek 34,9 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan her ikisi de kopmuştur.
- Yük 10 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.13. SWA50-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.10. SWA50/1,50 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø16 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø16) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,50lb (1,50x38x16x2=1824 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 50 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Var



Resim 4.31. SWA50-1,50 deney öncesi fotoğrafı



Resim 4.32. SWA50-1,50 deney sonrası fotoğrafı

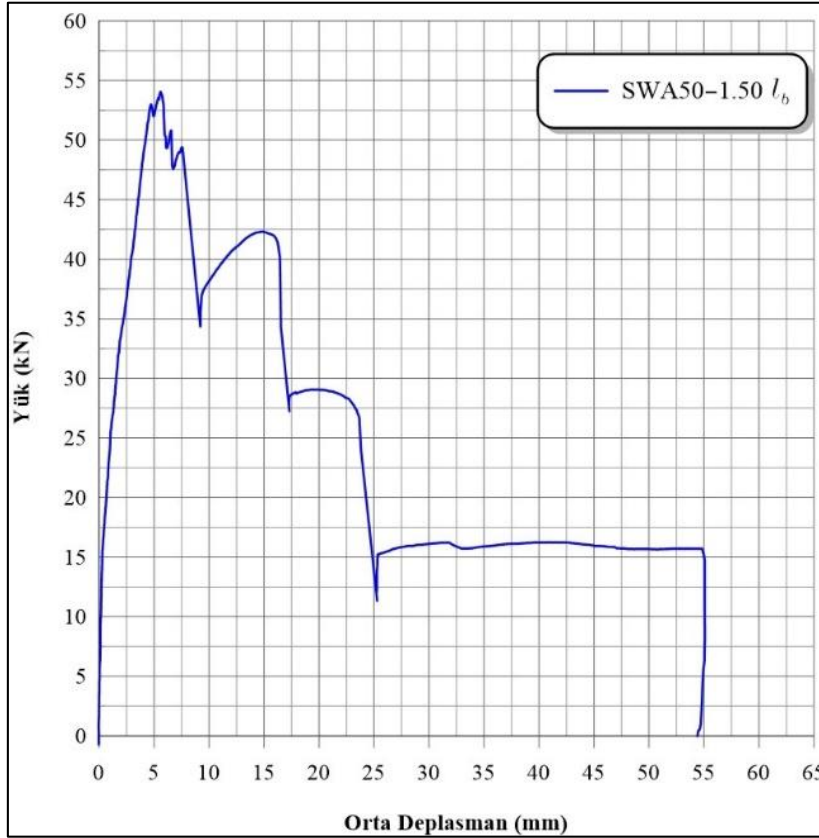


Resim 4.33. SWA50-1,50 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 15 kN yüklemeye kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 50 kN yüke kadar yüklemeye artırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 54,05 kN yüklemeye 5,6 mm orta deplasman varken yüklemeye çatırtı sesleri ile birlikte kademeli olarak 47 kN seviyelerine düşmüş ve ardından tekrar 49 kN seviyelerine çıkarak karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük 34 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 42 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 15,8 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 28 kN mertebelerine düşmüştür.

- Kiriş bir süre 28 kN /29 kN mertebelerinde sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yüklemeye 16 kN seviyelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.14. SWA50-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.11. SWA100/1,25 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 30Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,25l_b (1,25x38x22x2=2090 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 100 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Var



Resim 4.34. SWA100-1,25 deney öncesi fotoğrafı



Resim 4.35. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.36. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.37. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.38. SWA100-1,25 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 20 kN yüklemeye kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 63 kN yüke kadar yüklemeye arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.
- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- 70,57 kN yüklemeye 6,7 mm orta deplasman varken yüklemeye karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan yüksek bir ses ile birlikte önce 55 kN seviyesine ardından ani şekilde gelişen ikinci bir sıyrılma sesi ile birlikte 33 kN seviyelerine iki kademe halinde düşmüştür.
- Her iki kademe de sıyrılma seslerinin; karbon lamayı tutan epoksi macunun yüzeyden sıyrılmasına bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 41 kN mertebelerine ulaşmış ve bir süre burada sabit kaldıktan sonra 24,9 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan ilki kopmuştur.
- Yük 27 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş bir süre 27 kN /28 kN mertebelerinde sabit kalarak ikinci Ø8 donatı akmaya başlamış ve yüksek bir kopma sesi ile birlikte yüklemeye 12 kN seviyelerine düşmüştür.

- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.15. SWA100-1,25 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi

4.3.12. SWA100/1,50 güçlendirme elemanı

- Basınç bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22
- Çekme bölgesinde yer alan donatı : 2Ø22 + 2Ø8
- Etriye olarak kullanılan donatı : 3Ø8/100
- Çekme donatısı (Ø22) süreksizliği : Var
- Karbon plakanın bindirme boyu : 1,50lb (1,50x38x22x2=2508 mm)
- Karbon plakanın genişliği ve et kalınlığı : 100 mm / 1,4 mm
- Karbon kumaş sargı : Var
- Fan tipi ankraj : Var



Resim 4.39. SWA100-1,50 deney öncesi fotoğrafı



Resim 4.40. SWA100-1,50 deney sonrası fotoğrafı



Resim 4.41. SWA100-1,50 deney sonrası fotoğrafı

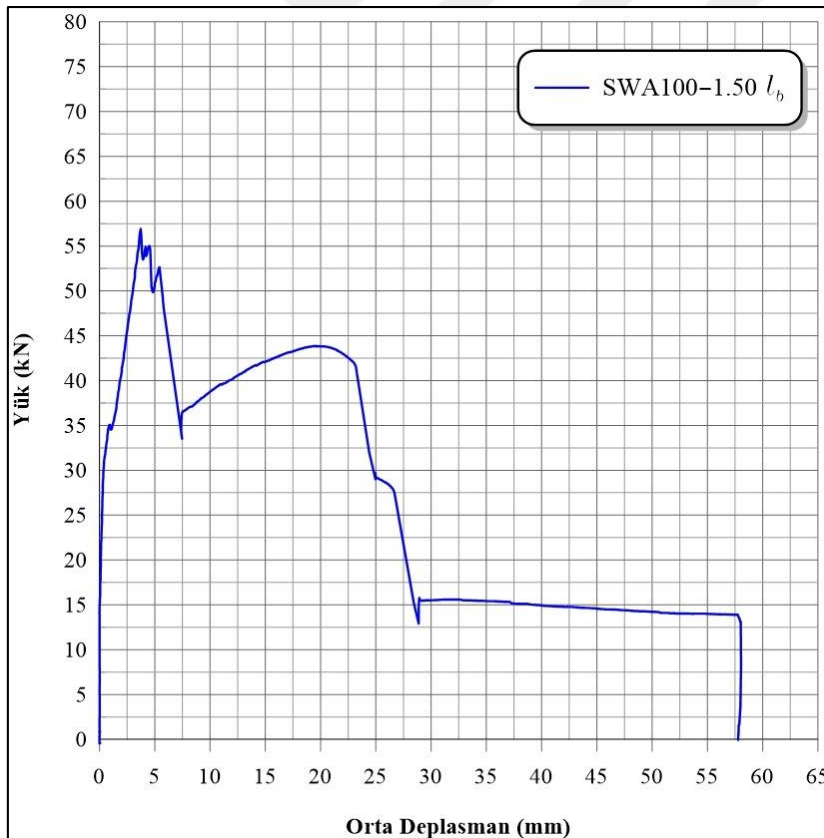


Resim 4.42. SWA100-1,50 deney sonrası fotoğrafı

Deneyin Hikayesi:

- 30 kN yüklemede kiriş yüzeyindeki güçlendirme malzemelerinden kısık sesli çıtırtılar duyulmaya başlamıştır.
- 50 kN yüke kadar yükleme arttırıldıkça seslerde de çok yoğun artışlar ve duyulmaya başlamıştır.

- Bu noktaya kadar kirişte belirgin bir çatlak görülmemiştir.
- Sonrasında deney elemanı 56,91 kN yüklemeye ulaşır bir miktar yük kaybına uğramış ve 55,02 kN yüklemeye 4,51 mm orta deplasman varken karbon lamanın sıyrılması ile ilintili olan son derece yüksek bir ses duyulmuştur.
- Yük kademeli şekilde 34 kN mertebelerine düşmüştür.
- Kiriş tekrar yük almaya başlayarak 43 kN / 44 kN mertebelerine ulaşmış ve 23 mm deplasmana ulaştığı sırada aniden ikinci bir yüksek ses duyulmuş ve güvenlik amaçlı bırakılan Ø8 donatılardan biri kopmuştur.
- Hemen ardından yük 29 kN seviyelerine düştüğü esnada orta deplasman 26 mm seviyelerindeyken üçüncü bir yüksek sesle diğer Ø8 donatı da kopmuştur.
- Yük 15 kN mertebelerine düşmüştür.
- Sistem bu noktadan sonra yük almaya devam etmemiş olup orta deplasman 55 mm seviyelerini görünceye değin yüklemeye devam edilmiş ve sonrasında ise yük boşaltılmıştır.



Şekil 4.16. SWA100-1,50 deney elemanı yük-deplasman ilişkisi



5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Genel Değerlendirme

Bu bölümde deneylerde elde edilen sonuçlar genel hatları ile yorumlanarak aktarılmıştır. Deney elemanlarının kıyas grafikleri ve bunların yorumlarına bölüm 5.2’de deney elemanlarının dayanım, süneklik ve enerji dönüştürme kapasitesi gibi niteliklerine dair değerlendirmelerine ise bölüm 5.3’de yer verilmiştir.

Deneylerde kullanılmak üzere imal edilen betonarme kirişlerin tamamında çekme bölgesinde güvenlik ve montaj amaçlı kullanılan 2 adet Ø8 donatı haricindeki gerek Ø16 gerekse Ø22 tüm ana donatılar bindirmeli ek yapılmaksızın süreksiz olarak yerleştirilmiştir. Bu nedenle deney elemanlarının çekme bölgesine yapıştırılan karbon fiber plakalarla deneylerde incelenmek istenen husus; kiriş elemanlarının içerisindeki donatıların kenetlenmesi ve karbon plakadan donatıya yük aktarımının güvenli bir şekilde sağlanıp sağlanamayacağını belirlenebilmesidir.

Çalışma kapsamında 200x400x3000 mm boyutlarında dikdörtgen kesite sahip 14 adet betonarme kiriş imal edilmiştir. İlgili kirişler A, B, C ve D olmak üzere dört gruba ayrılmış olup; A grubu içerisinde güçlendirme işlemine tabi tutulmamış ve çekme donatıları sürekli olarak imal edilmiş olan 2 adet referans kiriş yer almaktadır.

B grubu içerisinde daha önce içerisindeki Ø8 donatılar akmaksızın üç noktalı eğilme testine tabi tutularak kırılmış 4 adet betonarme kiriş yer almaktadır. Bu deney elemanları tamir harcı ile dolgu yapılarak onarıldıktan sonra farklı bindirme boylarında (temel kenetlenme boyunun 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 katı boyunda) 50 mm genişliğindeki karbon fiber plakalarla güçlendirilmiştir ve bu kirişlerin tümü çekme bölgesinde süreksiz olarak imal edilen 2 adet Ø16 çapında donatıya sahiptir. Ayrıca çekme bölgesine uygulanan karbon fiber plaka takviyesinden sonra 125 mm genişliğinde 300 gr/m² ‘lik karbon elyaflarla ve 75 mm aralıklarla plakayı bir uçtan diğer uca kadar kiriş iki yan yüzü dahil olmak üzere “U” biçiminde saracak şekilde iki katman sargılama yapılmıştır.

C grubu içerisinde daha önce içerisindeki Ø8 donatılar akmaksızın üç noktalı eğilme testine tabi tutularak kırılmış 4 adet betonarme kiriş yer almaktadır. Bu deney elemanları tamir harcı ile dolgu yapılarak onarıldıktan sonra farklı bindirme boylarında (temel kenetlenme boyunun 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 katı boyunda) 100 mm genişliğindeki karbon fiber plakalarla güçlendirilmiştir ve bu kirişlerin tümü çekme bölgesinde süreksiz olarak imal edilen 2 adet Ø22 çapında donatıya sahiptir. Ayrıca çekme bölgesine uygulanan karbon fiber plaka takviyesinden sonra 125 mm genişliğinde 300 gr/m² 'lik karbon elyaflarla ve 75 mm aralıklarla plakayı bir uçtan diğer uca kadar kiriş iki yan yüzü dahil olmak üzere "U" biçiminde saracak şekilde iki katman sargılama yapılmıştır.

D grubu içerisinde B ve C grubundaki deney elemanlarından farklı olarak daha öncesinde kırılmamış olan 4 adet betonarme kiriş yer almaktadır. Bu kirişlerden ikisi çekme bölgesinin ortasında süreksiz 2 adet Ø16 donatıya; diğer ikisi ise 2 adet Ø22 donatıya sahiptir. Bu deney elemanları farklı bindirme boylarında (temel kenetlenme boyunun 0,75; 1,00; 1,25 ve 1,50 katı boyunda) 50mm (Ø16 donatı kullanılan elemanlar için) ve 100 mm (Ø16 donatı kullanılan elemanlar için) genişliğindeki karbon fiber plakalarla güçlendirilmiştir. Ayrıca çekme bölgesine uygulanan karbon fiber plaka takviyesinden sonra 125 mm genişliğinde 300 gr/m² 'lik karbon elyaflarla ve 75 mm aralıklarla plakayı bir uçtan diğer uca kadar kiriş iki yan yüzü dahil olmak üzere "U" biçiminde saracak şekilde iki katman sargılama yapılmıştır. Sargılama işlemleri ile birlikte bu elemanlarda 20 cm ara ile fan tipi ankrajlar uygulanmıştır.

Yapılan deneylerde güçlendirme elemanlarının tamamında karbon fiber plakalar kiriş yüzeyinden sıyrılmış ve sonrasında da gevrek kırılma gerçekleşmiştir. Sıyrılmaya öncesinde kirişten gelen çatırdama sesleri plakanın sıyrılmaya önceden belli etmiştir. Tüm elemanlarda karbon fiber plaka kirişin bir tarafından sıyrıldıktan sonra kiriş orta bölümünde toplanmıştır.

Yine kirişlerin tamamı orta bölümde yüklemenin yapıldığı kısımdan aşağı doğru eğilme çatlağına maruz kalmıştır. Bunun haricinde kirişler üzerinde ciddi bir çatlak oluşumu gözlemlenememiş olup, kirişlerin yüzeyi epoksi ve karbon kumaşlarla kaplı olduğundan deney esnasında kılcal çatlakların tespiti de mümkün olmamıştır.

Gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri neticesinde;

- Önceden deneylerde kullanılmış olan hasarlı kirişler ile daha hasarsız vaziyette olan kirişlerin güçlendirildikten sonra gerek enerji dönüştürme gerekse dayanım anlamında birbirlerine üstünlüğünü gösterecek herhangi bir sonuca ulaşamamıştır.
- Fan tipi ankraj kullanılan elemanlardaki sıyırılma yükleri ile kullanılmayan elemanların sıyırılmaya maruz kaldığı yükler arasında anlamlı bir ilişki kurulamamış olup sistem üzerindeki ankrajların en azından deney yükleri altında çalışmadığı söylenebilir.
- B grubu, C grubu ve D grubu olmak üzere tüm gruptaki elemanlar kendi donatı klasmanı içerisinde benzer dayanım özellikleri göstermiştir.
- Gerek 50 mm genişliğinde karbon fiber plaka kullanılan elemanlar gerekse 100 mm genişliğinde karbon fiber plaka kullanılanlarda; seçilen bindirme boylarının sıyırılma ile ilişkisini gösterecek anlamlı bir sonuç alınamamıştır.
- Bindirme boyu kısa olan elemanların bindirme boyu büyük olan elemanlara göre daha yüksek dayanımlara ulaşabildiği büyük bindirme boyuna sahip elemanların daha düşük değerlerde kalabildiği görülmüştür. Bu durum gereğinden uzun şekilde kullanılan karbon plakanın yapışma yüzeyindeki kusur oranının ve / veya tesviye farklarının artmasıyla birlikte sıyırılma riskinin artabileceğini göstermiştir.
- Deneyler sırasında karbon lamaların kopma kapasitelerinin çok altındayken sıyırılma gerçekleştiğinden yapıştırıcı malzemenin önemi görülmektedir.

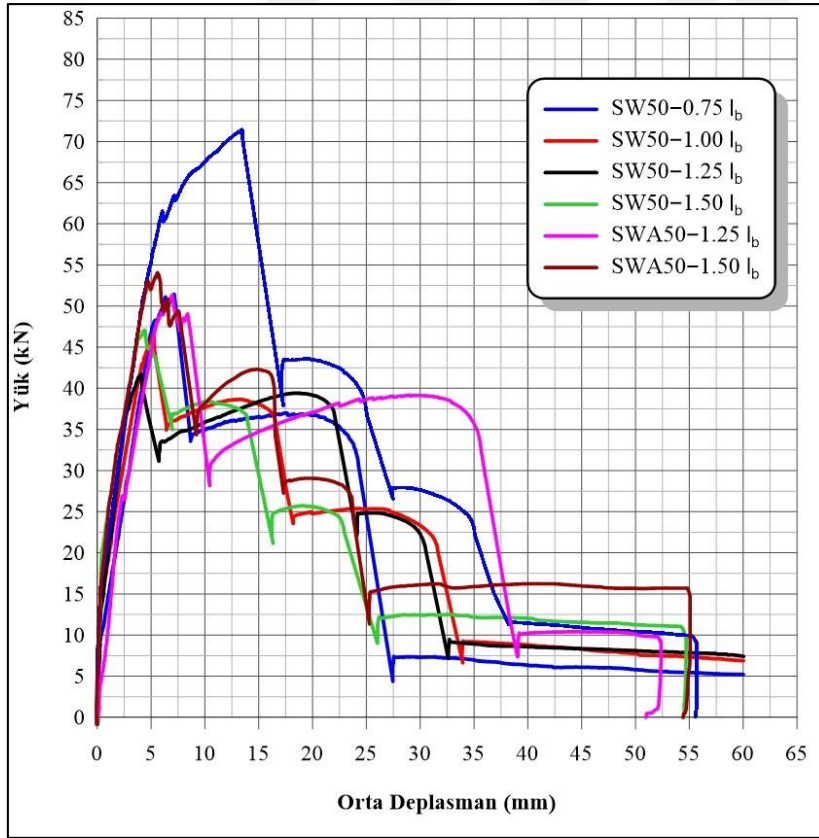
5.2. Genişliği 50 mm Olan Karbon Plakalarla Güçlendirilmiş Kirişler

Bu bölümde ele alınan deney elemanlarının tamamı çekme bölgesinde 2 adet Ø8 ve 2 adet Ø16 çapında donatıya sahip olan betonarme kirişler olup; bu elemanlar çekme bölgesine yapıştırılan farklı bindirme boylarında ve 50 mm genişliğindeki karbon fiber plakalarla güçlendirilmiştir. Deney elemanları çekme bölgesinde kullanılan donatılarına yaklaşık olarak karşılık gelen karbon fiber plaka kalınlıklarına göre gruplandırılmış sonrasında ise; farklı bindirme boylarında CFRP kullanımı, elemanın deney öncesi hasar durumu ile fan tipi ankraj kullanımı ve “U” biçiminde imal edilen karbon elyaf sargılama durumlarının eleman davranışına olan etkileri ele alınmıştır.

5.2.1. Farklı bindirme boylarında CFRP kullanılımasının davranışa olan etkisi

Aşağıda sunulan Şekil 5.1'den anlaşılacağı üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek dayanıma temel kenetlenme boyunun 0,75 katı kadar karbon plaka (CFRP) uzunluğuna sahip olan elemanın ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte temel kenetlenme boyunun 1,00 katı ve 1,50 katı olan elemanların benzer yüke ulaşarak ikinci olduğu, en düşük yüke ulaşan elemanın ise kenetlenme boyunun 1,25 katına sahip olan eleman olduğu görülmüştür.

Kenetlenme boyunun arttırılması ile ulaşılan nihai yüklem kapasitesi arasında CFRP malzemesi nihai dayanımına ulaşmadan sıyrıldığı için doğrusal bir ilişki olmadığı gibi; kullanılan karbon lama boyutu arttıkça eğilme elemanı üzerindeki olası yüzey kusurları ve tesviye bozukluklarının sonucu daha da olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir. Zira karbon plaka ile yapışma yüzeyi arasında oluşacak herhangi bir boşlukta sıyrılma tetiklenebilmektedir.

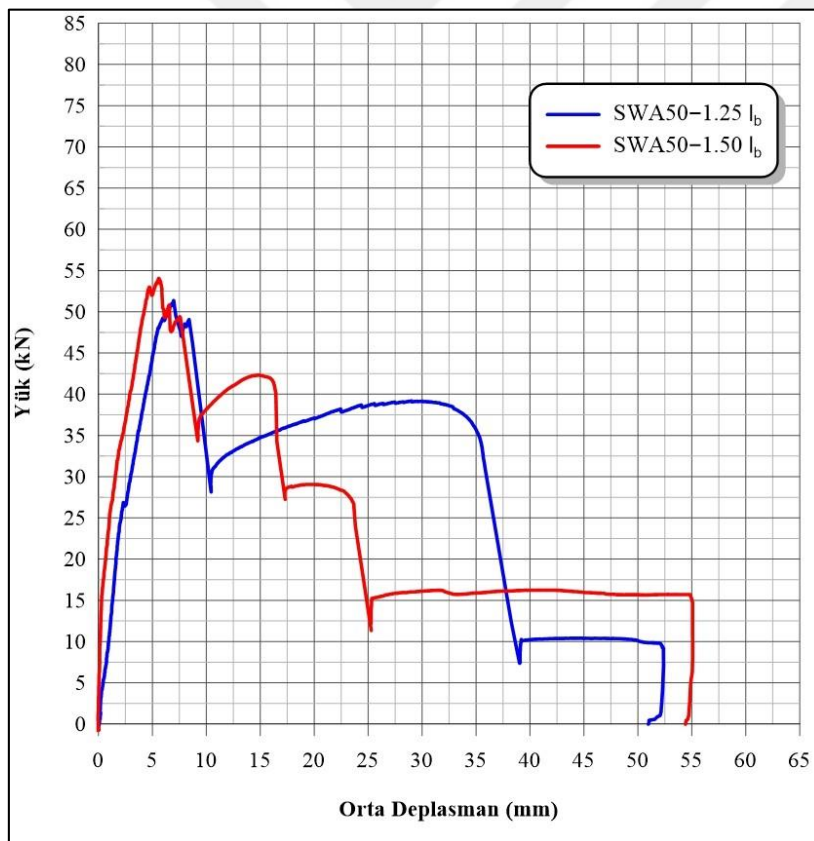


Şekil 5.1. CFRP kullanımının farklı bindirme boyları ile karşılaştırılması

5.2.2. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi

Şekil 5.2’de yük deplasman grafiklerine yer verilen SWA50-1,25 ve SWA50-1,50 kirişleri daha önce test edilmemiş ve dolayısı ile diğer 50 mm’lik plaka ile güçlendirilen elemanların aksine onarım görmeksizin güçlendirilmiş deney elemanlarıdır ve bu elemanlarda fan tipi ankrajlar bulunmaktadır.

Yük deplasman grafiklerinden de anlaşılacağı üzere ilgili deney elemanları onarım gören ankrajsız deney elemanları ile neredeyse aynı davranışı göstermiş olup; fan tipi ankrajların sıyrılmayı engelleme noktasında herhangi bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür. Öte yandan hasarlı olan elemanların onarımlarının başarıya ulaştığı ve hasarsızlık durumunun sonuca etki etmediği anlaşılmaktadır.

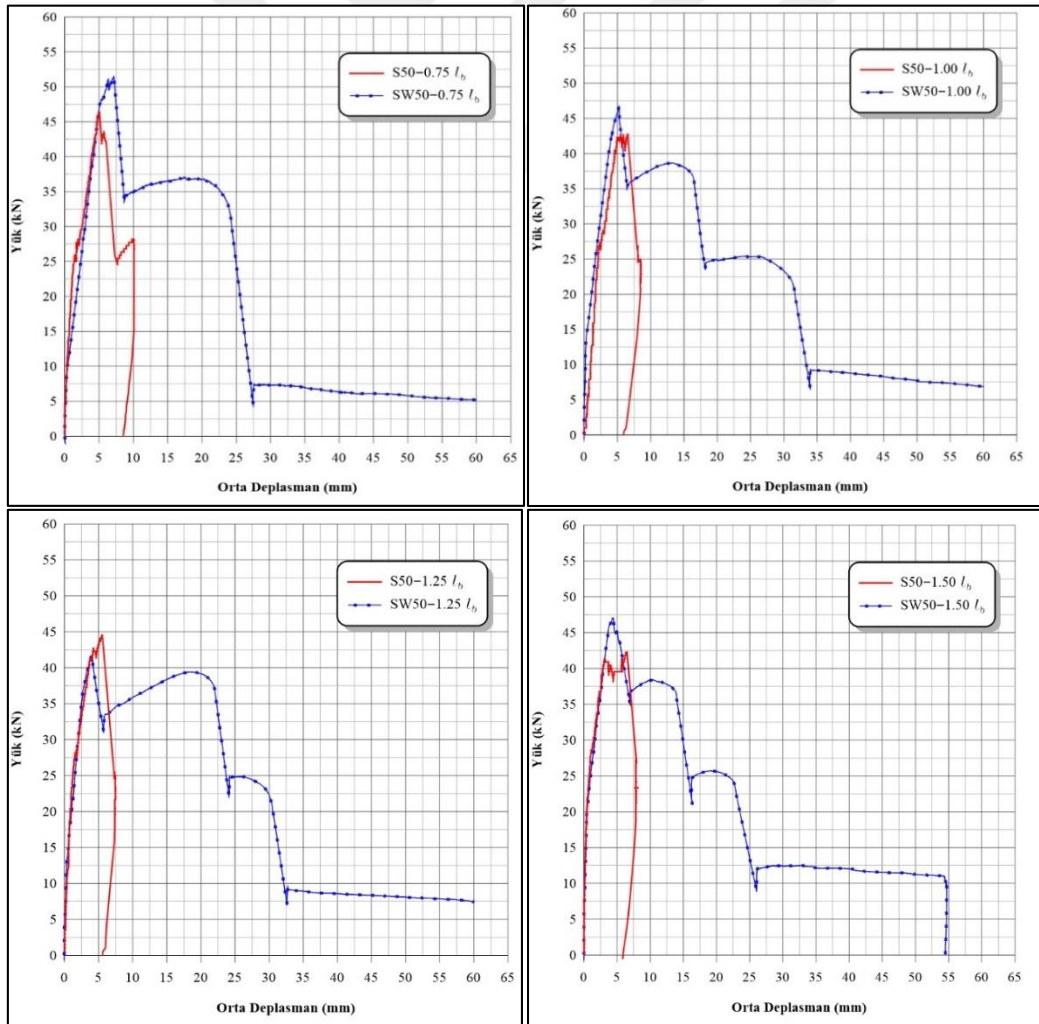


Şekil 5.2. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi

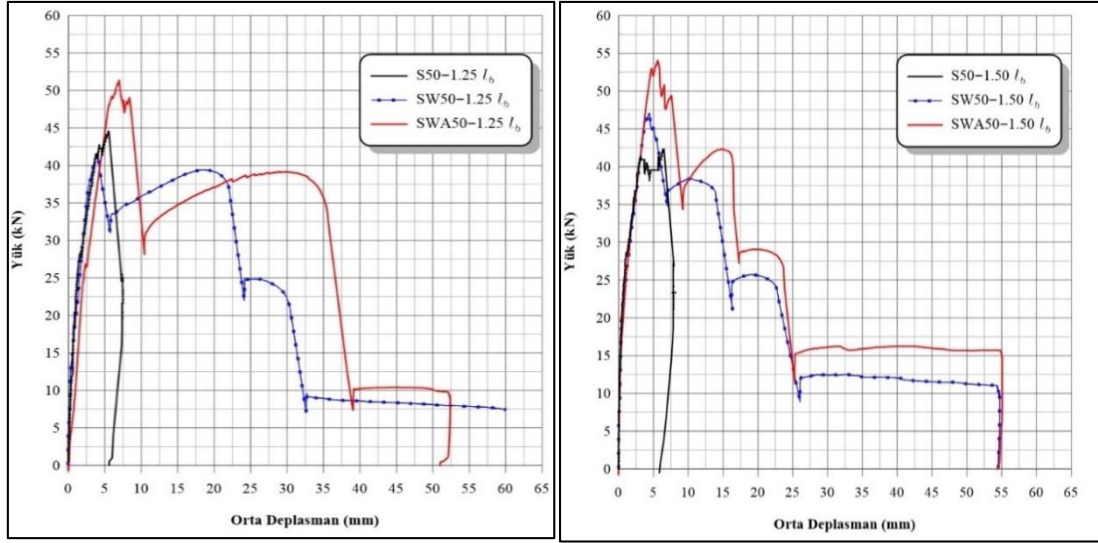
5.2.3. Sargılama yapıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi

Sümer (2023) tarafından test edilen 50 mm genişliğindeki plakalarla güçlendirilmiş kirişlerin her birinde kullanılan karbon plaka boyuna karşılık gelen, ancak ilgili çalışmadan farklı olarak onarılıp karbon plakalar yapıştırıldıktan sonra karbon elyaf kumaşlarla “U” şeklinde sargılanmış olan deney elemanlarının birbirleri ile olan kıyas grafiklerine yer verilmektedir.

İlgili grafiklerde sargılama işleminin; temel kenetlenme boyunun 1,25 katı olan elemanlar haricindeki diğer kenetlenme boylarının tamamında yük kapasitesinde son derece sınırlı bir artış sağladığı görülmüştür. Şekil 5.3 incelendiğinde temel kenetlenme boyunun 1,25 katı boyunca plaka ile güçlendirilen ankraj teşkil edilmiş elemanda da bu kapasite artışının diğer elemanlara benzer şekilde gerçekleşmiş olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Sargılama yapıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi



Şekil 5.3. (devam). Sargılama yapılıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi

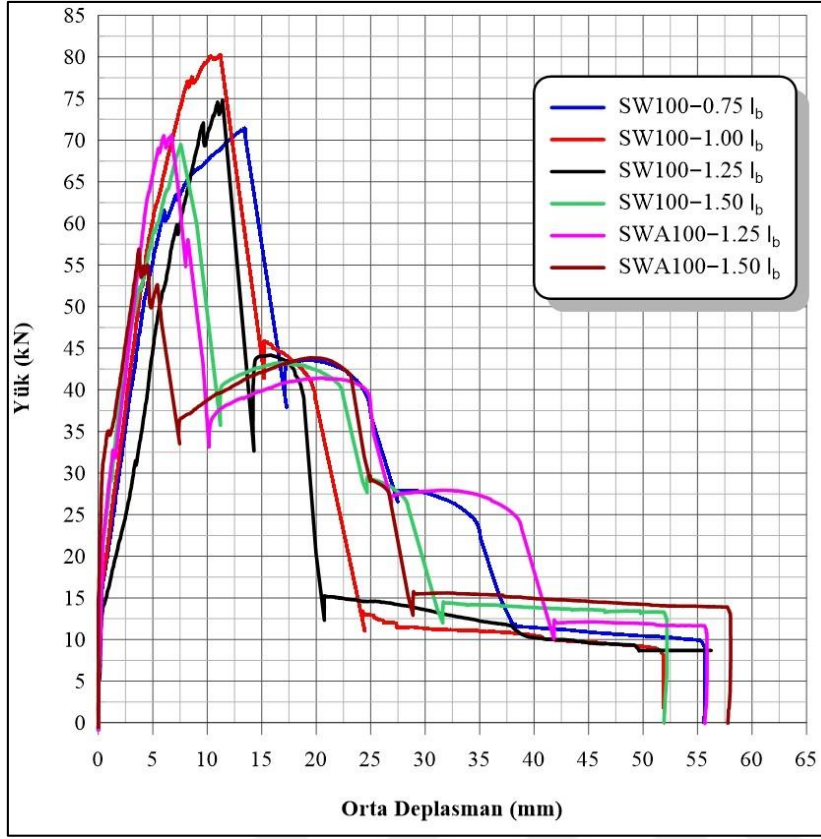
5.3. Genişliği 100 mm Olan Karbon Plakalarla Güçlendirilmiş Kirişler

Bu bölümde ele alınan deney elemanlarının tamamı çekme bölgesinde 2 adet $\varnothing 8$ ve 2 adet $\varnothing 16$ çapında donatıya sahip olan betonarme kirişler olup; bu elemanlar çekme bölgesine yapıştırılan farklı bindirme boylarında ve 50 mm genişliğindeki karbon fiber plakalarla güçlendirilmiştir.

5.3.1. Farklı bindirme boylarında CFRP kullanılması durumunun davranışa olan etkisi

Aşağıda sunulan Şekil 5.4'te anlaşılacağı üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek dayanıma temel kenetlenme boyunun 1,00 katı kadar karbon plaka (CFRP) uzunluğuna sahip olan elemanın ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte temel kenetlenme boyunun 1,25 katı boyunda CFRP kullanılan elemanın ikinci, 0,75 katı kullanılan elemanın üçüncü en yüksek dayanıma ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte temel kenetlenme boyunun 1,50 katı kadar CFRP uzunluğuna sahip olan en uzun karbon plakaya sahip elemanın en düşük dayanıma ulaştığı ancak sonuçlar arasında anlamlı farklar bulunmadığı anlaşılmıştır.

Kenetlenme boyunun artırılması ile ulaşılan nihai yükleme kapasitesi arasında CFRP malzemesi nihai dayanımına ulaşmadan sıyrıldığı için doğrusal bir ilişki olmadığı gibi; kullanılan karbon lama boyutu arttıkça eğilme elemanı üzerindeki olası yüzey kusurları ve tesviye bozukluklarının sonucu daha da olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir. Zira karbon plaka ile yapışma yüzeyi arasında oluşacak herhangi bir boşlukta sıyrılma tetiklenebilmektedir.

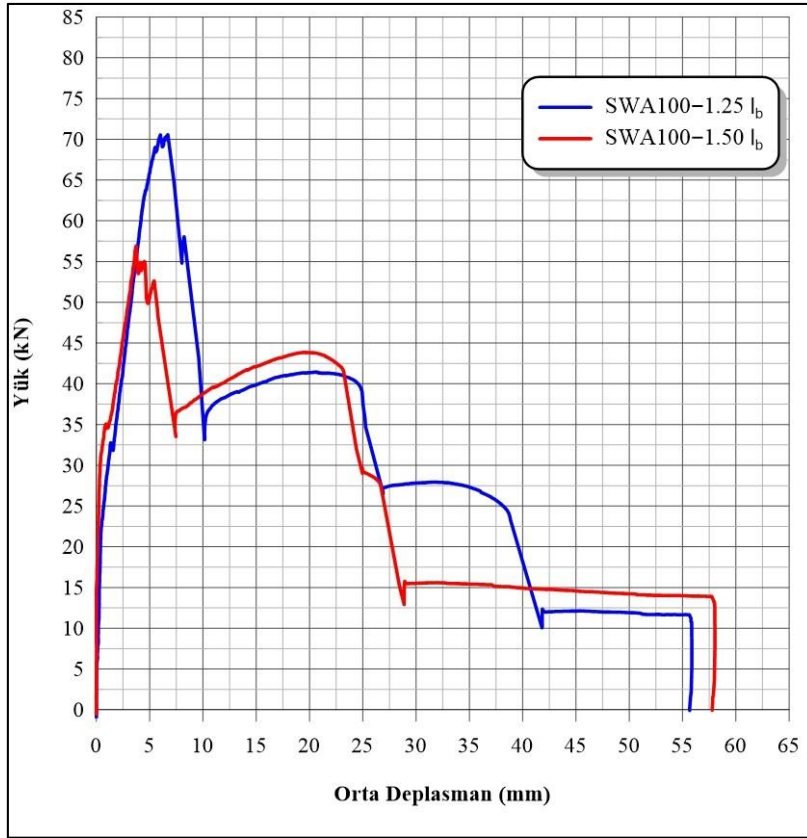


Şekil 5.4. Farklı bindirme boylarında CFRP kullanılmasıyla davranışa olan etkisi

5.3.2. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi

Şekil 5.5'te yük deplasman grafiklerine yer verilen SWA100-1,25 ve SWA100-1,50 kirişleri daha önce test edilmemiş ve dolayısıyla diğer 100 mm'lik plaka ile güçlendirilen elemanların aksine onarım görmeksizin güçlendirilmiş deney elemanlarıdır ve bu elemanlarda fan tipi ankrajlar bulunmaktadır.

Yük deplasman grafiklerinden de anlaşılacağı üzere ilgili deney elemanlarından SWA100-1,25 onarım gören ankrajsız deney elemanları ile neredeyse aynı davranışı göstermiş olup; SWA100-1,50 elemanının ise sargılanmış deney elemanları ortalamasının yaklaşık %29 altındaki yüklemde sıyrılma davranışı gösterdiği görülmüştür. Deney sonuçlarından fan tipi ankrajların sıyrılmayı engelleme noktasında herhangi bir etkisinin bulunmadığı görülmüş olmakla birlikte gereğinin üzerinde kullanılan CFRP boyunun kusur oranını arttırma noktasında sonuca etki edebileceği durumu teyit edilmiştir.

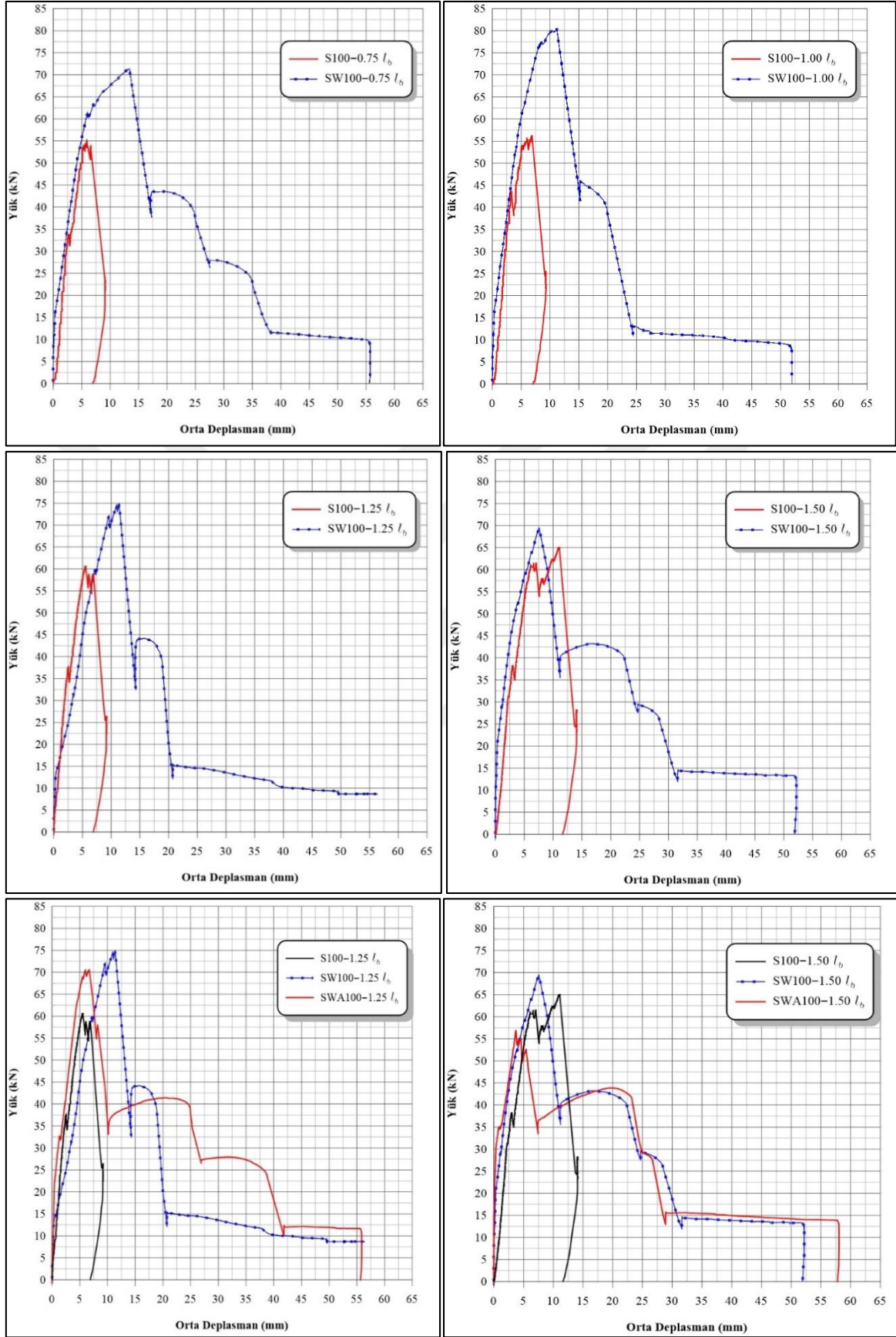


Şekil 5.5. Ankraj imalatı ile deney öncesi hasar durumunun davranışa olan etkisi

5.3.3. Sargılama yapıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi

Aşağıda Sümer (2023) tarafından test edilen 100 mm genişliğindeki plakalarla güçlendirilmiş kirişlerin her birinde kullanılan karbon plaka boyuna karşılık gelen, ancak ilgili çalışmadan farklı olarak onarılıp karbon plakalar yapıştırıldıktan sonra karbon elyaf kumaşlarla “U” şeklinde sargılanmış olan deney elemanlarının birbirleri ile olan kıyas grafiklerine yer verilmektedir. İlgili grafiklerde sargılama işleminin; tüm temel kenetlenme boylarında yük kapasitesinde artış sağladığı görülmüştür. Meydana gelen bu kapasite artışının temel kenetlenme boyunun 1,00 katı boyunda CFRP kullanılan elemanda %40, 0,75 katı kullanılanda %28, 1,00 katı kullanılan elemanda %24, 1,50 katı kullanılan elemanda ise %7 mertebelerinde olduğu ve doğrusal bir dağılım göstermediği görülmüştür.

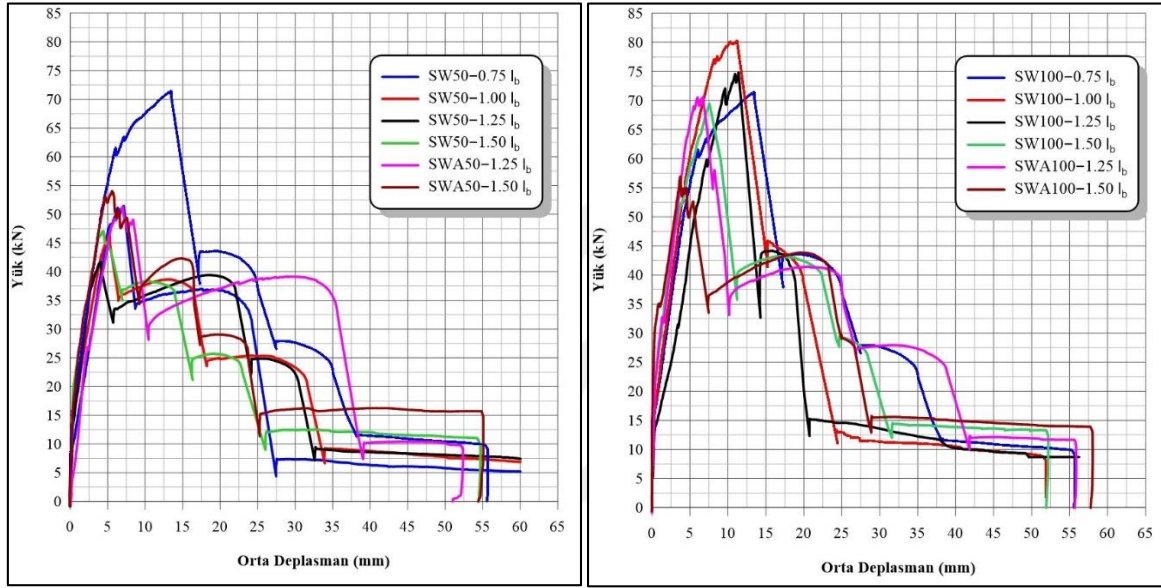
Şekil 5.6 incelendiğinde temel kenetlenme boyunun 1,50 katı boyunca plaka ile güçlendirilen ankraj teşkil edilmiş elemanda Bölüm 5.2.2.2 de belirtildiği üzere kapasite artışı görülmediği ve SWA100-1,50 deney elemanının sargılanmamış elemanlarla benzer dayanım özellikleri gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.6. Sargılama yapılıp yapılmaması durumunun davranışa olan etkisi

5.4. Karbon Plaka Genişliğinin Yük Kapasitesine Olan Etkisi

Gerek Sümer (2023)'ün çalışmasında gerekse bu çalışmanın devamı niteliğindeki bu tez çalışması kapsamında test edilen tüm elemanlar CFRP malzemesi nihai dayanımına ulaşmadan eleman yüzeyinden sıyrıldığından dolayı kullanılan karbon plakasının genişliği vasıtasıyla sağlanan kapasite artışının yapışma yüzeyinin genişlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

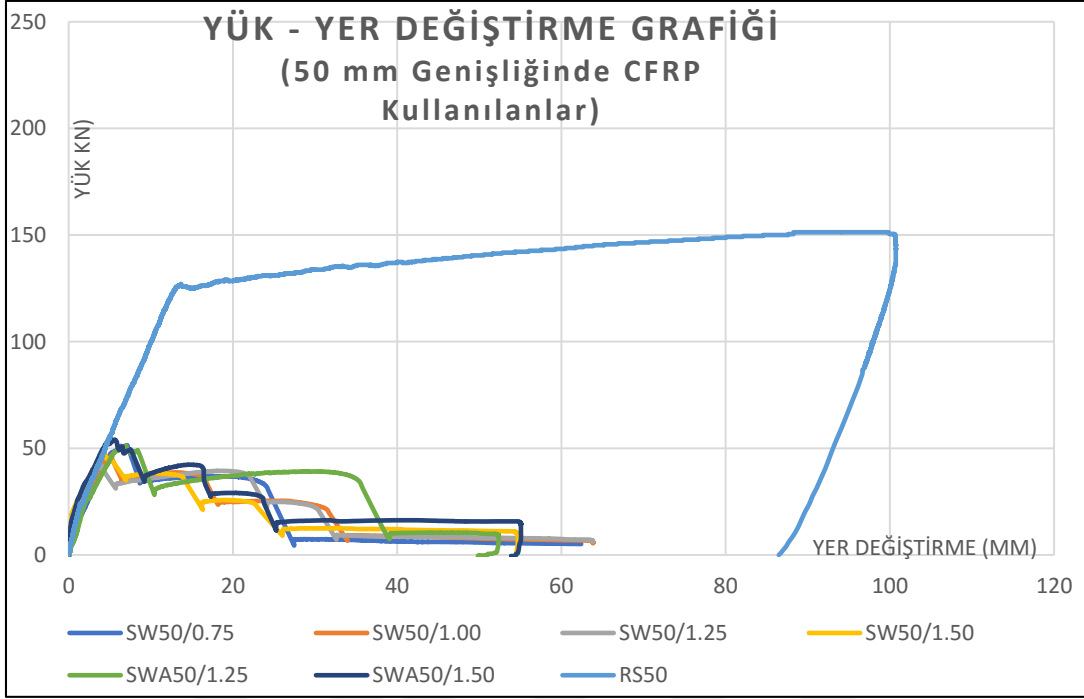


Şekil 5.7. Karbon plaka genişliğinin yük kapasitesine olan etkisi

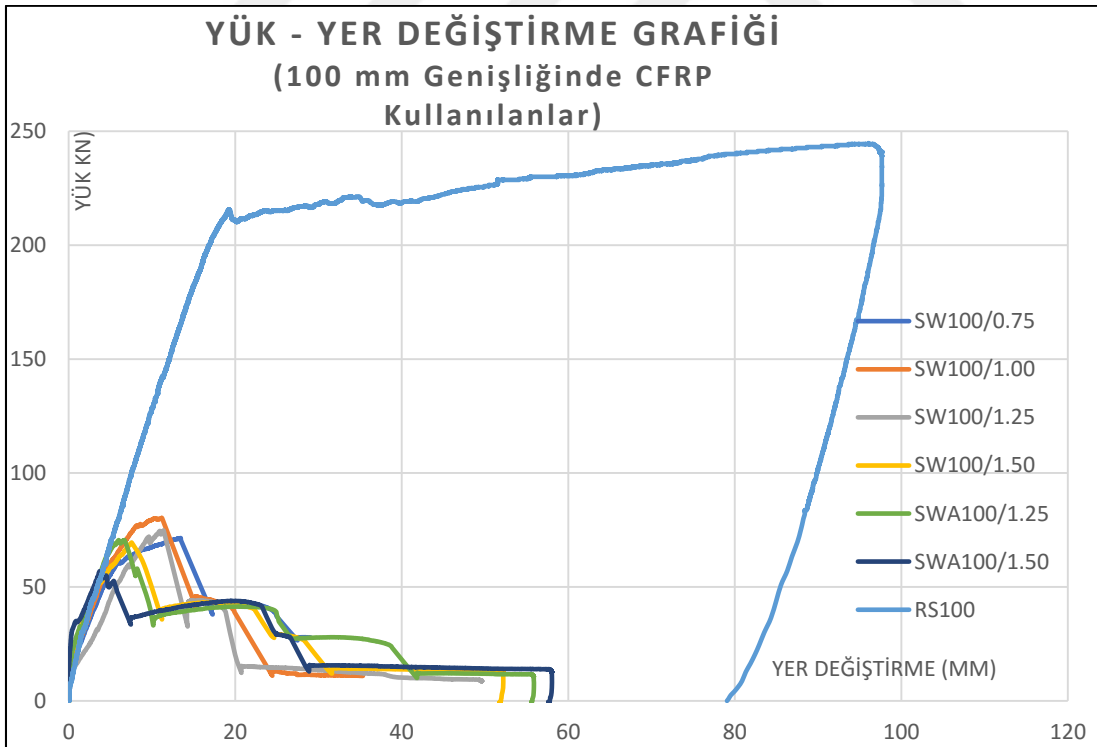
5.5. Güçlendirilmiş Elemanların ile Referans Elemanların Karşılaştırılması

Ø16 donatı kullanılan deney elemanları ve bunların referansları 1. Grup başlığı altında Şekil 5.8'de; Ø22 donatı kullanılan deney elemanları ve bunların referansları ise 2. Grup başlığı altında Şekil 5.9'da irdelenmiştir.

Aşağıdaki grafikler incelendiğinde donatı ve karbon plaka kalınlığı ayırt etmeksizin CFRP ile güçlendirme yapılan kirişlerin tamamında enerji dönüştürme kapasitesinin referans elemanlarla kıyaslanamayacak derecede düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8. Farklı bindirme boylarına sahip 50 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla karşılaştırılması



Şekil 5.9. Farklı bindirme boylarına sahip 100 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla karşılaştırılması

5.6. Temel Ölçütlere Göre Değerlendirmeler

5.6.1. Dayanım

Deney elemanlarının dayanımları değerlendirilirken deneyler sırasında kaydedilen yük – deplasman grafiklerinden yararlanılmıştır. Aşağıda yer alan Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de her bir deney elemanının maksimum dayanım değeri ile referans elemanın yüzde kaçına dayanıma ulaştığını gösterir dayanım oranları yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Farklı bindirme boylarına sahip 50 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla dayanım açısından karşılaştırılması

Deney Elemanı	Türü	Maksimum Dayanım (kN)	Referans Elemana Göre Dayanım(%)
RS50	Referans	151,30	% 100
SW50/0,75	Güçlendirme	51,44	% 34,00
SW50/1,00	Güçlendirme	46,75	% 30,90
SW50/1,25	Güçlendirme	41,69	% 27,55
SW50/1,50	Güçlendirme	47,05	% 31,10
SWA50/1,25	Güçlendirme	51,37	% 33,95
SWA50/1,50	Güçlendirme	54,05	% 35,72

Çizelge 5.2. Farklı bindirme boylarına sahip 100 mm genişliğindeki CFRP ile güçlendirilmiş elemanların referans elemanlarla dayanım açısından karşılaştırılması

Deney Elemanı	Türü	Maksimum Dayanım (kN)	Referans Elemana Göre Dayanım(%)
RS100	Referans	244,78	% 100
SW100/0,75	Güçlendirme	71,43	% 29,18
SW100/1,00	Güçlendirme	80,27	% 32,79
SW100/1,25	Güçlendirme	74,82	% 30,57
SW100/1,50	Güçlendirme	69,49	% 28,39
SWA100/1,25	Güçlendirme	70,57	% 28,83
SWA100/1,50	Güçlendirme	56,91	% 23,25

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 incelendiğinde güçlendirme elemanlarının dayanımlarının referans elemanların dayanımlarına oranla en az 3 kat düşük olduğu görülmektedir. Karbon fiber plakanın nihai dayanımına ulaşmadan sıyrılması bu duruma sebebiyet vermiştir. Deney elemanlarının ulaştığı olduğu 41,69 ila 80,27 kN arasındaki yük taşıma kapasitesi ise karbon fiber plakanın yüzeyden sıyrılınca değin taşımış olduğu yükten ileri gelmektedir. Deney elemanlarının tamamının çekme bölgesinde bulunan 2 adet Ø8 çapındaki donatı ancak sıyrılma yaşanıp yük 40 kN mertebelerine tekrar düştükten sonra; önce akmış devamında ise kopmuştur.

Güçlendirme elemanları kendi donatı klasmanı içerisinde mukayese edildiğinde benzer dayanım özellikleri gösterdikleri, farklı karbon fiber plaka boyu tercih edilmesinin dayanımla ilişkilendirilecek bir katkı sağlamadığı görülmüştür.

Bütün güçlendirme elemanlarında klrbon fiber plakalar sıyrılarak kırılmaya ulaşıldığından; bindirme boyundan ziyade birim yapışma yüzeyinin genişlikle doğru orantılı olarak artmasından dolayı CFRP plaka boyunun dayanım artışına olumlu etkisinin olduğu görülmüştür. 100 mm genişliğinde CFRP plaka kullanılan elemanlar 54,94 kN ila 80,27 kN arasında dayanım gösterirken; 50 mm genişliğinde CFRP plaka kullanılan elemanlar 41,69 kN ila 54,05 kN arasında dayanım göstermiştir. Öte yandan güçlendirme elemanları referans elemanlarla kıyaslandığında dayanım talebi arttıkça, referans elemanlara göre elde edilen görece dayanım değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

5.6.2. Süneklik

Bir elemanın önemli bir dayanım kaybı yaşamaksızın yapabileceği deformasyon yeteneği süneklik olarak tanımlanmaktadır. Bahsi geçen dayanım kaybı ise %15 mertebelerinde kabul edilmektedir.

Süneklik oranı ise ulaşılan maksimum dayanımın %85'i kadar olan yüklemdeki deplasman değerinin, elemanın akma yükündeki yer değiştirme değerine bölünmesi sonucu elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin ele alındığında tüm güçlendirme elemanları gevrek davranış göstermiş olup sadece güçlendirme yapılmamış olan referans elemanlar sünek davranış sergilemiştir. Deney elemanlarının süneklik oranlarına aşağıda Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te yer verilmiştir.

Çizelge 5.3. 50 mm genişliğinde CFRP plaka kullanılan deney elemanlarının süneklik oranları

Deney Elemanı	Nihai Dayanım (kN)	Nihai Dayanım Değerindeki Deformasyon (mm)	Akma Dayanımı (kN)	Akma Deformasyonu δ_y (mm)	Nihai Dayanımın %15 Kaybedildiği Dayanım Değerindeki Deformasyon δ_u (mm)	Nihai Dayanımın %15 Kaybedildiği Dayanım Değerindeki Deformasyon δ_u (mm)	Süneklik Oranı δ_u/δ_y (mm/mm)
RS50	151,30	99,82	126,20	13,41	128,60	100,27	> 7,48
SW50 /0,75	51,44	7,14	-	-	-	-	0,53
SW50 /1,00	46,75	5,25	-	-	-	-	0,39
SW50 /1,25	41,69	4,09	-	-	-	-	0,31
SW50 /1,50	47,05	4,32	-	-	-	-	0,32
SWA50 /1,25	51,37	6,97	-	-	-	-	0,52
SWA50 /1,50	54,05	5,60	-	-	-	-	0,42

Çizelge 5.4. 100 mm genişliğinde CFRP plaka kullanılan deney elemanlarının süneklik oranları

Deney Elemanı	Nihai Dayanım (kN)	Nihai Dayanım Değerindeki Deformasyon (mm)	Akma Dayanımı (kN)	Akma Deformasyonu δ_y (mm)	Nihai Dayanımın %15 Kaybedildiği Dayanım	Nihai Dayanımın %15 Kaybedildiği Deformasyon δ_u (mm)	Süneklik Oranı δ_u/δ_y (mm/mm)
RS100	244,78	96,06	215,50	19,17	208,07	97,14	> 5,07
SW100 /0,75	71,43	13,46	-	-	-	-	0,70
SW100 /1,00	80,27	11,21	-	-	-	-	0,59
SW100 /1,25	74,82	11,39	-	-	-	-	0,59
SW100 /1,50	69,49	7,57	-	-	-	-	0,39
SWA100 /1,25	70,57	6,70	-	-	-	-	0,35
SWA100 /1,50	56,91	4,51	-	-	-	-	0,24

Süneklik oranlarındaki “>” işareti, yük hücresinin uzama kapasitesinin aşılması nedeniyle deneye devam edilememesinden dolayı elemanın gerçek süneklik değerinin hesaplanamamasından ve aslında gerçekte daha büyük bir süneklik oranına ulaşacağından dolayı kullanılmıştır. Öte yandan güçlendirme elemanları sünek davranış sergilememiş ve akma dayanımına erişememiştir. Bu nedenle güçlendirme elemanların süneklik değerleri kendi nihai dayanımlarının referans elemanların akma anındaki deformasyonuna bölünmesi suretiyle hesaplanmıştır.

5.6.3. Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri değerlendirilirken deneyler sırasında kaydedilen yük – deplasman grafiklerinden yararlanılmıştır. Referans elemanlarının rijitlikleri akma anındaki dayanımlarının akma anındaki deformasyona bölünmesi ile hesaplanmıştır. Referans elemanların rijitlik değerlerine Çizelge 5.5’de yer verilmiştir. Güvenlik ve montaj kolaylığı açısından bırakılan 2 adet Ø8 donatının güçlendirme elemanları sıyrılıp yükte ani boşalma yaşandıktan sonra akması haricinde; takip edilen esas eleman davranışını belirleyen süreçte belirgin bir akma durumu gözlemlenmediğinden güçlendirme elemanları için rijitlik hesaplaması; başlangıç rijitlikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Başlangıç rijitliği güçlendirme elemanlarının ulaştıkları maksimum yüklemenin %85’inin bu değere karşılık gelen deformasyon değerine bölünmesi suretiyle hesaplanarak Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de sunulmuştur.

Çizelge 5.5. Referans deney elemanlarının rijitlik oranları

Deney Elemanı	Türü	Akma Dayanımı (kN)	Akma Deformasyonu δ_y (mm)	Rijitlik (kN/mm)
RS50	Referans	126,20	13,41	9,41
RS100	Referans	215,50	19,17	11,24

Çizelge 5.6. 50 mm genişliğinde karbon plaka kullanılan güçlendirme elemanlarının başlangıç rijitlikleri

Deney Elemanı	Türü	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)
SW50 /0,75	Güçlendirme	9,54
SW50 /1,00	Güçlendirme	10,85
SW50 /1,25	Güçlendirme	13,99
SW50 /1,50	Güçlendirme	13,48
SWA50 /1,25	Güçlendirme	8,92
SWA50 /1,50	Güçlendirme	12,48

Çizelge 5.7. 100 mm genişliğinde karbon plaka kullanılan güçlendirme elemanlarının başlangıç rijitlikleri

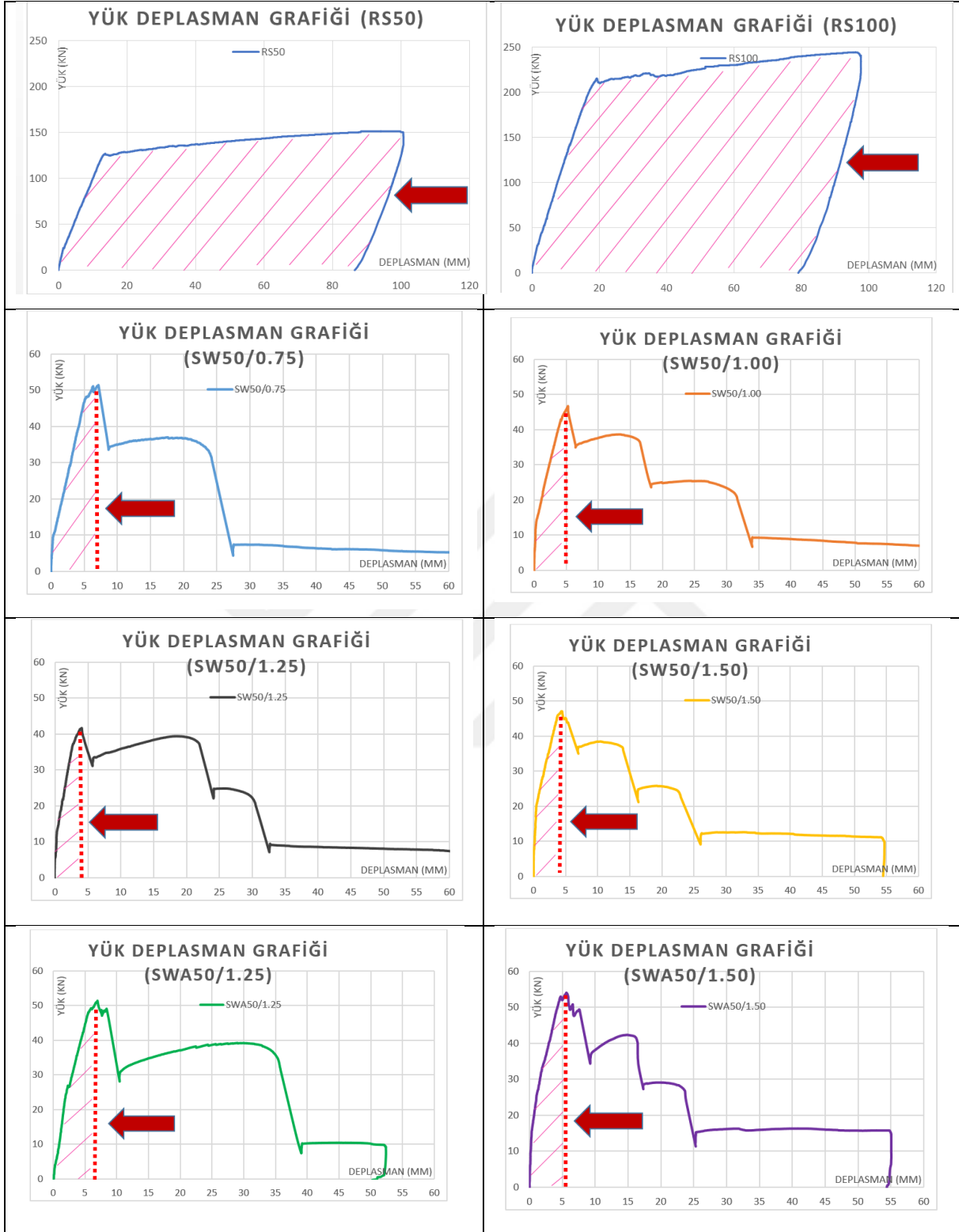
Deney Elemanı	Türü	Rijitlik Değeri
SW100 /0,75	Güçlendirme	10,81
SW100 /1,00	Güçlendirme	10,60
SW100 /1,25	Güçlendirme	7,82
SW100 /1,50	Güçlendirme	11,33
SWA100 /1,25	Güçlendirme	14,38
SWA100 /1,50	Güçlendirme	17,77

5.6.4. Enerji dönüştürme kapasitesi

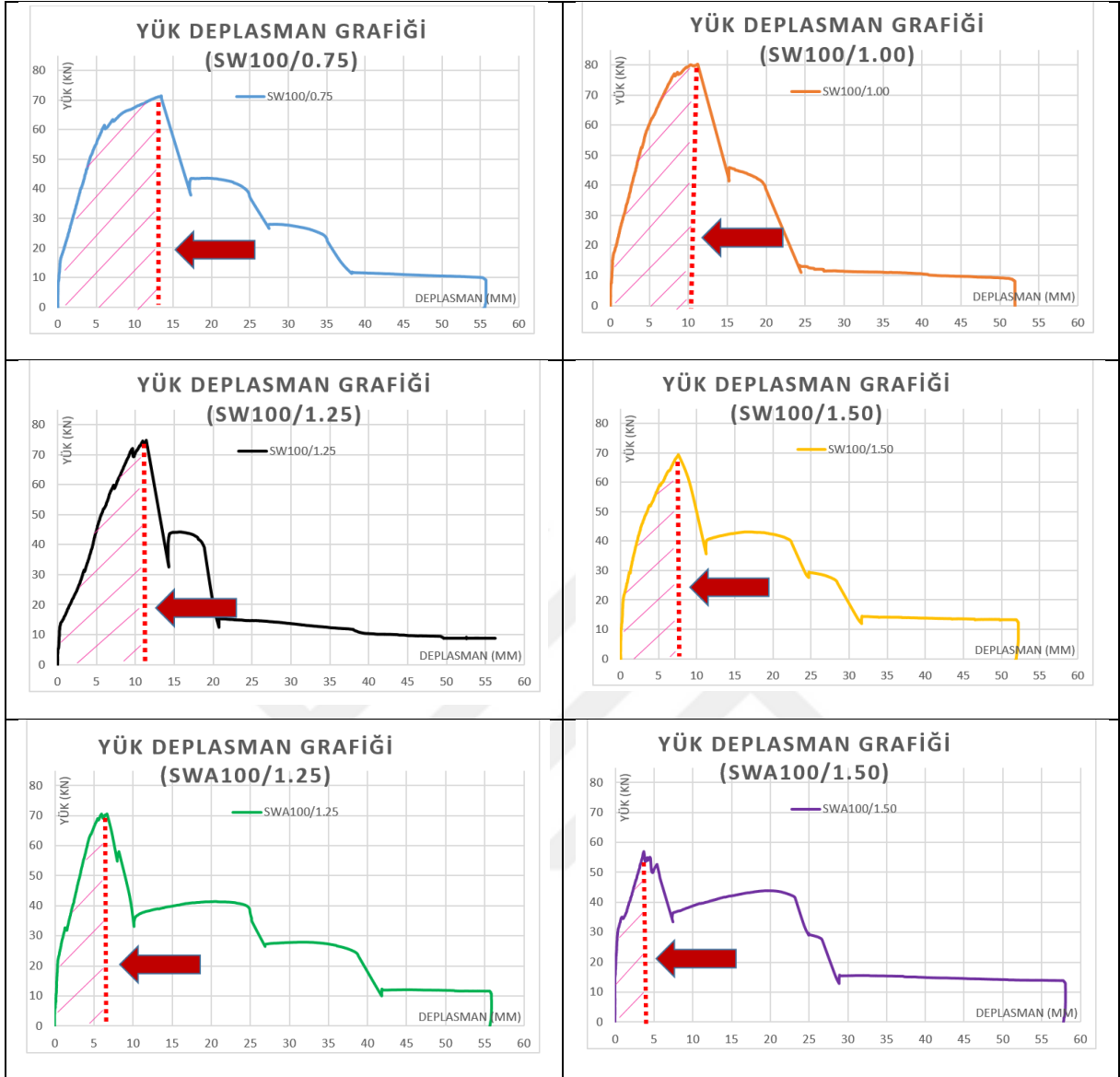
Bir cismin konumunu değiştirene değin dönüştürdüğü enerjiye “enerji tüketme” , “enerji yutma” veya enerji dönüştürme” kapasitesi denilmektedir. Fiziğin temel yasalarından enerjinin korunumu yasası nedeniyle bu kavramın “enerji dönüştürme kapasitesi” olarak ele alınması daha uygun olacaktır.

Enerji dönüştürme kapasitesi; yük deplasman grafiğinin altında kalan alan ile hesaplanmaktadır. Yani yük deplasman grafiğinin integrali enerji dönüştürme kapasitesini verecektir.

Güçlendirme elemanlarının enerji dönüştürme kapasiteleri karbon fiber plaka (CFRP) sınırlıncaya kadar elemanın yapmış olduğu deplasmana denk gelen grafik alanı üzerinden hesaplanmıştır. Deney elemanlarının enerji dönüştürme kapasitesinin hesaplanması için kullanılan yük yer değiştirme grafikleri; enerji dönüştürme hesabının yapılmış olduğu sınırlama noktaları her bir grafik üzerinde işaretlenerek aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5.10. Deney elemanlarının enerji dönüştürme grafikleri ve hesaplanması

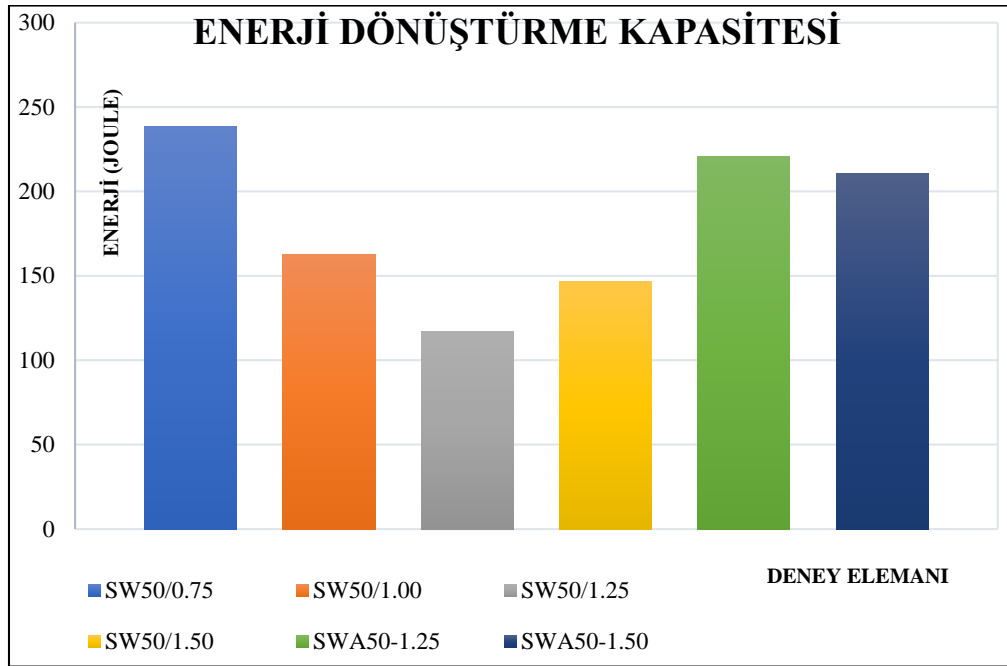


Şekil 5.10. (devam). Deney elemanlarının enerji dönüştürme grafikleri ve hesaplanması

Aşağıda yer alan Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’da her bir deney elemanının dönüştürdüğü toplam enerji değeri ve görel enerji dönüştürme kapasiteleri sunulmuştur.

Çizelge 5.8. 50 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri ve referans elemana göre göreceli enerji yüzdeleri

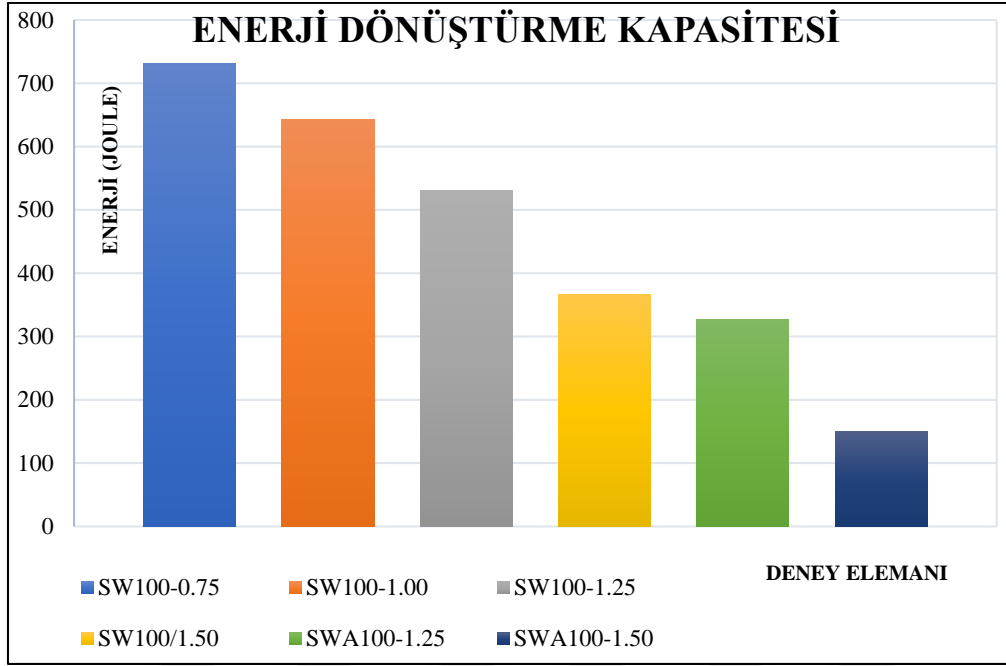
Deney Elemanı	Türü	Dönüştürülen Toplam Enerji (Joule)	Referans Elemana Göre Güçlendirme Elemanlarının Göreceli Enerji Dönüştürme Kapasiteleri (%)
RS50	Referans	11 411,00	% 100
SW50-0,75	Güçlendirme	239,00	% 2,09
SW50-1,00	Güçlendirme	163,00	% 1,43
SW50-1,25	Güçlendirme	117,00	% 1,03
SW50-1,50	Güçlendirme	147,00	% 1,29
SWA50-1,25	Güçlendirme	221,00	% 1,94
SWA50-1,50	Güçlendirme	210,90	% 1,85



Şekil 5.11. 50 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri grafiği

Çizelge 5.9. 100 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri ve referans elemana göre göreceli enerji yüzdeleri

Deney Elemanı	Türü	Dönüştürülen Toplam Enerji (Joule)	Referans Elemana Göre Güçlendirme Elemanlarının Göreceli Enerji Dönüştürme Kapasiteleri (%)
RS100	Referans	16 138,00	% 100
SW100-0,75	Güçlendirme	731,00	% 4,53
SW100-1,00	Güçlendirme	644,00	% 3,99
SW100-1,25	Güçlendirme	531,00	% 3,29
SW100-1,50	Güçlendirme	367,00	% 2,27
SWA100-1,25	Güçlendirme	327,00	% 2,03
SWA100-1,50	Güçlendirme	151,00	% 0,94



Şekil 5.12. 100 mm plaka kullanılan kirişlerin dönüştürdüğü toplam enerji kapasiteleri grafiği

Her iki grafik ve çizelge incelendiğinde güçlendirme elemanlarındaki dönüştürülen toplam enerji miktarının referans elemanlara göre son derece düşük olduğu görülecektir. Zira güçlendirme elemanları sıyrılmaya nedeniyle gevrek davranış sergilemiş ve referans elemanın yük kapasite değerlerine ulaşamamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İki tanesi referans eleman olmak üzere toplam on dört adet deney elemanı üzerinde yapılan üç noktalı eğilme testleri neticesinde elde edilen sonuçlar ve önerilere bu bölümde yer verilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, güçlendirme işlemlerinde sıklıkla kullanılan karbon fiber (CFRP) plakalar ve bunların sıyırılmasını önlemek için teşkil edilen karbon elyaf sargı elemanları yardımıyla; betonarme kirişlerin içerisindeki donatıların CFRP plakalarla birbirine kenetlenmesi ve plakadan donatıya yük aktarımının sağlanıp sağlanamayacağının değerlendirmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler bir malzeme testi olmayıp; uygulamada kullanılan yöntemlerin test edilmesi ve geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca gerçekleştirilen çalışmalar ile her ne kadar karbon lamalarla boyuna donatıların bindirmeli ekinin başarısının test edilmesi hedeflendiyse de; özellikle bindirme boyunun fazla olduğu elemanlarda (temel kenetlenme boyunun 1,25 katı ve 1,50 katı) CFRP malzeme kiriş alt yüzü boyunca devam ettiği için, bu elemanlar güçlendirme elemanı olarak düşünülebilir. Bu nedenle bu çalışmanın avantajlı bir yan ürünü olarak ele alınabilecek olan bu elemanlar; aynı zamanda deneylerde kullanılan yöntemle yapılmış bir güçlendirme çalışmasının başarısını da test etmektedir.

Tüm deney elemanlarında karbon fiber plaka çekme dayanımına erişmeden plakalar yüzeyden sıyrılmıştır. Bu durum güçlendirme malzemesi olarak kullanılan ve yüksek mukavemet özellikleri ile bilinen karbon fiber plakaların kendi çekme mukavemetlerinden ziyade tasarımda plakanın yüzeye yapıştırılmasını sağlayan epoksi malzemenin de özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini ve plaka ile epoksiden oluşacak kompozit malzeme özellikleri ile tasarıma devam edilmesi gerektiğini doğrulamaktadır.

Karbon fiber plakaların sıyırılmasının önlenmesi amacıyla kullanılan U şeklindeki karbon fiber kumaş şeritlerin ve fan tipi ankrajların plakanın eleman yüzeyinden sıyırılmasını önlemede kayda değer bir fayda sağlamadığı yaşanan sıyırılma ile birlikte gevrek kırılma yaşandığı görülmüştür.

Karbon fiber plakalar yüzeyden sıyrılmaya değin çatlakları büyük oranda engellemekte ancak sıyrılmaya ile birlikte yük taşıma kapasitesi aniden düşmekte ve kiriş üzerindeki çatlak boyutu bir anda artmaktadır. Yaşanan bu ani kırılmalar yöntemin güvenilirliği hususunda ciddi kaygılara yol açmaktadır.

Öte yandan genellikle şantiyelerde veya projelendirme aşamasında güvenli tarafta kalmak ve sıyrılmayı geciktirmek adına uygulanan daha büyük boyda CFRP plaka kullanımı ise artırılan boya paralel olarak olası yapışma yüzey kusurları ve tesviye farkları arttığından sıyrılmayı tetiklediği için karbon fiber plaka performansını olumsuz etkileyebilecek bir diğer husustur. Zira gerçekleştirilen deneyler neticesinde CFRP plaka boyu ile dayanım parametresi arasında tutarlılık bulunmadığı, CFRP plaka boyu artırıldıkça dayanımın düşebileceği görülmüştür.

Laboratuvar ortamında ve azami dikkatle gerçekleştirilen bir uygulamada dahi deney elemanlarından SW50/1,25 ve SW100/1,50 deney elemanlarının aynı plaka genişliğinde imal edilen kendi deney grubu dayanım ortalamasının yaklaşık %5 altında kalabildiği görülmüştür. Bu durum sıyrılmaya davranışındaki problemler giderilmeden malzemenin kullanılması noktasında tereddüte yol açan diğer bir husustur.

Karbon fiber plakaların yapışma yüzeyinden sıyrılmasının önlenmesi durumunda; yük taşıma kapasitesi ve deformasyonların sınırlandırılması noktasında taşıyıcı eleman davranışının iyileştirilebileceği değerlendirilmiştir. Ancak malzeme ve işçilik konularında hata toleransının düşük olması ve bu hataların performansı önemli ölçüde etkilediği de göz önünde bulundurulacak olursa; sıyrılmaya önlenirse dahi ciddi bir denetim / kontrol protokolü ve yüksek güvenlik katsayıları ile çalışılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Acar, D. (2014). *Çelik Levha ve Karbon Kumaşlarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Al-Fakih, A., Hashim, M. H. M., Alyousef, R., Mutafi, A., Sabah, S. H. A., and Tafsirojjaman, T. (2021). Cracking behavior of sea sand RC beam bonded externally with CFRP plate. *Structures*, 33, 1578-1589.
- Ali, A., Abdalla, J., Hawileh, R., and Galal, K. (2014). CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure. *Physics Procedia*, 55, 10-16.
- Al-Khafaji, A., Salim, H., and El-Sisi, A. (2021). Behavior of RC beams strengthened with CFRP sheets under sustained loads. *Structures*, 33, 4690-4700.
- Al-Shamayleh, R., Al-Saoud, H., Abdel-Jaber, M., and 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.
- Assad, M., Hawileh, R. A., Karaki, G. and Abdalla, J. A. (2024). *The structural behavior of recycled aggregate concrete walls under fire exposure: a finite element analysis*. International Structural Engineering And Construction Conference, 11(2).
- Balamuralikrishnan, R., and 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.
- Deng, J., Rashid, K., Li, X., Xie, Y., and 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.
- Dong, J., Wang, Q., and 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.
- El-Sayed, A. K., Al-Zaid, R. A., Al-Negheimish, A. I., Shuraim, A. B., and 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.
- Elwan, S. K., Elsayed, T. A., Refaat, W., and 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.
- 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.

- 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.
- Fayyadh, M. M., and 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.
- Garcia, R., Helal, Y., Pilakoutas, K., and Guadagnini, M. (2014). Bond behaviour of substandard splices in RC beams externally confined with CFRP. *Construction and Building Materials*, 50, 340-351.
- Grace, N. F., Sayed, G.A., Soliman, A. K., and Saleh, K. R. (1999). Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates. *ACI Structural Journal*, 188(8), 865-875.
- Hamad, B. S., Rteil, A. A., Salwan, B. R., and Soudki, K. A. (2004). Behavior of bondcritical regions wrapped with fiber-reinforced polymer sheets in normal and highstrength concrete. *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 248-257.
- Hamad, B. S., Soudki, K. A., Harajli, M. H., and 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.
- 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.
- Hashemi, S. H., Rahgozar, R., and 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.
- Huang, Z., Deng, W., Li, R., Chen, J., Sui, L., Zhou, Y., Zhao, D., Yang, L., and Ye, J. (2022). Multi-impact performance of prestressed CFRP-strengthened RC beams using h-typed end anchors. *Marine Structures*, 85, 103264.
- Jian-He, X., Yong-Chang, G., Yi-Feng, L., and Gong-Fa, C. (2014). Experimental study on flexural behaviour of pre-damaged reinforced concrete beams strengthened with CFRP. *Materiale Plastice*, 51(4), 370-375.
- Köksal, H.O., Altınoy, 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.
- Kurtipek, Y. F. (2007). *Beton ile CFRP Şeritler Arasındaki Kayma Gerilmesi Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Lu, J., Zhang, Y., Duan, L., Huo, Y., and Liu, H. (2022). Dynamic behavior of CFRP strengthened RC beams based on digital image correlation technology. *Engineering Fracture Mechanics*, 271, 108597.
- Makhlouf, 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.
- Mashrei, M. A., Makki, J. S., and Sultan, A. A. (2019). Flexural strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets with grooves. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(4), 1–13.
- Mousavi, S. R., Sohrabi, M. R., Moodi, Y., and 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.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1997). Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903-911.
- Rashid, K., Li, X., Deng, J., Xie, Y., Wang, Y., and 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.
- Shihata, A. (2011). *CFRP Strengthening of RC Beams with Corroded Lap Spliced Steel Bars*. MSc Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Sümer, O. (2023). *BA Elemanlarda Karbon Lamalarla Boyuna Donatların Bindirmeli Eki*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tarigan, J., Patra, F.M., and 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 Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126(1), 012025.
- Toutanji, H., Zhao, L., and Zhang, Y. (2006). Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Engineering Structures*, 28, 557-566.
- TS500 (2000). *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Ankara:Türk Standartları Enstitüsü.
- Yang, J., Johansson, M., Al-Emrani, M., and Haghani, R. (2021). Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 243, 112687.
- Yu, F., Zhou, H., Jiang, N., Fang, Y., Song, J., Feng, C., and Guan, Y. (2020). Flexural experiment and capacity investigation of CFRP repaired RC beams under heavy pre-damaged level. *Construction and Building Materials*, 230, 117030.





Gazili olmak ayrıcalıktır