



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LİFLİ POLİMER LEVHALARIN BETONA BAĞLANMASINDA
FAN TİPİ ANKRAJLARIN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa YAŞA

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222303721 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Mustafa YAŞA tarafından hazırlanan “**LİFLİ POLİMER LEVHALARIN BETONA BAĞLANMASINDA FAN TİPİ ANKRAJLARIN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ

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

Üye: Prof. Dr. Ali URAL

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ

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

Üye: Prof. Dr. Özgür ANIL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

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

Tez Savunma Tarihi: 26/06/2024

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

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HİNİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Mustafa YAŞA

TEŞEKKÜR

Deneylerin yapılmasında büyük emek veren, tezimin hazırlanmasında büyük katkılar sunan, çalışmalarımızı yönlendiren, bilgi, tecrübe ve zamanını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam ve tez danışmanın Prof. Dr. Mehmet Emin KARA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa YAŞA
AKSARAY, 2024



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesinde Kullanılan Teknikler ..	3
1.2. Lifli Polimerlerin Depreme Karşı Güçlendirme Çalışmalarında Kullanılması	4
1.3. Lifli Polimerler Çeşitleri ve Çalışmasını Etkileyen Faktörler.....	4
1.4. Lifli Polimerler ile Güçlendirilmiş Kirişlerde Göçme Modları.....	5
1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	7
2. KAYNAK ÖZETLERİ	14
3. DENEY ELEMANLARI ve YÖNTEM	21
3.1. Genel	21
3.2. Deney Elemanları ve Deneysel Değişkenler	24
3.3. Malzemeler	27
3.3.1. Beton ve Donatı	27
3.3.2. LP levha ve Epoksi	28
3.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi	29
3.5. Yapıştırma Prosedürü	30
3.6. Deney ve Ölçüm Düzeni	31
3.7. Birim Deformasyon Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu.....	34
4. DENEYLER	37
4.1. Deney Elemanı-1	37
4.2. Deney Elemanı-2	40
4.3. Deney Elemanı-3	43
4.4. Deney Elemanı-4	46
4.5. Deney Elemanı-5	49
4.6. Deney Elemanı-6	52
4.7. Deney Elemanı-7	55
4.8. Deney Elemanı-8	58
5. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	61
5.1. Dayanım ve Davranış	67
5.2. CFRP Levhalarındaki Gerilme Dağılımı.....	70
5.3. Deney Elemanlarının Kapasitesinin Analitik Olarak Hesaplaması.....	71
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ.....	82

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİFLİ POLİMER LEVHALARIN BETONA BAĞLANMASINDA FAN TİPİ ANKRAJLARIN ARAŞTIRILMASI

Mustafa YAŞA

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

ÖZET

Betonarme yapılarda CFRP şeritler, onarım/güçlendirme veya kapasite artırımı gibi sebeplerden dolayı sıkça kullanılmaktadır. CFRP levhaların uç bölgelerinde keskin dönüşler olmaktadır. Yapılan çalışmalarda levha ucundaki kullanılan ankrajın başarısının uygulamanın başarısı anlamına geldiği belirtilmiştir. Bu çalışmalarda betonu 10 MPa basınç dayanımında olan, betonarme kiriş elemanlarının çekme bölgesine CFRP levha yapıştırılmış ve uç bölgesinde fan ankraj uygulaması araştırılmıştır. Çalışmanın değişkenleri; levha genişliği, fan ankraj adedi ve levha ucunda ilave bir katmanın kullanılmasıdır. Deneysel çalışmada 100 mm genişliğinde CFRP levhanın ucunda bir veya iki ankraj olması, iki ankraj ve ilave katman olması ve üç ankraj ve ilave katman olması araştırılmıştır. İlave olarak 60 ve 80 mm genişliğindeki levhalara üç ankraj ve ilave katman yapılmıştır.

Üç ankraj yapılan deney elemanlarında levhalar adeta bir gergi çubuğu gibi çalışmış ve betondan tamamen ayrılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada 80 mm genişliğinde levhanın ucunda üç adet fan ankraj ve ilave katman olan deney elemanı en başarılı olmuştur. Deney elemanında CFRP levha, kapasitesinin %60'ı oranında yük taşımıştır. Levha genişliği 100 mm olan elemana göre levha genişliği %20 azalmasına rağmen dayanım değişmemiş, levha üzerindeki gerilme artmıştır. Ayrıca levha genişliğinin 60 mm yapılarak daha da azaldığı deney elemanı ise aynı dayanımı sergilemiştir. Ancak göçme şekli istenen formda gerçekleşmemiş, üç ankrajdan sadece biri göçmüştür. Deneylerde 50 mm aralıkla 10 MPa gibi düşük dayanımlı betonda kullanılan 150 mm çapında fan ankrajlarda betondan kaynaklanan göçme gerçekleşmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Lifli Polimer, CRFP, Ankraj, Betonarme, Onarım, Güçlendirme.

Haziran, 2024; 82 sayfa

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF FAN TYPE ANCHORS FOR BONDING FIBROUS POLYMER SHEETS TO CONCRETE

Mustafa YAŞA

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

ABSTRACT

CFRP strips are widely used for repair/strengthening or capacity increase purposes nowadays. Sharp bending at the ends of the CFRP strips is frequently encountered at these applications. In this study, Reinforced Concrete (RC) beam specimens that were produced with 10 MPa compression strength concrete were strengthened by using bonded CFRP strips with end anchorages to tension region. The parameters that were investigated with this study are the width of the strip, the number of applied fan anchorages and whether additional layer of CFRP patch is used or not at the strip ends. Specimens were strengthened with 100 mm wide CFRP strips with one or two anchorages at the ends. In addition CFRP patch with two and three anchorages at the ends were tested for investigating the effect of the patches. Specimens that were strengthened with three anchorages at the ends with patches were repeated with 60 and 80 mm wide CFRP strips.

In the experimental elements with three anchors, the plates worked like a tension rod and were completely separated from the concrete. In the experimental study, the experimental element with three fan anchors and an additional layer at the end of the 80 mm wide plate was the most successful. In the test element, the CFRP sheet carried a load of 60% of its capacity. Although the plate width was reduced by 20% compared to the element with a plate width of 100 mm, the strength did not change, but the stress on the plate increased. In addition, the experimental element, in which the plate width was further reduced by making the plate width 60 mm, exhibited the same strength. However, the collapse did not occur in the desired form and only one of the three anchors collapsed. In the experiments, the 150 mm diameter fan anchors used at 50 mm intervals in concrete with a strength as low as 10 MPa did not collapse due to concrete.

Keywords: Fibrous Polymer, CRFP, Anchoring, Reinforced Concrete, Repair, Strengthening.

June, 2024; 82 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kiriş basınç kırılması.....	5
Şekil 1.2. Kiriş kesme kırılması.....	6
Şekil 1.3. Kabuk betonunun ayrılması.....	6
Şekil 1.4. FRP şeritlerin ayrışması.....	7
Şekil 1.5. LP şeritlerin kopması.....	7
Şekil 1.6. CFRP şeritlerin BA kirişlerde uygulaması ve detayı (Altın ve diğ.).....	9
Şekil 1.7. CFRP şeritlerin sistem düzeyinde uygulanması ve detayı.....	10
Şekil 3.1. Kiriş deney elemanı geometrisi.....	22
Şekil 3.2. Kiriş deney elemanı.....	22
Şekil 3.3. Kiriş deney elemanı donatı planı.....	23
Şekil 3.4. Lifli polimer levha deney değişkenleri.....	24
Şekil 3.5. Deney elemanlarında CFRP şeritlerin ve CFRP ankrajların düzenlenmesi.....	26
Şekil 3.6. Deney elemanı donatısı.....	29
Şekil 3.7. Deney elemanlarının üretilmesi.....	30
Şekil 3.8. Yapıştırma prosedürü (A) deneylerde kullanılan CRFP ankraj, (B) deney elemanı 7 için yapıştırılmaya hazırlanmış CRFP şerit, ilave katman ve ankraj, (C) deney elemanı 4 ankraj yapımı sırasında, (D) CRFP Uygulaması tamamlanmak üzere.....	31
Şekil 3.9. Deney ve ölçüm düzeni.....	32
Şekil 3.10. Deney ve ölçüm düzeni.....	33
Şekil 3.11. Birim deformasyon kalibrasyonu için yapılan deney düzeneği.....	34
Şekil 3.12. Deney düzeneğindeki çelik plaka şeması.....	35
Şekil 3.13. (a) Çelik Levha gerilme birim şekil değiştirme grafiği, (b) Birim Deformasyon ölçer (mV) birim şekil değiştirme grafikleri	36
Şekil 4.1. Test için hazır Deney Elemanı 1.....	38
Şekil 4.2. Deney Elemanı-1 Yük-Deplasman grafiği.....	38
Şekil 4.3. Deney Elemanı-1'in test sırasında fotoğrafları.....	39
Şekil 4.4. Test için hazır Deney Elemanı-2.....	40
Şekil 4.5. Deney Elemanı-2 Yük-Deplasman grafiği.....	41
Şekil 4.6. Deney Elemanı-2 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.....	41
Şekil 4.7. Deney Elemanı-2'nin test sırasında fotoğrafları.....	42
Şekil 4.8. Test için hazır Deney Elemanı-3.....	43
Şekil 4.9. Deney Elemanı-3 Yük-Deplasman grafiği.....	44
Şekil 4.10. Deney Elemanı-3 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.....	44
Şekil 4.11. Deney Elemanı-3'ün test sırasında fotoğrafları.....	45
Şekil 4.12. Test için hazırlanan Deney Elemanı-4.....	46
Şekil 4.13. Deney Elemanı-4 Yük-Deplasman grafiği.....	47
Şekil 4.14. Deney Elemanı-4 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.....	47
Şekil 4.15. Deney Elemanı-4'ün test sırasında fotoğrafları.....	48
Şekil 4.16. Test için hazır Deney Elemanı-5.....	49
Şekil 4.17. Deney Elemanı-5 Yük-Deplasman grafiği.....	50
Şekil 4.18. Deney Elemanı-5 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.....	51
Şekil 4.19. Deney Elemanı-5'in test sırasında fotoğrafları.....	51
Şekil 4.20. Test için Hazırlanan Deney Elemanı-6.....	52
Şekil 4.21. Deney Elemanı-6 Yük-Deplasman Grafiği.....	53
Şekil 4.22. Deney Elemanı-6 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.....	53

Şekil 4.23. Deney Elemanı-6'nın test sırasında fotoğrafları.	54
Şekil 4.24. Test için hazırlanan Deney Elemanı-7.....	55
Şekil 4.25. Deney Elemanı-7 Yük-Deplasman grafiği.	56
Şekil 4.26. Deney Elemanı-7 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.	56
Şekil 4.27. Deney Elemanı-7'in test sırasında fotoğrafları.	57
Şekil 4.28. Test için hazırlanan Deney Elemanı-8.....	58
Şekil 4.29. Deney Elemanı-8 Yük-Deplasman grafiği.	59
Şekil 4.30. Deney Elemanı-8 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.	59
Şekil 4.31. Deney Elemanı-8'in test sırasında fotoğrafları.	60
Şekil 5.1. Deney elemanları test sonrası göçme fotoğrafları.	62
Şekil 5.2. Deney elemanlarına ait Yük-Deplasman grafikleri.	63
Şekil 5.3. Deneylere ait Yük-Deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.	64
Şekil 5.4. CFRP şeritlerin gerilme dağılımı.....	65
Şekil 5.5. CFRP şeritlerin gerilme dağılımı.....	66
Şekil 5.6. Deney elemanlarının göçme modları.....	67
Şekil 5.7. Sikawrap 230-C'nin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.	70
Şekil 5.8. Deney Elemanlarının analitik kapasite hesaplama yaklaşımı.....	72
Şekil 5.9. Yük-gerinim grafiklerine örnek.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deney elemanları özellikleri.....	25
Çizelge 3.2. Beton karışım oranları (1 m ³ beton için).	27
Çizelge 3.3. Donatı çeliği mekanik özellikleri.	28
Çizelge 3.4. Kullanılan LP levha ve yapıştırıcısının özellikleri.	28
Çizelge 5.1. Deneysel sonuçlar.....	61
Çizelge 5.2. Birim şekil değiştirmeler ve gerilmeler.	71
Çizelge 5.3. Analitik ve ölçülen kapasite değerlerinin karşılaştırılması.....	73



SİMGELER VE KISALTMALAR

ACI	American Concrete Institute
AFRP	Aramid elyaf takviyeli polimer (Aramid fiber reinforced polymer)
A_s	Çekme Donatısı kesit alanı
b	Betonarme Kiriş kesit genişliği
BFRP	Bazalt elyaf takviyeli polimer (Basalt fiber reinforced polymer)
c	Tarafsız eksene olan derinlik
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer (Carbon fiber reinforced polymer)
d	Çekme Donatısı merkezine kadar derinlik
E	Elastisite modülü
E_f	FRP fiber malzemenin elastisite modülü
f_c	Beton basınç gerilmesi
FRP	Fiber takviyeli polimerler (Fiber reinforced polymer)
f_s	Donatı çeliğindeki gerilme
f_{su}	Donatı kopma dayanımı
f_{sy}	Donatı akma dayanımı
GRFP	Cam elyaf takviyeli polimer (Glass fiber reinforced polymer)
h	Betonarme Kiriş kesit yüksekliği
HFRP	Hibrit fiber takviyeli polimer (hybrid fiber reinforced polymer)
LP	Lifli Polimer
LVDT	Elektronik deplasman ölçer (Lineer variable differential transformer)
mV	Milivolt
n	Fiber Takviyeli Polimer kat sayısı
St	Birim deformasyon ölçer (Strain gauge)
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
t_f	Bir FRP tabakasının kalınlığı
W_f	Lifli polimer şerit genişliği
ε	Birim şekil değiştirme
ε_c	Beton basınç birim şekil değiştirmesi
ε_{fe}	FRP'deki Birim şekil değiştirme
ε_s	Donatı çeliğinin pekleşme başlangıcındaki birim şekil değiştirmesi
ε_{su}	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi
ε_{sy}	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi
σ	Gerilme

1. GİRİŞ

Depremler, dünya tarihi boyunca ciddi yıkımlara sebep olmuş maddi kayıpların yanı sıra insanlığın sosyokültürel hayatını da olumsuz yönde etkilemiştir. Ülkemiz mevcut konumu itibarı ile “Anadolu Levhası” adı verilen yer kabuğu parçası üzerinde olması ve kuzeyinde Avrasya levhası, güneyinde Arap ve Afrika levhaları ile kesişmesinden kaynaklı aktif deprem bölgesi içindedir. Türkiye gelişmekte olan bir ülke olup kendi içerisinde farklı gelişmişlik düzeyinde bölgeler içermektedir. Her coğrafi bölgenin farklı sosyoekonomik koşullara sahip olması ülke nüfusunun dağılışı üzerinde etkili olmaktadır.

Son yıllarda Türkiye ve dünyada olan depremleri karşılaştırsak ülkemizin deprem konusunda yetersiz kaldığı görülebilir;

- 16 Mart 2022 – Fukuşima: Japonya'nın doğusunda kalan fukuşima açıklarında 7,3 büyüklüğünde meydana depremdir. 4 kişi hayatını kaybetmiş, 107 kişinin yaralandığı rapor edilmiştir [53].
- 14 Ağustos 2021 – Haiti Depremi: 7,2 şiddetinde meydana gelen depremde 2.200'den fazla can kaybı ve 13 binden fazla ev yıkıldı veya zarar gördü.
- 28 Eylül 2018 – Endonezya: 7,5 şiddetindeki deprem sonrası meydana gelen tsunami ile birlikte toplamda 4.300'den fazla kişinin ölümüne sebep olmuştur.
- 12 Kasım 2017 – İran: 7,3 şiddetinde meydana gelen depremde 400'den fazla kişinin ölümüne sebep olmuştur.
- 19 Eylül 2017 – Meksika: 7,1 şiddetindeki depremde 396 kişi yaşamını yitirmiştir.
- 16 Nisan 2016 – Ekvador: 7,8 şiddetindeki depremde en az 650 kişinin yaşamını yitirmiştir.
- 26 Ocak 2015 – Afganistan: 7,8 şiddetindeki depremde 400'den fazla kişi hayatını kaybetmiştir.
- 25 Nisan 2015 – Nepal: 7,8 şiddetindeki depremde 8 milyondan fazla kişi hayatını kaybetmiştir.
- 24 Eylül 2013 - Pakistan: 7,7 ve 7,8 şiddetindeki ikiz depremde 800 kişi can vermiştir.
- 27 Şubat 2010 Şili: 8,8 şiddetinde meydana gelen depremde 500'den fazla kişi hayatını kaybetmiştir [54].

Son yıllarda ülkemizde meydana gelen depremler ise;

- 6 Şubat 2023 Elbistan ve Pazarcık Kahramanmaraş: 7,6 ve 7,7 şiddetinde meydana gelen depremlerde 50.783 Türkiye vatandaşı ile 8.476 Suriye vatandaşı olmak üzere toplamda 59.259 kişi hayatını kaybetmiştir.
- 30 Ekim 2020 Ege Denizi açıklarında 6,9 şiddetinde meydana gelen depremde 117 Türk vatandaşı hayatını kaybetmiştir.
- 24 Ocak 2020 Sivrice Elâzığ 6,8 şiddetinde meydana gelen depremde 44 kişi hayatını kaybetmiştir.
- 23 Ekim 2011 Tabanlı Van 7,2 şiddetindeki depremde 604 kişi hayatını kaybetmiştir [55].

Depreme dayanıklı yapı tasarımına göre yapının yeterli rijitlikte olması istenir. Şili ve Japonya gibi ülkeler geçmiş depremlerden ders alarak yönetmelik ve uygulamalarda radikal kararlar almış olup bugün ise depremlerden en az hasarla kurtulabilmektedirler. Ülkemiz ise 17 Ağustos 1999 depreminden sonra kısmen de olsa yönetmelik ve standartları düzenlese de bunun yeterli olmadığı açıktır. Nitekim 17 Ağustos 1999 depreminden sonra çoğu daha yeni yapılan betonarme yapılarda beton basınç dayanımının 8-10 MPa arasında olduğu görülmüştür [1].

Ülkemizde aktif fay hatları üzerinde olduğu için yeni depremlerde beklenmektedir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü “İstanbul İli Olası Deprem Kayıp Tahminlerinin Güncellenmesi Projesi” kapsamında hazırlanan rapora göre olası 7,5 şiddetinde deprem senaryosuna göre binaların ortalama %57’sinin hasar görmeyeceği, %26’sının hafif, %13’nün orta, %3’ünün ağır ve %1’nin çok ağır hasar alacağı gerçeği ortaya çıkmaktadır [2].

Depremi oluşturduğu maddi kayıplar ülkemiz ekonomisini büyük ölçüde etkilemektedir. Şu an yapılması gereken ise; standart ve yönetmeliklerin mühendislerimiz tarafından daha iyi benimsenmesi ve en önemlisi yapının inşası sırasında işçilik, malzeme, denetimlerde kesinlikle taviz verilmemesidir. Depremde yapı güvenliği açısından risk taşıyan yapılar ise ya yıkılmalı ya da güçlendirilmesi yoluna gidilmelidir.

1.1. Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesinde Kullanılan Teknikler

Ülkemiz mevcut yapı stoğu araştırıldığında depremde hasar almış birçok yapının onarılması veya mevcut yapıların güçlendirilmesi gerekmektedir. Yapıların onarımı ve güçlendirilmesinde günümüzde birçok teknik geliştirilmiştir. Önemli olan ekonomik sınırlar içerisinde hangi yapının ne şekilde güçlendirileceği veya yıkılacağıdır. Unutulmamalıdır ki her yapının kendine has problemleri olduğundan her yapıda farklı çözümler üretmek gereklidir. Mevcut yapıda güçlendirme veya onarım yapılması için tasarlanan yöntem ve tekniklerin yapının hasar görebilirliğini minimize olacak şekilde yapılmalıdır. Hatalı yapılan tasarımlar belli bir bölgede mukavemeti artırabilirken aynı anda diğer bölgelerde zayıflamaya neden olabilir.

Onarım ve güçlendirme çalışmaları mevcut yapının hasar durumuna göre kolon, kiriş, perde gibi eleman düzeyinde veya sistem düzeyinde iyileştirilme olarak gruplandırılabilir. Sistem düzeyinde iyileştirme rijit düşey elemanlardan oluşan yeni yanal yük taşıyıcı sistem oluşturulması olarak tanımlanabilir [3].

Kolonların güçlendirilmesi çalışmalarında sargılama etkisi ile taşıma kapasitelerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Sargılama etkisi oluşturmada betonarme sargı (mantolama), çelik malzemelerle sargı ve son zamanlarda kullanımı artan lifli polimerlerle (LP) sargı kullanılmaktadır [3].

Kirişlerin güçlendirilmesinde amaç ise kirişlerin kesme dayanımlarının ve bazı durumlarda süneklik kapasitelerinin artırılmasıdır. Dıştan etriye eklenmesi, epoksi kullanarak çelik plakalar veya lifli polimerler yapıştırarak kiriş kapasitesini artırmak, mantolama yapmak gibi alternatifler geliştirilmiştir [3-4].

Sistem düzeyinde iyileştirme ise yapının yanal rijitliği yetersiz veya çok sayıda elemanın güçlendirilmesi gerekiyorsa onarımı ekonomik olmayacağından sistemdeki bazı çerçeveler çapraz profillerle desteklenebilir. Bu yöntem yapıya ek ağırlık ve mimari açıdan da sıkıntılar çıkardığından bunun yerine son yıllarda kullanımı artan lifli polimerlerle güçlendirilmesi son derece başarılı sonuçlar vermiştir [5].

Onarım ve güçlendirme çalışmalarının çoğu durumda bir kombinasyon şeklinde iyileştirme gerekebilir. Genellikle önce sistem düzeyinde iyileştirme (yanal rijitliği artırma) daha sonrasında ise bireysel elemanların iyileştirilmesi şeklindedir.

1.2. Lifli Polimerlerin Depreme Karşı Güçlendirme Çalışmalarında Kullanılması

Teknolojinin gelişmesi ile betonarme yapıların onarım ve güçlendirme çalışmalarında lifli polimerler tercih edilen malzemelerden biri olmuştur. Lifli polimerler epoksi ile yüzeyi pürüzlendirilmiş betonarme yüzeyine yapıştırılarak depreme karşı güçlendirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Lifli polimerler özellikleri:

- Betonarme ve çelik sargı ile güçlendirme yöntemlerine göre çok daha kolay ve hızlı uygulanabilmektedirler.
- Hafif malzeme oldukları için yapıya ek yük getirmemektedirler. (235 gr/m^2)
- Yapıda güçlendirme çalışmaları gerçekleştirilirken yapının tamamen boşaltılmasına gerek yoktur.
- Titreşimli yüklerden fazla etkilenmez.
- Yüksek mukavemet ve rijitliği vardır. (Lif çekme dayanımı 3500 N/mm^2 , lif çekme modülü $230\,000 \text{ N/mm}^2$) [6-7]

Lifli Polimer levhaların betonarme yapıların depreme karşı güçlendirilmesi uygulamalarında dayanıma olan katkısı araştırılmıştır. Eleman düzeyinde ve kullanılacak lifli polimer levhanın katman sayısı hakkına henüz yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.3. Lifli Polimerler Çeşitleri ve Çalışmasını Etkileyen Faktörler

Fiber Takviyeli Polimerler (Fiber Reinforced Polymer FRP) yapım yöntemi ve lif malzeme içeriğine göre çeşitlenmiştir.

- Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer CFRP)
- Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer GFRP)
- Aramid Elyaf Takviyeli Polimer (Aramid Fiber Reinforced Polymer AFRP)
- Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer (Basalt Fiber Reinforced Polymer BFRP)
- Hibrit Fiber Takviyeli Polimer (Hybrid Fiber Reinforced Polymer HFRP)

Betonarme elemanlarda düşük maliyeti, yüksek mukavemeti, göçme anındaki uzama (yüksek sehim avantajının getirdiği enerji tutma kapasitesindeki artış) sebebi ile çoğunlukla karbon fiber takviyeli polimerler tercih edilmektedir.

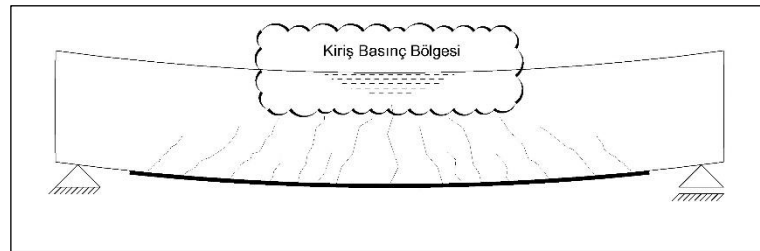
Lifli polimerlerin çalışmasını etkileyen faktörler:

- Fiber doğrultusu
- Uzunluk
- Fiberlerin şekil kompozisyonu
- Reçinelerin mekanik özellikleri
- Reçine ve fiber arasındaki aderans ve yapışma kuvveti [6]

1.4. Lifli Polimerler ile Güçlendirilmiş Kirişlerde Göçme Modları

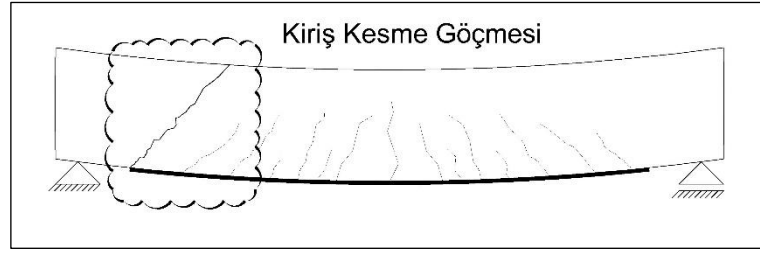
Göçme modu: Yapı Mühendisliği bağlamında kullanılan bu terim, bir yapının deprem, hareketli veya sabit yük gibi dış etkenlere maruz kaldığında şekil değiştirerek veya kırılarak kullanılamaz hale gelmesidir. Yapılan deneylerde elde edilen gözlemler neticesinde göçme modu yapının güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek için kullanılacak en önemli parametrelerdendir. Tasarımda göçme modunu dikkate almak olası hasarları minimize etmek için önemlidir. LP levha ile güçlendirilen kirişlerde genel biçimde gözlenen göçme modları aşağıdaki gibidir;

a) **Basınç kırılması veya betonun ezilmesi:** Bu göçme modunda Lifli polimer levha kopma dayanımına henüz ulaşmamıştır Şekil 1.1. Kiriş basınç kırılması. Ayrıca çekme bölgesindeki donatı çeliği de çekme dayanımına ulaşmadığı yorumu yapılabilir. Kiriş tasarımından veya beton kalitesinin düşük kalmasından dolayı bu göçme modu oluşabilir. Bu tür göçme modunu sık olarak rastlanılmaz.



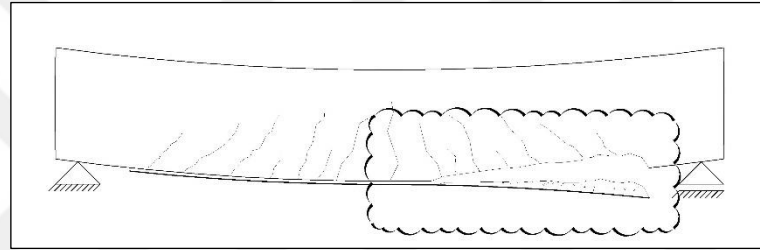
Şekil 1.1. Kiriş basınç kırılması.

b) **Kiriş Kesme kırılması:** Bu göçme modu kiriş alt yüzeyinde mesnet bölgelerine yakın yerde çatlارının görülmesiyle kendini belli edebilir Şekil 1.2. Lifli polimer levha tam kapasitesine ulaşmamıştır.



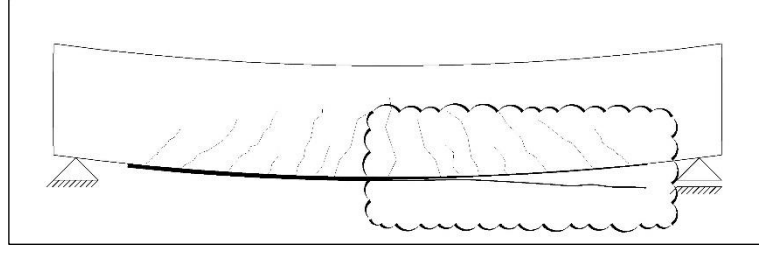
Şekil 1.2. Kiriş kesme kırılması.

c) Kabuk Betonunun Ayrılması: Bu göçme modu şerit uçlarında meydana gelen ilk çatlakların ardından beton dayanımının düşük kalmasından dolayı paspayına kadar olan beton bölgesinin Lifli polimer levha ile birlikte kirişten ayrılmasıdır Şekil 1.3. Lifli polimer levha tam kapasitesine ulaşmamıştır.



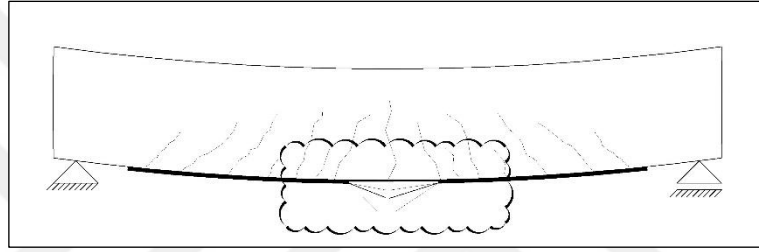
Şekil 1.3. Kabuk betonunun ayrılması.

d) Lifli Polimer Şeritlerin Ayrışması: Bu göçme türü epoksi yapıştırıcının Lifli polimer levhaya tam olarak aderans sağlamadığı durumlarda gerçekleşebilir (Şekil 1.4.). Delaminasyon göçmesi olarak da tanımlanabilir. Delaminasyon tabakalar arası mukavemetin düşük kalması sebebiyle sık karşılaşılan göçme türüdür. Epoksi ile yapıştırılması öncesi mevcut beton üzerindeki zayıf tabakanın alınarak ve yüzeyi pürüzlendirilerek yapıştırıcının yüzeyden ayrılması engellenebilir. Bir diğer durum ise epoksi yapıştırıcı mekanik özelliklerinin bölgedeki interlaminar gerilmeyi karşılayamamasından kaynaklanabilmektedir. Bu bölgelere yapılacak olan ankraj ayrışmayı geciktirecektir.



Şekil 1.4. FRP şeritlerin ayrışması.

e) Lifli Polimer Şeritlerin Kopması: Bu göçme durumu çekme bölgesindeki donatının akmasına müteakip FRP şeritlerin tam kapasitesine ulaşarak ani bir göçme şeklinde meydana gelir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. LP şeritlerin kopması.

Lifli Polimer levhanın kopması şeklindeki göçme nadir olarak gerçekleşmektedir. Levhanın kopması malzemenin aksenal çekme dayanımında kullanıldığını göstermektedir.

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı lifli polimer katman sayısının elemanın taşıma kapasitesine olan etkisi araştırılacaktır. Araştırmanın diğer bir amacı birim deformasyon ölçerler kullanılarak Lifli Polimer levha boyunca gerilme dağılımının belirlenmesi ve göçme anına karşılık gelen uzamanın üretici firmanın önerdiği uzamayla karşılaştırılmasıdır. Lifli polimerler levhaların ve yapıştırıcıların ithal ediliyor olması nedeni ile optimum şekilde kullanılması araştırılacaktır.

Yapılacak olan bu araştırmalarda katman sayısındaki değişikliğin Lifli Polimer levhaların yük taşıma kapasitesinin birim deformasyon ölçümleriyle desteklenerek belirlenmesi ve kapasiteyle ilgili yaklaşımların yapılması da amaçlanmaktadır. Elde

edilen bulguların betonarme çerçeve türü yapıların onarım ve güçlendirme uygulamalarında kullanılması hedeflenmektedir.

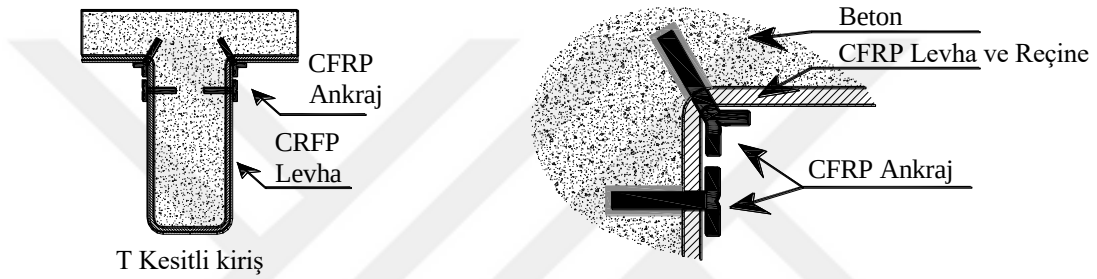
Betonarme yapılarda kullanılan onarım veya güçlendirme tekniklerinin başarısı, sisteme veya elemana ilave edilen betonarme, çelik veya Lifli Polimerlerin mevcut sisteme bağlanma başarısıyla doğru orantılıdır. Ülkemizde ise Lifli Polimer levhaların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Lifli Polimer levhaların beton dayanımı çok düşük olan sistemlerde kullanılması yönetmelikler ve yapılmış araştırmalarda sakıncalı görülmektedir. Ülkemizde güçlendirmeye ihtiyacı olan betonarme yapıların çoğunda kullanılan betonun dayanımı 20 MPa'ın altındadır. Bu nedenle Lifli Polimer levhanın projede önerilen 10 MPa (C10) beton dayanımı olan deney elemanlarında kullanılması, ileri zamanlarda yapılacak güçlendirme uygulamaları için önemli bir bilgi birikimi oluşturacaktır.

Ülkemizin büyük bir kısmının deprem bölgesi olması ve mevcut betonarme yapı stoğunda çok sık karşılaşılan kusurların olması, onarım ve güçlendirme konularını gündemde tutmaktadır. Yapı stoğunun büyük bir bölümünü oluşturan betonarme yapılarda gerek yapım kusurları gerekse yapının kullanım amacının değiştirilmesi gibi konular nedeniyle güçlendirme uygulamaları güncelliğini korumaktadır. Onarım ve güçlendirme uygulamalarında betonarme dolgu duvarlar ve çelik yaygın olarak kullanılmıştır. Son yıllarda ise Lifli Polimer levhalar dayanım ve uygulama kolaylığı gibi üstünlüklerinden dolayı kullanılmaya başlamıştır. Ancak Lifli Polimer levhaların kullanım alanlarının çok geniş olması ve üretici firmalar tarafından yeni malzemeler geliştirilmesi, bu malzemelerle ilgili çok geniş araştırma imkânları sunmaktadır.

Meydana gelen yıkıcı depremlerden sonra yerinde yapılan gözlemler neticesinde birçok araştırmacı tarafından yapılan deneysel çalışmalarda yapıda kullanılan betonarme çerçeveler içerisindeki bölme duvarların deprem sırasında önemli ölçüde yapıyı dinamik etkilere karşı yatay yük taşıma kapasitelerinin artırıldığını gözlemlenmiştir.

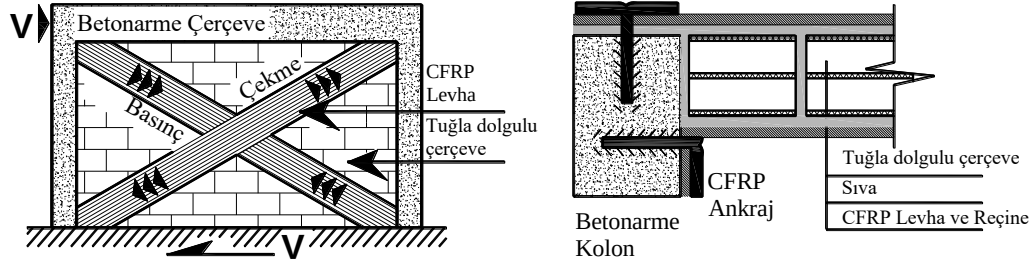
El-Ghandour (2011) CFRP şeritler ile ilgili eleman düzeyindeki çalışmalarda betonarme kirişlerin eğilme veya kesme kapasitesinin artırılması amaçlanmıştır. Betonarme kirişlerin eğilme ve kesme dayanımının amacıyla CFRP şeritler kullanılmıştır [8]. Altın vd (2010) benzer çalışmalarda CFRP şeride ankraj uygulaması

da yapılmıştır. Mevcut betonarme yapılarda kirişler tablalı olarak karşımıza çıkmaktadır. T kesitli kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi veya hasarlı kirişler onarılması çalışmalarında şeritler halindeki CFRP levhalar kirişlerin kesme açıklıklarına yapıştırılmıştır. CFRP Şeritler tablaya CFRP'den yapılmış ankrajlarla Şekil 1.6'da verildiği gibi bağlanmıştır [9]. Anıl (2010) ve Belarbi (2011) benzer çalışmalarda, levhanın tasarımından daha çok kirişin yük taşıma kapasitesindeki artış üzerine durulmuştur. Konuyla ilgili çalışmalardan elde edilen ortak sonuç levha ucunda yapılan CFRP ankrajın davranışı doğrudan etkilediğidir. Bazı çalışmalarda da CFRP şeritler tablaya metal ankrajlarla bağlanmıştır [10-11].



Şekil 1.6. CFRP şeritlerin BA kirişlerde uygulaması ve detayı (Altın ve diğ.).

CFRP şerit, çerçeve gözünde bulunan düşük dayanımlı tuğla vb. malzemeye yapıştırılmaktadır. Levha uçları ise çerçevenin kolon ve kirişlerine fan ankrajlarla bağlanmaktadır. CFRP şeritlerin tuğla dolgu çerçevelerde kullanılmasında Şekil 1.7'de detayı verilen ve Deprem Yönetmeliğinde de bulunan fan ankraj uygulaması kullanılmaktadır. Dolgunun iç yüzüne yapıştırılan CFRP şerit ile çerçevenin kolon ve kiriş elemanları arasında Şekil 1.7'de görüldüğü gibi bir seviye farkı ortaya çıkmaktadır. Sistem düzeyinde yapılan araştırmalarda da elde edilen genel sonuç uygulamanın başarısının doğrudan şerit uçlarında yapılan bağlantının başarısına bağlı olduğudur. CFRP şeritler geometrileri gereği basınç kuvveti taşımamaktadırlar (Şekil 1.7). Bu nedenle çerçeveye gelen yatay yükler karşısında tekrarlı çekme kuvveti etkisinde kalmaktadır.



Şekil 1.7. CFRP şeritlerin sistem düzeyinde uygulanması ve detayı.

Göçmenin beklendiği uç bölgenin kuvvetlendirilmesi amacıyla CFRP şeritten üretilmiş ilave bir katman kullanılması ülkemiz deprem yönetmeliğinde tavsiye edilmiştir. Araştırma projelerinde CFRP şeritlerin tuğla dolgu çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitesine olan katkısı üzerinde durulmuştur. Dayanımı çok yüksek olan malzemenin çerçeve dayanımına katkı sağlayacağı açıktır. Ancak yapılan uygulamalarda levhanın kapasitesinin ne kadarını kullandığı üzerinde durulmamıştır.

Betona yapıştırılmış CFRP şeritler betonarme yapıların onarımı güçlendirilmesi veya kapasite artırımı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Konu yönetmeliklerde de yer bulmuştur (1- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2007, 2-ACI Committee 440 2008). Literatürde tablalı betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi veya tuğla dolgu çerçevelerin depreme karşı güçlendirilmesi uygulamaları geniş yer bulmaktadır. Betona yapıştırılmış CFRP şeritlerin yük taşıma kapasitesinin araştırıldığı ve betonarme yapılarda kullanıldığı çalışmalar güncelliğini korumaktadır. Dayanımı çok yüksek olan CFRP levhaların düşük dayanımlı olan betonlarda kullanılmasının sakıncalı olduğu da aynı yönetmeliklerde belirtilmiştir [12-13].

Tasarımcıya yardımcı olacak ve çelik uygulamalarında olduğu gibi yapıştırılan malzemenin iki ucundan betona ankrajla bağlandığında kapasitesinin bilinmesi son derece önemlidir. Çelik yapılarda birleşim hesabının yapım ilkesi oldukça basittir. Birleşim bölgesinde yapılan bütün uygulamalar (bulon, perçin, kaynak) çelik çubuğun taşıması gereken servis yükünü emniyetle aktarabilmelidir. Bunun sağlanabilmesi amacıyla her bir birleşimin hesaplanması ayrı ayrı yapılmakta her bir birleşim için detay çizimleri hazırlanmaktadır. Malzeme özellikleri ve davranışı iyi bilinen çelik için bu şekilde detaylı çalışılırken, daha çok yeni olan CFRP şeritlerin betona

ankrajlanmasında birleşimin yük taşıma kapasitesi ile ilgili deneysel bilgi birikimi bulunmamaktadır. Buna rağmen hasar görmüş veya görme ihtimali yüksek olan betonarme yapılarda CFRP şerit uygulaması yapılmaktadır. CFRP şeritlerin uygulanmasında çelik yapılar projesinde olduğu gibi her bir birleşim tek tek hesaplanmalı ve detay çizimleri olmalıdır.

Tasarımcıya yardımcı olacak ve çelik uygulamalarında olduğu gibi yapıştırılan malzemenin iki ucundan betona ankrajla bağlandığında kapasitesinin bilinmesi son derece önemlidir. Bu nedenle deneysel çalışmada iki ucundan ankrajlı CFRP şeritlerin yük taşıma kapasitesi araştırılmıştır.

Literatür özetinde incelenen araştırmalarda elde edilen ortak sonuç CFRP şeritlerin betona yapıştırılmasında uç bölgesinde yapılan bağlantı şeklinin büyük önem taşıdığıdır. Eleman düzeyinde yapılmış araştırmaların neredeyse tamamında şerit üzerindeki gerilme dağılımına yer verilmiştir. Konuyla ilgi önceden yapılmış araştırmaların özetlendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Smith (2011) yaptığı çalışmada olduğu gibi elde edilen ortak sonuç göçmenin meydana geldiği şerit uçlarında gerilmenin şerit gövdesinde ölçülen gerilmeden oldukça düşük olduğudur. Sistemin göçmesinde şeridin taşıdığı kuvvet değil, uç bölgenin aktarabildiği kuvvet belirleyici olmaktadır [14]. Bu durum ekonomik olarak pahalı olan CFRP şeritlerin optimum olarak kullanılmasının son derece önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bazı araştırmalarda ve yönetmeliklerde tavsiye edilenin aksine, kapasite üzerinde levha genişliğinden çok uç bölgesinde yapılan ankraj uygulamasının başarısı belirleyici olmaktadır. Bu nedenle araştırmamızda yönetmeliklerde de yer bulan fan ankraj uygulamasında şerit kalınlığı ile şerit ucuna yapılacak ankraj sayısı arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada kirişin moment sabit bölgesine bırakılan 100 mm derinliğinde bir çentiğe, CFRP şerit yapıştırılmış ve uçlarında Fan ankrajla bağlanmıştır. Kullanılan betonun basınç dayanımı 10 MPa olarak belirlenmiştir. Böylece karşılaşılabilecek en olumsuz durumda kullanılan CFRP şeridin başarısı incelenmiştir.

Bu araştırmada dolgulu çerçevelerde diyagonal doğrultuda ve sadece çekme etkisinde kullanılabilen LP levhaların eleman düzeyinde özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çentikli kiriş deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde iki ucundan ankrajlarla bağlanmış ve betonarme elemanlara yapıştırılmış LP levha performansı araştırılmıştır.

Yapılacak olan bu deneysel çalışmaların amacı betona yapıştırılmış LP levhaların performansı incelemek ve daha etkin şekilde kullanılması amaçlanmaktadır. Elde edilen deney sonuçlarına göre katman sayısının taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Katman sayısının artması taşıma gücünde de lineer artış getirmeyeceği öngörülmüştür. Burada optimum şekilde kullanılacak olan LP sayısı belirlenecektir. Elde edilecek bulgular yeni bağlantı çeşitlerinde gelişmesini sağlayacaktır.

Araştırma projesinden elde edilecek sonuçların çerçeve türü yapıların güçlendirme uygulamalarında LP levhaların daha etkin kullanılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada literatürde de yer bulan ankraj şekli çentikli kiriş deneyleri kullanılarak karşılaştırılacaktır. Araştırma projesinin gerçekleştirilmesiyle iki ucundan ankrajlı LP levhaların yük taşıma kapasitesiyle ilgili yaklaşımların yapılması da amaçlanmaktadır. Betonarme yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde diyagonal doğrultuda LP levhaların kullanıldığı düşünüldüğünde yapılacak araştırma önemlidir. Elde edilen bulgular ışığında yeni bağlantı çeşitlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmaların amaçlarını kısaca özetleyecek olursak;

- 1- Mevcut çalışmalarda kullanılan deney düzeni, Lifli Polimer levha üzerindeki eksenel çekmeyi net olarak sağlayamamaktadır. Büyük deney elemanları kullanılarak çentikli kiriş deneylerinde LP levha eksenel çekme etkisinde bırakılmıştır.
- 2- Eksenel çekme etkisinde LP levhanın kopması gerçekleşmemektedir. Bu nedenle kopmanın LP levhadan gerçekleşmesinin amaçlanması böylece malzemenin limitlerinin bilinmesi önemlidir.
- 3- Düşük dayanımlı betonlarda kullanılan fan ankraj uygulaması önemlidir. 10 MPa gibi dayanımı olan bir betonda göçmenin LP levhanın yük taşıma kapasitesine ulaşarak gerçekleşmesi çarpıcı bir sonuç olacaktır. Özellikle üç ankrajın kullanıldığı deney elemanında 50 mm aralıklı kullanılan fan ankrajın göçme modu önemli ip uçları vermektedir.
- 4- Çerçeve türü yapılarda dolguya yapıştırılan Çelik ve LP levhaların göçmesinde dolguya yapılan uygulamadan çok levha uçlarında çerçeve elemanlarına yapılan bağlantının önemli olduğu açıktır. Bu çalışmada levha uçlarında kullanılan bağlantı

detayının levhanın yük taşıma kapasitesine olan katkısı ve levha boyunca gerilme dağılımının değişimi araştırılmıştır.

5- Betonarme elemanlara LP levhaların ankrajlanması dünyada yönetmelikler girmiştir. Ancak yapılacak uygulamalarla ilgili daha fazla bilgi birikimine ihtiyaç bulunmaktadır. Türk deprem yönetmeliğinde de fan ankrajla betona bağlanmış LP levhalara yer verilmiştir. Ancak bu kadar kapsamlı bir konuda gerek ankraj aralıkları gerekse ankraj çapı ve ankraj derinliği konuları yüzeysel olarak yer verilmiştir. Ayrıca levha ucunda kullanılması tavsiye edilen ilave parçanın işlevi tam olarak ortaya konulmamış bir detay olarak karşımıza çıkmaktadır.

6- LP levhaların bağlantı detayı çelik yapılarda düğüm noktası hesabına benzer şekilde projelendirilmeli ve uygulama projelerinde detaya yer verilmelidir. Uygulamada meydana gelecek istenmeyen bir etken göçme büyük sorunlar çıkaracaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Nüfusun ve ihtiyaçların artması ile birlikte yapıların sayısı da artmaktadır. Mevcut yapılarında ortalama yaşları da giderek artmaktadır. Bu da mevcut yapıların yıpranmasından kaynaklı iyileştirme ve güçlendirme yapılması kaçınılmaz bir hal almaktadır. İnşaat endüstrisinde yapının yük kapasitesinin artırılmasına yönelik araştırmalar teknoloji ve bilgi birikiminde gelişmesi ile birlikte yeni uygulamaları da beraberinde getirmektedir. Genel olarak yapılarda onarım ve güçlendirme çalışmaları kolon kiriş gibi eleman düzeyinde ve çerçeve sistem düzeyinde olmak üzere gruplandırılmıştır. Son yıllarda Lifli polimer levhaların yüksek çekme mukavemeti, kolay uygulanabilir olması, mekanik olarak sisteme ilave bir yük getirmemesi gibi avantajlarından dolayı onarım ve güçlendirme çalışmalarında kendisine yer edinmiştir.

LP levha ile güçlendirme çalışmalarında çok sayıda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalar:

- Çekme bölgesine yapıştırılan Lifli Polimerin çekme dayanımının belirlenmesi,
- Epoksi yapıştırıcısının arayüz ayrışmasındaki performansı,
- Betonarme elemanın performansı şeklindedir.

Betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde Lifli Polimer levhalar geniş kullanım alanı bulmaktadırlar. Konuyla ilgili çok sayıda bilimsel makale bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar iki grup altında toplanabilmektedir. Birinci grupta polimer türü malzemelerin (LP levhalar, LP çubuklar) beton veya tuğla elemanlara yapıştırılması veya elemana açılan deliğe ankrajlanmasının incelendiği araştırmalar bulunmaktadır. LP levhaların düzenli formda betona yapıştırılmasında gerekli olan yapışma boyu ve yapışma genişliği ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu tür çalışmalarda gözlenen göçme şekillerinde levhanın yüzeyden soyulması en fazla gözlenen göçme şeklidir. Bu nedenle yapıştırılan malzeme üretici firmanın önerdiği yük taşıma kapasitesine ulaşamamaktadır. Yük taşıma kapasitesinin artması amacıyla LP levha üzerinde yine LP' den yapılmış ankrajların kullanılması durumu ortaya çıkmıştır. Çeşitli beton sınıflarına göre ankraj çapı, ankraj derinliği ve delik çapı gibi konularda çok sayıda detaylı araştırmaya rastlanmaktadır. LP levhalarla ilgili yapılmış eleman düzeyindeki çalışmaların ortak sonucu levhanın yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde en önemli unsurun kullanılan ankraj türü ve düzenlemesi olduğudur.

LP levhaların kullanıldığı betonarme kirişlerle ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalar iki grupta toplanmaktadır. Birinci gruptaki araştırmalar kirişlerin eğilme kapasitesinin artırılması amacıyla çekme bölgesine LP levhaların yapıştırılmasıdır. Bu uygulama türünde çekme bölgesinde bulunan LP levha iki türde göçme sergilemiştir. Birincisi levhanın soyulması, ikinci levhanın beton yüzeyini koparmasıdır. Bunun üzerine LP levhaya ankraj uygulaması yapılmıştır. Betonarme kirişlerde yapılan diğer çalışmalar ise kesme dayanımı yetersiz olan dikdörtgen veya T kesitli kirişlerin güçlendirilmesidir. Bu çalışmalarda da LP levhalar satripler şeklinde kirişlerin çekme açıklıklarına yapıştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli kirişlerde LP levha iki şekilde uygulanmış ve ankraj kullanılmamıştır. Birincisi levhanın yan yüzlere yapıştırılmasıdır. İkincisi levhanın bütün kesiti sargılamasıdır. T kesitli kirişlerde ise levha tablanın bulunduğu bölüme ankrajla bağlanmıştır. Kirişlerle ilgili yapılan araştırmalar levhanın tasarımından daha çok yük taşıma kapasitesindeki artış üzerine yoğunlaşmıştır.

LP levhalarla ilgili ikinci gruptaki araştırmalar ise malzemenin sistem düzeyindeki betonarme çerçevelere etki eden yatay kuvvetlere karşı kullanılmasıdır. Betonarme çerçeve türü yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde çerçeve gözüne dolgu duvar yapılması, çerçevenin tuğla dolgusuna diyagonal doğrultuda çelik elemanların veya LP levhaların uygulanması öne çıkan çözüm yöntemleridir. Bunun yanı sıra çerçeve gözüne ön üretimli bazı elemanların yerleştirilmesi de bir yöntemdir. Çerçeve türü yapıların güçlendirilmesi ile ilgili araştırmalar incelendiğinde elde edilen ortak sonuç yapılan uygulamanın mevcut binaya olan bağlantısının başarısının en önemli parametrelerden biri olduğudur. LP levhaların tuğla dolgulu betonarme çerçevelerin, taşıyıcı tuğla duvarların veya perde elemanlarının yatay yük taşıma kapasitesinin artırılması amacıyla kullanımında da ilave edilen uygulamanın mevcut sisteme bağlanması önemli bir problemdir. Bu bağlanma şeklinin levha boyunca kullanılacak LP bulonlardan veya levha diyagonal doğrultuda yapıştırıldığı yüzeyin dayanımından daha önemli olduğu açıktır. Çerçeve türü yapılarda kullanılan uygulamaların sonuçları malzemenin yük taşıma kapasitesinden çok sistemin yük taşıma kapasitesine odaklanmıştır. LP levhanın aynen çelik yapılarda kullanılan birleşim uygulaması gibi detaylı tasarlanması gerekmektedir. Çelik yapılarda birleşimler göçmenin birleşim bölgesinde olmaması ilkesi ile tasarlanmakta böylece levhanın yük taşıma kapasitesi öngörülebilmektedir. Ancak LP levhalarla ilgili araştırmalarda bu yönde bir çalışmaya

rastlanmamıştır. Literatürde bulunan çalışmalarda çerçeve gözüne yapıştırılan LP levhaların çerçevenin kolon ve kirişlerine bağlandığı bölgelerden koptuğu ve malzemenin gövdede yük taşıma kapasitesine ulaşmadan göçmenin gerçekleştiği sonucu elde edilmiştir. Mühendislik tasarımında levhanın uç birleşiminin çelik yapılar projesinde olduğu gibi gövdenin yük taşıma kapasitesini karşılayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu araştırmanın amacı Betona yapıştırılmış LP levhanın uç bölgesinde kullanılan birleşim detayı ile levha genişliği arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılmasıdır.

LP levhaların betona bağlanmasında LP ankrajı kullanılmaktadır. LP ankrajının yapımıyla ilgili literatürde yeterli çalışma bulunmaktadır. Ankrajın yük taşıma kapasitesi öngörülebilmektedir. Ancak beton veya tuğla yüzeye yapıştırılmış ve ucundan ankrajla bağlanmış levhaların yük taşıma kapasitesi ile ilgili yeterli bilgi birikimi bulunmamaktadır. Tuğla dolgulu çerçevelerde tuğla duvar mekânın bütünlüğünün korunması amacıyla çerçeve aksına simetrik yerleştirilmektedir. Levhanın birleşim bölgesinde keskin dönüşler yapması söz konusu olmaktadır. Kolon mantolaması benzeri uygulamalarda dış bükey dönüşlerin nasıl olması gerektiği ile ilgili araştırmalar bulunmaktadır. Ancak iç bükey dönüşlerde nasıl bir bağlantı yapılacağıyla ilgili eleman düzeyinde çalışma bulunmamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar analitik denklemler üretilerek yapılacak olan onarım ve güçlendirme çalışması için prensipler açıklanmıştır.

Gao, Kim, Leung (2004) Lifli Polimerlerin inşaat mühendisliği güçlendirme uygulamalarında kullanımının mekanik sabitlemenin azaltılarak pratik bir yöntem olacağını belirtmiştir. Yaptığı deneysel çalışmalarda epoksi yapıştırıcıları modifiye ederek 2 ve 4 katmanlı Lifli Polimeri betonarme kiriş çekme bölgesine yapıştırarak yük taşıma ve süneklilik değerlerinin analizi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Polimer levha üzerinde oluşan gerilme dağılımını ve etkili olan yapıştırma genişliği araştırılmıştır [15].

Ferracuti, Savoia, Mazzotti (2007) Lifli polimerlerin betonarme yüzeye yapıştırılması ile arayüz kırılma enerjisi dolayısı ile delaminasyon yükünün artırmak amacı ile deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel verilerden başlayarak doğrusal olmayan

mod II (Lifli polimer levhanın kopması-göçmesi) arayüz yasaının üretilmesi için prosedür geliştirmesi yapmışlardır [16].

Yin, Wu (2003) Lifli Polimer ile güçlendirme çalışmalarında çoğu kez göçmenin eğilme çatlağının başladığı bölgede arayüz ayrışmasından kaynaklandığını belirtmiş, çelik lif takviyesinin eleman üzerinde maksimum yük ve sehimin artması ile arttığını deneysel çalışmalarda incelemiştir [17].

Çamlı, Binici (2007) beton plak, tuğla yüzeyine yapıştırılan lifli polimerlerin ankrajlanması ve çeşitli açılarda etkinliği deneysel olarak araştırılmıştır. Sıvalı ve sıvasız olarak bitirilen tuğla duvar üzerinde Lifli Polimer levha etkinliği monolitik yükleme altında test edilmiştir. Betonarme veya tuğla duvar ile Lifli polimer arasında meydana gelen kesme kuvvetine karşı önerilen ankrajların nihai mukavemeti önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir [18].

Chen, Tan, Novidis Dış yüzeye yapıştırılmış lifli Polimerlerin etkili güçlendirme çözümünün tasarımıda önemli bir hususun uç ankraj mukavemeti olduğunu belirtmiş, kesme etkisi altında ankraj mukavemet modellerinin incelenmesi için deneysel çalışmalar yapmıştır. Toplanan deneysel verilerle rasyonel model önerilmiştir. Bu model etkili ankraj boyutunu doğru bir şekilde tahmin etmektedir [19-21].

Teng, Liu, Yang, Wu, Zhou LP levhaların betonarme yüzeye yapıştırılması ile oluşan gerilmelerin incelenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yaparak analitik çalışmalar yapmışlardır [22-26].

Özdemir (2005), LP levhaların yapısal ve yapısal olmayan elemanlar üzerinde yapıştırılmasında etkili olan ankraj gömme derinliği, ankraj deliği çapı ve CRFP ankraj dübellerinin çekme dayanımı kapasitesi belirlenebilmesi üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır [27].

Toutanji, betonarme kiriş üzerinde yapıştırılan LP levhalar üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapmıştır. Analitik denklemler tahmin edilen sonuçların deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlarla çok iyi uyum sağladığını böylece etkili olan LP levha yapışma boyu ve genişliği belirlenebilmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır [28].

Lenwari (2006), Yapıştırılmış lifli Polimer levhaların bağdan ayrılma mukavemeti ele almışlardır. Yapıştırılmış Lifli polimer levha ucundaki yüksek gerilim alanı nedeni ile statik ve tekrarlı yükler altında ayrılma eğilimi içinde olduklarını belirtmiştir [29].

Rteil, Gheorghiu betonarme kiriş üzerine yapıştırılmış olan LP levhaların tekrarlı yükler altında yorulma mukavemeti üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Kiriş çekme bölgesine CRFP eklenmesi ve kademeli artış monotonik yükleme ile yapılan araştırmada yorulma mukavemeti üzerinde olumlu artışlar yaptığı deneysel sonuçlarla elde edilmiştir. Yaygın olarak kullanılmaya başlanan onarım sisteminin uzun vadeli davranışı hakkında fikir vermektedir [30-31].

Arslan (2006), betonarme kirişlerin eğilme güçlendirilmesi için deneyler gerçekleştirmiştir. Hasarlı kirişlerin yük-deplasman ilişkisini tanımlamak için yedi referans kiriş monotonik yükleme altında maksimum yük kapasitelerine kadar yüklenmiştir. Daha sonra kirişler farklı varyasyonlarla onarılmış ve güçlendirilmiştir. Güçlendirilen bu kirişler referans kirişlerle aynı koşullarda test edilmiş onarım ve güçlendirme tekniklerinin yük taşıma kapasitesine katkısı araştırılmıştır [32].

Sheikh (2002), sistem düzeyinde çerçeve türünde tam ölçekli ila üçte iki ölçekli modeller üzerinde LP levhaların etkinliğini araştırmıştır. LP levhalar birçok durumda geleneksel tekniklere göre daha ekonomik ve teknik olarak daha üstün bir alternatif sağlayacağını belirtmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, analitik sonuçlar ile kıyaslanmıştır [33].

Pham (2004), LP levhalar ile güçlendirmesi yapılan betonarme elemanların göçme modunun gerilme yığılmasından dolayı uç bölge ayrışması ve kesme bölgesinde oluşan ayrışma en kritik göçme modu olduğunu belirtmiştir. Çeşitli parametrelerle ayrışma modlarını analiz etmiştir [34].

Benjeddou (2007), betonarme kirişlerin çekme bölgesine yapıştırılmasıyla onarılan hasarlı betonarme kirişler üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada beton dayanımı, LP levha genişliği ve kiriş hasar derecesi (kirişe uygulanan ve ön çatlamaya neden olan yük ile kontrol kirişinin yük kapasitesi arasındaki oran) değişkenleri ile deney elemanları hazırlanmıştır. Gözlemlenen deney göçme modları LP levhanın yüzeyden soyulması ve arayüz ayrışması şeklindedir [35].

Kachlakev (2000), trafik yükü artışı için kesme mukavemeti açısından yetersiz kalan köprü kirişlerinin güçlendirilmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır. Mevcut yapının güçlendirilmesini simüle etmek için karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ve cam FRP (GFRP) değişkenleri ile deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneyde yük, deplasman ve gerilme değerleri toplanarak analiz etmiştir [36].

Schnerch (2007), çelik-beton kompozit türü köprü kirişlerini güçlendirmek ve onarmak için CRFP malzemelerinin doğru kurulumunu, analizini ve tasarımını için uygulayıcılar tarafından kullanılabilecek kurulum ve yapısal tasarım yönergeleri sunmuştur. Analitik veriler, güçlendirilmiş kirişin eğilme davranışını belirleme ve CRFP malzemelerin geometrik konfigürasyonunu ve gerekli malzeme uygunluklarını tasarlamak için kullanılabilir. Önerilen tasarım prosedürleri CRFP malzemeler ile güçlendirilmiş Çelik-Beton kompozit kiriş davranışını doğru bir şekilde tahmin etmiştir [37].

Teng (2006), eğilme etkisinde güçlendirilen betonarme kirişler üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar yapmıştır. Araştırmanın odak noktası ayrışma hatası mekanizması olduğundan incelenen test değişkeni CRFP şeritin uzunluğudur. Elde edilen sonuçlar analitik model ile karşılaştırılarak deneysel çalışmalar değerlendirilmiştir [38].

Ahmed (2001), CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin mukavemetini, özellikle de yapıştırılmış LP levhanın uç kesme veya beton örtü ayrışması nedeniyle meydana gelen göçme mekanizmalarını tahmin etmek için tasarım formülleri oluşturmayı amaçlamışlardır. Analitik formüller kullanılarak yapılan tahminler, elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır [39].

Pesic (2003), LP levha yapıştırılması ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin erken beton örtü ayrışması ve LP levhanın yüzeyden kopması ile gerçekleşen göçme modları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu tür göçme modlarının tahmin etmeye yönelik analitik modellerin ve sonlu elemanlar yönteminin doğruluğu yapılmış olan deneysel çalışmalarla değerlendirmiştir. [40].

Birçok araştırmada betonarme kirişlerde gözlemlenen erken göçme mekanizmalarından olan kesme kuvvetine karşı LP levhanın etkinliği araştırılmıştır. Kirişin kesme açıklığı bölgesinde alt ve yan yüzeylerine LP levha yapıştırılarak

onarılan ve güçlendirmesi yapılan betonarme elemanlar deneysel çalışmaya tabii tutulmuştur. Deneyde etkili ankraj uzunluğu, LP levha kalınlığı ve boyu araştırılarak tasarım yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır [41-49].

Özcebe, Altın ve diğerleri, diyagonal CFRP şeritleri kullanılarak güçlendirilmiş yığma dolgulu betonarme çerçevelerin çevrimsel yükler altındaki davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. CFRP şeritlerinin genişliğinin ve düzenleme türünün numunelerin davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. CFRP şeritlerin delikli kil tuğla dolgulu sünek olmayan betonarme çerçevelerin yanal dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından 18.03.2018 tarih ve 30364 sayılı resmî gazetede yayınlanarak 01.01.2019 tarihinde yürürlüğe giren “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” te de bu yönteme yer vermiştir [12, 50-51].

Onarım ve güçlendirme çalışmalarında LP levhaların betonarme elemanlara yapıştırılma formu sistemin başarısı için önemlidir. LP şeritler eksenel çekme etkisinde olan elemanlar yüzeyinde yapıştırılmalıdır. LP levha düzgün formda ve kolon kiriş gibi elemanların keskin dönüşlerinin zayıflatılması uygulamanın başarısını artıracaktır.

LP levhaların tuğla dolgulu çerçeve türü yapıların güçlendirilmesinde çerçeve elemanlarına bağlanması uygulamanın başarılı olması bakımından çok büyük önem taşımaktadır. Çerçeve gözündeki dolguya düzgün formda yapıştırılan LP levha çerçeve elemanlarına ankrajlanarak bağlanmaktadır. Beton gibi malzemelere düzgün formda yapıştırılmış LP şeritlerin eksenel çekme etkisinde elde edilen dayanımlarının, malzemenin eksenel çekme dayanımının altında gerçekleştiği göz önünde bulundurulursa, dolgu duvara yapıştırılan levhanın kolon ve kiriş elemanlarına keskin dönüşlerle bağlanması, uygulamanın etkinliğini azaltmaktadır. Bu araştırmada dolgulu çerçeveye bağlanmış LP levhaların yük taşıma kapasitesi çentikli kiriş deneyleriyle belirlenecektir.

Yapının güçlendirilmesinde çok fazla sayıda eleman olması, yapının yanal rijitliğinin yeterli olmaması ve zayıf katların olması gibi durumlarda sistem düzeyinde iyileştirme yapılmalıdır. Lifli Polimer levha ile sistem düzeyinde iyileştirme betonarme dolgu duvar üzerine yapıştırılması şeklinde olmaktadır.

3. DENEY ELEMANLARI ve YÖNTEM

3.1. Genel

LP levhalar kesitlerinin çok ince olması sebebi ile teorik olarak yük taşıma kabiliyetleri yoktur. LP levhalar eleman düzeyinde çekme etkisi olan bölgelere yapıştırılmaktadır. Bu nedenle tersinen negatif yükleme deney çalışmalarında yapılmamıştır. Deprem yükleri ve hareketli yükler gibi tekrarlanan yükleme etkisinde test edilmiştir.

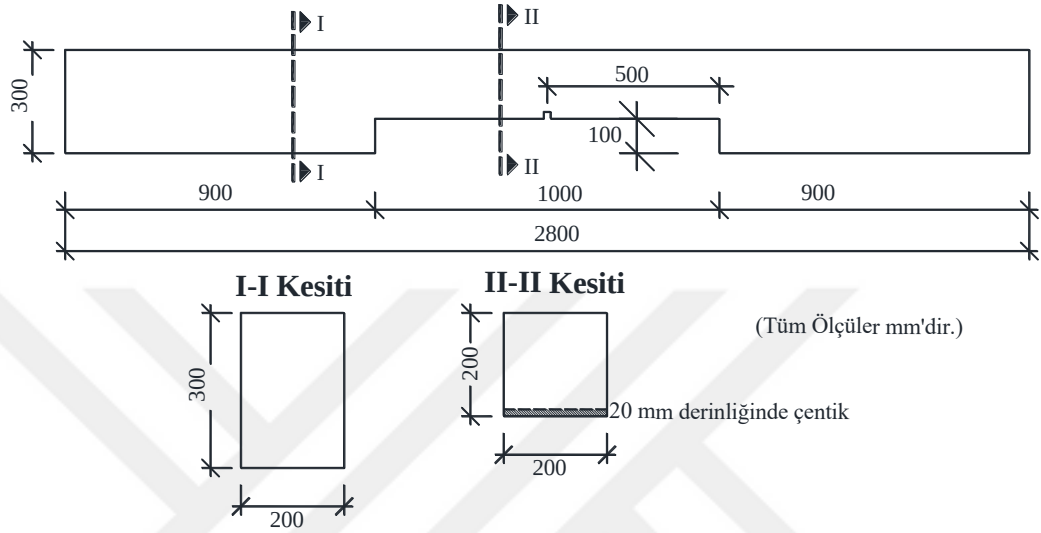
Kiriş deney elemanlarının geometrik boyutları değişkenlik göstermemiştir. 2800mm uzunluğunda ve 300mm x 200mm kesintinde olan kirişler simetrik olarak ortada 100mm derinlikte ve 1000mm açıklıkta çentik bırakılarak bu bölgede kesit 200 mm x 200mm düşürülerek kırılmanın bu bölge içinde gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Eksenel çekme kuvveti taşıyan CFRP şerit, eğilme momenti etkisindeki betonarme kirişin çekme bölgesine yapıştırılmıştır. Kullanılan kiriş deney elemanının geometrisi Şekil 3.1’de ve donatı detayı Şekil 3.3’de verilmiştir. Kiriş üzerinde levhanın yapıştırıldığı bölümde 100 mm derinliğinde 1000 mm uzunluğunda bir çentik bulunmaktadır. Çentiğin olduğu bölümde kesit küçültülerek göçmenin kesme kuvveti olmayan moment sabit bölgesinde gerçekleşmesi sağlanmıştır. Göçmede çekme kuvveti etkisindeki CFRP şeridin yük taşıma kapasitesine ulaşması amaçlanmıştır. Bu nedenle kirişin basınç bölgesine 3 adet 12 mm çapında donatı, çekme bölgesine ise 3 adet 12 mm çapında donatı yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada basınç dayanımı 10 MPa olan beton kullanılmıştır.

Çentik bölgesinde momentin sabit olduğu ve çekme kuvveti etkisindeki bölgede çentiğin içine LP levha yapıştırılarak etkinliği incelenmiştir. Çentik içerisinde çekme donatısı olmaması ve çentik orta bölgesinde kesit düzleminde 20x20mm bırakılan boşluk ile de betonun çekme dayanımı ihmal edilmesiyle bu bölgedeki çekme kuvvetinin tamamı LP levhaya taşınarak elde edilen dayanım LP levhanın dayanımı olması sağlanmıştır.

Betonarme çerçevelerin güçlendirilmesinde kullanılan dolgunun iki tarafındaki levhaların LP bulonlarıyla birbirine bağlanması gerektiği yönetmeliklerde de belirtilmiştir. LP bulonların kullanılmasının levhanın beton yüzeyinden ayrılmasının geciktireceği, oluşacak çatlakların lokalize olmasına engel olacağı ve böylece levhanın

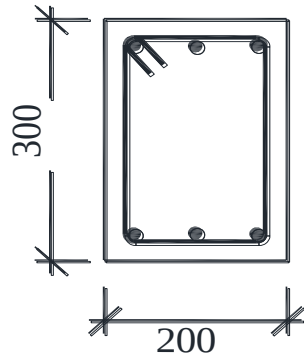
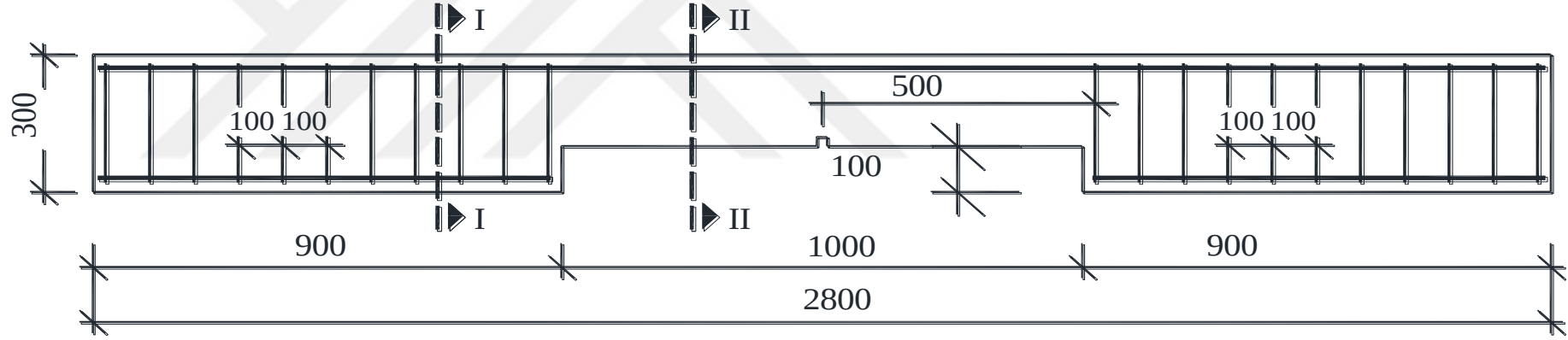
daha uzun süre yük taşımasına katkısının olacağı açıktır. Ancak LP bulonların varlığının dayanım üzerindeki etkisiyle ilgili literatürde eleman düzeyinde bir araştırmaya ulaşılamamıştır. Bu araştırma projesinde amaçlanan diğer konu ise İki ucundan çerçeve elemanlarına ankrajla bağlanmış olan levha boyunca LP bulonlarının kullanılmasının davranış ve dayanım üzerindeki etkisinin belirlenmesidir.



Şekil 3.1. Kiriş deney elemanı geometrisi.

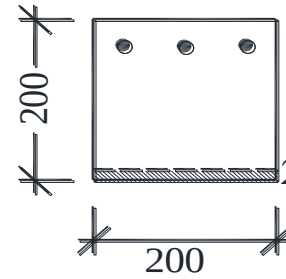


Şekil 3.2. Kiriş deney elemanı.



I-I Kesiti

Çekme Donatısı: 3 ϕ 12 mm (nervürlü)
 Basınç Donatısı: 3 ϕ 12 mm (nervürlü)
 Etriye Donatısı: ϕ 8/100 mm (nervürlü)
 Paspayı: 30 mm



II-II Kesiti

Basınç Donatısı: 3 ϕ 12 mm (nervürlü)
 Paspayı: 30 mm

20 mm derinliğinde çentik

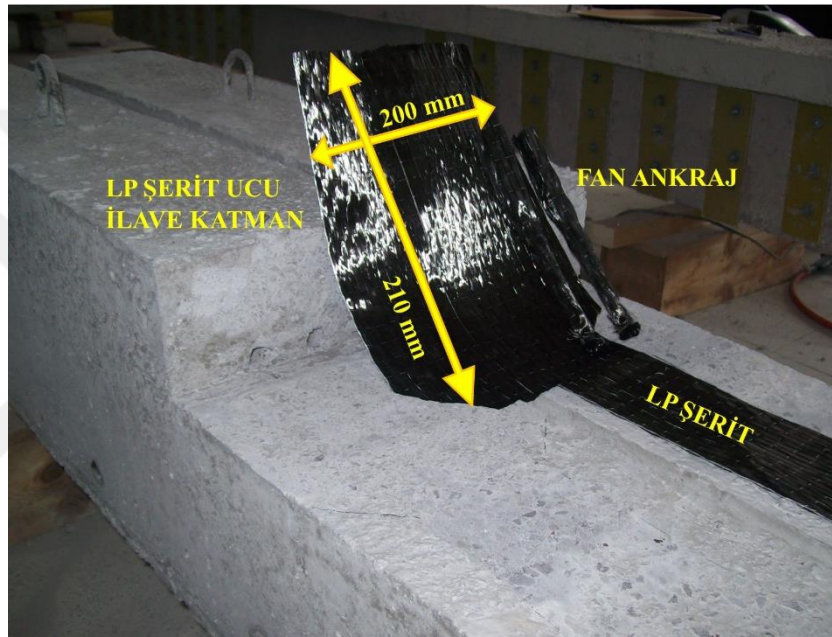
(Tüm Ölçüler mm'dir.)

Şekil 3.3. Kiriş deney elemanı donatı planı.

3.2. Deney Elemanları ve Deneysel Değişkenler

Bu araştırmada bir adet kiriş kontrol amacıyla test edilirken (Deney Elemanı-1) 7 adet kiriş ise deneysel araştırmada incelenmek üzere hazırlanmıştır. Kirişlerin geometrik boyutları ve mekanik özellikleri sabit olup kullanılan deneysel değişkenler:

- LP levhanın şerit genişliği,
- Betona yapıştırılmış LP levha şeridinin ucunda kullanılan fan ankrajın sayısı
- LP levha şerit ucunda ilave bir katmanın bulunmasıdır. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4. Lifli polimer levha deney değişkenleri.

Deney Elemanı-2; çentik iç bölgesine 100mm genişliğinde CRFP şerit yapıştırılmıştır. Şerit uçlarına ankraj ve ilave katman yapılmamıştır.

Deney Elemanı-3; çentik iç bölgesindeki 100mm genişliğindeki CRFP şeritin sabit tutulup şerit ucuna bir adet fan ankraj yapılmıştır.

Deney Elemanı-4; Deney Elemanı-3'e benzer şekilde 50 mm aralıkla iki adet fan ankraj kullanılmıştır.

Deney Elemanı-5; iki adet fan ankraj ve birleşimin daha güçlü olması beklentisi ile 200 mm genişliğinde 210 mm boyunda CFRP'den yapılmış ilave bir katman kullanılmıştır.

Deney Elemanı-6; Deney Elemanı-5'te bulunan iki adet ankraj sayısı 50mm aralıkla 3 adete çıkarılmıştır. Levha genişliği 100 mm olduğundan, yük aktarımının sağlanması amacıyla uç bölgeye ilave katman yapılmıştır.

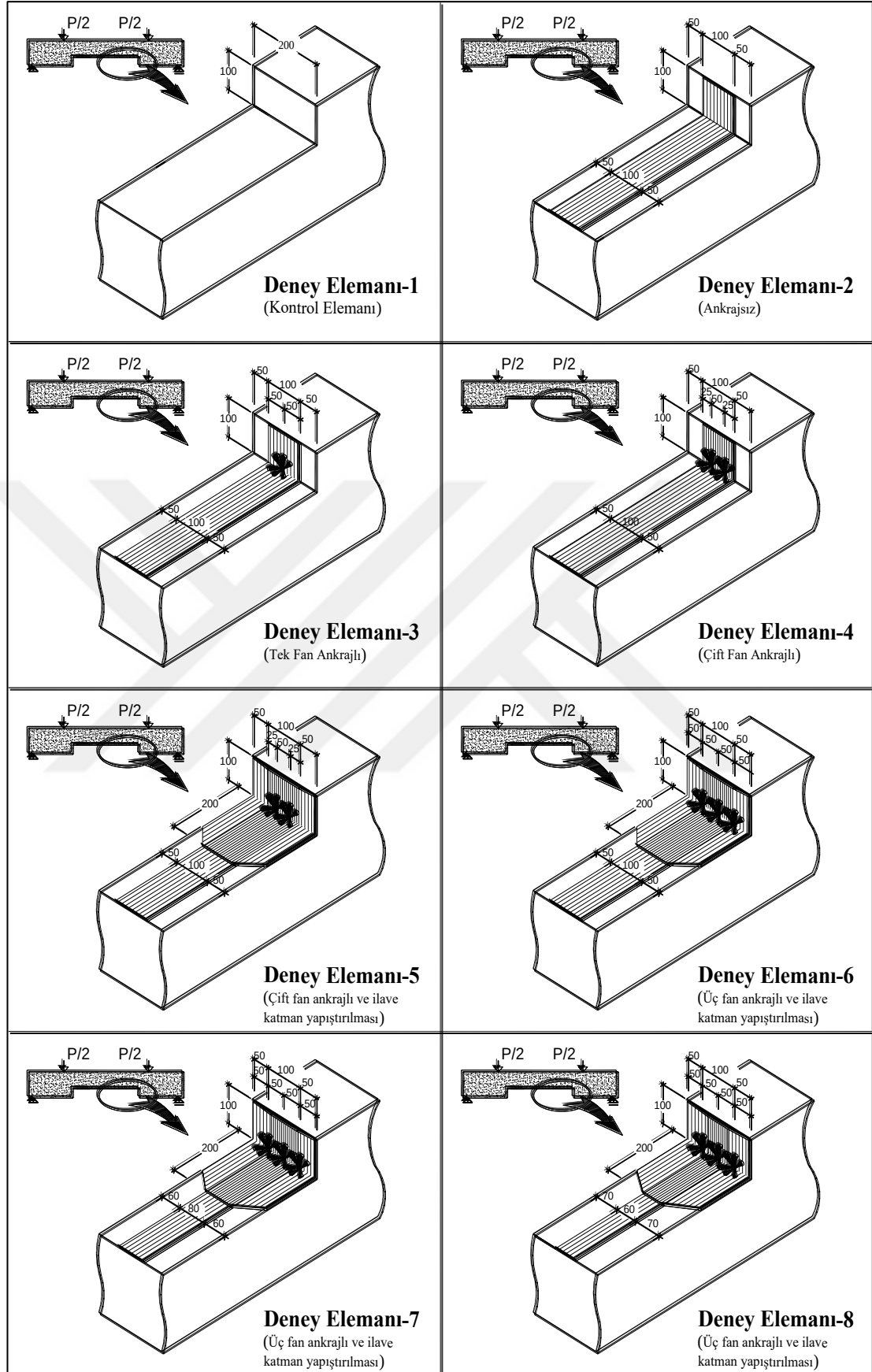
Deney Elemanı-7; Deney elemanının geometrisinin sınırlamasından levha ucuna 50 mm aralıkla üç ankrajdan fazlası yapılmamıştır. Bu nedenle deney elemanı-6'da kullanılan birleşim, LP levha genişliği 80mm olarak kullanılmıştır.

Deney Elemanı-8; Deney Elemanı-7'ye benzer şekilde ankraj sayısı ve ilave katman sabit tutulup çentik içerisindeki LP levha genişliği 60mm indirilmiştir (Şekil 3.5).

Deneylerde Şekil 3.4'de verilen fan ankraj türünde bağlantı kullanılmıştır. Ankrajın yapıldığı delik 14 mm çapında ve 150 mm derinliğindedir. CFRP ankrajlar ise 100 mm çapında ve 200 mm boyunda CFRP şeridin 8 mm çapında çeliğe sarılmasıyla elde edilmişlerdir. Şeridin dışarıda kalan 50 mm boyundaki kısmı çapı 100 mm olan fan şeklinde açılmıştır. Deney Elemanları özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deney elemanları özellikleri.

Deney Eleman No:	CFRP ŞERİT			Beton
	Genişlik, W _f (mm)	Ankraj Sayısı	İlave Katman	f _c , (Mpa)
Deney Elemanı-1 (Referans)	Şerit yok	-	-	11,00
Deney Elemanı-2	100	Ankraj yok	-	10.30
Deney Elemanı-3	100	1	-	10,40
Deney Elemanı-4	100	2	-	9,80
Deney Elemanı-5	100	2	Evet	10,00
Deney Elemanı-6	100	3	Evet	10,20
Deney Elemanı-7	80	3	Evet	11,00
Deney Elemanı-8	60	3	Evet	10,90



Şekil 3.5. Deney elemanlarında CFRP şeritlerin ve CFRP ankrajların düzenlenmesi.

3.3. Malzemeler

Deneyisel çalışmada betonarme elemanların üretilmesi ve deney elemanlarının mekanik özelliklerinde bir farklılık oluşmaması için donatı çeliği, LP levha, LP levha yapıştırıcısı ve çimento tek seferde alınmıştır. Üretilen beton aynı karışım oranında ve aynı kür şartlarında imal edilmiştir. Her beton dökümünde 3 adet silindir beton numunesi alınmıştır. Donatı çelikleri için çekme deneyi yapılmıştır.

Deneyisel çalışmada tek yönlü CFRP şerit (Sikawrap 230-C) kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak iki bileşenli (Sikadur-330) epoksi kullanılmıştır. CFRP şerit ve yapıştırıcısının özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

3.3.1. Beton ve Donatı

Beton: LP levhalar dayanımı 20 MPa’dan daha yüksek basınç dayanımı olan yüzeylerde kullanımı tavsiye edilmektedir. Fakat ülkemizde mevcut yapılar ile ilgili raporlar incelendiğinde onarım ve güçlendirmeye ihtiyacı olan birçok yapı da beton basınç dayanımı 10-12 MPa olarak çıkmaktadır. Bu nedenle gerçekçi bir modelleme olması için beton basınç dayanımı 10 MPa seçilmiştir. Kullanılan beton karışım oranları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu modellemeye uygun olması amacıyla 0-7mm elek açıklıklı kum ve 7-15mm çakıl %50 oranında kullanılmıştır. Çimento dozajı 200kg’dır. Su/çimento oranı 0,60 olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 3.2. Beton karışım oranları (1 m³ beton için).

Malzeme	Ağırlık (kg)
Çimento (KPC-32.5)	200
Çakıl (7-15 mm)	900
Kum (0-7 mm)	900
Su	120
Toplam	2120

Donatı: Deney elemanlarında aynı tür donatılar kullanılmıştır. Kullanılan Ø8 mm çapında ve Ø10 mm çapında nervürlü donatıların mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Donatı çeliği mekanik özellikleri.

Donatı Çapı Ø (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı f_{sy} (MPa)	Maksimum Dayanım f_{su} (MPa)
Ø 8	S420 (Nervürlü)	440	683
Ø 10	S420 (Nervürlü)	480	686

3.3.2. LP levha ve Epoksi

Kiriş elemanının üzerinde SikaWrap 230-C tek doğrultulu karbon lifli levha kullanılmıştır. Kullanılan LP levhanın yapıştırılmasında ve beton üzerine açılan deliklere ankrajlanmasında iki bileşenli Sikadur 330 epoksi reçinesi kullanılmıştır. LP levha ve epoksi reçinesinin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan LP levha ve yapıştırıcısının özellikleri.

LP Levhanın Mekanik Özellikleri CFRP (Skawrap-230C)		Epoksinin Mekanik Özellikleri (Sikadur 330)	
Ağırlığı (g/m^2)	230 ± 10	Çekme Dayanımı (MPa)	30
Yoğunluğu (g/m^3)	1,82	Elastisite Modülü (MPa)	3.800
Kalınlığı (mm)	0,131		
Çekme Dayanımı (MPa)	4.300		
Elastisite Modülü (MPa)	234.000		
Maksimum Uzama (%)	1,8		

3.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının betonları Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarında üretilmiştir. Ahşap kalıp malzemesi kullanılmıştır. Deney elemanlarının donatıları yapı mekaniği laboratuvarında hazırlanmıştır (Şekil 3.6). Kalıp ve donatı demiri hazırlanan deney elemanının betonu laboratuvar ortamında üretilerek hazırlanan kalıp içerisine dökümü gerçekleştirilmiştir. Beton dökümü ile beraber dayanımının kontrolü için her deney elemanından 4 adet beton numunesi alınmıştır. Beton dökümü tamamlanan deney elemanlarına ve alınan numune betonlara kür uygulanmıştır. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan kalıp ve donatının görüntüsü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Deney elemanı donatısı.

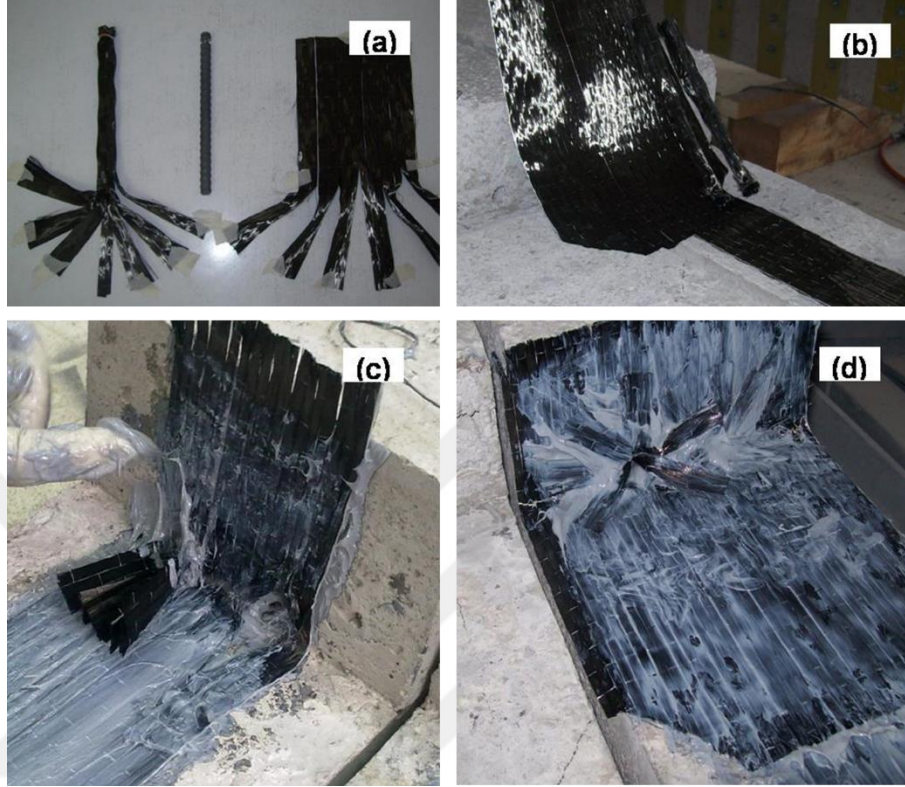


Şekil 3.7. Deney elemanlarının üretilmesi.

3.5. Yapıştırma Prosedürü

Deney elemanlarına, CFRP şeritlerin yapıştırılmasında ve ankrajların uygulanmasında özdeş prosedür kullanılmıştır. Deney elemanı betonunun mukavemetini sağlaması amacı ile 28 gün beklenilmiştir. Beton üretilmiş deney elemanlarında önce yüzey hazırlanmıştır. Uygulama için öncelikle beton yüzeyine epoksi ile CFRP şerit yapıştırılacak alanlar pürüzlendirilmiştir. Pürüzlendirmedeki amaç kiriş yüzeyindeki beton şerbeti temizlenerek sağlam beton yüzeyine ulaşmaktır. Daha sonra LP bulon ankraj uygulaması yapılacak olan deney elemanları için (Deney Elemanı 3-4-5-6-7-8) Ø14 mm çapında delik açılmıştır. Beton yüzeyi ve delikler vakumla temizlenmiştir. CFRP şeritler yüzeye serilmiş ve reçine emdirilmiştir. Ankraj uygulamasında 14 mm çapında açılan delik havayla temizlenmiştir. 100 mm genişliğinde ve 200 mm boyunda CFRP şerit 8 mm çapında çeliğe sarılmıştır. Deneylerde kullanılan ankrajların hepsi

özdeştir (Şekil 3.8.a). Deney elemanlarında kullanılan yapıştırma prosedürü Şekil 3.8’de verilmiştir. Yapıştırması tamamlanan deney elemanları 15 gün laboratuvar ortamında bekletilerek teste hazırlanmıştır.

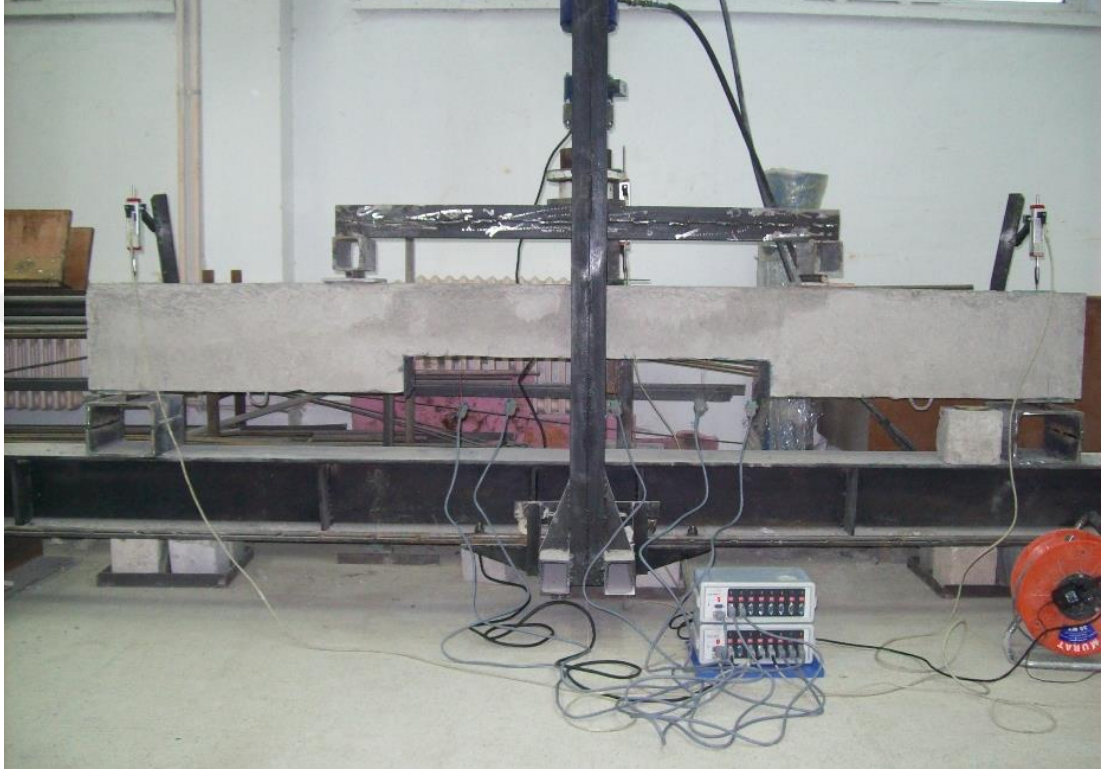


Şekil 3.8. Yapıştırma prosedürü (A) deneylerde kullanılan CRFP ankraj, (B) deney elemanı 7 için yapıştırılmaya hazırlanmış CRFP şerit, ilave katman ve ankraj, (C) deney elemanı 4 ankraj yapımı sırasında, (D) CRFP Uygulaması tamamlanmak üzere.

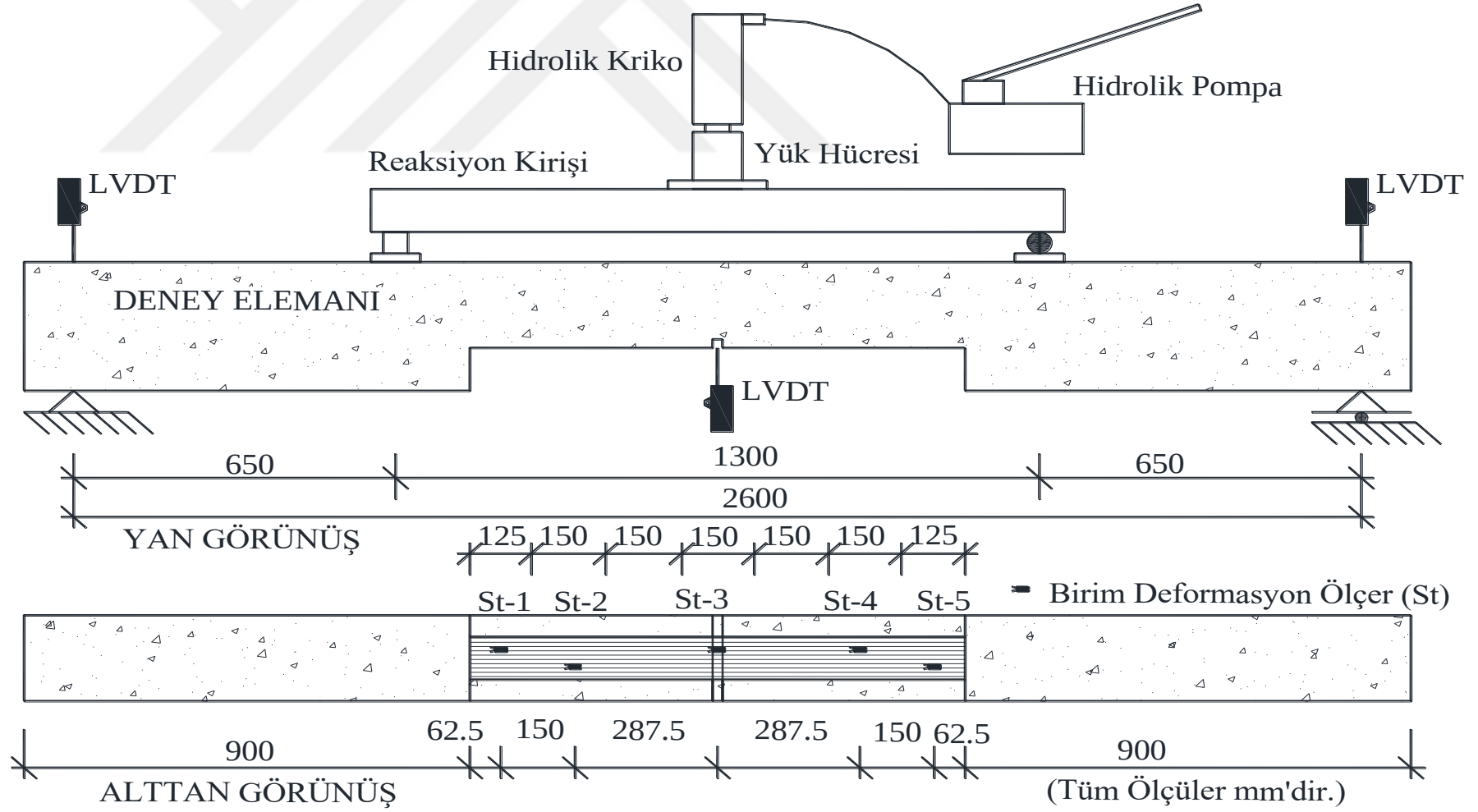
3.6. Deney ve Ölçüm Düzeni

Deneyisel çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.10’da verilmiştir. Deneyler, beton dökümünde olduğu gibi Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapılabilmesi için rijit bir deney düzeneği yapılmıştır. Bu düzenek 6 m boyunda HEB240 kiriş ve yükleme kolonu eklenmesiyle oluşturulmuştur. Deney elemanlarına yük 100 kN kapasiteli yük hücresi ile 1300 mm uzunluğundaki bir reaksiyon kirişi aracılığı ile uygulanmıştır (Şekil 3.9). Yükleme her çevrimde artırılarak tekrarlı olarak uygulanmıştır. Deney elemanında elektronik deplasman ölçüm aletleri (LVDT: Linear Variable Differential Transformer) ile orta nokta ve mesnetlerde deplasman ölçülmüştür. CFRP levha üzerinden beş adet birim

deformasyon ölçülmüştür. Birim deformasyon ölçerler levha uçlarında göçme beklendiğinden daha sık yerleştirilmiştir. Yükleme çekme donatısının aktığı veya CFRP şeridin göçtüğü ana kadar her çevrimde 5 kN artırılarak yük kontrollü, daha sonra ise deplasman kontrollü olarak devam ettirilmiştir. Kiriş elemanı sünek olarak tasarlandığından deplasman ölçerlerin sınır durumuna göre teste son verilmiştir.



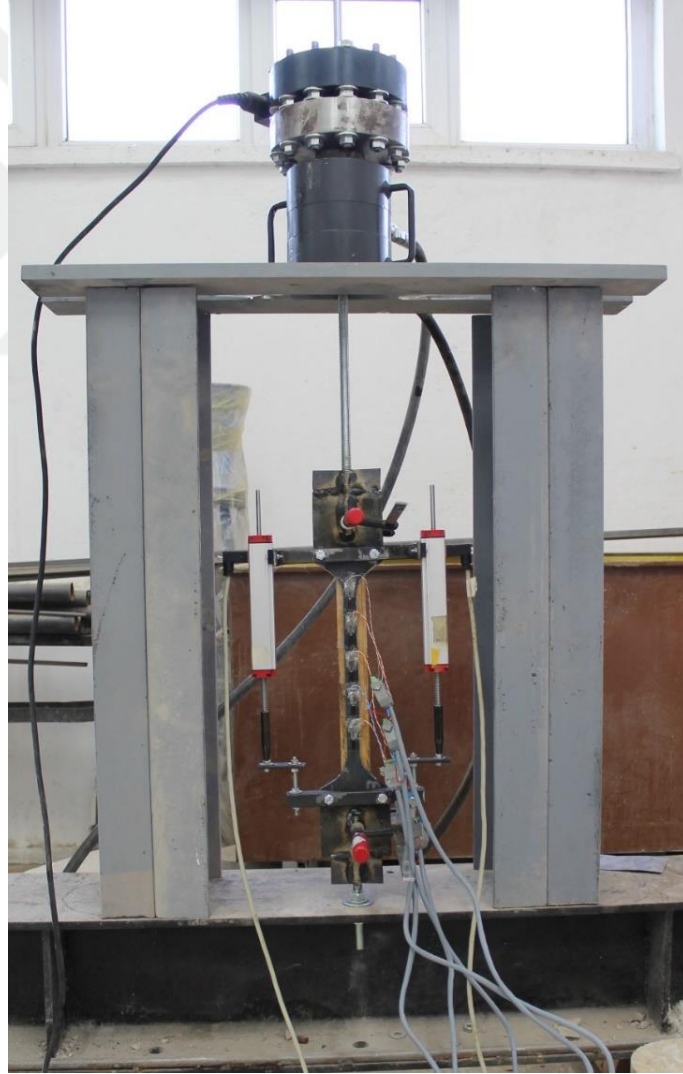
Şekil 3.9. Deney ve ölçüm düzeni.



Şekil 3.10. Deney ve ölçüm düzeni.

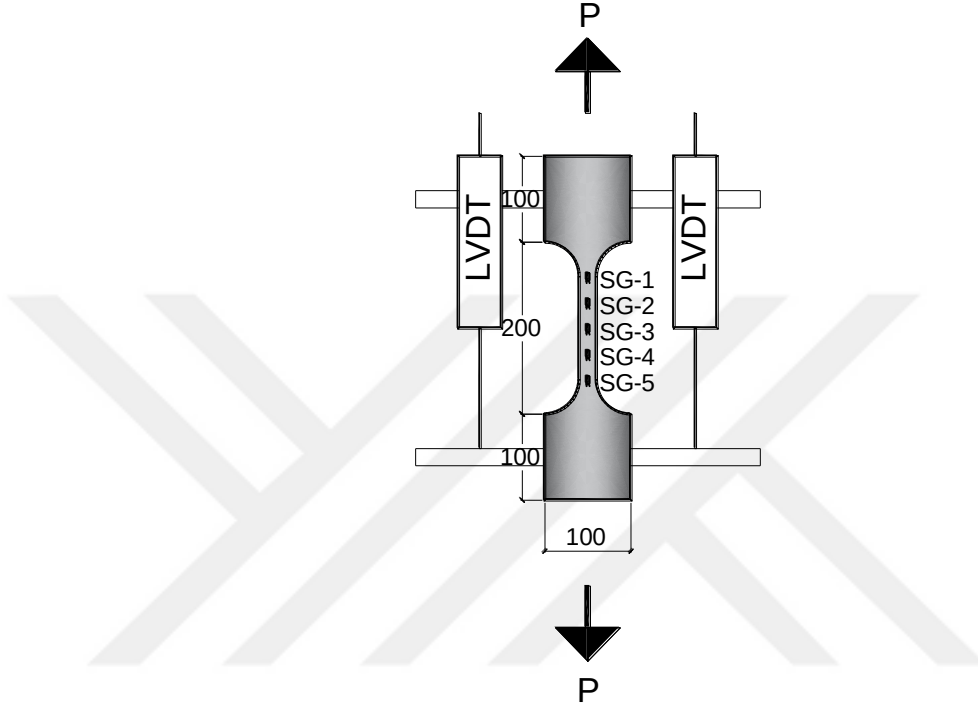
3.7. Birim Deformasyon Ölçüm Cihazlarının Kalibrasyonu

Birim deformasyon ölçüm cihazları (strain gauge) bir malzemeye yük uygulandığında malzemenin üzerinde meydana gelen deformasyonu ölçen sensördür. Birim deformasyon ölçerler genellikle metal film veya yarı iletken malzemelerden yapılmış ince bir şerit şeklindedir. Malzeme yüzeyinde oluşan deformasyon, birim deformasyon ölçüm cihazının üzerinde de bir gerilme oluşturur ve buna bağlı olarak yarı iletken maddenin elektriksel direncini de değiştirmiş olur. Bu değişkenlik mV (mili Volt) biriminde ölçülmektedir. LP levha üzerinde meydana gelen deformasyon ölçümü ile birim şekil değiştirme arasında bir bağıntı kurularak mV birimindeki ölçümler birim şekil değiştirmeye ($\epsilon = \Delta L/L$) dönüştürülmüştür.



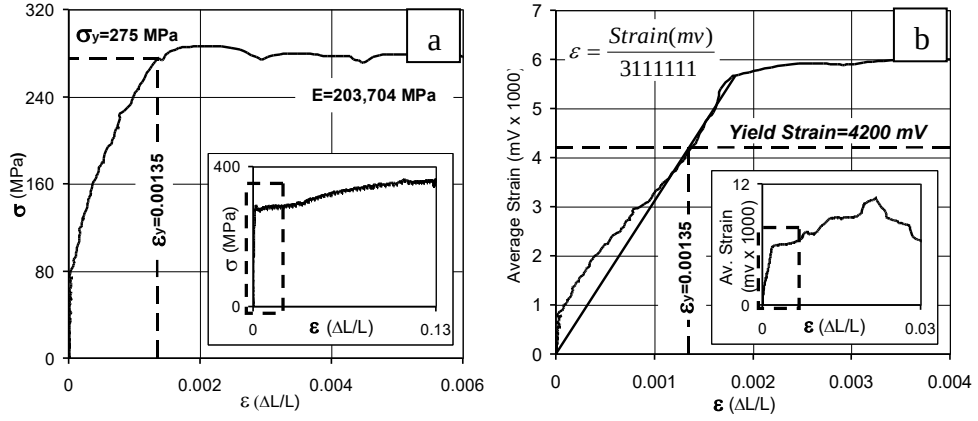
Şekil 3.11. Birim deformasyon kalibrasyonu için yapılan deney düzeneği.

Bu dönüşüm için yapılan deneysel çalışma düzeneği Şekil 3.11’da verilmiştir. Deneyde 400mm boyunda ve 100mm eninde düzgün kesitli, ST-37 sınıfında çelik plaka kullanılmıştır. Çelik plaka gövdesinde yüksek gerilimli bölge elde etmek için kesit düşürülmüştür. Çelik plaka gövdesi hassas bir şekilde 200mm uzunluğunda 20mm kesit genişliğine düşürülmüştür (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Deney düzeneğindeki çelik plaka şeması.

Plaka gövdesine 5 adet birim deformasyon ölçer yapıştırılmıştır. Plakadaki uzamaları tespit etmek için iki adet LVDT deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Deplasman ölçerden alınan değerler ilk boya bölünerek birim şekil değiştirme ($\epsilon = \Delta L / L$) hesaplanmıştır. Yapılan yüklemenin çelik plaka kesit alanına ($2\text{mm} \times 20\text{mm} = 40\text{mm}^2$) oranı ile plaka üzerindeki gerilmeler tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Gerilme- birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3.13.a.’da verilmiştir. Çelik plakanın akma gerilme değeri 275 MPa, akma birim uzama değeri 0,00135 mm/mm ve elastisite modülü 203.704 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.13. (a) Çelik Levha gerilme birim şekil değiştirme grafiği, (b) Birim Deformasyon ölçer (mV) birim şekil değiştirme grafikleri

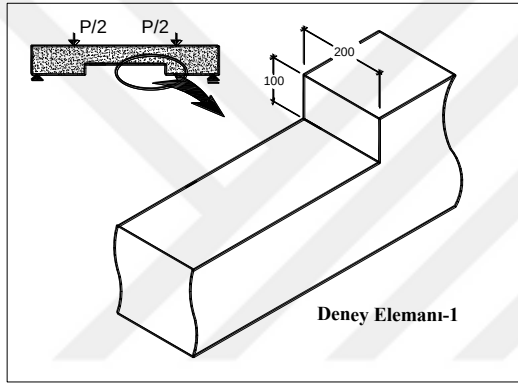
Çelik plaka gövdesine yapıştırılan 5 adet birim deformasyon ölçümü ile birimi miliVolt olan veriler ile birim uzamalar mukayese edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.13.b.'de grafikte verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi 5600 mV ve 0,0018 mm/mm birim şekil değiştirme değerinden sonra doğrusal davranıştan sapmaktadır. Bu durum birim deformasyon ölçerlerin çelik plaka yüzeyinden ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte akma mukavemeti Şekil 3.13.a.'da açıkça görülebilmektedir. Akmaya karşılık gelen gerilme, Şekil 3.13.b'de verildiği gibi, ölçümlerin doğrusal davranışla eşleştiği bölgede belirlenmiştir. Nihai olarak çekme etkisinde olan çelik plakanın 4.200 mV birim deformasyon değerinde aktığı ve bu anda birim şekil değiştirme değerinin 0,00135 olduğu görülmektedir. Deplasman ölçerlerden (LVDT) elde edilen birim şekil değiştirme ile birim deformasyon ölçerden elde edilen gerinim arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmıştır. Şekil 3.13.b'de akma anına gelen nokta ile orijin arasında kalan doğrunun eğimi ($5.600 \text{ mV} / 0,0018 = 3.111.111$) hesaplanmıştır.

LP levha üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden gelen mV birimindeki değerler 3.111.111 kat sayısına bölünerek birim şekil değiştirme hesaplanabilmektedir. Birim şekil değiştirme ile elastisite modülünün çarpılması ile LP levha üzerinde meydana gelen gerilmenin hesaplanması sağlanacaktır [52].

4. DENEYLER

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deney elemanlarının testleri anlatılmıştır. 5 kN artırılarak uygulanan yük çevrimleri deney elemanının göçmesine kadar devam ettirilmiştir. Yapılan deneylerin ayrıntıları, numunelerin yük çevrimleri sırasında sergiledikleri davranış biçimleri ve dikkati çeken ayrıntılar anlatılmıştır. Deneylerde yük deplasman grafikleri ve levha boyunca birim deformasyon değişim grafikleri verilmiştir. Deney elemanlarının testlerinde göçmeye kadar önemli görülen yük adımları için deney fotoğrafları her deneyin sonunda sunulmuştur.

4.1. Deney Elemanı-1



Deney elemanı tanımı: Kontrol Elemanı

LP Şerit Genişliği $W_f = 100\text{mm}$

İlave Katman: Yok

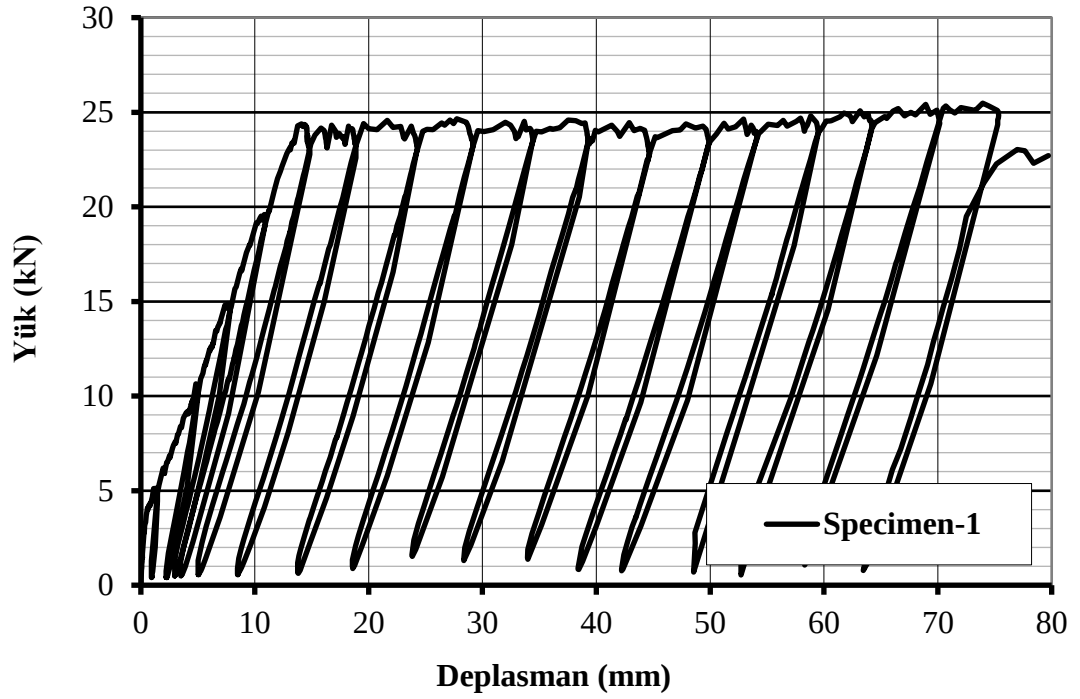
Ankraj Sayısı: Yok

Deney tarihi: 08.07.2010

1 Nolu deney elemanı LP levha ile güçlendirilmiş deney elemanları ile karşılaştırılmak üzere üretilmiş referans elemanıdır. Deney elemanın teste hazır hali Şekil 4.1’de verilmiştir. Deney Elemanına 18 yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanında ilk eğilme çatlakları 5 kN yük çevriminde sol çentik bölgesinde olmuştur. 10 kN yük çevriminde çok sayıda eğilme çatlakları oluşmuştur. 15 kN yük çevriminde tüm çentik bölgesine eğilme çatlakları yayılmıştır. 5. Yük çevrimi olan 25 kN yük çevriminde deney elemanı akmaya ulaşmıştır. 24 kN yük ve 19 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemeler yapılmıştır. Deney elemanı sünek bir davranış sergilemiştir. Deney elemanı eğilme çatlaklarının büyümesi üzerine yük kaybederek çökmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.1. Test için hazır Deney Elemanı 1.



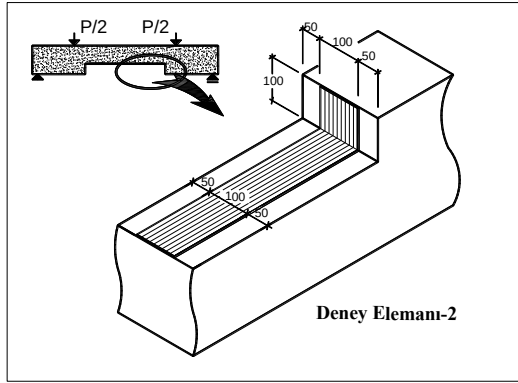
Şekil 4.2. Deney Elemanı-1 Yük-Deplasman grafiği

75 mm deplasman değerinde yükleme bitirilerek deney sonlandırılmıştır. Deney Elemanının yük altında göstermiş olduğu Yük-Deplasman performansı şekil 4.2’de verilmiştir.



şekil 4.3. Deney Elemanı-1’in test sırasında fotoğrafları.

4.2. Deney Elemanı-2



Deney elemanı tanımı: Ankrajsız

LP Şerit Genişliği $W_f = 100\text{mm}$

İlave Katman: Yok

Ankraj Sayısı: Yok

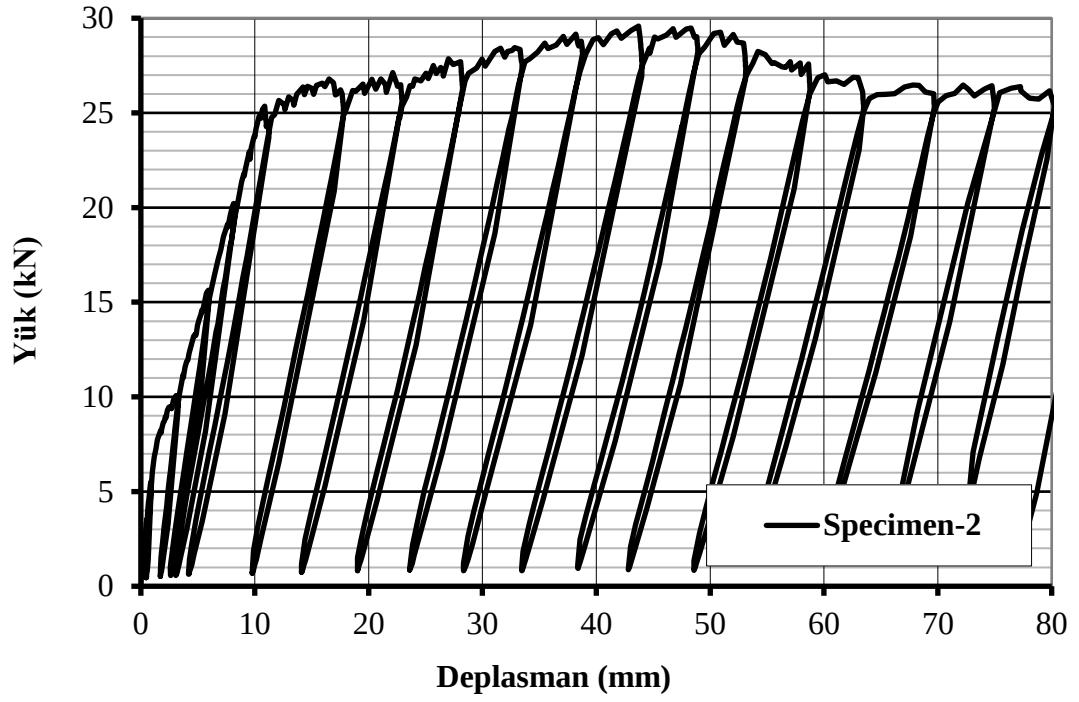
Deney tarihi: 01.03.2010

Deney Elamanı-2, kontrol kirişinin 100 mm genişliğinde LP şerit levhanın çentik içine yapıştırılması ile güçlendirilmiş şeklidir. Deney elemanın teste hazır hali Şekil 4.4'te verilmiştir.

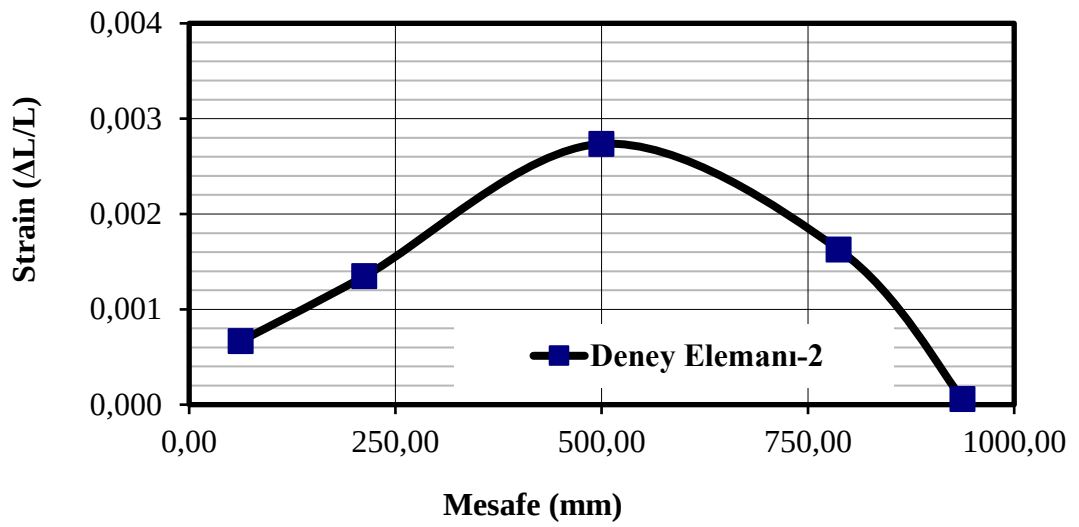


Şekil 4.4. Test için hazır Deney Elemanı-2.

Deney Elemanına 20 yük çevrimi uygulanmıştır. 25 kN yük mertebesine kadar olan çevrimlerde çentik içerisinde eğilme çatlağı oluşmamıştır. 5. Yük çevrimi olan 25 kN yük çevriminde deney elemanı akmaya başlamıştır. 26 kN yük ve 22 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemeler yapılmıştır.



Şekil 4.5. Deney Elemanı-2 Yük-Deplasman grafiği.



Şekil 4.6. Deney Elemanı-2 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.

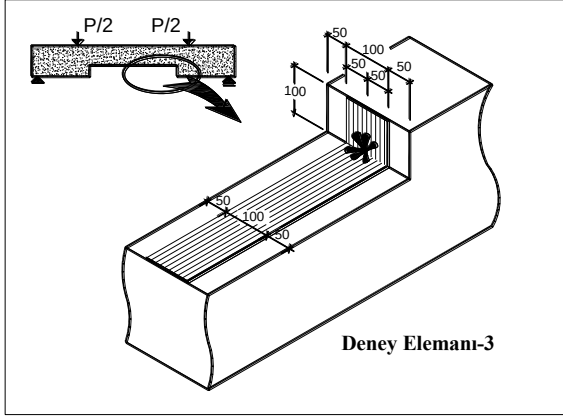
Akma sonrası kirişte LP levhanın etkisi ile deney elemanında yük artışı gözlemlenmiştir. Deney elemanı sünek bir davranış sergilemiştir. Maksimum yük düzeyine ulaşıldığında LP levha sadece uç bölgesinde betondan ayrılmıştır. Çentik bölgesinin sol ucunda LP levha beton yüzeyinden ayrılarak deney elemanı göçmüştür (Şekil 4.7). Deney Elemanının yük altında göstermiş olduğu Yük-Deplasman performansı

Şekil 4.5’de verilmiştir. LP levha üzerinden beş adet birim deformasyon ölçülmüştür. Birim deformasyon ölçerler levha uçlarında göçme beklendiğinden daha sık yerleştirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.7. Deney Elemanı-2'nin test sırasında fotoğrafları.

4.3. Deney Elemanı-3



Deney elemanı tanımı: Tek Fan Ankrajlı

LP Şerit Genişliği $W_f = 100\text{mm}$

İlave Katman: Yok

Ankraj Sayısı: 1

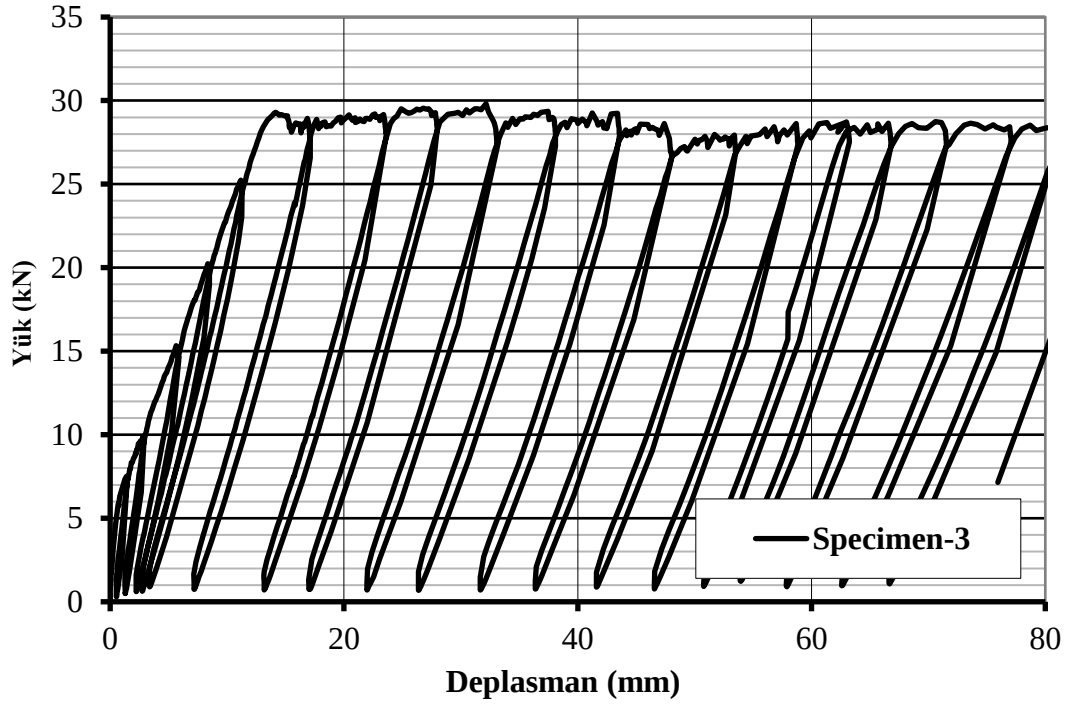
Deney tarihi: 04.11.2010

Deney Elemanı-3, Deney Elemanı-2'ye benzer şekilde tasarlanmış olup LP şeritin uc bölgeden kopmasını engelleme amacıyla 1 adet fan ile sabitlenmiş olan deney elemanıdır. Deney elemanın teste hazır hali Şekil 4.8'de verilmiştir.

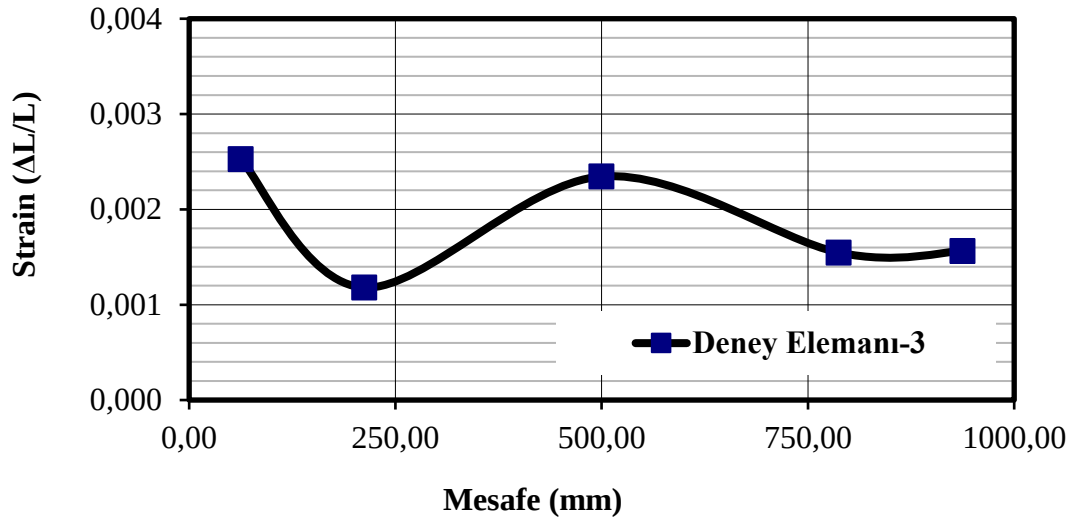
Deney Elemanına 19 yük çevrimi uygulanmıştır. 30 kN yük mertebesine kadar olan yük kontrollü bir şekilde her çevrimde 5 kN artırılarak yapılan çevrimlerde çentik içinde kılcal düzeyde eğilme çatlağı oluşmuştur. 30 kN yük çevriminde deney elemanı akmaya başlamıştır. 29 kN yük ve 14 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemeler yapılmıştır. Deney Elemanı başlangıç rijitliğinde artış gözlemlenmiştir. Deney elemanı sünek bir davranış sergilemiştir.



Şekil 4.8. Test için hazır Deney Elemanı-3.



Şekil 4.9. Deney Elemanı-3 Yük-Deplasman grafiği.

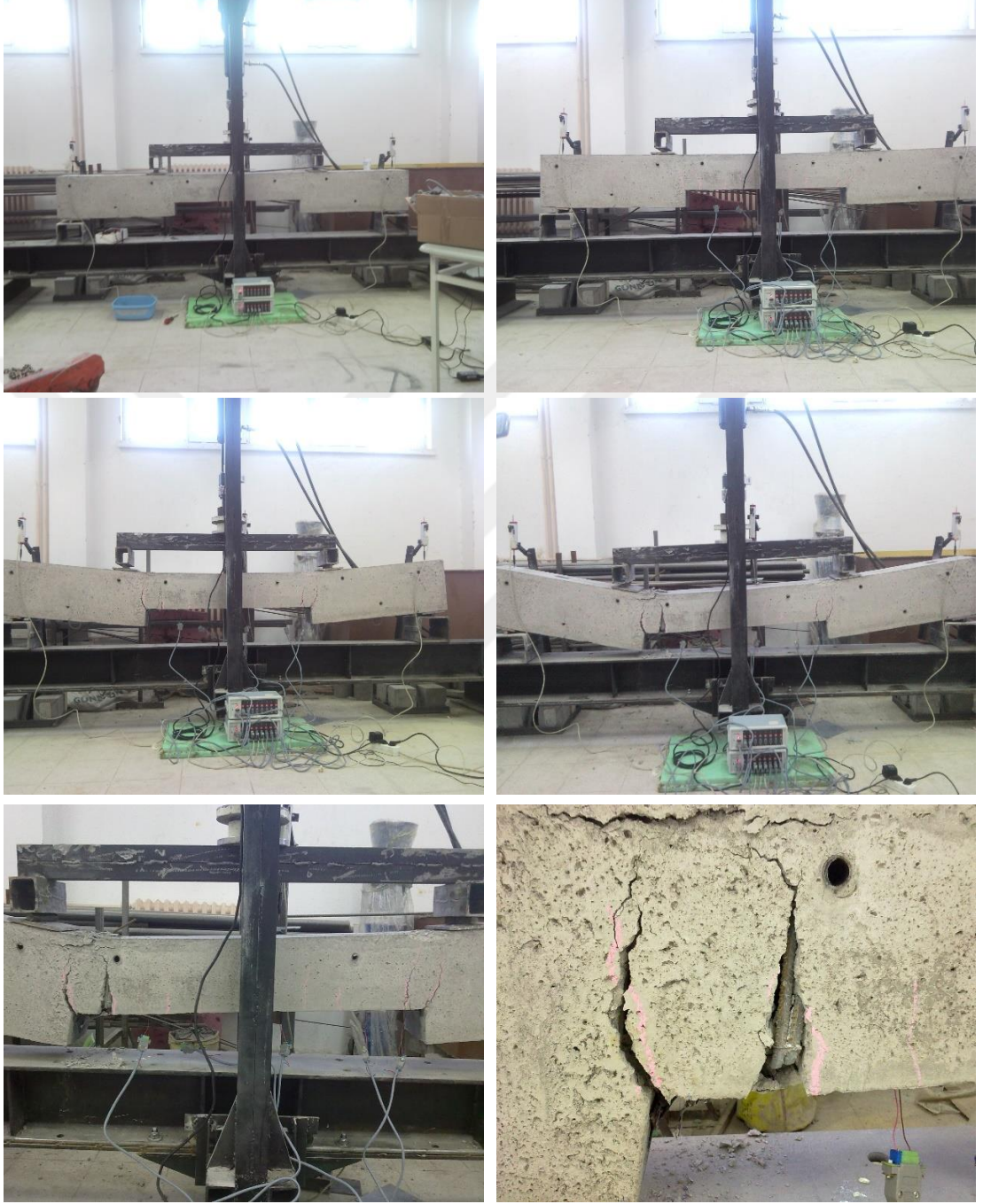


Şekil 4.10. Deney Elemanı-3 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı

Deney Elemanı-2’de olduğu gibi sadece uç bölgede LP levha betonarme yüzeyden ayrılarak göçme gerçekleşmiştir (Şekil 4.11).

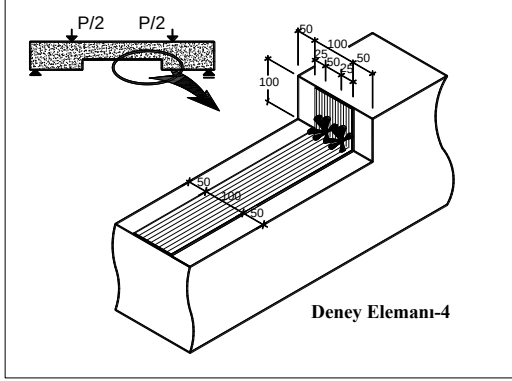
Deney Elemanının yük altında göstermiş olduğu Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.9’de verilmiştir. LP levha üzerinden beş adet birim deformasyon ölçümü yapılmıştır. LP

şeritin kopmasının gerçekleştiği sol uçta 0,002526 birim şekil değiştirme ($\epsilon=\Delta L/L$) ölçüm yapılmıştır. Eğilmenin en çok olmasının beklenildiği kiriş orta bölgesinde benzer bir sonuç ile 0,002345 birim şekil değiştirme ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.11. Deney Elemanı-3'ün test sırasında fotoğrafları.

4.4. Deney Elemanı-4



Deney elemanı tanımı: Çift Fan Ankrajlı

LP Şerit Genişliği $W_f = 100\text{mm}$

İlave Katman: Yok

Ankraj Sayısı: 2

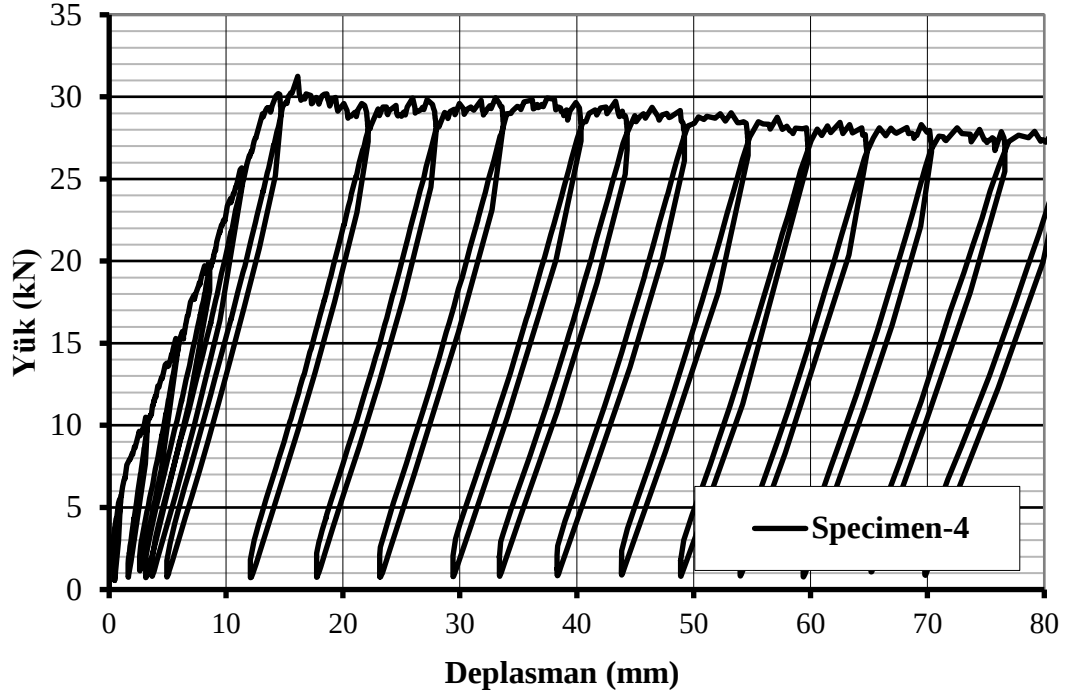
Deney tarihi: 25.10.2010

Deney Elemanı-4, Deney Elemanı-3'te bulunan tek ankraj sayısının 2'ye çıkarılarak LP levha uç bölge kopma davranışının araştırılmasını yapmak üzere tasarlanan deney elemanıdır. Deney elemanın teste hazırlanan hali Şekil 4.12'de verilmiştir.

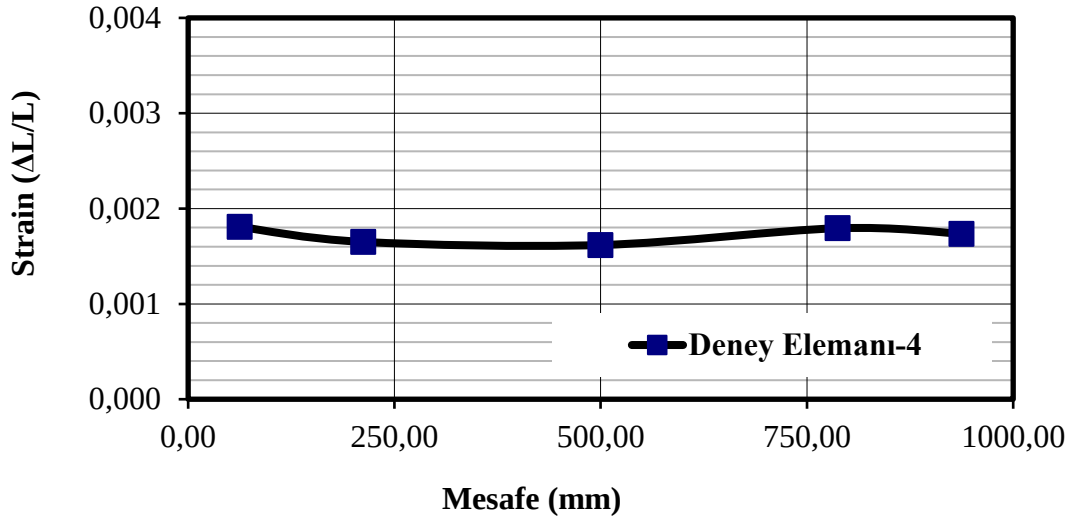
Deney Elemanına 18 yük çevrimi uygulanmıştır. 31 kN yük çevriminde deney elemanı akmaya başlamıştır. 31 kN yük ve 16 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemeler yapılmıştır. Deney Elemanı 50 mm aralıklı yapılan ankrajların arasında kalan LP levhanın yırtılması ve ankrajın kopmasıyla göçmüştür (Şekil 4.15).



Şekil 4.12. Test için hazırlanan Deney Elemanı-4.

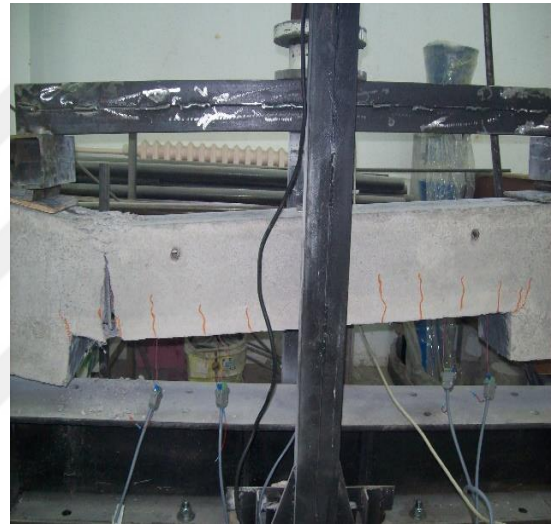
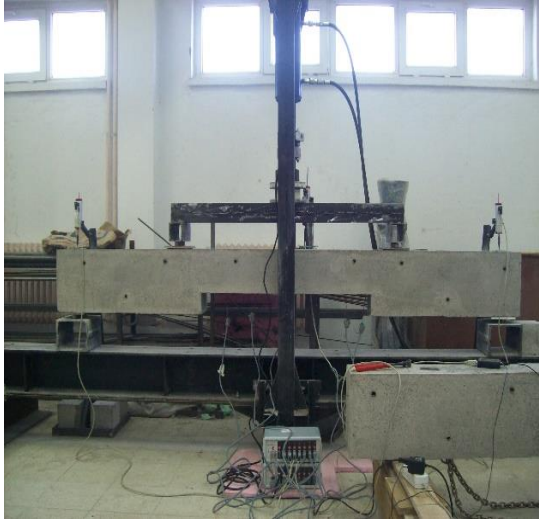


Şekil 4.13. Deney Elemanı-4 Yük-Deplasman grafiği.



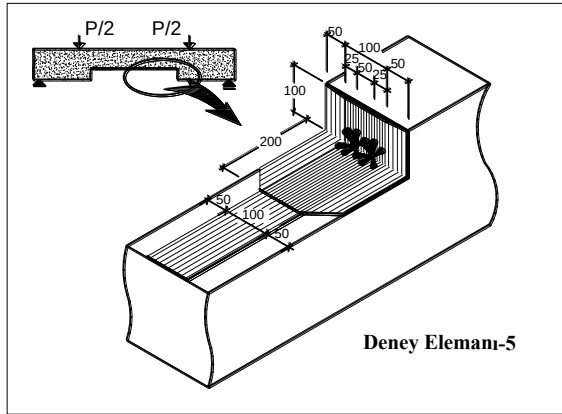
Şekil 4.14. Deney Elemanı-4 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.

Deney Elemanının Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir. LP levha üzerinden beş adet birim deformasyon ölçümü yapılmıştır. LP şeritin kopmasının gerçekleştiği sol uçta 0,001808 birim şekil değiştirme ($\epsilon = \Delta L/L$) ölçüm yapılmıştır. Kiriş orta bölgesinde 0,001618 birim şekil değiştirme ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.15. Deney Elemanı-4'ün test sırasında fotoğrafları.

4.5. Deney Elemanı-5



Deney elemanı tanımı: Çift fan ankrajlı ve ilave katman yapıştırılması

LP Şerit Genişliği $W_f = 100\text{mm}$

İlave Katman: Var

Ankraj Sayısı: 2

Deney tarihi: 31.03.2011

Deney Elemanı-5,6,7,8 nolu deney elemanlarında LP uç bölgelerine 210mm x 200mm boyutlarında fan ankraj üzerine ilave CRFP katman yapıştırılması ile elde edilen deney elemanıdır.

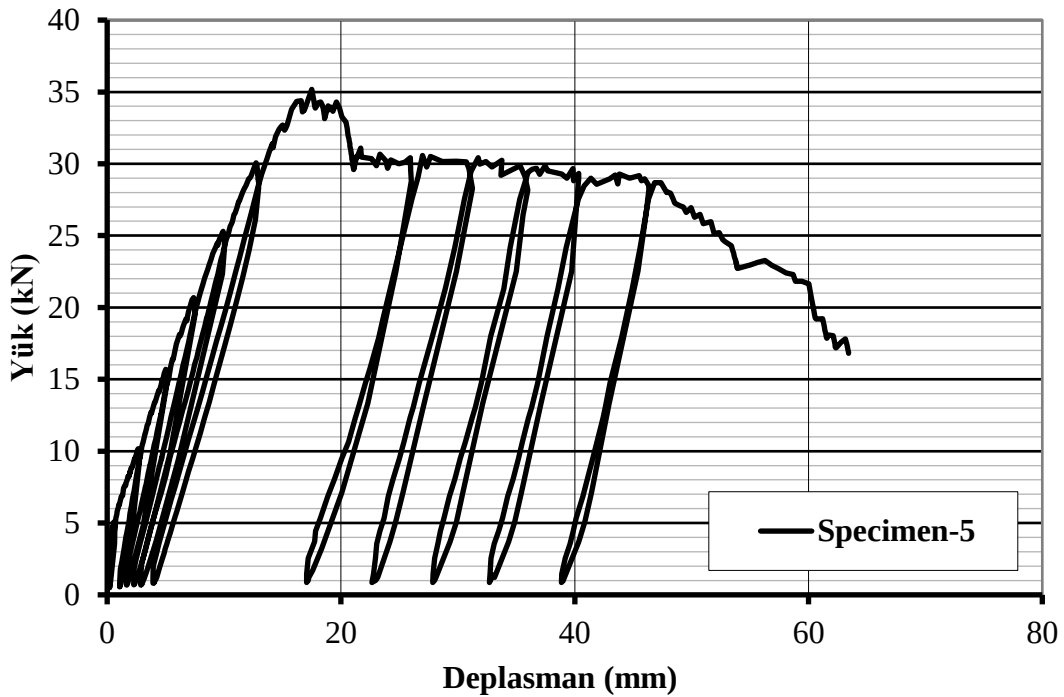


Şekil 4.16. Test için hazır Deney Elemanı-5.

Deney Elemanı-5, 100mm LP şerit genişliğinde, çift fan ankraj ve uç bölge kopmasının engellenmesi amacıyla ilave katmanla güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney için hazırlanan kiriş Şekil 4.16'da verilmiştir. Deney Elemanına 14 yük çevrimi

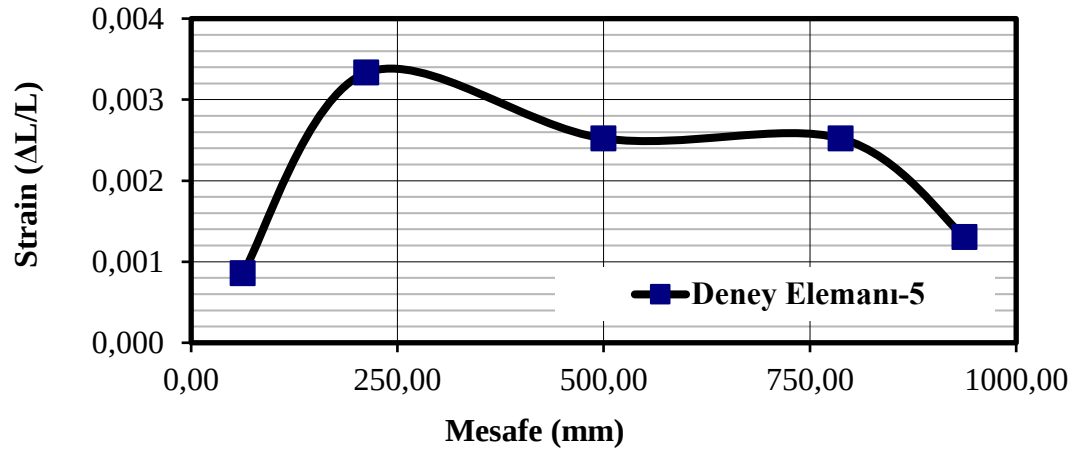
uygulanmıştır. Her çevrimde 5 kN artırılarak yapılan yük kontrollü çevrimler 35 kN yük olan 7. çevrime kadar devam etmiştir.

5 kN artırılarak yapılan çevrimlerde çentik içinde kılcal düzeyde eğilme çatlağı oluşmuş ve her çevrimde çatlak genişliğinde artış gözlemlenmiştir. 35 kN yük çevriminde deney elemanı akmaya başlamıştır. Maksimum 35 kN yük düzeyinde ve 16 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemelere devam edilmiştir. Deney Elemanı başlangıç rijitliğinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Deney elemanı maksimum yük düzeyi sonrası bir miktar güç kaybederek sünek bir davranış sergilemiştir. Deney Elemanı çentik içinde sağ uçta LP levhanın betondan ayrılma gözlemlenmiştir. LP levhanın yırtılması ve ankrajların kopmasıyla deney elemanı göçmüştür (Şekil 4.19). LP şerit, çentiğin sağ uç bölgesinde ayrılmış, diğer bölgelerde ayrılma gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.17. Deney Elemanı-5 Yük-Deplasman grafiği.

Deney Elemanının Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir. LP şeritin ayrıldığı sol orta açıklıkta 0,003333 birim şekil değiştirme ($\epsilon=\Delta L/L$) ölçüm yapılmıştır. Kiriş orta bölgesinde 0,002522 birim şekil değiştirme ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.18).

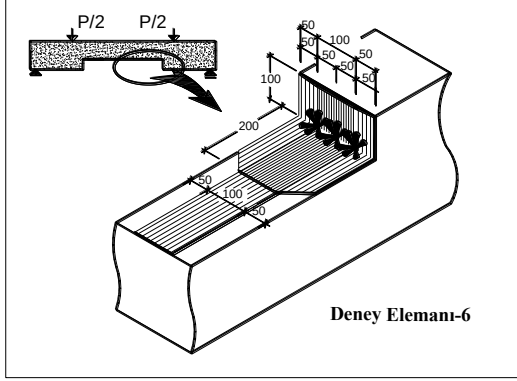


Şekil 4.18. Deney Elemanı-5 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.



Şekil 4.19. Deney Elemanı-5'in test sırasında fotoğrafları.

4.6. Deney Elemanı-6



Deney elemanı tanımı: Üç fan ankrajlı ve ilave katman yapıştırılması

LP Şerit Genişliği $W_f = 100\text{mm}$

İlave Katman: Var

Ankraj Sayısı: 3

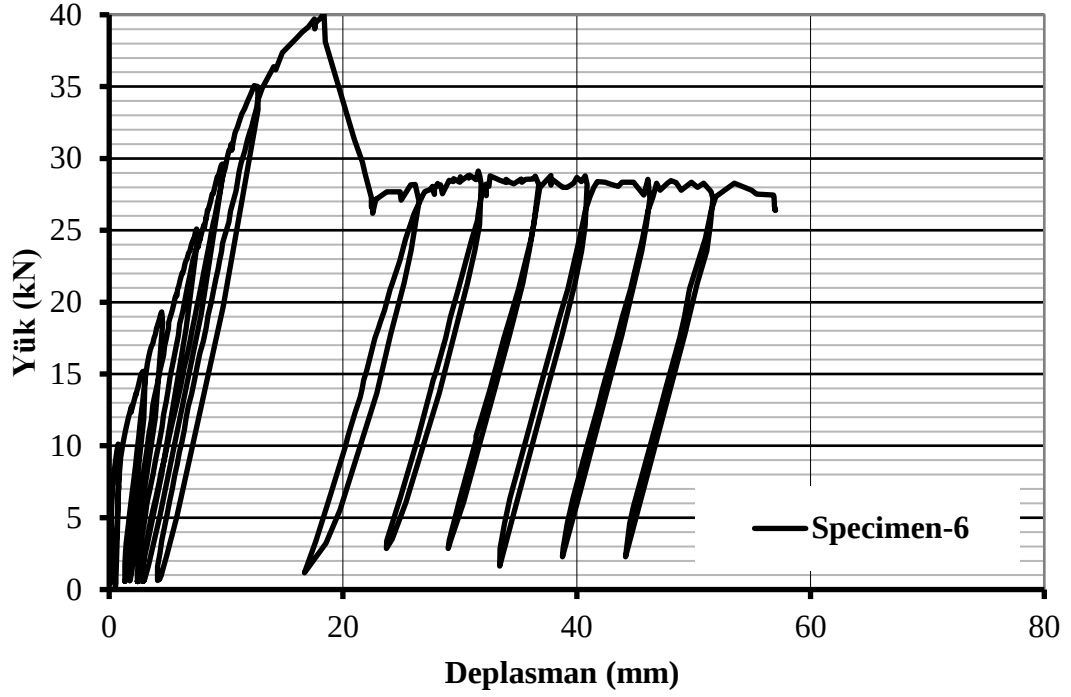
Deney tarihi: 17.04.2011

Deney Elemanı-6, deney elemanı-5’de bulunan 2 adet ankraj sayısının 50 mm aralıklarla 3 adet fan ankraj yapıldığı deney elemandır. Deney için hazırlanan kiriş Şekil 4.20’de verilmiştir.

Deney Elemanına 14 yük çevrimi uygulanmıştır. Her çevrimde 5 kN artırılarak yapılan yük kontrollü çevrimler 40 kN yük olan 8. çevrime kadar devam etmiştir. 5 kN artırılarak yapılan çevrimlerde çentik içinde kılcal düzeyde eğilme çatlakları oluşmuş ve her çevrimde çatlak genişliğinde artış gözlemlenmiştir. 40 kN yük çevriminde deney elemanı akmaya başlamıştır. Maksimum 40 kN yük düzeyinde ve 18 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemelere devam edilmiştir. Deney elemanı maksimum yük düzeyi sonrası bir miktar güç kaybederek sünek bir davranış sergilemiştir.

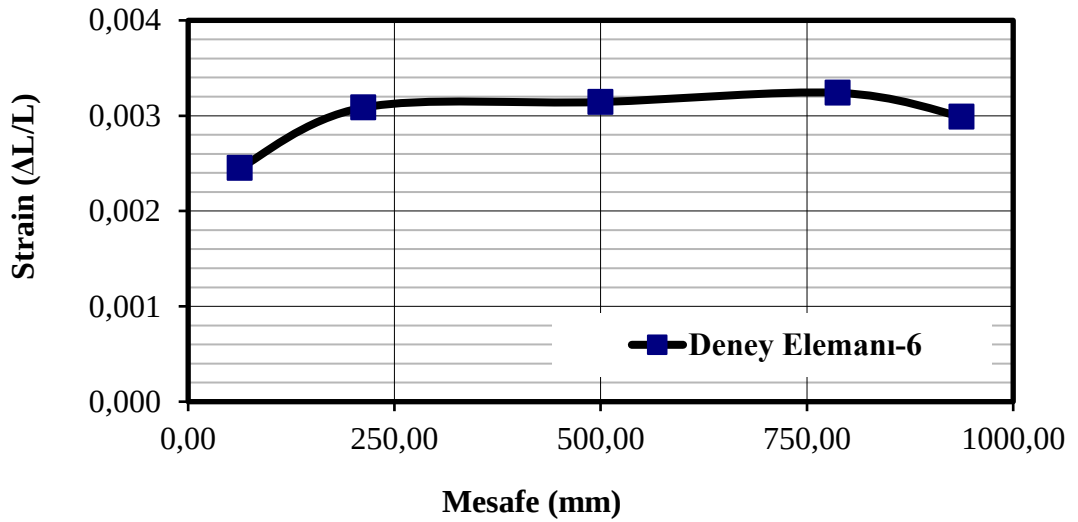


Şekil 4.20. Test için Hazırlanan Deney Elemanı-6



Şekil 4.21. Deney Elemanı-6 Yük-Deplasman Grafiği.

Deney Elemanı-6, ankrajların şeritle beton arasındaki yüzeyden kopmasıyla göçmüştür (Şekil 4.23). Levha veya ilave katman yırtılmamıştır. Deney Elemanının Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.21’da verilmiştir.



Şekil 4.22. Deney Elemanı-6 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.

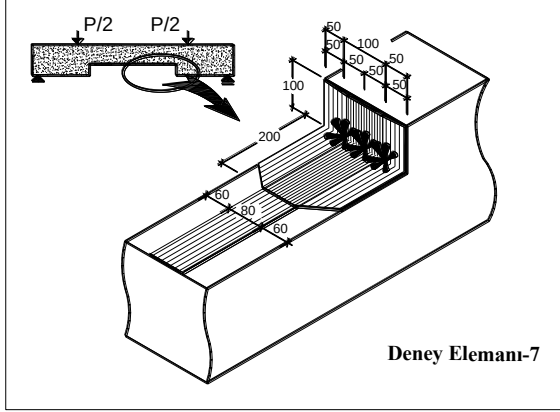
Birim deformasyonlar Deney Elemanı-6’da şerit boyunca dengeli dağılmıştır. Gerilmelerin diğer deney elemanlarına göre artış kaydettiği görülmüştür. LP şeritin

ayrıldığı sağ orta açıklıkta 0,003240 birim şekil değiştirme ($\epsilon=\Delta L/L$) ölçüm yapılmıştır. Kiriş orta bölgesinde 0,003144 birim şekil değiştirme ölçüm yapılmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.23. Deney Elemanı-6'nın test sırasında fotoğrafları.

4.7. Deney Elemanı-7



Deney elemanı tanımı: Üç fan ankrajlı ve ilave katman yapıştırılması

LP Şerit Genişliği $W_f = 80\text{mm}$

İlave Katman: Var

Ankraj Sayısı: 3

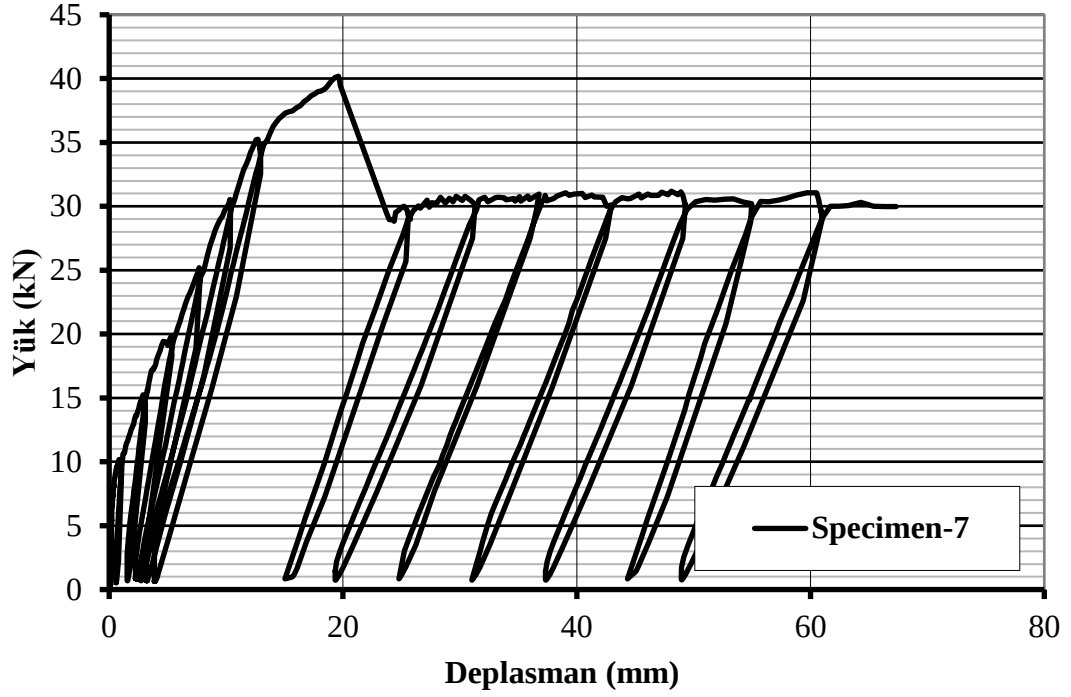
Deney tarihi: 02.05.2011

Deney Elemanı-7, göçmenin LP şeritin gövdesinde olması amacıyla şerit genişliğinin 80mm'ye düşürüldüğü deney elemanıdır. Deney için hazırlanan kiriş Şekil 4.24'de verilmiştir.

Deney Elemanına 15 yük çevrimi uygulanmıştır. Yük kontrollü çevrimler kirişin akmaya başladığı 40 kN kapasitesine kadar her çevrimde 5 kN artırılarak devam etmiştir. Her çevrim döngüsünde çentik iç bölgesinde eğilme çatlaklarının artışı gözlemlenmiştir. Maksimum 40 kN yük düzeyinde ve 20 mm deplasman ile deney elemanında gözlemlenen akma sonrası deplasman kontrollü yüklemelere devam edilmiştir. Deney elemanı maksimum yük düzeyi sonrası bir miktar güç kaybetmiş ve 60mm deplasman ile sünek bir davranış sergilemiştir.

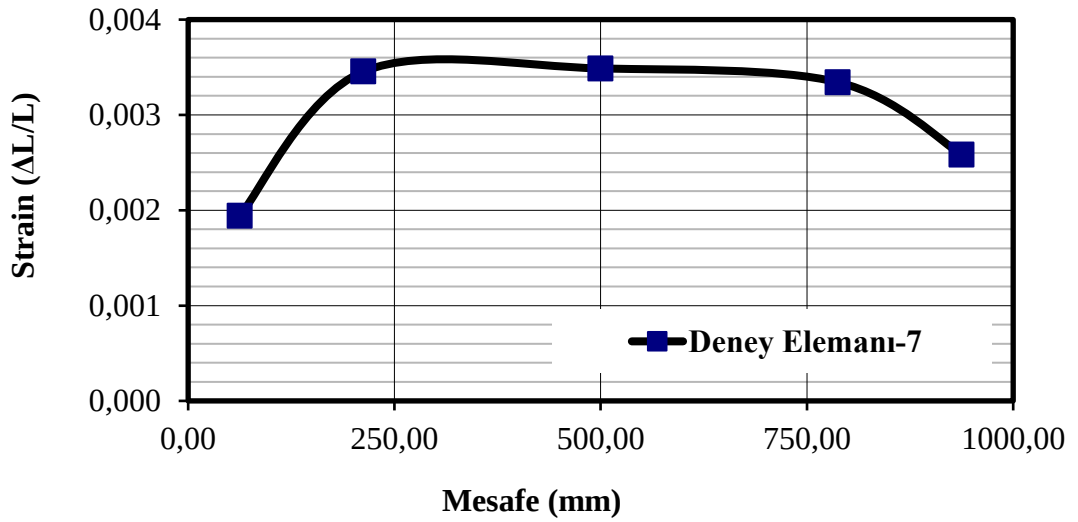


Şekil 4.24. Test için hazırlanan Deney Elemanı-7.



Şekil 4.25. Deney Elemanı-7 Yük-Deplasman grafiği.

Deney Elemanı-7, Deney Elemanı-6'ya benzer bir davranış göstererek ankrajların şeritle beton arasındaki yüzeyden kopmasıyla göçmüştür (Şekil 4.27). Levha veya ilave katman yırtılmamıştır. Deney Elemanının Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.25'de verilmiştir.



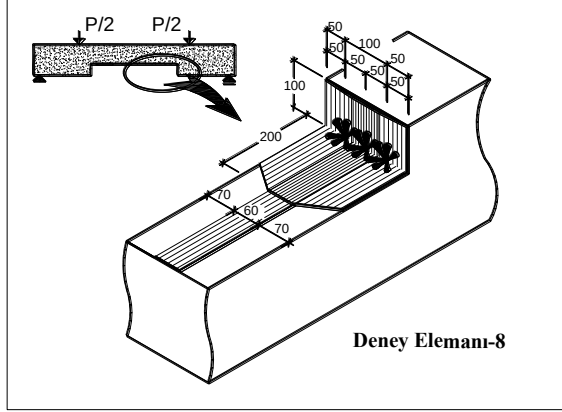
Şekil 4.26. Deney Elemanı-7 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.

Birim deformasyonlar Deney Elemanı-7’da uç bölgelerde düşmesine rağmen iç kesitte yüksek ve benzer bir performans göstermiştir. LP şeritin ayrıldığı sağ uçta 0,001040 birim şekil değiştirme ($\epsilon=\Delta L/L$) ölçüm yapılmıştır. Kiriş orta bölgesinde 0,003488 birim şekil değiştirme ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.26).



Şekil 4.27. Deney Elemanı-7'in test sırasında fotoğrafları.

4.8. Deney Elemanı-8



Deney elemanı tanımı: Üç fan ankrajlı ve ilave katman yapıştırılması

LP Şerit Genişliği $W_f = 60\text{mm}$

İlave Katman: Var

Ankraj Sayısı: 3

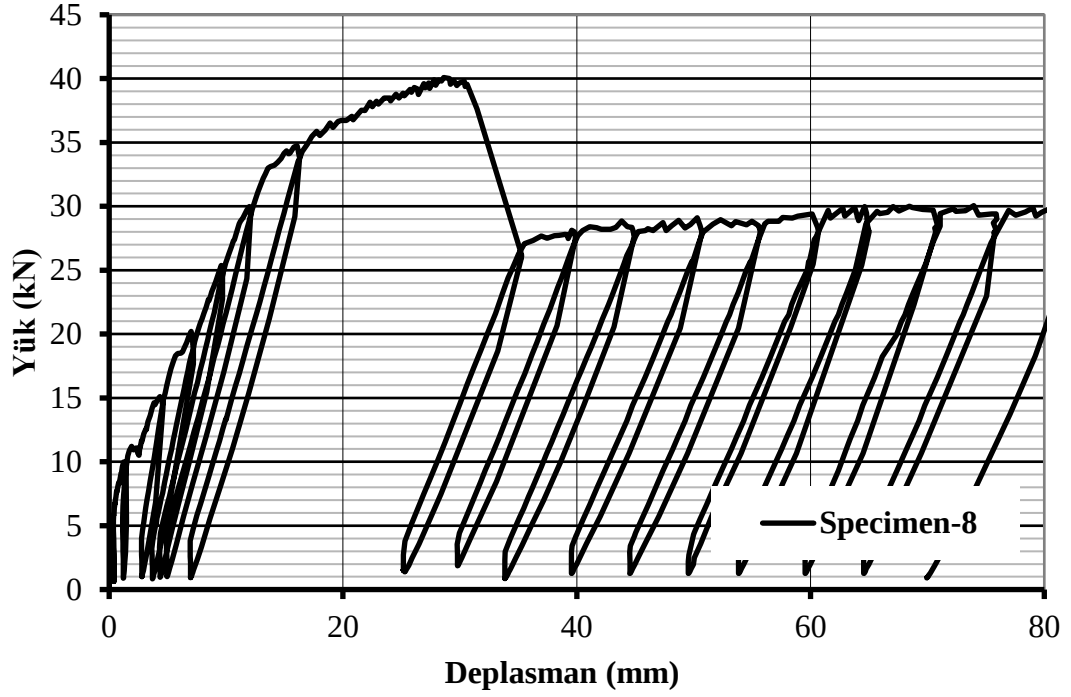
Deney tarihi: 23.05.2011

Deney Elemanı-8, Deney Elemanı-7’de olduğu gibi 3 fan ankraj ve LP şerit ucuna ilave katman yapıştırıldığı sadece LP levhayı daha etkin kullanma adına genişliğinin 60mm düşürüldüğü deney elemanıdır. Deney için hazırlanan kiriş Şekil 4.28’de verilmiştir.

Deney Elemanına 17 yük çevrimi uygulanmıştır. Yük kontrollü çevrimler kirişin akmaya başladığı 40 kN kapasitesine kadar her çevrimde 5 kN artırılarak devam etmiştir. Her çevrim döngüsünde çentik iç bölgesinde eğilme çatlaklarının arttığı gözlemlenmiştir. Deney Elemanı-6’ya göre akmanın başladığı deplasman değeri artmıştır. Maksimum 40 kN yük düzeyinde ve 30 mm deplasman değeri ölçülmüştür.

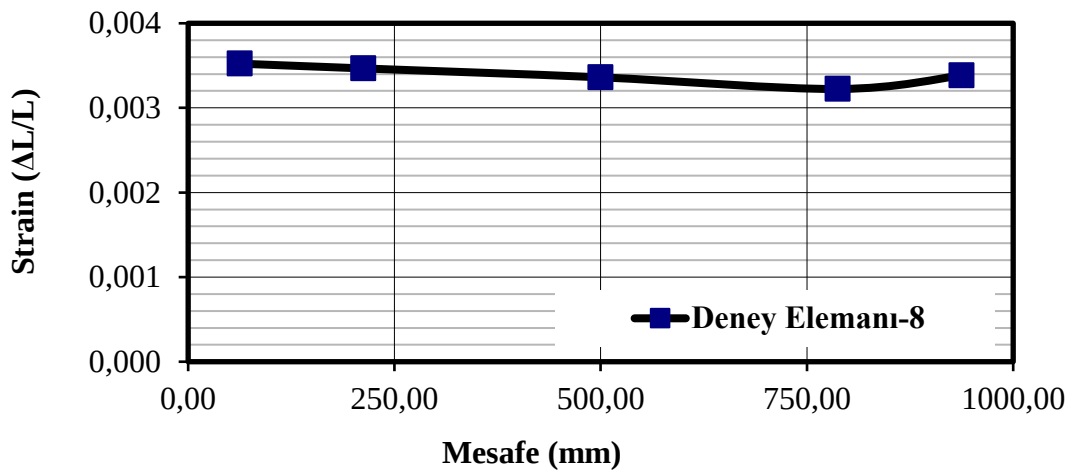


Şekil 4.28. Test için hazırlanan Deney Elemanı-8.



Şekil 4.29. Deney Elemanı-8 Yük-Deplasman grafiği.

Akma sonrası deplasman kontrollü yüklemelere devam edilmiştir. Deney elemanı maksimum yük düzeyi sonrası bir miktar güç kaybetmiş ve sünek bir davranış sergilemiştir. Maksimum yük düzeyinde LP şerit boydan boya beton yüzeyinden ayrılmıştır. Göçme ise ortadaki CFRP ankrajının kopması ve ilave katman olarak yapıştırılan levhanın iki tarafından yırtılmasıyla gerçekleşmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.30. Deney Elemanı-8 üzerindeki CFRP şeritin gerilme dağılımı.

Deney Elemanı-8'de birim deformasyonlar incelendiğinde LP şerit boyunca gerilmelerin oldukça yüksek ve dengeli dağıldığı görülmüştür. LP şeritin ayrıldığı sol uçta 0,003523 birim şekil değiştirme ($\epsilon=\Delta L/L$) ölçüm yapılmıştır. Kiriş orta bölgesinde 0,003361 birim şekil değiştirme ölçüm yapılmıştır (Şekil 4.30).



Şekil 4.31. Deney Elemanı-8'in test sırasında fotoğrafları.

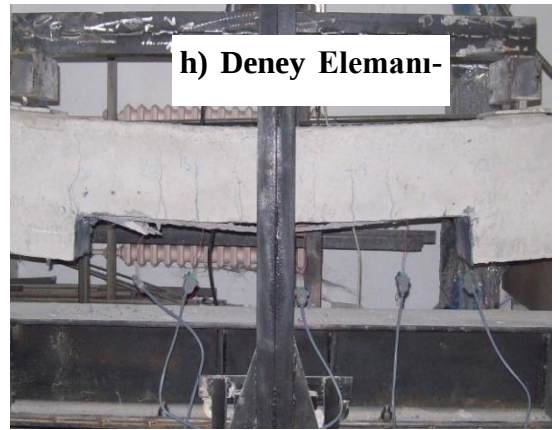
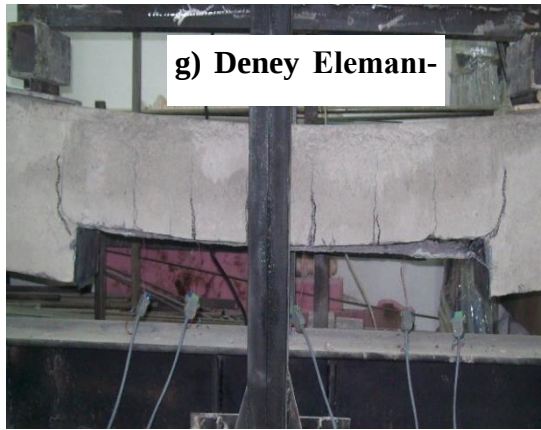
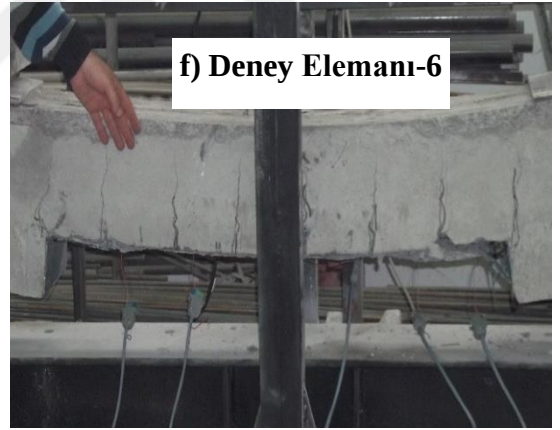
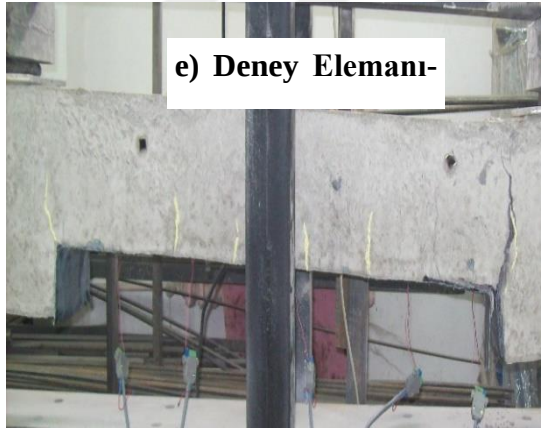
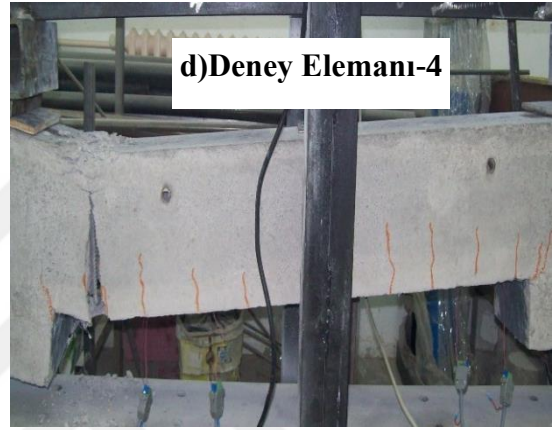
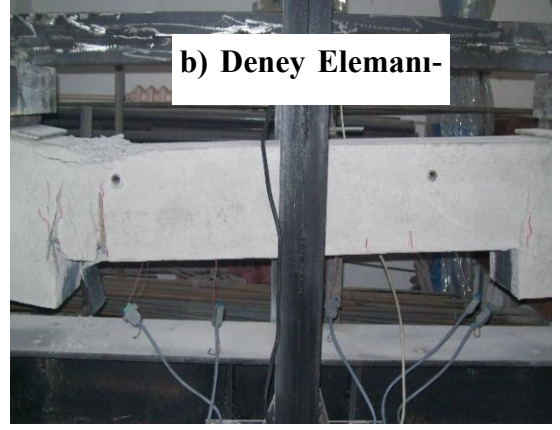
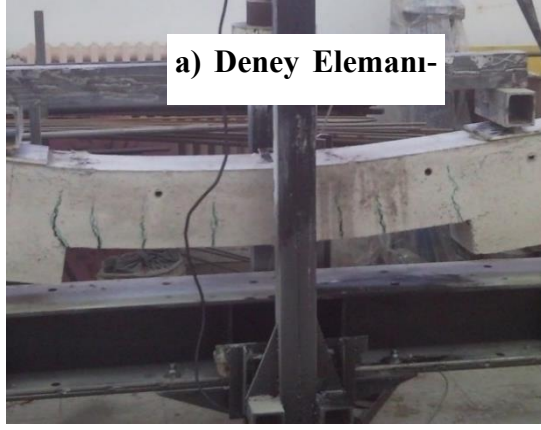
5. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde yapılan deneylere ait değerlendirmeler yapılmıştır. Deneyssel çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. Değerlendirmeler yük, rijitlik ve CFRP şeritte gözlemlenen göçme modu göz önüne alınarak yapılmıştır. CRFP levhalar, tipik olarak ani bir kırılma ile karakterizedir. Bu sebeple sünek bir davranış sergilemezler ve düşük enerji emme kapasitesindedirler. Bundan dolayı süneklik ve enerji tüketimi gibi veriler değerlendirilmemiştir. Deney elemanlarına ait göçme şekilleri Şekil 5.1’de verilmiştir.

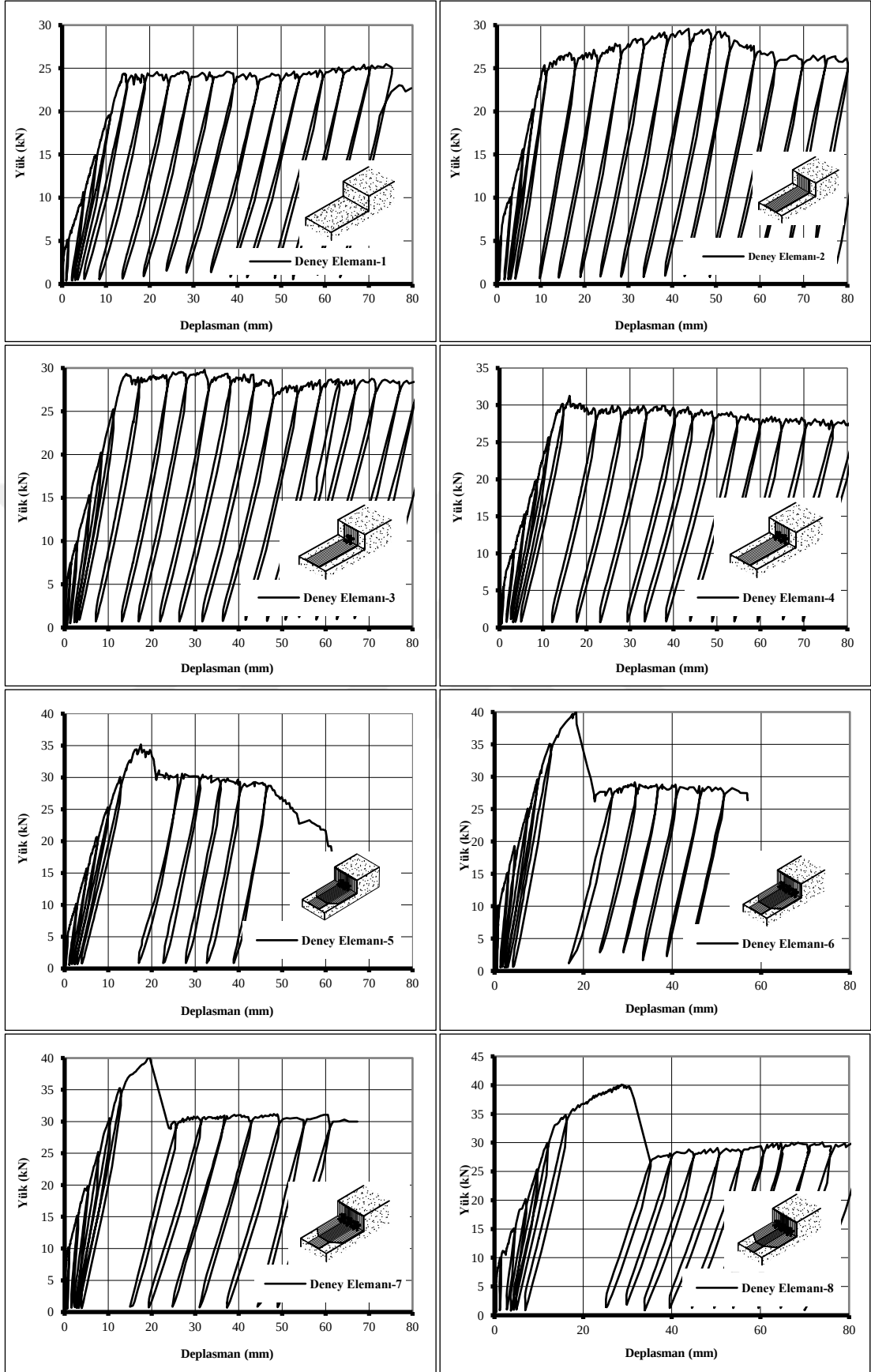
Deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Deney elemanlarına ait birleştirilmiş Yük-Deplasman Grafiği Şekil 5.3’de verilmiştir. CFRP şeritlerin gerilme dağılımı Şekil 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneyssel sonuçlar.

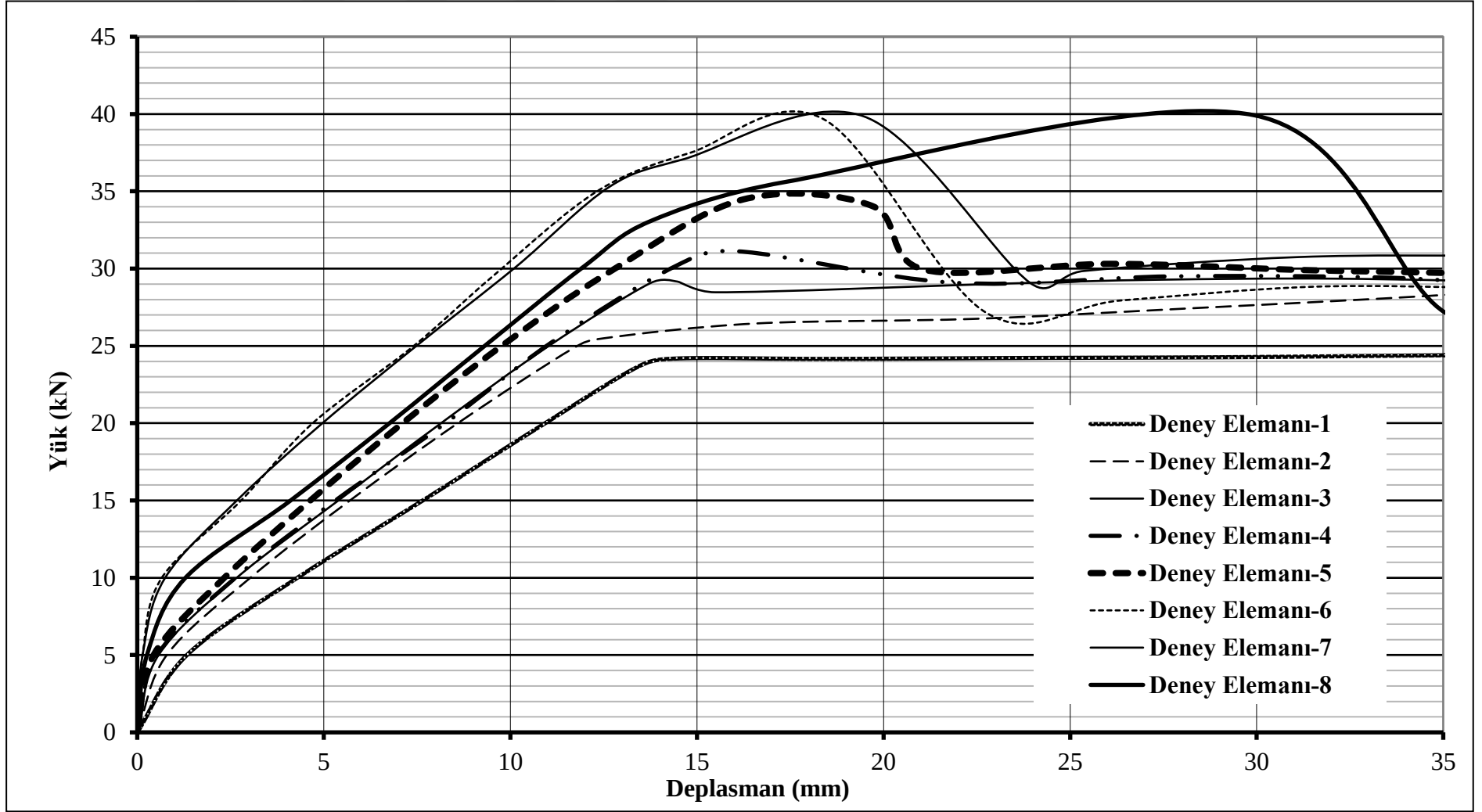
Deney Elemanı	Yük (kN)		Rijitlik (kN/mm)				Göçme Modu
	Max.	Oran*	Başlangıç	Oran**	Maksimum yükte	Oran**	
1	24	-	4,39	-	1,75	-	Eğilme
2	25	1,04	8,17	1,9	2,10	1,2	CFRP'nin yüzeyden ayrılması
3	29	1,21	13,14	3,0	2,10	1,2	CFRP ankrajın kopması
4	31	1,29	14,65	3,3	2,05	1,2	CFRP ankrajların kopması ve levhanın yırtılması
5	35	1,46	19,04	4,3	2,15	1,2	CFRP ankrajın kopması
6	40	1,67	51,47	11,7	2,32	1,3	CFRP ankrajın kopması
7	40	1,67	49,30	11,2	2,17	1,2	CFRP ankrajın kopması
8	40	1,67	30,34	6,9	1,43	0,8	CFRP ankrajın kopması ve levhanın yırtılması
* Oran= Deney Elemanının Maksimum Düşey Yük Değeri / Deney Elemanı-1 Maksimum Düşey Yük Değeri							
**Oran= Deney Elemanının Rijitlik Değeri / Deney elemanı-1'in Rijitlik Değeri							



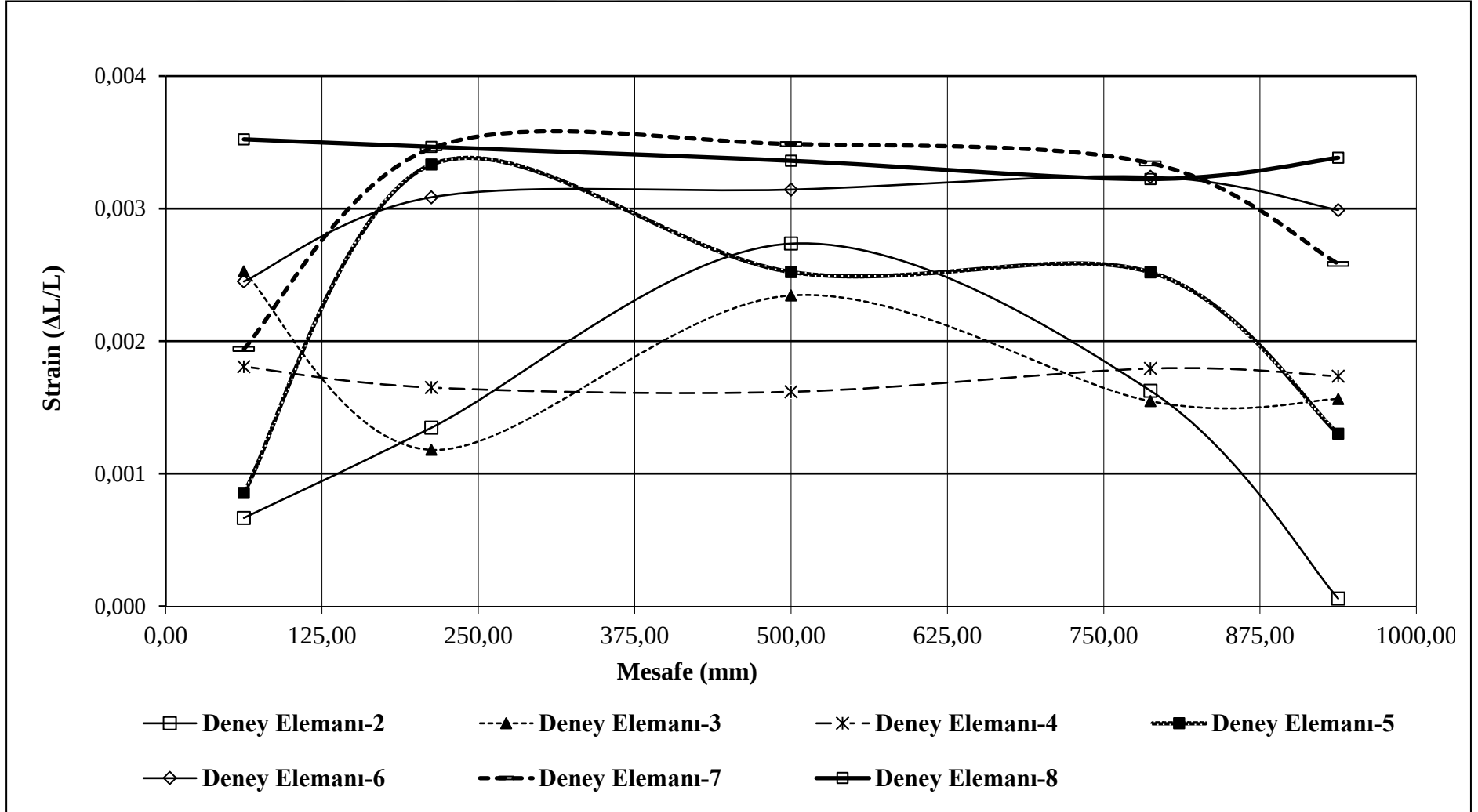
Şekil 5.1. Deney elemanları test sonrası göçme fotoğrafları.



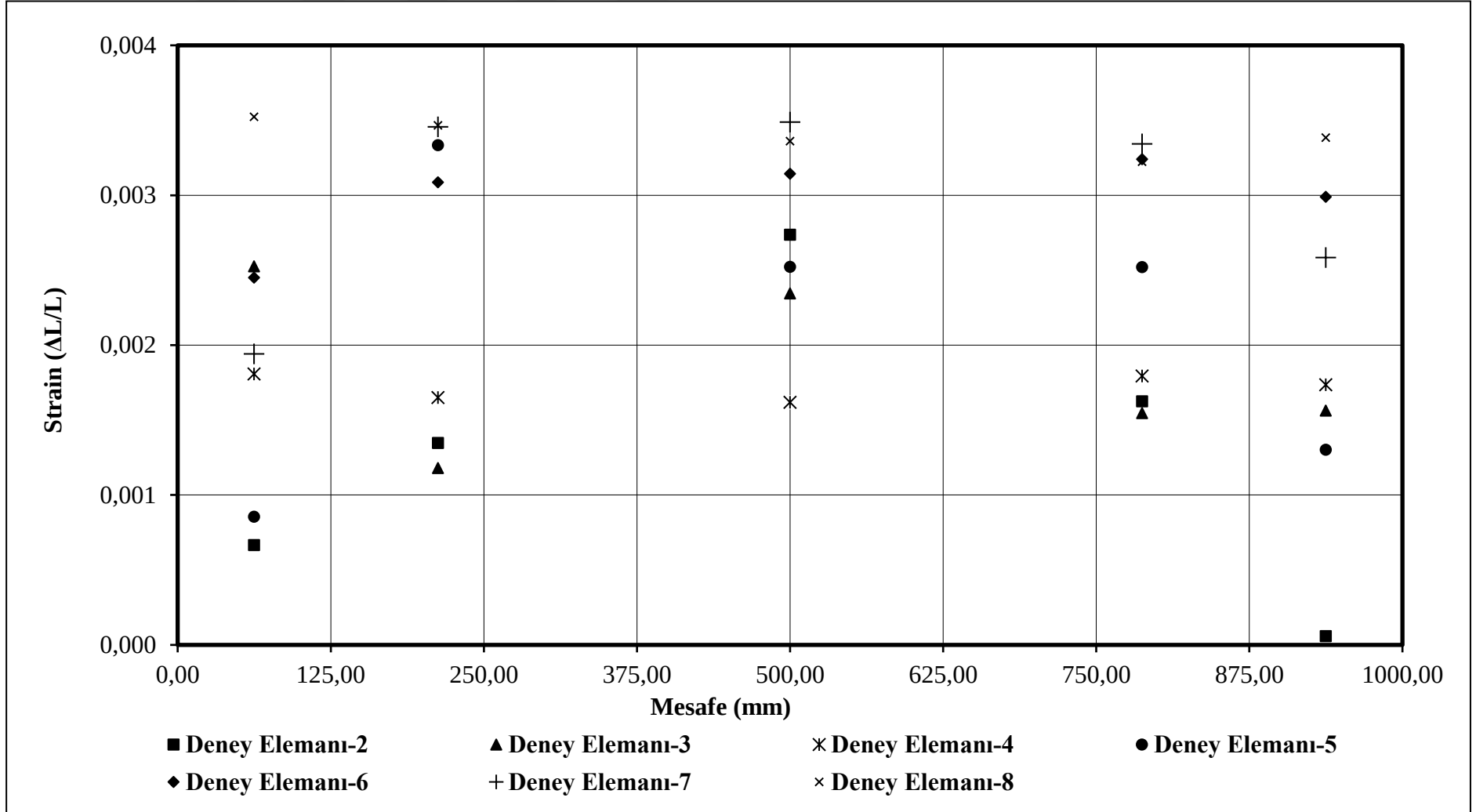
Şekil 5.2. Deney elemanlarına ait Yük-Deplasman grafikleri.



Şekil 5.3. Deneylere ait Yük-Deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.4. CFRP şeritlerin gerilme dağılımı.



Şekil 5.5. CFRP şeritlerin gerilme dağılımı.

5.1. Dayanım ve Davranış

Deney elemanlarının dayanımları ve yük altında deplasmanları zarf eğrileri incelenerek yorumlanmıştır. Zarf eğrileri elemanların yükleme altında yapmış olduğu şekil değiştirmenin başlangıçtan bitişe kadar genel bir izlenimini sunan grafiklerdir.

Deney Elemanı-1’de 24 kN yük düzeyinde çekme donatısı akmıştır. Sünek davranış sergileyen deney elemanında çekme bölgesinde çok sayıda eğilme çatlakları oluşmuştur. CFRP ankrajı kullanılmayan Deney Elemanı-2, Deney Elemanı-1 ile neredeyse aynı yükü taşımasına rağmen başlangıç rijitliği 1,9 kat, maksimum yükteki rijitliği ise 1,2 kat daha fazladır. Maksimum yük düzeyine ulaşıldığında levha sadece uç bölgesinde betondan ayrılmıştır, çentik bölgesinde eğilme çatlakları oluşmamıştır (Şekil 5.6.a). Tek fan ankrajlı deney elemanı 29 kN yük taşımıştır. Deney elemanı kontrol elemanından başlangıçta 3 kat daha rijittir. Deney elemanında CFRP şerit ankrajsız deney elemanında olduğu gibi sadece uç bölgesinde betondan ayrılmıştır (Şekil 5.1.c). Deney Elemanı-3 de kullanılan ankrajın iki adet olmasıyla elde edilen Deney Elemanı-4, kontrol elemanından %29 daha fazla yük taşımıştır. Ancak rijitlik değerleri beklendiği gibi artmamıştır. Deney Elemanı 50 mm aralıklı yapılan ankrajların arasında kalan LP levhanın yırtılması ve ankrajın kopmasıyla göçmüştür (Şekil 5.1.d). Deney elemanı 2-3 ve 4’ün maksimum yük düzeyindeki rijitlikleri birbirlerine oldukça yakındır. Dayanımları ise kontrol elemanından maksimum %29 daha fazladır. Yük taşıma kapasitesinin dolayısıyla davranışın daha üst düzeylere çıkarılması ancak levha ucunda ilave önlemlerin alınması gereğini doğurmuştur.



Şekil 5.6. Deney elemanlarının göçme modları.

Deney Elemanı-4’de kullanılan levhanın ucu 200 mm genişliğinde 210 mm boyunda ilave bir parçayla güçlendirilerek Deney Elemanı-5 üretilmiştir. 35 kN yük taşıyan

deney elemanı ilave katman kullanılmayan deney elemanı-4'den %13 daha fazla yük taşımıştır. Başlangıç rijitliği %30 oranında artmasına rağmen maksimum yük düzeyinde rijitlik önemli oranda değişmemiştir. İki ankrajın üzerine ilave katman yapılmasıyla Şekil 5.1.e'de görüldüğü gibi göçme şekli önemli oranda değişmemiştir. Levha sadece sağ uçta betondan ayrılmış Şekil 5.6.b'de görüldüğü gibi levhanın yırtılması ve ankrajların kopmasıyla göçmüştür. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi Deney Elemanları- 2, 3, 4 ve 5, CFRP şeridin uç bölgesinde ayrılmasından sonra, çentik kenarında oluşan çatlakların gelişmesiyle göçmüştür. CFRP şerit diğer bölgelerde betondan ayrılmamıştır.

CFRP şerit ucunda ilave katman yapıştırılması ile birlikte 50 mm aralıkla üç ankraj yapılan deney elemanı-6, 40 kN yük taşımıştır. Dayanım iki ankrajlı deney elemanı-5'e göre %14 artmıştır. Başlangıç rijitliği ise kontrol elemanının 11.7 katıdır. İki ankrajlı ve ilave katmanlı deney elemanı-5'in başlangıç rijitliğinin 1.3 katıdır. Maksimum yük düzeyinde ise kontrol elemanından %30 daha rijittir. Deney Elemanı-6, ankrajların şeritle beton arasındaki yüzeyden kopmasıyla göçmüştür (Şekil 5.1.f). Levha veya ilave katman yırtılmamıştır. Göçme sırasında kontrol deney elemanı gibi çok sayıda eğilme çatlağı oluşmuş, CFRP şerit yüzeyden ayrılmıştır. Göçmenin CFRP şeridin gövdesinde olması amacıyla deney elemanının geometrisi düşünülerek Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-8 de şerit genişlikleri azaltılmıştır.

Deney Elemanı-7'de üç ankraj ve ilave katman kullanılmış, levha genişliği 80 mm'ye düşürülmüştür. Deney elemanından farklı bir göçme şekli beklenmiştir. Ancak 100 mm levha genişliği olan Deney Elemanı-6 ile aynı yükü taşıyan deney elemanı benzer davranışı sergileyerek göçmüştür (Şekil 5.1.g). Deney elemanının rijitlikleri Deney Elemanı-6'ya göre başlangıçta %4 azalmış, maksimum yük düzeyinde ise %6 azalmıştır.

Deney Elemanı-8'de kullanılan bağlantı, Deney Elemanı-6 ve 7'de kullanılan bağlantının aynısıdır. Şerit genişliği ise 60 mm'ye düşürülmüştür. Deney elemanı beklenmedik bir şekilde deney elemanı-6 ve 7'de olduğu gibi 40 kN yük taşımıştır. Başlangıç rijitliği Deney Elemanı-6'ya göre %41 oranında daha azdır. Maksimum yük düzeyinde ise CFRP şerit bir gergi çubuğu gibi çalıştığından boydan boya beton yüzeyinden ayrılmıştır. Göçme ise ortadaki CFRP ankrajının kopması ve ilave katman olarak yapıştırılan levhanın iki tarafından yırtılmasıyla gerçekleşmiştir (Şekil 5.6.b).

Üç ankrajlı deney elemanlarının tamamında göçmeden önce CFRP şerit yüzeyden ayrılmıştır. Ancak 60 mm şerit genişliği olan Deney Elemanı-8'in rijitlik değerleri bu grup içinde en düşük olanıdır. Ayrıca 60 mm genişliğinde şerit olan deney elemanında göçme sırasında ortada bulunan ankraj kopmuş, diğer iki ankraj Şekil 5.6.c'de görüldüğü gibi sağlam kalmıştır.

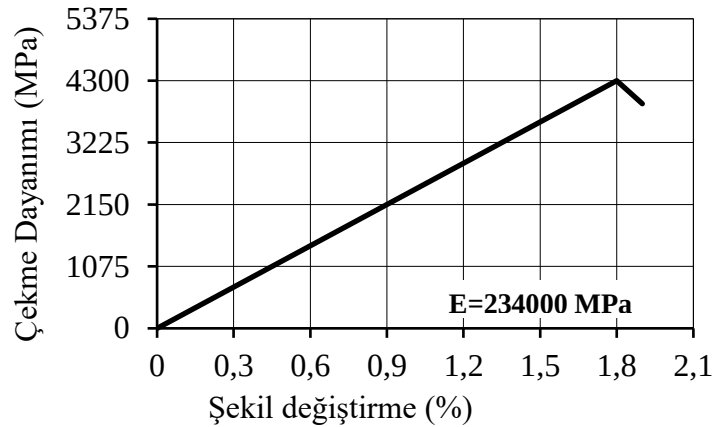
İlave bir katman kullanılarak uç bölgesi güçlendirilen deney elemanlarının grafiklerinde maksimum yük düzeyinde şeridin göçme anı Şekil 5.2'de verilen grafiklerde açıkça görülmektedir. Üç ankrajlı deney elemanları-6, 7 ve 8 de ise bu durum daha belirgin gerçekleşmiştir. Deney elemanlarının göçme fotoğrafları incelendiğinde üç ankrajlı deney elemanlarının şerit yapıştırılmayan kontrol elemanı gibi çentik bölgesinde çok sayıda eğilme çatlağı oluşmasıyla göçtüğü görülmüştür. CFRP şeritler beton yüzeyinden tamamen ayrılmış ve bir gergi çubuğu gibi çalışmıştır. Diğer deney elemanlarında ise şerit sadece uç bölgesinde kırıktan ayrılmıştır. Deney elemanlarında gözlemlenen bu davranış farkı Şekil 5.1'de görülebilmektedir. Deney elemanlarının davranışının birbirine göre karşılaştırılmasında Şekil 5.3'de verilen zarf eğrileri de kullanılmaktadır.

Zarf eğrilerinde üç ankraj kullanılan deney elemanlarının dayanımlarının diğer elemanlara göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Ancak 60 mm genişliğinde levhanın üç ankrajla bağlandığı Deney Elemanı-8 levhanın göçmesi sırasında en fazla deplasmanı yapan deney elemanı olmuştur. Buna rağmen 80 mm ve 100 mm levha genişliği olan Deney Elemanı- 6 ve 7 benzer davranışı sergilemişlerdir. Deney elemanı 7'de kullanılan CFRP şeridin Deney elemanı 6'da kullanılan levhaya oranla %20 oranında azaltılmasına rağmen gerek taşıyan yük, gerekse davranış olarak önemli bir fark gözlemlenmemiştir.

İki ve üç ankrajlı olan deney elemanlarında CFRP'den yapılmış ankrajlar arasında 50 mm mesafe bulunmaktadır. Dayanımı 10 MPa olan betonda ara mesafeleri yetersiz olan CFRP ankrajının betondan sıyrılması sakınılan bir göçme modudur. Buna rağmen hiçbir elemanda böyle bir göçme şekli gerçekleşmemiştir. Ankrajlar betondan çıkan fanların kısmen veya tamamen yırtılmasıyla göçmüştür.

5.2. CFRP Levhalarındaki Gerilme Dağılımı

Deney elemanlarından 5 adet birim deformasyon ölçülmüştür. Bu çalışmada levha boyunca ortalama gerilmenin yüksek olması, böylece levhanın bir çekme çubuğu gibi çalışması amaçlanmıştır. Yüksek maliyetli CFRP şeritlerin maksimum verimde kullanılması önemlidir. Kullanılan CFRP levhanın Çizelge 3.4’de verilen katalog bilgisine göre maksimum uzaması %1.8’dir. Şekil 5.7’de malzemenin Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Maksimum uzamanın olduğu %1.8 değeri ile merkez birleştirildiğinde ortaya çıkan eğim yaklaşık olarak malzemenin elastisite modülü olan 234000 MPa değerini vermektedir. Buna göre grafiğin maksimum yüke kadar olan bölümü doğrusal kabul edilmiştir. Deney elemanlarından alınan birim uzama ölçümleri ve malzemenin elastisite modülü kullanılarak levhanın hangi gerilme düzeyinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Sikawrap 230-C'nin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafiği.

Şekil 5.4’de CFRP şeritler üzerinden ölçülen maksimum birim uzamaların şerit boyunca dağılımları verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi üç ankrajlı deney elemanları diğer deney elemanlarından önemli oranda yüksektir. Birim deformasyonların şerit boyunca değişimi de önemlidir. Çelik yapı elemanlarında olduğu gibi şeritlerin bir çekme çubuğu gibi çalışması amaçlanmıştır. Ancak Deney Elemanı-8 dışında gerilme dağılımı levha boyunca büyük değişiklikler göstermiştir. Ancak Deney Elemanı-8 istenmeyen bir şekilde göçmüş, üç ankrajdan bir tanesi kopmuştur. Kenardaki ankrajlar test sonunda sağlam kalmışlardır. İlave katman kullanılan deney elemanlarında 1 ve 5 numaralı birim uzama ölçümleri ilave katmanın üzerinden

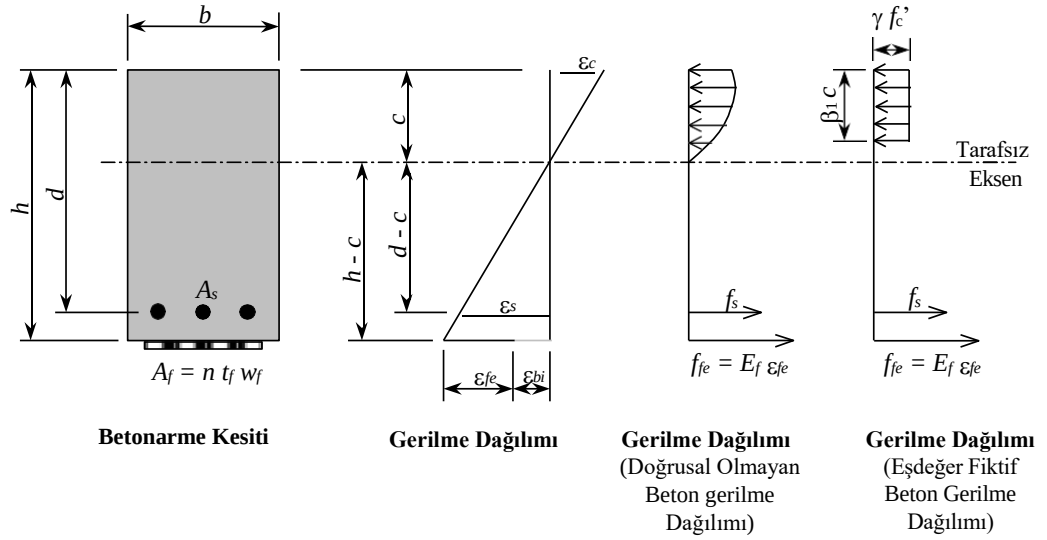
ölçülmüştür. Bu nedenle altta olan CFRP şerit üzerindeki uzama tam olarak ölçülememiştir. Buna rağmen 100, 80, 60 mm genişliğindeki şeritlerin ucunda üç ankraj kullanılan deney elemanlarının dayanımları aynı olmasına rağmen birim deformasyonlarda yaklaşık %10 oranında farklılıklar oluşmuştur. Deney elemanlarında CFRP şerit üzerinden ölçülen birim uzamaların **Şekil 5.7**'de verilen doğrusal orantı kurularak değerlendirilmesi ile **Çizelge 5.2**'elde edilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi **Çizelge 5.2**'de verilen 4300 MPa çekme dayanımına hiçbir deney elemanında ulaşamamıştır. Bu nedenle malzeme maksimum olarak %60 oranında kapasiteyle kullanılmıştır. 2-3-4 numaralı ölçümlerde Deney Elemanı-7 en yüksek birim uzamayı sergilemiştir.

Çizelge 5.2. Birim şekil değiştirmeler ve gerilmeler.

Deney Eleman No:	ϵ_{max} (mm/mm)	σ_{max} (Mpa)	$\epsilon_{ortalama}$ (mm/mm)	$\sigma_{ortalama}$ (Mpa)
2	0,0085	1989	0,004	936
3	0,0079	1849	0,006	1404
4	0,0054	1264	0,004	936
5	0,0083	1942	0,006	1404
6	0,010	2340	0,009	2106
7	0,011	2574	0,009	2106
8	0,011	2574	0,011	2574

5.3. Deney Elemanlarının Kapasitesinin Analitik Olarak Hesaplaması

Numunelerin analitik yük taşıma kapasiteleri ACI 440 Committee Report (2008) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar için **Çizelge 3.4**'te verilen CFRP'nin mekanik özellikleri ile kirişlerin basınç dayanımı ve elastisite modülü kullanılmıştır. Numunelerin analitik nihai kapasitesi hesaplanırken yapılan varsayımlar, betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesi için yapılan varsayımlara benzerdir.



Şekil 5.8. Deney Elemanlarının analitik kapasite hesaplama yaklaşımı.

Analitik hesaplamalar için kullanılan yaklaşım Şekil 5.8'te özetlenmiş ve denklemler (5.1), (5.2) ve (5.3)'te gösterilmiştir. Eğilme momentinin etkisiyle oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımının doğrusal olduğu ve deformasyondan önce tarafsız eksene dik olan kesitlerin deformasyondan sonra da dik kaldığı varsayılmaktadır. Betonun basınç dayanımı kesme dayanımından büyük olduğu için numunelerin maksimum moment bölgesinde betonun ezilmesi ile nihai kapasiteye ulaşacağı varsayılmış ve CFRP şeritteki gerilme değeri doğrusal gerilme dağılımı varsayımı kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem (5.1)).

$$\varepsilon_{CRFP} = 0.003 \times \left(\frac{h - c}{c} \right) \quad (5.1)$$

Daha sonra tarafsız eksenin konumu, CFRP şerit, donatılar üzerindeki çekme kuvveti ve kesitin üst kısmındaki beton üzerindeki basınç kuvveti dengesi kullanılarak hesaplanır (Denklem (5.2)).

$$0 = f_{AC} \cdot c \cdot b - \left(\frac{c - d_1}{c} \times 0.003 \right) \times A_{s1} \times E_{steel} \quad (5.2)$$

$$- \left(\frac{d - c}{c} \times 0.003 \right) \times A_{s2} \times E_{steel} - n_{CRFP} \times t_{CRFP} \times w_{CRFP} \times E_{CRFP} \times \varepsilon_{CRFP}$$

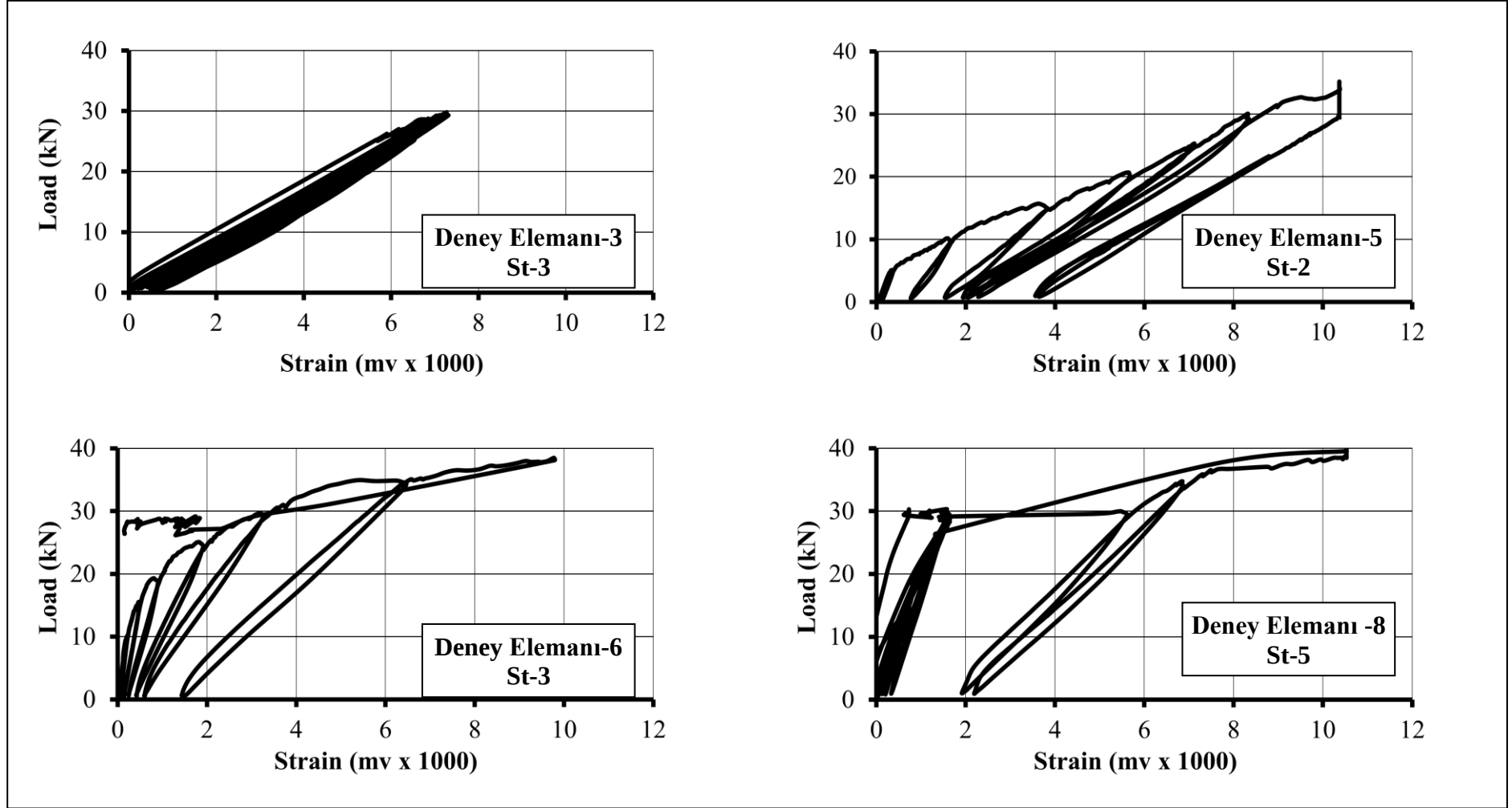
Sonuç olarak, yatay kuvvetlerin dengesinden hesaplanan tarafsız eksen konumuna dik kesitin nihai moment kapasitesi ve bu moment değerine ulaşmak için gerekli kesme kuvveti değeri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Denklem (5.3)). Analitik ve ölçülen kapasite değerlerinin karşılaştırılması Tablo 6'da verilmiştir.

$$M_{cal} = F_{CRFP} \times \left(h - \frac{c}{2}\right) + F_{s2} \times \left(d - \frac{c}{2}\right) - F_{s1} \times \left(\frac{c}{2} - d_1\right) \quad (5.3)$$

Numunelerin nihai kapasiteleri hesaplanırken, CFRP ankrajlarının nihai kapasiteye etkileri dahil edilmemiştir. Hesaplama için kullanılan denklemler sadece tek yönlü eğilme momentinin etkisini ve bu yöne paralel yerleştirilen şeritlerin katkısını içermektedir. Ortalama analitik kapasiteler, tüm numuneler için deneysel kapasitelerden %6 daha büyük bulunmuştur. Analitik değerlerin deneysel sonuçlara oranı 1,43 ile 0,81 arasında değişmektedir.

Çizelge 5.3. Analitik ve ölçülen kapasite değerlerinin karşılaştırılması.

Deney Eleman No	Nihai kapasite (kN)		Oran **
	Analitik*	Deneysel	
1	23,65	24	0,99
2	35,66	25	1,43
3	35,89	29	1,24
4	38,40	31	1,24
5	34,95	35	1,00
6	35,42	40	0,89
7	35,13	40	0,88
8	32,57	40	0,81
* Numunelerin analitik kapasite değerleri ACI440 Komite Raporuna göre hesaplanmıştır.			
** Analitik kapasitenin deneysel sonuçlara oranı			



Şekil 5.9. Yük-gerinim grafiklerine örnek.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

CFRP şeritler betonarme yapıların güçlendirilmesinde veya onarılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek dayanımları ve kolay uygulanmaları diğer malzemelere göre büyük üstünlük sağlamaktadır. Onarım veya güçlendirme uygulamalarının başarısı ilave edilen CFRP, çelik veya betonarme dolgu duvarın mevcut yapıya bağlantısının başarısıyla doğru orantılıdır. CFRP şeritlerin betona bağlanmasında ise genellikle CFRP ankrajları kullanılmaktadır. CFRP şeritlerle ilgili analitik yaklaşımların çoğu şeritlerin boyutlarıyla ilgidir. Şerit ucunda kullanılan bağlantının etkisinin göz önüne alındığı ampirik bir yaklaşım bulunmamaktadır. Araştırmamızda çekme etkisindeki levhanın ucunda fan ankraj kullanılarak en uygun bağlantı detayının elde edilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada 10 MPa dayanımı olan beton kullanılarak, levha en olumsuz durumda test edilmiştir. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Ankrajin sıyrılması veya betonun konik olarak göçmesi CFRP ankrajlarında sakınılan göçme şekilleridir. Bu amaçla ankrajların ara mesafesi ve gömülme boyları ile ilgili yaklaşımlarda bulunmaktadır. Yapılan deneylerde dayanımı 10 MPa olan betonda, 50 mm gibi yetersiz mesafede kullanılan 150 mm derinliğindeki ankraj uygulamasında olumsuz bir göçme oluşmamıştır.
- 100 mm genişliğinde CFRP şeritlerin uç bölgesinde bir veya iki adet fan ankraj kullanılması davranış ve dayanım açısından başarılı sonuçlar vermemiştir. Şeritte göçme ankrajla şeridin birleştiği bölümde gerçekleşmiştir.
- 100 mm genişliğinde şerit ucunda iki adet fan ankrajin daha başarılı olması amacıyla, ilave bir katman kullanılması davranış ve dayanımı önemli oranda etkilememiştir.
- 100 mm genişliğinde şerit ucuna üç adet fan ankraj ve ilave bir katman kullanılan deney elemanı iki ve tek ankrajlı deney elemanlarına göre oldukça başarılı bir davranış sergilemiştir. Çekme kuvveti etkisinde şerit çekme çubuğu gibi davranmış ve bütün levha beton yüzeyinden ayrılmıştır.

- Şerit genişliği 80 mm olan üç ankrajlı deney elemanı, 100 mm genişliğinde şerit kullanılan deney elemanı ile aynı davranışı ve dayanımı sergilemiştir. Dolayısıyla 80 mm genişliğinde bir levhaya 200 mm genişliğinde ilave bir katman ve 50 mm aralıklı üç adet fan ankraj uygulanması deney programının en başarılı deney elemanı olarak ön plana çıkmıştır. Buna rağmen
- Deney Elemanı-7’de elde edilen sonuç ekonomi, dayanım ve rijitlik olarak başarılı olduğudur. Ancak malzeme maksimum %60 kapasiteye ulaşmıştır. Göçme modu ankrajların levhayla birleştiği bölümde fanların yırtılmasıyla gerçekleşmiştir.
- Deney Elemanı-7’de kullanılan üç ankrajda da sıyrılma veya konik göçme modları gözlenmemiştir. Bu durum 150 mm gömülme boyu, 14 mm delik çapı olan ve 100 mm genişliğindeki levhanın donatı çeliğine sarılmasıyla elde edilen CFRP ankrajlarının 50 mm gibi yetersiz bir aralıkta kullanılması olumsuz bir durum ortaya koymamıştır.
- Levhanın koparılması amacıyla üretilen 60 mm levha genişliği olan üç ankrajlı deney elemanı-8’den elde edilen göçme şekli de başarısız olmuştur. Malzeme üç ankrajlı diğer deney elemanlarıyla, aynı dayanımı sergilemesine rağmen 60 mm levha için 200 mm genişliğindeki ilave katman fazla gelmiştir. Bu nedenle kenarda kalan iki ankraja, ilave katmanın yırtılması nedeniyle yük aktarılamamıştır. Davranışta sadece ortada olan ankraj etkili olmuştur. Bu nedenle göçme diğer deney elemanlarında olduğu gibi orta ankrajın fanlarının yırtılmasıyla gerçekleşmiştir. Üç adet fan ankraja 60 mm genişliğindeki levha için uygun olmamıştır.
- Sonuç olarak hiçbir deney elemanında levhanın kopması gövdede olmamıştır. Dayanım, davranış ve maliyet olarak en uygun tasarım 80 mm genişliğinde ucunda üç ankraj ve ilave katman olan deney elemanı olmuştur.

Betona yapıştırılmış CFRP şeritlerde fan ankraj uygulaması ile ilgili sınırlı düzeyde çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada ucu 100 mm derinliğinde çentiğe fan ankrajla bağlanmış CFRP şeritinin en uygun bağlantı detayı araştırılmıştır. Ancak elde edilen bulgular oldukça sınırlıdır. Özellikle levhaların uç bölgesinde yapılacak ankrajın levhayla yaptığı açı, ankrajda kullanılan levhanın miktarı irdelenebilecek konulardır.

KAYNAKLAR

1. Biniciksü, H., Kaplan H. ve Görür E. B., 2005 Türkiye’de yaşanan son depremlerde malzeme kalitesi ve kötü işçiliğin neden olduğu hasarlar. Deprem Sempozyumu, Kocaeli,705
2. Çaktı, E. Şafak, E. Hancılar, U. Şeşetyan, K. Baş, M. Kılıç, O. Menteşe, E. Y. Uzunkol, Ö. ve Kara, S., 2019. İstanbul ili olası deprem kayıp tahminlerinin güncellenmesi projesi, İstanbul Büyükşehir Belediye Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul, 294
3. Canbay, E. Ersoy, U. Özcebe, G. Sucuoğlu, H. ve Wasti, S. T., 2008. Binalar için deprem mühendisliği temel ilkeler, Bizim Büro Basımevi, Evrim Yayınevi, Ankara
4. Çamlıbel, N., 2000. Yapıların taşıma gücünün iyileştirilmesi, Birsan Yayınevi, İstanbul
5. Kara, M. E., 2006. Sünek olmayan betonarme çerçevelerin betonarme parçasal dolgu duvarlarıyla güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
6. Seçer, O., 2008. Yüksek sıcaklık etkisinden hasar görmüş lifli, hava sürükleyici katkılı ve perlit agregalı betonların dayanım özellikleri ve GFRP ile onarımı ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
7. SİKA® SikaWrap®-230 C 2017. Woven unidirectional carbon fibre Fabric, Designed for structural strengthening applications as part of the SIKA strengthening system, İstanbul.
8. El-Ghandour, A. A., 2011. Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams. Construction and Building Materials, 25, 1419-1429.
9. Altın, S. Anıl, Ö. Koprıman, Y. Mertoğlu, Ç. ve Kara, M. E., 2010. Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29, 2975-2991.
10. Anıl, Ö., 2007. Strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using CFRP composites subjected to cyclic load. Construction and Building Materials, 22, 2355-2368.
11. Abdeldjelil, B. Bae, S.-W. ve Brancaccio, A., 2011. Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. Construction and Building Materials, 32, 27-40.
12. T.C. Resmî Gazete, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 30364 sayı, 18.03.2018, 335-336

13. ACI Committee 440 2008, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Inst., Michigan, NY. USA.
14. Smith, S. T., Hu, S., Kim, S. J. ve Seracino, R., 2011, FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors. *Engineering Structures*, 33, 1075-1087.
15. Gao, B., Kim, J. ve Leung, C. K.Y., 2004. Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber modified reins. *Composites Science and Technology*, 64, 2557-2564.
16. Ferracuti, B., Savoia, M. and Mazzotti, C., 2007. Interface law for FRP-concrete delamination. *Composite Structures*, 80, 523-531.
17. Yin, J. ve Wu, Z.S., 2003. Structural performances of short steel-fiber reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 17, 463-470.
18. Camli, U.S. ve Binici, B., 2006. Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry. *Construction and Building Materials*, 21, 1431-1446.
19. Chen, J.F. ve Teng, J.G., 2001. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Journal of Structural Engineering*, 127, 784-791
20. Tan, K.H., Patoary, M.K.H. ve Roger, C.S.K., 2003. Anchorage systems for masonry walls strengthened with FRP composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22, 1353-1371.
21. Novidis, D., Pantazopoulou, S.J. ve Tentolouris, E., 2007. Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement. *Construction and Building Materials*, 21, 1760-1770.
22. Teng, J.G., Zhang, J.W. ve Smith, S.T., 2002. Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: a finite element study. *Construction and Building Materials*, 16, 1-14.
23. Liu, H.Y., Zhang, X., Mai, Y.W. ve Diao, X.X., 1999. On steady-state fibre pull-out II computer simulation. *Composites Science and Technology*, 59, 2191-2199.
24. Yang, J. ve Wu, Y.F., 2007. Interfacial stresses of FRP strengthened concrete beams: effects of shear deformation. *Composite Structures*, 80, 343-351.
25. Wu, Z.J. ve Davies J.M., 2003. Mechanical analysis of cracked beam reinforced with an external FRP plate. *Composite Structures*, 62, 139-143.
26. Zhou, Y., Li, C. ve Mason, J.J., 2005. Fiber-end deformation effects in enlarged-end, fiber-reinforced composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 72, 1980-1992.

27. Özdemir, G., 2005. Mechanical properties of CFRP anchorages., Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
28. Toutanji, H., Zhao, L. ve Zhang, Y., 2006. Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Engineering Structures*, 28, 557-566.
29. Lenwari, A., Thepchatri, T. ve Albrecht P., 2006. Debonding strength of steel beams strengthened with CFRP plates. *Journal of Composites for Construction*, 10, 69-78.
30. Rteil, A.A., Soudki, K.A. ve Topper, T.H., 2007. Preliminary experimental investigation of fatigue behavior of CFRP confined RC beams. *Construction and Building Materials*, 21, 746-755.
31. Gheorghiu, C., Labossiere, P. ve Proulx, J., 2006. Fatigue and monotonic strength of RC beams strengthened with CFRPs. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 37, 1111-1118.
32. Arslan, G., Sevuk, F. ve Ekiz, I., 2006. Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams. *Construction and Building Materials*, 21, 746-755.
33. Sheikh, S.A., 2002. Performance of concrete structures retrofitted with fibre reinforced polymers. *Engineering Structures*, 24, 869-879.
34. Pham, H. ve Mahaidi, R.A., 2004. Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites. *Composite Structures*, 66, 617-625.
35. Benjeddou, O., Ouezdou, M.B. ve Bedday A., 2007. Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 21, 1301-1310.
36. Kachlakev, D. ve McCurry, D.D., 2000. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 31, 445-452.
37. Schnierch, D., Dawood, M., Rizkalla, S. ve Summer, E., 2007. Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials. *Construction and Building Materials*, 21, 1001-1010.
38. Teng, J.G., Lorenzis, L.D., Wang, B., Li, R., Wong, T.N. ve Lam, L., 2006. Debonding Failures of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Journal of Composites for Construction*, 10, 92-105.
39. Ahmed, O., Gemert, D.V. ve Vandewalle, L., 2001. Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams. *Cement and Concrete Composites*, 23, 3-19.

40. Pesic, N. ve Pilakoutas, K., 2003. Concrete beams with externally bonded flexural FRP-reinforcement: analytical investigation of debonding failure. *Composites Part B: Engineering*, 34, 327-338.
41. Fam, A. ve Skutezky T., 2006. Composites T-beams using reduced-scale rectangular FRP tubes and concrete slabs. *Journal of Composites for Construction*, 172-181.
42. Mosallam, A.S. ve Banerjee S., 2007. Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38, 781-793.
43. Barnes, R.A. ve Mays, G.C., 2006. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 1-experimental programme. *Construction and Building Materials*, 20, 396-402.
44. Barnes, R.A. ve Mays, G.C., 2006. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 2-design guidelines. *Construction and Building Materials*, 20, 403-411.
45. Mohamed Ali, M.S., Oehlers, D.J. ve Park, S.M., 2001. Comparison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 32, 1319-1328.
46. Au, C. ve Büyüköztürk, O., 2006. Peel and shear fracture characterization of debonding in FRP plate concrete affected by moisture. *Journal of Composites for Construction*, 35-47.
47. Bercardino, F., Spadea, G. ve Swamy R.N., 2006. The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 21, 1997-2006.
48. Yao, J., Teng, J.G. ve Chen, J.F., 2005. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 36, 99-113.
49. Anil, Ö., 2006. Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load. *Cement and Concrete Composites*, 28, 638-649.
50. Özcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Erduran, E., Keskin, R.S.O. ve Mertol, H.C., 2003. Strengthened of brick-infilled RC frames with CFRP. *Structural Engineering Research Unit, Tubitak, METU*.
51. Altin, S., Anil, Ö., Kara, M.E. ve Kaya, M., 2007. An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*.
52. Kara, M. E., Fırat, F. K., Karabörk, T., Sönmez, M., 2016. An investigation of anchorage connection the edge of steel plates bonded to reinforced concrete. *Steel and Composite Structures*, 22-1, 25-43.

53. URL-1 <<https://www.bbc.com/turkce /haberler-dunya-60771008>>, Eriřim Tarihi: 1.11.2023.
54. URL-2 <<https://tr.euronews.com/2023 /02/06/dunyada-son-20-yilda-yasanan-en-olumcul-depremler>>, Eriřim Tarihi: 1.11.2023.
55. URL-3 <https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27deki_depremler_listesi>, Eriřim Tarihi: 1.11.2023.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mustafa YAŞA

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat
Mühendisliği Bölümü, 2005-2009

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022-2024

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Kara, M.E. ve Yaşa M. 2013. An Investigation of fan type anchorages applied to end of CFRP strips. Steel and Composite Structures, 15, 605-621.