
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

AÇILI ANKRAJLI CFRP ŞERİTLER İLE BETON YÜZEY ARASINDAKİ GERİLME DEFORMASYON DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Rahim GHOROUBİ

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2020

Rahim GHOROUBİ tarafından hazırlanan "AÇILI ANKRAJLI CFRP ŞERİTLER İLE BETON YÜZEY ARASINDAKİ GERİLME DEFORMASYON DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……..……..

Başkan: Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……..……..

Üye: Doç. Dr. Mehmet BARAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……..……..

Üye: Prof. Dr. Ayhan GÜRBÜZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……..……..

Üye: Dr. Öğr. Üye. M. Cem YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……..……..

Tez Savunma Tarihi: 23/06/2020

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

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Rahim GHOROUBİ

23/06/2020

AÇILI ANKRAJLI CFRP ŞERİTLER İLE BETON YÜZEY ARASINDAKİ GERİLME DEFORMASYON DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Rahim GHOROUBİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2020

ÖZET

Karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) deprem performansı yetersiz yapıların onarım ve güçlendirilmesinde son 20 yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme ve onarım detaylarında en önemli tasarım kriterlerinden biri CFRP şerit veya levhaların yüzeyden soyulmalarını geciktirmek ve CFRP güçlendirme elemanlarının tüm performanslarından yararlanmaktır. Bu nedenle CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında ankraj kullanımı ve bu konudaki araştırmalar giderek artmıştır. Literatürde güçlendirme detaylarında kullanılan fan tipi CFRP ankrajlar ve ankrajlı CFRP şeritler için geliştirilen kayma gerilmesi-kayma deplasman modelleri ile ilgili araştırmalar ankrajsız şeritlere göre sınırlı sayıda olsa da yer almıştır. Ancak bu konudaki çalışmalarda ankrajlar CFRP şeritlere uygulanan eksenel çekme kuvvetine 90^{o} açı ile yerleştirilmektedir. Eksenel çekme kuvvetine göre açısı değişim gösteren ankrajlı CFRP şeritlerin eksenel kuvvet taşıma gücü ve kayma gerilmesi-kayma deplasman modelleri ile ilgili bir araştırmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu nedenle deneysel bir çalışma düzenlenmiş, beton yüzeye yapıştırılan 28 adet açılı ankrajlı CFRP şerit deney elemanı, tez çalışması için özel olarak geliştirilen bir deney düzeneği ile eksenel çekme kuvveti etkisinde test edilmiştir. Deneysel çalışmada incelenen değişkenler beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit üzerine yerleştirilen fan tipi CFRP ankraj açısı ve ankraj sayısıdır. Deneysel çalışma sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritlerin taşıma gücü değerlerinin hesaplanması için bir eşitlik önerilmiş ve kayma gerilmesi-kayma deplasman davranışı hakkında yeni bir öneri geliştirilmiştir.

Bilim Kodu	:	93008
Anahtar Kelimeler	:	CFRP, Güçlendirme, Açılı CFRP Fan Tipi Ankraj, Kayma Gerilmesi-Deplasman Modeli
Sayfa Adedi	:	146
Danışman	:	Prof. Dr. Özgür ANIL

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE STRESS DEFORMATION DISTRIBUTION BETWEEN THE ANGLED ANCHORED CFRP STRIPS AND THE CONCRETE SURFACE

(Ph. D. Thesis)

Rahim GHOROUBI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2020

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) have been widely used for the last 20 years for repairing and strengthening of inadequate earthquake performance of the structures. One of the most important developed design criteria in the retrofit and strengthening details are using CFRP to delay the debonding of the CFRP strips or plates from the surface and to take full advantage of the CFRP reinforcement elements. For this reason, the uses of anchors in the reinforcement details developed by using CFRP and also researches on this subject have increased substantially. In the literature, research on bond-slip models developed for fan type CFRP anchors and anchored CFRP strips used in reinforcement details are limited in comparison to non-anchored strips. However, in studies on this subject, anchors are placed at 90^{o} to the axial tensile force applied to the CFRP strips. Axial force-bearing strength and bond-slip models of CFRP strips with the different anchored angle under axial tensile strengths have not been found in the literature. For this reason, an experimental study was carried out and 28 specimens of angled anchored CFRP strip test specimen, which was bonded to the concrete surface, was tested under the influence of axial tensile force with an experimental setup. The variables studied in the experimental study are the concrete compressive strength, the CFRP strip width, the number of the fan type CFRP anchor and angle placed on the CFRP strip. As a result of the experimental study, an equation was proposed for calculating the bearing strength values of angled anchored CFRP strips and a new proposal for the bond-slip model was developed.

Science Code	:	93008
Key Words	:	CFRP, Strengthening, Angular Fan Type CFRP Anchor, Bond-slip Model
Page Number	:	146
Supervisor	:	Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Tez çalışma boyunca tüm süreçte, bilimsel ve manevi olarak yanımda olan, yönlendiren ve yardımlarını hiçbir zaman esigemeyen dağerli hocam Sayın Prof. Dr. Özgür ANIL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sırasında labratuvarda her zaman bana destek veren canım arkadaşım Sayın Assist. Ömer MERCİMEK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında bana yardım eden Sayın Dr. Şeyma SAKİN'e teşekkür ederim.

Tüm bu süreçte hayatımın her evresinde uzakta olsalar bile madi ve manevi bana yardım eden değerli ailem Canım Annem Rana SARBAKHSH'e ve Canım Babam Ebrahim GHOROUBİ'ye minnettarım ve teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1

2. DENEYSEL ÇALIŞMA 19

2.1. Deney Elemanları 19

2.2. Yapı Malzemeleri 20

2.2.1. Beton 20

2.2.2. CFRP ve epoksi 21

2.3. Deney Elemanlarının Hazırlanması 22

2.4. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi 27

3. DENEY DÜZENEĞİ 31

3.1. Ölçüm Aletleri 32

3.1.1. Deplasman ölçer (LVDT) 32

3.1.2. Birim deformasyon ölçer'lerin hazırlanması 33

4. DENEYLER 35

4.1. Deney Elemanı 25C50W (Referans Elemanı 1) 35

4.2. Deney Elemanı 25C50W1N90AF 37

4.3. Deney Elemanı 25C50W1N0AF 40

Sayfa

4.4. Deney Elemanı 25C50W1N45AF 43
4.5. Deney Elemanı 25C50W2N45/90AF 45
4.6. Deney Elemanı 25C50W2N0/90AF 48
4.7. Deney Elemanı 25C50W2N90/90AF 51
4.8. Deney Elemanı 25C100W (Referans Elemanı 2) 53
4.9. Deney Elemanı 25C100W1N90AF 56
4.10. Deney Elemanı 25C100W1N0AF 59
4.11. Deney Elemanı 25C100W1N45AF 61
4.12. Deney Elemanı 25C100W2N45/90AF 64
4.13. Deney Elemanı 25C100W2N0/90AF 67
4.14. Deney Elemanı 25C100W2N90/90AF 69
4.15. Deney Elemanı 10C50W (Referans Elemanı 3) 72
4.16. Deney Elemanı 10C50W1N90AF 75
4.17. Deney Elemanı 10C50W1N0AF 77
4.18. Deney Elemanı 10C50W1N45AF 80
4.19. Deney Elemanı 10C50W2N45/90AF 83
4.20. Deney Elemanı 10C50W2N0/90AF 85
4.21. Deney Elemanı 10C50W2N90/90AF 88
4.22. Deney Elemanı 10C100W (Referans Elemanı 4) 91
4.23. Deney Elemanı 10C100W1N90AF 93
4.24. Deney Elemanı 10C100W1N0AF 96
4.25. Deney Elemanı 10C100W1N45AF 99
4.26. Deney Elemanı 10C100W2N45/90AF 101
4.27. Deney Elemanı 10C100W2N0/90AF 104
4.28. Deney Elemanı 10C100W2N90/90AF 107
5. DENEY SONUÇLARI 111

Sayfa

6. ANALİTİK ÇALIŞMA 119

7. SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER..... 133

7.1. Sonuçlarının Değerlendirilmesi 133

7.2. Öneriler 138

KAYNAKLAR 141

ÖZGEÇMİŞ 145

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Deneysel elemanlar..... 19

Çizelge 2.2. 1 M3 beton için karışım detayları..... 20

Çizelge 2.3. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları..... 21

Çizelge 2.4. CFRP ve epoksi reçinenin mekanik özellikleri 21

Çizelge 2.5. Deney elemanlarının özellikleri (fan ankraj)..... 28

Çizelge 5.1. Nihai yük seviyesinde gerilim dağılımı sonuçları 114

Çizelge 5.2. Nihai yük seviyesi için önemli noktalarda gerilim değerleri..... 115

Çizelge 5.3. Deneysel sonuçlar..... 117

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Deney elemanlarının boyutları (boyutlar mm bitimindendir) 23

Şekil 2.2. (a,b,c,d,e,f) Deney elemanlarının CFRP ankraj yerleşimi ayrıntıları (boyutlar mm cinsinden)..... 29

Şekil 3.1. Doğrusal değişkenli fark transformatörün yapısı 32

Şekil 3.2. Birim deformasyon ölçer'lerin yapıştırma yerleri 34

Şekil 4.1. Deney elemanı 25C50W yük-deplasman grafiği..... 36

Şekil 4.2. Deney elemanı 25C50W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği 36

Şekil 4.3. Deney elemanı 25C50W1N90AF yük-deplasman grafiği..... 38

Şekil 4.4. Deney elemanı 25C50W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği 39

Şekil 4.5. Deney elemanı 25C50W1N0AF yük-deplasman grafiği..... 41

Şekil 4.6. Deney elemanı 25C50W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği 42

Şekil 4.7. Deney elemanı 25C50W1N45AF yük-deplasman grafiği..... 44

Şekil 4.8. Deney elemanı 25C50W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği 44

Şekil 4.9. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF yük-deplasman grafiği..... 46

Şekil 4.10. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF birim deformasyon - birim deformasyon ölçer numarası grafiği 47

Şekil 4.11. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF yük-deplasman grafiği..... 49

Şekil 4.12. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF birim deformasyon - birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 50

Şekil 4.13. Deney elemanı 25C50W2N90/90AF yük-deplasman grafiği..... 52

Şekil 4.14. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF gerilim-birim şekil değiştirme grafiği. 52

Şekil 4.15. Deney elemanı 25C100W yük-deplasman grafiği..... 54

Şekil 4.16. Deney elemanı 25C100W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 55

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.17. Deney elemanı 25C100W1N90AF yük-deplasman grafiği..... 57

Şekil 4.18. Deney elemanı 25C100W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 58

Şekil 4.19. Deney elemanı 25C100W1N0AF yük-deplasman grafiği..... 60

Şekil 4.20. Deney elemanı 25C100W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 60

Şekil 4.21. Deney elemanı 25C100W1N45AF yük-deplasman grafiği..... 62

Şekil 4.22. Deney elemanı 25C100W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 63

Şekil 4.23. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF yük-deplasman grafiği..... 65

Şekil 4.24. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 66

Şekil 4.25. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF yük-deplasman grafiği..... 68

Şekil 4.26. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 68

Şekil 4.27. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF yük-deplasman grafiği..... 70

Şekil 4.28. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 71

Şekil 4.29. Deney elemanı 10C50W yük-deplasman grafiği..... 73

Şekil 4.30. Deney elemanı 10C50W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 74

Şekil 4.31. Deney elemanı 10C50W1N90AF yük-deplasman grafiği..... 76

Şekil 4.32. Deney elemanı 10C50W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 76

Şekil 4.33. Deney elemanı 10C50W1N0AF yük-deplasman grafiği..... 78

Şekil 4.34. Deney elemanı 10C50W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 79

Şekil 4.35. Deney elemanı 10C50W1N45AF yük-deplasman grafiği..... 81

Şekil 4.36. Deney elemanı 10C50W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 82

Şekil 4.37. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF yük-deplasman grafiği..... 84

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.38. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 84

Şekil 4.39. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF yük-deplasman grafiği..... 86

Şekil 4.40. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 87

Şekil 4.41. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF yük-deplasman grafiği..... 89

Şekil 4.42. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 90

Şekil 4.43. Deney elemanı 10C100W yük-deplasman grafiği..... 92

Şekil 4.44. Deney elemanı 10C100W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 92

Şekil 4.45. Deney elemanı 10C100W1N90AF yük-deplasman grafiği..... 94

Şekil 4.46. Deney elemanı 10C100W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 95

Şekil 4.47. Deney elemanı 10C100W1N0AF yük-deplasman grafiği..... 97

Şekil 4.48. Deney elemanı 10C100W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 98

Şekil 4.49. Deney elemanı 10C100W1N45AF yük-deplasman grafiği..... 100

Şekil 4.50. Deney elemanı 10C100W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 100

Şekil 4.51. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF yük-deplasman grafiği..... 102

Şekil 4.52. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 103

Şekil 4.53. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF yük-deplasman grafiği..... 105

Şekil 4.54. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 106

Şekil 4.55. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF yük-deplasman grafiği..... 108

Şekil 4.56. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği..... 108

Şekil 6.1. Lu ve arkadaşları tarafından 2005 yılında geliştirilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı modeli 120

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.2. Mertoğlu ve arkadaşları tarafından 2016 yılında geliştirilen kayma gerilmesi- kayma deplasmanı modeli 121

Şekil 6.3. Tez Çalışmasında Önerilen Kesme Gerilmesi-Kayma Deplasmanı Malzeme Modeli 122

Şekil 6.4. İki farklı değer fc' için normalize edilmiş pik kesme gerilmesi τn ve CFRP ankraj açısı ($\emptyset$) arasındaki ilişki 124

Şekil 6.5. Üç farklı değer fc' için normalize edilmiş pik kesme gerilmesi τn ve CFRP ankraj açısı ($\emptyset$) arasındaki ilişki 125

Şekil 6.6. Üç farklı değer fc' için normalize edilmiş pik kesme gerilmesi τn ve CFRP ankraj açısı ($\emptyset$) arasındaki ilişki 125

Şekil 6.7. Önerilen denklem tarafından tahmin edilen tepe noktada gerilimi ile deneysel tepe noktada gerilimi arasındaki karşılaştırma 126

Şekil 6.8. Pik kesme gerilmesinde Sn normalize edilmiş yer değiştirme ile ankraj açıları arasındaki $\emptyset$ ilişki (bf: CFRP şerit genişliği, fC: Beton dayanımı) ... 127

Şekil 6.9. Ortalama kalıcı kesme gerilimi ile tepe kesme gerilimi oranı arasındaki ilişki ($\tau Res\tau max$) ve ankraj açıları ($\emptyset$)..... 127

Şekil 6.10. Ortalama kalıcı kesme gerilimi ile tepe kesme gerilimi oranı arasındaki ilişki ($\tau Res\tau max$) ve ankraj açıları ($\emptyset$)..... 128

Şekil 6.11. Önerilen denklem tarafından tahmin edilen kalıcı stres ile deneysel kalıcı stres arasındaki karşılaştırma 129

Şekil 6.12. Önerilen denklem tarafından tahmin edilen nihai stres ile deneysel nihai stres arasındaki karşılaştırma 129

Şekil 6.13. Göçme noktasında kesme yer değiştirmenin ortalaması ile tepe kesme gerilmesinde yer değiştirmenin ortalaması arasındaki ilişki ($SfailS0$) ve ankraj açıları ($\emptyset$) 130

Şekil 6.14. Kalıcı gerilmede deneysel ve hesaplanan yer değiştirme arasındaki karşılaştırma $SRes$ 130

Şekil 6.15. Göçme noktasında kesme yer değiştirmenin ortalaması ile tepe kesme gerilmesinde yer değiştirmenin ortalaması arasındaki ilişki ($SfailS0$) ve ankraj açıları ($\emptyset$) 131

Şekil 6.16. Göçme stresinde deney ve hesaplanan yer değiştirmenin karşılaştırması $SFail$. 132

Şekil 7.1. Açılı ankrajlı CFRP şertiler ile beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modeli 137

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Tek doğrultulu taşıyıcı liflere sahip CFRP şeriti 22

Resim 2.2. Üretilen deney elemanlarının geometrik boyutları (boyutlar mm bitimindendir)..... 23

Resim 2.3. CFRP şeritlerin yerleşim bölgelerinin işaretlenmesi 24

Resim 2.4. Geometric dimensions of CFRP fan type anchorage (boyutlar mm cinsindendir)..... 25

Resim 2.5. CFRP şeritlerin hazırlanışı, yüzeylere yapıştırılması..... 25

Resim 2.6. Deney elemanların hazırlanma aşamaları 27

Resim 3.1. Test düzeneği; (a) Perspektif (b) Fotoğraf 31

Resim 3.2. LVDT nin yerleşim yeri 33

Resim 3.3. Birim deformasyon ölçer'lerin hazırlanması 33

Resim 4.1. Deney elemanı 25C50W 35

Resim 4.2. Deney elemanı 25C50W hasar modeli..... 37

Resim 4.3. Deney elemanı 25C50W1N90AF 38

Resim 4.4. Deney elemanı 25C50W1N90AF hasar modeli..... 40

Resim 4.5. Deney elemanı 25C50W1N0AF 40

Resim 4.6. Deney elemanı 25C50W1N90AF hasar modeli..... 42

Resim 4.7. Deney elemanı 25C50W1N45AF 43

Resim 4.8. Deney elemanı 25C50W1N45AF hasar modeli..... 45

Resim 4.9. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF 46

Resim 4.10. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF hasar modeli 48

Resim 4.11. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF 48

Resim 4.12. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF hasar modeli 50

Resim 4.13. Deney elemanı 25C50W2N90/90AF 51

Resim 4.14. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF hasar modeli 53

Resim 4.15. Deney elemanı 25C100W 54

Resim **Sayfa**

Resim 4.16. Deney elemanı 25C100W hasar modeli..... 56
Resim 4.17. Deney elemanı 25C100W1N90AF 56
Resim 4.18. Deney elemanı 25C100W1N90AF hasar modeli..... 58
Resim 4.19. Deney elemanı 25C100W1N0AF 59
Resim 4.20. Deney elemanı 25C100W1N0AF hasar modeli..... 61
Resim 4.21. Deney elemanı 25C100W1N45AF 62
Resim 4.22. Deney elemanı 25C100W1N45AF hasar modeli..... 64
Resim 4.23. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF 64
Resim 4.24. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF hasar modeli 66
Resim 4.25. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF 67
Resim 4.26. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF hasar modeli 69
Resim 4.27. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF 70
Resim 4.28. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF hasar modeli 72
Resim 4.29. Deney elemanı 10C50W 72
Resim 4.30. Deney elemanı 10C50W hasar modeli..... 74
Resim 4.31. Deney elemanı 10C50W1N90AF 75
Resim 4.32. Deney elemanı 10C50W1N90AF hasar modeli..... 77
Resim 4.33. Deney elemanı 10C50W1N0AF 78
Resim 4.34. Deney elemanı 10C50W1N0AF hasar modeli..... 80
Resim 4.35. Deney elemanı 10C50W1N45AF 80
Resim 4.36. Deney elemanı 10C50W1N45AF hasar modeli..... 82
Resim 4.37. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF 83
Resim 4.38. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF hasar modeli 85
Resim 4.39. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF 86
Resim 4.40. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF hasar modeli 88
Resim 4.41. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF 88

Resim **Sayfa**

Resim 4.42. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF hasar modeli 90
Resim 4.43. Deney elemanı 10C100W 91
Resim 4.44. Deney elemanı 10C100W hasar modeli..... 93
Resim 4.45. Deney elemanı 10C100W1N90AF 94
Resim 4.46. Deney elemanı 10C100W1N90AF hasar modeli..... 96
Resim 4.47. Deney elemanı 10C100W1N0AF 96
Resim 4.48. Deney elemanı 10C100W1N0AF hasar modeli..... 98
Resim 4.49. Deney elemanı 10C100W1N45AF 99
Resim 4.50. Deney elemanı 10C100W1N45AF hasar modeli..... 101
Resim 4.51. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF 102
Resim 4.52. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF hasar modeli 104
Resim 4.53. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF 104
Resim 4.54. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF hasar modeli 106
Resim 4.55. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF 107
Resim 4.56. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF hasar modeli 109

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
f_C (MPa)	Compressive Strength of Concrete
f_{ck}	Beton Karakteristik Dayanımı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ACI	American Concrete Institute
CFRP	Karbon Lif Donatılı Polimer
FRP	Lif Donatılı Polimer
LVDT	Elektronik Doğrusal Deplasman Ölçer

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere depremler meydana getirdiği can ve mal kayıplarından dolayı doğal afetler içerisinde en tehlikeli olanıdır. 1986'da Mexico City, 1999'da Gölcük, 2003'da İran, 2011'da Tohuku depremleri binlerce binanın ciddi hasar görmesine ve aynı zamanda milyonlarca insanın yaralanmasına ve ölmesine sebep olmuştur. Dünyanın aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alan Türkiye'de özellikle son yıllarda meydana gelen büyük depremler, mevcut binaların dayanımı hakkında soru işaretleri oluşmasına sebep olmuştur. Meydana gelen depremlerde kayıtlara geçen yapı hasarları ve can kayıpları; mevcut tasarım standartlarının ve inşaat malzemelerinin yetersizliği, bilgi eksikliği, yapım hataları (beton basınç dayanımını projelendirme sırasında öngörülen değerden düşük olması, enine ve boyuna donatıların günümüz yönetmelikleri tarafından öngörülen şartları sağlamaktan uzak olması veya yönetmelik kurallarına uyulmamasından kaynaklanmaktadır. Bu eksiklikler düşey taşıyıcı elemanların eksenel yük, kesme kuvveti, eğilme momenti taşıma kapasiteleri ile sünekliklerini olumsuz etkilemekte ve bunun sonucunda yapıların deprem karşısındaki davranışı öngörülen dayanımın altında olabilmektir. Depremler yapıların depreme karşı dayanıklı tasarım esasları için gerekli bilgi birikimini arttırmış ve hasara uğramış yapıların onarıma ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Yeni tasarlanmış yapıların deprem yönetmenliğine uygun şekilde yapılması ve aynı zamanda mevcut yapıların güçlendirilmesi birçok ülkede hızla büyüyen bir mühendislik hizmet alanına dönüşmüştür. Yapıların depreme karşı güçlendirmenin temel hedefi depreme karşı güvenliği olmayan yapıları çeşitli yöntemler kullanarak uygun bir şekilde güçlendirilmesi ve can kaybını en aza indirilmesidir. Deprem yönetmelikleri, tespit edilmiş zayıf yapılarda sorunu çözmek için iki yol önermektedir. Bu yollardan ilki yapıyı yıkmak ve yapıyı günümüz yönetmenlik ve standartlarına uygun bir şekilde yeniden yapılması, ikincisi ise yapının güçlendirilmesidir. Her ikisinde de verilecek karar yapıda oluşan hasarın büyüklüğüne ve ekonomik faktörlere bağlıdır. Bu nedenle hasar gören yapı elemanlarının güçlendirme yöntemlerinden biri ile belirli bir güvenlik düzeyine çıkararak yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesini, sünekliğini, rijitliğini veya bunlardan bazılarını gereken düzeylere çıkarmak gerekir. Bu işlemde inşaat mühendislerine önemli bir görev düşmektedir. İnşaat mühendisleri zemin etütlerini, statik projeleri ve malzeme kalitesini analiz ederek yapının hasar nedenlerini ve boyutunu belirler. Böylece yapının sağlam olup olmadığına, sağlam değilse yıkılmasına veya güçlendirilmesine karar verirler.

Ehsani ve Saadatmanesh 1997 yılında güçlendirilmiş prekast beton duvarların sismik güçlendirilmesi için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Güçlendirme malzemesi (kompozit kumaş) duvarın dış yüzeyine epoksi ile bağlanır. Hafif kumaşlar son derece güçlüdür ve elemanın eğilme ve kesme kapasitesini önemli ölçüde artırabilir. İnce kompozit kumaşlar, duvarın ağırlığında ve kalınlığında küçük bir artışa neden olur, atalet yüklerinde çok az değişikliğe neden olur ve temellerin güçlendirilmesi ihtiyacını ortadan kaldırır. 17 Ocak 1994 Northridge depreminin ardından bu teknik, Güney Kaliforniya'daki beton duvarların öncelikle yatay olarak inşa edilip daha sonra dikildiği inşa yöntemiyle ilgili bir beton binaya uygulanmıştır. Yöntemin bu hasarlı binayı çok kısa sürede onarmak için en uygun maliyetli alternatif olduğunu kanıtlanmıştır. 20.000 ft'den fazla duvar yüzey alanı güçlendirilmiş ve bu da bu projeyi bu tekniğin bildirilen en büyük uygulaması haline getirmiştir [1].

Paterson ve Mitchell 2003 yılında mevcut bir binanın perde duvarı için önerilen sismik güçlendirmeyi değerlendirmek amacıyla dört adet perde duvar örneği test edilmiştir. Çekirdek duvar, potansiyel plastik mafsal bölgelerindeki uzunlamasına takviyede ekleri, sınır bölgelerinin yetersiz hapsedilmesi ve enine takviyenin yetersiz ankrajı da dahil olmak üzere sünek olmayan takviye detaylarına sahiptir. Sismik güçlendirme, duvarın tabanında başlı takviye, karbon fiber sargı ve betonarme kafa kullanımını içeriyordu. Dört perde duvar örneği ters çevrimli yükleme altında test edilmiştir. Bu duvarlardan ikisinin, duvarın tabanındaki uzunlamasına çelikte bir birleşme yeri ek yeri vardı ve diğer ikisinin, duvarın tabanından 600 mm'lik bir ekleme yeri yapılmıştır. Bu örneklerin her biri, yapım aşamasında test edilmiş ve diğer ikisi testten önce güçlendirilmiştir. Test sonuçları, onarılmış perde duvarların sünekliğini ve enerji dağılımını iyileştirmede başarılı olduğunu göstermektedir [2].

Betonarme, yığma ve çelik yapıların, tasarımları aşamasında yapılan projelendirme hataları, yapıların imalatı sırasında meydana gelen uygulama hataları, yapıların kullanım amacının değişmesi, yapılara etkiyen yüklerin büyüklüğünün yapı ömrü boyunca değişerek artması, yapıların çevresel etkilerden etkilenerek hasar görmesi veya deprem yüklemesi gibi tahmin edilmesi zor yüklemelerin daha yüksek düzeylerde yapılara etkimesi gibi nedenlerden dolayı güçlendirilmesi veya onarılması gerekli olmaktadır. Bu konudaki çalışmalar artarak devam etmekte olup, karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) gibi özel malzemeler bu tür uygulamalarda son 20 yıldır avantajlı özellikleri nedenleriyle tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon takviyeli elyaf kumaşlar ağırlıklarının hafif olması, çok

yüksek mekanik dayanımları, ince olmaları nedeniyle uygulandıkları yapı elemanının mimari geometrik boyutlarını değiştirmemeleri, yapıya ek bir ağırlık eklememeleri nedeniyle yapının dinamik karakteristiklerini değiştirmemeleri, çevresel etkilere karşı yüksek dirençleri gibi birçok sebepten dolayı güçlendirme ve onarım uygulamalarında tercih edilen bir yapı malzemesi haline gelmiştir [3-4].

Karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) ile geliştirilen güçlendirme detaylarında dikkat edilmesi gerekli olan önemli noktaların başında, güçlendirilecek yapıya yapıştırılan CFRP elemanların yüzeyden soyulmasını geciktirerek, CFRP'nin yüksek mekanik dayanım değerlerinin avantajlarından mümkün olan en büyük oranda yararlanılması gelmektedir [5-15]. Bu nedenle araştırmalar bu konuya yönelmiş ve CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında çeşitli türde ankrajlar kullanılarak CFRP güçlendirme bileşenlerinin yüzeyden soyulmalarını geciktirmeye yoğunlaşılmıştır. Yapılan araştırmalar özellikle CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında gerilme birikmelerinin meydana geldiği yapıştırılan CFRP bileşenlerinin uç bölgeleri, bindirme bölgeleri, yapı elemanlarının kesit değiştirdiği bölgeler, köşe bölgeleri gibi yerlerde yapıştırılan CFRP elemanların yüzeyden soyuldukları ve güçlendirme amacıyla geliştirilen detaydan istenilen performans elde edilemeden çok daha düşük kapasitelerde bu soyulma olayının meydana geldiğini göstermiştir [13–34]. Özellikle CFRP elamanlar ile yapılan güçlendirmenin düşük çekme ve kayma dayanımına sahip bir yapı elemanı yüzeyine uygulanması durumunda yüzeyden soyulmanın çok daha düşük kapasite değerlerinde ve ani bir şekilde meydana geldiği yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu konularda yapılan araştırmalar CFRP ile uygulanan güçlendirme detaylarında yüzeyden soyulmanın geciktirilmesi için değişik türde ankraj uygulamaların kullanılabileceğini göstermiş ve çalışmalar bu konuda yoğunlaşmaya başlamıştır [35-37].

Lin ve Zhang 2013 yılında yaptıkları çalışmada öncelikle mevcut beton ve çelik çubukların, FRP ile kayma gerilmesi-deplasman modelleri, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve bu modellerin avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Analiz için FRP ile takviye edilmiş çubuklarının değerlendirmesi için, kayma gerilmesi-deplasman etkisi ile FRP-betonarme kirişler sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kompozit kiriş için geliştirilmiş yeni kayma gerilmesi-deplasman metodu, GFRP ve CFRP ile güçlendirilmiş beton elemanları sonlu elemanlar yöntemi analizi için kullanılmıştır. Kayma gerilmesi-deplasman yönteminin kapasitesini ve uygunluğu ölçmek için sonlu elemanlar ile yapılmış, özetlenmiş ve

sonuçlandırılmıştır. FRP takviyeli beton yapıların analizinde sonlu elemanlar modeline göre daha doğru sonuçlar üretmek için, FRP demiri kayma gerilmesi-deplasman efekti içermesinin büyük önemi vardır. FRP demiri için olgun kayma gerilmesi-deplasman modelleri hakkında günümüze kadar az sayıda çalışma yayınlanmıştır. Bu çalışmada şimdiye kadar yapılmış birkaç çelik ve FRP demiri için mevcut kayma gerilmesi-deplasman modelleri gözden geçirildi. FRP güçlendirmesini analizi için beton kirişler modeli kullanılmıştır. FRP inşaat demiri için üç ve çelik inşaat demiri için iki model geliştirilmiştir. Malvar'ın modeli, FRP demiri kayma gerilmesi-deplasman eğrisinin tanımı için eksiksiz bir sonuç verse de bu ilişki daha az kapsamlı ve daha az güvenilir olduğu değerlendirilmektedir. Tighiouart ve ark.'nın modeli, kayma gerilmesi-deplasman modelinin artan kısımların tanımlarını inceledi, ancak hata olduğu tespit edildi. Sayısal sonuçlar karşılaştırarak Rossetti tarafından kalibre edilen BPE modeli sayısal analizde uygun olmadığını tespit edilmiş, ancak bu modelleme tüm durumları kapsayamıyor. Buna ek olarak, doğru tahminler başlangıçta yalnızca CMR'yi kullanarak oluşturulmalıdır ve model ve taşıma kapasitesi tahmin edilen test verilerine göre çok daha düşüktür. Haskett ve diğerlerinin çelik bağlayıcılar için bağ gerilme-kayma modeli sonlu elemanlar analizinde yükte artırış olunca yeterince doğru tahminler vermiyor. Bu çalışmada stres-kayma modelini araştırmak için düzeltilmiş BPE modelin değerleri, FRP inşaat demirlerine uygun olduğunu göstermektedir. GFRP ve CFRP-betonarme kirişlerin sayısal analizleri, sonlu elemanlar yöntemiyle düzeltilmiş BPE modeli beton kirişlerin küresel yapısal davranışı için çok iyi tahminler vermektedir ve hem takviye çubuklarındaki yerel gerilme ve hesaplanan sonuçlar diğerlerinden daha doğru ve tutarlıdır. Ancak, düzeltilmiş BPE Modeli eksiksiz değildir. Örneğin modellemede inşaat demirin çapı ve lif tipinin etkilerinin ihmal edilmiştir. Onun için özellikle çeşitli faktörlerin kayma gerilmesi üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Parametrik çalışmada düzeltilmiş BPE modelin etkisi FRP ile takviye edilmiş demir yüzeylerinin üstünde yapılmıştır. İnşaat demirin yüzeyinin türünün, bağ üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulunmuştur. Pürüzlü yüzeyler, FRP inşaat demiri ve beton arasındaki en iyi bağ kurarken, pürüzsüz yüzey en kötü bağa sahiptir. Nervürlü ve örgülü FRP inşaat demirlerin yüzeyleri benzer şekilde çalışmaktadır [38].

Zhang ve Smith 2011 yılında FRP bağlantılarının üzerine yapılan araştırmalar sınırlı olduğu için ve bu alandaki boşluğunu azaltmak amacıyla 30 adet FRP-beton bağlantının kesme testin sonuçlarını rapor etmişlerdir. Bunlardan 26 eklemin farklı geometrik konumlarda FRP ankraj ile güçlendirilmiş kalan son 4 numunede ankrajsız olarak test edilmiştir. Daha spesifik

bir araştırma yapmak için, FRP ankrajının, fan lifleri vasıtasıyla FRP plakasına bağlantısı, ankrajların açısına göre çeşitli olarak yapmışlardır. Bu araştırmada sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

i. Yükleme yönünde, fan tipi FRP ankraj, papyon gibi bağlanmış FRP ankrajlar ile benzer şekilde gerçekleştirilir; ancak ikinci durumda iki kat elyaf kullanıldı. Bununla birlikte, papyon gibi bağlanmış FRP ankrajlar, sınırlı bağ kuvvetine rağmen FRP ve beton arasında daha büyük kayma gerilmesini mümkün kılar.
ii. Ankraj dübelin açısı yük yönüne göre arttıkça, mukavemette artmaktadır. Bağın sünekliği, kırılgan ankraj başarısızlığından ve bir pik sonrası güç rezervinin atlanmasından görüldüğü üzere, ankrajın açısına göre bir artış ile azalmaktadır. Testlerde ankrajlı elemanlarda ankrajın açısı yüklenmenin yönüyle aynıysa, ankrajsız kontrol numunelerle kıyasladığında %160 artış göstermektedir. Buna ek olarak, FRP plakası tarafından direnen maksimum gerilme, ankrajsız kontrol eklemleri için ortalama %25'den, bazı ankrajlı eklemleri için %67'ye yükselmektedir.
iii. Ankraj dübelin açısı ile bağ mukavemetin arttırımı arasında lineer bir ilişki varlığı ispatlanmıştır [39].

CFRP ile geliştirilen güçlendirme detayının uygulandığı yapı elemanı veya sisteminin taşıma gücü gibi özelliklerini ne ölçüde artırdığının doğru bir şekilde tespit edilmesi için uygulanan güçlendirme detayının ne kadar kapasitesi olduğunun doğru bir şekilde hesaplanabilmesi son derece önemlidir. Aynı şekilde yüzeyden soyulmayı geciktirerek taşıma gücünü artırmak için ankraj kullanılan CFRP güçlendirme detayları için de taşıma gücünün doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önemli bir araştırma konusudur. Yapılan araştırmalar son yıllarda bu konulara yoğunlaşmış ve güçlendirme amacıyla yapıştırılan yapı ile CFRP bileşenlerin ara yüzeyindeki gerilme dağılımları, CFRP güçlendirme elemanlarının taşıma gücü ve yüzey ile CFRP arasındaki kayma gerilmesi-deplasman malzeme modelleri konularında çalışmalar artmıştır. Yüzeylere yapıştırılan ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili de bu konulardaki araştırmalar ankrajsız CFRP şeritlere göre çok daha sınırlı sayıda olmasına rağmen literatürde yer almaktadır [38-39]. Ancak ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili araştırmalar incelendiğinde çalışmaların kapsamında CFRP şeritlere uygulanan eksenel çekme kuvvetlerine 90^o açı ile dik olarak yerleştirilen ankrajların incelendiği görülmektedir. Geliştirilen güçlendirme detaylarının türüne ve uygulama yerlerine göre CFRP şeritlerin yüzeyden soyulma risklerinin yüksek olduğu konumlara yerleştirilen ankrajların her zaman

CFRP şeritlere etkiyen çekme kuvvetlerine dik olarak konumlanması mümkün olmamaktadır. CFRP şeritler üzerine yerleştirilen ve şerit ekseni ile belirli açılar yapan ankrajların CFRP şerit taşıma gücüne olan etkileri, CFRP şerit ile yapışma yüzeyi arasındaki gerilme dağılımı üzerinde meydana getirdiği değişiklikler ve yapışma yüzeyi ile CFRP şerit arasındaki kayma gerilmesi-deplasman modeli gibi konular incelenmesi gerekli olan önemli araştırma konularıdır. Yapılan literatür taraması sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanarak bu konuların incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde yapılan incelemeler özellikle kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin güçlendirilme uygulamalarında açılı CFRP şeritlerin yaygın bir şekilde kullanıldığı ve tercih edildiğini göstermiştir. Bu tür güçlendirme detaylarında kullanılan açılı CFRP şeritlerin taşıma güçlerinin hesaplanabilmesi için bu konudaki yapılan çalışmaların literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Casanova, Jason ve Davenne 2011 yılında betonarme yapıların simülasyonu için kayma gerilmesi-deplasman kullanmışlar. Bu çalışmada, çelik arası bağ efektlerini göstermek için kafes elemanları ve çevresindeki beton ile modellenen yeni bir sonlu elemanlar modeli önerilmiştir. Bu bağ etkileri, çelik-beton arasındaki ek iç kuvvetler aracılığıyla hesaba katılmıştır. Önerilen model, betonarme yapıların üzerinde uygulanmıştır. Bağ kuvvetlerinin çelikten betona aktarımı ile ilgili karakteristik bir stres dağılımı gözlemlenmiştir. Bu durumda, çatlak hem betonun heterojen özellikleriyle (bağlama boyunca çekme mukavemetinin dağılımı) hem de malzeme arasında gerilmelerin yeniden dağıtıldığı geçiş bölgeleriyle indüklenmiştir. Simülasyonun sonunda niteliksel olarak deneysel gözlemlere karşılık gelen sonlu sayıda çatlak gözlemlenmiştir. Çelik ile beton arasındaki mükemmel ilişkinin hipotezini (yapısal uygulamalarda klasik hipotez) kullanılan başka bir simülasyon da önerilmiştir. Bu durumda çatlaklar, beton güç dağılımı ile yönetilir çünkü; kırılmamış bölgelerde gerilme dağılımı homojendir. Nihai durumdada, beton tamamen kırılır. Bu, kayma gerilmesi-deplasman modelinin çatlama sürecinin nasıl artırabileceğini gösterir. 3D simülasyonlar yardımıyla beton kesitteki stres dağılımının etkileri de değerlendirilmiştir. Son olarak, önerilen sonlu elemanlar modelinin sınırlamaları ana hipotez ile ilgili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca çelik, kafes elemanları kullanılarak modellendiğinde, ilgili zorluklarla (örneğin, stres konsantrasyonu) dikkate almak zorunlu olduğu gösterilmiştir [40].

R. Al-Mahaidi ve R. Kalfat 2010 yılında ankrajlı tek yönlü kumaş sargılı CFRP plakları araştırmışlar. Makalede iki alternatif ankraj yeri sunulmuştur; hem laminasyonun yönüne paralel hem yatay olarak yönlendirilmiş tek yönlü kumaş sargısı kullanılmıştır. Her iki ankraj formu, gerilmeyi daha geniş bir beton alanına dağıtarak CFRP-betonun bağ kuvvetine arttırmasında etkili olmuştur. Deneysel çalışmada, beton yapıların güçlendirilmesinde CFRP ankraj sistemlerine ilişkin aşağıdaki sonuçlara elde edilmiştir:

- CFRP laminatların uçlarını laminat şerit boyunca yatay olarak uygulayan tek yönlü CFRP kumaş ile sabitlemek (ankraj tipi 2), nihai göçme yükünü %39-43 oranında arttırmada etkili olmuştur. Ayrıca maksimum laminat yükü göçmeden önce %19-28 artışa neden olmuştur.

- Ankraj tip 2'nin daha yüksek yük taşıma kapasitesi, laminat yapışkan gerilmeleri daha geniş bir beton genişliğine dağıtan 50 mm yapışmış bantlara iletmesiyle yorumlanmıştır.

- Ankrajlı kumaş sargı numunesi için kontrol numunesinden daha fazla lokalize bağ gerilmeleri gözlemlenmesine rağmen, bu ankraj formunun yapışkan madde ve beton katman arasındaki bağ kuvvetini eşit bir şekilde arttırmak için yeterince yüksek bir seviyede sağlamadığına gözlenmiştir.

- Laminat (ankraj tipi 3) yöne ile paralel tek yönlü liflerin uygulanması, ankrajsız kontrol modele kıyasla nihai arıza yükünü %46-57 oranında arttırmada etkili olmuştur. Bu ankraj formuna maksimum laminat uzamalarda %18-37'lik bir artış da kaydedilmiştir.

- Ankraj tip 3'ün mukavemetindeki artış yükü, yüklenen kenardan daha büyük bir alana aktarılmıştır [41].

Fawzia, Zhao ve Al-Mahaidi 2009 yılın da çift şeritli CFRP ile bağlı çelik levhalarda, bağlantılarda ki bir dizi testler yapmışlar. Araştırmaların temel amacı, güçlendirilmiş çift şeritli bağlantıların yük altında deneysel ve sayısal analizini kullanılarak, bağ özelliklerini detaylı olarak araştırmışlar. Parametrik sayısal modelleme çeşitli CFRP şeritlerin yapışma uzunlukları, yapışkanın maksimum gerilimi ve yapışkan tabaka kalınlıklarının değişkenleri ile yapılmıştır. Çalışmada yük altındaki çift şeritli CFRP ile bağlı eklem numunelerindeki

test sonuçları sunulmuştur. CFRP şeritleri üç farklı yapıştırıcı türü ile kullanılmıştır. Deneysel ve parametrik çalışmalardan elde edilen sonuçları şöyle özetlenebilir:

- Kayma gerilmesi, yüklenen kenardan eklem dışına olan mesafeye doğru azalır.

- Kayma gerilmesi-deplasman modeli, etkin bağ uzunluğunun ötesinde, bağ uzunluğundan etkilenmez.

- Yapışkanların yük-deplasman grafiklerinde pik noktadaki yük, maksimum deplasman üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

- Yapışkan tabakanın kalınlığı, kayma gerilmesi-deplasman modelin üzerinde önemli etkilere sahiptir. Yapışkan kalınlığı arttıkça başlangıç ve maksimum kayma gerilmesi artar.

- Kayma gerilmesi-deplasman modelinde parametrik çalışmada kullanılan değişkenler arasında, maksimum kesme gerilmesi, başlangıç deplasman ve maksimum deplasman dikkate alınacak üç önemli faktördür [42].

Bilotta, Ludovico ve Nigro 2010 yılın da FRP nin betonun üzerinden soyulma kapasitesini modellemek için deneysel araştırma yapmışlar. Teorik kırılma enerji ilişkileri genel olarak FRP-beton bağ testi ile elde edilen deneysel verilerle kalibre edilmiştir. Mevcut deneysel FRP-beton bağ testleri, en yaygın test Tek-Kırılma testi (SST) ve levhalar yerine FRP levhalarını içeren en büyük test parçası olduğunu göstermişlerdi. Yazarlar tarafından, CFRP levhaları (18) ve plakalar (16) üzerinde yapılan 34 SST testinin sonuçları rapor edilmiş ve mevcut makalede tartışılmıştır; CFRP takviyeli levha ve plaklar, soyulma açısından karşılaştırılmış. Genişletilmiş bir FRP beton bağ testi veri tabanına dayanarak CNR DT200 / 2004 tarafından EBR FRP güçlendirmesi için kırılma enerjisinin hesaplanması ve kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bağlanma yükünü hesaplamak için deney sonuçları ile CNR-DT200 / 2004 tarafından verilen sonuçları karşılaştırmada, levha takviye bağlama yükünün sıklıkla hafife alındığını ve plakalarla ilgili olan bağlanma yükünü olduğundan yüksek tahmin etmiştir [43].

Fedele ve Milani 2011 yılın da FRP levhalar ve duvar sütunların arasındaki bağlanma gerilmelerinin tabakalar şeklinde ayrılması incelemişler. Çalışmalarında, iki farklı üç

boyutlu sonlu elemanlar modelleri arasındaki ayrıntılı bir karşılaştırma geliştirmişler: (i) Sadece tuğla ve harçtan yapılmış duvar (FRP takviyesi desteğe mükemmel bir şekilde yapıştığın da sadece duvarın toplu hasar görebileceği bir model hesaba katılır) (ii) FRP ve beton arasında yapışkan, sıfır kalınlıkta bir arayüzey dikkate alındığı alternatif bir model içerir. Tabakaların ayrılması ve yerel gerilme dağılımları arayüzeyde, FRP takviye genişliğini değiştirerek incelenmiş ve araştırılmış. Simülasyon sonuçlarına göre, mükemmel yapışma ile tam 3D hasar modelinden, FRP şerit ve direk genişlikleri arasındaki $r = b_f / b$ (FRP şeritin genişliği / beton yüzeyin genişliği) oranı arttıkça hem pik ortalama kayma gerilmesi hem de bütün süneklilik azalır. Ayrıca hasarlar FRP ankrajından başlayarak tuğla yığınının içinde derin bir şekilde ilerleyen göçme mekanizmaları, FRP genişliğine büyük ölçüde bağlılığı gözükmektedir [44].

Sayed-Ahmed, Bakay ve Shrive 2008 yılında eğilmeye karşı güçlendirilmiş FRP lamine ve betonarme elemanların arasındaki bağlanma kuvveti ve soyulma modlarını araştırmışlar. Ayrıca laminatlar ile beton arasındaki bağ kuvvetini tahmin etmek için mevcut modelleride incelemişler. Araştırmada FRP rehabilite edilen yapıların davranışı pek çok durumda doğru bir şekilde modellenmesi gerektiği gözlenmiş, örneğin; göçme modlarının daha iyi anlaşılması, emniyet ve maliyet dengesini sağlayarak daha hassas tasarımlar sağlar. Eğilmeye karşı güçlendirilmesi için harici bağlanan FRP laminatın, RC kirişlerinin-levhalarının en yaygın göçme modlarından biri, FRP'nin yüzeyden soyulmasıdır. FRP laminatlar ile beton arasındaki kompozit etki, büyük ölçüde iki malzeme arasındaki kayma davranışına bağlıdır. FRP laminatlar ve levhaların incelenmesini şu şekilde açıklamışlar:

- FRP laminatlarla güçlendirilmiş betonarme elemanların göçme modları, malzemeler arasındaki kompozit etkinin devamına bağlı olarak iki kategoriye ayrılabilir. Kompozit etki, nihai yüke ulaşana kadar muhafaza edildiğinde üç şekil göçme moduyla karşılaşabiliriz: betonun kırılması, gerilmeden dolayı FRP'nin kopması ve beton kirişin kesme yetmezliği. Kompozit etki, nihai yüke ulaşılıncaya kadar muhafaza edilmediğinde, FRP laminatların soyulmasından dolayı hasar oluşmaktadır. Bu göçme modu, ara yüzü soyulması olarak adlandırılır ve en yaygın göçme modudur. Ara yüzey soyulması bu modlardan dolayı oluşabilir: betonun kapak atması, plakaların sonlarında ara yüzeyin soyulması, ara (eğilme veya eğilme kesmesi) çatlağa bağlı ara yüzeyin soyulması ve kritik diyagonal çatlakla indüklenen ara yüzey soyulması.

- Levhalarda soyulma modelleri genel olarak üç kategoriye ayrılır: kesme kapasitesine dayalı modeller, beton diş modelleri ve ara yüzey gerilme tabanlı modeller. Kesme kapasitesi modelinde soyulma, betonun kesme direnciyle ilişkilendirir. Yapıştırılmış plak ile beton arasındaki ara yüzey gerilimi stresi değerlendirilmemiştir. Betonun diş modelinde, iki bitişik kırık yüzey arasında beton "diş" kavramı kullanılır. Gerilme yapıştırılmış plakanın üzerinde tüm boyunda üniform şekilde dağılmaktadır. Kesme gerilmesi, betonun gerilme direncini aştığı zaman soyulma oluşur [45].

Uygun yapışma tekniğini seçmek, beton yapıları güçlendirmek ve onarmak için çok önemlidir çünkü farklı yapıştırma teknikleri farklı performanslara neden oluyor. Jumaat, M. M. Rahman ve M. A. Rahman 2010 yılında, epoksi yapıştırma tekniği, öngerilmeli güçlendirme tekniği, soyulmaları ankraj ile sabitleme tekniği ve mekanik olarak tutturulmuş CFRP'yi tekniği gibi farklı bağlama teknikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında mevcut mekanik olarak tutturulan teknikler eleştirel olarak gözden geçirilerek diğer geleneksel güçlendirme teknikleriyle karşılaştırmışlardır. Beton yapıların güçlendirilmesi ve onarımı için uygun bağlama tekniğini seçmeye yardımcı olmuştur.

Kullandıkları güçlendirme yöntemleri bu şekilde sıralanabilir:

(A) Kesitin genişlemesi: "Yapıştırılmış" betonarme, mevcut bir yapısal elemana bir kaplama şeklinde ilave edilir.

(B) Çelik levha yapıştırması: Çelik levhalar kompozit bir sistem oluşturmak ve eğilme mukavemetini arttırmak için epoksi yapıştırıcı ile beton yüzeyine yapıştırılır.

(C) Dıştan gerdirme sistemi: Aktif dış kuvvetler eğilme mukavemetini arttırmak için önceden gerginlenmiş kablolar kullanarak yapısal elemana uygulanır.

(D) Epoksi ile bağlanmış (EB) sistem: FRP kompozitleri eğilme mukavemetini arttırmak için epoksi yapıştırıcı ile betonun yüzeyine yapıştırılır. FRP malzemeler, levha veya plaka halinde olabilir.

(E) Yüzeye yakın monte (NSM) sistem: FRP çubuklar veya plakalar betonun içine yerleştirir ve daha sonra epoksi ile betonun üzerine yapıştırılır.

(F) Bağlanmamış / mekanik olarak tutturulmuş sistem: Bu yöntemde, FRP'leri betonun üzerinde önceden delinmiş deliklere özel bir tabanca yardımıyla çivilenir.

Harici olarak bağlı sistemler için göçme modlarında şu şekilde açıklamıştır:

Durum (i): Tam bileşik etki

1. Betonun kırılması
2. FRP nin kopması

Eğer erken göçme önlenirse kiriş nihai eğilme kapasitesine ulaşabilir, FRP kompozitin gerilme kopmasına ulaşabilir ya da beton basınçta ezilebilir. FRP kopmasının kırılgan göçmesi haricinde RC kirişlerinin klasik eğilme hasar modlarına benzer.

Durum (ii): Erken göçme

1. Uç kısımlarda kapağın ayrılması: Betonun kapak atması, yüksek seviyede ara yüzey kesme ve normal gerilmeler nedeniyle levha ucunda veya yakınında bir çatlak oluşması ile başlar ve numunenin aniden son bulmasına neden olur.

2. Ara yüz ara tabakalarının delaminasyonu: Soyulma göçmesi, plakanın ucuna yakın olan en zayıf elemanın (beton veya epoksi) dayanımını aşan yüksek ara yüzey kesme ve normal gerilmelerle meydane gelir.

3. Eğilme çatlakları ile indüklenen soyulma: Çatlak yerindeki yoğun bağ gerilmesi, en zayıf katmandaki kesilme direncini aştığında eğilme bağlı soyulmalar indüklenebilir.

4. Kesme çatlakları ile indüklenen soyulma: Kesme çatlaktan kaynaklı soyulma hem kesme ve hem eğilme momenti olan bölgede oluşur. Bunun nedeni iki mekanizmanın kombinasyonudur. Birincisi, eğilme çatlak ile oluşan soyulma; ikincisi eğimli çatlağın dikey hareketi ile ilgili olduğunu söylenebilir [46].

Dıştan bağlı FRP laminatın sonradan takviye edilmiş betonarme (RC) elemanlardan erken soyulması, FRP'nin elde edilebilecek güç artışının seviyesini sınırlanmasına ve verimsiz olmasına sebep olur. Bunun için Cameron 2011 yılında çalıştığı tezde, yeni karbon FRP

ankrajları, erken soyulma başlangıcını geciktirmek ve üstün güç elde etmek için kullanılmıştır. Ankrajları laminat ve beton üzerine yapıştırmak için en uygun epoksi bulmak için küçük ölçüde beton prizmalar üzerinde dokuz çift kesme testi gerçekleştirmiştir. Epoksi tiplerinden bir tanesi, prizmanın nihai yükünü, laminatın iki ucundaki iki ankrajlı, ankrajsız referans numunelerine göre %83,7 oranında arttırmıştır. Araştırmanın ikinci aşaması, altı büyük ölçekli T-kirişinin 4500 mm açıklık, 400 mm yükseklik ve 500 mm flanç genişliği, dört nokta bükümüne sahip test edilmesinden oluşmaktadır. İki kiriş, kontrol kirişleri olarak FRP takviyesiz olarak test edildi. Bir kiriş sadece epoksi ile birleştirilen FRP ile test edildi. Geriye kalan üç kiriş ankrajlı ve FRP epoksiyle birleşmiş şekilde test edildi. 30 adet ankraja sahip olan kirişlerden bir tanesinde FRP nin soyulma yükü, ankrajsız kirişlerle kıyasladığında %46'lık bir artış sergilerken FRP laminatı maksimum yük kapasitesinin %80'ine eşit bir maksimum yük elde etti. Yalnızca epoksi ile güçlendirilmiş kirişlerde %94'lük bir artış elde edildi. Sonuçlar, ankraj sisteminin etkinliğini ve FRP laminatın verimli bir şekilde kullanılmasının uygun bir yolunu göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçları şu şekilde yazabiliriz:

1- İki ankraja sahip beton prizma numuneleri, en yüksek nihai yükü sağlamışlar. Ayrıca ikinci bir ankraj eklenmesi, numunenin ilk ankraj kadar yük taşıma kapasitesini arttırmadı.

2- Bir ankraj ile laminatın yüke karşı direnci, herhangi bir ankraj olmayan referans deney elemanından karşılık gelen yükten %70 daha yüksektir.

3- Sikadur 30 epoksi, diğer epoksilere kıyasla en yüksek nihai yüke ulaştığı için ankrajları betona ve FRP laminata yapıştırmak için en uygun epoksidir [47].

Realfonzo, Martinelli, Napoli ve Nunziata 2010 yılın da betonarme elemanlarda, mekanik bağlanmış elyaf takviyeli polimer laminatların ara yüzey davranışını araştırmayı amaçlayan deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneysel çalışmada, farklı düzenlere göre düzenlenmiş tekli veya çoklu vidalı ankraj yoluyla beton numunelerine tutturulan FRP laminatlar üzerinde 34 adet doğrudan kesme testi (DST) yapılmıştır. 17 numunede, her bağlayıcı kafası ile laminatın dış tarafı arasına bir çelik pul yerleştirildi ve kalan diğer numunelerde pul kullanılmadı. Yapılan testlerde bağlantılarının davranışını ağırlıklı olarak yük taşıma

kapasitesi, FRP gerilme dağılımı ve hasar mekanizması açısından değerlendirildi. Bağlantı elemanı konumu ve pulun varlığı deneysel olarak etkisi de araştırılmıştır. Laminat ile beton yüzey arasındaki etkileşimi tanımlamak için olası bir yük-deplesman kalibre etmek için tek bir vida kullanılarak numuneler üzerindeki testlerin sonuçları kullanıldı. Deneysel olarak gözlemlenen davranışların etkisini araştırmak için SAP2000'de basitleştirilmiş sonlu elemanlar modelleri uygulanmıştır. Laminat-ankraj yer değiştirmesinin deneysel davranışları araştırılmış, etkisini ölçmek için üç alternatif model incelenmiştir. Bağlantı düzeneğinin etkisi göz ardı edildiğinde, benzer numunelerde de pul olmayan bağlantılardan elde edilen yük-deplasman eğrilerinin önemli derecede etkilendiğini bulunmuştur. Maksimum yük noktasından sonra düşüş daha yumuşak bir eğimle belirlendi. Pul ile tutturulmuş FRP laminatlar çökme sırasında elde edilen yüksek deplasman değerleri ile daha düzenli bir davranış sergiledi. Bağlayıcıların sayısı 2'den 4'e çıkarıldığında bağlantının pik gücü neredeyse iki katına çıktı. Bağlantı eleman aralığı, testlerde daha önemli bir rol oynadığı belirlendi. Genellikle daha geniş aralıklı ankrajlar testlerde daha iyi sonuçlar vermektedir [48].

Mevcut binalarda yapısal iyileştirme ve yenilenmesi için fiber takviyeli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ankrajsız CFRP takviyelerinin hem beton hem de duvar üzerinde göçmesi, çoğunlukla kompozitin yük değerleri, gerilme mukavemetinden daha düşük olduğu için alt tabaka veya birleştirme yüzeyinde meydana gemektedir. Duvarlarla ilgi çalışmalar sınırlıdır bu boşluğu doldurmak için Fagone, Ranocchiai, Caggegi, Briccoli Bati ve Cuomo 2013 yılın da CFRP şeritleri ile takviye edilmiş, CFRP çivi ankrajı ile alt tabakaya tutturulmuş tuğla örnekleri üzerinde deneysel çalışma yapmışlar. Düzlem CFRP takviyeli şeritler genelde kırılgan göçme modu göstermektedir. Bu çalışmada bildirilen deneysel çalışmalar, düzgün tasarlanmış mekanik ankrajların hem göçme yükünü hem de takviyenin sünekliliğin arttırdığını göstermektedir [49].

2013 yılında Colombi, Fava ve Poggi yaptıkları çalışmada, literatürde seçilen sonuçları ve yazarların yaptığı itme-çekme, soyulma testlerini birleştirerek geniş bir veri tabanı elde edilmiştir. Testler, farklı uzunluklarda sargı (13) ve şeritler (17) ile toplam 30 adet numuneden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlar ve ilgili istatistiksel analizler şunları göstermektedir:

- Genel olarak, FRP sargıyla güçlendirilmiş numuneler için daha yüksek bağ kuvveti gözlenmiştir. Pultrüde şeritler, lamine edilmiş sargılara kıyasla daha büyük bir kalınlığa sahiptir. FRP-beton ara yüzeyindeki kesme ve normal gerilmeler, takviye kalınlığı ile birlikte artmakta ve bu da FRP takviyesinin soyulma performansının üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir.

- Mevcut bağ kuvveti ve kırılma enerjisi modelleri için bir onay olarak, istatistiksel analizler hem normal hem de lognormal dağılım modellerinin, sargı takviyeli sistemler için bağlanma yükünün doğru bir şekilde tahmin edildiğini ortaya koymuştur. Lognormal dağılım, şerit takviye sistemleri için daha uygundur [50].

Kotynia 2011 yılın da çalıştığı makalede, kompozit karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) materyalleri, harici olarak bağlanmış (EB) ve yüzeye monte edilmiş (NSM) FRP ile güçlendirilmiş takviyeli kiriş betonlarla ilgilenmiş. Kayma gerilmesi-deplasman modelini, modifiye RILEM kiriş bağı testi ile altı parametrenin açısından incelmiş. Bunlar; kiriş aralığı ve derinliği, takviyeli çeliğin uzunluğu, CFRP şeritlerinin ve levhaların tipi, CFRP şeritlerin bağ uzunluğu ve betonun mukavemeti. Bu çalışmada mevcut çelik takviyenin etkisi FRP-beton bağ koşulları kirişin tüm boyu üzerinde araştırılmış, ayrıca kirişin orta kısmında takviye çeliğin olmayan numunelerde araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilmiş bulgular sonuçlar şu şekilde sonuçlanmıştır:

- Beton mukavemetindeki artış CFRP nin soyulmasını geciktirir ve CFRP nin soyulması için gereken gerilme artar.

- Betonarme kesitlerin kontrolü için güçlendirilmiş takviyeli kirişlerin son yükü, çeliğin eğilme ve bükülme yetersizliği ile ilerlemekte ve FRP-beton ara yüzündeki derzlerin, çelik donatı ile olan bağlantı hatalardan etkilenmemektedir. Orta mesafeden kesilmiş çelik çubuk numunelerin aksine CFRP şeritleri ve beton arasındaki kaymayı gösterir.

- Harici olarak bağlanmış (EB) ve yüzeye monte edilmiş (NSM) edilmiş kirişlerin nihai yükü, betonun mukavemeti önemsiz bir etkiye sahiptir.

- Orta kısımdan kesilmiş çelik çubukların beton dayanımı, CFRP'nin bağ gerginliği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görünmektedir.

- Islak yatırma tabakalarıyla harici olarak güçlendirilmiş kirişler, prefabrik şeritlerle güçlendirilenlerden daha büyük CFRP bağ gerginliğini gösterir.

- Çelik takviyenin kesilmesi CFRP bağlanmayı geciktirir, böylece CFRP bağı gerginliğini önemli ölçüde arttırır ve CFRP ile yapışkan arabirimindeki kayma nedeniyle bozulma modunu bükülme tipinden bağ koparmasına kadar değiştirir.

- Takviye kompozitin oranında artış, CFRP bağ geriliminin düşmesine neden olur.

- Uzunlamasına çelik takviyenin kesilmesi CFRP bağlanmasını geciktirir, böylece CFRP bağ gerilimini önemli ölçüde arttırır ve CFRP bağlanması kesilme nedeniyle başarısızlığı, büküm tipinden büküm başarısızlığa değişilir.

- İç çelik takviye, FRP-beton bağ davranışında önemli etkiye sahiptir. İç çelik çubukların varlığı, betonarme arıza düzlemini, trapez biçimli (net beton numunelerindeki) yatay, çelik takviyenin (betonarme elemanlarda) hemen hemen yatay veya yatay olarak hareket ettirir [51].

Abdel Baky, Ebead ve Neale 2012 yılın da FRP-beton ara yüzeyindeki doğrusal olmayan mikromekanik tabanlı kayma gerilmesi-deplasman modelini araştırmışlar. Bu çalışmada, FRP-beton ara yüzler için doğrusal olmayan bir kayma gerilmesi-deplasman modeli elde etmek için ve yerel bağ kuvvetinin değişimini açıklamak amacıyla bir prosedür geliştirilmiştir. Kayma gerilmesi-deplasman modeli beton için mikro düzlem teorisini kullanarak, 3D doğrusal olmayan mikromekanik tabanlı sonlu elemanlar sonuçlarına dayanılarak geliştirilmiştir. Mikro düzlem kurucu kanunu sonlu elemanlar analizinde, simülasyonları çalıştırmak için (ADINA) sonlu elemanlar paketinde kullanıcı tanımlı bir altprogram olarak uygulanmıştır. Sonlu elemanlar sonuçları, FRP-beton bağlantıları için doğrusal olmayan kayma gerilmesi-deplasman modelini geliştirmek için kullanılmıştır. Ardından, tüm yerel kayma gerilmesi-deplasman ilişkisini tanımlamak için yeni bir matematiksel yaklaşım önerilmiştir. Önerilen ara yüz modeli, FRP laminatların, yapıştırıcı ve beton katmanların doğrusal olmayan katkılarından sorumludur. Son olarak da önerilen bağ-kayma modeli etkinliğini değerlendirmek ve geçerli olduğunu göstermek için deneysel 118 numunenin sonuçları kullanılmıştır. Ayrıca, önerilen modelin özelliklerinden ve öngörülerinden ve literatürdeki iki kayma gerilmesi-deplasman modelin tahminlerinden

karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçta üç ayrı modele tanımlamak için yeni bir matematiksel yaklaşım önerilmiştir. Birinci modelde, bir ortotropik FRP laminatın kesme davranışını yakalanmıştır. İkinci modelde yapışkan tabakanın kesme özelliklerini simüle edilmiştir. Üçüncü modelde, ara katman (interfacial layer) olarak adlandırılan betondaki ince tabakanın linear olmayan kesilmesini temsil etmiştir. Önerilen kayma gerilmesi-deplasman modelini kalibre etmek için büyük miktarda deneysel veriler kullanılmıştır. Önerilen kayma gerilmesi-deplasman modeli, FRP, beton ve yapışkan tabakaların özelliklerini yansıtmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar tahminleri ile deney sonuçları kıyasladığında çok iyi bir yaklaşım gözlenmiştir [52].

Wali Dın 2014 de yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında tez çalışması kapsamında CFRP şeritler ile delikli yığma yapı tuğlası, dolu harman tuğlası ve gaz beton yüzeyler arasındaki gerilme dağılımı, yük-kayma deplasmanı davranışı ile taşıma gücü performansları deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca CFRP şeridin üzerinde yüzeyden soyulmasını geciktirmek için CFRP'den üretilen fan tipi ankrajın gerilme dağılımı, yük-kayma deplasmanı davranışı ve taşıma gücü değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen değişkenler CFRP şerit genişliği, CFRP şerit etkili yapıştırma boyu ve CFRP şeridin yapıştırıldığı malzeme türüdür. Yapılan 24 adet deney sonucunda elde edilen deneysel taşıma gücü değerleri, yaygın ve güncel 2 farklı analitik kapasite denklemi kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- CFRP şerit yapışma boyu ve CFRP şerit genişliği arttıkça deney elemanlarının maksimum taşıma gücü değerleri de artış göstermiştir.

- CFRP şeridin üzerinde yer alan bir adet fan tipi CFRP ankrajı deney elemanlarının maksimum taşıma gücü değerleri üzerinde artışa neden olmuştur.

- Gözlemlenen göçme modları incelendiğinde her üç malzeme türünden üretilen ankrajsız deney elemanlarının hepsinde CFRP şeritlerin yüzeyden soyulduğu gözlemlenmiştir.

- Ankrajsız deney elemanlarında gerilme dağılımı, yüklemenin uygulandığı kenar noktada maksimum değerde ve giderek azalarak sıfıra yakın bir değere kadar azalan bir dağılım göstermektedir.

- Ankrajlı deney elemanlarında gerilme dağılımında ankrajın bulunduğu noktada belirgin bir gerilme artışı meydana geldiği ölçülmüştür [53].

Mertoğlu 2015'de yaptığı doktora tez çalışmasında çatlaksız, eğilme çatlağı ile kesme çatlağına sahip beton yüzeyine yapıştırılan ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritler ile yüzey arasındaki kayma davranışı, bond-slip modeli ve ANSYS yazılımı kullanılarak model oluşturulması ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Farklı şerit genişlikleri ve şerit yapışma boylarına sahip 4 referans deney elemanı, 10 adet farklı sayıda ankraj uygulaması yapılmış deney elemanları ve 16 adet farklı sayıda eğilme ve kesme çatlağına sahip deney elemanı toplam 30 adet deney elemanı test edilmiştir. Deney sonuçları şerit genişliği, şerit yapışma boyu, ankraj sayısı ile eğilme ve kesme çatlaklı olarak gruplandırılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir:

- CFRP şeritlerin maksimum taşıma kapasitesinde şerit genişliği, şerit yapışma boyu ve ankraj uygulaması doğrudan etkilenmektedir.

- Ankrajsız deney elemanlarında göçme, CFRP şeritlerin yüzeyden sıyrılması sonucu olmuştur.

- Referans deney elemanlarına göre eğilme ve Kesme çatlağına sahip deney elemanlarının maksimum taşıma kapasitelerinde azalma görülmüştür.

- CFRP şerit altında kalan kesme çatlağının alanının eğilme çatlağından fazla olması sonucu taşıma kapasitesindeki azalma, kesme çatlağına sahip deney elemanlarında daha fazla olmuştur.

- Referans deney elemanları ANSYS programında modellenmiştir. Modelleme sonucu ANSYS programından elde edilen sonuçların deney sonuçlarına oranı ortalama 1,02 olarak hesaplanmıştır [54].

Yukarıda detaylı olarak verilen literatür taramasından da görüldüğü gibi açılı ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzeyler arasındaki kayma gerilmesi-kayma deplasmanı davranışının incelendiği bir çalışamaya rastlanmamıştır. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanmıştır. Yürütülen deneysel çalışma kapsamında beton yüzeyine yapıştırılan açılı ankrajlı CFRP şeritlerin davranışının incelenmesi amacıyla 28 adet "T" şeklinde kütle betonu üzerine "L"

şeklinde CFRP şeritler yapıştırılarak eksenel çekme kuvveti etkisi altında monotonik yükleme uygulanarak test edilmiştir. Beton kütlenin “T” şekilde üretilmesi ve CFRP şeritin “L” şeklinde yapıştırılması, şerit eksenine paralel olarak uygulanan çekme kuvvetine göre değişik açılarda ankraj yerleştirilmesine imkân sağlamıştır. Deneysel çalışmada ankraj türü olarak literatürde de yaygın olarak tercih edilen CFRP fan tipi ankraj seçilmiştir. Araştırma kapsamında değişken olarak şeritlerin yapıştırıldığı beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve uygulanan CFRP fan tipi ankrajın sayısı ile kuvvet eksenine göre açısı incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritlerin yük-deplasman davranışı, maksimum taşıma güçleri, CFRP şerit ile beton yüzey arasındaki gerilme dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak CFRP şeritler üzerinde kullanılan açılı ankrajların şerit taşıma gücü üzerindeki etkileri yorumlanmış ve maksimum taşıma gücü ile ilgili bir eşitlik önerilmiştir. Ayrıca açılı ankrajlı CFRP şeritler ve beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi-deplasman davranışı ile ilgili bir model oluşturulmuştur.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deney Elemanları

Deneysel çalışma kapsamında açılı CFRP şeritlerin eksenel çekme kuvveti etkisindeki yük-deplasman davranışları, eksenel çekme kuvveti kapasiteleri, yapıştırıldıkları beton yüzey ile CFRP şerit arasındaki gerilme dağılımları, yapışma yüzeyi kayma gerilmesi-deplasman modeli ile ilgili araştırmaların yapılması için 28 adet deney elemanı üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel çalışmada incelenen değişkenler, açılı CFRP şeritlerin yapıştırıldığı kütle betonunun basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit üzerinde kullanılan ankraj sayısı ile ankrajların uygulanan eksenel çekme kuvvet doğrultusu ile yapmış olduğu açıdır. Deneysel çalışmada test edilen elemanların özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Deneysel elemanlar

Deney Elemanı No	f_C (MPa) Beton Basınç Dayanımı	CFRP Şeridinin Genişliği (mm)	Ankraj Sayısı	Ankrajların Açısı
1	25.7	50	Referans	
2	24.5		1	90
3	25.2		1	0
4	26.4		1	45
5	24.7		2	45/90
6	26.8		2	0/90
7	24.9		2	90/90
8	25.3	100	Referans	
9	25.7		1	90
10	24.5		1	0
11	25.2		1	45
12	26.4		2	45/90
13	24.7		2	0/90
14	26.8		2	90/90
15	8.6	50	Referans	
16	9.5		1	90
17	8.5		1	0
18	8.5		1	45
19	9.6		2	45/90
20	9.8		2	0/90
21	10.2		2	90/90
22	9.4	100	Referans	
23	8.6		1	90
24	9.5		1	0
25	8.5		1	45
26	8.5		2	45/90
27	9.6		2	0/90
28	9.8		2	90/90

2.2. Yapı Malzemeleri

2.2.1. Beton

Deney elemanlarının üretilmesinde hedef beton basınç dayanımı olarak 10 MPa ve 25 MPa olarak iki farklı beton sınıfı seçilmiştir. Zamanla kimyasal veya yapısal hasarlar betonarme yapılarda meydana gelmektedir. Bu durum betonun diğer özellikleri gibi basınç dayanımında ciddi anlamda etkiliyor. Bu çalışmada 10 MPa beton basınç dayanımına sahip deney elemanlar bahsettiğimiz bu düşük beton basınç dayanımlı beton elemanları modellemek için üretilmiştir. Deney elemanlarının üretildiği beton karışımlarından her eleman için 3 adet 150 mm x 150 mm x 150 mm boyutlarında standart küp numunesi alınarak test gününe kadar deney elemanları ile aynı kür şartlarında saklanmıştır. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları hedeflenen dayanım değerlerine oldukça yakın elde edilmiş olup, standart sapma ve varyasyon değerleri çok düşüktür. Deney elemanlarının beton karışımlarında kullanılan malzemeler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. 1 M^3 beton için karışım detayları

Malzeme Türü	C10 Beton Karışımı		C25 Beton Karışımı	
	Ağırlık (kg)	Ağırlık Yüzdesi (%)	Ağırlık (kg)	Ağırlık Yüzdesi (%)
Su	205	8.9	195	8.6
İnce Çakıl (0-7 mm)	1475	64.1	650	28.9
İri Çakıl (7-15 mm)	370	16	1107	49.2
Portland Çimento	250	10.8	300	13.3

Betonun karakteristik basınç dayanımını belirlemek için her T şekil kalıp için 3 adet küp numune toplam 48 adet alınmıştır, testlerde elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Küp numuneler 150 mm x 150 mm x 150 mm boyutlarındadır. Standart küp numunelerin ortalama beton basınç dayanımı her deney elemanı için Çizelge 2.3'de verilmiştir

Çizelge 2.3. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları

C25		C10	
Deney Elemanı No	f_{ck} (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa)
1	25.7	1	8.6
2	24.5	2	9.5
3	25.2	3	8.5
4	26.4	4	8.5
5	24.7	5	9.6
6	26.8	6	9.8
7	24.9	7	10.2
8	25.3	8	9.4

2.2.2. CFRP ve epoksi

Deneysel çalışmada CFRP şerit genişliği olarak 50 mm ve 100 mm değerleri seçilmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde tek doğrultulu taşıyıcı liflere sahip Sika© firması tarafından üretilen CFRP ve yine aynı firma tarafından önerilen iki bileşenli epoksi malzemeleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan CFRP ve epoksi malzemesinin üretici firma tarafından verilen mekanik dayanım özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir. Tek doğrultulu taşıyıcı liflere sahip Sika© firması tarafından üretilen CFRP şeririti Resim2.1 de verilmiştir.

Çizelge 2.4. CFRP ve epoksi reçinenin mekanik özellikleri

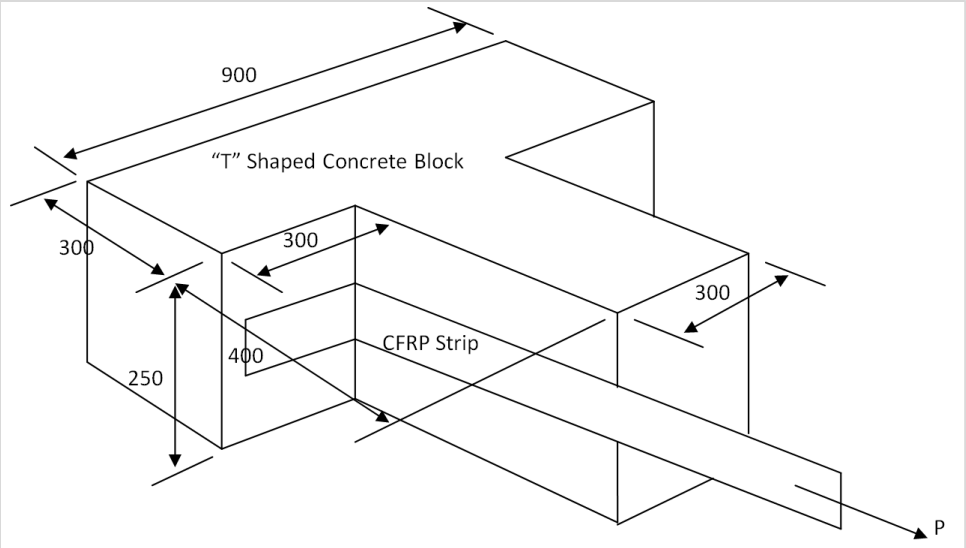
CFRP Özellikleri	
Açıklamalar	Değerler
Ağırlık	220 gr/m^2
Kalınlık	0.12 mm
Gerilme Mukavemeti	4100 MPa
Elastiklik Modülü	231 GPa
Nihai Gerilme	1.7%
Epoksi Reçine	
Açıklamalar	Değerler
Birim Hacim Ağırlığı	1.31 kg/lt
Karışım Oranı	Beyaz-Gri Bileşik = 4/1
Uygulama Sıcaklığı	Min +10ºC, mac +35ºC
Gerilme Mukavemeti	30 MPa
Eğilme Esneklik Modülü	3800 MPa



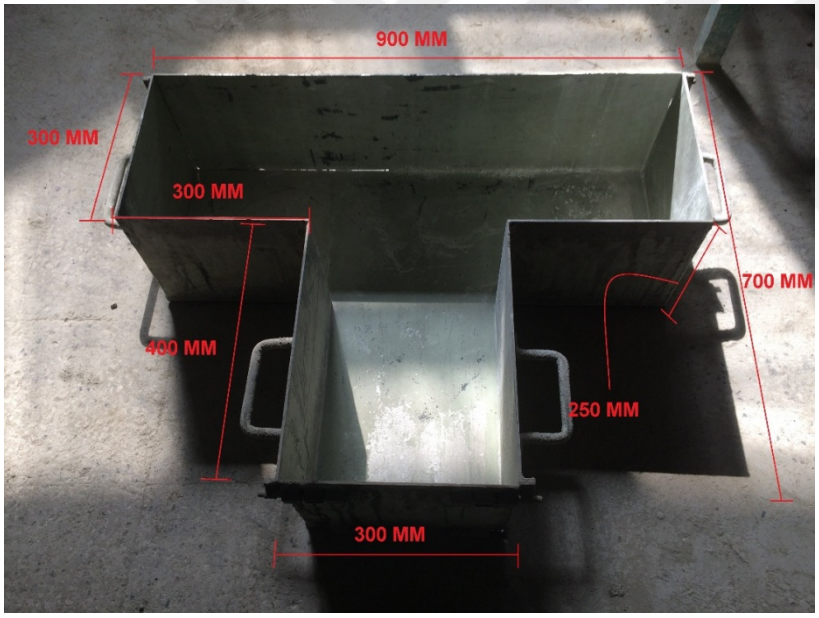
Resim 2.1. Tek doğrultulu taşıyıcı liflere sahip CFRP şeriti

2.3. Deney Elemanlarının Hazırlanması

Deneysel çalışma kapsamında açılı ankrajlı CFRP şeritlerin test edilebilmesi amacıyla “T” şeklinde kütle betonları üretilmiştir. Her “T” kesitli kütle betonu üzerine 2 adet “L” şeklinde CFRP şerit yapıştırılarak her seferinde yazarlar tarafından üretilmiş özel bir single pull-out deney düzeneği kullanılarak bir adet CFRP şerit monotonik artan eksenel çekme yüklemesi etkisinde test edilmiştir. Üretilen deney elemanlarının geometrik boyutları Şekil 2.1 ve Resim 2.2’de verilmiştir.

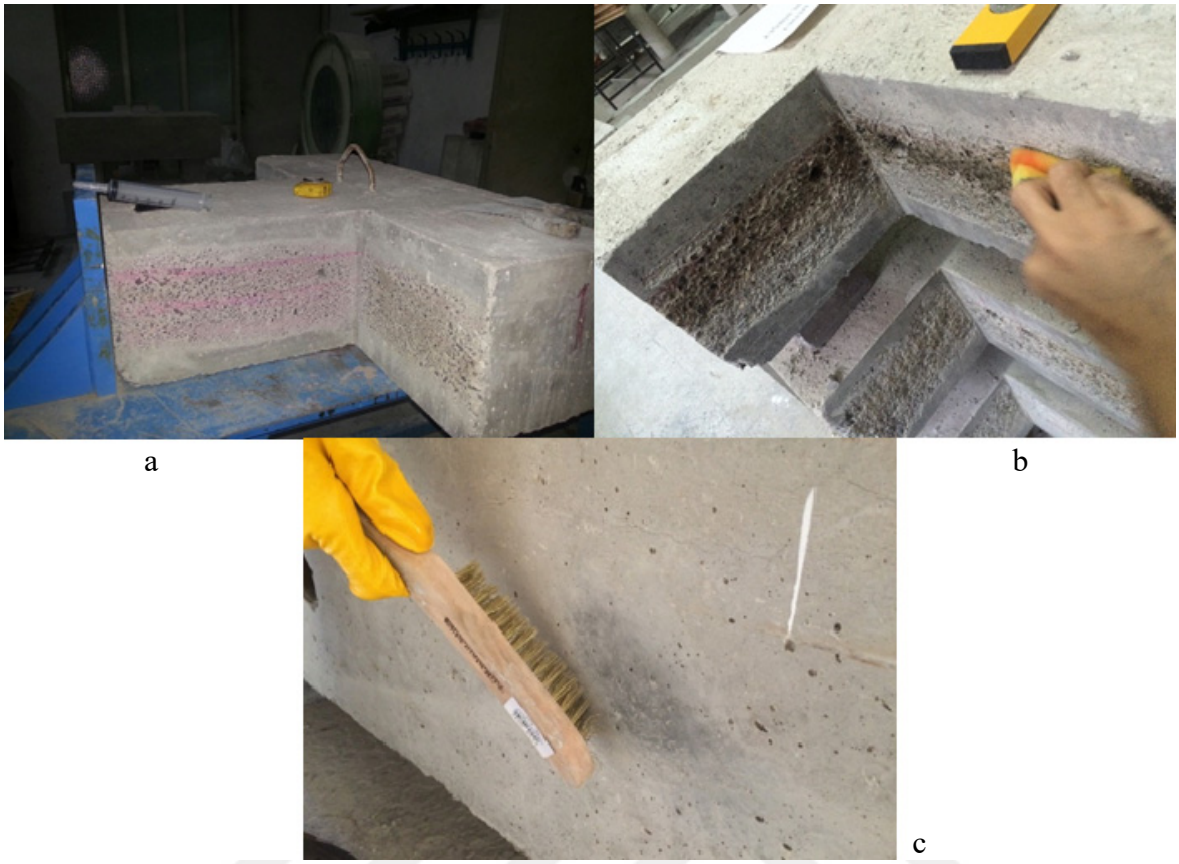


Şekil 2.1. Deney elemanlarının boyutları (boyutlar mm bitimindendir)



Resim 2.2. Üretilen deney elemanlarının geometrik boyutları (boyutlar mm bitimindendir)

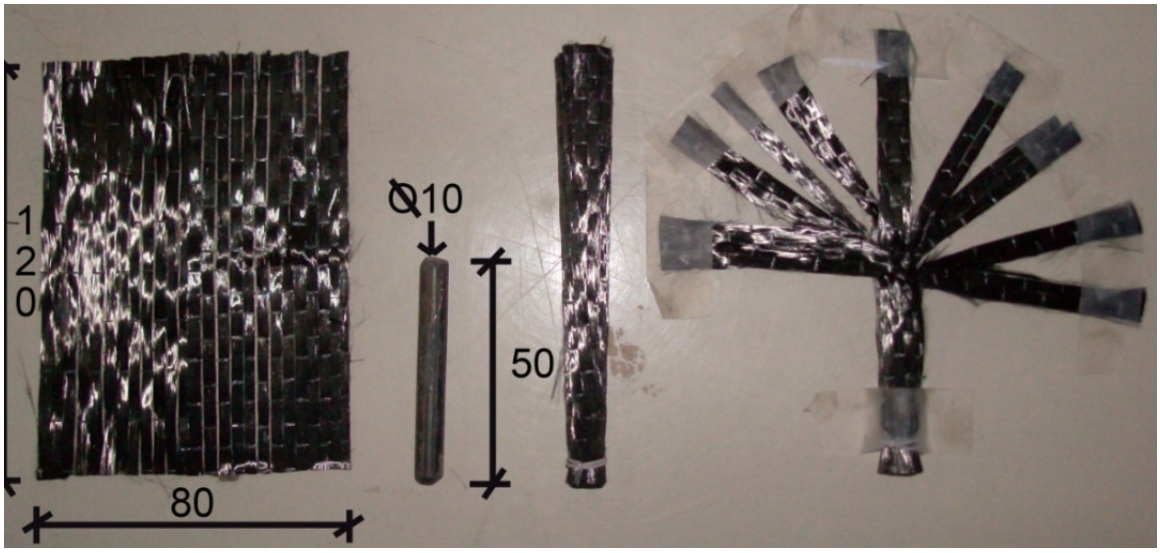
Beton T şekil numunelerin üzerinde CFRP şeritlerini yapıştırmak için öncelikle yapıştıracak yüzeyi kırmızı kale ile işaretlenir. Sonraki adımda işaretlenmiş alanda betonun şerbetini temizlemek için ve beton granüllerin görünmesi için demir fırça yardımıyla betonun yüzeyi temizlenir. Sonraki adımda basınçlı hava ile yüzeyin tozu alınır ve nemli bir süngerle silinir. CFRP şeritlerin yerleşim bölgelerinin hazırlama süreci Resim 2.3 (a, b, c)'de verilmiştir.



a b c

Resim 2.3. CFRP şeritlerin yerleşim bölgelerinin işaretlenmesi

Deney elemanlarının üretilmesinde güçlendirme çalışmalarında da yaygın olarak tercih edilen CFRP fan tipi ankraj seçilmiştir. Deney elemanlarında kullanılan fan ankrajları, 50 mm uzunluğunda 10 mm çapındaki donatıya, 80 mm genişliğinde 120 mm uzunluğunda CFRP şerit sarılarak üretilmiştir. CFRP ankrajlarda donatının dışında kalan 70 mm'lik kısım 10 mm genişliğinde 8 adet parçaya fan olarak yapıştırılacak şekilde ayrılmıştır. Ankraj uygulaması yapılması için 14 mm çapında 50 mm derinliğinde delikler açılmıştır. Çalışmada kullanılan CFRP fan tipi ankrajın özellikleri ve geometrik boyutları Resim 2.4'te verilmiştir



Resim 2.4. CFRP fan tipi ankrajın geometrik boyutları (Boyutlar mm birimindendir.)

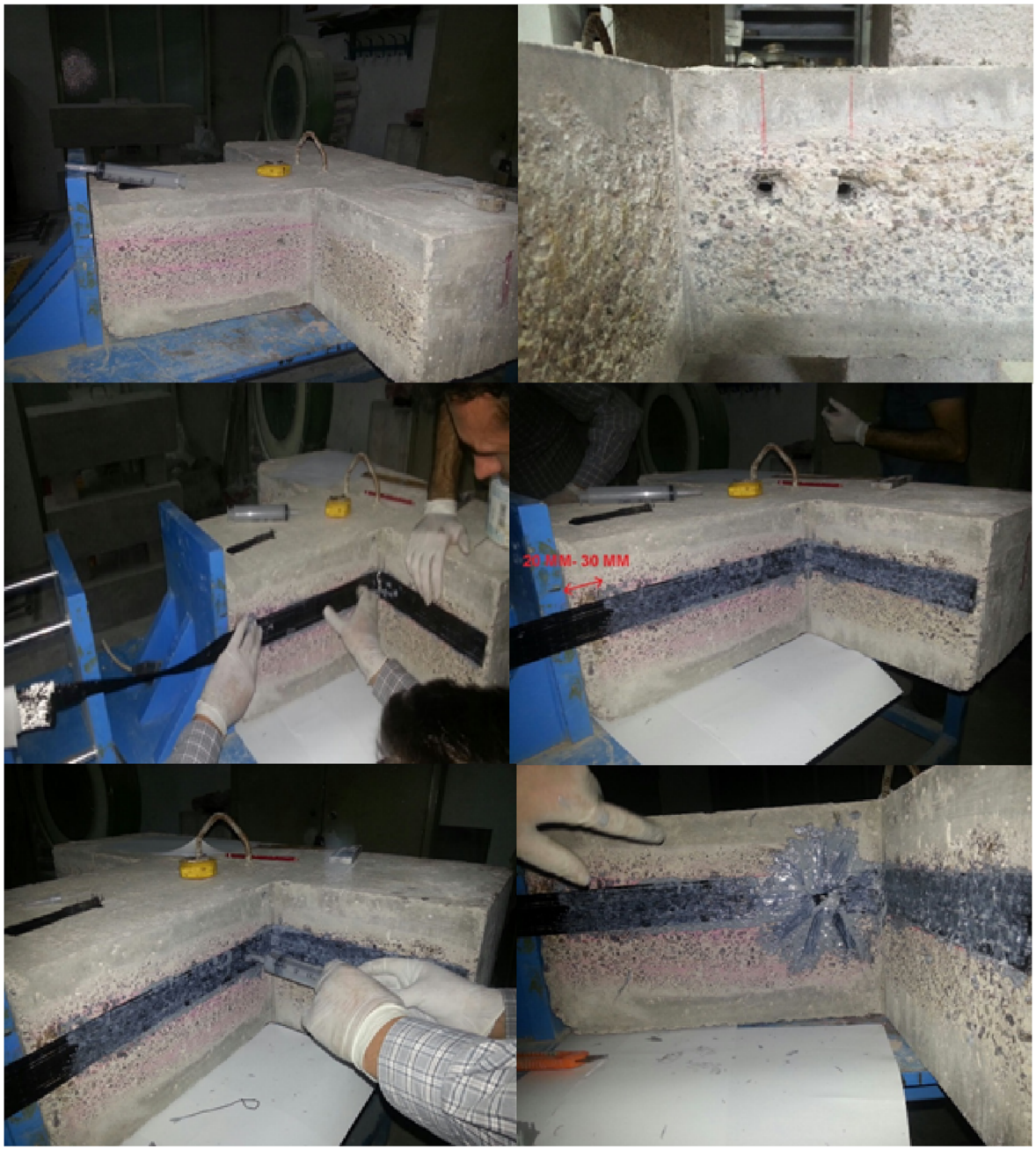
Ankraj uygulanacak deney elemanların üzerine ankrajların sayısı ve türü işaretlendikten sonra matkap yardımıyla fan ankrajlar için 14 mm çapında 50 mm derinliğinde açılır, mekanik ankrajlar için 10 mm çapında ve 60 mm derinliğinde delikler açılır. Delikler açıldıktan sonra basınçlı havayla deliklerdeki olan toz parçaların dışarıya çıkmasını ve deliklerin temizlenmesini sağlıyoruz. Ankraj deliklerinin oluşturulması Resim 2.5'te verilmiştir.



Resim 2.5. CFRP şeritlerin hazırlanışı, yüzeylere yapıştırılması

CFRP uygulamalarında yüzey hazırlığı ve üretim aşamasında gösterilen özen son derece önemlidir. İlk olarak beton üzerinde CFRP şeritin yerleştirileceği bölge ve ankraj yerleri

işaretlenmiştir. Daha sonra CFRP şeritin yapıştırılacağı bölgedeki beton yüzeyi mekanik taşlama aleti ile pürüzledirilmiş, yüzeydeki çimento şerbeti kaldırılarak beton içerisindeki agregalar görülür hale getirilmiştir. Daha sonra basınçlı hava kompresörü kullanılarak yüzeydeki toz ve gevşek parçalar temizlenmiştir. Bu aşamadan sonra ankraj delikleri açılıp deliklerin içi ile birlikte yüzey son bir kez basınçlı hava ile temizlendikten sonra iki bileşenli epoksi bire dört oranında üretici firmanın talimatlarına uyularak karıştırılmış, CFRP şeritlerin yapıştırılacağı yüzeye yaklaşık 0.5 mm kalınlığında sürülerek yayılmıştır. Daha sonra CFRP şerit taşıyıcı liflerinin doğrultusunun bozulmamasına özen gösterilerek epoksi üzerine yerleştirilmiş ve el ile sürülen epoksi CFRP şerite emdirilerek hava boşluğu kalmamasına özen gösterilerek yapıştırılmıştır. Bu aşamadan sonra ankraj deliklerinin içerisine enjektör ile epoksi doldurulmuştur. Daha sonra CFRP fan tipi ankrajların kök bölümleri deliklerin içerisine sokularak dışarıda kalan uç bölümleri dairesel bir fan şeklinde açılmış ve CFRP şeritin üst bölümüne sürülen yaklaşık 0.5 mm kalınlığındaki epoksi üzerine yapıştırılarak CFRP şeritin yapıştırılması prosedürü tamamlanmıştır. Deney elemanlarının üretilmesi aşamalarından alınan fotoğraflardan seçilen örnekler Resim 2.6'da verilmiştir. Uygulama esnasında laboratuvar ortamındaki sıcaklığın 20±2 C^o olmasına özen gösterilmiştir. Deney elemanları üretildikten sonra epoksinin tam olarak dayanımını alması için yedi gün süre ile beklenilmiş ve daha sonra testlere başlanılmıştır.



Resim 2.6. Deney elemanların hazırlanma aşamaları

2.4. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi

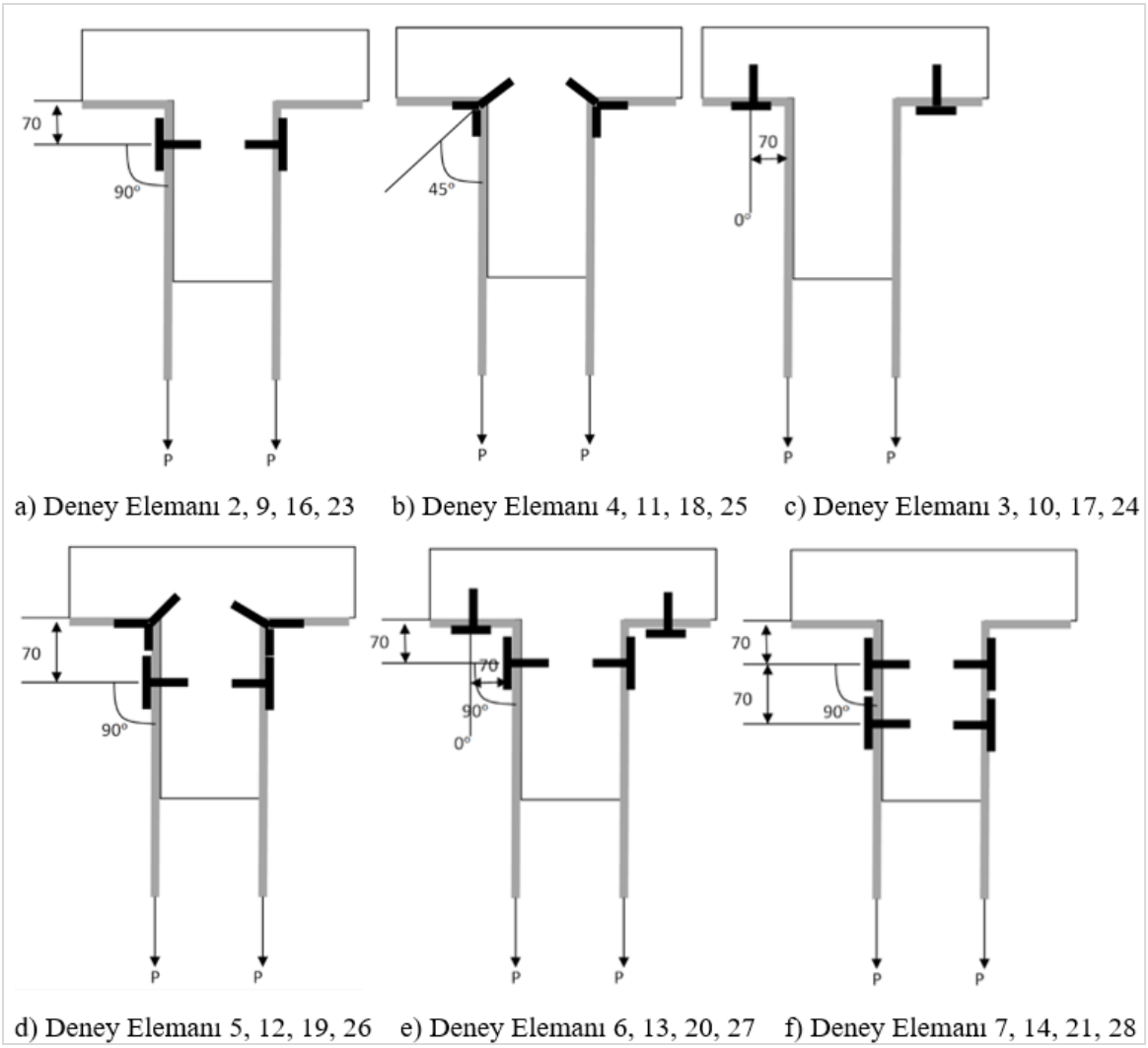
Deneysel çalışmada incelenen açılı ankrajların CFRP şeritlerin davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla 1 ve 2 adet ankrajlı 3 farklı açıda ankraj uygulaması yapılarak her seri için ankrajsız bir adet referans elemanı ile birlikte 7 deney elemanı üretilmiştir. Deneysel çalışmada 2 farklı beton basınç dayanımı ve 2 farklı CFRP şerit genişliği için toplam 2×2×7=28 deney elemanı üretilmiştir. Üretilen açılı ankrajların CFRP şerit yükleme eksenine göre açıları 90º, 0º ve 45º olarak seçilmiştir. Deney elemanlarında

kullanılan açılı CFRP şeritlerin yerleşimi ile ilgili geometrik boyutlar Resim 4'de verilmiştir. "T" şeklinde beton kütleye yapıştırılan açılı CFRP şeritler monotonik olarak artırılan eksenel çekme kuvveti etkisinde göçme meydana gelene kadar yüklenmiştir. Testler sonucunda açılı CFRP şeritlerin maksimum taşıma gücü değerleri, yük-deplasman davranışları, beton yapışma yüzeyi ile açılı CFRP şeritler arasındaki gerilme dağılımları ve kayma gerilmesi-deplasman davranışları elde edilerek yorumlanmıştır. Deneysel sonuçlar üzerinde incelenen değişkenlerin meydana getirdiği etkiler araştırılmıştır. Deney Elemanlarının Özellikleri Çizelge 2.5'de verilmiştir. Ayrıca deney elemanların CFRP ankraj yerleşimi ayrıntıları Şekil 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Deney elemanlarının özellikleri (fan ankraj)

Deney Elemanı No	f_C (MPa) Beton Basınç Dayanımı	CFRP Şeridinin Genişliği	Ankraj Sayısı	Ankrajların Açısı*	Adı
1 (Referans)	25	50	------		25C50W
2			1	90	25C50W1N90AF
3			1	0	25C50W1N0AF
4			1	45	25C50W1N45AF
5			2	45/90	25C50W2N45/90AF
6			2	0/90	25C50W2N0/90AF
7			2	90/90	25C50W2N90/90AF
8 (Referans)		100	------		25C100W
9			1	90	25C100W1N90AF
10			1	0	25C100W1N0AF
11			1	45	25C100W1N45AF
12			2	45/90	25C100W2N45/90AF
13			2	0/90	25C100W2N0/90AF
14			2	90/90	25C100W2N90/90AF
15 (Referans)	10	50	------		10C50W
16			1	90	10C50W1N90AF
17			1	0	10C50W1N0AF
18			1	45	10C50W1N45AF
19			2	45/90	10C50W2N45/90AF
20			2	0/90	10C50W2N0/90AF
21			2	90/90	10C50W2N90/90AF
22 (Referans)		100	------		10C100W
23			1	90	10C100W1N90AF
24			1	0	10C100W1N0AF
25			1	45	10C100W1N45AF
26			2	45/90	10C100W2N45/90AF
27			2	0/90	10C100W2N0/90AF
28			2	90/90	10C100W2N90/90AF

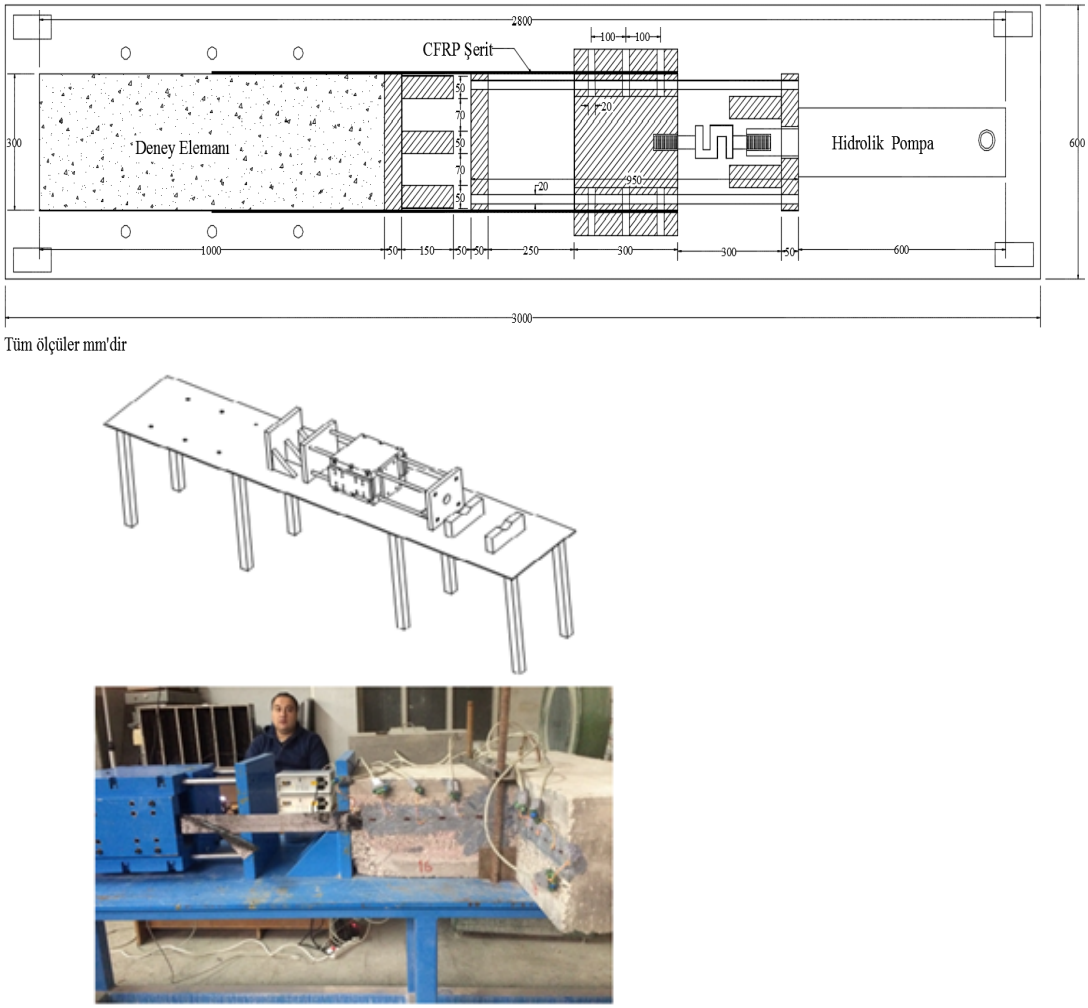
* CFRP Ankraj ile yükleme ekseni arasındaki açı



Şekil 2.2. (a,b,c,d,e,f) Deney elemanlarının CFRP ankraj yerleşimi ayrıntıları (boyutlar mm cinsinden)

3. DENEY DÜZENEĞİ

Deney elemanlarının bu tür deneyler için özel olarak tasarlanmış bir single pull-out test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10 mm kalınlığında, 600 mm genişliğinde ve 3000 mm uzunluğundaki çelik levha üzerine bir sistem tasarlanmıştır. Hidrolik bir sistemle karbon fiberlerin bağlandığı kafa kısmı sürtülmesini ihmal edecek krom yataklı hareketli sistem ilave edilmiştir. Deney düzeneği üzerine yerleştirilen 500 kN kapasiteli bir hidrolik kriko ile eksenel yükleme test elemanlarına uygulanmış ve 400 kN kapasiteli yük hücresi (Load-Cell) ile ölçülmüştür. Deneylerde yükleme motorlu ve hızı ayarlanabilen bir hidrolik pompa ile tüm deney elemanlarında özdeş hızda uygulanmış olup, yükleme hızı 0.5 mm/sn olacak şekilde sabitlenmiştir. Deney düzeneği Resim 3.1'de verilmiştir.

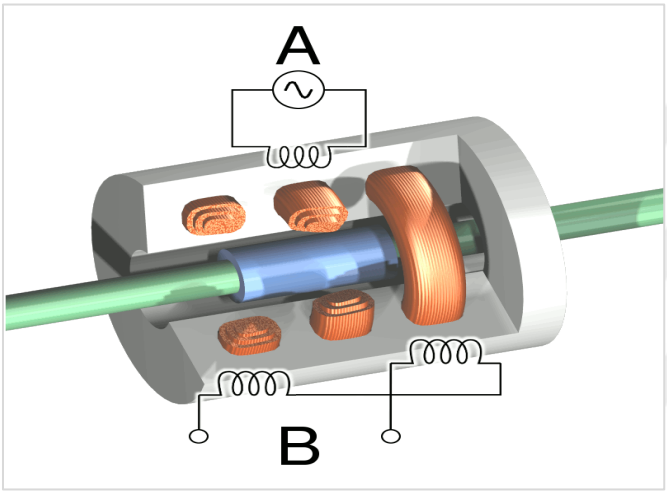


Resim 3.1. Test düzeneği; (a) Perspektif (b) Fotoğraf

3.1. Ölçüm Aletleri

3.1.1. Deplasman ölçer (LVDT)

LVDT bir objenin doğrusal olan mekanik hareketini, elektrik sinyallerine dönüştüren elektromekanik birdönüştürücüdür. LVDT yer değişimi algılayıcıları, 0.01 µ seviyelerindeki yer değişimlerini belirleyebilecek kapasitededir. Doğrusal değişkenli fark transformatörün yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir



Şekil 3.1. Doğrusal değişkenli fark transformatörün yapısı

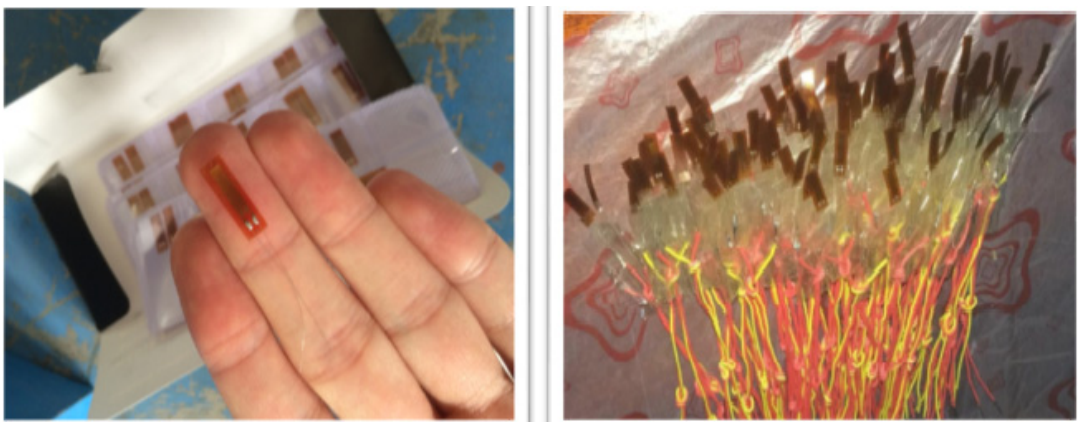
En basit haliyle bir LVDT primer, sekonder sargılar ve bunların merkezinde temas etmeden hareket eden bir çekirdekten meydana gelir. Primer sarımlar sabit genlikli bir Alternatif Akım ile beslendiğinde bu LVDT'nin merkezinde bir manyetik alan yaratır ve sekonder sarımlarda indüklenen akım ile çekirdeğin o anki konumu tespit edilir. Primer sarımlar sabit genlikli bir Alternatif Akım ile beslendiğinde bu LVDT'nin merkezinde bir manyetik alan yaratır ve sekonder sarımlarda indüklenen akım ile çekirdeğin o anki konumu tespit edilir. Resim 3.2'de LVDT nin yerleşim yeri verilmiştir.



Resim 3.2. LVDT nin yerleşim yeri

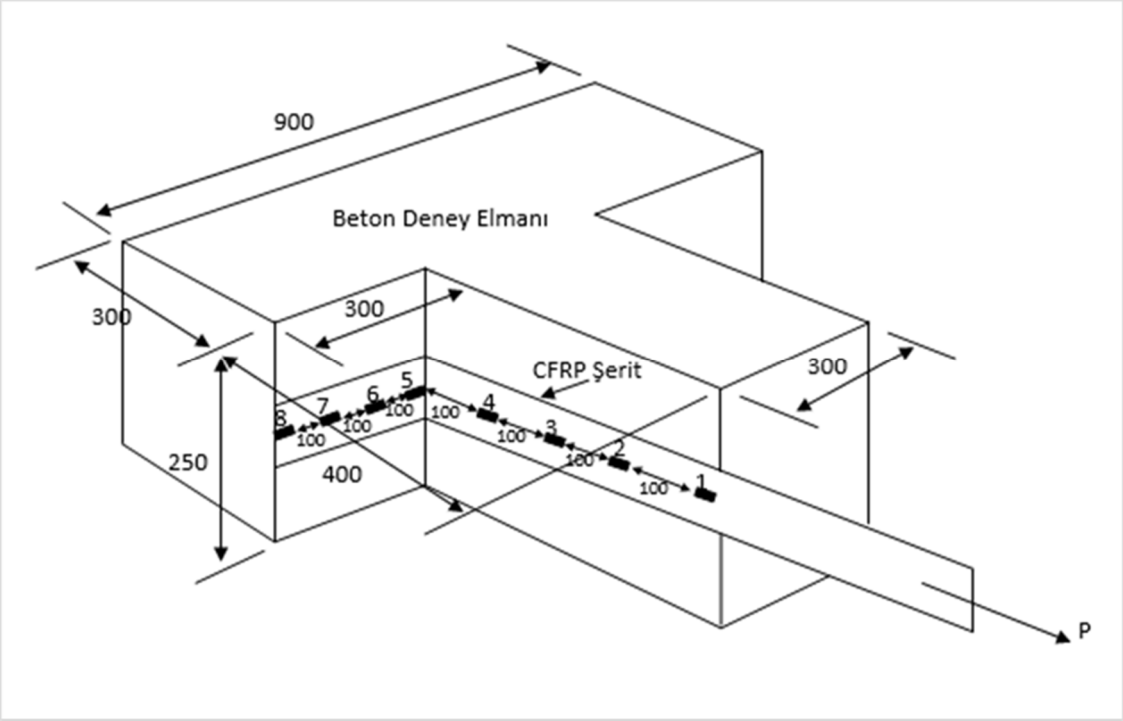
3.1.2. Birim deformasyon ölçer'lerin hazırlanması

Birim deformasyon ölçer'ler, bir cisim üzerindeki gerginliği ölçmek için kullanılan bir cihazdır. 1938'de Edward E. Simmons ve Arthur C. Rugged tarafından icat edilen en yaygın gerinim ölçme türü, metalik bir folyo deseni destekleyen anizotropik bir esnek sırttan oluşmaktadır. Nesne deforme olduğunda folyo deforme olur ve elektrik direncinin değişmesine neden olur. Bu direnç değişikliği bir ölçü faktörü olarak bilinir. Betonun üzerine yapıştırılmış Birim deformasyon ölçer'ler CFRP şeridinin gerilmesini ölçmek için kullanılır. Birim deformasyon ölçer'lerin uçlarındaki telleri lehim yardımıyla kablolara bağlanır ve bant ile sabitlenir. Strain gaugelerin hazırlanması Resim 3.3'de verilmiştir.



Resim 3.3. Birim deformasyon ölçer'lerin hazırlanması

Deney elemanları CFRP şeritlerinin boysal deplasman değerleri bir elektronik deplasman ölçer ile ölçülmüştür. CFRP şeritler üzerindeki gerilme dağılımının şerit boyunca değişiminin ölçülmesi için belirli aralıklar ile birim deformasyon ölçerler yapıştırılmıştır. Deney elemanlarından alınan birim deformasyon ölçümlerinin yerleri. Şekil 3.2'de verilmiştir. Testler sonucunda deney elemanlarının eksenel yük-deplasman grafikleri ve CFRP şeritler boyunca birim deformasyon dağılımı grafikleri elde edilmiş olup, testler yük-deplasman grafikleri izlenerek yapılmıştır. Deney elemanlarından alınan tüm ölçümler elektronik sensörler ile alınarak bir veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılarak testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 3.2'de deney elemanlarında Birim deformasyon ölçer'lerin yapıştıracağı yerler gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Birim deformasyon ölçer'lerin yapıştırma yerleri

4. DENEYLER

Deneysel çalışma kapsamında toplam 28 adet açılı CFRP şerit deney elemanı eksenel çekme yüklemesi etkisi altında test edilmiştir. Testler sonucunda deney elemanlarının eksenel çekme yüklemesi-deplasman grafikleri ve açılı CFRP şeritler boyunca meydana gelen birim deformasyon dağılımı grafikleri elde edilmiştir.

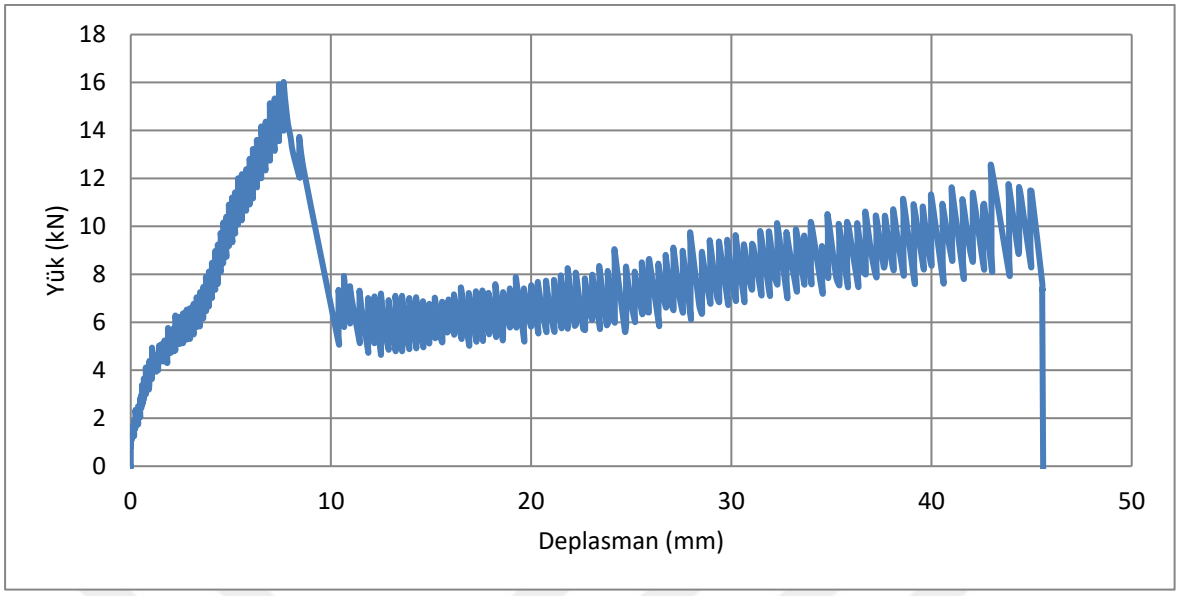
4.1. Deney Elemanı 25C50W (Referans Elemanı 1)

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.1'de verilmiştir.



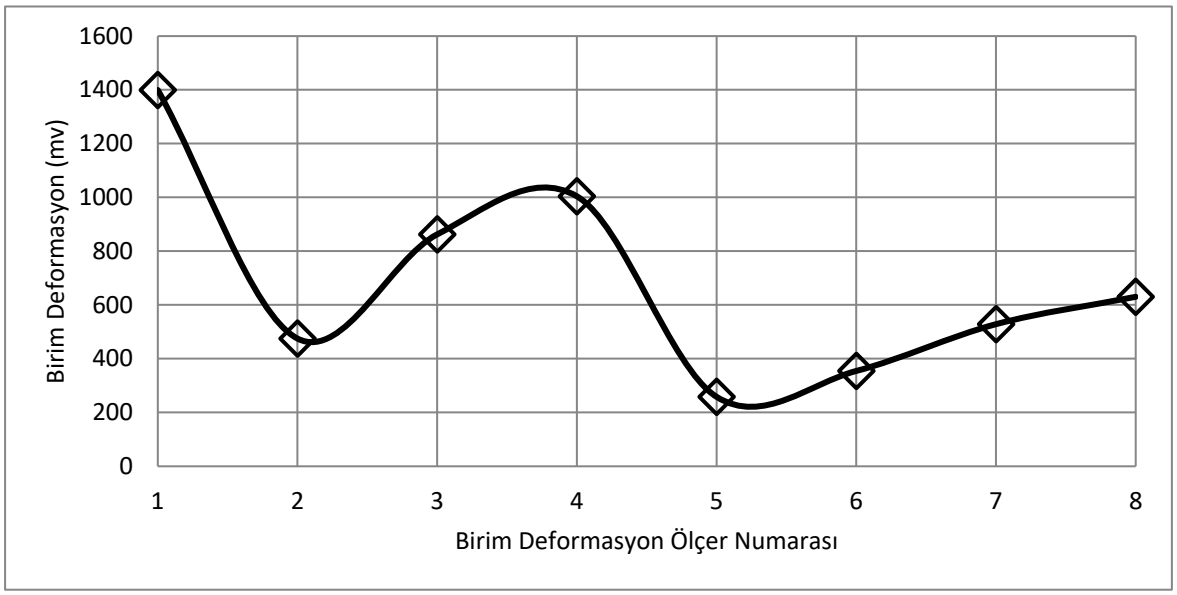
Resim 4.1. Deney elemanı 25C50W

25C50W Referans deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 16.02 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 7.63 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney elemanı 25C50W yük-deplasman grafiği

25C50W referans deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0008 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.2'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir. Birim deformasyon değerleri 250×10^3 ile bölünerek (mv) biriminden (mm/mm) birimine dönüştürebilir.



Şekil 4.2. Deney elemanı 25C50W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,80 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır, yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi hafifçe betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.2'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.2. Deney elemanı 25C50W hasar modeli

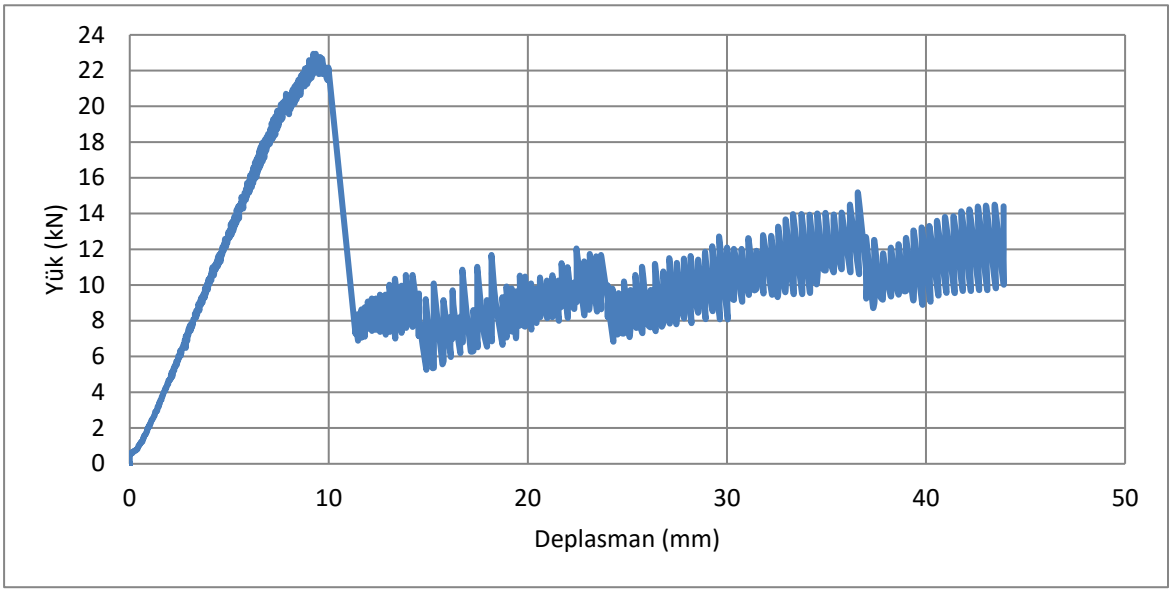
4.2. Deney Elemanı 25C50W1N90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönünde dik (90 derece) tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.3'de verilmiştir.



Resim 4.3. Deney elemanı 25C50W1N90AF

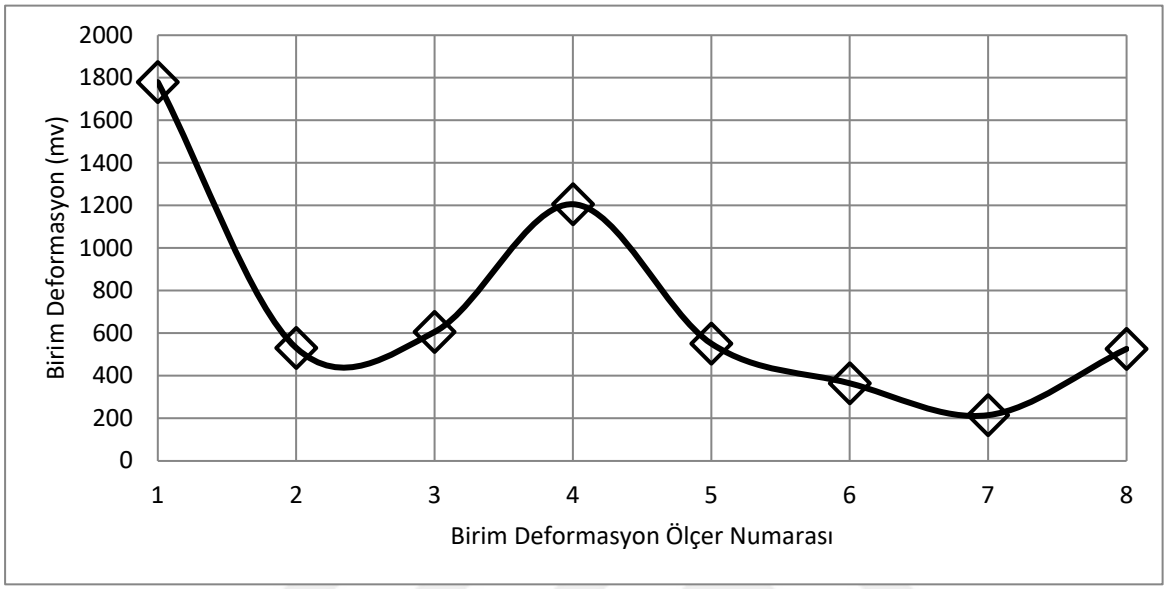
25C50W1N90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 22,95 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 9,22 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Deney elemanı 25C50W1N90AF yük-deplasman grafiği

25C50W1N90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0014 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.4'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.4. Deney elemanı 25C50W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,15 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W1N90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Resim 4.4'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.4. Deney elemanı 25C50W1N90AF hasar modeli

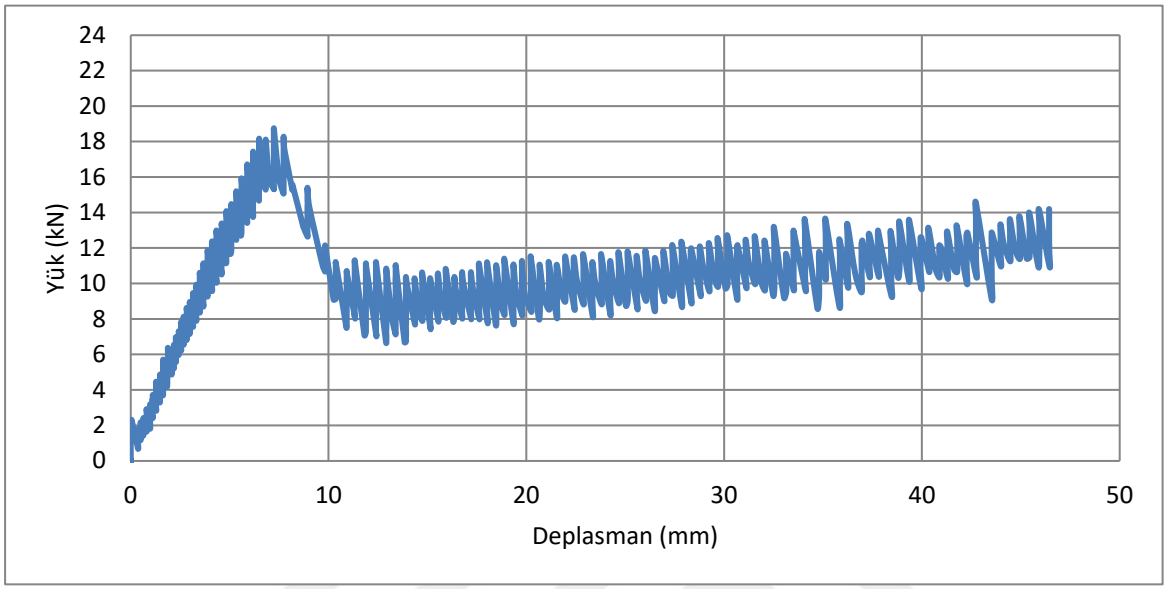
4.3. Deney Elemanı 25C50W1N0AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönünde (0 derece) tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.5'de verilmiştir.



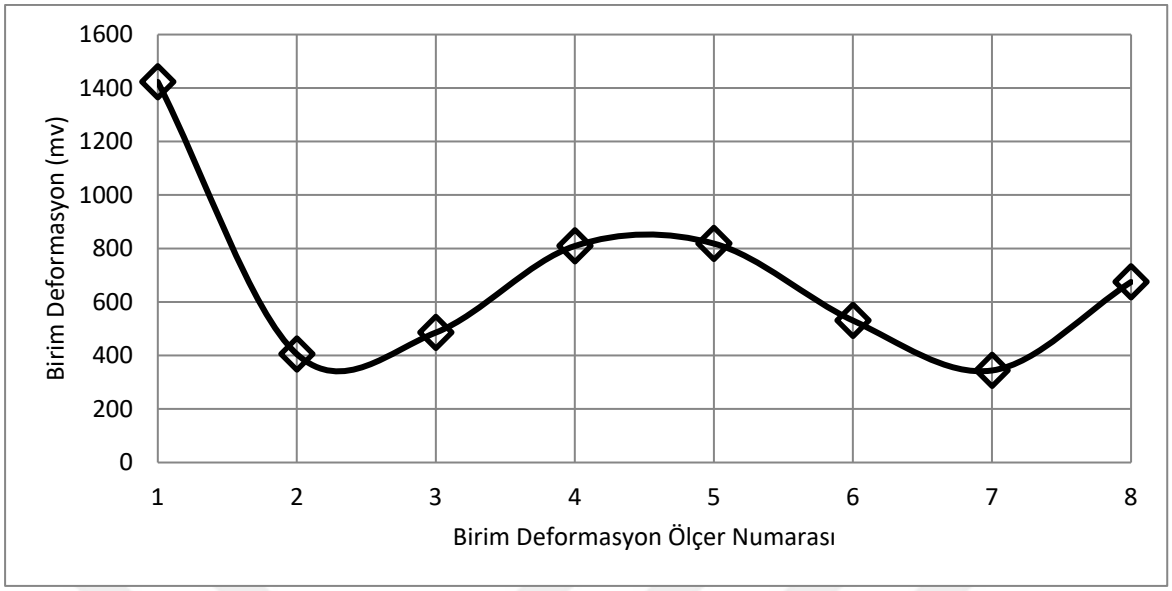
Resim 4.5. Deney elemanı 25C50W1N0AF

25C50W1N0AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 18,76 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 7,23 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Deney elemanı 25C50W1N0AF yük-deplasman grafiği

25C50W1N0AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0007 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş beşinci birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.6'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.6. Deney elemanı 25C50W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,94 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W1N90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Resim 4.6'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.6. Deney elemanı 25C50W1N90AF hasar modeli

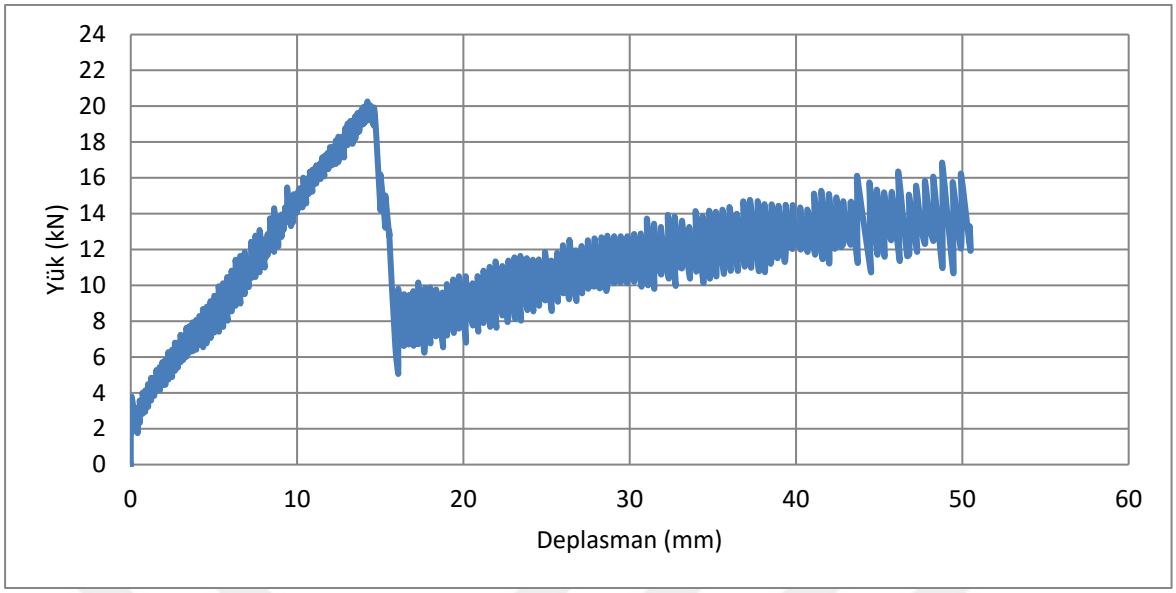
4.4. Deney Elemanı 25C50W1N45AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.7'de verilmiştir.



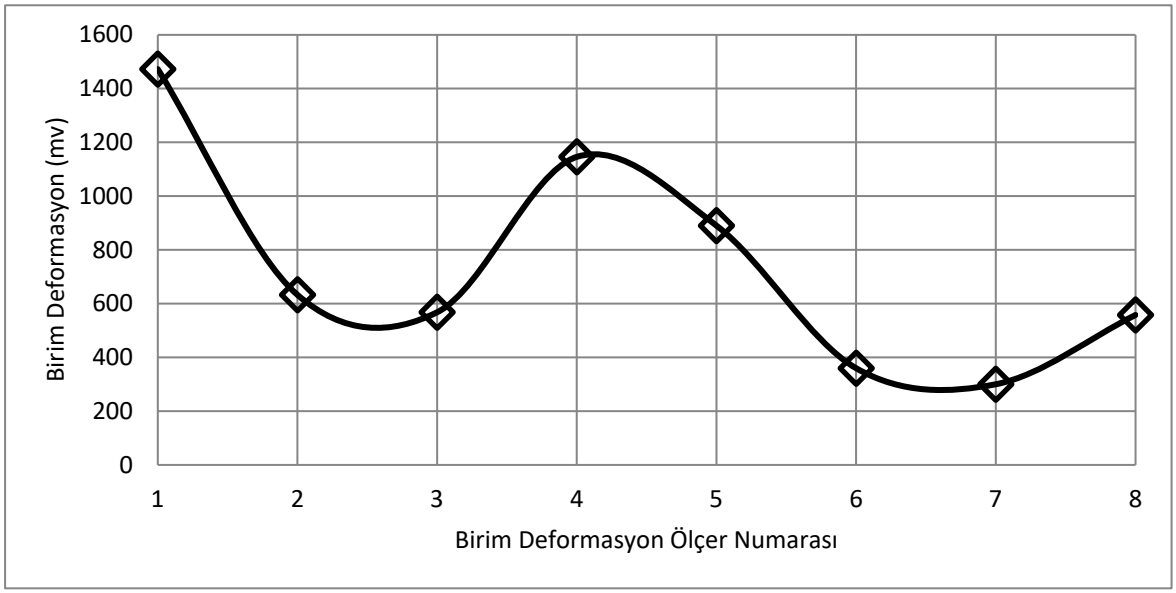
Resim 4.7. Deney elemanı 25C50W1N45AF

25C50W1N45AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 20,27 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 14,23 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Deney elemanı 25C50W1N45AF yük-deplasman grafiği

25C50W1N45AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0012 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.8'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.8. Deney elemanı 25C50W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,01 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W1N45AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.8'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.8. Deney elemanı 25C50W1N45AF hasar modeli

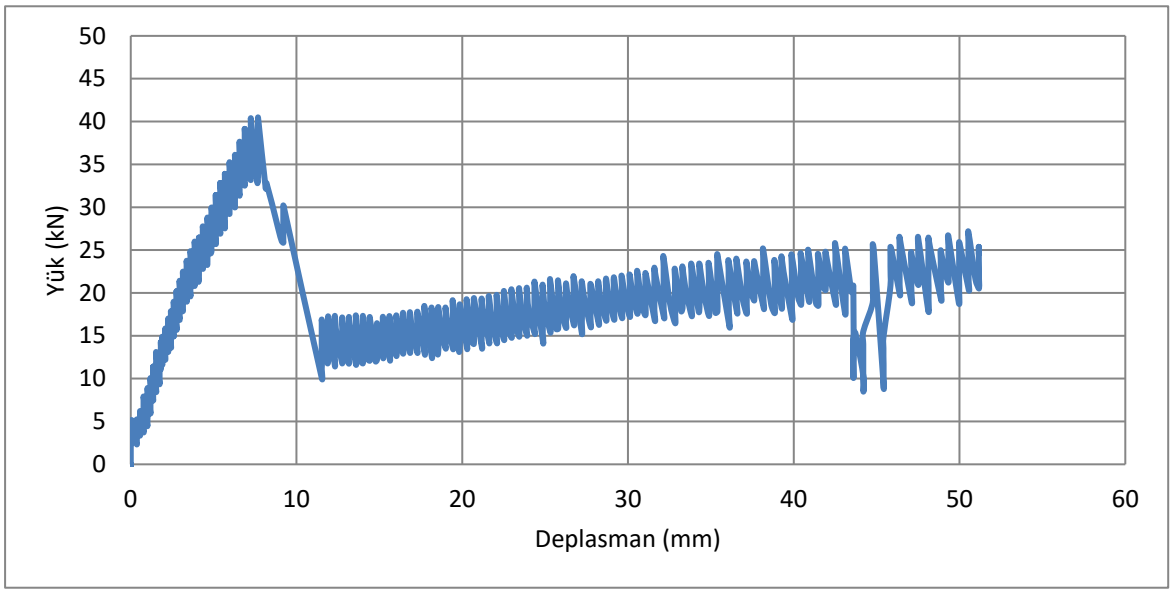
4.5. Deney Elemanı 25C50W2N45/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.9'de verilmiştir.



Resim 4.9. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF

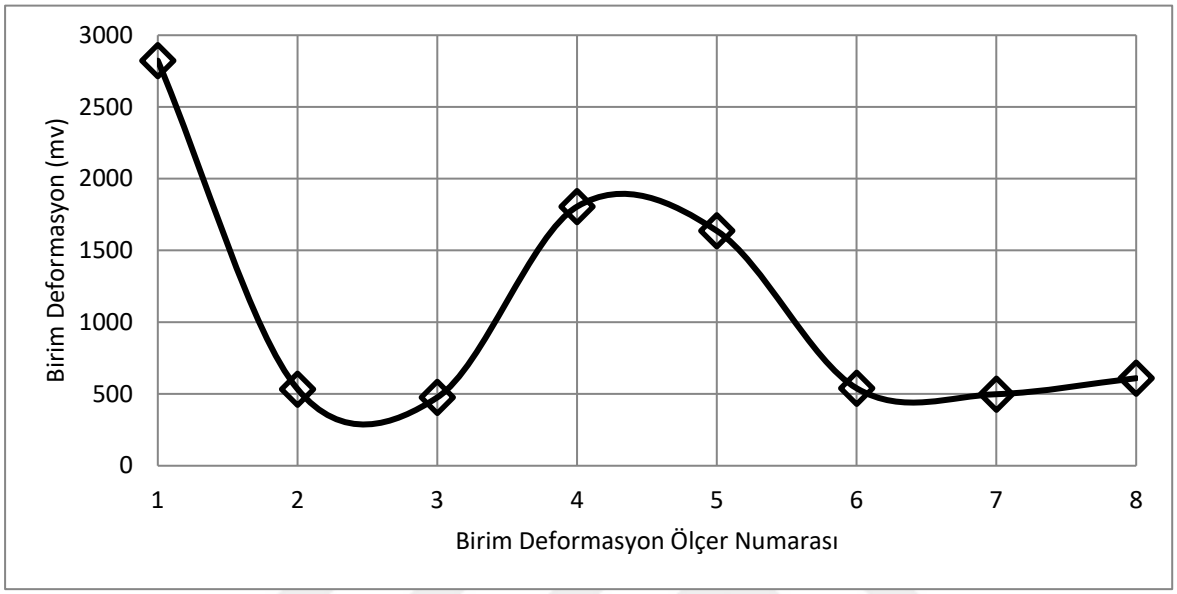
25C50W2N45/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 40,50 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 7,68 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.9'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF yük-deplasman grafiği

25C50W2N45/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0023 mm/mm ve 0,0014 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.10'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.10. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF birim deformasyon - birim deformasyon ölçer numarası grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 2,03 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.10'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.10. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF hasar modeli

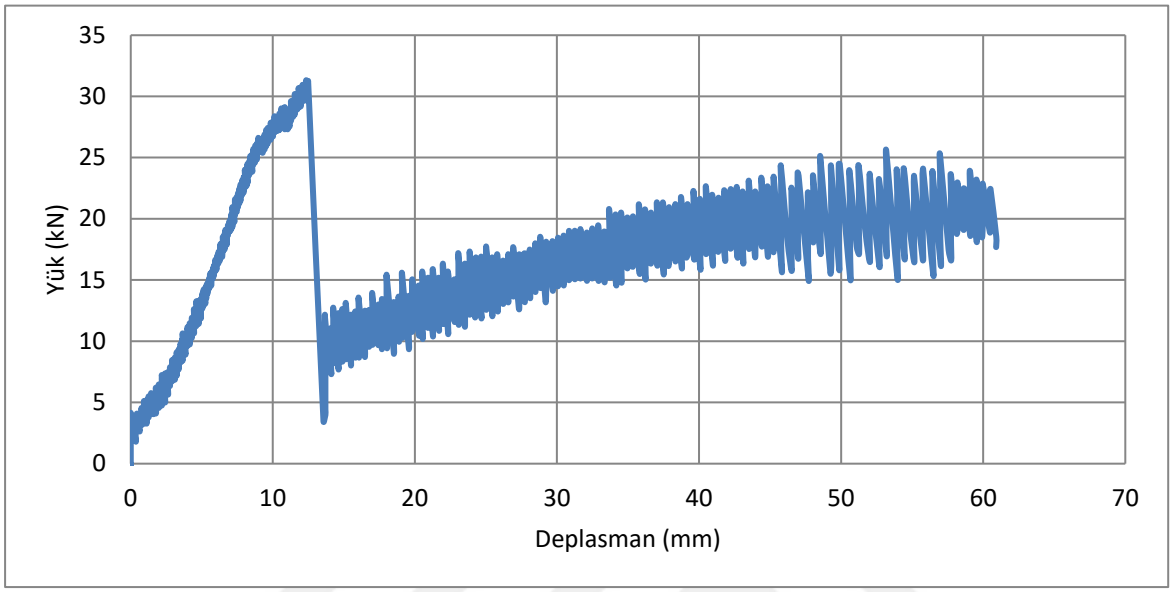
4.6. Deney Elemanı 25C50W2N0/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.11'de verilmiştir.



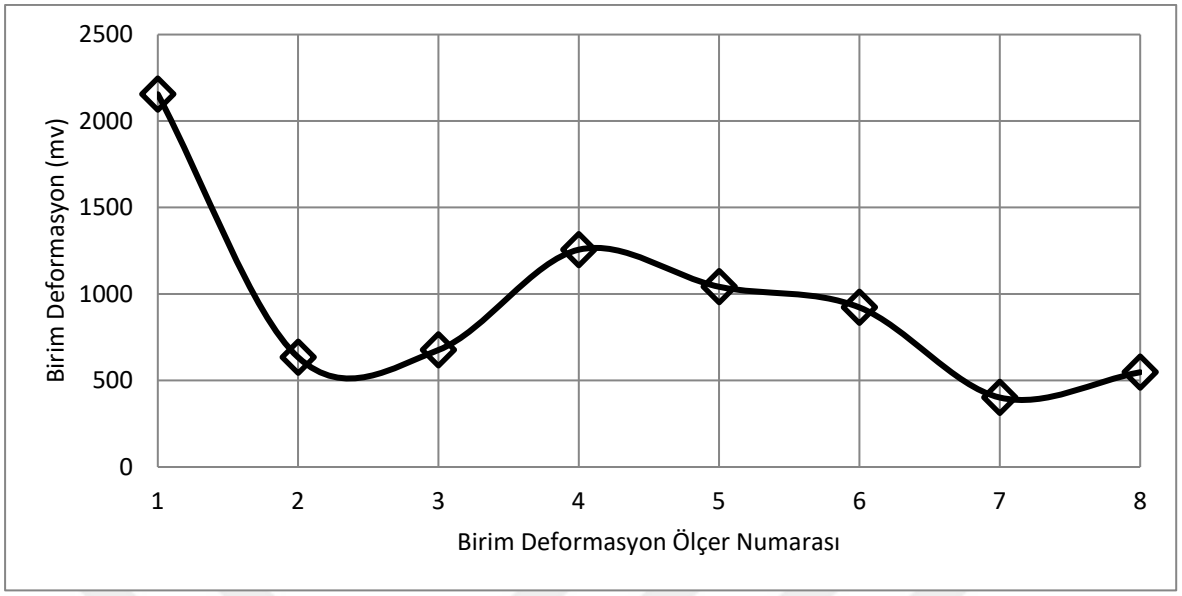
Resim 4.11. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF

25C50W2N0/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 31,32 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 12,48 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF yük-deplasman grafiği

25C50W2N0/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0017 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.12'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.12. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF birim deformasyon - birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,57 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.12'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.12. Deney elemanı 25C50W2N45/90AF hasar modeli

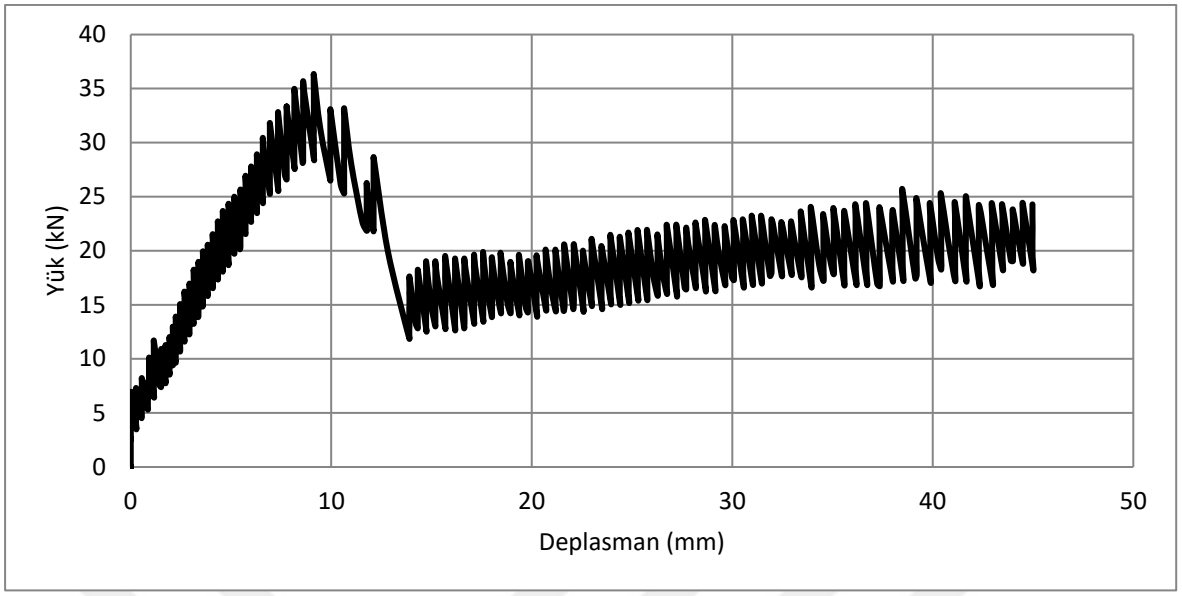
4.7. Deney Elemanı 25C50W2N90/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.13'de verilmiştir.



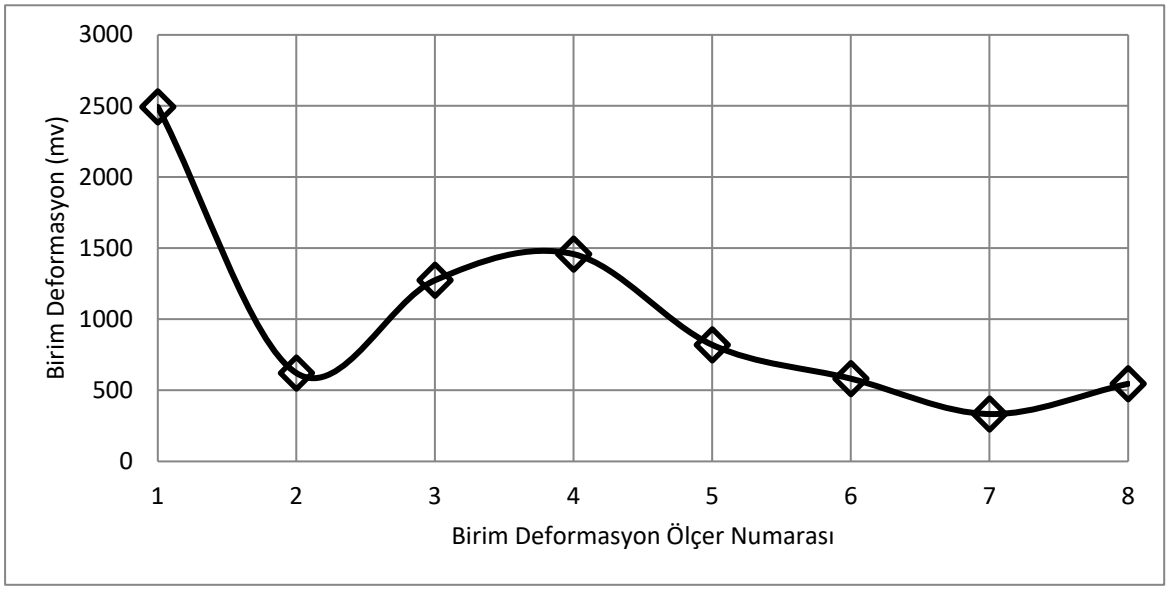
Resim 4.13. Deney elemanı 25C50W2N90/90AF

25C50W2N90/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 36,35 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 9,13 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Deney elemanı 25C50W2N90/90AF yük-deplasman grafiği

25C50W2N90/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0020 mm/mm ve 0,0012 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.14'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.14. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF gerilim-birim şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,82 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.14'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.14. Deney elemanı 25C50W2N0/90AF hasar modeli

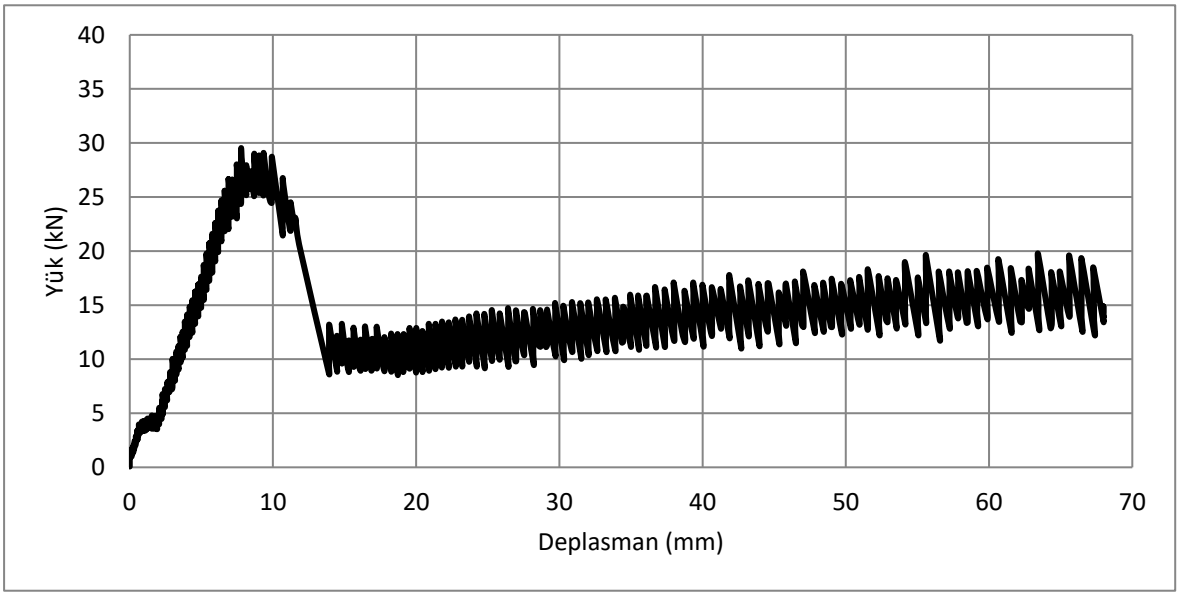
4.8. Deney Elemanı 25C100W (Referans Elemanı 2)

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.15'de verilmiştir.



Resim 4.15. Deney elemanı 25C100W

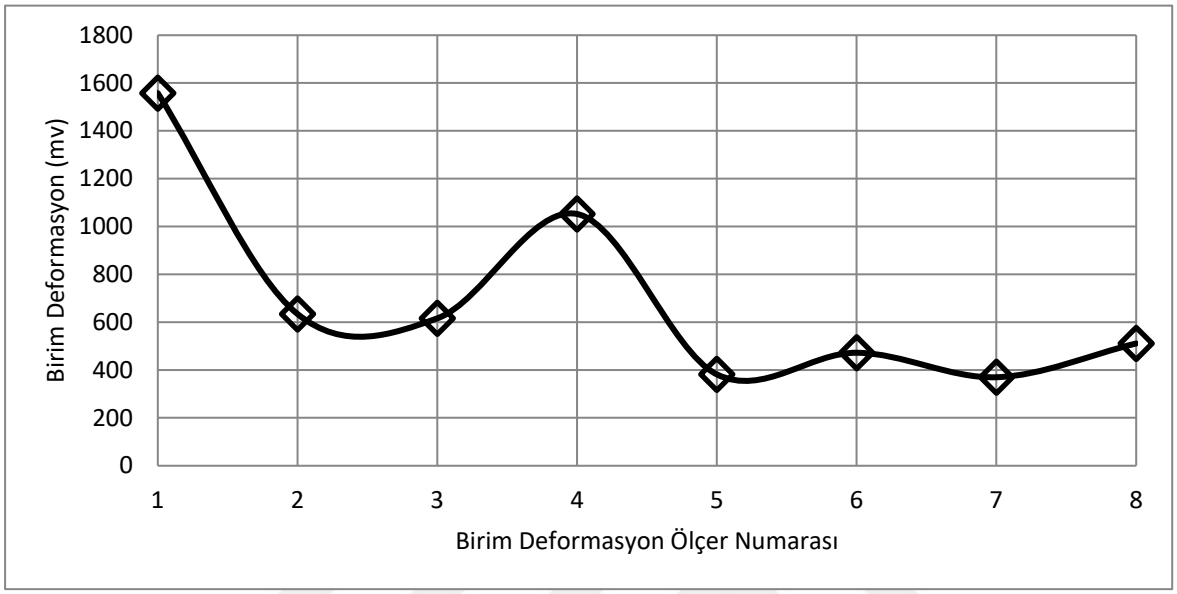
25C100W Referans deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 29,54 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 7,77 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Deney elemanı 25C100W yük-deplasman grafiği

25C100W referans deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0012 mm/mm ve 0,0008 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.16'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.16. Deney elemanı 25C100W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,74 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır, yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi hafifçe betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.16'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.16. Deney elemanı 25C100W hasar modeli

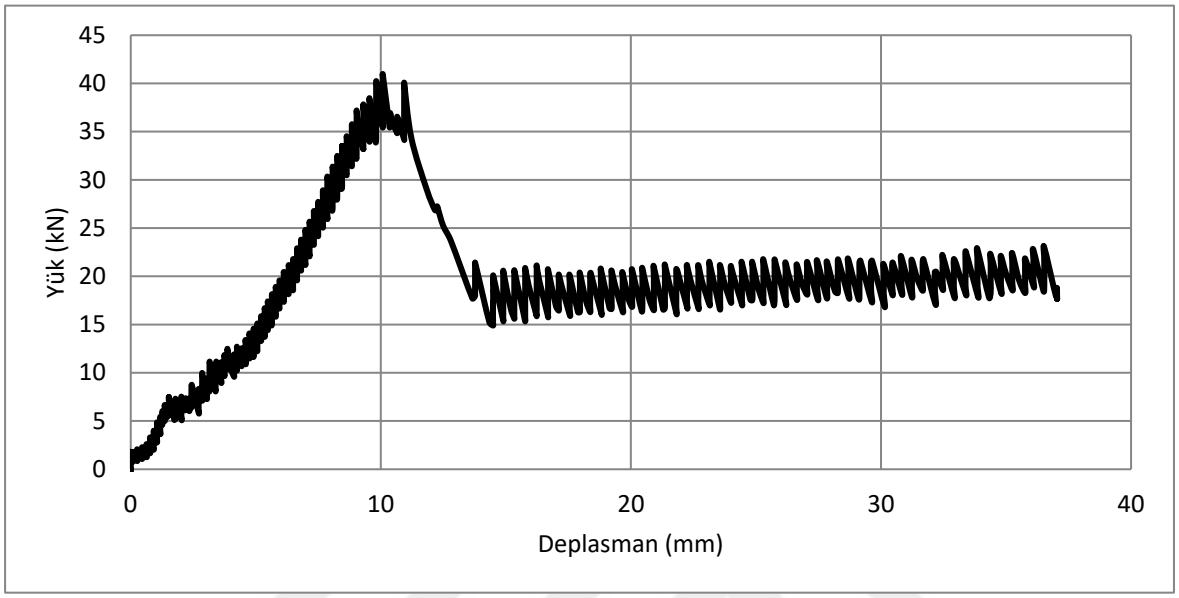
4.9. Deney Elemanı 25C100W1N90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.17'de verilmiştir.



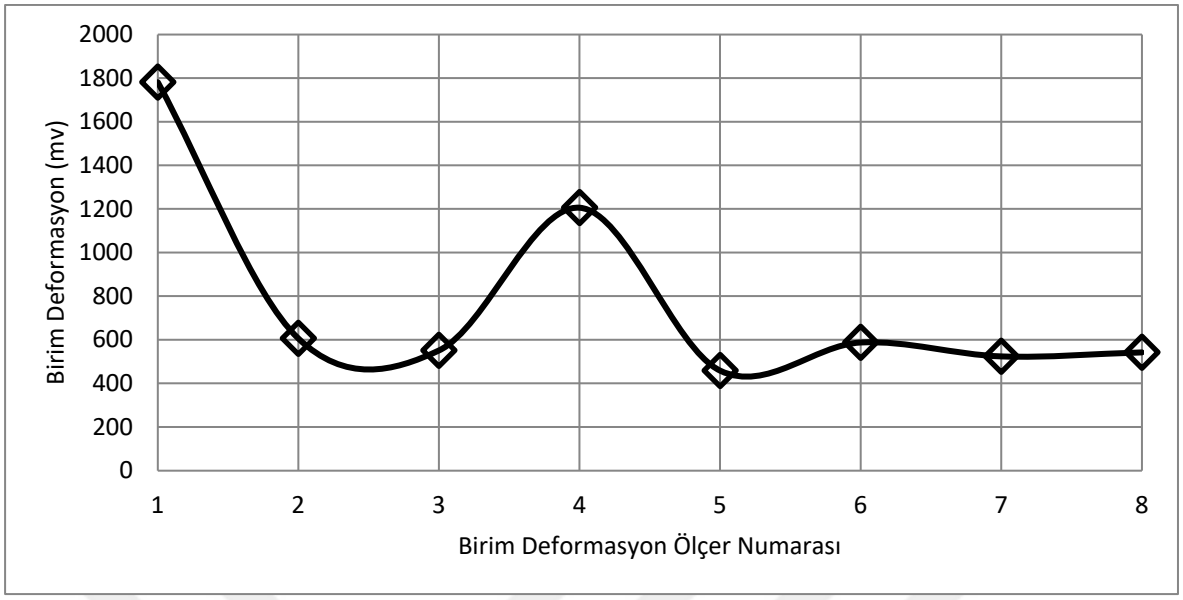
Resim 4.17. Deney elemanı 25C100W1N90AF

25C100W1N90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 40,99 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 10,07 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Deney elemanı 25C100W1N90AF yük-deplasman grafiği

25C100W1N90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0012 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.18'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.18. Deney elemanı 25C100W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,02 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W1N90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Resim 4.18'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.18. Deney elemanı 25C100W1N90AF hasar modeli

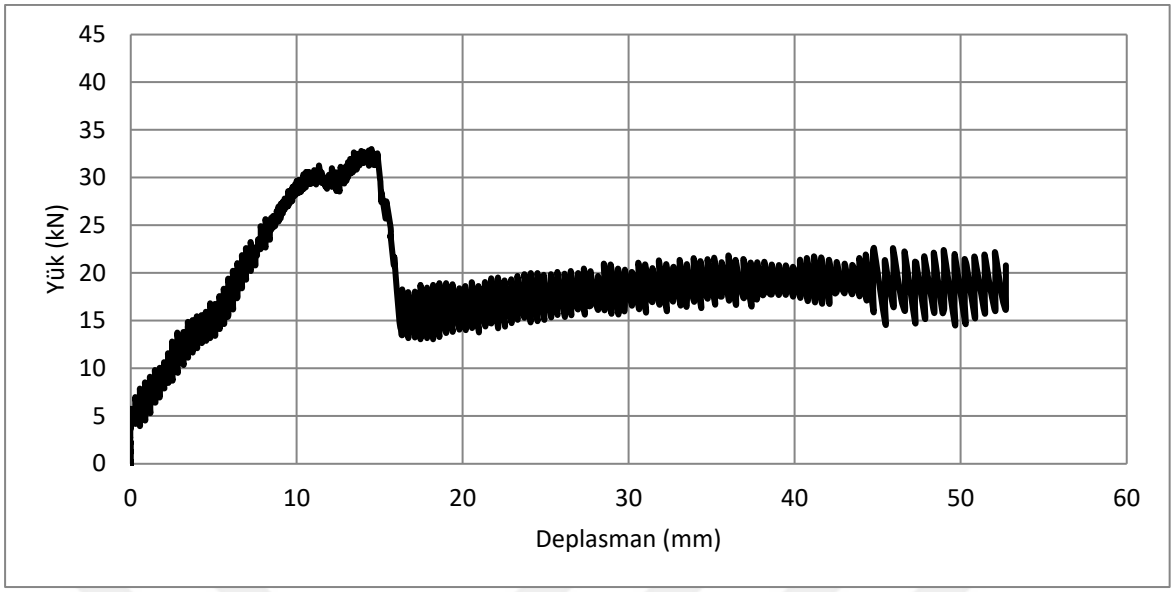
4.10. Deney Elemanı 25C100W1N0AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.19'de verilmiştir.



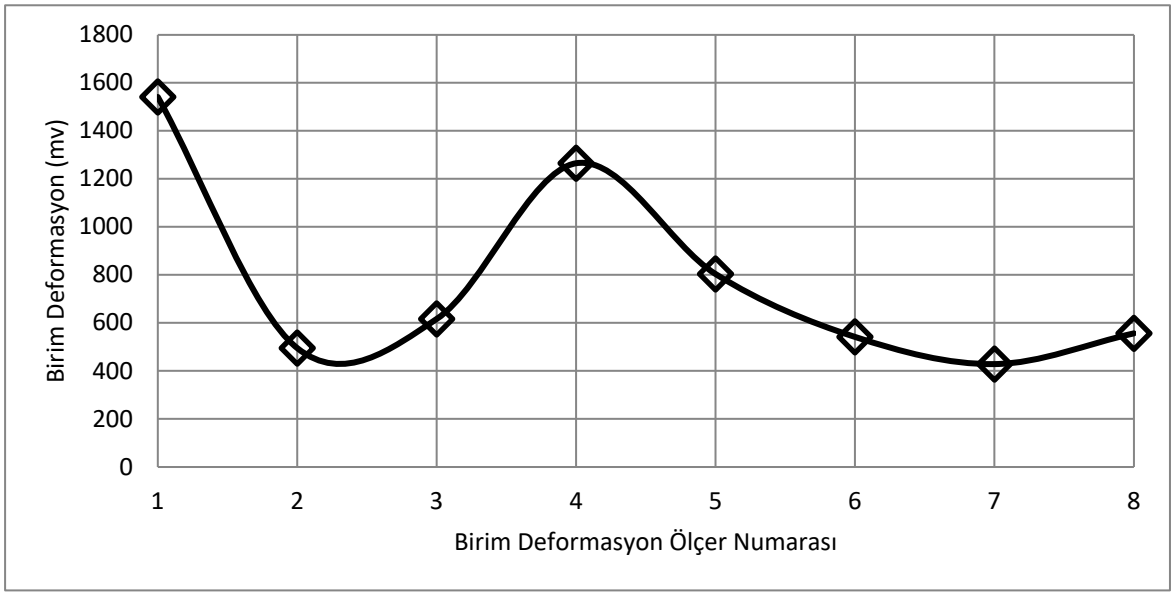
Resim 4.19. Deney elemanı 25C100W1N0AF

25C100W1N0AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 33,00 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 14,50 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.19'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Deney elemanı 25C100W1N0AF yük-deplasman grafiği

25C100W1N0AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0012 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.20'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.20. Deney elemanı 25C100W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,82 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W1N0AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Resim 4.20'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.20. Deney elemanı 25C100W1N0AF hasar modeli

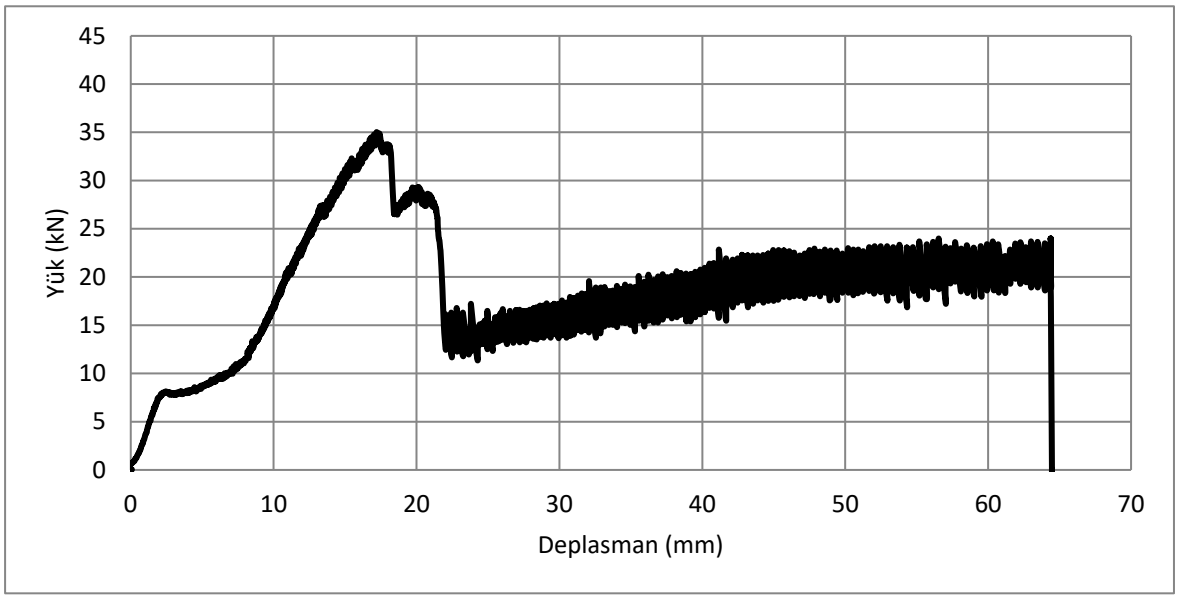
4.11. Deney Elemanı 25C100W1N45AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.21'de verilmiştir.



Resim 4.21. Deney elemanı 25C100W1N45AF

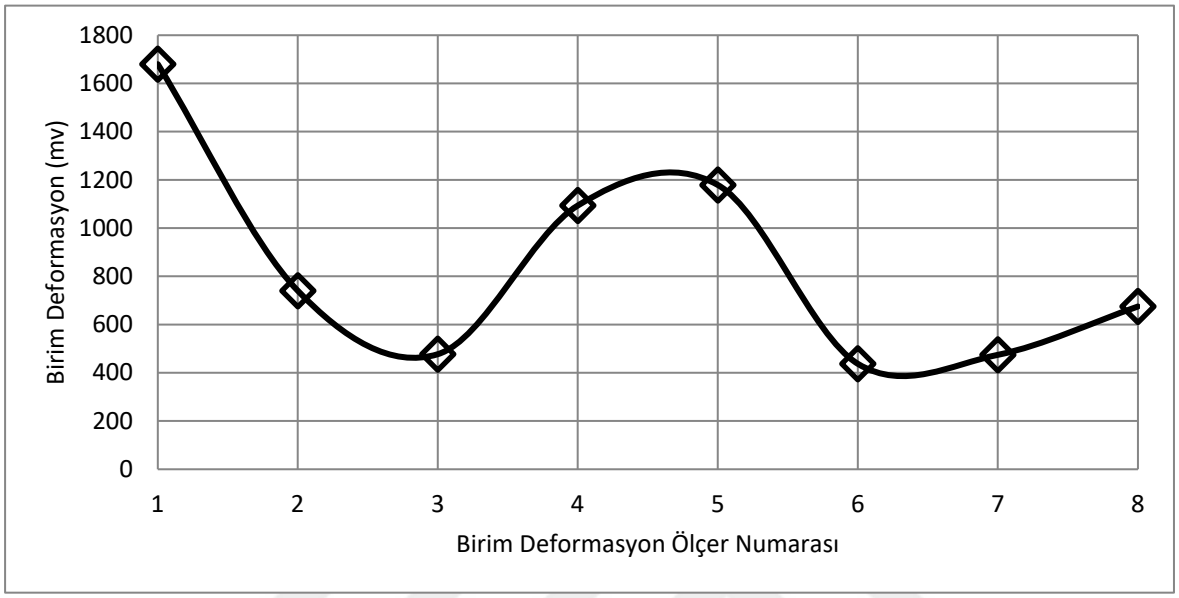
25C100W1N45AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 35,03 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 17,21 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Deney elemanı 25C100W1N45AF yük-deplasman grafiği

25C100W1N45AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0013 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.22'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.22. Deney elemanı 25C100W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,88 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W1N45AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma ankraja yakın bölgeye kadar devam etmiştir. Resim 4.22'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.22. Deney elemanı 25C100W1N45AF hasar modeli

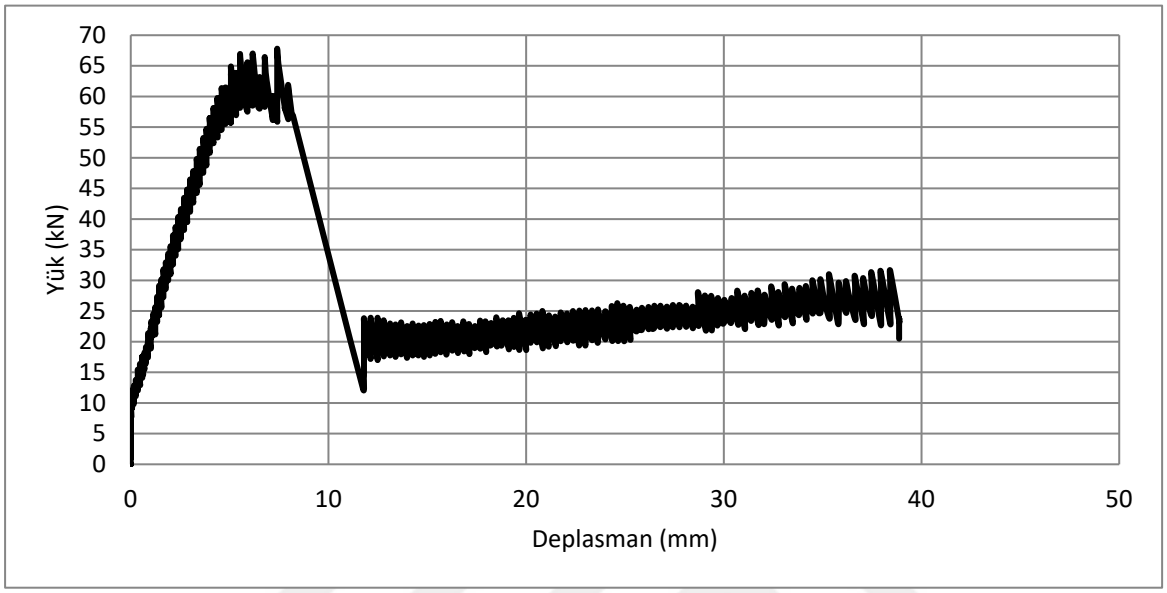
4.12. Deney Elemanı 25C100W2N45/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.23'de verilmiştir.



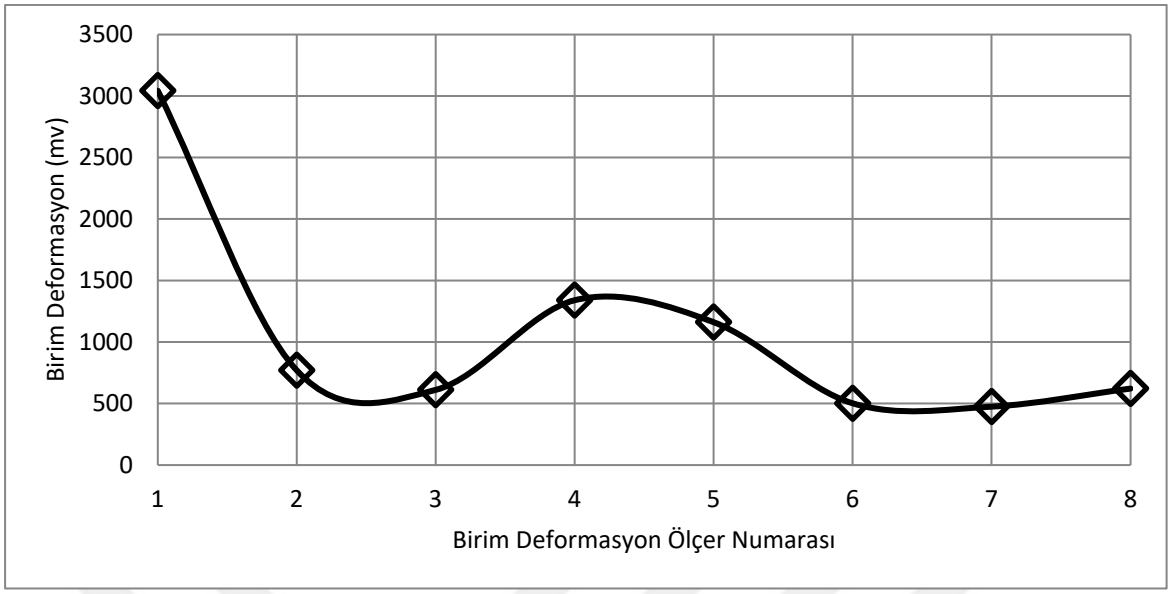
Resim 4.23. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF

25C100W2N45/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 67,80 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 7,41 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.23'de verilmiştir.



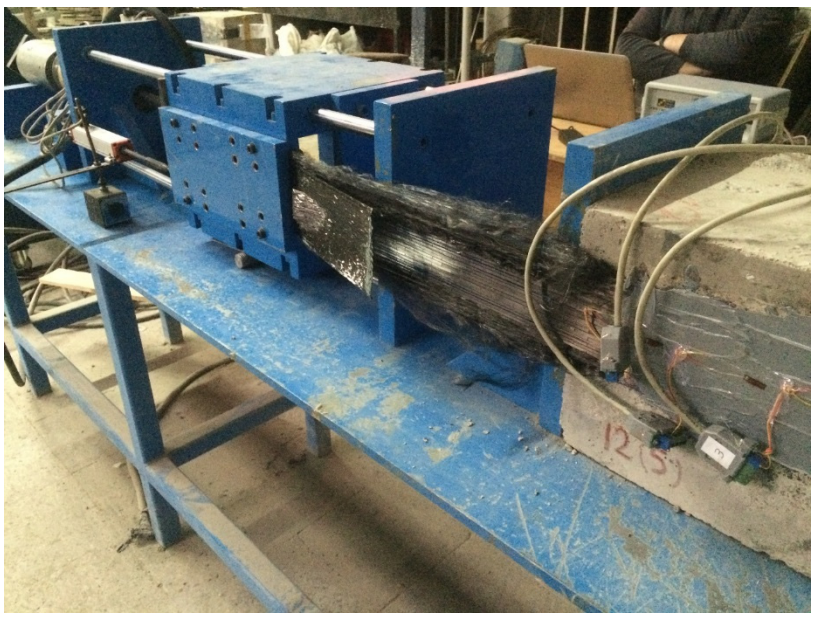
Şekil 4.23. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF yük-deplasman grafiği

25C100W2N45/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0024 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.24'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.24. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

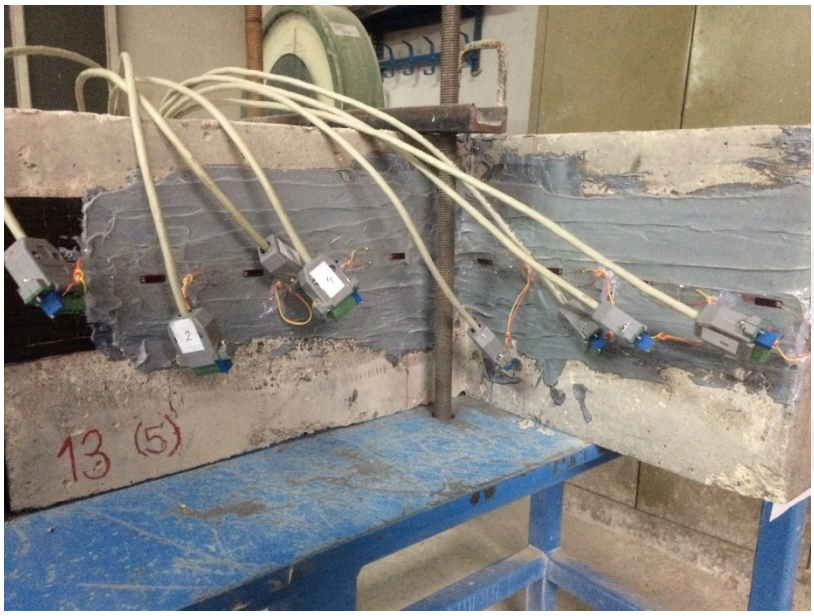
CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,70 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Resim 4.24'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.24. Deney elemanı 25C100W2N45/90AF hasar modeli

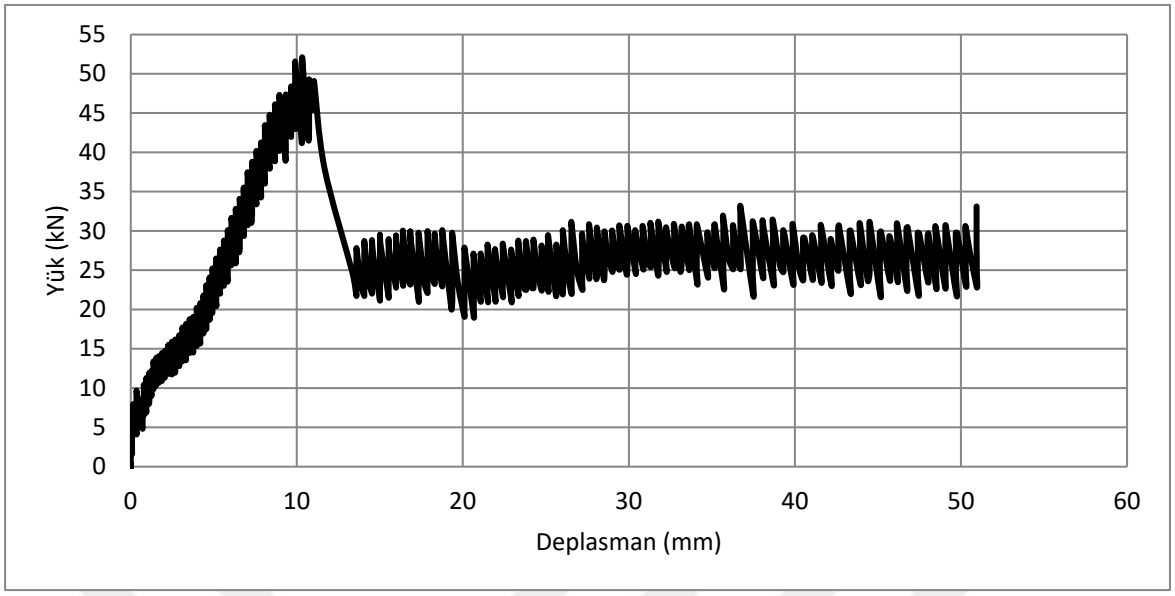
4.13. Deney Elemanı 25C100W2N0/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.25'de verilmiştir.



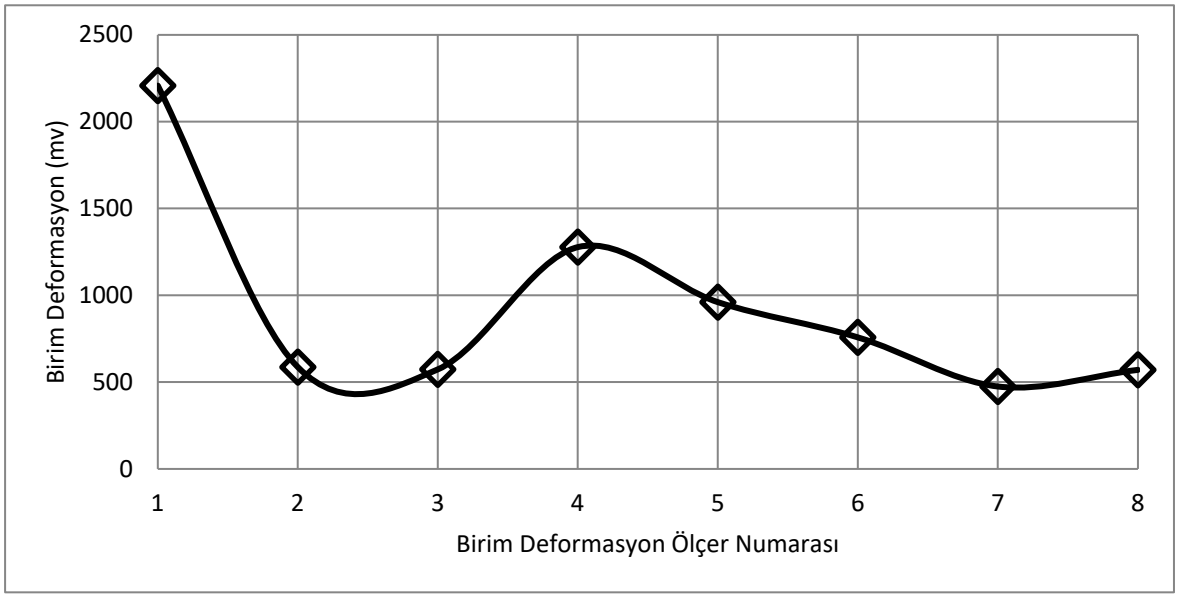
Resim 4.25. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF

25C100W2N0/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 52,11 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 10,32 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF yük-deplasman grafiği

25C100W2N0/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0018 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.26'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.26. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,30 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.26'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.26. Deney elemanı 25C100W2N0/90AF hasar modeli

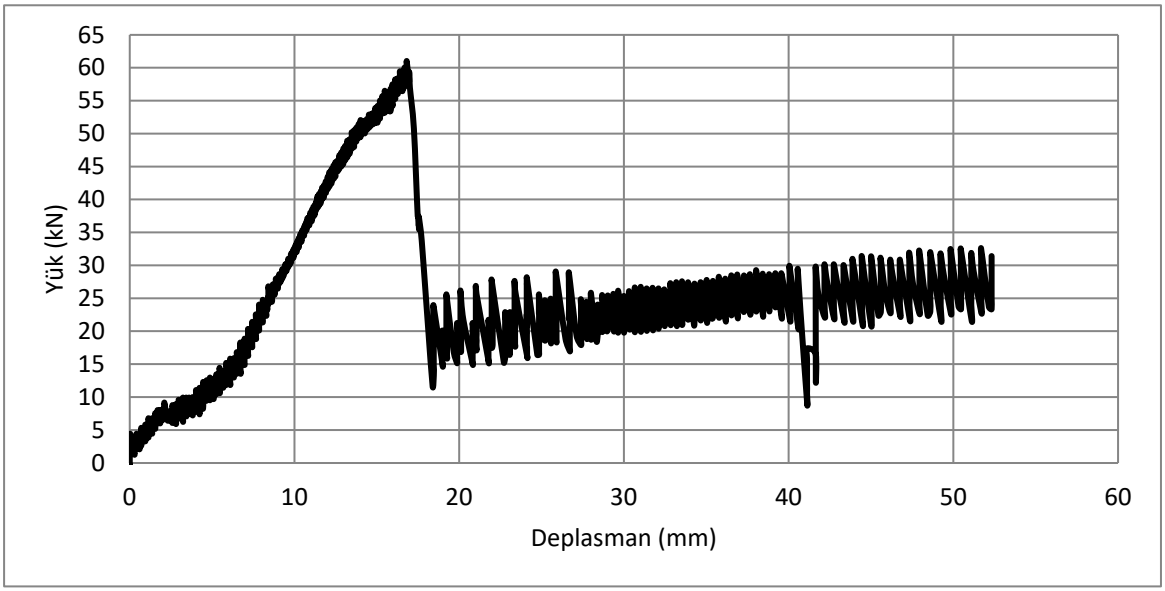
4.14. Deney Elemanı 25C100W2N90/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla çift Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.27'de verilmiştir.



Resim 4.27. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF

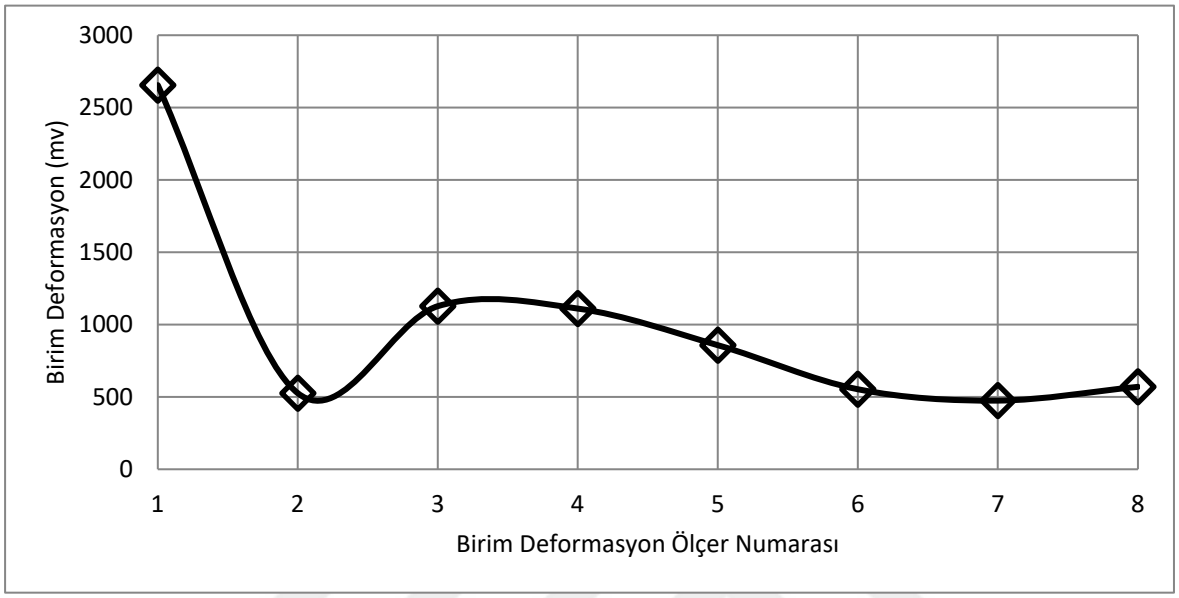
25C100W2N90/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 61,03 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 16,81 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF yük-deplasman grafiği

25C100W2N90/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0021 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.28'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.28. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,53 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.28'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.28. Deney elemanı 25C100W2N90/90AF hasar modeli

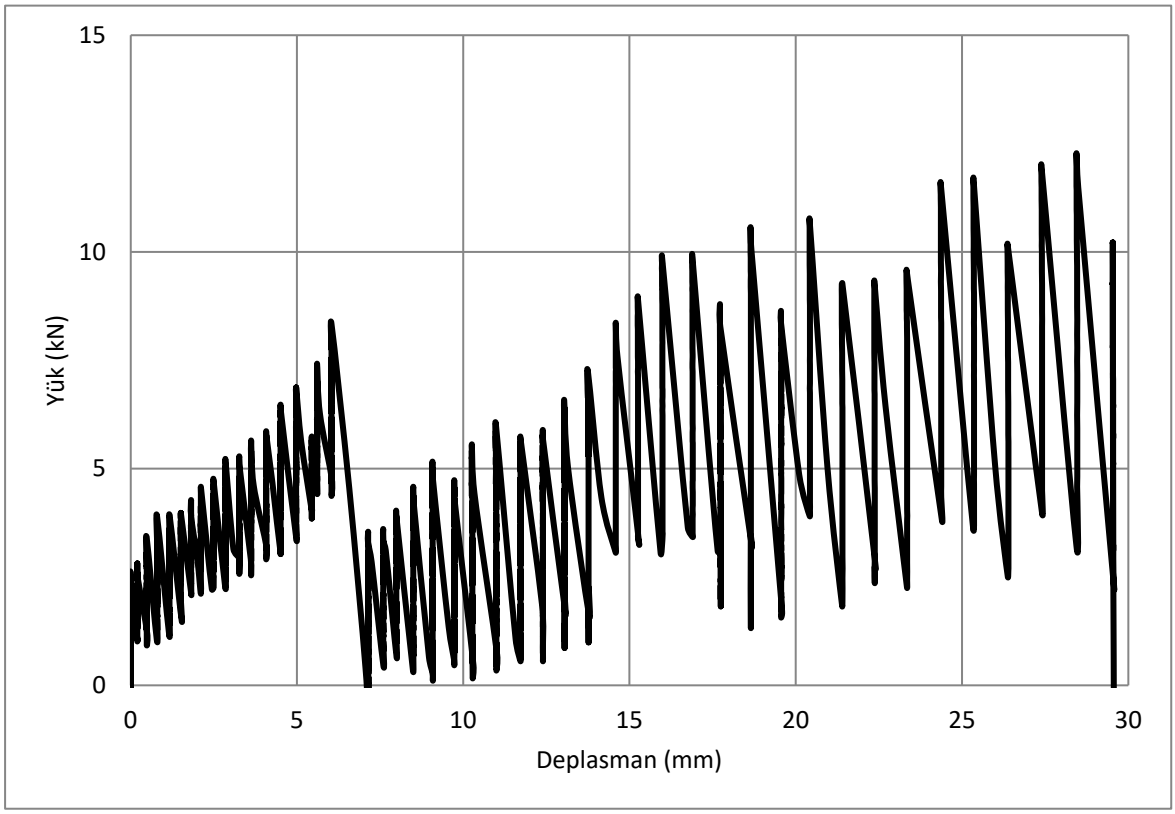
4.15. Deney Elemanı 10C50W (Referans Elemanı 3)

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.29'de verilmiştir.



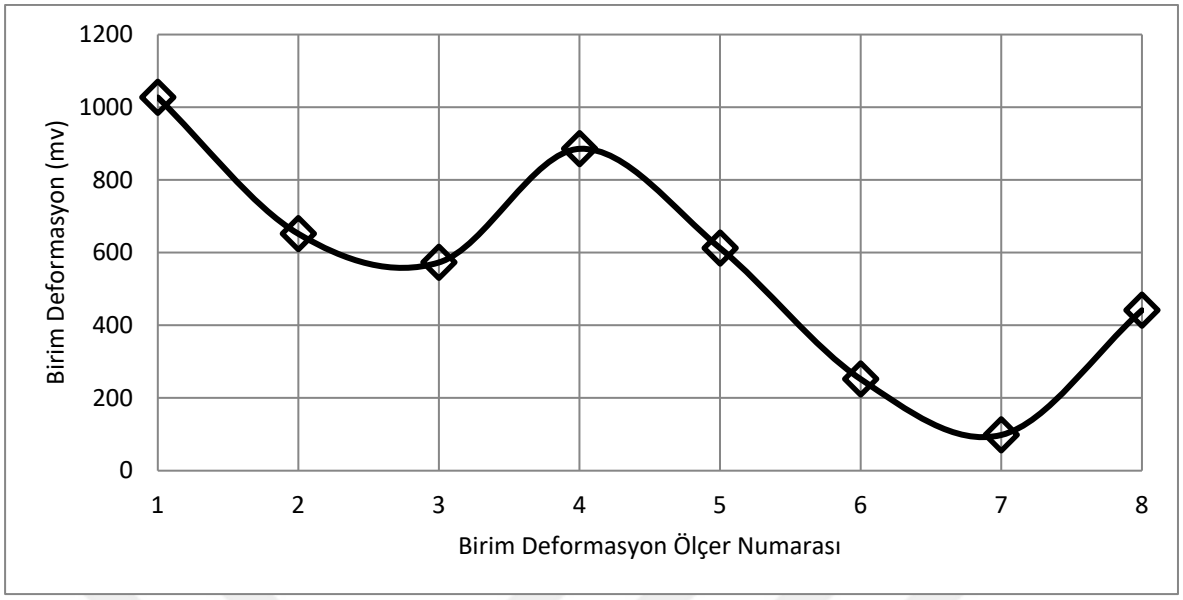
Resim 4.29. Deney elemanı 10C50W

10C50W Referans deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 8,34 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 6,04 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.29'de verilmiştir.



Şekil 4.29. Deney elemanı 10C50W yük-deplasman grafiği

10C50W referans deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0008 mm/mm ve 0,0007 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.30'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.30. Deney elemanı 10C50W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

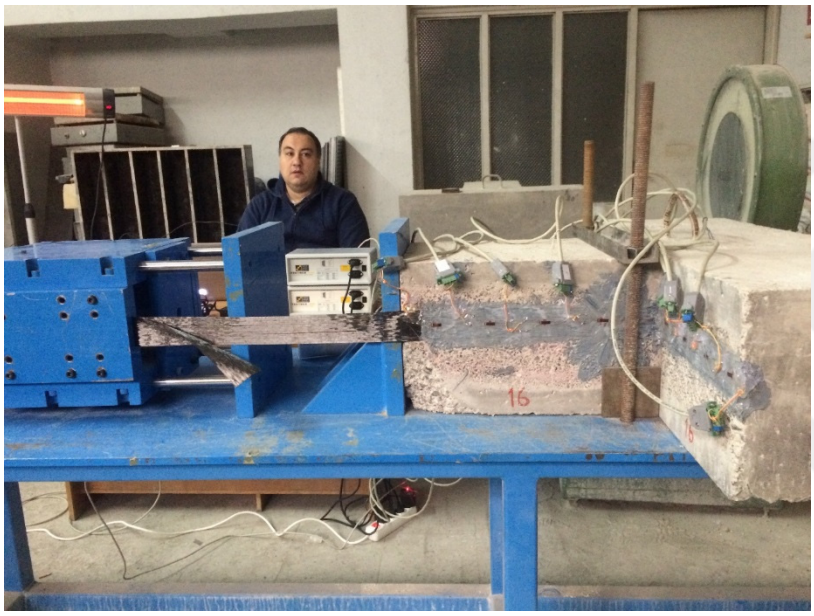
CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,42 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır, yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.30'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.30. Deney elemanı 10C50W hasar modeli

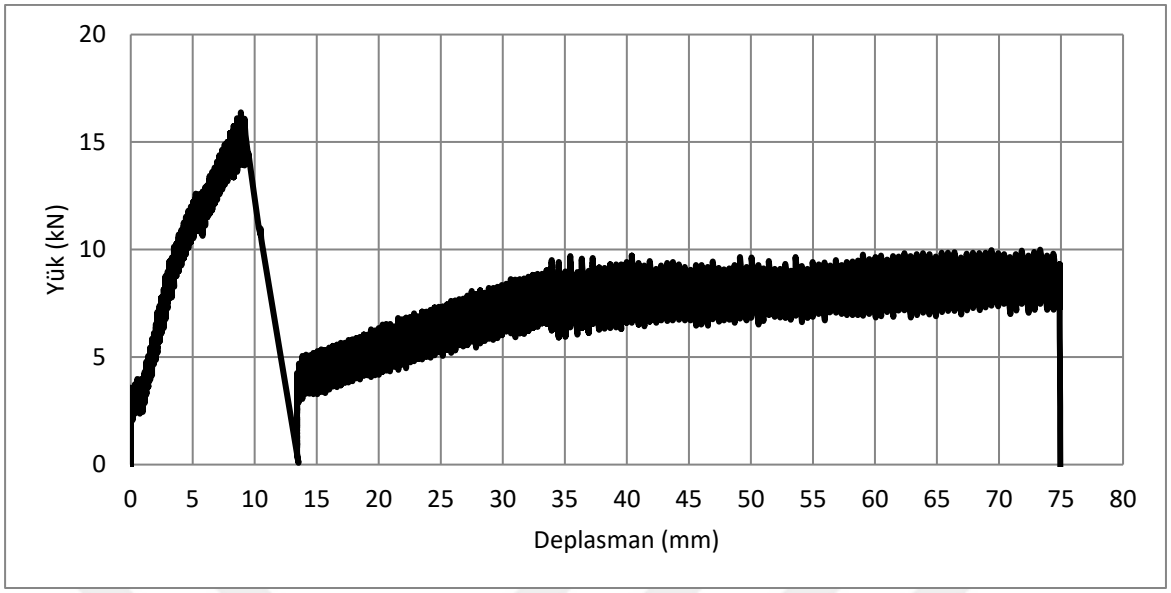
4.16. Deney Elemanı 10C50W1N90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.31'de verilmiştir.



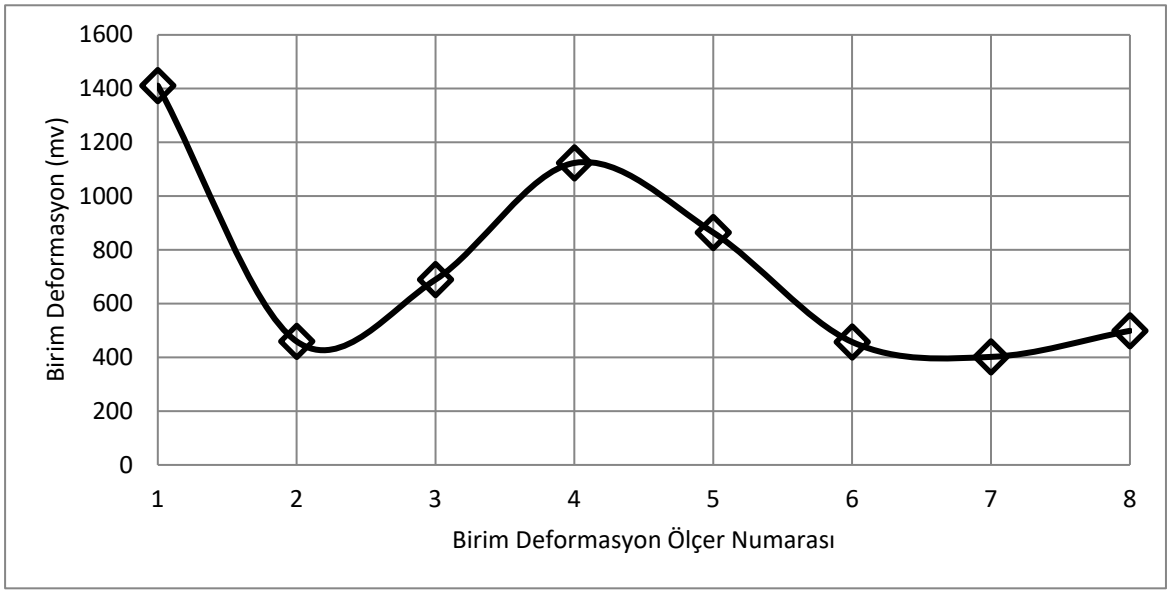
Resim 4.31. Deney elemanı 10C50W1N90AF

10C50W1N90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 16,38 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 8,88 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31. Deney elemanı 10C50W1N90AF yük-deplasman grafiği

10C50W1N90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.32'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.32. Deney elemanı 10C50W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

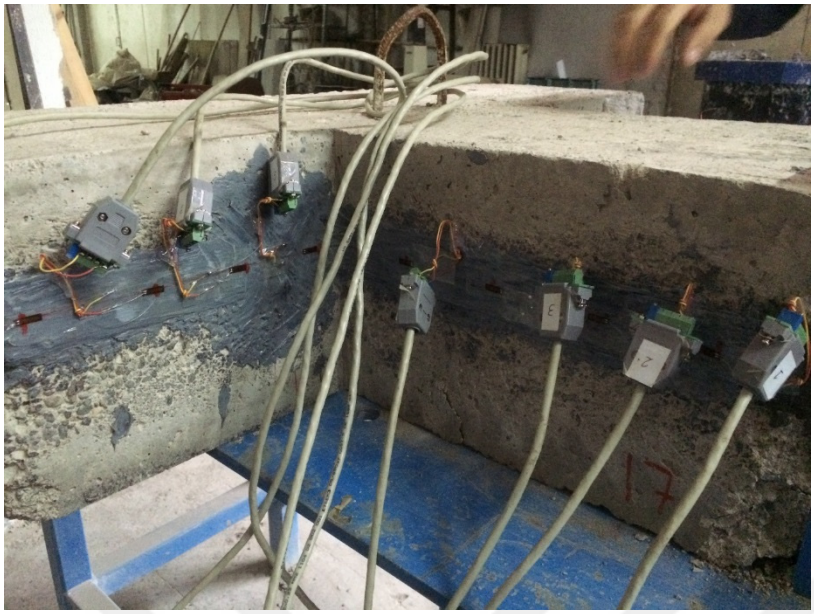
CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,82 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W1N90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.32'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.32. Deney elemanı 10C50W1N90AF hasar modeli

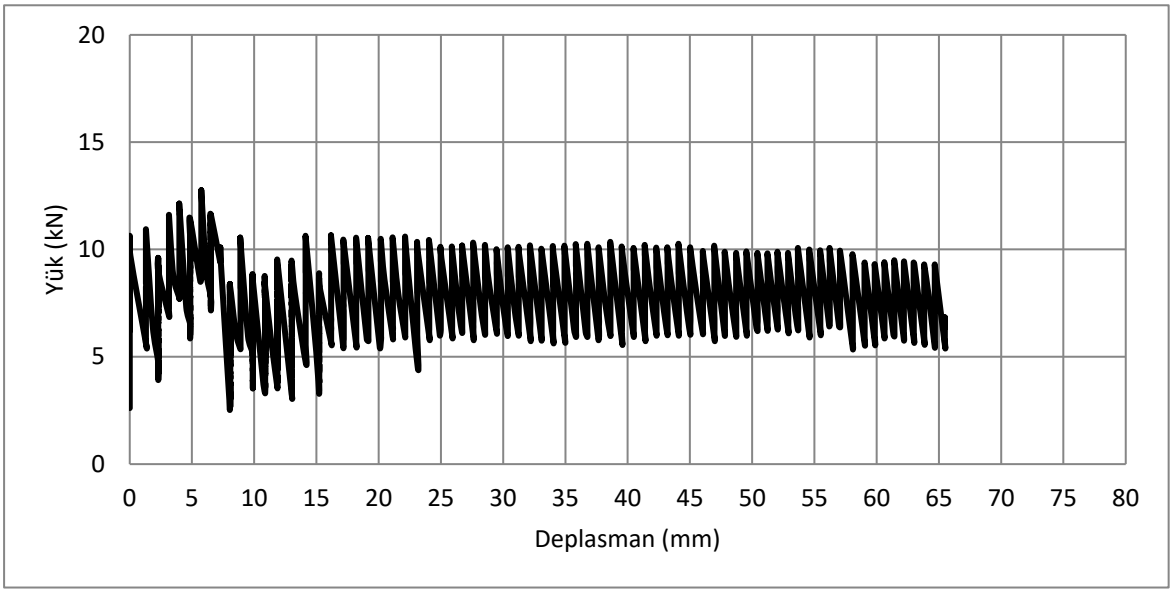
4.17. Deney Elemanı 10C50W1N0AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.33'de verilmiştir.



Resim 4.33. Deney elemanı 10C50W1N0AF

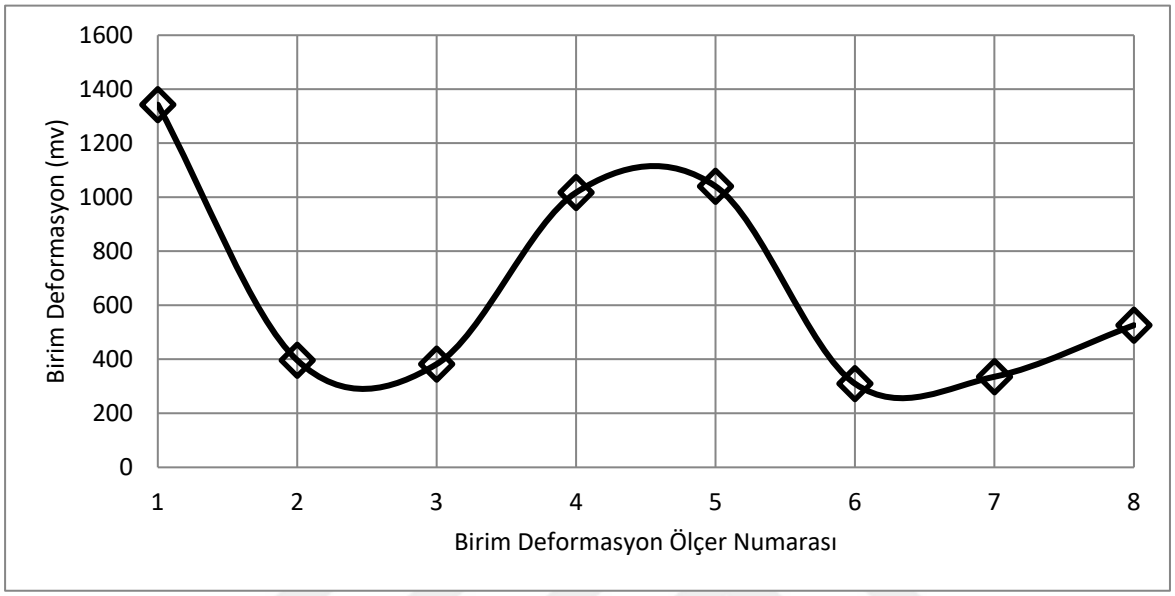
10C50W1N0AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 12,76 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 5,75 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.33'de verilmiştir.



Şekil 4.33. Deney elemanı 10C50W1N0AF yük-deplasman grafiği

10C50W1N0AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0008 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.34'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.34. Deney elemanı 10C50W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

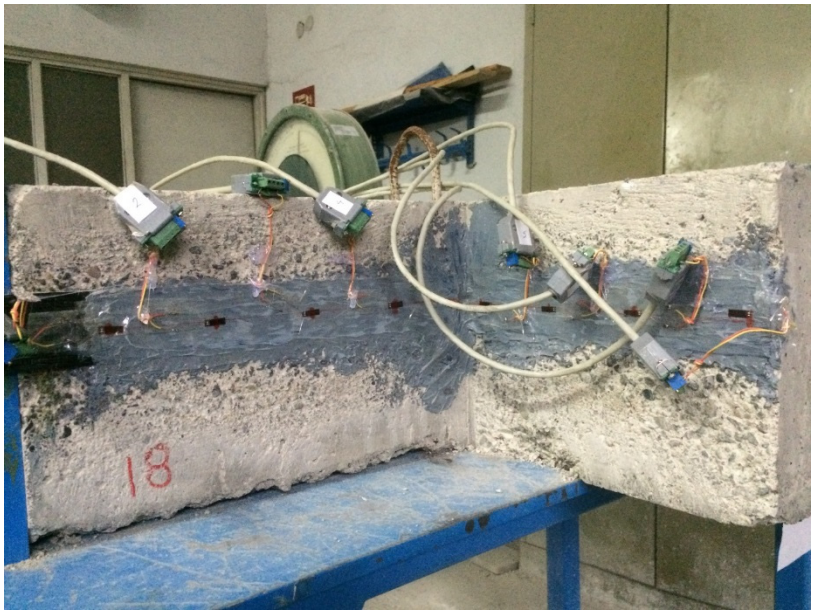
CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,64 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W1N0AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine (ankrajın olduğu yere) kadar devam etmiştir. Resim 4.34'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.34. Deney elemanı 10C50W1N0AF hasar modeli

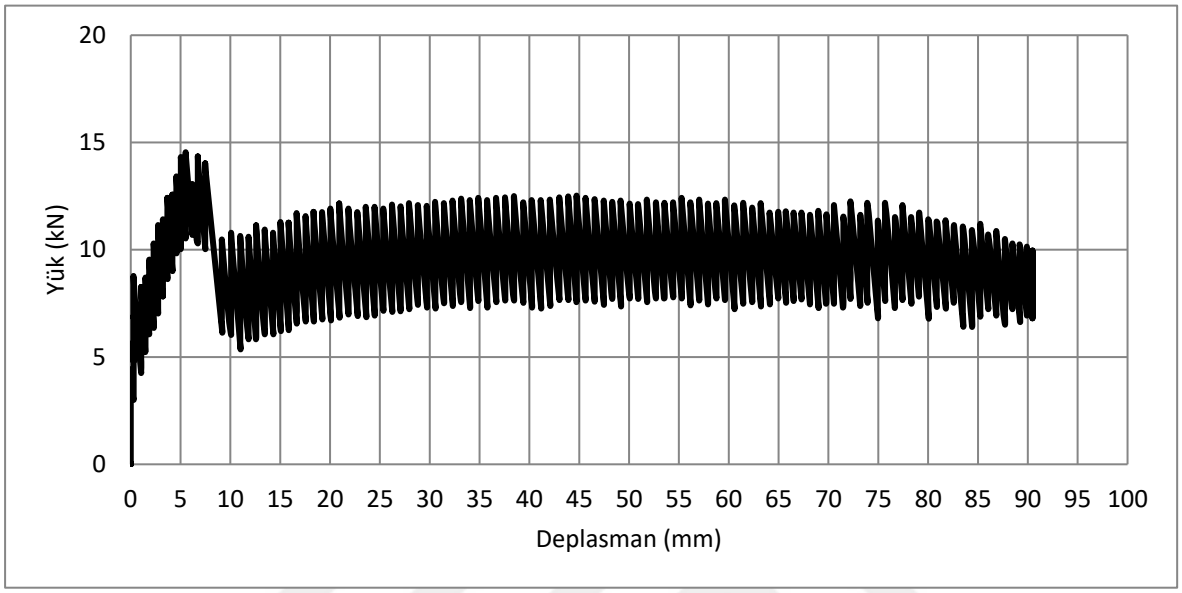
4.18. Deney Elemanı 10C50W1N45AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.35'de verilmiştir.



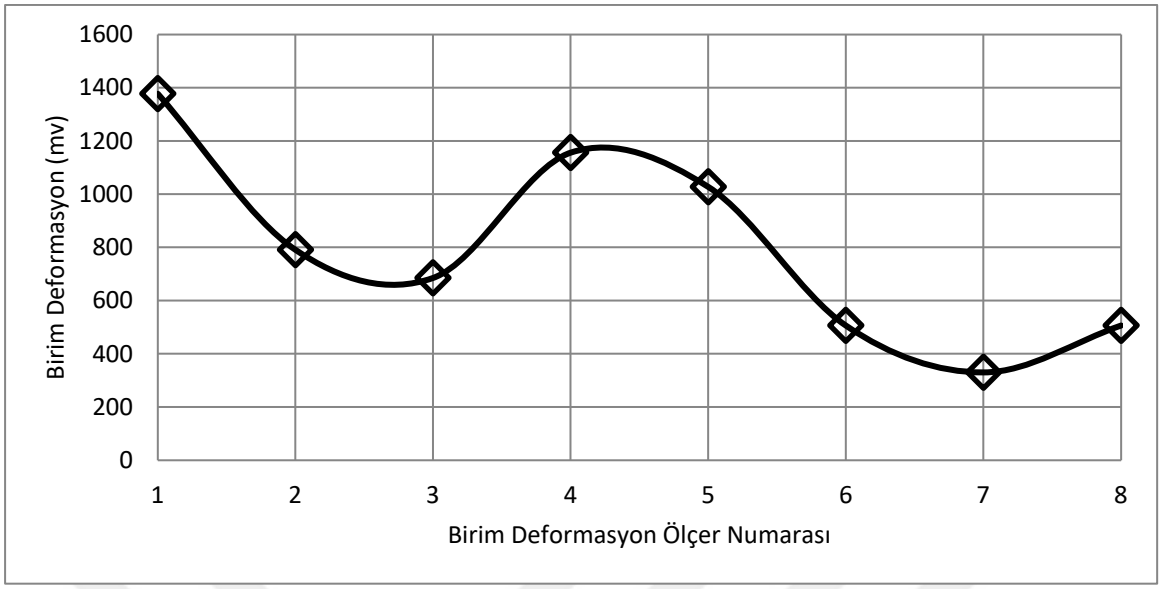
Resim 4.35. Deney elemanı 10C50W1N45AF

10C50W1N45AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 14,55 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 5,51 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.35'de verilmiştir.



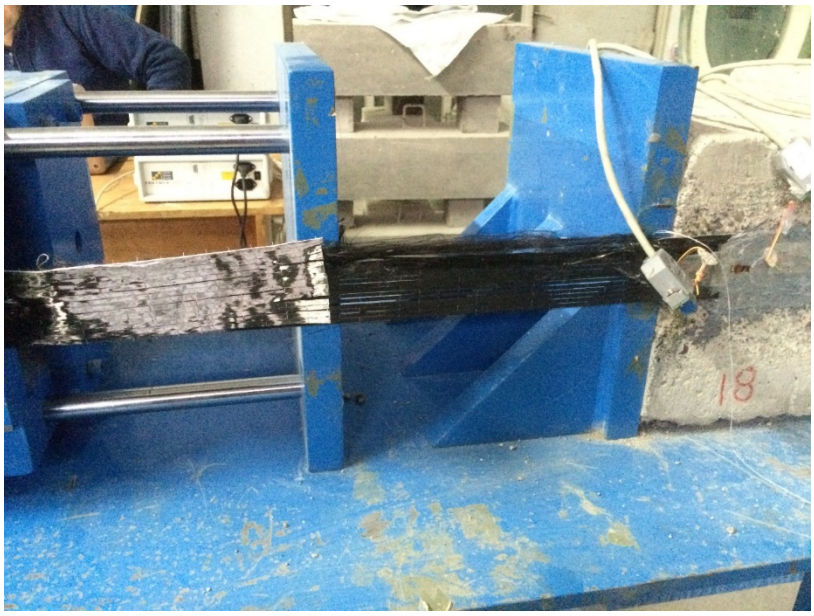
Şekil 4.35. Deney elemanı 10C50W1N45AF yük-deplasman grafiği

10C50W1N45AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.36'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.36. Deney elemanı 10C50W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,73 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W1N45AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Resim 4.36'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.36. Deney elemanı 10C50W1N45AF hasar modeli

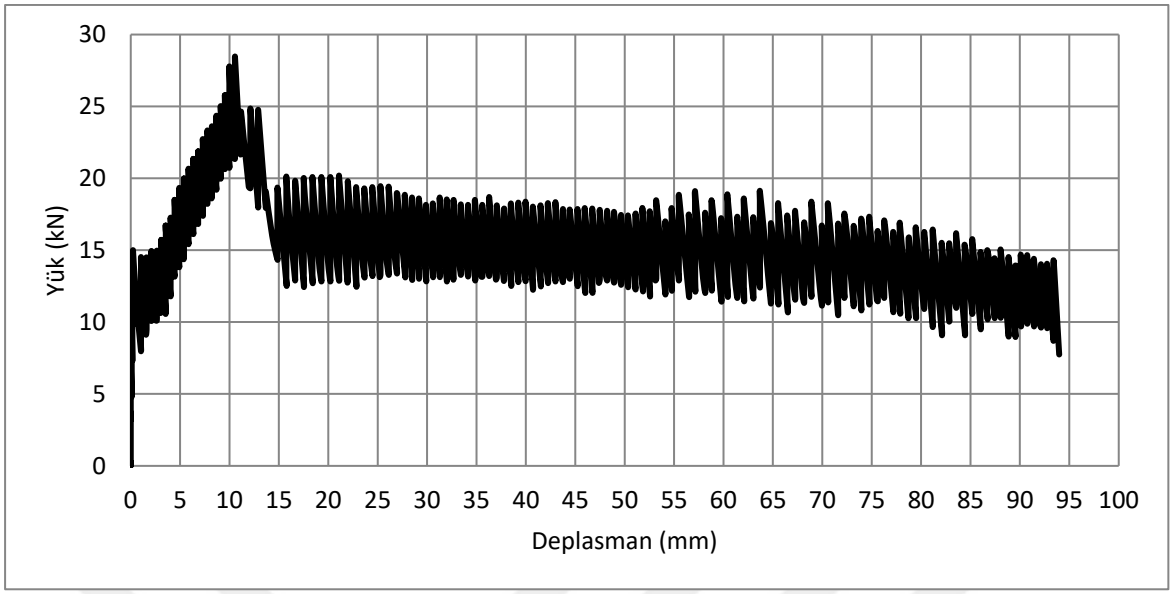
4.19. Deney Elemanı 10C50W2N45/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.37'de verilmiştir.



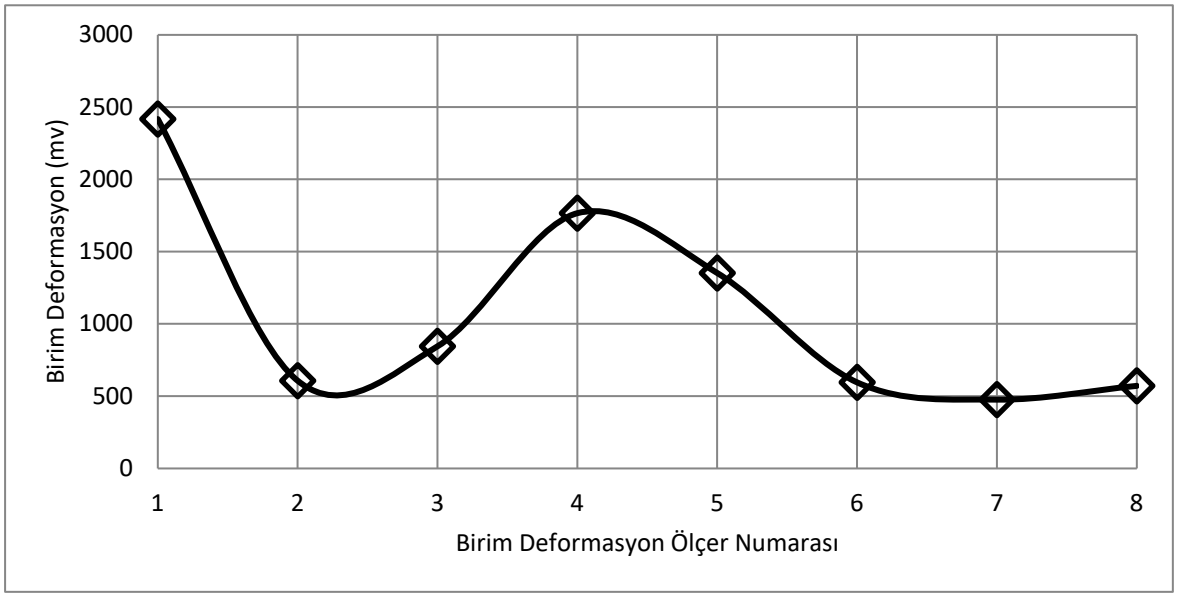
Resim 4.37. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF

10C50W2N45/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 28,48 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 10,54 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.37'de verilmiştir.



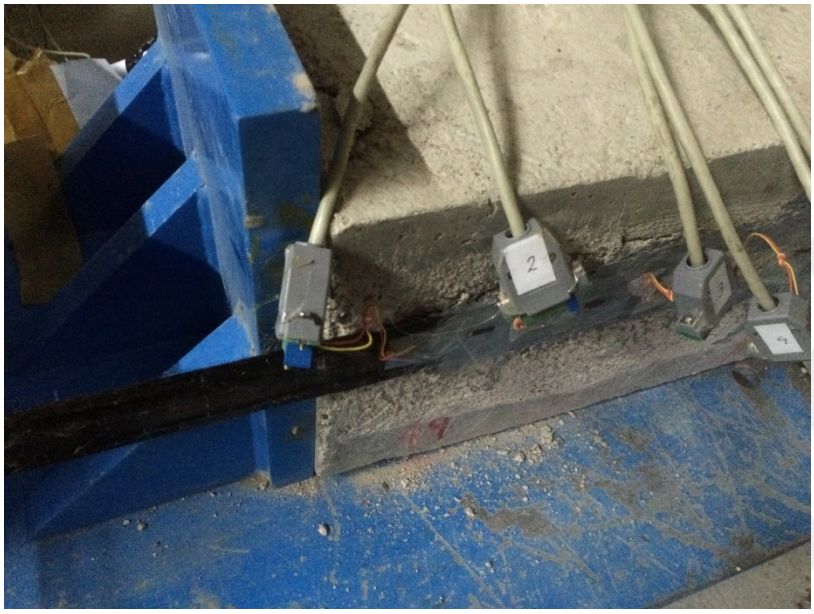
Şekil 4.37. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF yük-deplasman grafiği

10C50W2N45/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0019 mm/mm ve 0,0014 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.38'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.38. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,42 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Resim 4.38'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.38. Deney elemanı 10C50W2N45/90AF hasar modeli

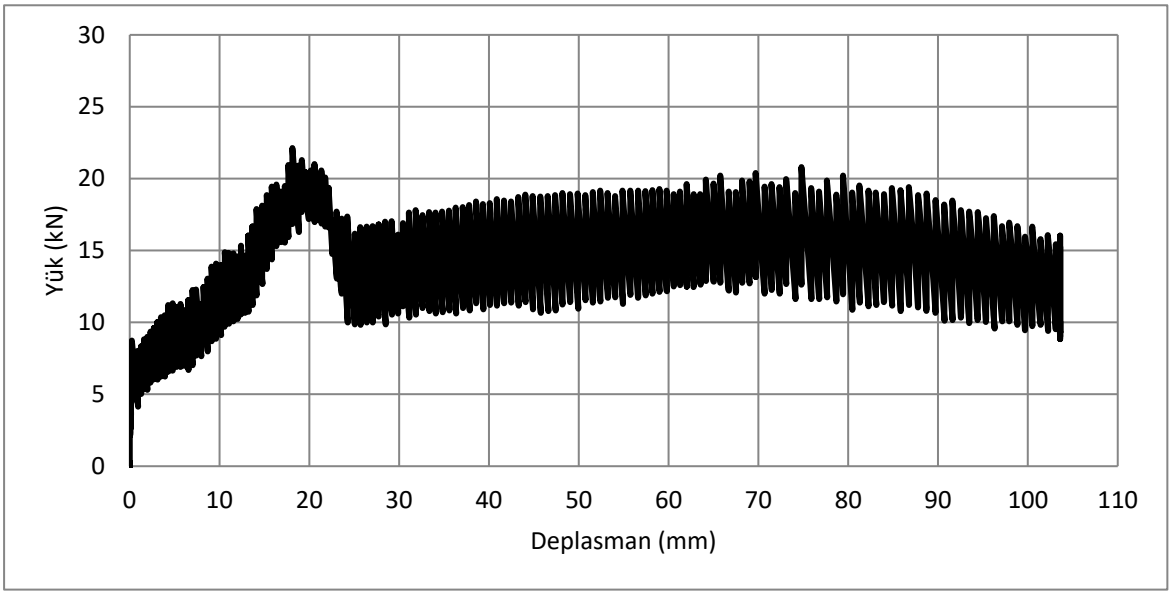
4.20. Deney Elemanı 10C50W2N0/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.39'de verilmiştir.



Resim 4.39. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF

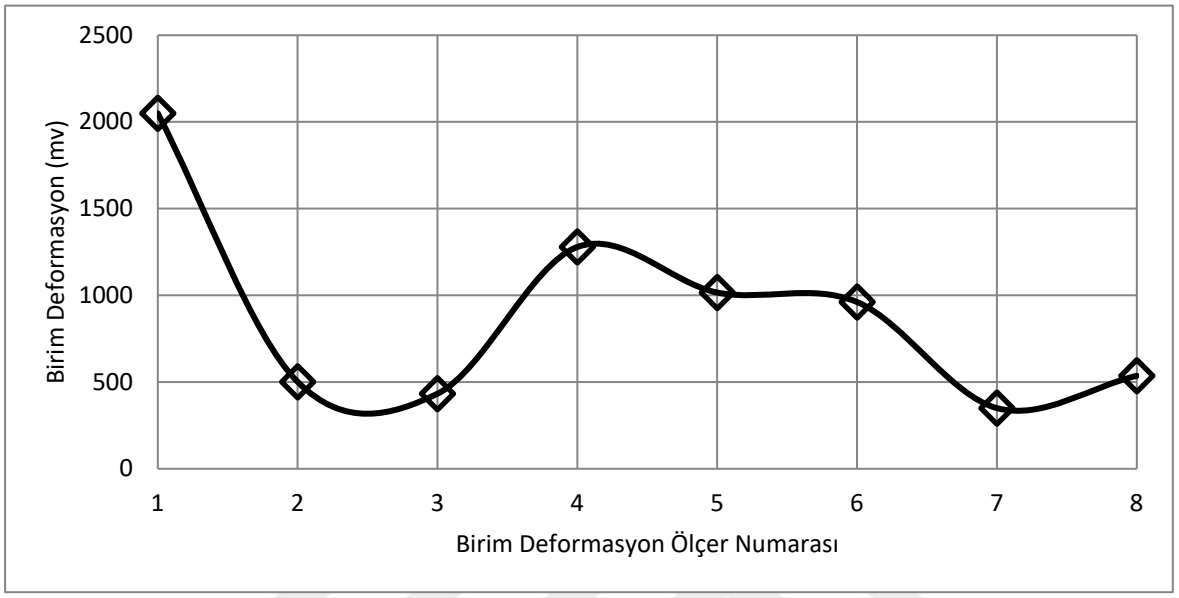
10C50W2N0/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 22,13 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 18,11 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.39'de verilmiştir.



Şekil 4.39. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF yük-deplasman grafiği

10C50W2N0/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0016 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.40'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.40. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,11 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.40'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.40. Deney elemanı 10C50W2N0/90AF hasar modeli

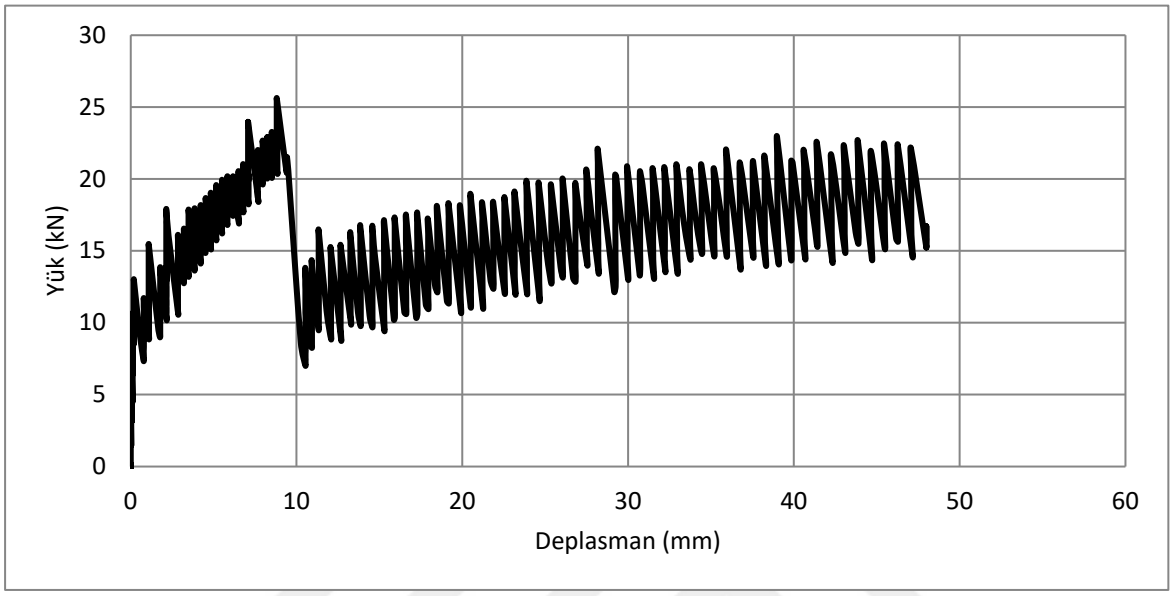
4.21. Deney Elemanı 10C50W2N90/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 50 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla çift Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.41'de verilmiştir.



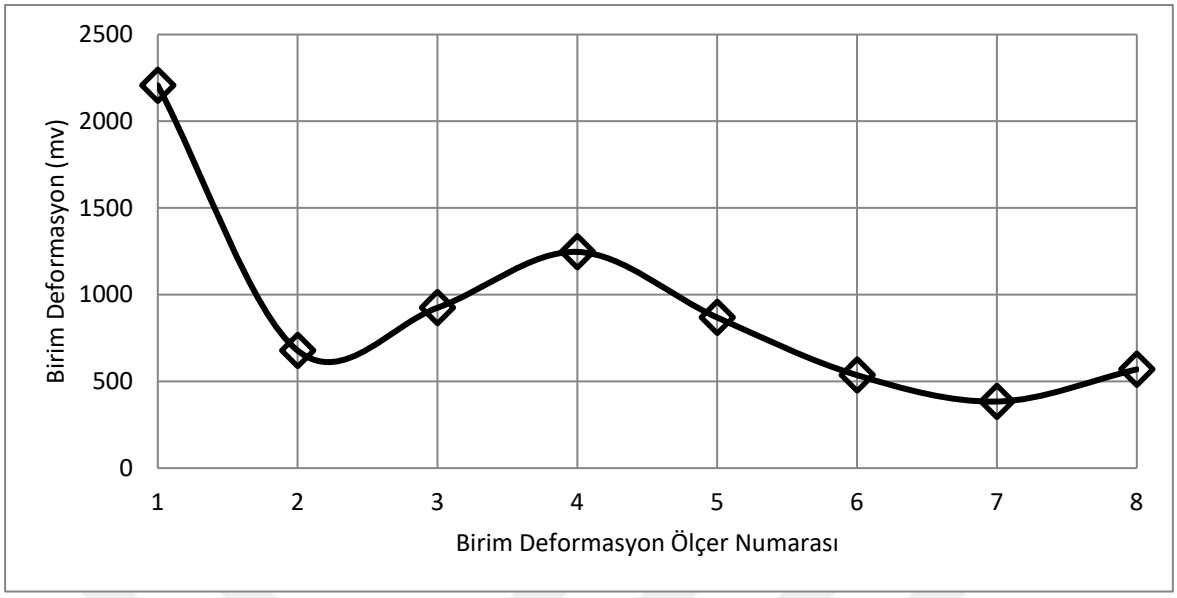
Resim 4.41. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF

10C50W2N90/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 25,64 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 8,80 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4.41. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF yük-deplasman grafiği

10C50W2N90/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0018 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.42'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.42. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,28 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.42'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.42. Deney elemanı 10C50W2N90/90AF hasar modeli

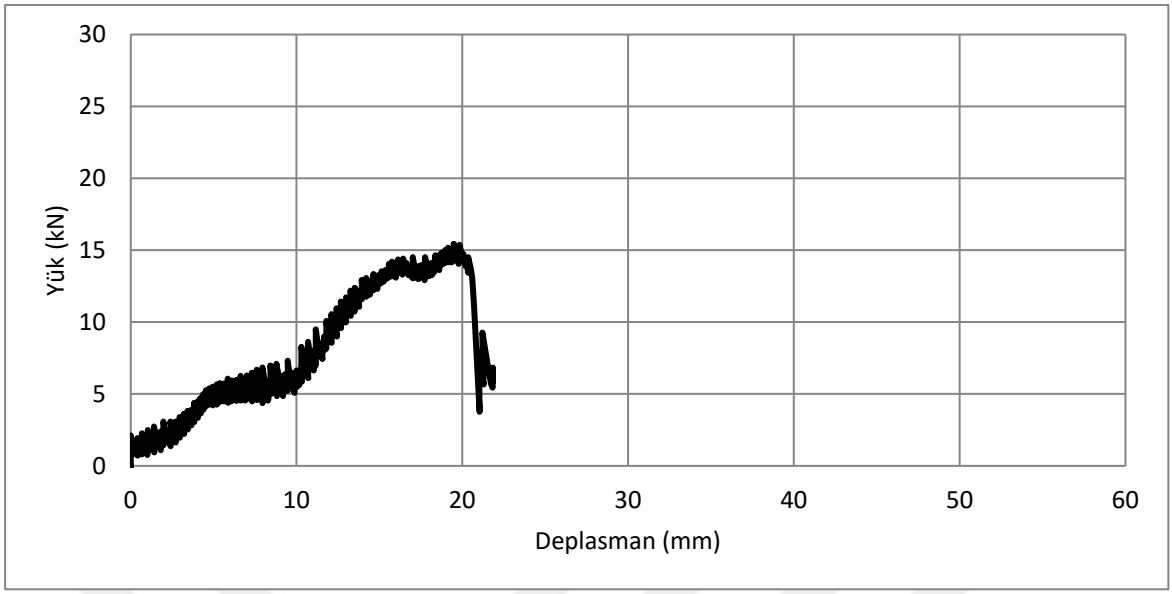
4.22. Deney Elemanı 10C100W (Referans Elemanı 4)

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.42'de verilmiştir.



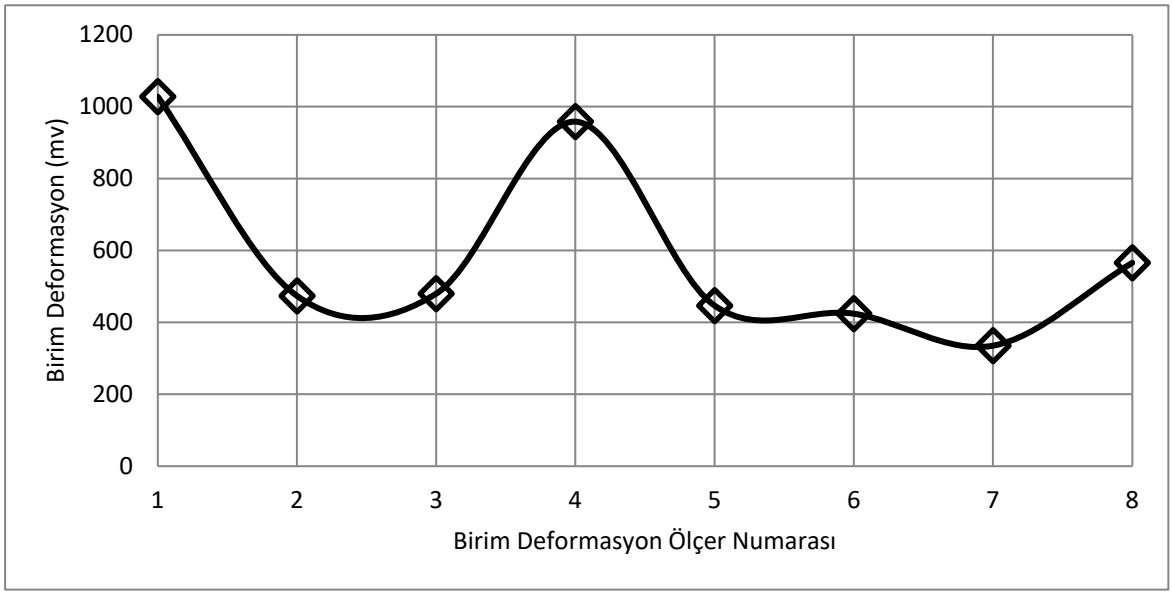
Resim 4.43. Deney elemanı 10C100W

10C100W Referans deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 15,43 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 19,48 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.43'de verilmiştir.



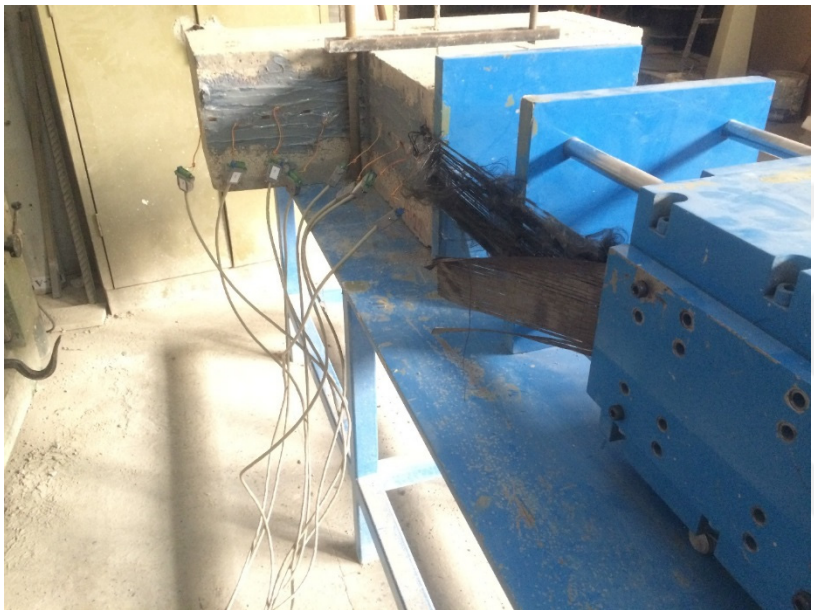
Şekil 4.43. Deney elemanı 10C100W yük-deplasman grafiği

10C100W referans deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0008 mm/mm ve 0,0008 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.44'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.44. Deney elemanı 10C100W birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

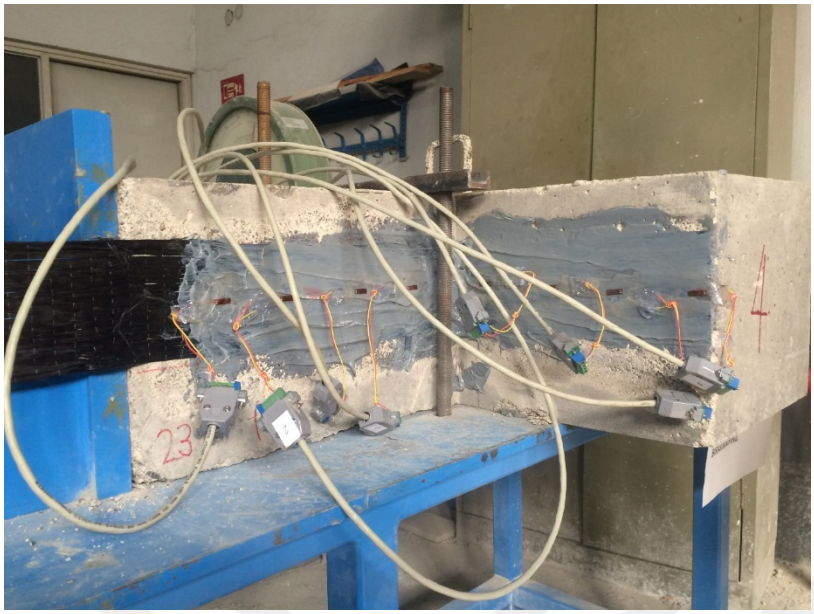
CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,39 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır, yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.44'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.44. Deney elemanı 10C100W hasar modeli

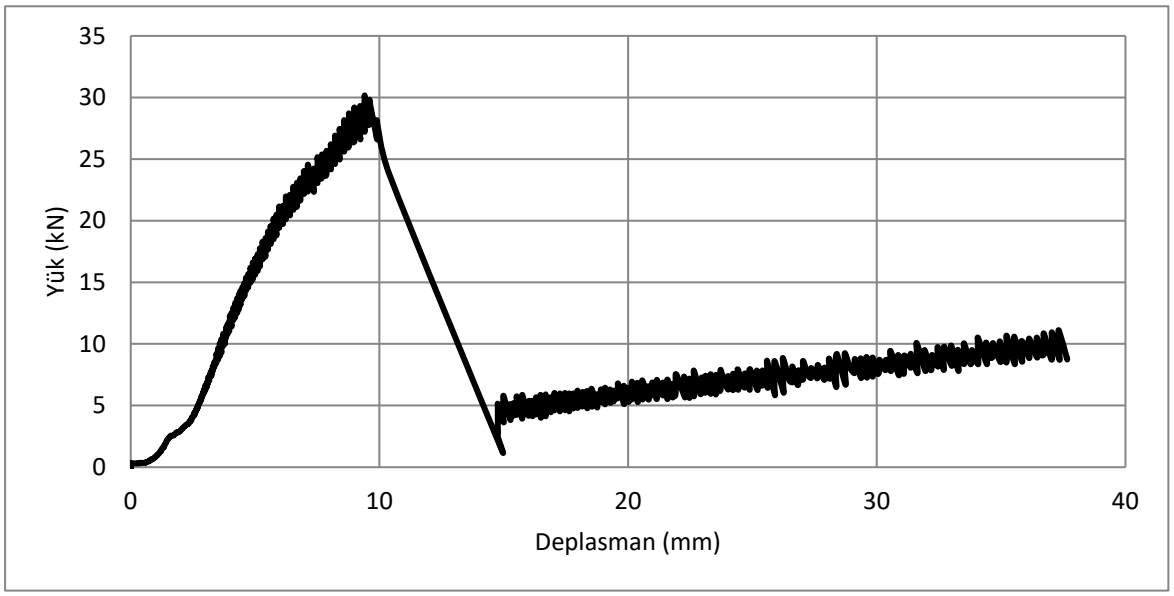
4.23. Deney Elemanı 10C100W1N90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.45'de verilmiştir.



Resim 4.45. Deney elemanı 10C100W1N90AF

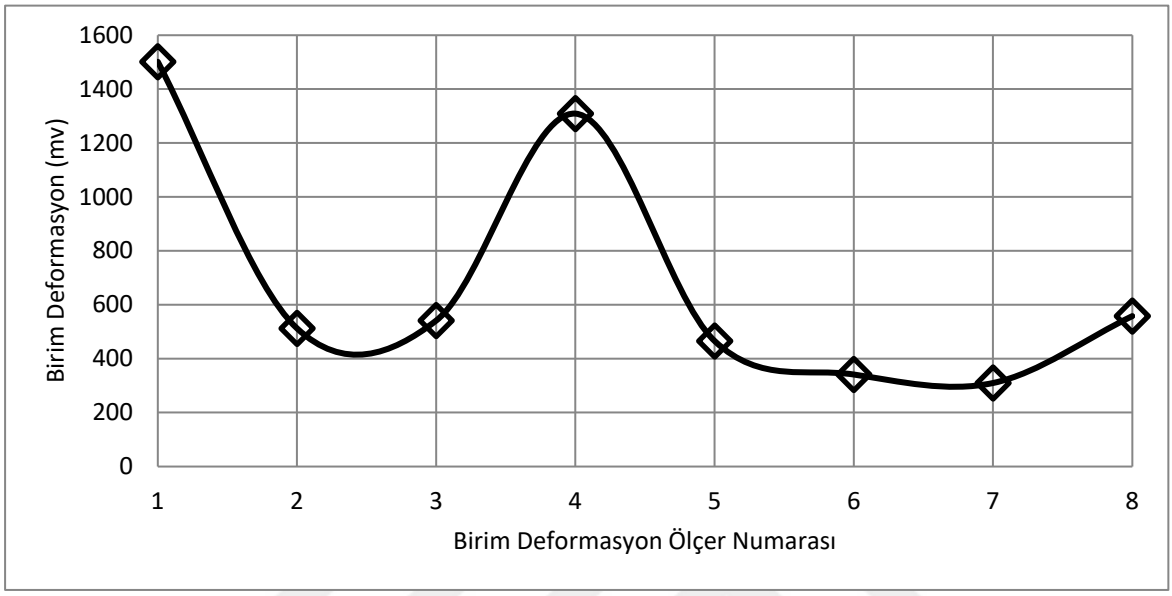
10C100W1N90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 30,17 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 9,40 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.45'de verilmiştir.



Şekil 4.45. Deney elemanı 10C100W1N90AF yük-deplasman grafiği

10C100W1N90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0012 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.46'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.46. Deney elemanı 10C100W1N90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,75 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W1N90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.46'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.46. Deney elemanı 10C100W1N90AF hasar modeli

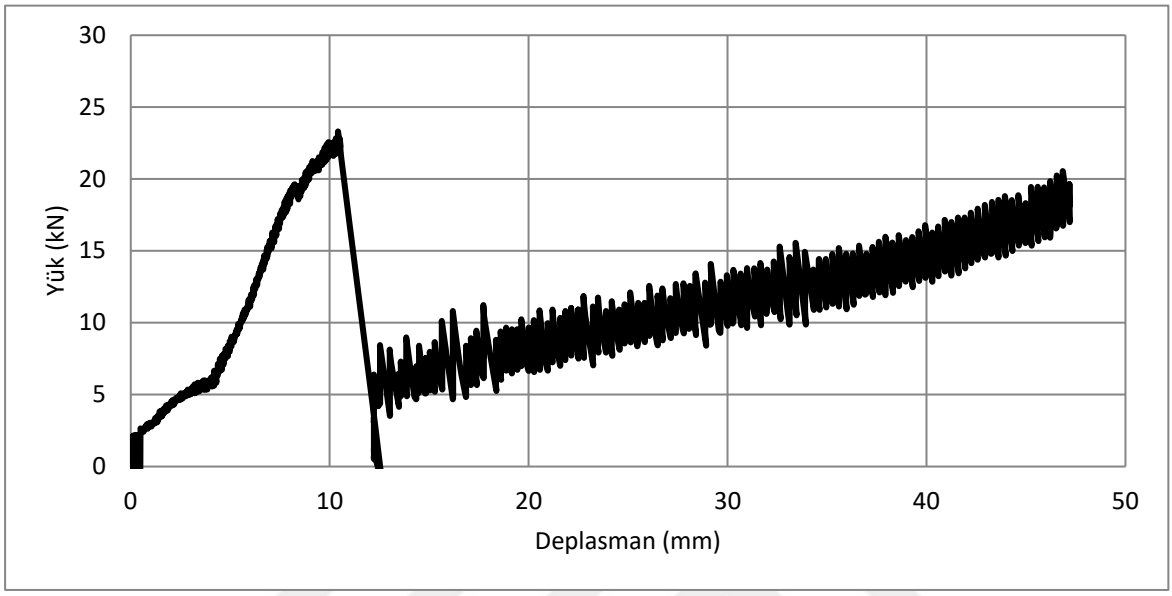
4.24. Deney Elemanı 10C100W1N0AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.47'de verilmiştir.



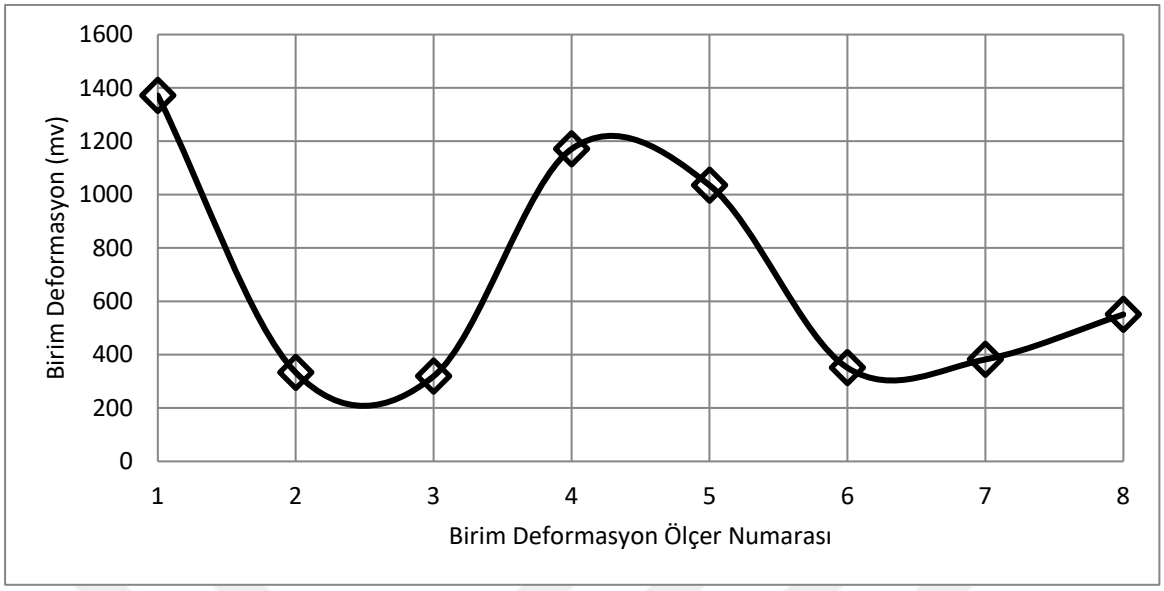
Resim 4.47. Deney elemanı 10C100W1N0AF

10C100W1N0AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 23,31 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 10,42 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.47. Deney elemanı 10C100W1N0AF yük-deplasman grafiği

10C100W1N0AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.48'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.48. Deney elemanı 10C100W1N0AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,58 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W1N0AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.48'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.48. Deney elemanı 10C100W1N0AF hasar modeli

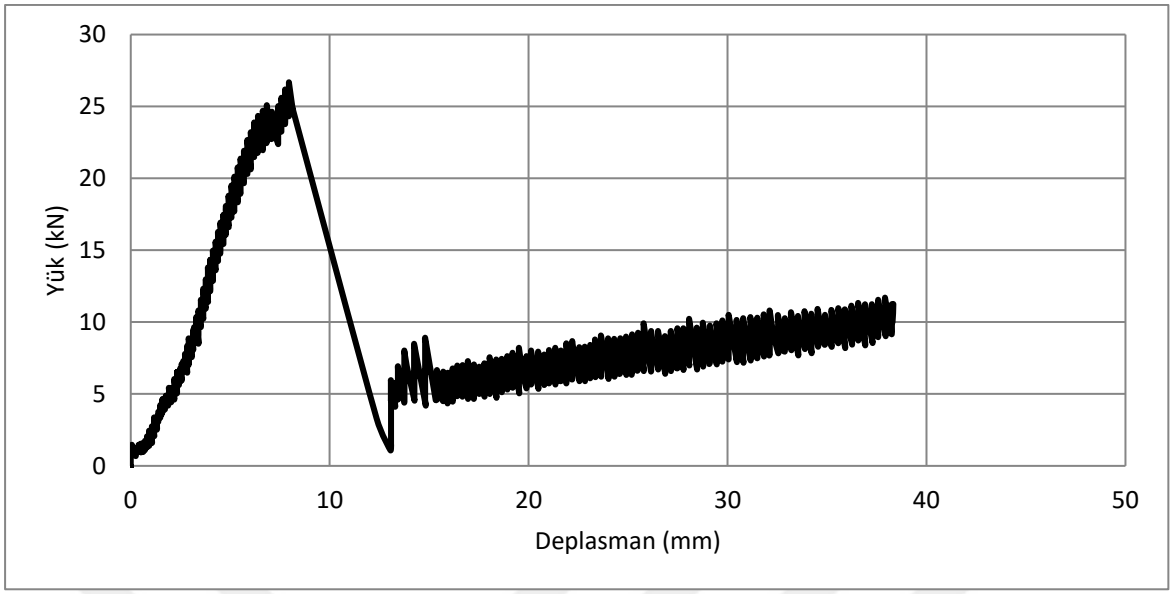
4.25. Deney Elemanı 10C100W1N45AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 derecelik açıyla tek Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.49'de verilmiştir.



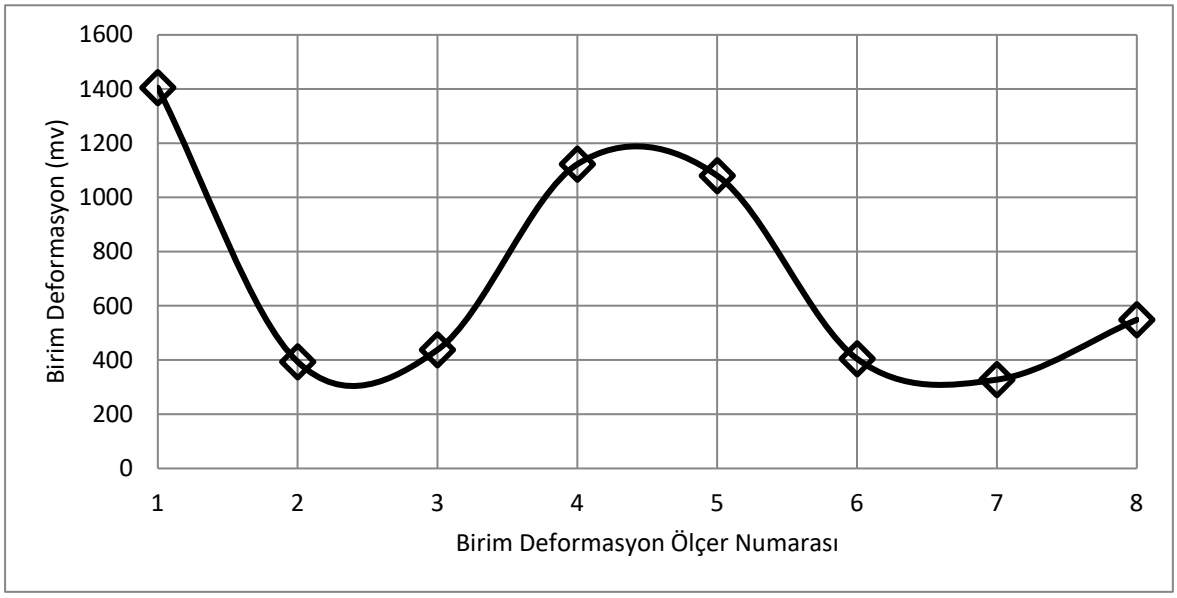
Resim 4.49. Deney elemanı 10C100W1N45AF

10C100W1N45AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 26,68 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 7,95 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.49'de verilmiştir.



Şekil 4.49. Deney elemanı 10C100W1N45AF yük-deplasman grafiği

10C100W1N45AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0011 mm/mm ve 0,0009 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.50'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.50. Deney elemanı 10C100W1N45AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 0,67 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W1N45AF göçme yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridinin betonun yüzeyinden sıyrılmasıyla sonuçlanmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.50'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.50. Deney elemanı 10C100W1N45AF hasar modeli

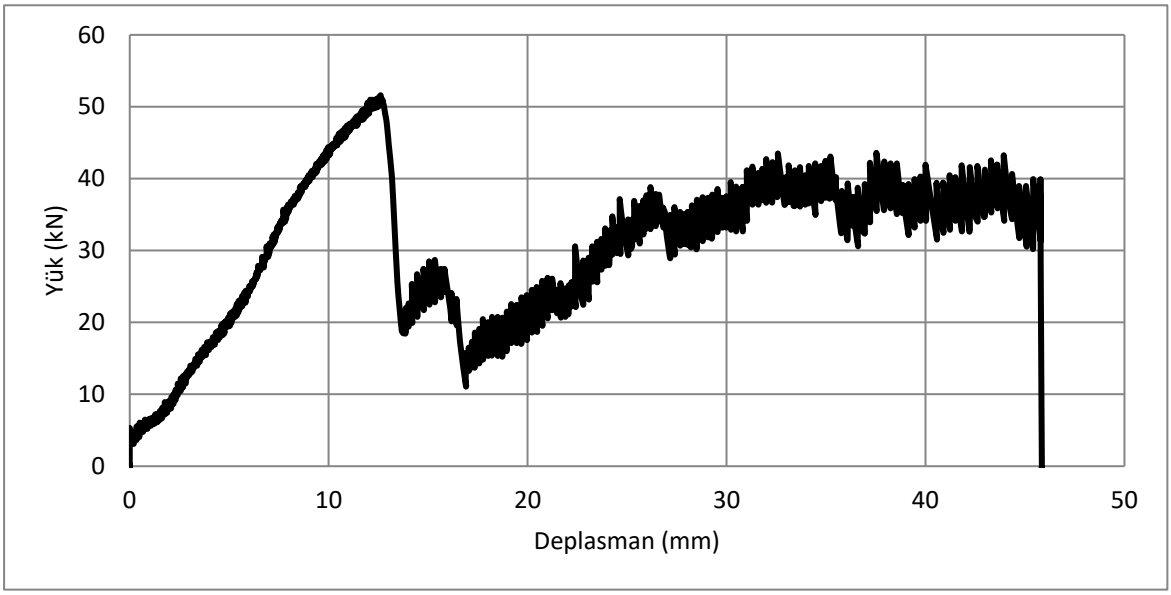
4.26. Deney Elemanı 10C100W2N45/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 45 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.51'de verilmiştir.



Resim 4.51. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF

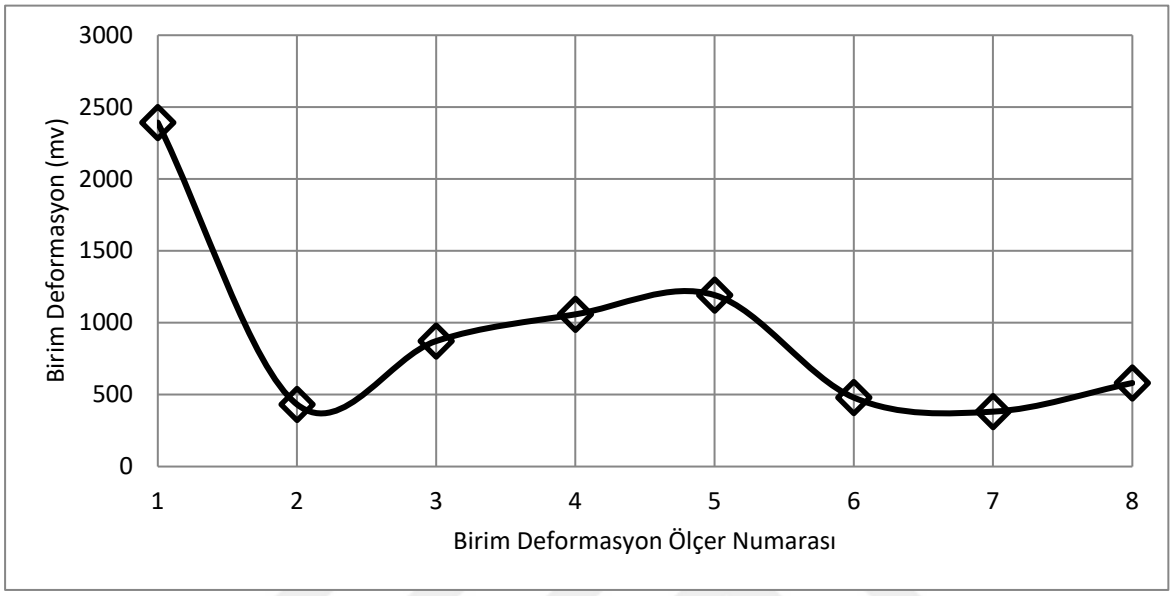
10C100W2N45/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 51,60 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 12,61 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.51'de verilmiştir.



Şekil 4.51. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF yük-deplasman grafiği

10C100W2N45/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0019 mm/mm ve 0,0008 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim

deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.52'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.52. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

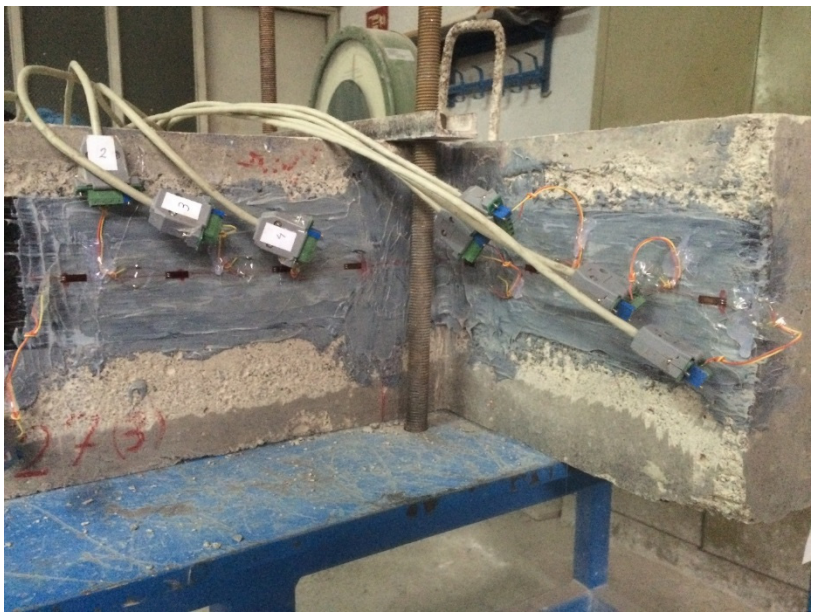
CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,29 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF göçme CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir, Ayrıca beton numunesinde çok büyük tahrip meydana gelmiştir. Resim 4.52'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.52. Deney elemanı 10C100W2N45/90AF hasar modeli

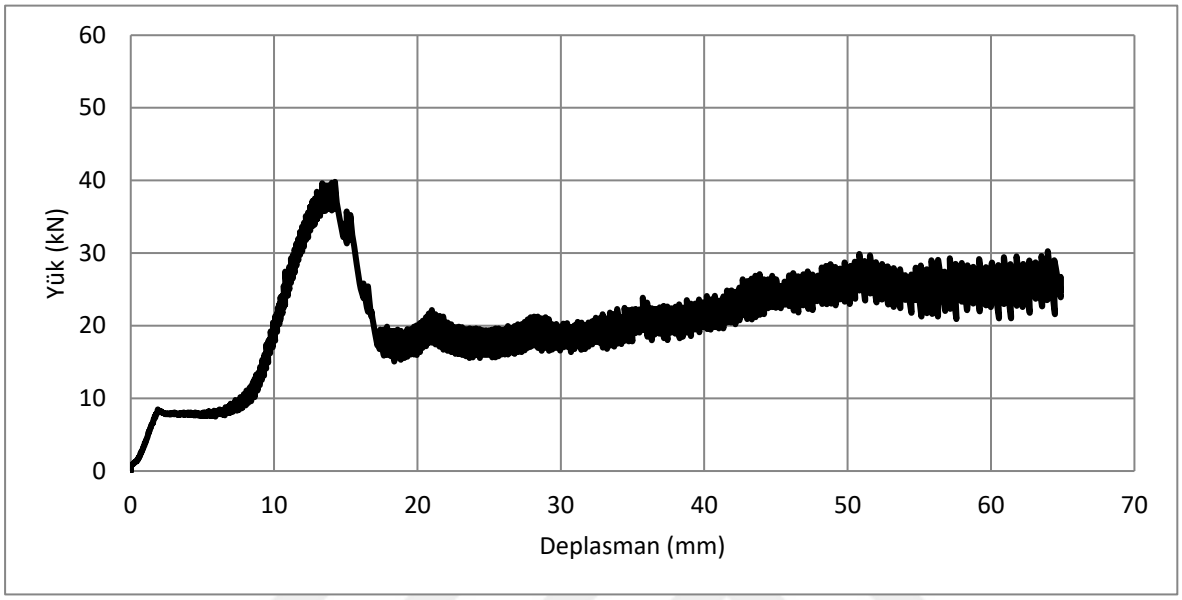
4.27. Deney Elemanı 10C100W2N0/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 0 ve 90 derecelik açıyla iki Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.53'de verilmiştir.



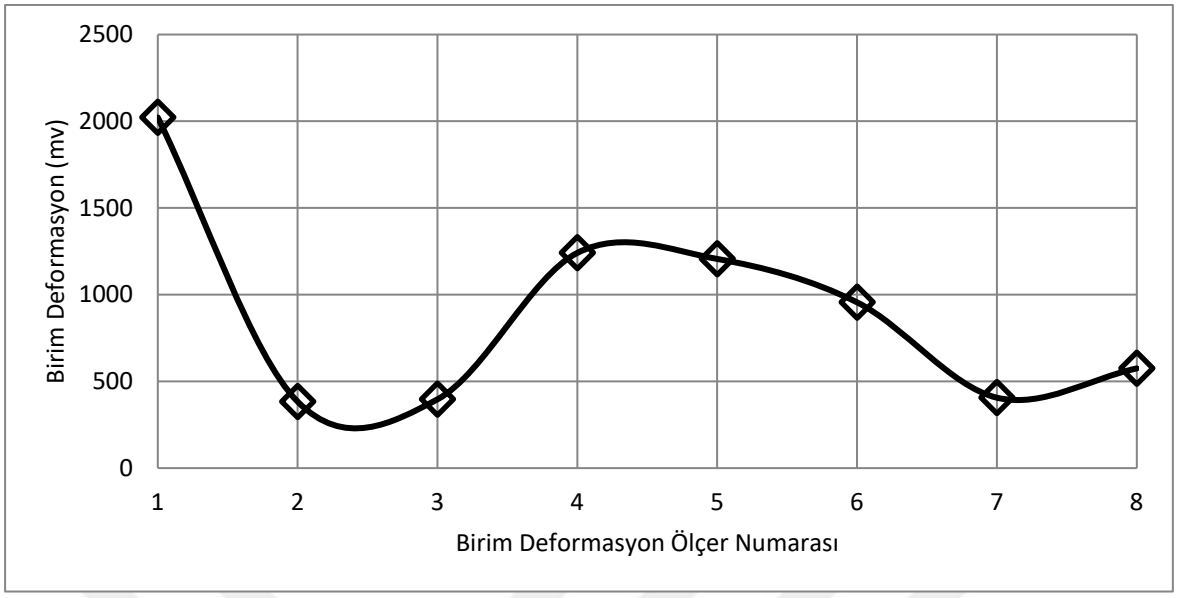
Resim 4.53. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF

10C100W2N0/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 39,81 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 14,25 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.53'de verilmiştir.



Şekil 4.53. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF yük-deplasman grafiği

10C100W2N0/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0016 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.54'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.54. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,00 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.54'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.54. Deney elemanı 10C100W2N0/90AF hasar modeli

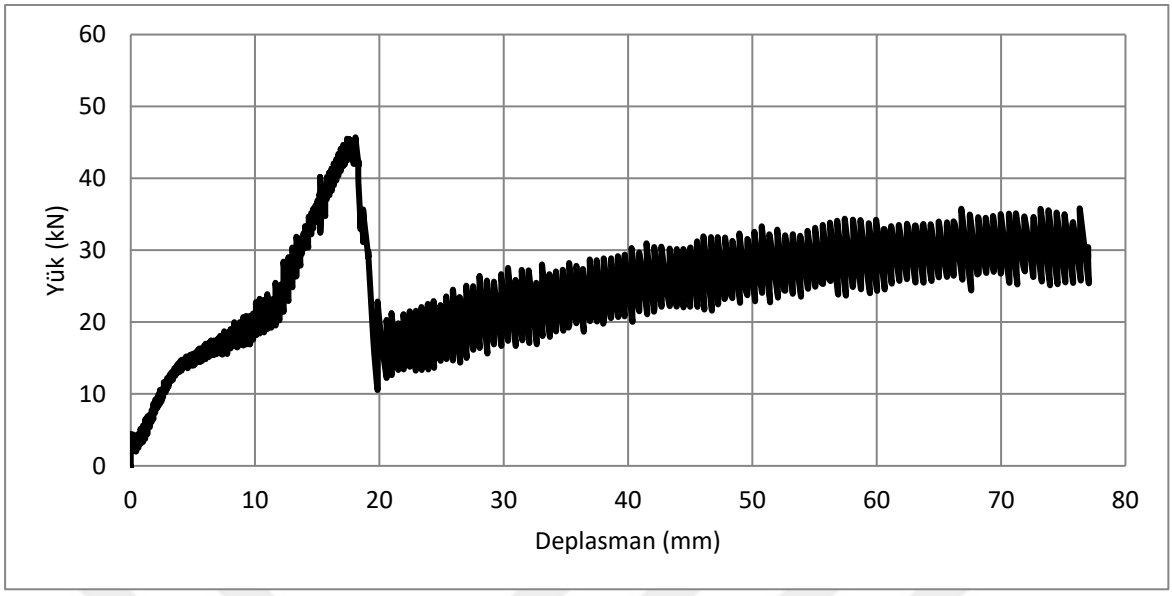
4.28. Deney Elemanı 10C100W2N90/90AF

CFRP ile beton yüzeyler arasında yapışma sonrasında oluşan gerilme dağılımının deneysel olarak araştırılabilmesi için üretilen 100 mm CFRP şerit genişliği ve 2000 mm boyu olan referans elemanın 700 mm etkin yapışma boyuna sahiptir. Bu deney elemanında yükleme yönüne 90 derecelik açıyla çift Fan ankraj uygulanmıştır. Hazırlanmış deney elemanının göçmeden önceki görünüşü Resim 4.55'de verilmiştir.



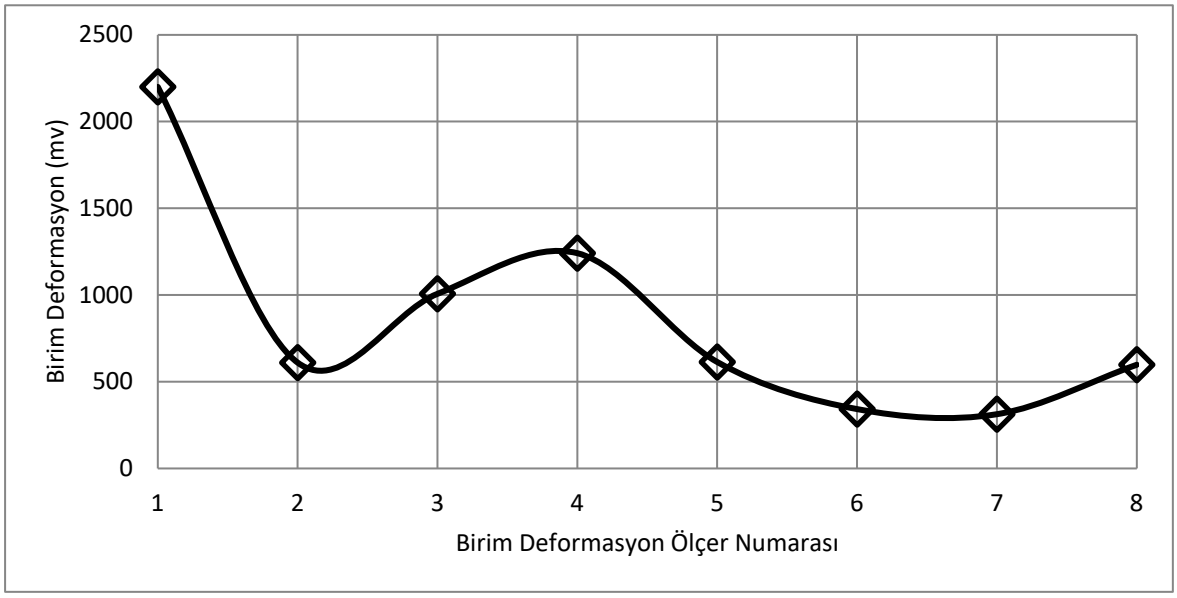
Resim 4.55. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF

10C100W2N90/90AF deney elemanında, CFRP şeridine uygulanan maksimum çekme kuvveti 45,71 kN ölçülmüştür. Maksimum yükteki deplasman ise 18,07 mm olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 4.55'de verilmiştir.



Şekil 4.55. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF yük-deplasman grafiği

10C100W2N90/90AF deney elemanında CFRP şeridindeki maksimum birim deformasyon değerleri 0,0018 mm/mm ve 0,0010 mm/mm ölçülmüştür. En yüksek birim deformasyon değeri yüklü kenara en yakın olan yapışma yüzeyinin başlangıcına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Diğeri ise köşeye yakın yerleştirilmiş üçüncü birim deformasyon ölçerden alınmıştır. Şekil 4.56'de deney elemanının Gerilme-deformasyon ölçer numarası olarak mv biriminden çizilmiştir.



Şekil 4.56. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF birim deformasyon- birim deformasyon ölçer numarası şekil değiştirme grafiği

CFRP şerit yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise maksimum çekme kuvvetinin etkin yapışma yüzeyine oranlanması neticesinde 1,14 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF CFRP şeridinin maksimum çekme dayanımına ulaşıp ve kopmasıyla sonuçlanmıştır. Yüklemeye yakın bölgede CFRP şeridi betonun yüzeyinden sıyrılmıştır. Sıyrılma deney elemanını köşesine kadar devam etmiştir. Resim 4.56'de deney elemanının göçme mekanizması verilmiştir.



Resim 4.56. Deney elemanı 10C100W2N90/90AF hasar modeli

5. DENEY SONUÇLARI

Deneysel çalışma kapsamında toplam 28 adet açılı CFRP şerit deney elemanı eksenel çekme yüklemesi etkisi altında test edilmiştir. Testler sonucunda deney elemanlarının eksenel çekme yüklemesi-deplasman grafikleri ve açılı CFRP şeritler boyunca meydana gelen birim deformasyon dağılımı grafikleri elde edilerek verilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında incelenen değişkenler CFRP şeritlerin yapıştırıldığı beton kütlenin basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit üzerine yerleştirilen ankrajların sayısı ile eksenel çekme kuvvetine göre açılarının değişimidir. Deneysel değişkenlerin açılı CFRP şeritlerin eksenel kuvvet taşıma gücü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde ankraj uygulamasının CFRP şeritlerin eksenel yük taşıma gücünü önemli ölçüde etkilediğini ve performansını artırdığını göstermiştir. 50 mm CFRP şerit genişliğine sahip, 25 MPa beton basınç dayanımlı deney elemanlarında tek ankraj eklenmesi CFRP şeritlerin eksenel taşıma gücünü ankrajsız referans deney elemanına göre ortalama 29% oranında artırmıştır. Aynı beton basınç dayanımında, 100 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarında tek ankraj olması durumunda ankrajsız referans deney elemanına göre eksenel yük taşıma gücü ortalama 23% oranında artmıştır. Ankraj sayısının birden ikiye çıkması eksenel yük taşıma gücü değerlerini çok daha büyük oranda etkilemiş ve artmasına neden olmuştur. 25 MPa beton basınç dayanımlı, iki adet ankrajlı CFRP şeritli, 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarının eksenel yük taşıma gücü değerleri ankrajsız CFRP şeritli referans deney elemanlarına göre sırasıyla ortalama 125% ve 104% oranlarında artış göstermiştir. Beton basınç dayanımının azalarak 25 MPa'dan 10 MPa değerine indirilmesi, deney elemanlarında ankraj uygulamasının CFRP şeritlerin eksenel çekme kapasitesi üzerinde çok daha fazla olumlu etki meydana getirerek performanslarının daha fazla artmasına neden olmuştur. 10 MPa beton basınç dayanımlı, 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişliğine sahip tek ankrajlı CFRP şeritli deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankrajsız CFRP şeritli referans deney elemanlarına göre sırasıyla ortalama 75% ve 73% oranlarında artış göstermiştir. Aynı beton basınç dayanımı değerinde, 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişliğine sahip, 2 ankraj uygulanan CFRP şeritli deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri ise, ankrajsız CFRP şeritli referans test elemanlarından sırasıyla ortalama 205% ve 196% oranlarında daha fazla elde edilmiştir. Eksenel yük taşıma gücü değerlerinin yükleme doğrultusuna paralel olan CFRP şerit yapışma alanlarına oranlanması ile hesaplanan maksimum kesme gerilmesi değerleri incelendiğinde eksenel yük taşıma gücü ile benzer bir davranış trendi görülmektedir. CFRP şeritlere ankraj

eklenmesi maksimum kesme gerilmesi değerlerini de eksenel çekme kuvveti taşıma gücü değerlerinde olduğu gibi önemli oranlarda artırmış ve artış oranları 10 MPa düşük dayanımlı betonlu deney elemanları ile iki adet ankraj uygulanan deney elemanlarında çok daha büyük meydana gelmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen bir diğer değişken CFRP fan tipi ankrajlar ile CFRP şeritlere uygulanan eksenel çekme kuvvetleri arasındaki açısal değişimdir. Çalışma kapsamında CFRP şerit yükleme ekseni ile 90º, 0º ve 45º olmak üzere üç farklı tip açıya sahip ankrajın etkileri incelenmiştir. CFRP şeritlere 1 ankraj yerleştirildiği durumlarda, 25 MPa beton basınç dayanımına sahip, ankrajların CFRP şerit eksenine göre açıları 90º, 0º ve 45º olan deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankraj uygulanmayan referans deney elemanına göre sırasıyla 41%, 14% ve 23% oranlarında artış göstermiştir. Bir ankrajlı ve 10 MPa beton basınç dayanımına sahip, ankraj açıları 90º, 0º ve 45º olan deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçlerinde ise, ankraj uygulanmayan referans deney elemanına göre sırasıyla 96%, 52% ve 74% oranlarında artış meydana gelmiştir. Tek ankrajlı deney elemanlarının eksenel yük taşıma gücü üzerindeki etkileri incelendiğinde, ankrajların CFRP şerit yükleme ekseni ile 90º açı yaptığı deney elemanlarının en büyük taşıma gücü değeri artışını meydana getirdiği, 45º açılı deney elemanlarının ikinci sırada yer aldığı ve en düşük eksenel yük taşıma gücü artışını ise 0º açılı deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir. CFRP şeritlere yerleştirilen ankraj sayısının ikiye çıkarıldığı deney elemanlarında şerit üzerine konumlandırılan ankrajların eksenel yük eksenine göre açıları sırasıyla birinci ankraj 45º, ikinci ankraj 90º, birinci ankraj 0º, ikinci ankraj 90º ve her iki ankrajda 90º açılı olacak şekilde 3 farklı kombinasyonda yerleştirilmiştir. 25 MPa beton basınç dayamına sahip, 2 adet ankrajlı, birinci ankraj 45º, ikinci ankraj 90º açılı CFRP şeritli deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankrajsız referans deney elemanına göre ortalama 141% oranında daha büyük elde edilmiştir. Aynı beton basınç dayanımında, birinci ankraj 0º, ikinci ankraj 90º açılı olan deney elamanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankrajsız referans test elemanına göre ortalama 86%, her iki ankrajında 90º açılı olan deney elemanlarında ise ortalama 117% oranlarında daha büyüktür. Beton basınç dayanımı 10 MPa değerinde, birinci ankraj 45º, ikinci ankraj 90º, birinci ankraj 0º, ikinci ankraj 90º ve her iki ankrajda 90º açı ile yerleştirilen deney elemanlarının eksenel taşıma gücü değerleri, ankrajsız referans deney elemanından sırasıyla ortalama 238%, 162% ve 202% oranlarında daha büyük değerler sergilemiştir. 2 ankrajlı ve 3 farklı ankraj açı kombinasyonlarına sahip deney elemanları içerisinde eksenel yük taşıma gücünü en büyük oranda birinci ankraj 45º, ikinci ankraj 90º açı ile yerleştirilen deney elemanları sergilemiştir. İkinci sırada her iki ankrajda 90º açı ile

yerleştirilen deney elemanları yer almış, en düşük taşıma gücü artışını ise birinci ankraj 0^0, ikinci ankraj 90^o açı ile yerleştirilen deney elemanları sergilemiştir.

Deneysel çalışmada incelenen bir diğer değişken ise CFRP şerit genişliğidir. Çalışma kapsamında 50 mm ve 100 mm genişliğinde iki farklı CFRP şerit incelenmiştir. CFRP şerit genişliğinin artması genel olarak CFRP şerit eksenel yük taşıma gücünü önemli oranda artırmıştır. Eksenel taşıma gücü değerindeki artış 25 MPa ve 10 MPa beton basınç dayanımına sahip deney elemanlarında birbirlerine oldukça yakın oranlarda meydana gelmiş olup, 100 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarının eksenel yük taşıma gücü değerleri 50 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarından sırasıyla ortalama 73% ve 82% daha büyük elde edilmiştir. Aynı şekilde tek ve iki ankrajlı deney elemanlarında da CFRP şerit genişliğindeki artış eksenel yük kapasitesinin birbirlerine yakın oranlarda artmasına neden olmuştur.

Deneysel çalışmada incelenen bir diğer değişken ise CFRP şeritlerin yapıştırıldığı beton kütlenin basınç dayanımıdır. Çalışmada 25 MPa ve 10 MPa beton basınç dayanımları incelenmiştir. Beton basınç dayanımının artması genel olarak CFRP şeritlerin eksenel yük taşıma gücünü olumlu etkilemiş ve artırmıştır. Ankrajsız CFRP şeritli referans deney elemanlarında beton basınç dayanımının artması eksenel yük taşıma kapasitesini ortalama 92% oranında artırmıştır. Bu artış oranı 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişlikleri için birbirlerine çok yakın bir değerde olmuştur. Ankrajlı CFRP şeritli deney elemanlarında beton basınç dayanımının artması eksenel yük taşıma gücü değerlerinin ortalama 38% oranında artmasına neden olmuştur. Ankrajlı CFRP şeritli deney elemanlarında değişim gösteren ankraj sayısı ve CFRP şerit genişliği eksenel taşıma gücü artış oranı üzerinde sınırlı bir miktarda etkili olmuş, artış oranları 31% ile 47% arasında değişim göstermiştir.

Deneysel çalışma kapsamında CFRP şeritler boyunca belirli aralıklar ile birim deformasyon dağılımları ölçülerek, şerit boyunca birim deformasyon dağılımlarının ankraj sayısı, açısı ve "L" şeklinde yapıştırılan CFRP şerit üzerinde meydana gelen köşe noktasında nasıl değişim gösterdikleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 28 adet deney elemanından CFRP şerit boyunca, maksimum eksenel yük düzeyinde ölçülen birim deformasyon değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Ayrıca deney elemanlarında eksenel çekme kuvvetinin uygulandığı CFRP şerit serbest ucunda, L şeklindeki CFRP şeridin köşe bölgesinde ve CFRP

şeritte yer alan ankrajlardan ölçülen birim deformasyon değerlerinin ulaştıkları maksimum değerler de Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Nihai yük seviyesinde gerilim dağılımı sonuçları

Deney Elemanı No	Birim Deformasyon Değerleri (mv)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1399	475	862	1004	258	355	528	630
2	1779	531	606	1206	551	365	215	526
3	1423	405	476	810	819	531	344	675
4	1473	633	568	1146	890	360	300	558
5	2823	533	476	1805	1638	540	499	610
6	2155	634	676	1256	1042	923	402	548
7	2494	621	1274	1458	820	582	332	546
8	1558	634	616	1052	382	472	370	511
9	1781	606	551	1206	459	588	524	543
10	1541	495	616	1265	804	542	429	557
11	1680	740	478	1094	1179	438	475	675
12	3043	770	611	1340	1161	501	475	622
13	2208	587	573	1278	961	758	475	571
14	2655	526	1127	1111	858	554	475	570
15	1027	652	573	886	612	252	98	441
16	1411	460	690	1124	865	458	402	499
17	1343	397	382	1018	1041	310	335	526
18	1378	791	685	1156	1027	506	330	506
19	2417	606	845	1766	1352	595	476	572
20	2049	501	433	1279	1016	961	350	536
21	2207	677	925	1247	868	536	384	570
22	1028	474	480	959	447	424	335	566
23	1501	512	541	1309	465	341	310	558
24	1372	333	320	1171	1035	351	382	551
25	1405	393	437	1123	1080	405	328	549
26	2392	432	873	1058	1192	480	382	581
27	2022	383	396	1241	1206	956	406	575
28	2200	610	1007	1241	614	342	313	597

Çizelge 5.2. Nihai yük seviyesi için önemli noktalarda gerilim değerleri

Deney Elemanı No	Maksimum Birim Deformasyon Değeri (mv)	Köşede Birim Deformasyon Değeri (mv)	Ankrajda Maksimum Birim Deformasyon Değeri (mv)
1	1399	1004	-----
2	1779	1206	606
3	1423	810	819
4	1473	1146	890
5	2823	1805	1638
6	2155	1256	1042
7	2494	1458	1274
8	1558	1052	-----
9	1781	1206	606
10	1541	1265	804
11	1680	1094	1179
12	3043	1340	1161
13	2208	1278	961
14	2655	1111	1127
15	1027	886	-----
16	1411	1124	690
17	1343	1018	1041
18	1378	1156	1027
19	2417	1766	1352
20	2049	1279	1016
21	2207	1247	925
22	1028	959	-----
23	1501	1309	541
24	1372	1171	1035
25	1405	1123	1080
26	2392	1058	1192
27	2022	1241	1206
28	2200	1241	1007

Deney elemanlarından ölçülen birim deformasyon dağılımları ve çizelgelardeki değerler incelendiğinde CFRP şeritler üzerinde maksimum birim şekil değiştirme değerinin CFRP şeritin eksenel yüklemenin uygulandığı serbest ucuna yakın bir bölgede meydana geldiği görülmektedir. Daha sonra CFRP şerit üzerinde azalarak devam eden birim deformasyon dağılımı ankrajların olduğu ve “L” şeklindeki CFRP şeritin köşe yaptığı, gerilme birikmelerinin meydana geldiği bölgelerde tekrar artış göstermiştir. Şerit üzerinde köşe ve

ankrajların meydana geldiği bölgelerde birim deformasyon değerlerinde artış meydana gelmesine rağmen, birim deformasyon değerleri CFRP şerit serbest uç bölgesinde ulaşılan maksimum birim deformasyon değerinden daha düşük düzeyde kalmıştır. Ancak CFRP şerit üzerinde ankrajların kullanılması ve şerit üzerinde köşe dönüşlerinin olması CFRP şeritlerde meydana gelen birim deformasyon dağılımını önemli oranda etkilemiş ve artmasını sağlayarak şeritler üzerinde daha uzun bir bölgede gerilme aktarımının olmasına, şeritin daha etkin bir şekilde yük taşıyarak, eksenel yük taşıma güçlerinin artmasına neden olduğu görülmüştür.

Eksenel çekme yüklemesi etkisi altında test edilen deney elemanları için maksimum taşıma gücü düzeyinde rijitlik ve enerji tüketim kapasiteleri de hesaplanarak Çizelge 5.3'te verilmiştir. Deney elemanları için maksimum yük düzeyinde hesaplanan rijitlik değerleri yük-deplasman grafiklerinde maksimum taşıma gücünün meydana geldiği noktayı grafik başlangıç noktasına bağlayan doğrunun eğimi hesaplanarak elde edilmiştir. Enerji tüketim kapasiteleri ise deney elemanlarının yük-deplasman grafiklerinin tümünün altında kalan alan hesaplanarak belirlenmiştir. Deney elemanlarının maksimum taşıma gücü rijitlikleri ve enerji tüketim kapasiteleri incelendiğinde 100 mm genişliğinde, 25 MPa beton basınç dayanımlı, tek ankrajlı deney elemanları haricinde diğer tüm deney elemanlarında ankraj uygulaması deney elemanlarının rijitlik ve enerji tüketim kapasitlerinin artmasına neden olmuştur. Bir veya iki ankrajlı deney elemanlarının rijitlik ve enerji tüketim kapasitesi değerleri ankrajsız referans deney elemanlarına göre önemli oranlarda artış göstermiştir. Özellikke artış miktarı 10 MPa beton basınç dayanımına sahip deney elemanlarında çok daha büyük oranlarda meydana gelmiş ve ankraj uygulaması deney elemanlarının rijitlik ve enerji tüketim kapasitesi değerlerini çok daha olumlu olarak etkilemiştir. Bu artış hem bir hem de iki ankrajlı ve 3 farklı açı değerine sahip ankrajlı deney elemanlarının hepsinde görülmüştür.

Numune No	f_C (MPa) Betonun Basınç Dayanımı	CFRP Şeridin Genişliği	Ankrajların Sayısı	Ankrajların Açısı	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yük (MPa)	Maksimum Yükteki Deplasman (mm)	Kalıcı Gerilme (MPa)	Kalıcı Gerilmedeki Deplasman (mm)	Maksimum Deplasmandaki Kesme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Deplasman (mm)	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN-mm)	Rigitlik (kN/mm)
1	25	50	Referans		16.02	0.80	7.63	0.25	10.39	0.57	45.58	396.25	2.10
2			1	90	22.95	1.15	9.22	0.34	11.46	0.72	44.27	510.76	2.49
3			1	0	18.76	0.94	7.23	0.38	10.90	0.71	46.44	512.08	2.59
4			1	45	20.27	1.01	14.23	0.32	15.90	0.70	50.47	605.91	1.42
5			2	45/90	40.50	2.03	7.68	0.50	11.53	1.27	51.17	1077.29	5.27
6			2	0/90	31.32	1.57	12.48	0.44	13.67	0.88	60.91	1105.59	2.51
7			2	90/90	36.35	1.82	9.13	0.59	13.90	0.92	45.00	890.69	3.98
8		100	Referans		29.54	0.74	7.77	0.22	13.91	0.34	67.99	1059.40	3.80
9			1	90	40.99	1.02	10.07	0.37	14.48	0.44	37.04	739.83	4.07
10			1	0	33.00	0.82	14.50	0.34	16.31	0.40	52.72	999.99	2.28
11			1	45	35.03	0.88	17.21	0.31	22.04	0.47	64.47	1274.40	2.04
12			2	45/90	67.80	1.70	7.41	0.50	11.79	0.70	38.88	1241.95	9.15
13			2	0/90	52.11	1.30	10.32	0.54	13.60	0.62	50.95	1430.39	5.05
14			2	90/90	61.03	1.53	16.81	0.51	18.43	0.71	52.32	1315.82	3.63
15	10	50	Referans		8.34	0.42	6.04	0.18	7.14	0.51	29.58	156.08	1.38
16			1	90	16.38	0.82	8.88	0.26	14.13	0.47	74.96	631.44	1.84
17			1	0	12.76	0.64	5.75	0.23	8.08	0.34	65.51	504.24	2.22
18			1	45	14.55	0.73	5.51	0.31	9.19	0.34	90.47	911.32	2.64
19			2	45/90	28.48	1.42	10.54	0.63	15.77	0.72	93.97	1464.84	2.70
20			2	0/90	22.13	1.11	18.11	0.50	9.99	0.61	103.58	1619.29	1.22
21			2	90/90	25.64	1.28	8.80	0.35	10.53	0.76	47.99	768.27	2.91
22		100	Referans		15.43	0.39	19.48	0.09	21.04	0.17	21.83	185.80	0.79
23			1	90	30.17	0.75	9.40	0.13	14.76	0.28	37.66	403.97	3.21
24			1	0	23.31	0.58	10.42	0.11	12.22	0.43	47.19	550.82	2.24
25			1	45	26.68	0.67	7.95	0.13	13.07	0.28	38.33	390.26	3.36
26			2	45/90	51.60	1.29	12.61	0.46	13.75	1.00	45.85	1422.25	4.09
27			2	0/90	39.81	1.00	14.25	0.42	17.35	0.60	64.85	1361.99	2.79
28			2	90/90	45.71	1.14	18.07	0.45	19.86	0.76	77.02	1908.91	2.53

6. ANALİTİK ÇALIŞMA

Deneysel çalışma sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin hesaplanması ve yapışma yüzeyi kayma gerilmesi-deplasman modellerinin oluşturulması için öneriler yapılmıştır.

Lu ve arkadaşları, 2005 yılında yürüttükleri çalışmalarında beton yüzey ile ankrajsız CFRP şeritler arasındaki kayma gerilmesi - kayma deplasmanı arayüzey malzeme modeli hakkında bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen ankrajsız CFRP şeritler ile beton yüzey arasında kullanılabilecek malzeme modeli daha sonra yaygın bir şekilde kabul görmüş ve 2014 yılından sonra ANSYS ve ABAQUS sonlu elemanlar yazılımınlarının içeriğine dahil edilerek kullanılmaya devam etmiştir. Ankrajsız CFRP şeritler için Lu ve arkadaşları tarafından geliştirilen arayüzey malzeme modeli Şekil 6.1'de verilmiştir. Bu model bi-lineer (çift doğrulu) bir malzeme modeli olup, CFRP şerite etki eden eksenel kuvvet etkisiyle CFRP şerit belirli bir düzeye kadar kayma gerilmesi taşımaya devam etmekte ve CFRP şerit ile beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi değeri belirli bir değere ulaştıktan sonra CFRP şerit yüzeyden soyularak (debonding) aniden bir kapasite düşmesi meydana gelerek kayma geirlmesi değeri sıfıra kadar düşmektedir. Lu ve arkadaşlarının yaptıkları deneysel çalışma sonucunda elde ettikleri kayma gerilmesi- kayma deplasmanı malzeme modeli için geliştirdikleri eşitlikler, denklem 6.1 ile denklem 6.6 arasında verilmiştir.

$$\tau_{max} = 1.5\beta_w f_t \tag{6.1}$$

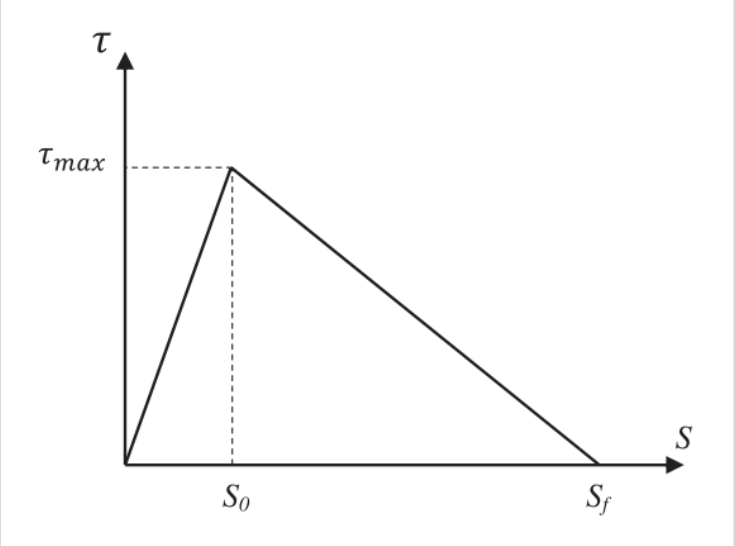
$$G_f = 0.308\beta_w^2\sqrt{f_t} \tag{6.2}$$

$$s_0 = 0.0195\beta_w f_t \tag{6.3}$$

$$s_f = 2\,G_f/\tau_{max} \tag{6.4}$$

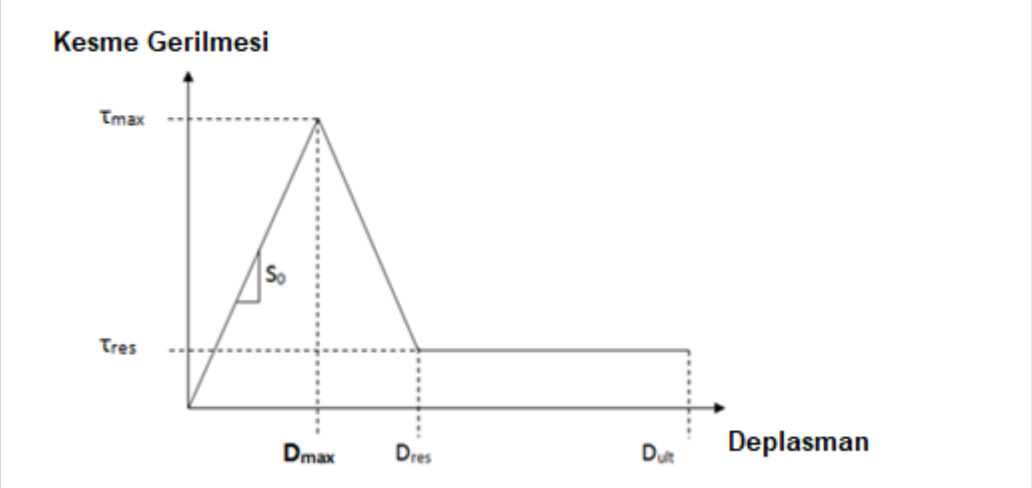
$$\beta_w = \sqrt{\frac{(2.25-b_f/b_c)}{(1.25+b_f/b_c)}} \tag{6.5}$$

$$f_t = 0.33\sqrt{f_c'} \tag{6.6}$$



Şekil 6.1. Lu ve arkadaşları tarafından 2005 yılında geliştirilen kayma gerilmesi- kayma deplasmanı modeli

Mertoğlu ve arkadaşları 2016 yılında yürüttükleri çalışma kapsamında ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi - kayma deplasmanı arayüzey malzeme modeli hakkında bir öneri geliştirmiştir. Bu çalışmada kullanılan ankrajlar CFRP şeritler üzerine yükleme doğrultusuna göre 90^{o}açı ile yerleştirilmiştir. Sözkonusu çalışma ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzeyler arasındaki malzeme modelleri hakkında öncü niteliğindeki ilk çalışmalardan biridir. Gerçekleştirilen çalışmada toplamda 14 adet deney gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar kullanılarak ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi – kayma deplasmanı malzeme modeli ile ilgili bir model oluşturulmuştur. Bu model elde edilirken temel olarak Lu ve ark., 2005 tarafından geliştirilen malzeme modeli temel alınarak ankrajsız şeritler için kullanılan model üzerinde şeritlerde ankraj yer alması durumunda yapılması gerekli modifikasyonlar ile ilgili katsayılar elde edilmiştir. Ancak bu model kapsamında CFRP şeritler üzerinde yer alan ankrajların şeritlere etki eden çekme kuvvetine göre 90^o açı ile dik yerleştirilen ankrajlar için geliştirilmiş olduğu unutulmamalıdır. Mertoğlu ve ark., 2016 tarafından yükleme yönüne göre dik olarak yerleştirilen ankrajlı CFRP şeritler için geliştirilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modeli Şekil 6.2'de verilmiştir. Oluşturulan model Lu ve arkadaşlarının ankrajsız CFRP şeritler için önerilen modeli temel alınarak oluşturulmuş ve maksimum kayma gerilemsi değeri ile maksimum kayma depalsmanı değerleri için sırasıyla eşitlik 7 ve eşitlik 8'de geliştirilen denklemler önerilmiştir. Eşitlik 6.7 ve 6.8'de yer alan "N" değişkeni CFRP şerit üzerinde yer alan ankraj sayısını ifade etmektedir.



Şekil 6.2. Mertoğlu ve arkadaşları tarafından 2016 yılında geliştirilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı modeli

Denklem 6.1 kullanarak: $\tau_{max_ankraj} = \tau_{max}\ e^{0,17N}$

(τ_{max}): ankrajsız eleman için önerilen herhangi bir modelden hesaplanır

(S_0): ankrajsız eleman için önerilen herhangi bir modelden hesaplanır

(τ_{res}): τ_{max_ankraj} 0,2 ölçeklemesi ile elde edilir

D_{res}: D_{max} 1,2 ölçeklemesi ile elde edilir

$D_{max} = \tau_{max_ankraj} / S_0$

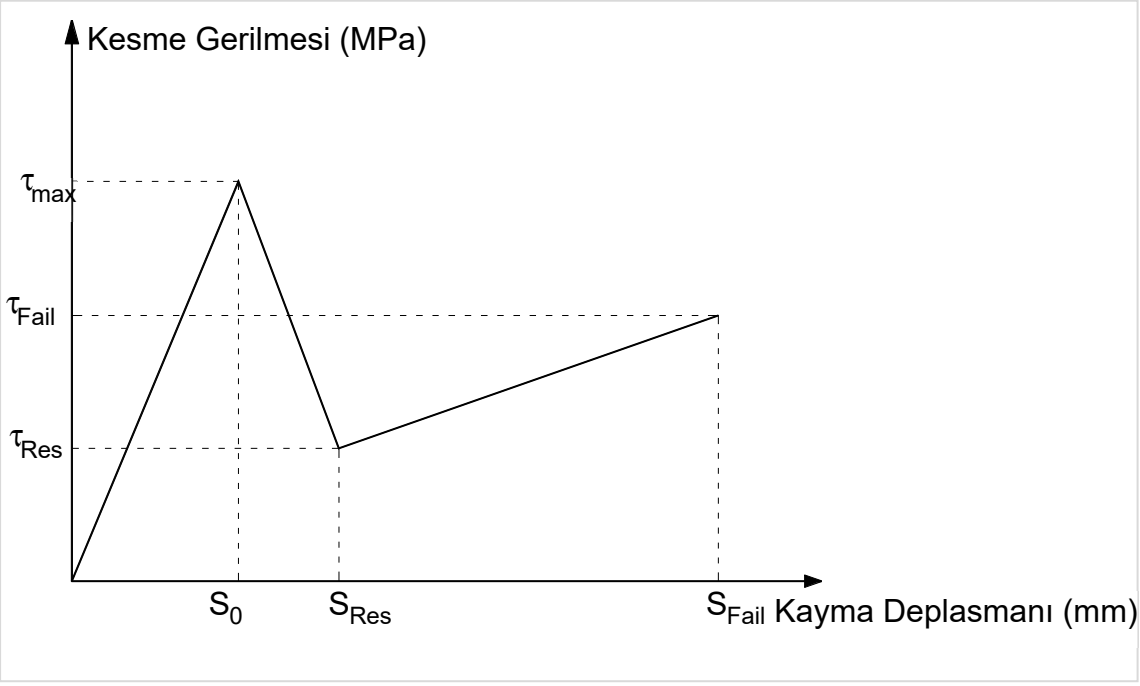
Denklem 6.2 kullanarak: $D_{ult} = D_{max}\,(0,51N + 1,68)$

$$\tau_{max\ _ankraj} = \tau_{max}\ e^{0.17N} \tag{6.7}$$

$$D_{ult} = D_{max}\,(0.51N + 1.68) \tag{6.8}$$

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ve önerilen açılı ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzeyler arasındaki yeni bir kayma gerilmesi-kayma deplasmanı matematiksel malzeme modelinin oluşturulması için de ankrajsız CFRP şeritler ile ilgili olarak en fazla tercih edilen modellerden biri olan ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımına eklenmiş koheziv ara yüzey malzeme modeli olarak da kullanılan Lu v.d., 2005'in modeli üzerinden bir başlangıç yapılmıştır. Bu modelin açılı ankrajlı CFRP şeritler için kullanılabilmesi için nasıl modifikasyonların yapılması gerektiği üzerinde yoğunlaşılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen eksenel çekme kuvveti-kayma deplasmanı grafikleri incelendiğinde açılı ankrajlı CFRP şeritlerin genel yük-deplasman davranışının ankrajsız olan şeritlerden özellikle

maksimum taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra önemli farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Açılı ankrajlı CFRP şeritlerin genel yük-deplasman davranışlarında maksimum taşıma gücüne ulaşılıp bağlantı göçmeye ulaştığında ankrajsız şeritlerden farklı olarak kalıcı bir taşıma gücü değeri kalmakta ve kalıcı kapasite belirli bir deplasman değerine kadar korunmaktadır. Ek olarak kalıcı kapasite değerinin maksimum taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra kalmasının yanısıra ankraj açısına ve sayısına bağlı olarak, artan kayma deplasmanı değeri ile kalıcı dayanım değerinde artış trendi görülmekte ve maksimum taşıma gücünden sonraki grafiğin kuyruk bölümünde açılı bir kapasite artışı meydana gelmektedir. Ankrajsız CFRP şeritlerin yük-deplasman davranışlarında ise maksimum taşıma gücü değerine ulaşılıp bağlantı göçtükten sonra kapasite sıfıra inerek herhangi bir kalıcı dayanım değeri oluşmamakta, yük-deplasman grafiğinin çift doğrudan oluşacak şekilde modellenmesi mümkün olmaktadır. Buna karşılık açılı ankrajlı CFRP şeritlerin kayma gerilmesi-kayma deplasmanı grafiklerinin genel davranışı kalıcı dayanım bölümünü de modelleyecek şekilde 3 doğrudan oluşacak şekilde modellenmesinin gerektiği görülmüştür. Bu genel davranış farklılığına ek olarak açılı ankrajlı CFRP şeritlerin maksimum gerilme taşıma gücü değerleri ve tüketilen kırılma enerjisi değerleri de ankrajsız CFRP şeritlere göre çok daha büyüktür. Deneysel veriler kullanılarak açılı ankrajlı CFRP şeritler için oluşturulan kesme gerilmesi-kayma deplasmanı matematiksel malzeme modeli önerisi Şekil 6.3'de sunulmuştur.



Şekil 6.3. Tez Çalışmasında Önerilen Kesme Gerilmesi-Kayma Deplasmanı Malzeme Modeli

Açılı ankrajlı CFRP şeritler için önerilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı ara yüzey malzeme modelinin tanımlanması için gerekli değerler eşitlik 6.9-6.14'de verilmiş olup, bu değerler şekilde sunulan genel kantitatif model iskelet grafiği üzerinde gösterilmiştir. Sadece maksimum kesme gerilmesine ulaşıldığında ölçülen S_0 kayma deplasmanı değeri için bir eşitlik önerilmemiş olup, bu değerin hesaplanması için ankrajsız CFRP şeritler için geliştirilen Lu v.d., 2005 tarafından önerilen eşitliğin kullanılabileceği görülmüştür.

$$\tau_{max} = f_1 \tau_{max,0} \tag{6.9}$$

$$f_1 = \left[\sum_{\emptyset=0}^{\emptyset=90}(0.0024\emptyset + 4.564)\right] (f_c')^{-0.32}\ (b_f)^{-0.095} \tag{6.10}$$

$$\tau_{Res} = \frac{1}{n}\left[\sum_{\emptyset=0}^{90}(0.375 - 0.00068\emptyset)\right]\tau_{max} \tag{6.11}$$

$$\tau_{Fail} = \frac{1}{n}\left[\sum_{\emptyset=0}^{90}(0.6087 - 0.00084\emptyset)\right]\tau_{max} \tag{6.12}$$

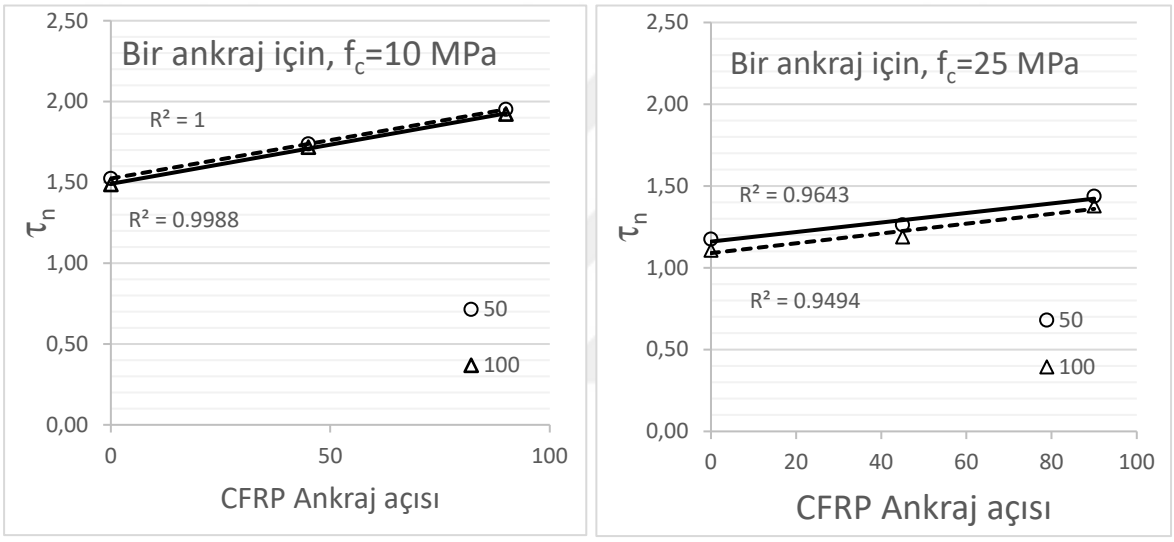
$$Sres = 1.31 \times S0 \tag{6.13}$$

$$S_{Fail} = (-0.00018\emptyset^2 + 0.009\emptyset + 4.87) * n^{0.08} S_0 \tag{6.14}$$

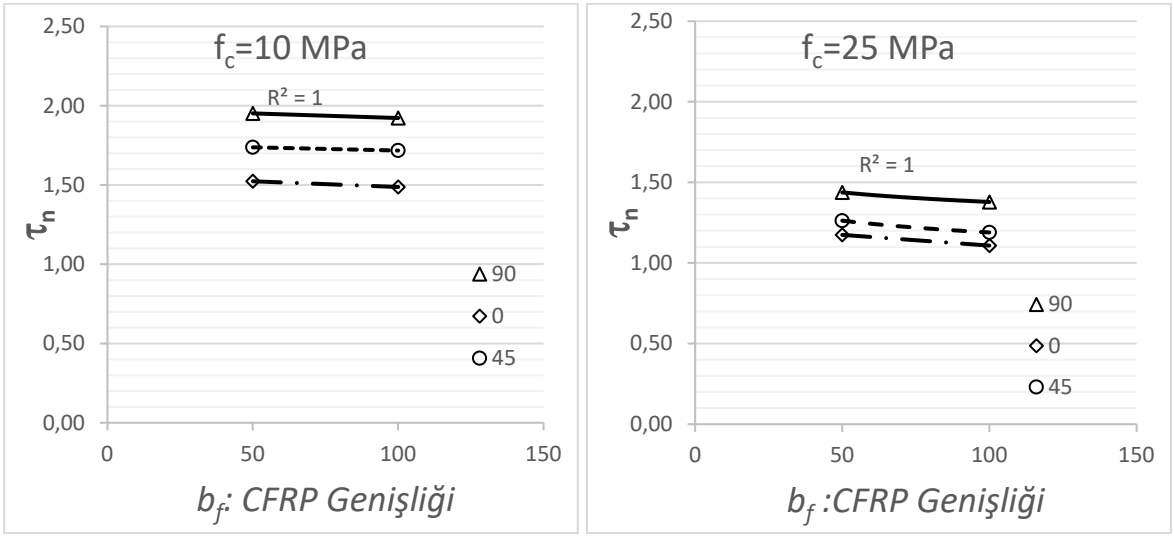
Eşitlik 6.9'da verilen $\tau_{max,0}$ değeri Lu v.d., 2005 tarafından önerilen ankrajsız CFRP şeritler için önerilen eşitlik ile hesaplanabilen ankrajsız CFRP şerit kesme gerilmesi kapasitesidir. Bu değer f_1 katsayısı ile çarpılarak açılı ankrajlı CFRP şeritlerin kesme gerilmesi değeri hesaplanmaktadır. f_1 çarpanının hesaplanması için geliştirilen eşitlik 6.10'da beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit açısına bağlı olarak verilmiştir. Eşitlik 6.11'de verilen kalıcı kesme gerilmesi ve eşitlik 6.12'de gösterilen göçme kesme gerilmesi değerleri ise eşitlik 9'da verilen açılı ankrajlı CFRP şerit maksimum kesme gerilmesi τ_{max} değerine bağlı olarak verilmiştir. Kalıcı kayma deplasmanı S_{res} ve göçme kayma deplasmanı S_{Fail} değerleri ise maksimum kesme kapasitesinde ulaşılan deplasman değeri S_0'a bağlı olarak eşitlik 6.13 ve eşitlik 6.14'de verilmiştir. Eşitlikde n ankraj sayısını, Φ ise ankraj açısını ifade etmektedir.

Eğri uydurma yöntemi kullanılarak tahmin edilen katsayılar kullanılarak yeni bağ-kayma modelinin parametreleri, ankrajsız numunelerin (ankraj içermeyen referans numuneler) kesme gerilmesi ve karşılık gelen yer değiştirme değerleri ile çarpılarak tahmin edilmiştir.

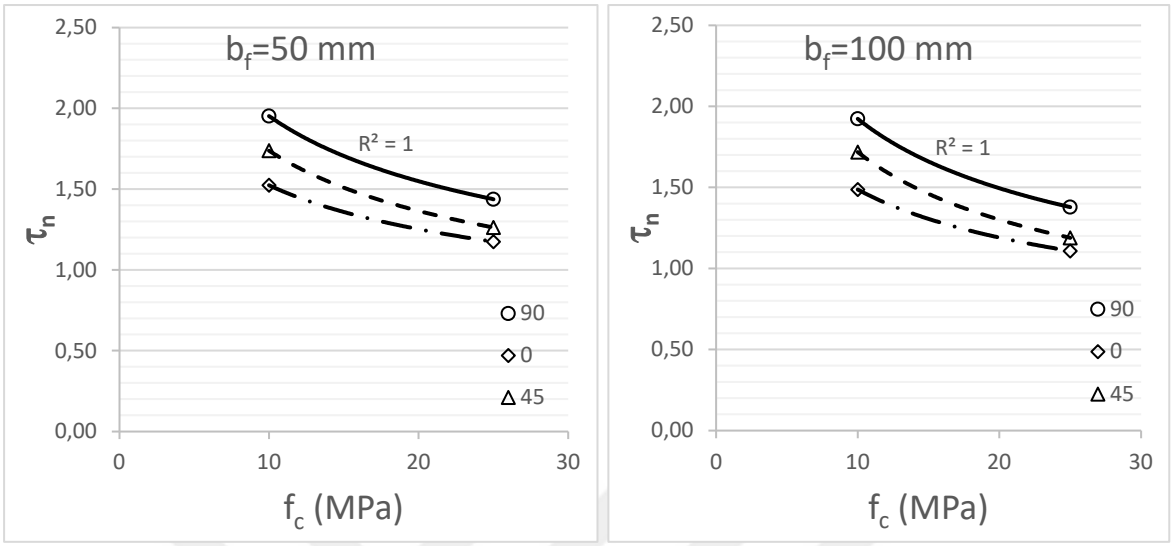
Excel kullanılarak eğri uydurma gerçekleştirilmiştir. En yüksek determinasyon katsayısına sahip olan denklemler R^2 seçildi. Kesme gerilmesi üzerinde pik noktasında ankraj açısının değiştirilmesinin etkisini bulmak için, CFRP şeritleri ve farklı açılarda CFRP ankrajları ile güçlendirilmiş deney elemanlarının pik nokta gerilimlerini (τ_{max}) referans deney elemanının (CFRP ankkrajı olmayan deney elemanı) pik nokta gerilme değerine ($\tau_{max,0}$) bölerek, deney elemanlarından elde edilen pik nokta kesme gerilmesi değeri normalize edildi (τ_n). Daha sonra, normalleştirilmiş pik nokta gerilimleri ankrajın açılarına, betonun basınç dayanımına ve CFRP şeritinin genişliğine göre çizilmiş ve sırasıyla Şekil 6.4, 6.5 ve 6.6'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. İki farklı değer f_c' için normalize edilmiş pik kesme gerilmesi τ_n ve CFRP ankraj açısı ($\emptyset$) arasındaki ilişki



Şekil 6.5. Üç farklı değer f_c' için normalize edilmiş pik kesme gerilmesi τ_n ve CFRP ankraj açısı ($\emptyset$) arasındaki ilişki



Şekil 6.6. Üç farklı değer f_c' için normalize edilmiş pik kesme gerilmesi τ_n ve CFRP ankraj açısı ($\emptyset$) arasındaki ilişki

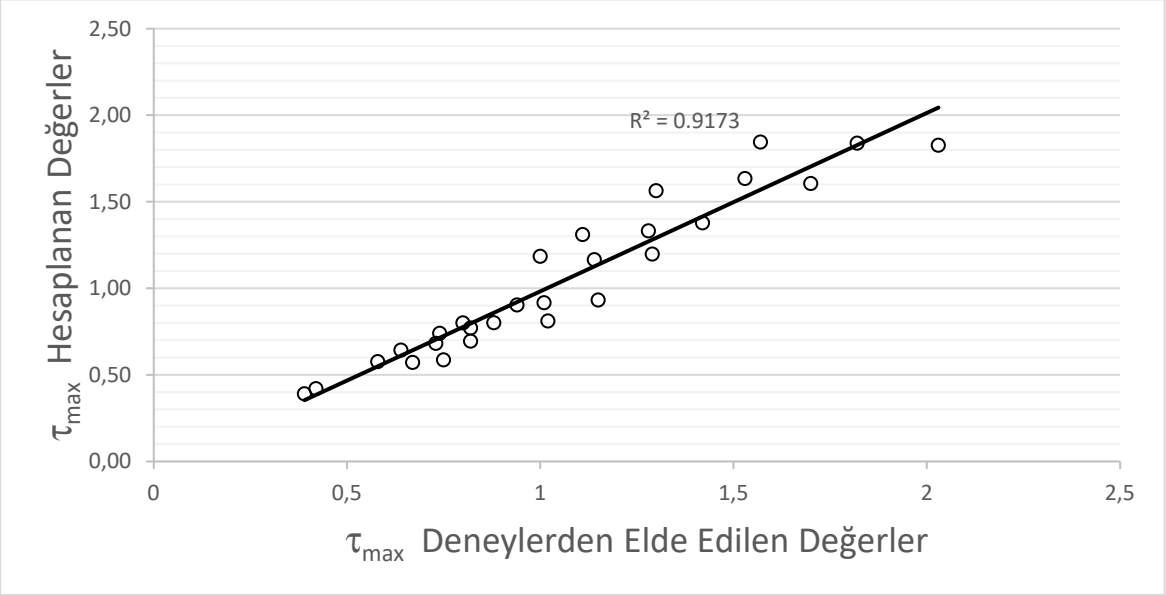
Şekil 6.4'de, her iki basınç dayanımı değeri için, CFRP ankrajların açıları ($\emptyset$) arttırılmasıyla τ_n değeri lineer olarak artırışı gözlenmiştir. Hâlbuki Şekil 6.3 ve 6.4'de, CFRP şerit genişliği b_f ve f_c' artışı, τ_n azaldığını görülebiliriz. Daha sonra, pik noktada kesme gerilmesi (τ_{max}) ile referans deney elemanı için pik nokta gerilme değeri arasındaki ilişki ($\tau_{max,0}$) tanımlaması için denklem 6.1 ve 6.2 önerilmiştir. Denklem CFRP ankrajların açısı($\emptyset$), CFRP şerit genişliği b_f ve daha önce açıklandığı gibi τ_{max} değerini etkileyen f_c' 'nin etkisini içermektedir.

$$\tau_{max} = f_1 \tau_{max,0} \tag{6.9}$$

$$f_1 = \left[\sum_{\emptyset=0}^{\emptyset=90}(0.0024\emptyset + 4.564)\right](f_c')^{-0.32}\,(b_f)^{-0.095} \tag{6.10}$$

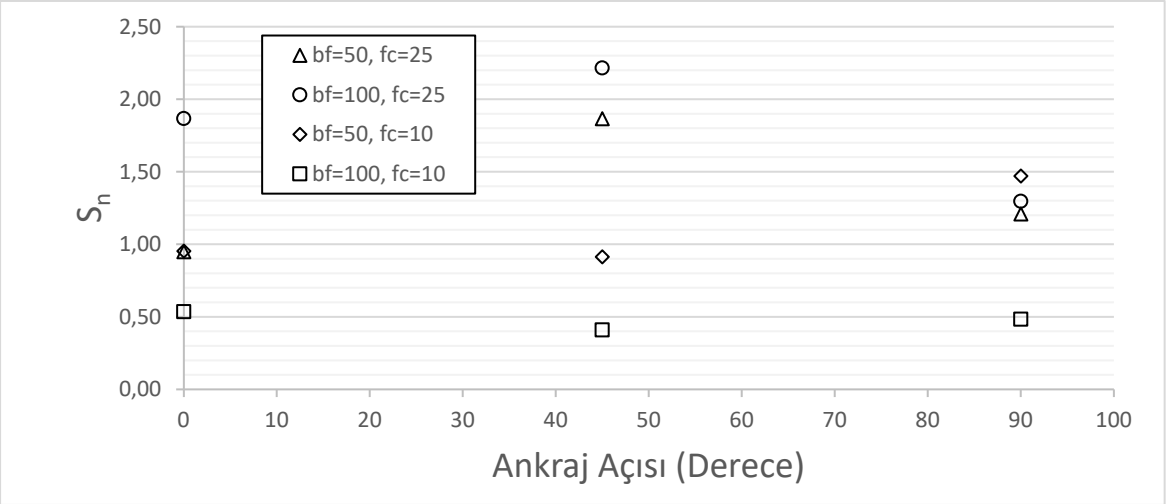
Bu denklemlerde, ($\tau_{\max}$) farklı açılarda CFRP ankraja sahip deney elemanların pik nokta gerilmesi, ($\tau_{max,0}$) deneysel verilerden elde edilen veya Lu ve arkadaşları, 2005 [29] gibi herhangi bir kayma gerilmesi-deplasman model kullanılarak ankrajsız deney elemanları için elde edilen pik nokta gerilmesi, ($\emptyset$) CFRP ankrajların açısı, f_c' betonun basınç dayanamını MPa olarak ve b_f de mm cinsinden CFRP şeritlerin genişliğini temsil etmektedir. Önerilen

denklemler, Şekil 6.5'de gösterildiği gibi, R^2-değerini %0.91'e eşit olan pik nokta gerilimini makul olarak tahmin edebilmiştir.



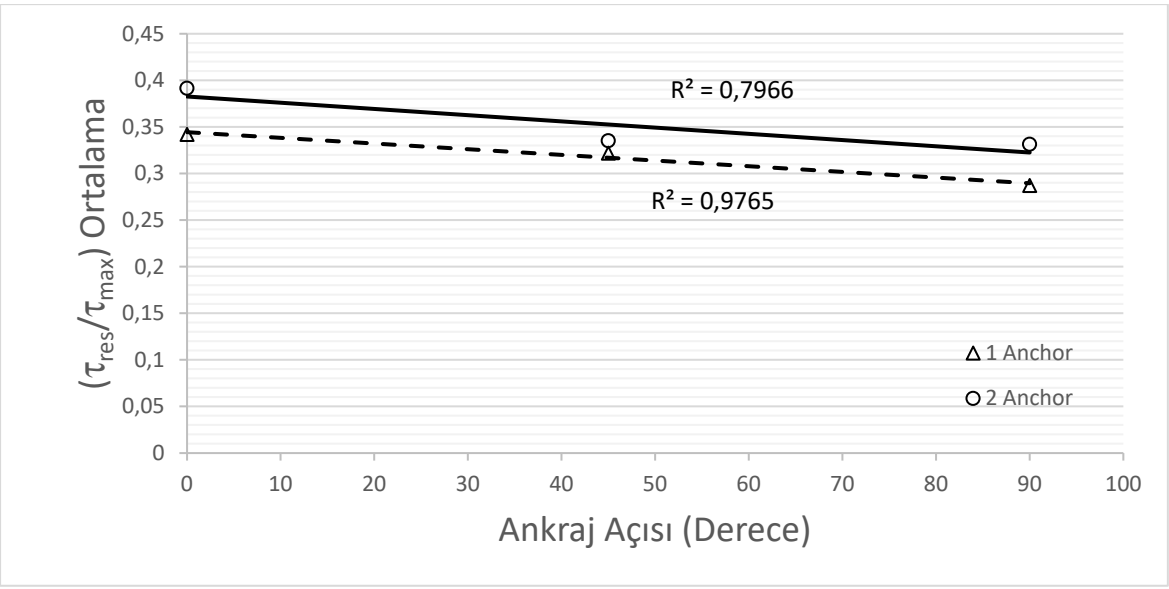
Şekil 6.7. Önerilen denklem tarafından tahmin edilen tepe noktada gerilimi ile deneysel tepe noktada gerilimi arasındaki karşılaştırma

Aynı şekilde, pik nokta gerilmesindeki (s_0) yer değiştirme normalleştirildi (s_n) ve Şekil 6.8'de gösterildiği gibi ankrajın açısına ($\emptyset$) karşı çizilmiştir. Şekil 6.6'da (s_n) ve ($\emptyset$) arasında anlamlı bir korelasyon olmadığı görülebilir. Bu nedenle, ankrajlı deney elemanları için (s_0) ankrajı olamayan referans deney elemanıyla (s_0)'a eşit olduğu varsayılmıştır, buda deneysel verilerden elde edilebilir veya Lu ve diğerleri, 2005 [29] gibi herhangi bir kayma gerilmesi-deplasman modeli kullanılarak tahmin edilebilir.

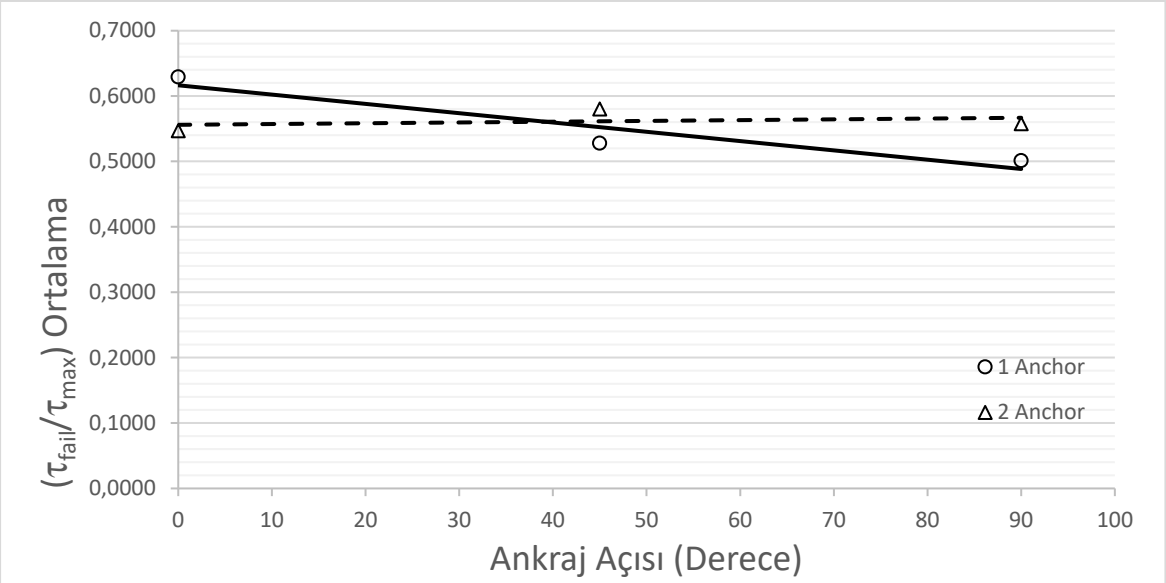


Şekil 6.8. Pik kesme gerilmesinde S_n normalize edilmiş yer değiştirme ile ankraj açıları arasındaki (∅) ilişki (b_f: CFRP şerit genişliği, f_C: Beton dayanımı)

Daha sonra, rezidüel kesme gerilmesinin ortalaması en pik nokta kesme gerilmesine oranı (τ_{Res}/τ_{max}) ve göçme gerilmesinin ortalaması en pik nokta kesme gerilmesine oranı (τ_{Fail}/τ_{max}) ankraj açısına göre (∅) karşı hesaplanmış ve çizilmiş ve sırayla Şekil 6.9 ve 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Ortalama kalıcı kesme gerilimi ile tepe kesme gerilimi oranı arasındaki ilişki (τ_{Res}/τ_{max}) ve ankraj açıları (∅)



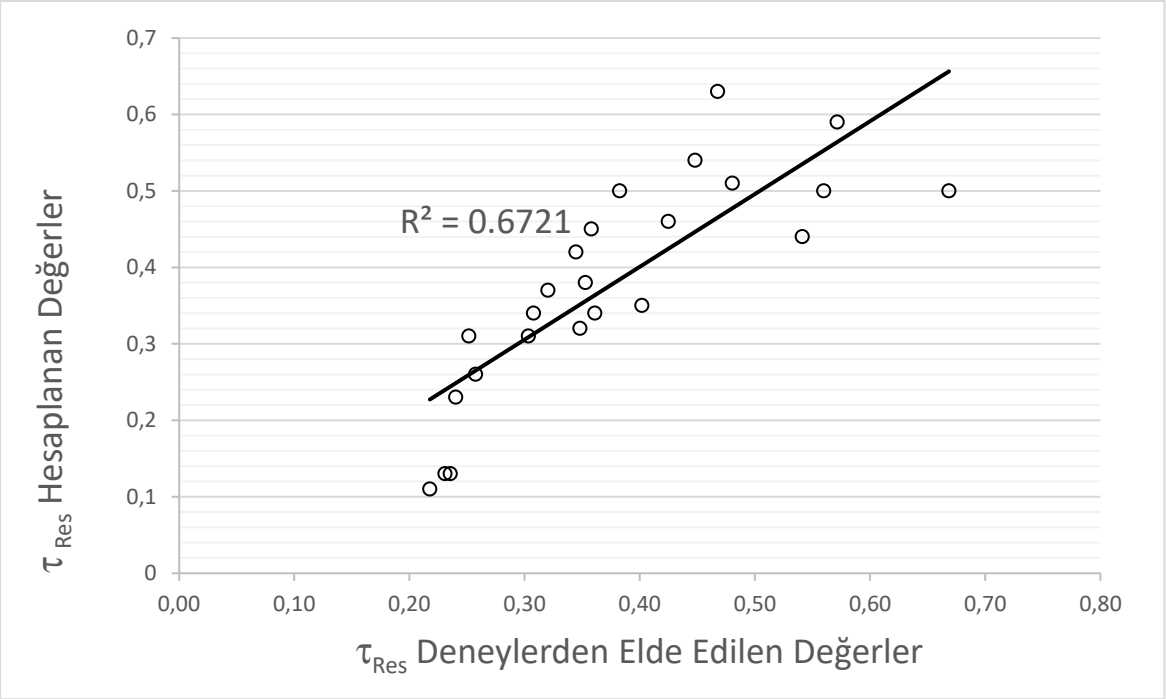
Şekil 6.10. Ortalama kalıcı kesme gerilimi ile tepe kesme gerilimi oranı arasındaki ilişki (τ_{Res}/τ_{max}) ve ankraj açıları $(\emptyset)$

Şekil 6.9'da herhangi bir ankraj sayısı için ankraj açısını artırması rezidüel kesme gerilmesinin azaldığını göstermiştir. Aynı zamanda, tek ankrajlı deney elemanlarında göçme noktasında kesme gerilmesi için de aynı davranış gözlenmiştir. Şekil 6.8'de gösterildiği gibi İki ankrajlı deney elemanlarında göçme noktasında kesme gerilmesi, ankrajların açısının değiştirilmesinden daha az etkilendi. Eğri uydurma uygulanarak rezidüel stres ve göçme noktasında stres ile pik nokta stresi arasındaki ilişkiyi açıklamak için denklem 6.3 ve 6.4 seçilmiştir.

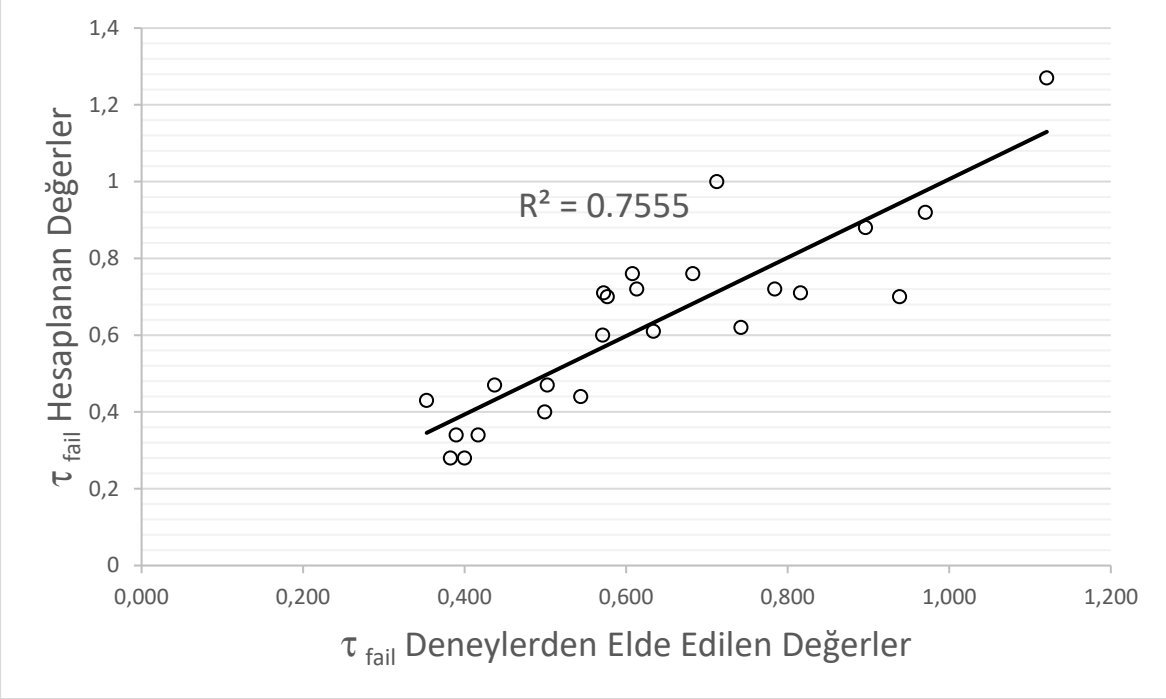
$$\tau_{Res} = \frac{1}{n}\left[\sum_{\emptyset=0}^{90}(0.375 - 0.00068\emptyset)\right]\tau_{max} \tag{6.11}$$

$$\tau_{Fail} = \frac{1}{n}\left[\sum_{\emptyset=0}^{90}(0.6087 - 0.00084\emptyset)\right]\tau_{max} \tag{6.12}$$

Bu denklemlerde n ankrajların sayısını, $\emptyset$ ankraj açısını ve τ_{max} denklem 6.1'den elde edilen pik nokta kesme gerilmesini temsil etmektedir. Deneysel çalışmada elde edilen rezidüel kesme gerilmesi ve göçme noktasında kesme gerilmesi değerleri, Şekil 6.11 ve 6.12'de gösterildiği gibi, önerilen denklemlerden tahmin edilenlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar karşılaştırdığında τ_{Res} rezidüel stresin %67'sinin ve τ_{Fail} göçme stresin %75'inin önerilen denklemleri kullanılarak makul olarak tahmin edildiğine varabiliriz.



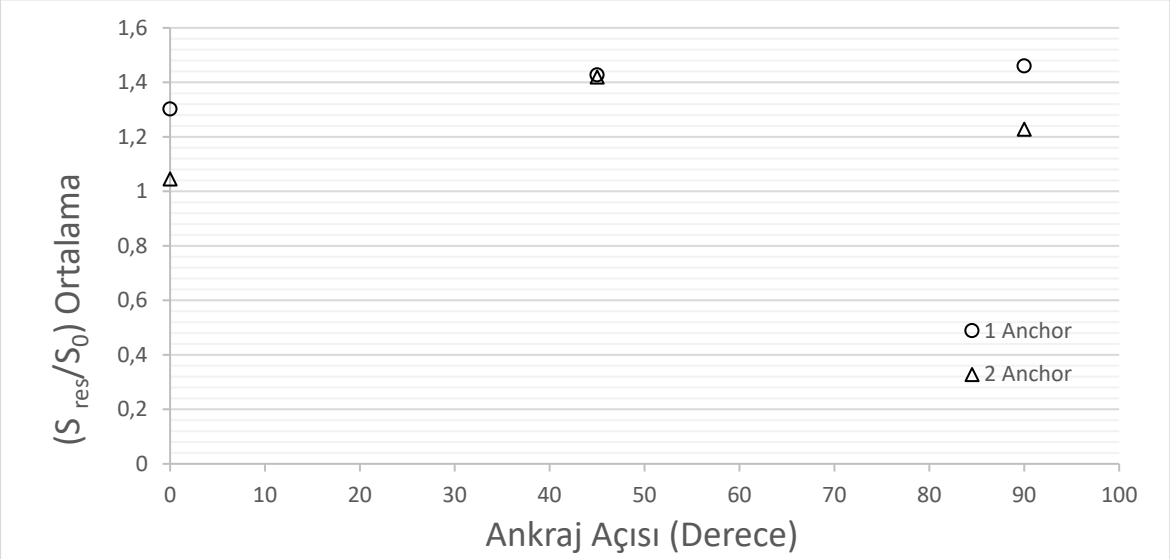
Şekil 6.11. Önerilen denklem tarafından tahmin edilen kalıcı stres ile deneysel kalıcı stres arasındaki karşılaştırma



Şekil 6.12. Önerilen denklem tarafından tahmin edilen nihai stres ile deneysel nihai stres arasındaki karşılaştırma

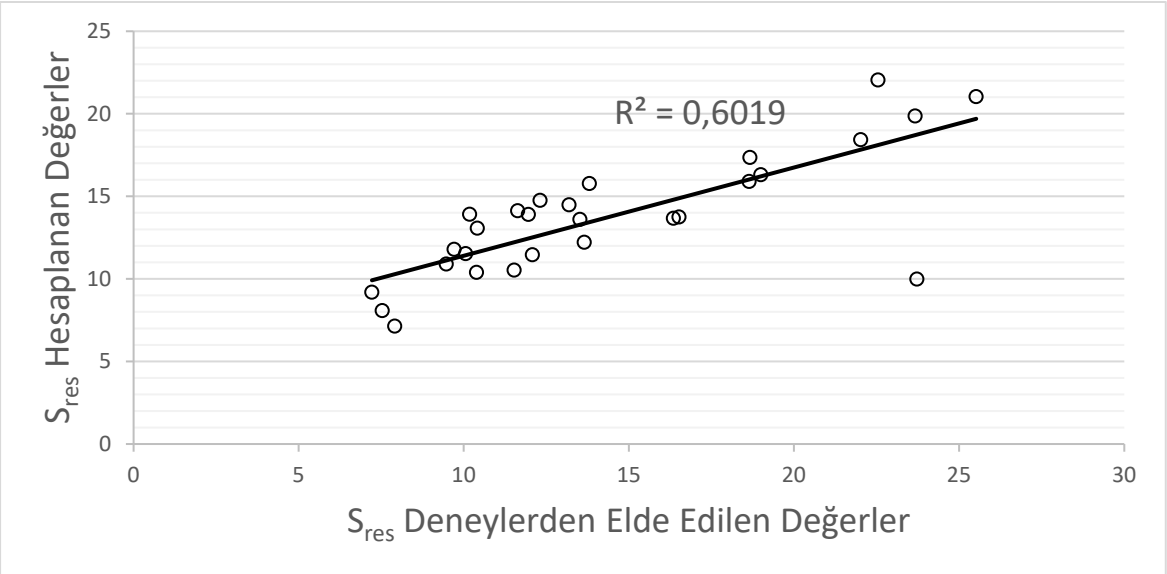
Aynı şekilde, rezidüel gerilmede yer değiştirme ortalamasının oranı (S_{Res}/S_0) pik noktada kesme gerilmesindeki yerdeğiştirme deneysel verilerden elde edilmiştir ve Şekil 6.13'de

gösterildiği gibi ankraj açısına karşı çizilmiştir. Şekli incelediğinde, ankraj açısının değiştirmesi rezidüel gerilimde yer değiştirmeyi hafifçe etkileyen görünebilir.



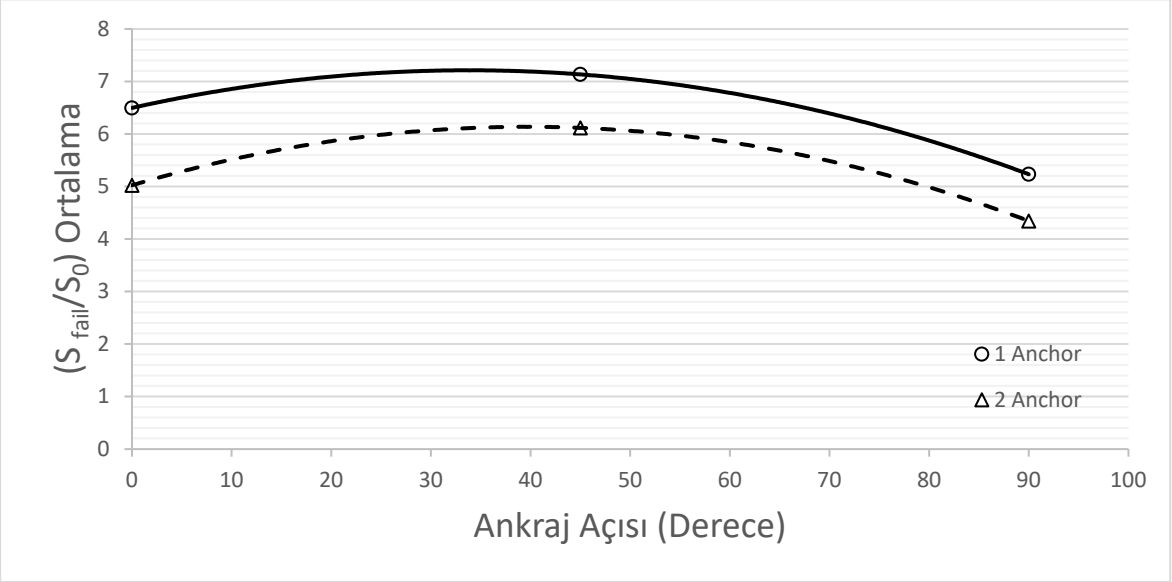
Şekil 6.13. Göçme noktasında kesme yer değiştirmenin ortalaması ile tepe kesme gerilmesinde yer değiştirmenin ortalaması arasındaki ilişki (S_{fail}/S_0) ve ankraj açıları (Ø)

Bu nedenle, ankrajlı deney elemanlarında rezidüel gerilimdeki yer değiştirme, Şekil 6.14'de gösterildiği gibi R^2'nin %60'a eşit olduğu pik noktasındaki gerilimde yer değiştirme oranını 1.31 ile çarparak konservatif olarak tahmin edilebilir.

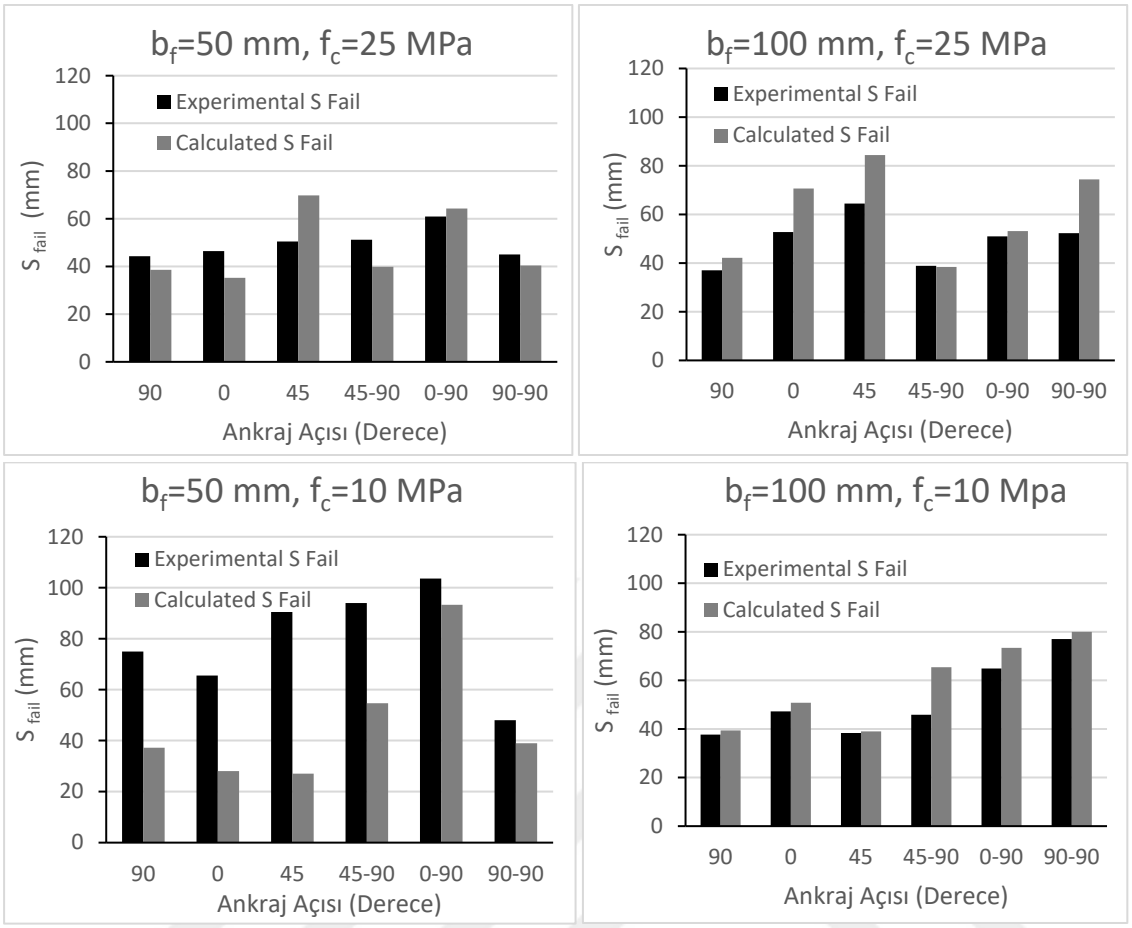


Şekil 6.14. Kalıcı gerilmede deneysel ve hesaplanan yer değiştirme arasındaki karşılaştırma S_{Res}

Son olarakta, göçme noktasındaki (S_{Fail}) yer değiştirme, pik noktasında gerilme yer değiştirme ile elde edilen oranın ortalamasına bölünmüştür ve Şekil 6.15'te gösterildiği gibi ankraj açısına karşı çizilmiştir. Eğri uydurma 5 denklemi uygulandıktan sonra en yüksek R^2 değerine sahip olan seçilmiştir. Bu durumda, R^2 0.84'e eşittir buda önerilen denklemin, Şekil 6.16'da gösterildiği gibi, normalize edilmiş ortalama göçme noktasındaki yer değiştirmenin %84'ünü makul olarak tahmin edebileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 6.15. Göçme noktasında kesme yer değiştirmenin ortalaması ile tepe kesme gerilmesinde yer değiştirmenin ortalaması arasındaki ilişki (S_{fail}/S_0) ve ankraj açıları ($\emptyset$)



Şekil 6.16. Göçme stresinde deney ve hesaplanan yer değiştirmenin karşılaştırması S_{Fail}.

$$S_{Fail} = (-0.00018\emptyset^2 + 0.009\emptyset + 4.87) * n^{0.08} S_0 \quad (6.14)$$

Bu denklemde S_{Fail} göçme noktasındaki gerilimenin yer değiştirmesi, $\emptyset$ en küçük ankraj açısıdır, n ankrajların sayısı ve S_0 pik noktada gerilme yer değiştirmesidir.

7. SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında CFRP ankrajlarının açısının CFRP ile güçlendirilmiş beton örneklerinin davranışına etkisini incelenmesi için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel çalışmada, iki farklı genişlikte sahip CFRP şeridi ve farklı açılarda çeşitli CFRP ankrajları ile güçlendirilmiş, iki farklı basınç dayanımına sahip 28 adet beton deney elemanı için tek doğrultlda kesme gerilmesi testi içermiştir.

Yapılan literatür taraması CFRP kullanılarak geliştirilen onarım ve güçlendirme detaylarında yüzeyden soyulmayı geciktirmek için ankraj kullanılmasının yaygınlaştığı ve araştırmaların bu konu üzerine yoğunlaştığını göstermiştir. Ankrajlı CFRP güçlendirme detaylarının taşıma gücü kapasiteleri ve yapı elemanına katkılarının gerçekçi bir şekilde hesaplanabilmesi için bu türdeki bağlantıların kayma gerilmesi-deplasman modelleri ve taşıma gücü hesaplama eşitlikleri üzerine araştırma yapılması önemli bir araştırma konusudur. Ankrajlı CFRP şertiler ile ilgili yapılan bu konudaki çalışmalar sınırlı sayıdadır. Ayrıca bu çalışmalarda CFRP şerit üzerinde kullanılan ankrajların şerit eksenine göre yerleşim açıları incelenmemiş bir değişkendir. CFRP güçlendirme detaylarında her zaman ankraj şerit yükleme eksenine 90^{o} açı ile yerleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanmış ve elde edilen sonuçlar kullanılarak açılı CFRP şertilerin yük-deplasman davranışları, maksimum taşıma güçleri ve yağışma yüzeyi kayma gerilmesi-deplasman modelleri ile ilgili bir çalışma yürütülmüştür.

- Deneysel sonuçlar incelendiğinde ankraj uygulamasının CFRP şeritlerin eksenel yük taşıma gücünü önemli ölçüde etkilediğini ve performansını artırdığını göstermiştir. 50 mm CFRP şerit genişliğine sahip, 25 MPa beton basınç dayanımlı deney elemanlarında tek ankraj eklenmesi CFRP şeritlerin eksenel taşıma gücünü ankrajsız referans deney elemanına göre ortalama 29% oranında artırmıştır. Aynı beton basınç dayanımında, 100 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarında tek ankraj olması durumunda ankrajsız referans deney elemanına göre eksenel yük taşıma gücü ortalama 23% oranında artmıştır.
- Ankraj sayısının birden ikiye çıkması eksenel yük taşıma gücü değerlerini çok daha büyük oranda etkilemiş ve artmasına neden olmuştur. 25 MPa beton basınç dayanımlı,

iki adet ankrajlı CFRP şeritli, 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarının eksenel yük taşıma gücü değerleri ankrajsız CFRP şeritli referans deney elemanlarına göre sırasıyla ortalama 125% ve 104% oranlarında artış göstermiştir. Beton basınç dayanımının azalarak 25 MPa'dan 10 MPa değerine indirilmesi, deney elemanlarında ankraj uygulamasının CFRP şeritlerin eksenel çekme kapasitesi üzerinde çok daha fazla olumlu etki meydana getirerek performanslarının daha fazla artmasına neden olmuştur. 10 MPa beton basınç dayanımlı, 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişliğine sahip tek ankrajlı CFRP şeritli deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankrajsız CFRP şeritli referans deney elemanlarına göre sırasıyla ortalama 75% ve 73% oranlarında artış göstermiştir. Aynı beton basınç dayanımı değerinde, 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişliğine sahip, 2 ankraj uygulanan CFRP şeritli deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri ise, ankrajsız CFRP şeritli referans test elemanlarından sırasıyla ortalama 205% ve 196% oranlarında daha fazla elde edilmiştir.

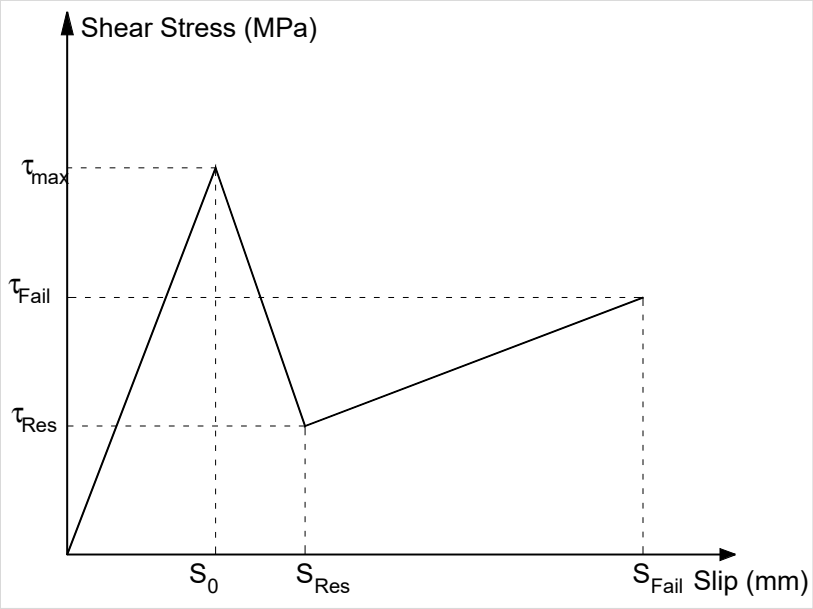
- Eksenel yük taşıma gücü değerlerinin yükleme doğrultusuna paralel olan CFRP şerit yapışma alanlarına oranlanması ile hesaplanan maksimum kesme gerilmesi değerleri incelendiğinde eksenel yük taşıma gücü ile benzer bir davranış trendi görülmektedir. CFRP şeritlere ankraj eklenmesi maksimum kesme gerilmesi değerlerini de eksenel çekme kuvveti taşıma gücü değerlerinde olduğu gibi önemli oranlarda artırmış ve artış oranları 10 MPa düşük dayanımlı betonlu deney elemanları ile iki adet ankraj uygulanan deney elemanlarında çok daha büyük meydana gelmiştir.
- Çalışma kapsamında CFRP şerit yükleme ekseni ile 90^{o}, 0^{o} ve 45^{o} olmak üzere üç farklı tip açıya sahip ankrajın etkileri incelenmiştir. CFRP şeritlere 1 ankraj yerleştirildiği durumlarda, 25 MPa beton basınç dayanımına sahip, ankrajların CFRP şerit eksenine göre açıları 90^{o}, 0^{o} ve 45^{o} olan deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankraj uygulanmayan referans deney elemanına göre sırasıyla 41%, 14% ve 23% oranlarında artış göstermiştir. Bir ankrajlı ve 10 MPa beton basınç dayanımına sahip, ankraj açıları 90^{o}, 0^{o} ve 45^{o} olan deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçlerinde ise, ankraj uygulanmayan referans deney elemanına göre sırasıyla 96%, 52% ve 74% oranlarında artış meydana gelmiştir. Tek ankrajlı deney elemanlarının eksenel yük taşıma gücü üzerindeki etkileri incelendiğinde, ankrajların CFRP şerit yükleme ekseni ile 90^{o} açı yaptığı deney elemanlarının en büyük taşıma gücü değeri artışını meydana getirdiği, 45^{o} açılı deney elemanlarının ikinci sırada yer aldığı ve en düşük eksenel yük taşıma gücü artışını ise 0^{o} açılı deney elemanlarının sergilediği belirlenmiştir.

- CFRP şeritlere yerleştirilen ankraj sayısının ikiye çıkarıldığı deney elemanlarında şerit üzerine konumlandırılan ankrajların eksenel yük eksenine göre açıları sırasıyla birinci ankraj 45^o, ikinci ankraj 90^o, birinci ankraj 0^o, ikinci ankraj 90^o ve her iki ankrajda 90^o açılı olacak şekilde 3 farklı kombinasyonda yerleştirilmiştir. 25 MPa beton basınç dayamına sahip, 2 adet ankrajlı, birinci ankraj 45^o, ikinci ankraj 90^o açılı CFRP şeritli deney elemanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankrajsız referans deney elemanına göre ortalama 141% oranında daha büyük elde edilmiştir. Aynı beton basınç dayanımında, birinci ankraj 0^o, ikinci ankraj 90^o açılı olan deney elamanlarının eksenel yük taşıma güçleri, ankrajsız referans test elemanına göre ortalama 86%, her iki ankrajında 90^o açılı olan deney elemanlarında ise ortalama 117% oranlarında daha büyüktür. Beton basınç dayanımı 10 MPa değerinde, birinci ankraj 45^o, ikinci ankraj 90^o, birinci ankraj 0^o, ikinci ankraj 90^o ve her iki ankrajda 90^o açı ile yerleştirilen deney elemanlarının eksenel taşıma gücü değerleri, ankrajsız referans deney elemanından sırasıyla ortalama 238%, 162% ve 202% oranlarında daha büyük değerler sergilemiştir. 2 ankrajlı ve 3 farklı ankraj açı kombinasyonlarına sahip deney elemanları içerisinde eksenel yük taşıma gücünü en büyük oranda birinci ankraj 45^o, ikinci ankraj 90^o açı ile yerleştirilen deney elemanları sergilemiştir. İkinci sırada her iki ankrajda 90^o açı ile yerleştirilen deney elemanları yer almış, en düşük taşıma gücü artışını ise birinci ankraj 0^o, ikinci ankraj 90^o açı ile yerleştirilen deney elemanları sergilemiştir.
- Çalışma kapsamında 50 mm ve 100 mm genişliğinde iki farklı CFRP şerit incelenmiştir. CFRP şerit genişliğinin artması genel olarak CFRP şerit eksenel yük taşıma gücünü önemli oranda artırmıştır. Eksenel taşıma gücü değerindeki artış 25 MPa ve 10 MPa beton basınç dayanımına sahip deney elemanlarında birbirlerine oldukça yakın oranlarda meydana gelmiş olup, 100 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarının eksenel yük taşıma gücü değerleri 50 mm CFRP şerit genişlikli deney elemanlarından sırasıyla ortalama 73% ve 82% daha büyük elde edilmiştir. Aynı şekilde tek ve iki ankrajlı deney elemanlarında da CFRP şerit genişliğindeki artış eksenel yük kapasitesinin birbirlerine yakın oranlarda artmasına neden olmuştur.
- Çalışmada 25 MPa ve 10 MPa beton basınç dayanımları incelenmiştir. Beton basınç dayanımının artması genel olarak CFRP şeritlerin eksenel yük taşıma gücünü olumlu etkilemiş ve artırmıştır. Ankrajsız CFRP şeritli referans deney elemanlarında beton basınç dayanımının artması eksenel yük taşıma kapasitesini ortalama 92% oranında artırmıştır. Bu artış oranı 50 mm ve 100 mm CFRP şerit genişlikleri için birbirlerine çok yakın bir değerde olmuştur. Ankrajlı CFRP şeritli deney elemanlarında beton basınç

dayanımının artması eksenel yük taşıma gücü değerlerinin ortalama 38% oranında artmasına neden olmuştur. Ankrajlı CFRP şeritli deney elemanlarında değişim gösteren ankraj sayısı ve CFRP şerit genişliği eksenel taşıma gücü artış oranı üzerinde sınırlı bir miktarda etkili olmuş, artış oranları 31% ile 47% arasında değişim göstermiştir.

- Deney elemanlarından ölçülen birim deformasyon dağılımları incelendiğinde CFRP şeritler üzerinde maksimum birim şekil değiştirme değerinin CFRP şeritin eksenel yüklemenin uygulandığı serbest ucuna yakın bir bölgede meydana geldiği görülmektedir. Daha sonra CFRP şerit üzerinde azalarak devam eden birim deformasyon dağılımı ankrajların olduğu ve "L" şeklindeki CFRP şeritin köşe yaptığı, gerilme birikmelerinin meydana geldiği bölgelerde tekrar artış göstermiştir. Şerit üzerinde köşe ve ankrajların meydana geldiği bölgelerde birim deformasyon değerlerinde artış meydana gelmesine rağmen, birim deformasyon değerleri CFRP şerit serbest uç bölgesinde ulaşılan maksimum birim deformasyon değerinden daha düşük düzeyde kalmıştır. Ancak CFRP şerit üzerinde ankrajların kullanılması ve şerit üzerinde köşe dönüşlerinin olması CFRP şeritlerde meydana gelen birim deformasyon dağılımını önemli oranda etkilemiş ve artmasını sağlayarak şeritler üzerinde daha uzun bir bölgede gerilme aktarımının olmasına, şeritin daha etkin bir şekilde yük taşıyarak, eksenel yük taşıma güçlerinin artmasına neden olduğu görülmüştür.
- Deney elemanlarının maksimum taşıma gücü rijitlikleri ve enerji tüketim kapasiteleri incelendiğinde 100 mm genişliğinde, 25 MPa beton basınç dayanımlı, tek ankrajlı deney elemanları haricinde diğer tüm deney elemanlarında ankraj uygulaması deney elemanlarının rijitlik ve enerji tüketim kapasitelerinin artmasına neden olmuştur. Bir veya iki ankrajlı deney elemanlarının rijitlik ve enerji tüketim kapasitesi değerleri ankrajsız referans deney elemanlarına göre önemli oranlarda artış göstermiştir. Özellikle artış miktarı 10 MPa beton basınç dayanımına sahip deney elemanlarında çok daha büyük oranlarda meydana gelmiş ve ankraj uygulaması deney elemanlarının rijitlik ve enerji tüketim kapasitesi değerlerini çok daha olumlu olarak etkilemiştir. Bu artış hem bir hem de iki ankrajlı ve 3 farklı açı değerine sahip ankrajlı deney elemanlarının hepsinde görülmüştür.
- Çalışma sonucunda açılı CFRP şeritler ile beton yüzey arasında kullanılabilecek genelleştirilmiş bir kayma gerilmesi-kayma deplasmanı modeli geliştirilmiştir. Bu modelin genel iskelet grafiği aşağıda Şekil 7.1'de tekrar verilmiş olup, grafik üzerindeki değerlerin hesaplanması için kullanılacak olan denklemler 6. bölümde sunulmuştur. Bilindiği gibi betonarme yapısal elemanların çeşitli nedenlerden dolayı güçlendirilmesi

veya onarılması bazen gereklilik haline gelmektedir. Bu gibi durumlarda güçlendirme veya onarım amacıyla geliştirilen güçlendirme detaylarında kullanılan CFRP şeritlerin yapıştırıldıkların beton yüzeye daha iyi tutunabilmesi için güçlendirme detaylarında ankraj kullanılması giderek yaygınlaşan bir teknik olmuş ve bu konudaki araştırmalarda artış göstermiştir. Güçlendirme veya onarım uygulandıktan sonra betonarme yapısal elemanların taşıma güçleri, genel yük-deplasman davranışları gibi önemli parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda ankrajlı CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilen veya onarılan bu türdeki betonarme yapısal elemanların kapasitelerinin, genel yük-deplasman davranışlarının belirlenebilmesi için bu çalışma kapsamında geliştirilen malzeme modeline ihtiyaç bulunmaktadır. Bilindiği gibi ankrajsız CFRP şeritler ile beton yüzey arasındaki bu türdeki bir bond-slip malzeme modeli Lu ve arkadaşları tarafından 2005 yılında yapılan bir çalışma ile geliştirilmiştir. Daha sonra 2014 yılından sonra ANSYS ve ABAQUS gibi sonlu elemanlar yazılımlarına söz konusu CFRP ile beton yüzeyler arasındaki bu malzeme modeli CZM (Cohesive Zone Modelling) olarak girmiş ve halen kullanılmaktadır. Ancak bu model ankrajsız CFRP şeritler için geçerlidir. Açılı ankrajlı CFRP şeritler için bilinen bir arayüzey malzeme modeli bulunamamıştır. Bu çalışmanın sonuçlarının bu açıdan önemli olduğu ve sonlu elemanlar analiz modellerinde de kullanılabileceği düşünülmektedir.



Şekil 7.1. Açılı ankrajlı CFRP şertiler ile beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modeli

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ankraj açısı, sayısı, CFRP şerit genişliği ve beton basınç dayanımı parametrelerini içeren, açılı CFRP şeritlerin maksimum kesme gerilmesi kapasitelerinin hesaplanmasında kullanılabilecek bir eşitlik önerilmiştir. Ek olarak, deney programından elde edilen veriler, CFRP fan ankrajlarının açısını değiştirmenin etkisini dikkate alan yeni bir kayma gerilmesi-deplasman modeli önermek için kullanılmıştır. Genel olarak, önerilen denklemler kayma gerilmesi-deplasman modelinin parametrelerini makul bir şekilde tahmin edebilmiştir. Buna rağmen, 0/45 gibi diğer açı kombinasyonlarını incelemek için aynı zamanda ankrajlarının sayısını üçe çıkarmak için daha deneysel programlar yapılmasına ihtiyaç vardır.

7.2. Öneriler

Yürütülen çalışma kapsamında beton yüzey ile açılı ankrajlar kullanılarak yüzeye bağlanan CFRP şeritler arasındaki kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modelli için genelleştirilmiş yeni bir malzeme modeli önerisi geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen değişkenler haricindeki başka değişkenlerin incelenmesi için öncelikle gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar ile doğrulanmış bir sonlu elemanlar modelinin oluşması yapılabilecek bir diğer çalışmadır. ANSYS veya ABAQUS sonlu elemanlar yazılımlarından biri ile öncelikle deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar elde edilebilecek bir sonlu elemanlar nümerik modelinin oluşturulması için çalışma kapsamında geliştirilen ve önerilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modeli kullanılarak bir nümerik model oluşturulabileceği düşünülmektedir. Deneysel sonuçlar ile uyumlu ve gerçekçi sonuçlar verebilen bir sonlu elemanlar nümerik modelinin oluşturulmasından sonra bu model kullanılarak bilgisayar ortamında yapılacak simülasyonlar ile deneysel sonuçlar ile uyumlu verilerin artırabileceği düşünülmektedir. Nümerik analizler ile artırılan veriler kullanılarak geliştirilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modeli geliştirilebilir.

Yürütülen çalışma kapsamında açılı CFRP fan tip ankrajlar ile beton yüzeye bağlanan CFRP şeritler için deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Benzer deneysel çalışmanın cam elyaf şeritler (GFRP), bazalt elyaf şeritler (BFRP) ve aramid elyaf şeritler (AFRP) içinde yapılması mümkündür. Ayrıca çalışma kapsamında CFRP fan tip ankrajlar yerine mekanik farklı türde ankrajlar için de deneysel bir çalışma gerçekleştirilebilir. Bunlar haricinde yapısal güçlendirme alanına yeni yeni giriş yapan tekstil ile güçlendirilmiş sıva katmanı (Textile Reinforced Mortar) güçlendirme yöntemi için tekstil şeritlerin açılı ankrajlar ile

beton yüzeye bağlanması durumunda kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modelinin geliştirilmesi için yeni bir deneysel çalışma yapılması mümkündür. Benzer çalışmaların çelik malzemesinden üretien şeritler ile beton yüzey arasındaki kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modelinin belirlenmesi için yapılabileceği düşünülmektedir. Yukarıda özetlenen tüm çalışmalar betonarme yapısal elemanlarda kullanılabilecek güçlendirme/onarım yöntemlerinde yer alan CFRP şeritli detayları modellemek için beton malzemesi ile açılı CFRP şeritler arasında yürütülmüştür. Benzer çalışmaların yığma yapıların onarım/güçlendirme yöntemlerinde kullanılabilecek detaylar için bu sefer delikli tuğla, biriket, dolu harman tuğlası, gaz beton, taş vb. malzemeler ile açılı şeritler arasında yapılması mümkündür. Açılı CFRP şeritler ile beton yüzeyler arasındaki kayma gerilmesi-kayma deplasmanı malzeme modelinin geliştirildi bu deneysel çalışma öncü niteliğinde olup, bu türdeki çalışmaların farklı malzeme türleri arasındaki benzer malzeme modellerinin oluşturulması için yapılması gereklidir.

KAYNAKLAR

1. Ehsani, M. R. and Saadatmanesh, H. (1997). Fiber composites: an economical alternative for retrofitting earthquake-damaged precast-concrete walls. *Earthquake Spectra*, *13*(2), 225-241.

2. Paterson, J. and Mitchell, D. (2003). Seismic retrofit of shear walls with headed bars and carbon fiber wrap. *Journal of Structural Engineering*, *129*(5), 606-614.

3. Chang, S. Y., Li, Y. F. and Loh, C. H. (2004). Experimental study of seismic behaviors of as-built and carbon fiber reinforced plastics repaired reinforced concrete bridge columns. *Journal of Bridge Engineering*, *9*(4), 391-402.

4. Chagnon, N. and Massicotte, B. (2005). *Seismic retrofitting of rectangular bridge piers with CFRP.* ConMat'05 Third international conference on construction materials: Performance, Innovations and Structural Implications, 1-10.

5. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L. (2002). *FRP: strengthened RC structures.* Chichester: Wiley.

6. Chen, J. F. and Teng, J. G. (2001). Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Journal of Structural Engineering*, *127*(7), 784-791.

7. Smith, S. T. and Teng, J. G. (2002). FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, *24*(4), 385-395.

8. Smith, S. T. and Teng, J. G. (2002). FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models. *Engineering Structures*, *24*(4), 397-417.

9. Smith, S. T. and Teng, J. G. (2003). Shear-bending interaction in debonding failures of FRP-plated RC beams. *Advances in Structural Engineering*, *6*(3), 183-199.

10. Oehlers, D. J. and Moran, J. P. (1990). Premature failure of externally plated reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*, *116*(4), 978-995.

11. Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J. and Chen, J. F. (2003). Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Construction and Building Materials*, *17*(6-7), 447-462.

12. Ali, M. M., Oehlers, D. J. and Bradford, M. A. (2001). Shear peeling of steel plates bonded to tension faces of RC beams. *Journal of Structural Engineering*, *127*(12), 1453-1459.

13. Ali, M. M., Oehlers, D. J. and Bradford, M. A. (2002). Interaction between flexure and shear on the debonding of RC beams retrofitted with compression face plates. *Advances in Structural Engineering*, *5*(4), 223-230.

14. Kabir, M. I., Shrestha, R. and Samali, B. (2016). Effects of applied environmental conditions on the pull-out strengths of CFRP-concrete bond. *Construction and Building Materials*, *114*, 817-830.

15. Al-Allaf, M. H., Weekes, L., Augusthus-Nelson, L. and Leach, P. (2016). An experimental investigation into the bond-slip behaviour between CFRP composite and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, *113*, 15-27.

16. Hassan, S. A., Gholami, M., Ismail, Y. S. and Sam, A. R. M. (2015). Characteristics of concrete/CFRP bonding system under natural tropical climate. *Construction and Building Materials*, *77*, 297-306.

17. Peng, H., Hao, H., Zhang, J., Liu, Y. and Cai, C. S. (2015). Experimental investigation of the bond behavior of the interface between near-surface-mounted CFRP strips and concrete. *Construction and Building Materials*, *96*, 11-19.

18. Calvet, V., Valcuende, M., Benlloch, J. and Cánoves, J. (2015). Influence of moderate temperatures on the bond between carbon fibre reinforced polymer bars (CFRP) and concrete. *Construction and Building Materials*, *94*, 589-604.

19. Badawi, M., Wahab, N. and Soudki, K. (2011). Evaluation of the transfer length of prestressed near surface mounted CFRP rods in concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(3), 1474-1479.

20. Ahmad, F. S., Foret, G. and Le Roy, R. (2011). Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): Experimental study. *Construction and Building Materials*, *25*(2), 479-485.

21. Pham, H. B. and Al-Mahaidi, R. (2007). Modelling of CFRP-concrete shear-lap tests. *Construction and Building Materials*, *21*(4), 727-735.

22. Schilde, K. and Seim, W. (2007). Experimental and numerical investigations of bond between CFRP and concrete. *Construction and Building Materials*, *21*(4), 709-726.

23. Oehlers, D. J., Park, S. M. and Ali, M. M. (2003). A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *34*(9), 887-897.

24. Dogan, A. B. and Anil, O. (2010). Nonlinear finite element analysis of effective CFRP bonding length and strain distribution along concrete-CFRP interface. *Techno Press, Computers and Concrete an International Journal 7*(5), 437-453.

25. Lamanna, A. J. (2002). *Flexural strengthening of reinforced concrete beams with mechanically fastened fiber reinforced polymer strips*. PhD dissertation, University of Wisconsin-Madison.

26. Bank, L. C., Lamanna, A. J., Ray, J. C. and Velazquez, G. I. (2002). *Rapid strengthening of reinforced concrete beams with mechanically fastened, fiber-reinforced polymeric composite materials* Report ERDC/GSL-TR-02-4, 99.

27. Bank, L. C. and Arora, D. (2007). Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips. *Composite Structures*, *79*(2), 180-191.

28. Bank, L. C., Borowicz, D. T., Lamanna, A. J., Ray, J. C. and Velazquez, G. I. (2002). *Rapid strengthening of full-sized concrete beams with powder-actuated fastening systems and Fiber-Reinforced Polymer (FRP) composite materials*. Report ERDC/GSL-TR-02-12, 110.

29. Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P. and Jiang, J. J. (2005). Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, *27*(6), 920-937.

30. Rizzo, A., Galati, N., Nanni, A. and Bank, L. C. (2005). Strengthening concrete structures with mechanically fastened pultruded strips. *Proceedings of the Composites*. Columbus, Ohio, USA, September 28-30.

31. Lamanna, A. J., Bank, L. C. and Borowicz, D. T. (2004). Mechanically fastened FRP strengthening of large scale RC bridge T beams. *Advances in Structural Engineering*, *7*(6), 525-538.

32. Chen, J. F. and Teng, J. G. (2003). Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, *17*(1), 27-41.

33. Napoli, A., Bank, L. C., Brown, V. L., Martinelli, E., Matta, F. and Realfonzo, R. (2013). Analysis and design of RC structures strengthened with mechanically fastened FRP laminates: A review. *Composites Part B: Engineering*, *55*, 386-399.

34. Yao, J., Teng, J. G. and Chen, J. F. (2005). Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, *36*(2), 99-113.

35. De Lorenzis, L., Miller, B. and Nanni, A. (2001). Bond of FRP laminates to concrete. *ACI Materials Journal*, *98*(3), 256-264.

36. Anil, Ö. and Belgin, Ç. M. (2010). Anchorages effects on CFRP-to-concrete bond strength. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *29*(4), 539-557.

37. Mertoğlu, Ç., Anil, Ö. and Durucan, C. (2016). Bond slip behavior of anchored CFRP strips on concrete surfaces. *Construction and Building Materials*, 123, 553-564.

38. Zhang, H. W. and Smith, S. T. (2012). Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates. *Composites Part B: Engineering*, *43*(8), 3516-3527.

39. Zhang, H. W. and Smith, S. T. (2012). FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors. *Composite Structures*, *94*(2), 403-414.

40. Casanova, A., Jason, L. and Davenne, L. (2012). Bond slip model for the simulation of reinforced concrete structures. *Engineering Structures*, 39: 66–78

41. El-Mahaidi, R. and Kalfat, R. (2011). Investigation into CFRP plate end anchorage utilising uni-directional fabric wrap *Composite Structures,* 93(2), 821–830

42. Fawzia, S., Zhao, XL and Al-Mahaidi, R. (2010). Bond–slip models for double strap joints strengthened by CFRP. *Composite Structures*, 92(9), 2137-2145

43. Bilotta, A., Di Ludovico, M. and Nigro, E. (2011). FRP-to-concrete interface debonding: Experimental calibration of a capacity model. *Composites Part B Engineering*, 42(6), 1539-1553

44. Fedele, R. and Milani, G. (2012). Assessment of bonding stresses between FRP sheets and masonry pillars during delamination tests. *Composites Part B Engineering*, 43(4), 1999-2011

45. Sayed-Ahmed, EY, Bakay, R. and Shrive, NG (2009). Bond strength of FRP laminates to concrete: State-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 9, 45-61

46 Jumaat, M. Z., Rahman, M. M., and Rahman, M. A. (2011). Review on bonding techniques of CFRP in strengthening concrete structures. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(15), 3567-3575.

47. Cameron, R. (2012). Strengthening of RC Beams With Externally Bonded and Anchored FRP Laminate. *Composite Structures*, DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111574

48. Martinelli, E., Napoli, A., Nunziata, B. and Realfonzo, R. (2011). FRP laminates mechanically fastened to concrete: experimental observations and numerical modeling. Conference: *Proceedings of SMAR 2001, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, At: Dubai*

49. Fagone, M., Ranocchiai, G., Caggegi, C., Bati, S.B. and Cuomo, M. (2014). The efficiency of mechanical anchors in CFRP strengthening of masonry: An experimental analysis. *Composites Part B Engineering*, 64, 1–15

50. Colombi, P., Fava, G. and Poggi, C. (2014). End debonding of CFRP wraps and strips for the strengthening of concrete structures. *Composite Structures*, *111*, 510-521.

51. Kotynia, R. (2012). Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 32, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.104

52. H. Abdel Baky, U.A. Ebead, and K.W. Neale. (2012). Nonlinear micromechanics-based bond–slip model for FRP/concrete interfaces. *Engineering Structures,* 39, 11–23.

53. Din, S. (2014). *Gaz beton ve Tuğla ile Karbon Takviyeli Elyaf Kumaşların Yapışma Yüzeyi Arasındaki Gerilme Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 148.

54. Mertoğlu, Ç. (2015). *CFRP ile Beton Yüzeyler Arasındaki Gerilme Aktarım Mekanizmalarının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 183.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GHOROUBİ, Rahim

Uyruğu : İran

Doğum tarihi ve yeri : 30.05.1986, Iran-KHOY

Medeni hali : Bekâr

Telefon : 0 (553) 048 09 99

E-mail : rahim_ghorubi@yahoo.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Islamic Azad University of Shabestar / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	2013
Lisans	Islamic Azad University of Khoy	2009
Lise	Dehkhoda	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019- Devam Ediyor	Çankaya University	Öğretim Görevlisi
2011-2014	Islamic Azad University of Khoy	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

Arapça, Farsca, İngilizce, Türkçe,

Yayınlar

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Sakin, S., Anil, Ö., Ghoroubi, R. and Mercimek, Ö. (2019). *Nonlinear FE Analysis on Bonding Strength of Concrete Strengthened with Anchored CFRP Strip*", ICE Publishing, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings.

2. Ghoroubi, R., Mercimek, Ö. and Anil, Ö. (2020). Açılı CFRP Ankrajlı Şeritler ile Beton Yüzey Arasındaki Gerilme-Deformasyon Davranışı için Yeni Bir Model Önerisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi,* 12(2), 380-386.

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler:

1. Mercimek, Ö., Ghoroubi, R. and Anil, Ö. (2016, 24-28 October). *Behavior of RC Square Column Strengthening with CFRP Strip Subjected to Low Velocity Lateral Impact Loading*, AERS 2016, International Congress on Advanced Earthquake Resistant Structures, Samsun, Turkey.

2. Ghoroubi, R., Anil, Ö. and Mercimek, Ö. (2019, November). *Retrofitting of Damaged Square RC Columns Using with CFRP strip,* 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ankara, Turkey.

3. Mercimek, Ö., Anil, Ö. and Ghoroubi, R. (2019, November). *Proposed New Bond-Slip Model Between Angular CFRP Fan Type Anchoraged CFRP Strip to Concrete Surface*, 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ankara, Turkey.

C. Yazılan uluslararası kitaplar veya kitaplarda bölümler:

1. Ghoroubi, R., Anil, Ö. and Mercimek, Ö. (2019). *"Chapter 16: Behavior of RC Square Column Strengthening with CFRP Strips Subjected to Low Velocity Lateral Impact Loading",* Seismic Isolation, Structural Health Monitoring, and Performance Based Seismic Design in Earthquake Engineering, Book ID: 455422_1_En, Book ISBN: 978-3-319-93156-2.



GAZİ GELECEKTİR..