

**DÜŞÜK DAYANIMLI BETONARME ELEMANLARIN
CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Önder PEKER
501021196**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Haziran 2005**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Alper İLKİ (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Zekai CELEP (İTÜ)

Yrd.Doç.Dr. Şevket ÖZDEN (KOÜ)

MAYIS 2005

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında, karbon lif takviyeli polimer tabakalar ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilen ve düşük dayanımlı beton ile üretilen daire, kare ve dikdörtgen enkesitli betonarme elemanların, eksenel basınç gerilmeleri altındaki davranışları üzerine yapılan deneysel çalışmanın sonuçları sunulmaktadır.

Yoğun emek, sabır ve bilgi birikimi gerektiren bu deneysel çalışma esnasında bana her konuda destek olan, çok şey öğrendiğim ve hayatıma yeni bir bakış açısı getirmemi sağlayan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Alper İLKİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışma boyunca yardımları ile bana destek olan ve hayatıma renk katan değerli arkadaşlarım Emre KARAMUK, Volkan KOÇ, Esen YILMAZ, Cem DEMİR ve burada ismini yazamadığım tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. Maddi destekleri için YKS-Yapkim, SET Beton, Sayın Bülent TURGUT, Sayın Tayfun PALA ve Sayın Metin TİRYAKİ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca ve bu uzun süreçte, maddi, manevi bütün desteklerini bana sunan, hoşgörü, sabır gösteren ve hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan Annem'e ve Babam'a minnettarım. Tezi yazmam sırasındaki manevi desteklerinden dolayı Ceren Özge ALPAT'a çok teşekkür ederim.

Lisans öğrenimim boyunca, desteklerini esirgemeyen ve bana bu mesleği sevdiren değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ÖZDEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2005

Önder Peker

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE HAZIRLANMASI	10
2.1 Giriş	10
2.2 Numune Tasarımı	10
2.3 Numune İmalatı	11
2.3.1 Donatı İskeletlerinin Hazırlanması	11
2.3.2 Şekildeğiştirmeölçerlerin Donatılara Yapıştırılması	13
2.3.3 Kalıpların Hazırlanması	14
2.3.4 Beton Dökümü	16
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ	17
3.1 Giriş	17
3.2 Numunelerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler	17
3.2.1 Donatı Çeliği	17
3.2.2 Beton	20
3.2.3 Güçlendirme Malzemeleri	23
4. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ	27
4.1 Giriş	27
5. DENEY DÜZENEĞİ	34
6. DENEY SONUÇLARI	37
6.1 Giriş	37
6.2 Daire Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçları	38
6.2.1 LSR-C-0-a ve LSR-C-0-b	39
6.2.2 LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b	40
6.2.3 LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b	42
6.2.4 LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S	44

6.2.5 LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD	46
6.2.6 LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b	48
6.2.7 Daire Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	50
6.3 Kare Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçları	55
6.3.1 LSR-R-1-0-40a ve LSR-R-1-0-40b	56
6.3.2 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b	57
6.3.3 LSR-R-1-1-40a-A ve LSR-R-1-1-40b-A	59
6.3.4 LSR-R-1-3-10a ve LSR-R-1-3-10b	61
6.3.5 LSR-R-1-3-20a ve LSR-R-1-3-20b	63
6.3.6 LSR-R-1-3-40a ve LSR-R-1-3-40b	65
6.3.7 LSR-R-1-5-40a ve LSR-R-1-5-40b	67
6.3.8 Kare Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	69
6.4 Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçları	74
6.4.1 LSR-R-2-0-40a ve LSR-R-2-0-40b	75
6.4.2 LSR-R-2-1-40a ve LSR-R-2-1-40b	76
6.4.3 LSR-R-2-1-40a-A ve LSR-R-2-1-40b-A	78
6.4.4 LSR-R-2-3-40a ve LSR-R-2-3-40b	80
6.4.5 LSR-R-2-3-40a-H ve LSR-R-2-3-40a-S	82
6.4.6 LSR-R-2-3-40a-PD ve LSR-R-2-3-40b-PD	84
6.4.7 LSR-R-2-5-40a ve LSR-R-2-5-40b	86
6.4.8 Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	88
6.5 Farklı Enkesite Sahip Numunelerin Karşılaştırmaları	94
6.6 Literatürde Yer Alan Benzer Çalışma ile Karşılaştırmalar	101
7. DAYANIM VE EKSENEL ŞEKİLDEĞİŞTİRMENİN TAHMİNİ	105
8. SONUÇLAR	110
KAYNAKLAR	115
EK A. KALIP ÇİZİMLERİ	118
EK B. ÖLÇÜM ÇERÇEVESİ ÇİZİMLERİ	120
EK C. NUMUNE ÜZERİNE ETKİYEN GERİLMENİN BULUNMASI	121
ÖZGEÇMİŞ	122

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Daire Enkesitli Numunelerin Genel Özellikleri.....	6
Tablo 1.2. Kare Enkesitli Numunelerin Genel Özellikleri.....	7
Tablo 1.3. Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Genel Özellikleri	8
Tablo 1.4. Çalışma Kapsamında Uygulanan Güçlendirme Şekilleri.....	9
Tablo 3.1. Çekme Deneyleri Sonuçları	20
Tablo 3.2. Beton Karışımı	20
Tablo 3.3. Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları	21
Tablo 3.4. Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	23
Tablo 3.5. FRP Malzemelerin ve Çeliğin Birim Ağırlıkları.....	24
Tablo 3.6. Farklı Türdeki FRP Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	24
Tablo 3.7. C1-30 Türü CFRP Malzemenin Mekanik Özellikleri.....	25
Tablo 3.8. C1-30 Türü CFRP Malzemenin Geometrik Özellikleri.....	25
Tablo 3.9. Astar, Macun ve Yapıştırıcıya Ait Genel Özellikler.....	26
Tablo 5.1. Yerdeğiştirmeölçerlerin Özellikleri	34
Tablo 5.2. Şekildeğiştirmeölçerlerin Özellikleri	36
Tablo 6.1. Daire Enkesitli Numunelere Ait Özet Bilgiler	38
Tablo 6.2. LSR-C-0-a ve LSR-C-0-b Deney Sonrası Bilgileri	39
Tablo 6.3. LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b Deney Sonrası Bilgileri	41
Tablo 6.4. LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b Deney Sonrası Bilgileri	43
Tablo 6.5. LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S Deney Sonrası Bilgileri.....	45
Tablo 6.6. LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD Deney Sonrası Bilgileri.....	47
Tablo 6.7. LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b Deney Sonrası Bilgileri	49
Tablo 6.8. Daire Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları.....	54
Tablo 6.9. Kare Enkesitli Numunelere Ait Özet Bilgiler	55
Tablo 6.10. LSR-R-1-0-40a ve LSR-R-1-0-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	56
Tablo 6.11. LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	58
Tablo 6.12. LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	60
Tablo 6.13. LSR-R-1-3-10a ve LSR-R-1-3-10b Deney Sonrası Bilgileri.....	62
Tablo 6.14. LSR-R-1-3-20a ve LSR-R-1-3-20b Deney Sonrası Bilgileri.....	64

Tablo 6.15. LSR-R-1-3-40a ve LSR-R-1-3-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	66
Tablo 6.16. LSR-R-1-5-40a ve LSR-R-1-5-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	68
Tablo 6.17. Kare Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları	73
Tablo 6.18. Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Özet Bilgiler.....	74
Tablo 6.19. LSR-R-2-0-40a ve LSR-R-2-0-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	75
Tablo 6.20. LSR-R-2-1-40a ve LSR-R-2-1-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	77
Tablo 6.21. LSR-R-2-1-40a-A ve LSR-R-2-1-40b-A Deney Sonrası Bilgileri	79
Tablo 6.22. LSR-R-2-3-40a ve LSR-R-2-3-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	81
Tablo 6.23. LSR-R-2-3-40a-H ve LSR-R-2-3-40a-S Deney Sonrası Bilgileri	83
Tablo 6.24. LSR-R-2-3-40a-PD ve LSR-R-2-3-40b-PD Deney Sonrası Bilgileri....	85
Tablo 6.25. LSR-R-2-5-40a ve LSR-R-2-5-40b Deney Sonrası Bilgileri.....	87
Tablo 6.26. Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları.....	93
Tablo 6.27. Farklı Enkesit Tipleri için Hacimsel CFRP Oranları	94
Tablo 6.28. Hacimsel CFRP Oranları Karşılaştırması	94
Tablo 6.29. Düşük ve Normal Dayanımlı Elemanlara Ait Deneysel Sonuçlar	101
Tablo 7.1. Daire Enkesitli Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar.....	107
Tablo 7.2. Kare Enkesitli Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar.....	107
Tablo 7.3. Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar .	108
Tablo 8.1. Ortalama Dayanım ve Şekildeğiştirme Kapasitesi Artış Miktarları	111
Tablo 8.2. Ortalama Deneysel/Analitik Oranlar.....	113

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Boyuna Donatıların Kesilmesi	11
Şekil 2.2 : Daire Enkesitli Numuneler İçin Enine Donatı İmalatı	12
Şekil 2.3 : Donatı Yerleşimi Detayları	12
Şekil 2.4 : Şekildeğiştirmeölçer Yerleşimi	13
Şekil 2.5 : Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması.....	14
Şekil 2.6 : Kalıpların Hazırlanması	15
Şekil 2.7 : Beton Dökümü ve Kür	16
Şekil 3.1 : Çelik Çekme Deneyleri	17
Şekil 3.2 : Enine Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi ($\phi 8$).....	18
Şekil 3.3 : Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi ($\phi 10$)	18
Şekil 3.4 : Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi ($\phi 12$)	18
Şekil 3.5 : Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi ($\phi 14$)	19
Şekil 3.6 : Çekme Çubuğunda Kopma ve Düzgün Doğrusal Uzama Bölgeleri	19
Şekil 3.7 : Standart Silindir Deneyi Düzenegi.....	21
Şekil 3.8 : 28 Günlük Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	22
Şekil 3.9 : 90 Günlük Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	22
Şekil 3.10 : 180 Günlük Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	22
Şekil 3.11 : Dayanım-Beton Yaşı İlişkisi	23
Şekil 3.12 : FRP Malzemelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi	25
Şekil 4.1 : Köşelerin Yuvarlatılması.....	27
Şekil 4.2 : Yuvarlatma İşlemi sonrasında Kare Enkesitli Numuneler	28
Şekil 4.4 : CFRP Tabakaların Uygun Uzunluklarda Kesilmesi	29
Şekil 4.5 : Astar Karışımın Sürülmesi	29
Şekil 4.6 : Macun Karışımının Uygulanması	30
Şekil 4.7 : Yapıştırıcı Karışımın Uygulanması.....	30
Şekil 4.8 : Önceden Hasar Verilen Numunenin Onarımı ve CFRP Sargı İşlemi	31
Şekil 4.9 : Spiral Türü Sargı Uygulaması.....	31
Şekil 4.10 : Etkinlik Artırıcı Detay Uygulaması	32
Şekil 4.11 : Etkinlik Artırıcı Detay İmalatı	33

Şekil 5.1 : Veri Toplama Sistemi Akış Grafiği	34
Şekil 5.2 : Deney Düzenegi	35
Şekil 5.3 : Numune Yüzeyindeki Şekildeğiştirmeölçerler	36
Şekil 6.1 : LSR-C-0-a ve LSR-C-0-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)	39
Şekil 6.2 : Numunelerin Deney Sırasındaki Görüntüleri.....	39
Şekil 6.3 : LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)	40
Şekil 6.4 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	40
Şekil 6.5 : LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	41
Şekil 6.6 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	41
Şekil 6.7 : LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)	42
Şekil 6.8 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	42
Şekil 6.9 : LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	43
Şekil 6.10 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	43
Şekil 6.11 : LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)	44
Şekil 6.12 : H ve S Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	44
Şekil 6.13 : LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	45
Şekil 6.14 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	45
Şekil 6.15 : LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)	46
Şekil 6.16 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	46
Şekil 6.17 : LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	47
Şekil 6.18 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	47
Şekil 6.19 : LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)	48
Şekil 6.20 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	48
Şekil 6.21 : LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	49
Şekil 6.22 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	49
Şekil 6.23 : CFRP Tabaka Sayısı Artışının Boyuna Davranışa Etkisi	50
Şekil 6.24 : CFRP Tabaka Sayısı Artışının Enine Davranışa Etkisi	51
Şekil 6.25 : Ön Hasar Verilmiş Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Davranışlarının Doğrudan Güçlendirilen Numuneler ile Karşılaştırması	52
Şekil 6.26 : Farklı Sargı Şekillerinin Davranışa Etkisi.....	53

Şekil 6.27 : LSR-R-1-0-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	56
Şekil 6.28 : Numunelerin Deney Sonrasındaki Görüntüleri.....	56
Şekil 6.29 : LSR-R-1-1-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	57
Şekil 6.30 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	57
Şekil 6.31 : LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	58
Şekil 6.32 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	58
Şekil 6.33 : LSR-R-1-1-40a-A ve b-A Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri.....	59
Şekil 6.34 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	59
Şekil 6.35 : LSR-R-1-1-40a-A ve LSR-R-1-1-40b-A Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri.....	60
Şekil 6.36 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	60
Şekil 6.37 : LSR-R-1-3-10a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	61
Şekil 6.38 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	61
Şekil 6.39 : LSR-R-1-3-10a ve LSR-R-1-3-10b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	62
Şekil 6.40 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	62
Şekil 6.41 : LSR-R-1-3-20a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	63
Şekil 6.42 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	63
Şekil 6.43 : LSR-R-1-3-20a ve LSR-R-1-3-20b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	64
Şekil 6.44 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	64
Şekil 6.45 : LSR-R-1-3-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	65
Şekil 6.46 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	65
Şekil 6.47 : LSR-R-1-3-40a ve LSR-R-1-3-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	66
Şekil 6.48 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	66
Şekil 6.49 : LSR-R-1-5-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	67
Şekil 6.50 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	67
Şekil 6.51 : LSR-R-1-5-40a ve LSR-R-1-5-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	68
Şekil 6.52 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	68
Şekil 6.53 : CFRP Tabaka Sayısı Artışının Boyuna Davranışa Etkisi	69
Şekil 6.54 : CFRP Tabaka Sayısı Artışının Enine Davranışa Etkisi	70
Şekil 6.55 : Köşe Yarıçapı Değişiminin Boyuna Davranışa Etkisi	71
Şekil 6.56 : Köşe Yarıçapı Değişiminin Enine Davranışa Etkisi	71

Şekil 6.57 : Etkinlik Artırıcı Detay Uygulamasının Boyuna ve Enine Davranışa Etkisi	72
Şekil 6.58 : LSR-R-2-0-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	75
Şekil 6.59 : Numunelerin Deney Sırasındaki Görüntüleri.....	75
Şekil 6.60 : LSR-R-2-1-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	76
Şekil 6.61 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	76
Şekil 6.62 : LSR-R-2-1-40a ve LSR-R-2-1-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	77
Şekil 6.63 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	77
Şekil 6.64 : LSR-R-2-1-40a-A ve b-A Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri.....	78
Şekil 6.65 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	78
Şekil 6.66 : LSR-R-2-1-40a-A ve LSR-R-2-1-40b-A Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri.....	79
Şekil 6.67 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	79
Şekil 6.68 : LSR-R-2-3-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	80
Şekil 6.69 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	80
Şekil 6.70 : LSR-R-2-3-40a ve LSR-R-2-3-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	81
Şekil 6.71 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	81
Şekil 6.72 : LSR-R-2-3-40a-H ve a-S Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	82
Şekil 6.73 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	82
Şekil 6.74 : LSR-R-2-3-40a-H ve LSR-R-2-3-40a-S Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	83
Şekil 6.75 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	83
Şekil 6.76 : LSR-R-2-3-40a-PD ve b-PD Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	84
Şekil 6.77 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	84
Şekil 6.78 : LSR-R-2-3-40a-PD ve LSR-R-2-3-40b-PD Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	85
Şekil 6.79 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	85
Şekil 6.80 : LSR-R-2-5-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri	86
Şekil 6.81 : a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri	86
Şekil 6.82 : LSR-R-2-5-40a ve LSR-R-2-5-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri	87
Şekil 6.83 : Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	87

Şekil 6.84 : CFRP Tabaka Sayısı Artışının Boyuna Davranışa Etkisi	88
Şekil 6.85 : CFRP Tabaka Sayısı Artışının Enine Davranışa Etkisi	89
Şekil 6.86 : Önceden Hasar Verilip Güçlendirilen Numunelerin Boyuna ve Enine Davranışlarının Doğrudan Güçlendirilen Numuneler ile Karşılaştırılması	90
Şekil 6.87 : Farklı Sargı Şekillerinin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Davranışa Olan Etkisi	91
Şekil 6.88 : Etkinlik Artırıcı Detay Uygulamasının Boyuna ve Enine Davranışa Olan Etkisi	92
Şekil 6.89 : 1 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	95
Şekil 6.90 : 1 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	96
Şekil 6.91 : 3 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	97
Şekil 6.92 : 3 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	98
Şekil 6.93 : 5 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	99
Şekil 6.94 : 5 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri	100
Şekil 6.95 : Düşük ve Normal Beton Dayanımına Sahip 3 ve 5 Kat CFRP ile Sargılanmış Daire Enkesitli Numunelere ait Gerilme – Ş.D. İlişkileri ..	102
Şekil 6.96 : Düşük ve Normal Beton Dayanımına Sahip 3 ve 5 Kat CFRP ile Sargılanmış Kare Enkesitli Numunelere ait Gerilme – Ş.D. İlişkileri ...	103
Şekil 6.97 : Düşük ve Normal Beton Dayanımına Sahip 3 ve 5 Kat CFRP ile Sargılanmış Dikdörtgen Enkesitli Numunelere ait Gerilme – Ş.D. İlişkileri	104
Şekil 7.1 : Daire Enkesitli Numuneler için Deneysel – Analitik Sonuçların Karşılaştırılması	108
Şekil 7.2 : Kare Enkesitli Numuneler için Deneysel – Analitik Sonuçların Karşılaştırılması	109
Şekil 7.3 : Dikdörtgen Enkesitli Numuneler için Deneysel – Analitik Sonuçların Karşılaştırılması	109

SEMBOL LİSTESİ

b	: dörtgen enkesitin eni
d	: daire enkesit çapı
ϵ_{cc}	: 500 mm ölçüm boyundan ölçüden göçme anındaki şekildeğiştirme
ϵ_{ch}	: 60 mm ölçüm boyundan ölçüden göçme anındaki şekildeğiştirme
ϵ_{co}	: sargısız beton göçme anındaki şekildeğiştirmesi
$\epsilon_{h,rup}$	: beton elemana sarılmış CFRP tabakaların en büyük çekme dayanımı
ϵ_{maks}	: boyuna veya enine doğrultuda göçme anındaki en büyük şekildeğiştirme
ϵ_{su}	: donatı kopma birim uzaması
ϵ_{smaks}	: donatı en büyük uzama ve kısalması
ϵ_y	: donatı akma birim uzaması
E_c	: standart silindir elastisite modülü
E_{cort}	: standart silindir ortalama elastisite modülü
E_{FRP}	: CFRP tabakasının elastisite modülü
f'_c	: standart silindir basınç dayanımı
f'_{cort}	: ortalama standart silindir basınç dayanımı
f'_{co}	: sargısız beton basıncı eleman dayanımı
f'_{coi}	: deneyin yapıldığı güne karşı gelen sargısız beton basıncı eleman dayanımı
f_y	: donatı akma dayanımı
f_{smaks}	: donatı en büyük çekme dayanımı
f'_{lmaks}	: en büyük yanal sargı basıncı
h	: dörtgen enkesitin boyu
κ_a	: kesit şekline bağlı etki faktörü
l	: numune yüksekliği
ϕ	: donatı çapı
P_{maks}	: numunenin taşıyabildiği en büyük yük
ρ	: boyuna donatı oranı
ρ_h	: hacimsel CFRP oranı
σ_c	: numuneye etkiyen net gerilme
σ_{maks}	: numunenin taşıyabildiği en büyük gerilme

DÜŞÜK DAYANIMLI BETONARME ELEMANLARIN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Dünya’da deprem riski taşıyan bölgelerde, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, mevcut birçok yapı, deprem kuvvetleri karşısında yetersiz performans göstermektedir. İlgili yönetmelik ve standartlara uygun olmayan imalatlar ve/veya eski yönetmelikler bu yetersizliğin en büyük sebeplerindendir. Türkiye’de özellikle tasarım ve imalattan kaynaklanan en önemli kusurlardan ikisi; düşük beton dayanımı ve yetersiz enine donatı kullanımıdır. Bu durumdaki taşıyıcı elemanlar, özellikle de kolonlar, deprem kuvvetleri etkisi altında gevrek davranış göstererek hasar görmekte hatta tamamen göçmektedir. Bu şartlar altında deprem güvenlikleri yeterli olan mevcut yapıların güçlendirilmeleri gereği açıktır.

Yapıların güçlendirilmesinde, geleneksel tekniklere ek olarak yeni teknikler her geçen gün geliştirilmekte ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmaktadır. Lif takviyeli polimer (fiber reinforced polymer – FRP) malzemeler ile güçlendirme de bu yeni tekniklerden biridir. FRP ile güçlendirme, hızlı ve kolay uygulanabilir olması, yüksek dayanıma, dayanıklılığa, düşük özağırlığa sahip olması, mimaride değişiklik gerektirmemesi ve yapının yük dağılımına etki etmemesi gibi sebeplerden dolayı tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, lif takviyeli polimer malzemeler ile güçlendirilmiş, daire, kare ve dikdörtgen enkesite sahip, düşük dayanımlı betonarme elemanların eksenel basınç gerilmeleri altındaki davranışları incelenmiştir. Enkesit şekli, FRP sargı kalınlığı, yükleme tipi, köşe yarıçapı, ön-hasar, farklı sargı şekilleri ve etkinlik artırıcı detay uygulaması çalışmada incelenen değişkenlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, lif takviyeli polimer malzemeler ile düşey taşıyıcı elemanların enine doğrultuda sargılanmasının, basınç dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve boyuna donatıların burkulmasının çok yüksek şekildeğiştirmelere kadar geciktirdiği gözlenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda numuneler için elde edilen en büyük dayanım ve buna karşı gelen şekildeğiştirme değerleri, daha önce İlki ve diğ. (2004c) tarafından sunulan amprik bağıntılar kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre kullanılan teorik modelin deneysel sonuçlara kabul edilebilir yakınlıkta değerler ürettiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: lif takviyeli polimer, karbon, sargılama, dayanım, süneklik.

LOW STRENGTH REINFORCED CONCRETE MEMBERS STRENGTHENED WITH CFRP SHEETS

SUMMARY

In earthquake prone regions of the world, particularly in developing countries, many existing structures exhibit poor seismic performance against earthquake forces. Most frequently observed deficiencies may be either because of the insufficiency of relatively older codes or due to inadequate construction practice. In Turkey, the most common deficiencies are insufficient ductility and low concrete strength. These deficiencies cause significant reductions in strength and ductility. For preventing severe seismic damage, the deformability and axial capacity of the structural members may need to be enhanced. For several decades various strengthening techniques have been developed. One of them is jacketing concrete members with fiber reinforced polymer (FRP) composite sheets. In this study, the results of the experiments carried on circular, square and rectangular cross-section, low strength reinforced concrete members strengthened with fiber reinforced polymer composites are presented. The aim was to investigate the effect of cross-section shape, FRP jacket thickness, loading type, corner radius, pre-damage, different wrapping techniques and application of special details on the behavior of FRP jacketed reinforced concrete members. Test results indicated that external lateral confinement by fiber reinforced polymer jackets improved the compressive strength and deformability of the specimens, as well as retarding the buckling of the longitudinal re-bars. The compressive strengths and the corresponding axial deformations of the CFRP jacketed columns were also predicted by the stress-strain model proposed by the Ilki et al. (2004c) before. It was seen that the predicted strength and ultimate axial deformations were in reasonable agreement with experimental data.

Key Words: fiber reinforced polymer, carbon, confinement, strength, ductility.

1. GİRİŞ

17 Ağustos 1999, saat 03.02, çoğu uykusunda milyonlarca insan, sadece 7.4 büyüklüğünde şiddetli bir depreme değil aynı zamanda yüzyılın en büyük felaketlerinden birine uyandı. Bu afet sonrasında resmi kayıtlara göre ellibinden fazla ölü, yüz binlerce yaralı, milyonlarca evsiz ve milyar dolarlar seviyesinde ekonomik kayıp vardı. Topraklarının %96'sı deprem tehlikesi altında olan ve nüfusunun %98'i bu bölgelerde yaşayan ülkemizde, yapıların depreme dayanıklı inşa edilmemiş olduğunu ve bunun ne kadar kötü sonuçlara sebep olabileceğini Türkiye ile birlikte tüm dünya da en acı şekilde bir kez daha öğrendi.

Türkiye'de ve gelişmekte olan birçok ülkede mevcut yapıların deprem kuvvetleri karşısında gösterdiği kötü davranışın birçok sebebi olmakla birlikte bunlardan ikisi çok daha ön plandadır; düşük beton dayanımı ve yetersiz süneklik. Depreme dayanıklı yapı tasarımında tüm dünyada benimsenen ilke, yapının küçük şiddetteki depremleri elastik sınırlar içinde yani hasarsız, orta şiddetteki depremleri elastik sınır ötesinde, ancak önemsiz ve kolayca tamir edilebilecek hasarlarla, çok şiddetli depremleri ise büyük hasarla fakat sistem tamamen göçmeden ve can kaybı olmadan karşılayabilmesidir. Bu bağlamda, yapı, deprem kuvvetlerine maruz kaldığında, taşıyıcı sistem elemanlarının sünek davranış göstermesi ve enerji yutması, yapının göçmeden ayakta kalabilmesi için önemlidir. Mevcut yapılarda bu sünekliğin sağlanamamasının en önemli sebeplerinden biri yetersiz enine donatı kullanımıdır. Ayrıca düşük beton dayanımı, kolonlar üzerindeki eksenel gerilmenin artmasına, bu da elemanların gevrek davranması sonucunu doğurmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı, yeni yapılar ilgili yönetmelikler doğrultusunda tasarlanmalı, mevcut yetersiz yapılar ise uygun teknik kullanılarak güçlendirilmelidir.

Mevcut yapıların güçlendirilmesi için farklı amaçlar doğrultusunda birçok güçlendirme tekniği bulunmaktadır. İstenen kriterler doğrultusunda en uygun teknik seçilmelidir. Taşıyıcı elemanların lif takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi bu yöntemlerden biridir. Karbon, cam ve aramid gibi malzemelerden üretilen bu lifler, yüksek elastisite modülüne ve dayanıma sahip,

birim ağırlığı düşük, uygulaması kolay ve hızlı yapılabilen, çevre koşullarına dayanıklı malzemelerdir.

Karbon lif takviyeli polimer kompozitler ile güçlendirme, yeni bir teknik olmasına rağmen bu güne kadar yapılmış çalışmalar bir hayli fazladır. Özellikle beton elemanlar üzerinde çok fazla çalışma mevcuttur. Birçok değişkene bağlı olarak FRP kompozitler ile güçlendirilen yapı elemanlarının davranışı incelenmiştir. Ancak donatılı, yani betonarme elemanlar üzerinde yapılan çalışma sayısı fazla değildir. Bu deneysel çalışmada, betonarme elemanlar karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kompozitler ile enine doğrultuda sargılanmış ve literatürde bu yöndeki boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

Bu deneysel çalışma öncesinde incelenen bazı araştırmaların özeti şöyledir;

Mirmiran ve Shahawy (1997), FRP kompozit malzemeleri kullanarak ürettikleri tüp elemanlarla daire enkesitli beton elemanları sararak, bu tür bir sargılamanın elemanların eksenel basınç altındaki davranışına etkisini araştırmış ve bu yöntemin elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca yaptıkları deneylerin sonuçlarını literatürdeki analitik modeller ile karşılaştırmışlardır.

Demers ve Neale (1999), cam lif takviyeli ve karbon lif takviyeli polimer (GFRP ve CFRP) malzeme ile güçlendirdikleri enine ve boyuna donatılı 16 adet daire enkesitli numunenin, enine ve boyuna donatılarının değiştiği, donatıda meydana getirilen korozyon nedeni ile oluşan ön hasarın ve sargı sayısının değişken olarak alınıp eksenel yükler altında incelendiği bu çalışmada kompozit malzemelerle yapılan güçlendirmenin süneklik ve eksenel yük taşıma kapasitesini artırdığı gözlenmiştir. Bu çalışmada önceden hasar verilip güçlendirilen numunelerin doğrudan güçlendirilen özdeş numunelere çok yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Toutanji (1999), yaptığı deneysel ve analitik çalışmasında, daire enkesitli beton elemanları farklı türden lif sargıları ile güçlendirerek (cam ve karbon lif), elemanların eksenel yükler altındaki davranışını incelemiş, deneyler sonucunda güçlendirilmiş elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesi gibi özelliklerinin büyük ölçüde geliştiğini göstermiştir. Ayrıca lif sargıları ile güçlendirilmiş betonun davranışının belirlenebilmesi için bir analitik model de önermiştir.

Fukuyama ve Sugano (2000), CFRP tabakaları kullanarak onarım ve güçlendirme çalışmalarının ilk olarak Japonya'da geliştirildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalar 1979 yılında başlamış olmasına rağmen FRP malzeme kullanılarak güçlendirme üzerine deneysel ve teorik çalışmalar 1990'ların sonuna doğru artmıştır.

Xiao ve Wu (2000), CFRP sargıları ile güçlendirilmiş daire enkesitli numuneler üzerinde çalışarak, CFRP sargı kalınlığının ve numune beton dayanımlarının davranışa olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonunda karbon lif ile sargılamanın dayanım ve sünekliği arttırdığını göstermiş ve bu ilişkiyi açıklaması amacıyla bir analitik model önermişlerdir.

Wang ve Restrepo (2001), cam lif takviyeli polimer (GFRP) malzeme ile güçlendirdikleri enine ve boyuna donatılı 3 adet kare ve 3 adet dikdörtgen enkesitli numunenin, eksenel yükler altındaki davranışlarını incelemişler ve bir analitik model önermişlerdir. Bu çalışma sonucunda, numunelerin dayanım ve şekildeğiştirme özelliklerinin iyileştiğini, ayrıca enine doğrultuda yapılan sargılamanın boyuna donatıların burkulmasını önlediğini belirtmişlerdir.

İlki ve Kumbasar (2002), tarafından yapılan çalışmada 20 adet daire enkesitli, orijinal olarak denenmiş hasarlı ve hasarsız numuneler CFRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirmişler ve monoton artan veya tekrarlı yükler altında test edilmişlerdir. Bu çalışma sonucunda CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş elemanların dayanım ve şekildeğiştirmesinin CFRP tabaka kalınlığı ile orantılı olarak önemli ölçüde arttığı belirtilmiş olup önerdikleri analitik modeli, çalışmalarındaki ve literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Tan (2002), cam ve karbon lifli polimer kompozitlerle güçlendirilmiş 52 adet 115-420 mm boyutunda dikdörtgen enkesitli betonarme elemanın eksenel yükler altındaki davranışının incelendiği bu çalışmada farklı sargı şekillerinin eksenel yük taşıma kapasitesine ve sünekliğe olan etkisi gözlemlenmiştir.

Chaallal, diğ (2003), tarafından yapılan çalışmada 6 seri halinde üretilen toplam 90 adet kare ve dikdörtgen enkesitli beton numune karbon lif takviyeli kompozitlerle enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiştir. Bu çalışmada beton basınç dayanımı (20-41.4 MPa), enkesit oranı (1-0.654-0.5), polimer lif sargı sayısı (0-1-2-3-4) değişken olarak alınmıştır. Çalışma sonunda kompozit malzemelerle yapılan

güçlendirmenin eksenel yük taşıma kapasitesini ve sünekliği artırdığı, düşük beton dayanımlı numunelerde bu artışı oranının daha da fazla olduğu gözlenmiştir.

Maalej ve diğ (2003), betonarme kesitler üzerinde yaptıkları çalışmada iki farklı güçlendirme tekniği kullanmış, geliştirdikleri analitik model ile karşılaştırma yaparak modelin etkinliğini gözlemişlerdir. Ayrıca geliştirdikleri analitik modeli, bir parametrik çalışma ile enine boyut oranı, 2, 4, 6, 8 olmak üzere yatay FRP sargı sayısı, kolonların köşe yarıçapı, düşey FRP miktarı (yüzde olarak kolon kesit alanı) değişimlerini göz önüne alarak incelemişlerdir.

İlki ve Kumbasar (2003), karbon lif takviyeli polimer (CFRP) malzeme ile güçlendirilmiş 8 adet kare, 8 adet dikdörtgen, 27 adet daire enkesitli numunenin, monoton artan ve tekrarlı eksenel yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kendi deneysel sonuçlarını başka araştırmacıların deneysel sonuçları ve analitik modellerinden çıkan sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda bütün kesit tiplerindeki numunelerin eksenel yük taşıma kapasiteleri ve sünekliklerinin (FRP sargılama ile) önemli oranda arttığı gözlenmiştir. Özellikle de silindir numunelerin eksenel yük taşıma kapasiteleri daha fazla artmıştır. Bazı numunelerin ön hasar verilerek güçlendirilmesi ve tekrarlı yükler altında denenmiş olması davranış açısından belirgin bir dezavantaja sebep olmamıştır.

İlki ve diğ (2003), düşük ve normal dayanımlı, CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş, daire enkesitli beton elemanlar üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda, bu güçlendirme tekniğinin sarılmamış beton dayanımı düşük elemanlarda daha belirgin olmak üzere, CFRP tabaka kalınlığıyla orantılı olarak önemli ölçüde dayanım ve şekildeğiştirme artışı sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

İlki ve diğ (2003), yaptıkları çalışmada, 8 adet, donatısız düşük beton basınç dayanımlı (10 MPa) numune üzerinde, 1, 3, 5 kat karbon polimer lif sargı sayısının değişiminin süneklik ve eksenel yük taşıma kapasitesine olan etkisini, şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçerlere ek olarak fotogrametrik ölçüm teknikleri kullanılarak incelemişlerdir.

Bu deneysel çalışmada, düşük beton dayanımına sahip, farklı enkesit şekillerindeki betonarme elemanlar, enine doğrultuda CFRP kompozitler ile güçlendirilmiş, monoton veya tekrarlı artan eksenel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Türkiye'deki mevcut yapıların durumunu temsil etmesi açısından numunelerin

retiminde, 28 günlük dayanımı 10.94 MPa olan beton ile St220 düz yüzeyli donatı çeliği kullanılmıştır.

Düşük dayanımlı beton ile üretilen daire, kare ve dikdörtgen enkesitli betonarme numuneler sırasıyla 12, 14 ve 14 olmak üzere toplam 40 adettir. 8 numune hariç diğer tüm numunelerin birer özdeşi bulunmaktadır. Bu, farklı yükleme ve ölçüm sistemlerinin kullanılmasını ve sağlıklı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Tüm enkesit şekillerinde, numuneler orijinal (sargısız), 1, 3 veya 5 kat CFRP sargılı şekilde deneye tabi tutulmuşlardır.

Numuneler isimlendirilirken, her bir numunenin sahip olduğu özellikleri yansıtmasına zen gösterilmiştir. Bu amaçla, beton dayanımı, enkesit şekli, kenar uzunlukları oranı, CFRP sargı sayısı, köşe yarıçapı ve eğer varsa ek değişken (n hasar, farklı sargı şekilleri veya etkinlik artırıcı detay) numune isminde kullanılmıştır. Örneğin; LSR-C-3-a-PD numunesinde LSR, düşük beton dayanımını (**L**ow **S**trength) ve numunenin donatıya sahip olduğunu (**R**einforced), C, enkesit şeklini (**C**ircular), **3**, CFRP sargı sayısını, **a**, iki özdeş numuneden biri olduğunu, PD ise n hasar (**P**re-**D**amage) verildikten sonra onarılıp, güçlendirildiğini göstermektedir. Dikdörtgen enkesite sahip LSR-R-2-3-40a-H numunesinin isminde ise, LSR, düşük beton dayanımını ve donatıyı, R, enkesit şeklini (**R**ectangular), 2, kenar uzunlukları oranını, 3, CFRP sargı sayısını, 40, köşe yarıçapını, H ise etriye tipi (**H**oop) sargı yapıldığını göstermektedir.

Kesit tiplerine göre sınıflandırılmış genel numune özellikleri, tablolarda sunulmuştur, Tablo 1.1, 1.2, 1.3. Bu tablolarda f'_c , d, b, h ve l sırasıyla 180 günlük standart silindir basınç dayanımını, daire enkesitin çapını, dörtgen enkesitlerin enini, boyunu ve numunenin yüksekliğini göstermektedir.

Tablo 1.1 Daire Enkesitli Numunelerin Genel Özellikleri

Numune İsmi	f'_c 180 gün (MPa)	Numune $d \times l$ (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
LSR-C-0-a	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	0
LSR-C-0-b	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	0
LSR-C-1-a	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	1
LSR-C-1-b	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	1
LSR-C-3-a	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	3
LSR-C-3-b	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	3
LSR-C-3-a-PD	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	3
LSR-C-3-b-PD	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	3
LSR-C-3-a-H	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	3
LSR-C-3-a-S	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	3
LSR-C-5-a	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	5
LSR-C-5-b	15.92	250×500	$6\phi 10$	$\phi 8/145$	5

Daire tipi enkesite sahip toplam 12 numuneden 2'si deney sırasında yaklaşık 0.003 eksenel kısalmaya maruz bırakılarak hasar verilip onarıldıktan sonra, 2'si farklı sargı şekilleri (etkiye ve spiral tipi) kullanılarak, diğer numuneler ise doğrudan güçlendirilmiştir.

Tablo 1.2 Kare Enkesitli Numunelerin Genel Özellikleri

Numune İsmi	f'_c 180 gün (MPa)	Numune $b \times h \times l$ (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
LSR-R-1-0-40a	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	0
LSR-R-1-0-40b	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	0
LSR-R-1-1-40a	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	1
LSR-R-1-1-40b	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	1
LSR-R-1-1-40a-A	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	1
LSR-R-1-1-40b-A	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	1
LSR-R-1-3-10a	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
LSR-R-1-3-10b	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
LSR-R-1-3-20a	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
LSR-R-1-3-20b	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
LSR-R-1-3-40a	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
LSR-R-1-3-40b	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
LSR-R-1-5-40a	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	5
LSR-R-1-5-40b	15.92	250×250×500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	5

Kare enkesite sahip numunelerden 2'si polimer lif sargının etkinliğini artırıcı detay kullanılarak, 4'ü de diğer dörtgen enkesite sahip numunelerden (40 mm) farklı olarak köşeleri, 10 ve 20 mm yarıçapında çeyrek daire formunda yuvarlatılarak üretildikten sonra, kalan numuneler ise doğrudan güçlendirilmiştir.

Tablo 1.3 Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Genel Özellikleri

Numune İsmi	f'_c 180 gün (MPa)	Numune $b \times h \times l$ (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
LSR-R-2-0-40a	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	0
LSR-R-2-0-40b	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	0
LSR-R-2-1-40a	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	1
LSR-R-2-1-40b	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	1
LSR-R-2-1-40a-A	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	1
LSR-R-2-1-40b-A	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	1
LSR-R-2-3-40a	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
LSR-R-2-3-40b	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
LSR-R-2-3-40a-PD	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
LSR-R-2-3-40b-PD	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
LSR-R-2-3-40a-H	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
LSR-R-2-3-40a-S	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
LSR-R-2-5-40a	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	5
LSR-R-2-5-40b	15.92	150×300×500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	5

Dikdörtgen enkesite sahip numuneler hem polimer lif sargının etkinliğini artırıcı detay hem de farklı sargı şekilleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Ayrıca bu enkesite sahip numunelerden 2'si de ön hasar verildikten sonra onarıldıktan sonra güçlendirilmiştir.

Tablo 1.4'te çalışmada denenen numunelere ait güçlendirme şekilleri bulunabilir.

Tablo 1.4 Çalışma Kapsamında Uygulanan Güçlendirme Şekilleri

Kesit	Numune Sayısı		Güçlendirme
Daire	10	2	Hasar Verilip
		2	Farklı Sargı Şekilleri İle
		6	Doğrudan
Kare	12	2	Farklı Köşe Yarıçapı İle Üretilip
		4	Etkinlik Artırıcı Detay İle
		6	Doğrudan
Dikdörtgen	12	2	Hasar Verilip
		2	Farklı Sargı Şekilleri İle
		2	Etkinlik Artırıcı Detay İle
		6	Doğrudan

Yapılan deneyler sonucunda, CFRP tabakaları ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilen ve eksenel yükler altında deneye tabi tutulan numunelerin dayanımlarının ve şekildeğiştirme yeteneklerinin, CFRP sargı sayısı ile bağlantılı olarak, önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

2. NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE HAZIRLANMASI

2.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında, enine doğrultuda CFRP sargılanarak güçlendirilen, 500 mm yüksekliğindeki betonarme kolonların, monoton veya tekrarlı artan eksenel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Numuneler, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında imal edilmiş, deneyleri ise Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.2 Numune Tasarımı

Türkiye'deki mevcut yapıların genel durumunu temsil etmek üzere, numuneler 28 günlük basınç dayanımı yaklaşık 10 MPa olan beton ve St220 düz yüzeyli yapı çeliği kullanılarak üretilmişlerdir. Beton dökümü sırasında alınan standart silindir numuneler 28, 90 ve 180. günlerde deneye tabi tutulmuş ve ortalama dayanımlar sırası ile 10.94 MPa, 13.94 MPa ve 15.92 MPa olarak bulunmuştur. Numuneler 3 farklı kesit tipinde, daire ($\phi 250 \times 500$ mm), kare ($250 \times 250 \times 500$ mm) ve dikdörtgen ($150 \times 300 \times 500$ mm) olarak tasarlanmıştır.

Kullanılan boyuna donatı oranı $\rho=0.01$ olacak şekilde seçilmiş ve daire enkesitli numunelerde $6\phi 10$, kare enkesitli numunelerde $4\phi 14$, dikdörtgen enkesitli numunelerde ise $4\phi 12$ boyuna donatı kullanılmıştır. Enine donatı seçiminde tasarım kriteri olarak, numune test bölgesinde (yükseklik doğrultusunda orta 250 mm) boyuna donatıda burkulma olması ancak bunun CFRP tabakası tarafından geciktirilmesi veya tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla kullanılan $\phi 8$ enine donatı, test bölgesinde, boyuna donatı çapının yaklaşık 14.5 katı uzunlukta bir aralığa sahiptir. Bu da daire en kesitli numuneler için 145 mm, kare en kesitli numunelerde 200 mm ve dikdörtgen en kesitli numuneler için 175 mm aralığa karşılık gelmektedir. Enine donatı, test bölgesi dışında göçme olması istenmediğinden enkesit tipine göre uygun aralık seçilerek (sıklaştırılarak) boyuna donatılara bağlanmıştır. Enine donatı kancaları da hasar oluşturmayacak şekilde 135°

kıvrılarak 100 mm boyunda imal edilmiştir. Daire enkesitli numunelerde, günümüz yapılarında genel olarak spiral tip enine donatı uygulanmasına karşın, deney sistemine uygun olması açısından etriye tipi enine donatı kullanımı tercih edilmiş, bindirme boyu olarak 7 ϕ seçilmiş ve kanca kullanılmamıştır.

Önceki çalışmalardan elde edilen bilgilere göre, dörtgen enkesitli numunelerin köşelerinde gerilme yığılmaları oluşmakta bu da CFRP tabakanın bu bölgelerden yırtılmalarına neden olmaktadır. Bunu engellemek için numune köşeleri 40 mm çapında çeyrek daire formunda yuvarlatılması düşünülmüş, bir değişken olarak da 10 ve 20 mm 'lik köşe yarıçaplarına sahip numuneler de üretilerek, bunun davranışa etkisinin incelenmesine karar verilmiştir.

2.3 Numune İmalatı

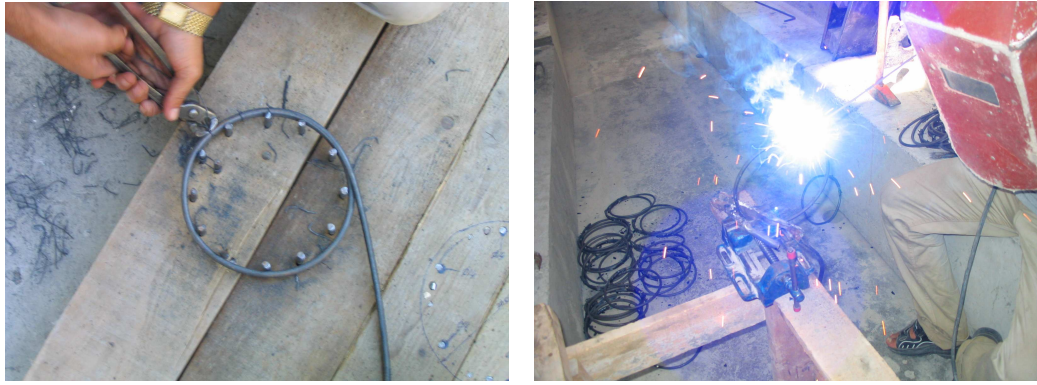
2.3.1 Donatı İskeletlerinin Hazırlanması

Türkiye'deki mevcut yapıların durumu temsil etmek için tüm numunelerde St220 düz yüzeyli donatı çeliği kullanılmıştır. Her bir kesit tipine göre boyuna donatı oranı $\rho=0.01$ olacak şekilde seçilen donatılar, doğrudan aksenal yüke maruz kalmamaları için numune yüksekliğinden (500 mm) altta ve üstte 20 mm boşluk kalacak şekilde 460 mm uzunluğunda kesilmiştir, Şekil 2.1. 10 mm çapındaki boyuna donatıların kesiminde demir makası kullanılmasına karşın, 12 ve 14 mm çapındaki donatılar spiral kesme aleti yardımıyla istenen boyda kesilmişlerdir.



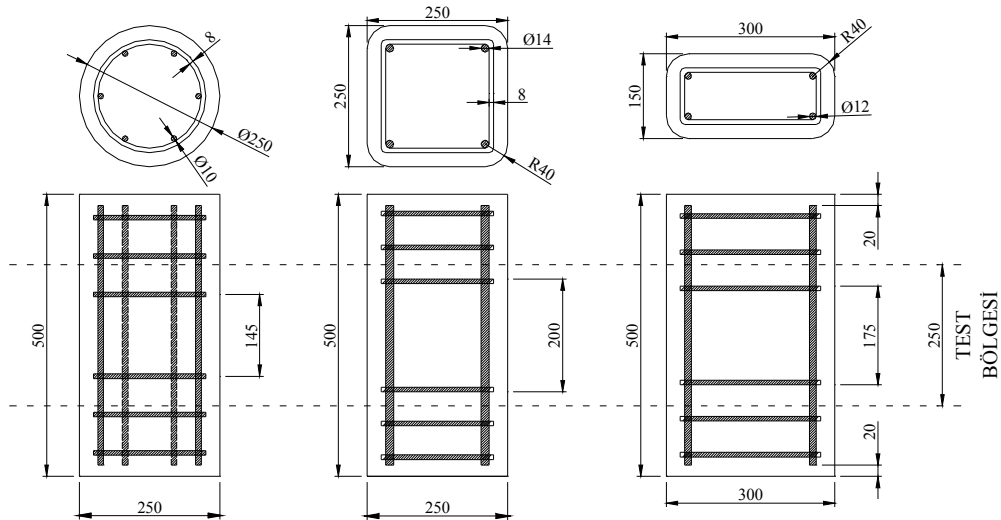
Şekil 2.1 Boyuna Donatıların Kesilmesi

Enine donatı imalatında, her bir kesit tipi için metraj yapılmış ve yaklaşık etriye uzunlukları hesaplandıktan sonra donatılar demir makası ile kesilmiştir. Dörtgen enkesite sahip numunelerde 100 mm uzunluğundaki kancalar, etriye kolu ile 135° kıvrılmış ve deney sırasında enine donatının açılması gibi bir sorun ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Daire enkesite sahip numunelerde genel uygulamanın aksine, kullanılan etriye tipi için bir kıvrırma tezgâhı tasarlanmıştır. Bu şekilde enine donatılar bir çember oluşturacak ve 7φ bindirme olacak şekilde birbirine bağlandıktan sonra her iki yüzünden kaynaklanarak, bu tür enine donatı için de açılma sorunu olmaması hedeflenmiştir, Şekil2.2.



Şekil 2.2 Daire Enkesitli Numuneler İçin Enine Donatı İmalatı

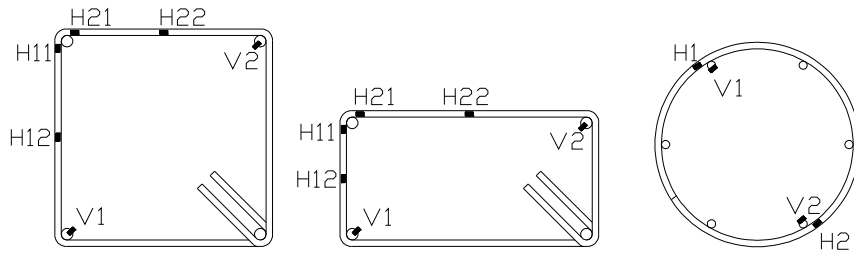
Donatılar, uygun uzunluklarda kesilip, her bir kesit tipine yetecek miktarda enine donatı imal edildikten sonra bağ teli ile daha önceden karar verilmiş olan yerlerine bağlanarak donatı iskeletleri hazırlanmıştır. Şekil 2.3'de bütün kesit tipleri için kullanılan donatı yerleşimi detayları görülmektedir.



Şekil 2.3 Donatı Yerleşimi Detayları

2.3.2 Şekildeğiştirmeölçerlerin Donatılara Yapıştırılması

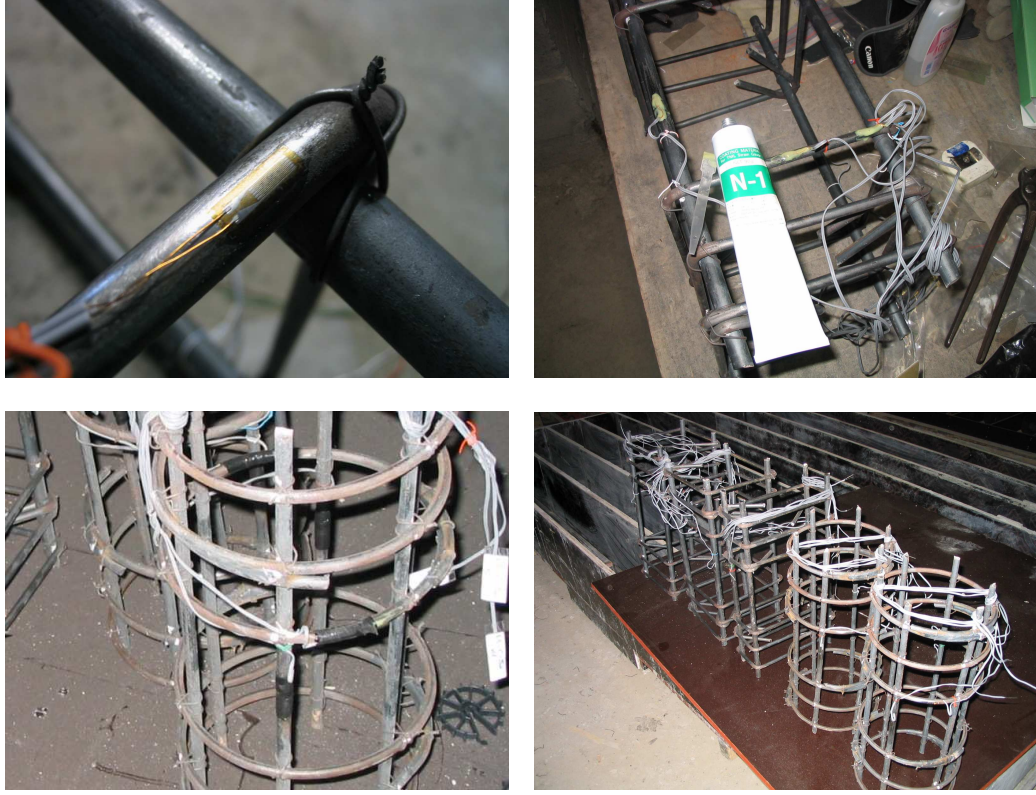
Bu çalışma kapsamında deneye tabi tutulan 40 numuneden 5 tanesinin enine ve boyuna donatılarına şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır. Yapıştırma öncesinde belirlenen yerler üç farklı kalınlıkta zımpara ile pas ve imalattan kalan artıklardan temizlenmiş, şekildeğiştirmeölçerlerin yapışması için uygun yüzey elde edildikten sonra asetonlu pamuk yardımıyla yüzey temizlenmiştir. Hazırlanan yüzeylere cyanacrylat esaslı güçlü yapıştırıcılar kullanılarak şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmış ve yapıştırmanın tam anlamı ile sağlanması için şekildeğiştirmeölçer üzerine bir dakika süre ile sabit basınç etkilmiştir. Dörtgen enkesite sahip numunelerde, test bölgesindeki (orta 250 mm) bir enine donatıya, kancanın çaprazındaki köşeye birleşen iki kenarın ortasına ve köşesine birer adet olmak üzere, FLA-3-11-1-L tipi 3 mm ölçüm boyuna sahip 4 adet, bu iki kenarın birleşmediği yerdeki iki çapraz konumda yer alan boyuna donatının tam ortasına gelecek şekilde YFLA-5-1L tipi 5 mm ölçüm boyuna sahip 2 adet şekildeğiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Daire enkesite sahip numunelerde ise yine test bölgesindeki bir enine donatıda, bindirmenin en az 90° uzağına gelecek şekilde FLA-3-11-1-L tipi iki adet karşılıklı ve bunlara en yakın 2 adet boyuna donatının ortasına YFLA-5-1L tipi şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır, Şekil 2.4 ve 2.5.



Şekil 2.4 Şekildeğiştirmeölçer Yerleşimi

Yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerin üzerine sudan korunmaları için iki kat olmak üzere N-1 yalıtım malzemesi sürülmüş ve kuruması beklendikten sonra, bitüm içerikli VM bant ile sarılarak beton dökümü sırasında zarar görmeleri engellenmiştir. Tüm bunların üzerine bir kat olmak üzere yalıtım bandı sarılmıştır. Bu işlemler boyunca donatı ile beton arasındaki aderans kaybını en az düzeyde tutabilmek için, donatı üzerinde mümkün olduğunca küçük bir alan yalıtılmaya çalışılmıştır.

Şekildeğiştirmeölçer kabloları en kısa mesafeden yüzeye çıkacak şekilde toparlanıp, uçlarına isimlerini gösteren notlar yazıldıktan sonra, beton dökümü sırasında zarar görmeyecek şekilde paketlenmiştir.



Şekil 2.5 Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması

2.3.3 Kalıpların Hazırlanması

Numunelerin üretimi için son aşama olan kalıp üretimi, hem laboratuarda mevcut bulunan hem de yeni temin edilen malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Her enkesit tipi için farklı kalıp sistemleri tasarlanmış ve gerekli malzeme buna göre sağlanmıştır. Kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler için ahşap (plywood) kalıplar, numuneler yatay bir konumda iken döküm olacak şekilde tasarlanıp birbirine monte edilmiş, daire enkesitli numuneler için ise özel kilit mekanizmalı, birçok sefer kullanıma uygun, 1.5 mm kalınlığındaki sacdan, numuneler düşey durumda kalıptan çıkacak şekilde, silindir biçiminde kalıplar tasarlanmıştır. Ahşap kalıplar birbirine monte edilirken kullanılan iki farklı yöntemin birbirine göre avantaj ve dezavantajları olmuştur. Dikdörtgen enkesitli numuneler için hazırlanan kalıplarda kullanılan şaşırtmalı birleşimin imalatı kolay olmasına rağmen, numuneler kalıptan çıkarılırken sorun yaşanmış, buna karşın kare enkesitliler için hazırlanan kalıpların imalatı zor, ancak kalıptan numunelerin çıkarılması son derece kolay olmuştur (EK A).

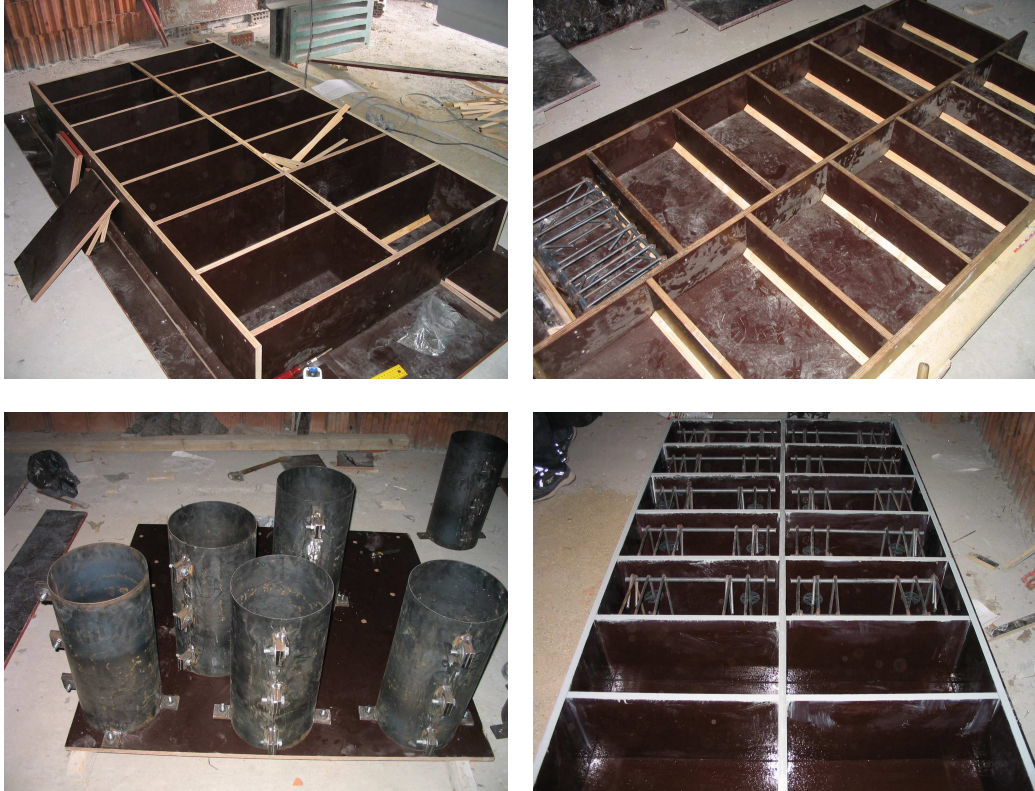
Daire enkesitli numuneler için hazırlanan silindirik şeklindeki metal kalıplar, ahşap bir levha üzerine monte edilmiştir. Döküm sonrasında, özellikle betondan korunan bulon-somun birleşimleri sayesinde numunelerin kalıptan çıkarılmasında bir sorun yaşanmamıştır.

Dörtgen enkesitli numunelerde, dik kenarları 25 mm olan ikizkenar üçgen formunda çıtlar, kalıp köşelerine çakılarak, köşelerde oluşturulacak 40 ve 20 mm yarıçapındaki yuvarlatma işleminde kolaylık sağlanmıştır.

Donatı iskeletleri kalıplara yerleştirilmeden önce tüm yüzeyler özel kalıp yağı ile yağlanmış, oluşabilecek yapışmaların önüne geçilmiş ve kalıpların yeniden kullanımına da imkân verilmiştir.

Numune yüzeyi ile donatı arasında her yüzde aynı miktarda (etriye yüzünden 25 mm) boşluk bırakılabilmesi için enine donatılara, hazır plastik paspayları takılmıştır. Ayrıca daire enkesitli numuneler düşey durumda olacak şekilde döküleceği için boyuna donatıların altında 20 mm büyüklüğünde paspayları kullanılarak üst ve altta bırakılmak istenen boşluk elde edilmiştir.

Kalıp imalatı ile ilgili resimler, Şekil 2.6'da görülebilir.



Şekil 2.6 Kalıpların Hazırlanması

2.3.4 Beton Dökümü

Karışım oranları bildirildikten sonra Set Beton tarafından hazırlanan, 28 günlük silindir basınç dayanımı yaklaşık 10 MPa olan hazır beton, tüm numuneler için, hava sıcaklığının 26°C olduğu aynı gün ve şartlarda kalıplara dökülmüştür. Döküm sırasında betonun mümkün olduğunca iyi yerleşmesini sağlamak için vibrasyon uygulanmıştır, Şekil 2.7. Donatı iskeletlerinin kalıp içinde hareket etmemesine ve şekildeğiştirmeölçerlerin dökümden zarar görmemesine azami gayret sarf edilmiştir. Aynı mikserden, beton dayanımını belirleyebilmek için de 16 adet standart silindir numune alınmıştır, Şekil 2.7.

Beton dökümünü izleyen 14 gün boyunca kür uygulanan numuneler, üzerleri amerikan bezi örtülerek sabah ve akşam birer kez olmak üzere sulanmış, böylece oluşabilecek rötre çatlakları önlenmiştir, Şekil 2.7.



Şekil 2.7 Beton Dökümü ve Kür

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ

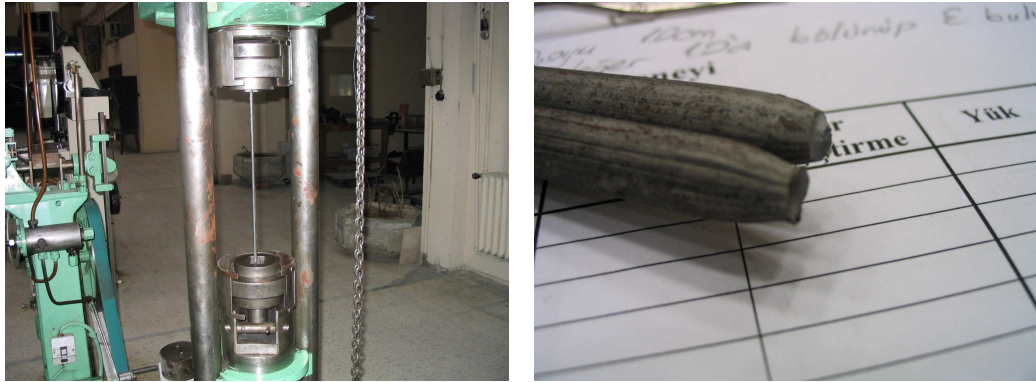
3.1 Giriş

Numune imalatında kullanılan malzemeler, ülkemizdeki mevcut durum göz önünde bulundurularak özel olarak seçilmiş, bu amaçla tüm numunelerde, 28 günlük standart silindir dayanımı yaklaşık 10 MPa olan beton ile St220 düz yüzeyli donatı çeliği kullanılmıştır. Bu bölüm kapsamında, numune imalatında ve güçlendirmede kullanılan malzemelerin özellikleri ile yapılan deneylerin sonuçları sunulmuştur.

3.2 Numunelerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

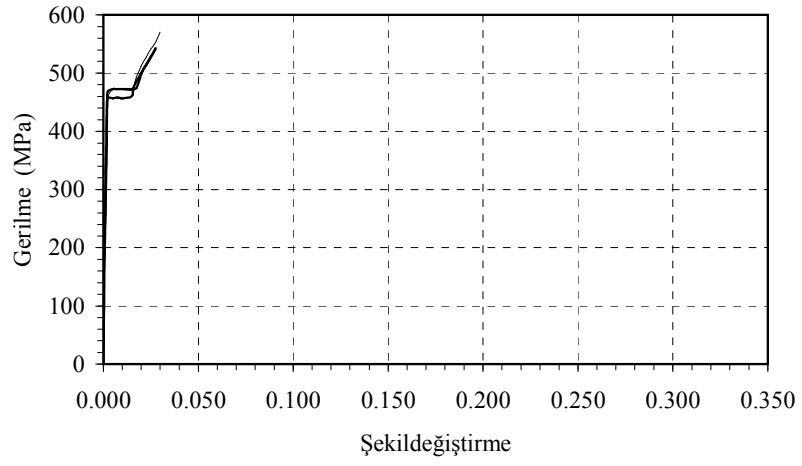
3.2.1 Donatı Çeliği

Çalışmanın amacına uygun olarak seçilen düz yüzeyli donatı çelikleri, kullanılan her çap için üçer adet numunenin çelik çekme deneyleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında 20 t kapasiteli Amsler mekanik çekme cihazı kullanılarak TS708 standardına uygun olarak yapılmıştır, Şekil 3.1.

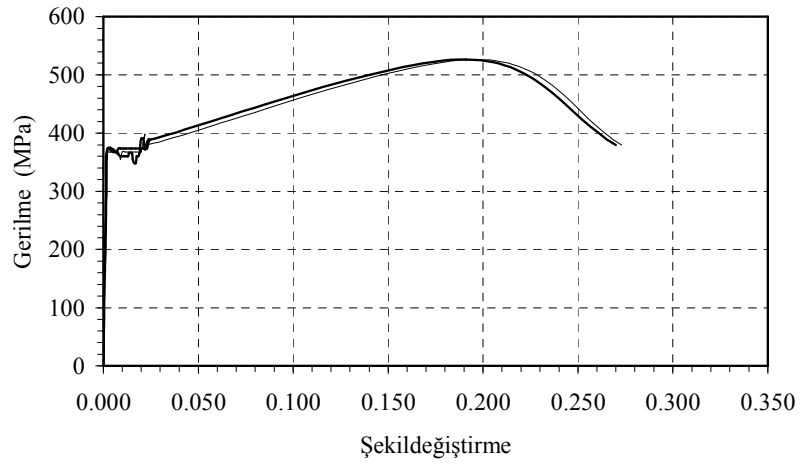


Şekil 3.1 Çelik Çekme Deneyleri

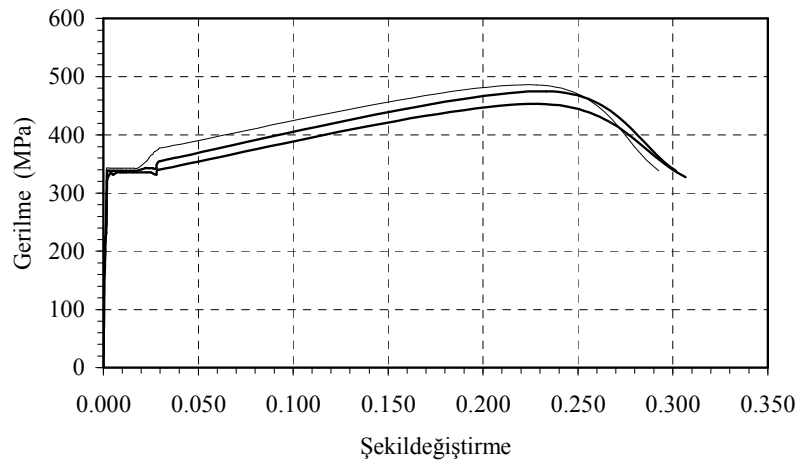
Tüm donatı çapları için yapılan çelik çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini gösteren grafikler Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te görülebilir.



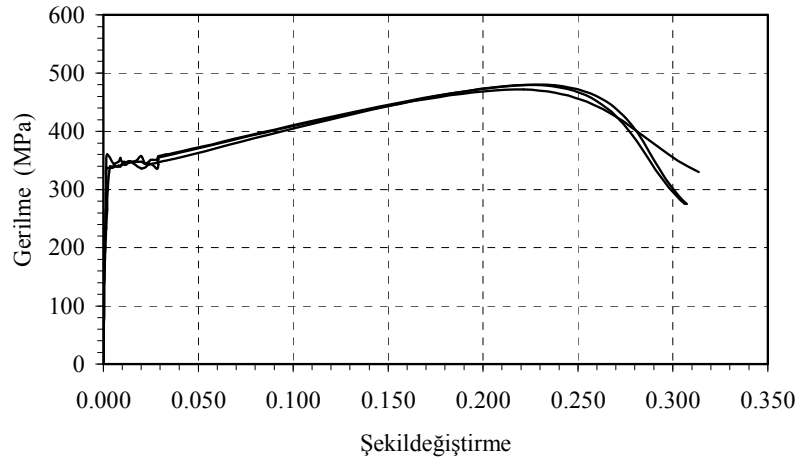
Şekil 3.2 Enine Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (φ8)



Şekil 3.3 Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (φ10)

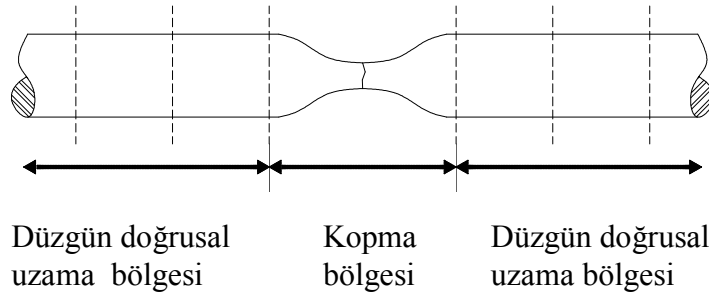


Şekil 3.4 Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (φ12)



Şekil 3.5 Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (φ14)

Kopma birim uzamasının (ϵ_{su}) belirlenmesinde, çubuğun orta bölgesinde donatı çapının 10 katına eşit, ölçü boyu kullanılmıştır. Bu ölçü boyu üzerine donatının çapı kadar aralıklarla çizgiler çizilmiştir. Deney sonrasında düzgün doğrusal donatı uzaması belirlenirken kopmanın olduğu bölge dışında çubuğun iki tarafında oluşan uniform uzama bölgelerinde belirlenen şekildeğiştirmelerin ortalaması alınmıştır. Kopma birim uzaması ise aşırı uzamanın olduğu bölgede belirlenen şekildeğiştirme değeri olarak alınmıştır. Şekil 3.6'da çekme kuvveti uygulanan çubukta kopma ve düzgün doğrusal uzama bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Çekme Çubuğunda Kopma ve Düzgün Doğrusal Uzama Bölgeleri

Tablo 3.1'de boyuna ve enine donatı özellikleri verilmiştir. Tabloda sırası ile ϵ_y : Donatıda akma birim uzaması ve kısalması, ϵ_{su} : Kopma birim uzaması, ϵ_{smax} : En büyük uzama ve kısalma, f_y : Donatı akma dayanımı, f_{su} : Donatının kopma dayanımı, f_{smax} : Donatının en büyük çekme dayanımıdır.

Tablo 3.1 Çekme Deneyleri Sonuçları

Donatı	ϵ_y	ϵ_{su}	ϵ_{smax}	f_y (MPa)	f_{su} (MPa)	f_{smax} (MPa)
ϕ 8 (enine)	0.0024	–	–	476	–	–
ϕ 10 (boyuna)	0.0018	0.27	0.19	367	377	523
ϕ 12 (boyuna)	0.0017	0.30	0.23	339	335	471
ϕ 14 (boyuna)	0.0017	0.31	0.23	345	294	477

3.2.2 Beton

Dayanımın düşük (~10 MPa) olması hedefiyle sipariş edilen beton, 10.09.2003 tarihinde tüm numuneler için kalıplara dökülmüştür. Su/çimento oranı 1.1 olan karışımda PÇ42,5 cinsi portland çimentosu, kimyasal katkı malzemesi olarak da YKS® MR25-S orta akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkının su oranını %10 – 17 azalttığı, aynı su/çimento oranına göre işlenebilirliği ve nihai mukavemeti artırdığı üretici tarafından belirtilmektedir. Beton karışımı Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Beton Karışımı

Çimento (kg)	Su (kg)	Kum (kg)	Mıçır-I (kg)	T. Kumu (kg)	M. Katkı (kg)	MR25-S (kg)
224	252	1022	1482	414	63	1.705

Taze betonda çökme ve yayılma çapını belirlemek amacı ile 3 ayrı çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Çökme konisinin doldurulması 3 defada yapılmış ve her doldurma işleminin ardından uzun demir bir çubukla beton 25 defa şişlenerek iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Koninin tamamı doldurulup 3 dakika beklendikten sonra koni yavaşça çekilmiş, yayılma çapı ve çökme ölçülmüştür. Taze betonda yapılan çökme deneyi sonuçları Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3 Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları

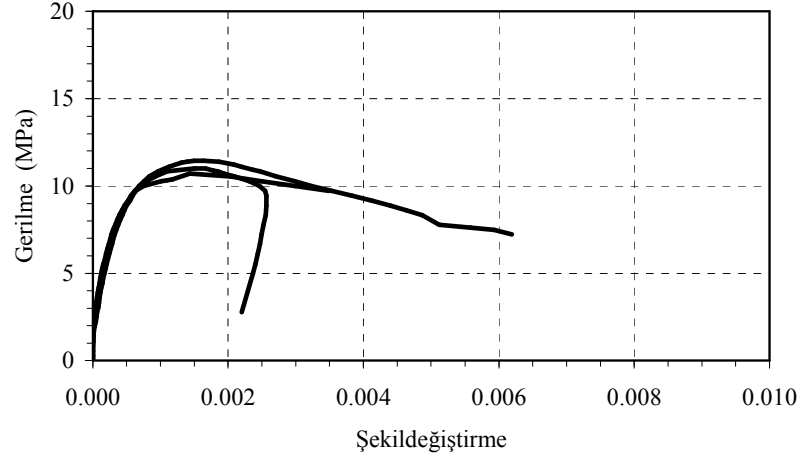
Deneme	Çökme (mm)	Yayılma Çapı (mm × mm)
1	200	310 × 310
2	220	300 × 290
3	240	330 × 320

Beton dayanımını belirleyebilmek amacı ile aynı mikserden alınan 16 adet standart silindir numune, aynı şartlarda bekletilmiş ve kür uygulanmıştır. 500 ton kapasiteli Amsler yükleme cihazında 28, 90 ve 180. günlerde standart silindir basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sırasında gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenebilmesi için TML CM-15 ölçüm çerçevesi (kompresometre), bu çerçeveye bağlı olan ve standart silindirin orta 150 mm'sindeki yerdeğiştirmeyi ölçme amaçlı TML CDP-5 tipi yerdeğiştirmeölçer ayrıca tüm boy olan 300 mm'den ölçüm almak için iki adet de CDP-25 tipi yerdeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Bu yerdeğiştirmeölçerler silindir numunenin etrafına, aralarında 180° açı ve numune yüzeyinden 100 mm uzaklıkta ölçüm alacak şekilde yerleştirilmişlerdir, Şekil 3.7. Veri toplayıcı olarak kullanılan TML TDS-303'den alınan veriler, bilgisayar ortamında değerlendirilerek, her bir numuneye ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi tespit edilmiştir.

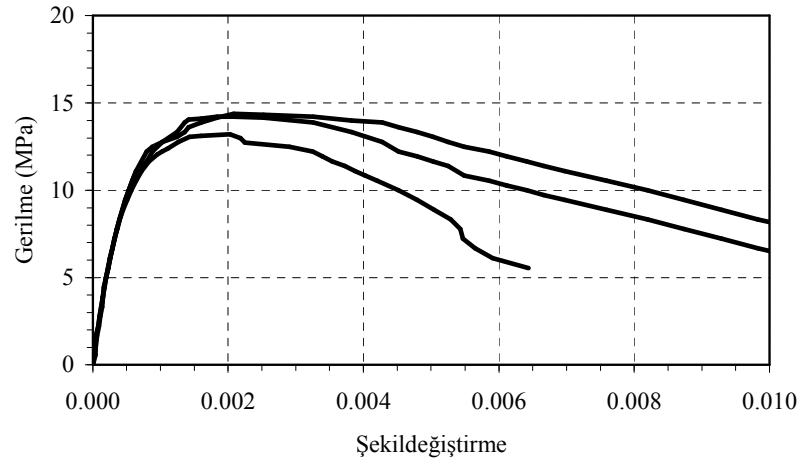


Şekil 3.7 Standart Silindir Deneyi Düzeneği

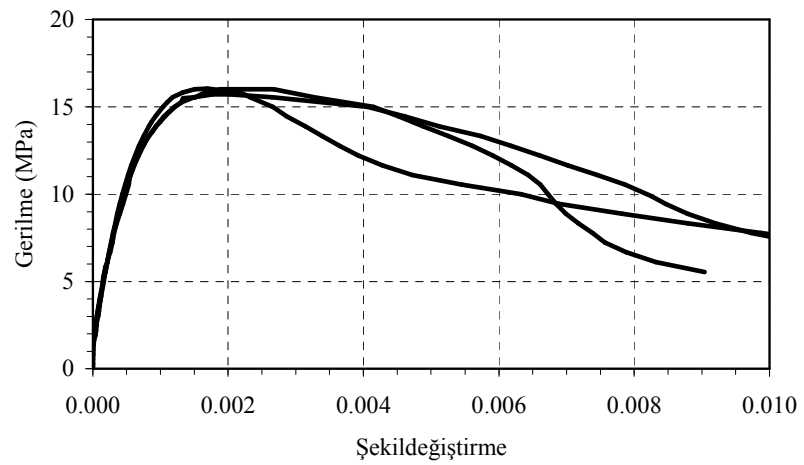
28, 90 ve 180 günlük standart silindirlerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri sırasıyla Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



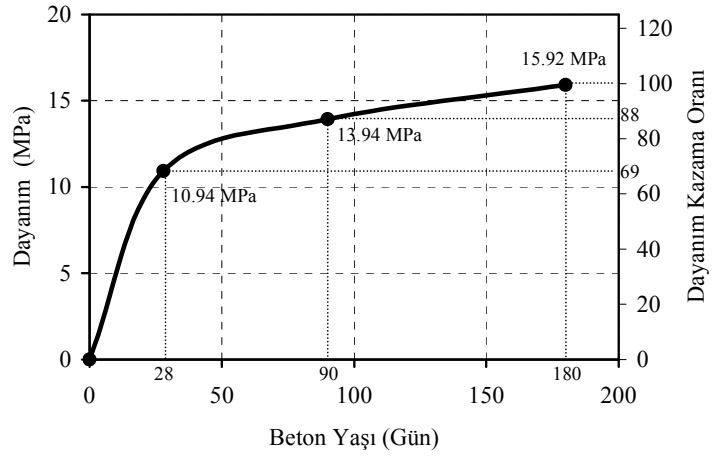
Şekil 3.8 28 Günlük Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.9 90 Günlük Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.10 180 Günlük Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.11 Dayanım-Beton Yaşı İlişkisi

Standart silindir basınç deneyi sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Standart Silindir Numune	Numune Yaşı (Gün)	Beton Dayanımı f'_c (MPa)	Ort. Beton Dayanımı f'_{cort} (MPa)	Elastisite Modülü E_c (MPa)	Ort. Elastisite Modülü E_{cort} (MPa)
LS-SS-28-01	28	10.99	10.94	28202	28394
LS-SS-28-02	28	10.39		32908	
LS-SS-28-03	28	11.44		24071	
LS-SS-90-01	90	14.39	13.94	23395	23307
LS-SS-90-02	90	14.22		21931	
LS-SS-90-03	90	13.22		24595	
LS-SS-180-01	180	15.99	15.92	22005	22708
LS-SS-180-02	180	15.72		22350	
LS-SS-180-03	180	16.05		23769	

3.2.3 Güçlendirme Malzemeleri

Karbon lif takviyeli polimer malzemeler yeni olmalarına rağmen, yurtdışında ve ülkemizde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle sanayi türü yapılarda uygulamasının kolay olmasından, üretimin durmasına yol açmamasından dolayı rağbet görmektedir. Birim ağırlığının düşük olması, yapıya ek bir yük getirmemekte ayrıca uygulandığı elemanın boyutunu da değiştirmemektedir. Çevre koşullarına

karşı dayanıklı olmaları, elemanı dış etkilere, özellikle nemden koruması, korozyon gibi istenmeyen durumlar için ideal bir koruma sağlamaktadır. Bina türü yapılar için de bu tür bir uygulama, yetersiz olan sünekliği, bina toplam ağırlığını büyük ölçüde değiştirmeden artırmasıyla sistemin depreme karşı olan davranışının önemli oranda iyileşmesini sağlamaktadır. Yüksek maliyetine karşın bu avantajları düşünüldüğünde, fiyat/performans oranının yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca artan taleple birlikte, polimer lif ile birlikte uygulamada gerekli olan malzemelerin ucuzlayacağı da unutulmamalıdır.

Farklı amaçlar için kullanılan FRP türleri mevcuttur. Bulardan en yaygın olanlar karbon, cam ve aramid lifleri ile imal edilenlerdir. FRP türü malzemeler ile yapı çeliğinin birim ağırlıklarının karşılaştırması ile farklı türdeki FRP malzemelerin mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3.5 ve 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.5 FRP Malzemelerin ve Çeliğin Birim Ağırlıkları

Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
7.9 t/m ³	1.2~2.1 t/m ³	1.5~1.8 t/m ³	1.2~1.5 t/m ³

Tablo 3.6 Farklı Türdeki FRP Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Lif Türü	Elastisite Modülü (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopma Şekildeğiştirmesi minimum (%)
Karbon	230000	3430	1.5
Cam	70000	2100	4.5
Aramid	75000	3800	2.5

FRP malzemeler farklılık gösterdiği gibi, her malzeme de kendi içinde çeşitlilik göstermektedir. Bu çalışmada MBrace C1-30 türü karbon lif takviyeli polimer kompozit (CFRP) kullanılmıştır. Üretici tarafından verilen mekanik ve geometrik özellikler sırasıyla Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de bulunabilir.

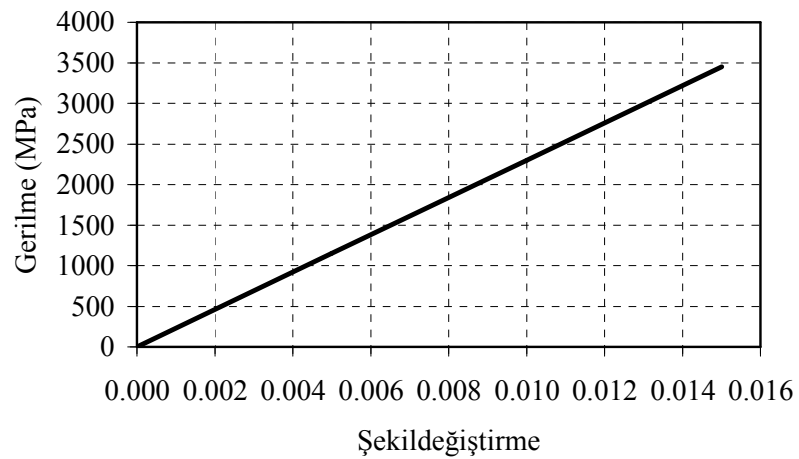
Tablo 3.7 C1-30 Türü CFRP Malzemenin Mekanik Özellikleri

Karakteristik Çekme Modülü (MPa)	230000
Maksimum Uzama (%)	1.5
Karakteristik Kopma Dayanımı (MPa)	3430
20 cm Bindirme ile Eklenme Durumunda Kopma Dayanımı (MPa)	3430

Tablo 3.8 C1-30 Türü CFRP Malzemenin Geometrik Özellikleri

Lif Türü	Yüksek Dayanımlı Karbon
Tabaka Örgü Şekli	Tek Yönlü
Alan Yoğunluğu (kg/m²)	0.3
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	1820
Etkili Tabaka Kalınlığı (mm)	0.165
Birim Genişlik için Etkili Enkesit Alanı (mm²/cm)	1.65

FRP malzemeler kopma dayanımına ulaşana dek lineer elastik bir gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi gösterirler, Şekil 3.12.



Şekil 3.12 FRP Malzemelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi

CFRP uygulaması için gerekli olan astar (primer), macun (putty) ve yapıştırıcıya (saturant) ait, üretici (MBrace) tarafından verilen bilgiler Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

Tablo 3.9 Astar, Macun ve Yapıştırıcıya Ait Genel Özellikler

Malzeme / Özellik		Astar	Macun	Yapıştırıcı
Özgöl Ağırlık (kg/lt)		1.08 ± 0.024	1.26 ± 0.024	1.02 ± 0.024
Karışım Oranları (Ağırlıkça %)	A Bileşeni	77	78	76
	B Bileşeni	23	22	24
Elastisite Modülü (MPa)	Çekme	>700	>1800	>3000
	Eğilme	>580	>900	>3500
Çekme Dayanımı (MPa)	Direk	>12	>12	>50
	Eğilme	>24	>26	>120
Maksimum Uzama (%)		3	1.6	2.5
Basınç Dayanımı (MPa)		–	–	>80

4. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

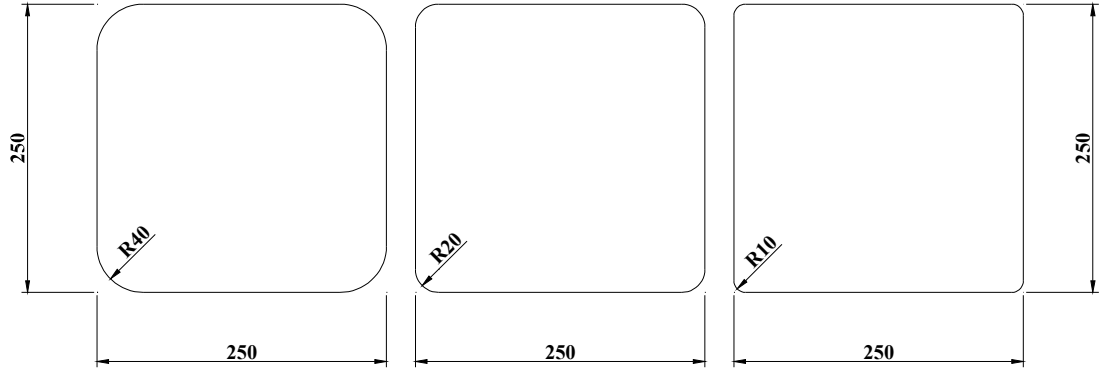
Çalışma kapsamında farklı güçlendirme yöntemleri uygulanmıştır. Bunlar: hasar verilip, farklı sargı şekilleri ile, etkinlik artırıcı detay ile ve doğrudan güçlendirme olmak üzere toplam dört çeşittir.

Dörtgen enkesite sahip tüm numunelerin köşeleri, önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda, bu bölgelerde gerilme yığılmalarını önlemek amacıyla güçlendirme öncesinde 40 mm yarıçapında, çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır. Numunelerin bazılarında (her birinden ikişer tane olmak üzere 4 numunede), köşe yarıçapı 10 ve 20 mm olacak şekilde yuvarlatma işlemi yapılarak, bir deney değişkeni daha elde edilmiştir. Beton dökümü öncesinde, kalıp köşelerine çakılan ikizkenar üçgen çıtalar sayesinde yuvarlatma işleminde kolaylık sağlanmıştır. Kalıplardan çıkarılan numunelerin köşeleri, dikkatli bir şekilde, istenen şekle gelene kadar, spiral taşlama aletiyle yuvarlatılmıştır, Şekil 4.1.



Şekil 4.1 Köşelerin Yuvarlatılması

Yuvarlatma işlemi sonrasında kare enkesitli numuneler 3 farklı ölçüde (10, 20, 40 mm) köşe yarıçapına, dikdörtgen enkesitli numuneler ise 40 mm'lik yarıçapa sahip olmuşlardır. Şekil 4.2'de kare enkesitli numunelere ait enkesit şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.2 Yuvarlatma İşlemi sonrasında Kare Enkesitli Numuneler

Tüm dörtgen enkesitli numunelerin köşeleri yuvarlatıldıktan sonra, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarının alt katında, hem sargı işleminin rahatlıkla yapılabilmesi hem de bir karışıklığa meydan vermemek için 1, 3 ve 5 kat sargılanacak numuneler ayrı hollere, rahat bir çalışma ortamı sağlayacak şekilde yaklaşık 85'er cm arayla yerleştirilmişlerdir, Şekil 4.3.



Şekil 4.3 Numunelerin Yerleştirilmesi

Önceden hasar verildikten sonra ve farklı sargı şekilleriyle güçlendirilecek olanlar hariç tüm numunelerin sargı işlemi aynı gün ve şartlarda yapılmıştır. Güçlendirme adımları tüm numuneler için aynıdır. Sargı işlemine başlamadan önce tüm numuneler için bindirme (150 mm) ile birlikte hesaplanan CFRP tabaka boyları kesilip hazır hale getirilmiştir, Şekil 4.4.



Şekil 4.4 CFRP Tabakaların Uygun Uzunluklarda Kesilmesi

Öncelikle numune yüzeyleri, tel fırça ve kuru sünger ile silinerek olabilecek, toz, kir, su ve yağdan arındırılmıştır.

İstenmeyen maddelerden arındırılan numune yüzeyine epoksi polyamin astar (MBrace Primer) karışımı sürülmüştür, Şekil 4.5. Üreticinin belirttiği doğrultuda ağırlıkça 0.77:A ve 0.23:B oranında karıştırılan ve numune yüzeyine uygulanan astar, bir sonraki aşamaya geçmeden önce 24 saat süreyle bekletilmiştir.



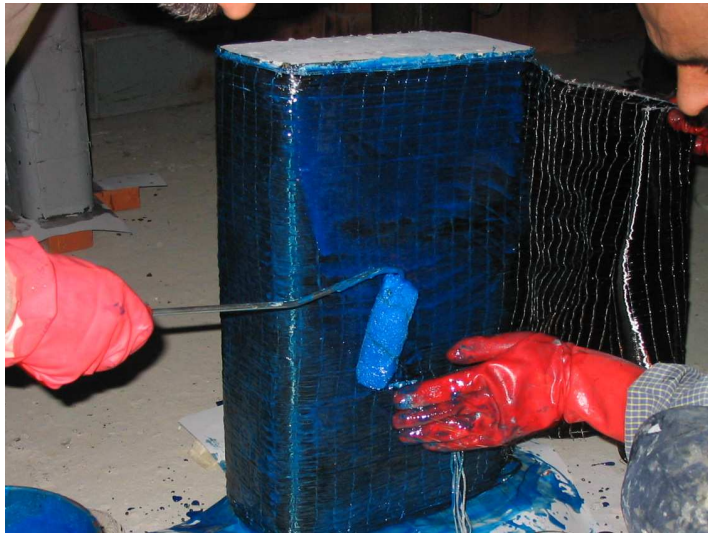
Şekil 4.5 Astar Karışımın Sürülmesi

Boşlukların doldurulması ve pürüzsüz hale getirilip, CFRP tabakanın yüzeye tam olarak yapışmasını sağlamak için numune yüzeyine çift bileşenli macun (MBrace Rasatura Putty, ağırlıkça karışım oranı 0.78:A ve 0.22:B) sürülmüştür, Şekil 4.6.



Şekil 4.6 Macun Karışımının Uygulanması

Macunun kuruması beklenmeden, yine çift bileşenli (0.76:A, 0.22:B) yapıştırıcı (MBrace Saturant), astar üzerine, rulo fırça yardımıyla bir kat sürülmüştür. Sarılan her CFRP tabakasının liflerinin, yapıştırıcıyla temas etmesine, ayrıca tabakalar arasında hava kalmamasına özen gösterilmiştir. Her numune için istenen miktarda kat sarıldıktan sonra bir kat daha yapıştırıcı sürülerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır, Şekil 4.7. Bindirmenin yapıldığı bölge numune üstünde işaretlenerek, deney sırasında, bu bölgede oluşabilecek açılmaların takibi kolaylaştırılmıştır. Tüm numuneler için sargı işlemi tamamlandıktan sonra, malzemelerin dayanımlarını kazanmaları için kür uygulanmıştır.



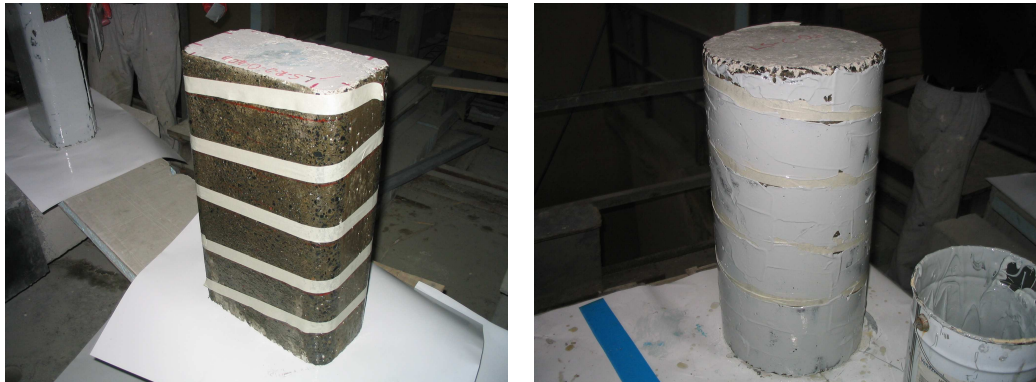
Şekil 4.7 Yapıştırıcı Karışımın Uygulanması

Hasar verildikten sonra güçlendirilen 2 daire ve 2 dikdörtgen enkesitli 4 numune, orijinal durumda iken, eksenel yüklenerek, betonda ilk çatlaklar görülünceye kadar yaklaşık olarak 0.003 boyuna şekildeğiştirme yapacak şekilde deneye tabi tutulmuş, bu şekildeğiştirme adımı en büyük dayanımlarına ulaşan numuneler daha sonra onarılıp güçlendirilmişlerdir, Şekil 4.8. Onarım sırasında oluşan çatlakların doldurulması ve yüzeydeki pürüzlerin giderilmesi için ağırlıkça karışım oranı 0.75:A ve 0.25:B olan tamir harcı (MBrace Concreseive 1406) kullanılmıştır. Bu harcın yeterli dayanıma ulaşması beklendikten sonra, CFRP sargı işlemi diğer numunelerdeki gibi yapılmıştır.



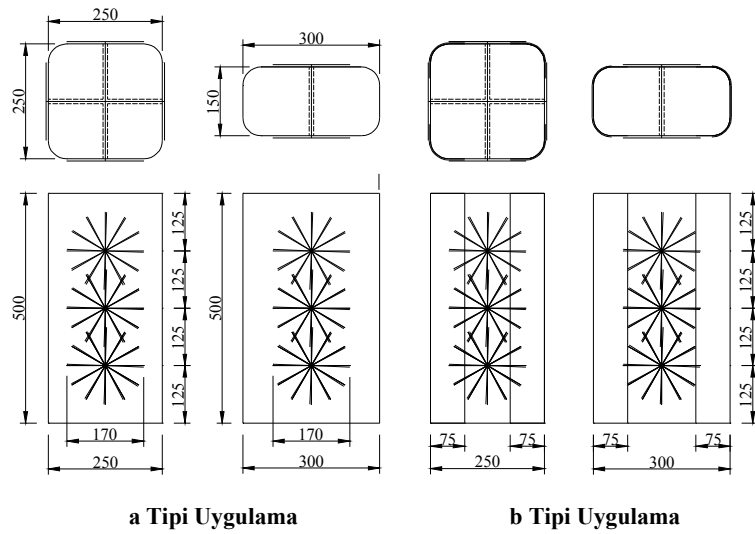
Şekil 4.8 Önceden Hasar Verilen Numunenin Onarımı ve CFRP Sargı İşlemi

Farklı sargı şekilleri ile güçlendirilen, 2 daire ve 2 dikdörtgen enkesitli toplam 4 numunede iki farklı türde sargı şekli uygulanmıştır. Bu sargılar, CFRP tabakaları 50 mm genişliğinde kesilerek elde edilen etriye ve spiral türü şeritlerden yapılmıştır. 3 kat sargılanan 50 mm'lik şeritler halindeki etriye türü sargılar arasında yine 50 mm boşluk bırakılmıştır. Spiral şeritler halindeki ikinci tür sargıda da yine 3 kat sargılanan ve numune boyunca kesintiye uğramayan şeritlerin arasında 50 mm boşluk bırakılmıştır, Şekil 4.9.



Şekil 4.9 Spiral Türü Sargı Uygulaması

CFRP sargının etkinliğini artırıcı detay ile üretilen numunelerde amaç, daha az CFRP kullanılarak yapılan bir sargıda etkinlik artırıcı bir ek üretip, bunun deney sırasındaki performansının test edilmesidir. Bu şekilde üretilen bir numune, daha az miktarda CFRP kullanılarak daha yüksek dayanım ve süneklığe ulaşıyorsa, başarılı bir uygulama yapıldığı anlaşılabılır. Bu amaçla iki farklı tip etkinlik artırıcı detay tasarlanmıştır. (a) tipi birinci detay uygulamasında deney sırasında oluşan yanal gerilmenin, 1 kat CFRP sargı ile birlikte numuneye ankre edilen 30 mm genişliğinde CFRP şeritlerin de alması amaçlanmıştır. Bunun için kare enkesitli numunelerde numunenin 4 kenarına, her bir kenarın düşeyde ve yatayda ortasına gelecek şekilde 1 adet, ayrıca bu noktanın altına ve üstüne 125 mm aralıklarla 2 adet şemsiye tipi ankraj yapılması düşünülmüştür. Şemsiyeler birbirinden bağımsız olacak şekildedir ve her birinin uzunluğu numune içinde 125, dışarıda 85 mm olacak şekilde, 210 mm'dir. Dikdörtgen enkesitli numunelerde ise (a) tipi bu uygulama, numunenin uzun kenarlarının yatay ve düşeydeki ortalarına gelecek şekilde ve CFRP şeridi tek parça olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. (b) tipi uygulamada köşelerde oluşan gerilme birikmelerinden dolayı oluşan çekme gerilmesini karşılamak için kare enkesitli numuneler için 4 köşeye her birinin ölçüsü $(b \times h)$ 150 × 500 mm olan ek CFRP parçaları ile birlikte (a) tipi detay uygulanmıştır. Aynı uygulama dikdörtgen için kısa kenarların tümünü kaplayacak şekilde ve boyutları $(b \times h)$ 300 × 500 mm olan ek CFRP parçaları ile yapılmıştır. Şekil 4.10'da (a) ve (b) tipi uygulamanın detayları görülmektedir.



Şekil 4.10 Etkinlik Artırıcı Detay Uygulaması

Bu uygulama yapılırken öncelikle belirlenen yerlere matkapla delikler açılmıştır. Toz kalmayacak şekilde hava tutularak delikler temizlendikten sonra iki bileşenli yapıştırıcı (MBrace saturant), deliklere bir şırınga yardımıyla enjekte edilmiştir. Daha önceden kesilip hazır hale getirilen CFRP şeritler, ince bir tel yardımıyla, yapıştırıcıyla tamamen temas edecek deliklere sokulmuştur. (b) tipi uygulama ise 150×500 mm ve 300×500 mm boyutlarındaki tabakalar, önceden yeteri miktarda yapıştırıcı sürülen yüzeye sarılıp, sonra üzerine bir kat daha yapıştırıcı sürülerek yapılmıştır. Şekil 4.11’de etkinlik artırıcı detay imalatı görülmektedir.

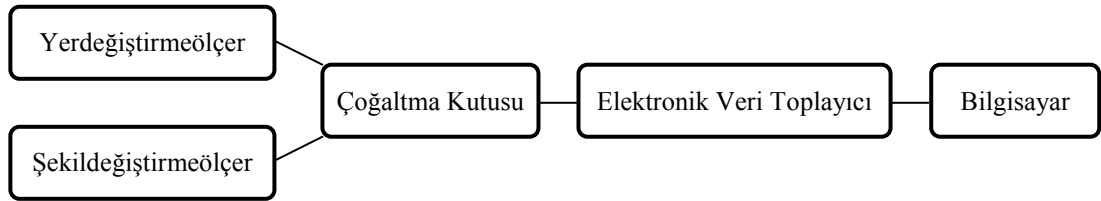


Şekil 4.11 Etkinlik Artırıcı Detay İmalatı

5. DENEY DÜZENİ

Hazırlanan tüm numunelere ait deneyler, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan, 500 ton kapasiteli Amsler deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Deney düzeneği içerisinde, elektronik olmayan tek ölçüm olan yük değerlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla, üst tablası sabit, alt tablası hareketli olan bu deney aletinde, numunelerin hesap dayanımlarına göre uygun yükleme aralığı (100, 250, 500 ton) seçilerek, yük ölçümünün mümkün olduğunca hassas yapılması amaçlanmıştır.

Tüm deneylerde, belirlenen yük aralıklarında, yerdeğiştirmeölçer ve şekildeğiştirmeölçerlerden alınan veriler, çoğaltma kutusu (TML ASW-50C Switch Box) ve elektronik veri toplayıcı (TML TDS-303 Data Logger) ile kayıt edilmiş, sonrasında bilgisayar ortamında değerlendirilmiştir, Şekil 5.1.



Şekil 5.1 Veri Toplama Sistemi Akış Grafiği

Deney düzeneğinde numunenin hesap dayanımı göz önünde bulundurularak, her bir deneyde, farklı ölçüm boyuna ve hassasiyete sahip TML CDP-10, CDP-25, CDP-50, CDP-100 şekildeğiştirmeölçer tipi yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Kullanılan yerdeğiştirmeölçerlere ait özet bilgiler Tablo 5.1'de bulunabilir.

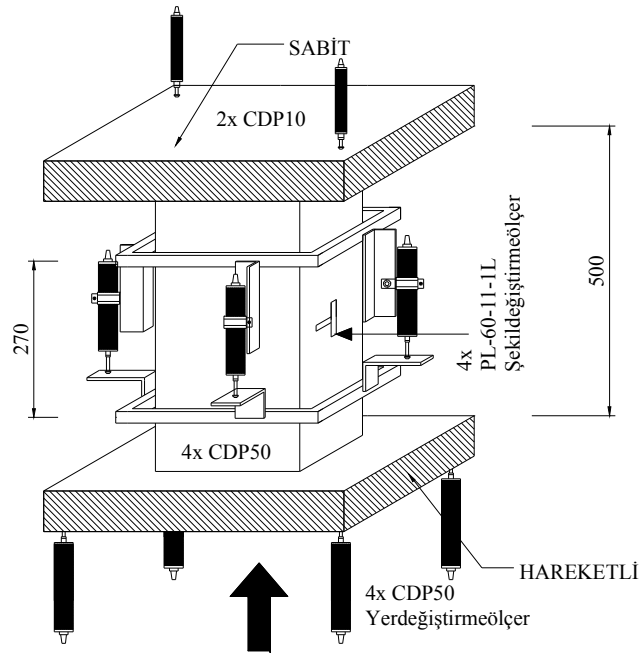
Tablo 5.1 Yerdeğiştirmeölçerlerin Özellikleri

Yerdeğiştirmeölçer	CDP-10	CDP-25	CDP-50	CDP-100
Ölçüm Boyu (mm)	10	25	50	100
Hassasiyet (mm)	1/1000	1/500	1/200	1/100

Numunenin tüm boyundaki yerdeğiştirmeyi ölçmek için, Amsler yükleme cihazının hareketli olan alt tablasının 4 köşesine, deney sırasında herhangi bir dönmede kullanım dışı kalmaması için kenarlardan 40 mm uzakta olacak şekilde, 4 adet CDP-50 veya CDP-100 tipi, hareketsiz olan üst tablada oluşabilecek küçük yerdeğiştirmeleri ölçmek için tablanın karşılıklı iki köşesine, yine kenarlardan 40 mm uzağa iki adet CDP-10 tipi yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. Deney sonrasında tüm boydaki yerdeğiştirme, üst tabladaki yerdeğiştirmeölçerlerden alınan ortalama verinin, alt tabladan alınan verilerden çıkarılması ile bulunmuştur. Amsler yükleme aletinin ve tablaların, numuneye göre çok yüksek rijitlikte olmasından dolayı, cihazda oluşan şekildeğiştirmeler ihmal edilmiştir.

Tüm boydaki yerdeğiştirmeyle birlikte, numunenin test bölgesinden (yükseklik boyunca orta 250 mm) ölçüm alınmıştır. Bunun için 4 adet CDP-25 veya CDP-50 tipi yerdeğiştirmeölçerlerin takılabilmesine izin veren ve orta 270 mm'den ölçüm alabilen bir ölçüm çerçevesi (kompresometre) tasarlanmıştır (EK B). Kaynakla birleştirilen, demir dolu kesitler ve korniyerlerden üretilen bu çerçeve sayesinde deney sonuna kadar test bölgesinin deformasyonu hakkında sağlıklı veri alınabilmiş, ayrıca yerdeğiştirmeölçerlerin göçme anında zarar görmesi -tasarım sırasında göz önünde bulundurulduğu için- engellenmiştir.

Şekil 5.2'de deney düzeneğini gösteren şematik bir çizim görünmektedir.



Şekil 5.2 Deney Düzeneği

Deney sırasında, boyuna ve enine doğrultuda oluşan şekildeğiştirmeleri ölçmek için, yaklaşık 0.01~0.02 mertebesine kadar sağlıklı sonuç verebilen ve 60 mm ölçüm boyuna sahip özel akma-sonrası türü şekildeğiştirmeölçerler (PL-60-11-1L) kullanılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler, numune yüzeyi, çok amaçlı yapıştırıcı (Pattex Epoxy Mix) kullanılarak uygun hale getirildikten sonra, cyanacrylat esaslı güçlü yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılmıştır. Daire enkesitli numunelerde bindirmeye uzak olacak ve birbiriyle 180° açı yapacak şekilde boyuna ve enine doğrultuda toplam 4 adet, kare enkesitli numunelerde bindirmenin olmadığı karşılıklı iki kenarın tam ortasına, boyuna ve enine doğrultuda, her bir numunede 4 adet, dikdörtgen enkesitli numunelerde ise uzun kenarlardan bindirmeye uzak olan uzun kenarın ortasına, boyuna ve enine doğrultuda, diğerk uzun kenara, boyuna ve kısa kenarlardan birine enine doğrultuda olmak üzere toplam 4 adet şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır.



Şekil 5.3 Numune Yüzeyindeki Şekildeğiştirmeölçerler

Ayrıca, Bölüm 2.2.2’de açıklandığı gibi 5 numunede, donatılarda da şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Çalışma boyunca kullanılan şekildeğiştirmeölçerlere ait bilgiler Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Şekildeğiştirmeölçerlerin Özellikleri

Şekildeğiştirmeölçer	FLA-3-11-1L	YFLA-5-1L	PL-60-11-1L
Yer	Enine Donatı	Boyuna Donatı	Yüzey
Ölçüm Boyu (mm)	3	5	60
Ölçüm Katsayısı (%)	2.13 ± 1	2.12 ± 2	2.10 ± 1

6. DENEY SONUÇLARI

6.1 Giriş

Düşük dayanımlı beton ile üretilen daire, kare ve dikdörtgen enkesitli toplam 40 adet numunenin deneyleri sonucunda elde edilen bilgiler bu bölümde sunulmuştur. Birbirinin özdeşi olan numuneler aynı başlık altında incelenmiş, deney sonucunda oluşan gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ve deney sonrası numunelerde oluşan hasar durumları buna göre verilmiştir. CFRP ile sargılanmış her numune –çifti– için 500 mm'lik ölçüm boyundan alınan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi sargılanmamış orijinal numuneler ile karşılaştırılarak bir grafikte, her numune için farklı ölçüm boylarından (500, 270 ve 60 mm) alınan veriler ve 60 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğiştirmeölçerlerden alınan enine şekildeğiştirmeler de birer grafikte verilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen, numuneye deney sırasında etkiyen gerilmenin (σ_c), söz konusu numunenin sargısız eleman beton basınç dayanımı (f'_{co}) oranını temsil eden boyuttan bağımsız, σ_c/f'_{co} oranıdır. σ_c değeri tüm numuneye deney sırasında etkiyen gerilmeden donatının aldığı gerilme çıkarılarak bulunur (EK C). Grafiklerdeki yatay eksen ise mikro şekildeğiştirmeyi ($\mu\epsilon$) göstermektedir. Tüm numuneler için f'_{co} değeri, standart silindir basınç dayanımının 0.85'i olarak kabul edilmiştir.

6.2 Daire Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçları

180 günlük standart silindir basınç dayanımı 15.92 MPa olan beton ile üretilen 12 adet 250 mm çapında daire enkesite ve 500 mm yüksekliğe sahip silindir numuneler eksenel basınç gerilemeleri altında deneye tabi tutulmuştur. Orijinal halde denenen 2 numune dışında diğer numuneler 1, 3 veya 5 kat CFRP tabakaları ayrıca 3 katlı farklı sargı şekilleri ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiştir. Bu enkesite sahip numuneler ile ilgili bilgiler Tablo 1.1'de görülebileceği gibi Tablo 6.1'de de özet bilgi sunulmuştur.

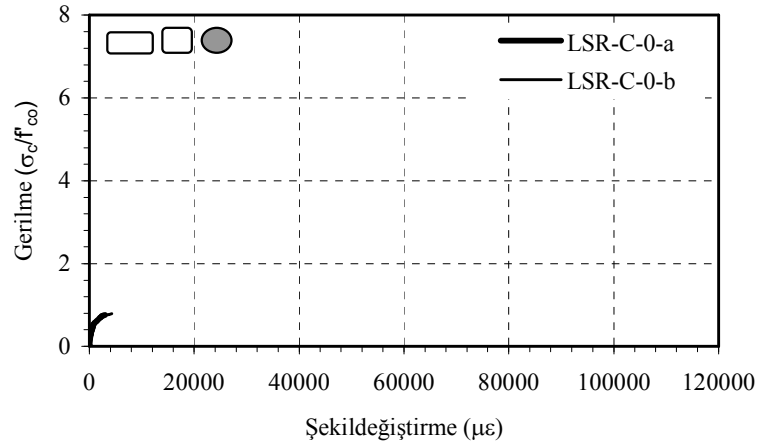
Tablo 6.1 Daire Enkesitli Numunelere Ait Özet Bilgiler

Numune İsmi	f'_{coi} (MPa)	Numune d × l (mm)	Polimer Lif Sargı Sayısı	Ek Değişken	Yükleme Tipi
LSR-C-0-a	12.22	250 × 500	0	–	M
LSR-C-0-b	12.22	250 × 500	0	–	M
LSR-C-1-a	12.84	250 × 500	1	–	M
LSR-C-1-b	13.14	250 × 500	1	–	M
LSR-C-3-a	13.27	250 × 500	3	–	M
LSR-C-3-b	13.53	250 × 500	3	–	M
LSR-C-3-a-PD	12.84	250 × 500	3	Ön Hasar	M
LSR-C-3-b-PD	13.14	250 × 500	3	Ön Hasar	M
LSR-C-3-a-H	13.53	250 × 500	3	Etriye Tipi Sargı	M
LSR-C-3-a-S	13.53	250 × 500	3	Spiral Tipi Sargı	M
LSR-C-5-a	12.84	250 × 500	5	–	M
LSR-C-5-b	13.53	250 × 500	5	–	M

f'_{coi} : Deneyin yapıldığı güne karşılık gelen standart silindir basınç dayanımının 0.85'i. M: Monoton artan yükleme

6.2.1 LSR-C-0-a ve LSR-C-0-b

Bu iki numune daire enkesite sahip tüm numuneler için referans teşkil etmesi bakımından önemlidir. Sargılanmadan orijinal halde denenen bu iki numune için tüm boydan (500 mm) alınan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.1’de verilmiştir. Her iki numune de birbiriyle uyumlu davranış göstermiştir. Bu da imalatın özenli yapıldığının göstergesidir. Deney sonrasında elde edilen bilgiler Tablo 6.2’de, deney sırasındaki fotoğraflar Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1 LSR-C-0-a ve LSR-C-0-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)

Tablo 6.2 LSR-C-0-a ve LSR-C-0-b Deney Sonrası Bilgileri

Numune*	P _{maks} (ton)	σ _{maks} (MPa)	ε _{cc}
LSR-C-0-a	64	9.21	0.0030
LSR-C-0-b	66	9.61	0.0043

*Her iki numunenin de beton yaşı 110’dur. P_{maks} : En büyük yük, σ_{maks} : En büyük gerilme, ε_{cc} : 500 mm için göçme anındaki şekildeğiştirme



(LSR-C-0-a)

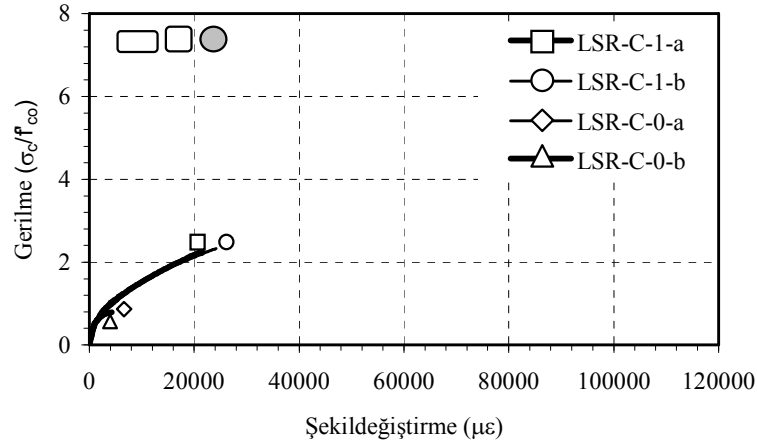


(LSR-C-0-b)

Şekil 6.2 Numunelerin Deney Sırasındaki Görüntüleri

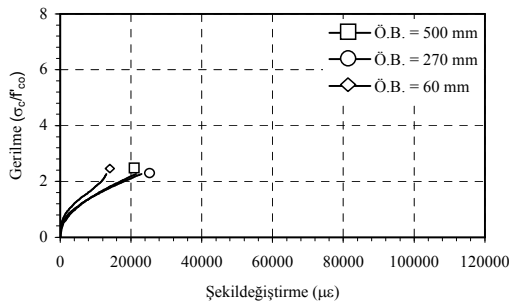
6.2.2 LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b

1 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.3'de verilmiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunenin de dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Numuneler birbirine çok yakın davranış göstermiştir.

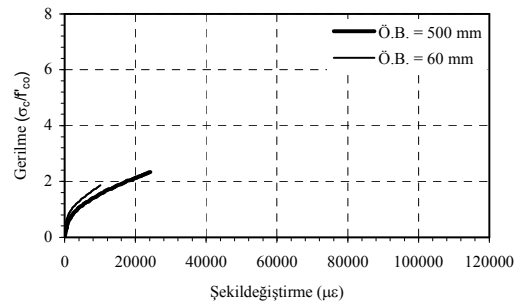


Şekil 6.3 LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan sonuçlar karşılaştırıldığında birbirine benzer davranışlar gözlenmiştir, Şekil 6.4. Bu, yapılan ölçümlerin sağlıklı olduğunu göstermektedir. Bu grafiklerde, tüm boydaki (500 mm), ölçüm çerçevesindeki (270 mm) yerdeğiştirmeölçerlerden ayrıca 60 mm ölçüm boyuna ait şekildeğiştirmeölçerlerden alınan veriler kullanılmıştır.



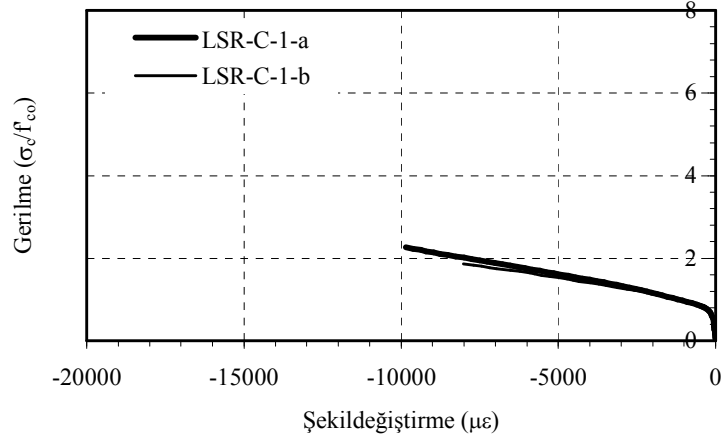
(LSR-C-1-a)



(LSR-C-1-b)

Şekil 6.4 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.5’de numunelere ait enine şekil değiştirmeler görülmektedir. Her iki numune enine doğrultuda da birbirine yakın davranış göstermiştir.



Şekil 6.5 LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.3 ve Şekil 6.6’da görülebilir.

Tablo 6.3 LSR-C-1-a ve LSR-C-1-b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-C-1-a	29.04	0.021	0.009	220 mm tek parça	220 mm genişliğinde tek parça
LSR-C-1-b	30.66	0.024	0.007*	300 mm tek parça	300 mm genişliğinde tek parça

* Şekil değiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-C-1-a)

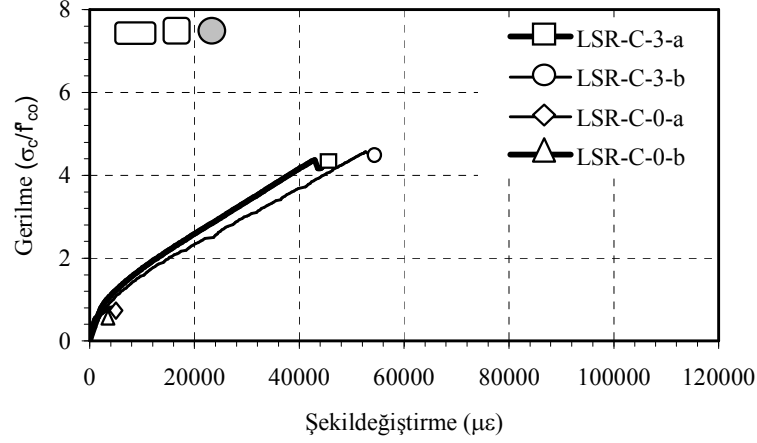


(LSR-C-1-b)

Şekil 6.6 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

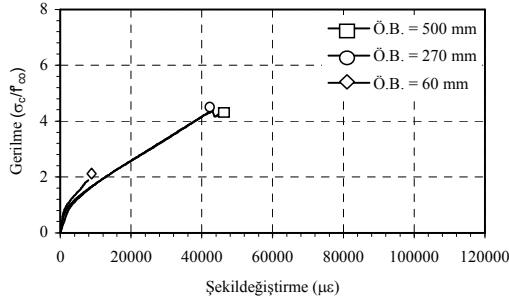
6.2.3 LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b

3 kat CFRP sargılanarak güçlendirilen bu iki numuneye ait tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.7'de verilmiştir. Sargısız numunelerle karşılaştırıldığında her iki numunede de önemli ölçüde dayanım ve şekildeğiştirme artışı gözlenmiştir.

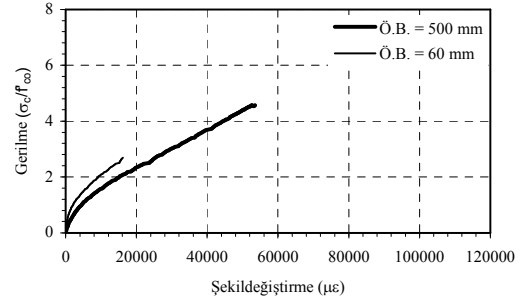


Şekil 6.7 LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)

Farklı ölçüm boylarından alınan verilerle elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.8'de görülebilir. 500, 270 ve 60 mm'den alınan ölçümlerden numunelerin kendi içinde benzer davranışlar gösterdikleri anlaşılmaktadır.



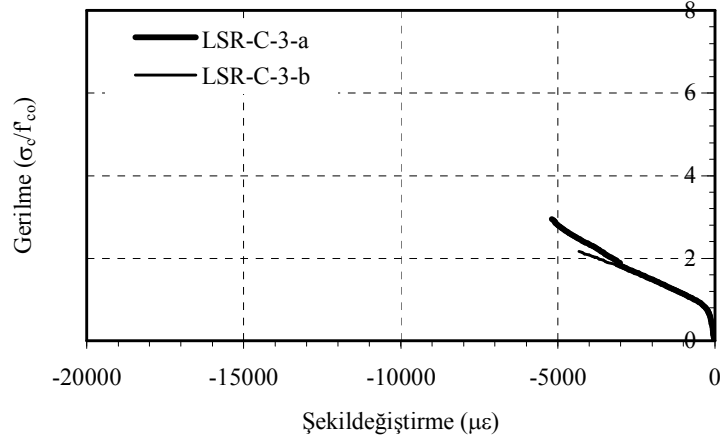
(LSR-C-3-a)



(LSR-C-3-b)

Şekil 6.8 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numuneler için enine doğrultuda oluşan şekildeğişimler Şekil 6.9'da verilmiştir. Enine doğrultuda numunelerin benzer davranış gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.9 LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b numuneleri için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.4 ve Şekil 6.10'da görülebilir.

Tablo 6.4 LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-C-3-a	54.48	0.045	0.005*	250 mm çok parçalı	30–50 mm arası değişen 5–6 parça
LSR-C-3-b	60.04	0.054	0.004*	300 mm çok parçalı	20–120 mm arası değişen 4–5 parça

* Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-C-3-a)

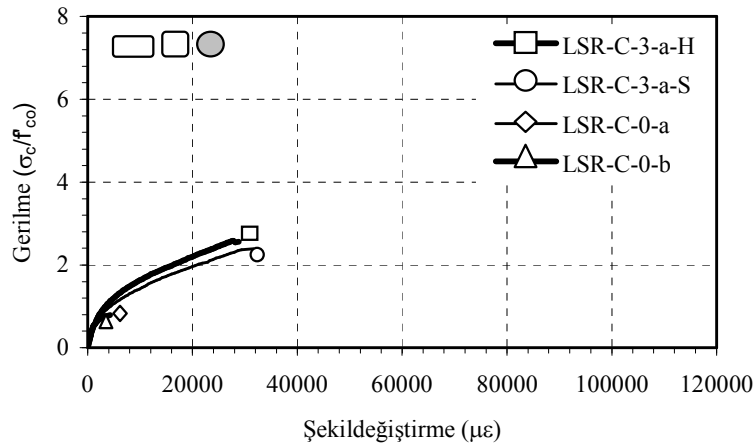


(LSR-C-3-b)

Şekil 6.10 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

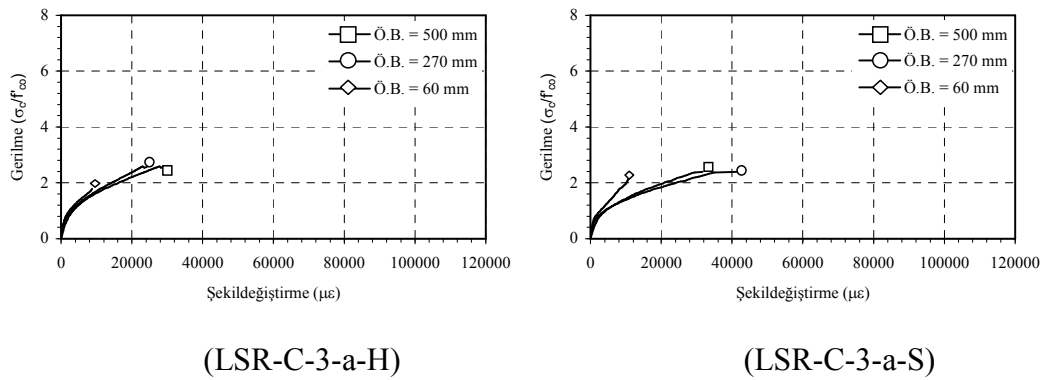
6.2.4 LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S

3 kat CFRP ile etriye (hoop) ve spiral şeklinde sargılanarak güçlendirilen bu iki numuneye ait tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.11’de verilmiştir. Sargısız numunelerle karşılaştırıldığında her iki numunede de dayanım ve şekildeğiştirme artışı gözlenmiştir. 3 kat sargılı olmasına karşın 50 mm’lik boşluklardan dolayı hacimsel olarak CFRP miktarı göze alınırsa sargılamanın yaklaşık 1.5 kat gibi olduğu düşünülmelidir. Bu duruma göre dayanım ve şekildeğiştirme artışları makul düzeydedir.



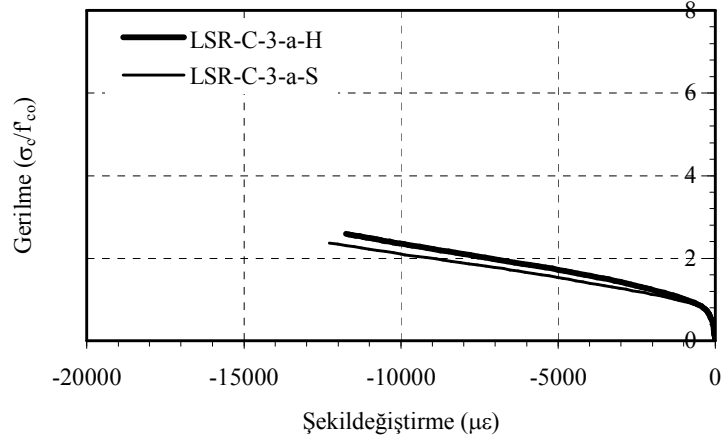
Şekil 6.11 LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)

Farklı ölçüm boylarından alınan verilerle elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.12’de görülebilir. 500, 270 ve 60 mm’den alınan ölçümlerden numunelerin kendi içlerinde benzer davranışlar gösterdikleri anlaşılmaktadır.



Şekil 6.12 H ve S Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Enine doğrultuda oluşan şekildeğişikliklerin verildiği Şekil 6.13'e göre her iki numunenin benzer davranış gösterdiği anlaşılmaktadır.

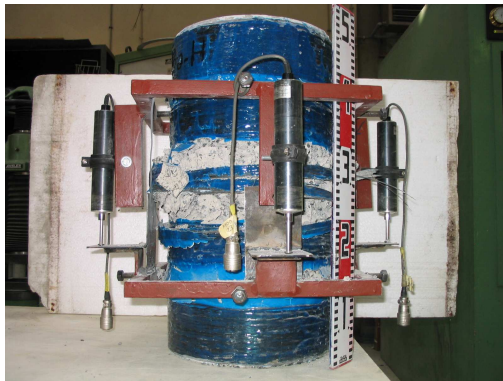


Şekil 6.13 LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S numuneleri için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.5 ve Şekil 6.14'de görülebilir.

Tablo 6.5 LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-C-3-a-H	34.66	0.028	0.012	120 mm çok parçalı	20–45 mm arası değişen 3–4 parça
LSR-C-3-a-S	32.46	0.032	0.012	350 mm çok parçalı	30–60 mm arası değişen 2–3 parça



(LSR-C-3-a-H)

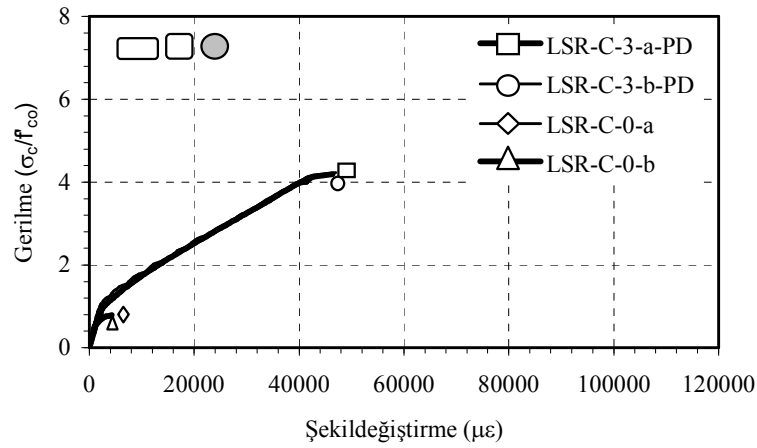


(LSR-C-3-a-S)

Şekil 6.14 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

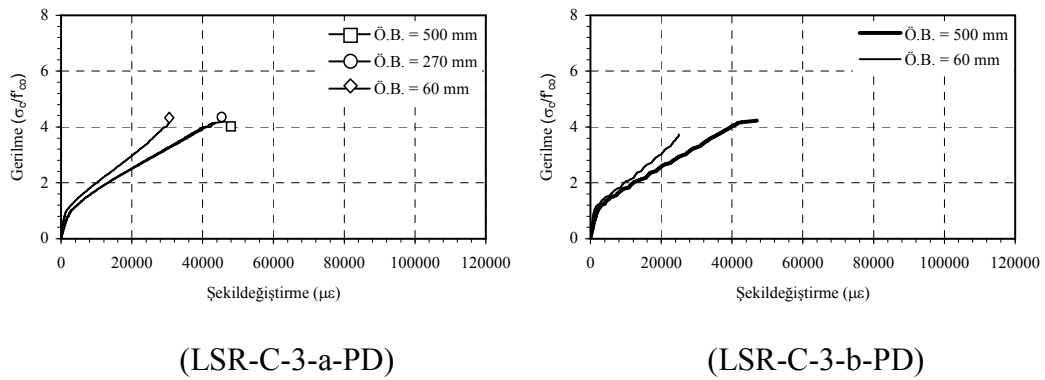
6.2.5 LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD

Güçlendirme öncesinde en büyük dayanımlarına ulaşana dek yüklenerek hasar verilen, daha sonra özel tamir harçlarıyla onarıldıktan sonra 3 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen bu iki numuneye ait tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.15’de verilmiştir. Sargısız numunelerle karşılaştırıldığında her iki numunede de önemli ölçüde dayanım ve şekildeğiştirme artışı gözlenmiştir. Önceden hasarlı olmalarına rağmen, doğrudan 3 kat CFRP sarılarak güçlendirilen numunelerle benzer davranış göstermişlerdir.



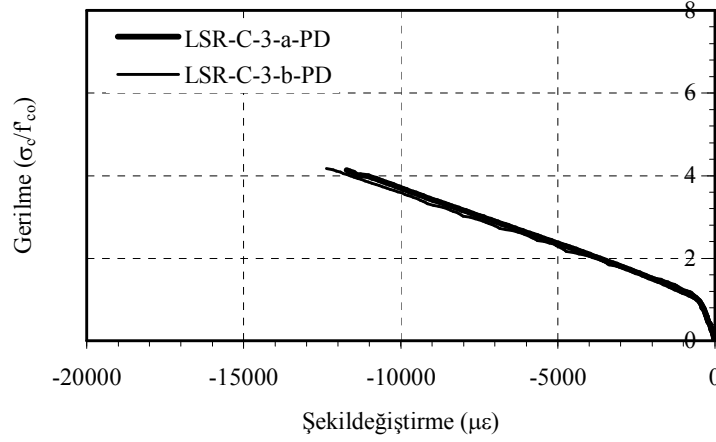
Şekil 6.15 LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)

Farklı ölçüm boylarından alınan verilerle elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.16’da görülebilir. 500, 270 ve 60 mm’den alınan ölçümlerden numunelerin kendi içlerinde benzer davranışlar gösterdikleri anlaşılmaktadır.



Şekil 6.16 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numuneler enine doğrultuda oluşan gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerine göre karşılaştırıldıklarında benzer davranış gösterdikleri anlaşılmaktadır, Şekil 6.17.



Şekil 6.17 LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

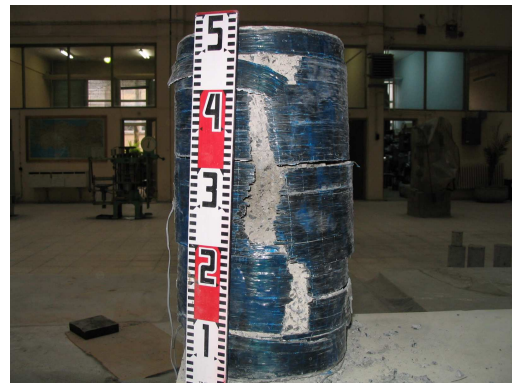
LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD numuneleri için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.6 ve Şekil 6.18’de görülebilir.

Tablo 6.6 LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-C-3-a-PD	55.64	0.046	0.012	330 mm tek parça	20–130 mm arası değişen 4–5 parça
LSR-C-3-b-PD	57.24	0.047	0.012	380 mm tek parça	40–105 mm arası değişen 3–4 parça



(LSR-C-3-a-PD)

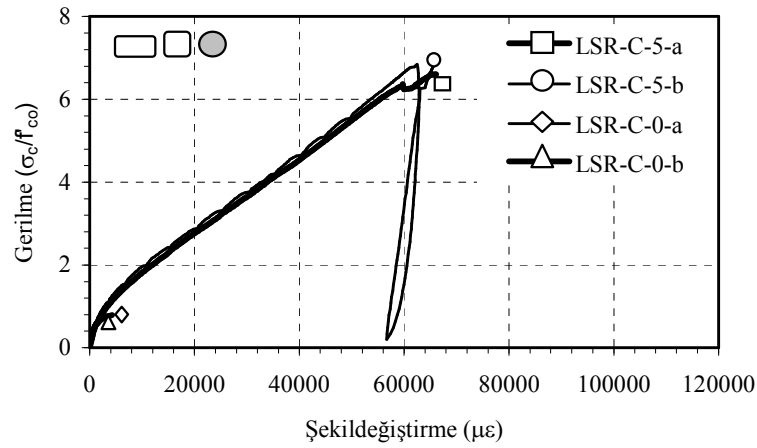


(LSR-C-3-b-PD)

Şekil 6.18 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

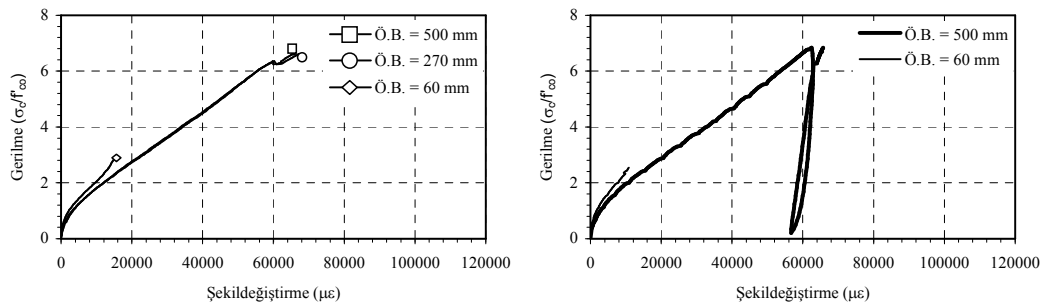
6.2.6 LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b

5 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen bu iki numuneye ait tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.19'da verilmiştir. Sargısız numunelerle karşılaştırıldığında her iki numunede de çok büyük miktarda dayanım ve şekildeğiştirme artışı gözlenmiştir. Özellikle LS-R-C-5-b numunesinde Amsler yükleme cihazının kapasitesi (500 ton) yetmediği için göçme sağlanamamıştır. Cihazın kapasitesine ulaşıldığı anda yük boşaltılıp tekrar yüklenmiştir ancak numune bir miktar daha şekildeğiştirme yapmasına rağmen taşıma gücüne ulaşamamıştır.



Şekil 6.19 LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b Gerilme – Ş.D. İlişkileri (Ö.B. 500 mm)

Farklı ölçüm boylarından alınan verilerle elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.20'de görülebilir. 500, 270 ve 60 mm'den alınan ölçümlerden numunelerin kendi içlerinde benzer davranışlar gösterdikleri anlaşılmaktadır.

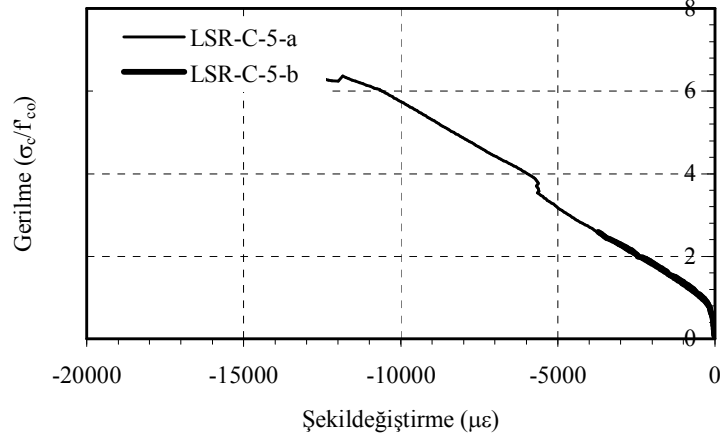


(LSR-C-5-a)

(LSR-C-5-b)

Şekil 6.20 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Her iki numunenin enine doğrultuda oluşan gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinde benzer davranış gözlenmiştir, Şekil 6.21. Ancak LSR-C-5-b numunesinin şekildeğiştirmeölçeri pik yüke ulaşmadan devre dışı kalmıştır.



Şekil 6.21 LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b numuneleri için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.7 ve Şekil 6.22'de görülebilir.

Tablo 6.7 LSR-C-5-a ve LSR-C-5-b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-C-5-a	84.88	0.065	0.013	250 mm çok parçalı	10–20 mm arası değişen çok parça
LSR-C-5-b	92.61	0.066	0.004*	Göçme oluşmadı	Göçme oluşmadı

* Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-C-5-a)



(LSR-C-5-b)

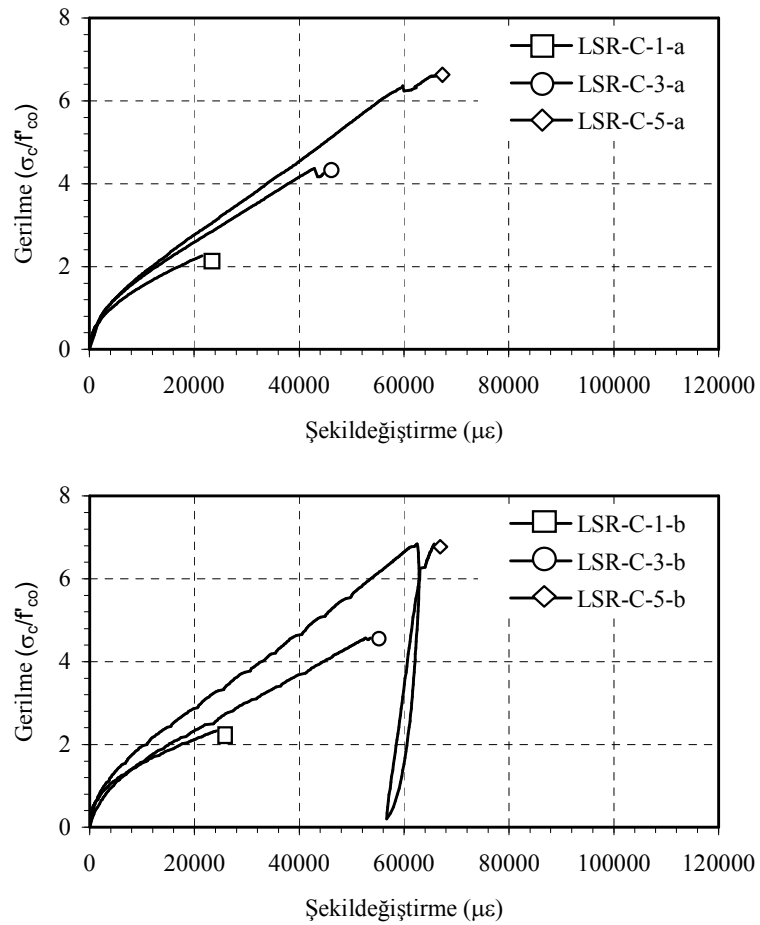
Şekil 6.22 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

6.2.7 Daire Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen numunelere ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Her bir değişken için kendi grubu içinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Daire enkesite sahip numunelerde incelenen değişkenler:

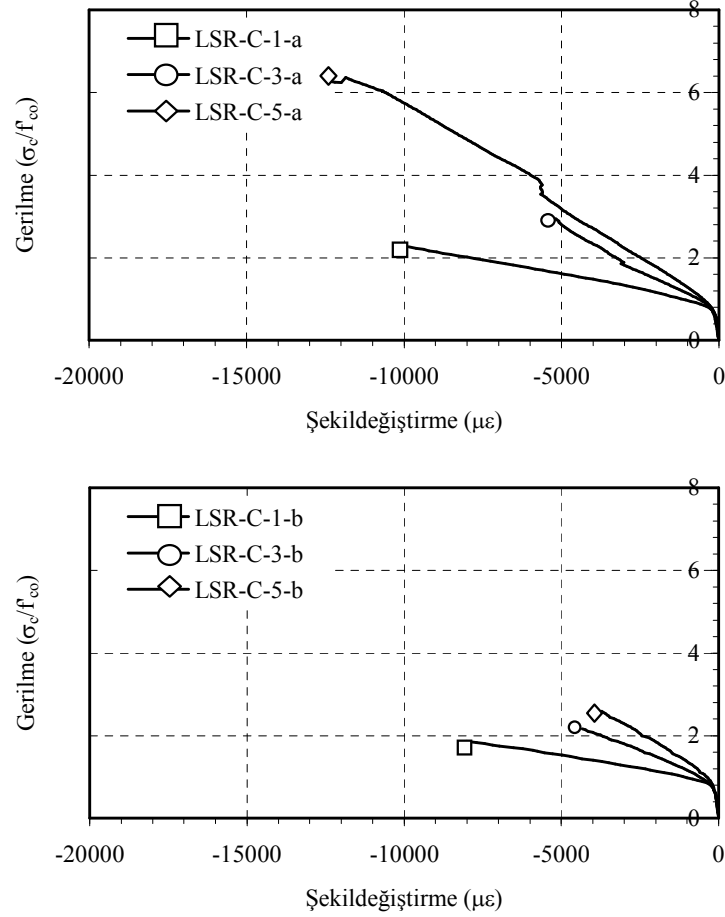
- CFRP Tabaka Sayısı
- Ön Hasar
- Farklı Sargı Şekilleri'dir.

Şekil 6.23'de CFRP tabaka sayısı artışının dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. 1, 3 ve 5 kat sargılanan numuneler için sırasıyla ortalama %129, %346 ve %572 oranında dayanım, %1050, %2350 ve %3175 oranında da şekildeğiştirme kapasitesi artışı gözlenmiştir.



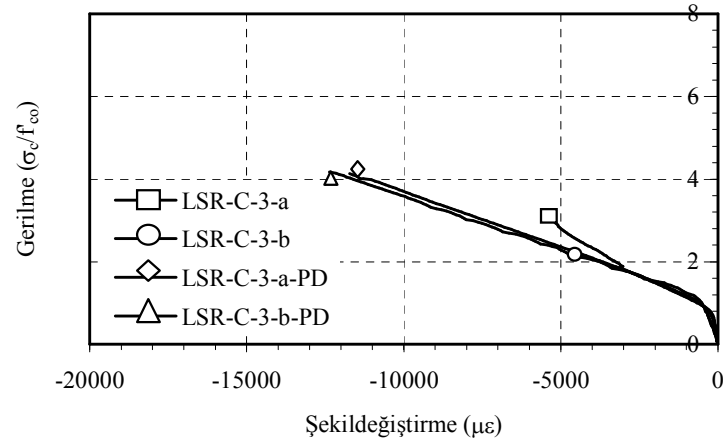
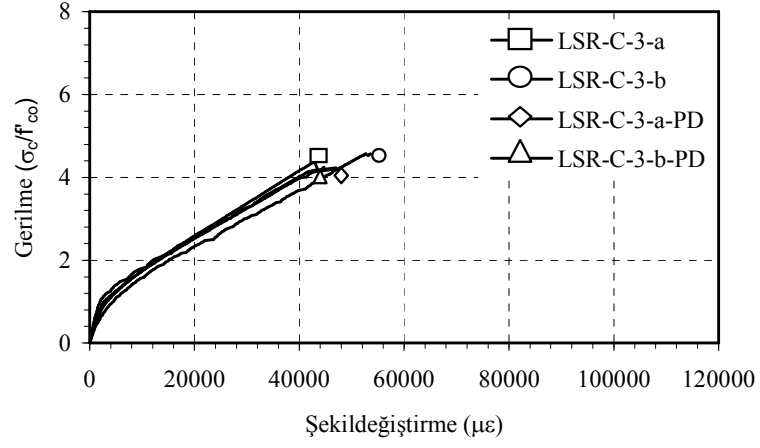
Şekil 6.23 CFRP Tabaka Sayısı Artışının Boyuna Davranışa Etkisi

CFRP tabaka sargı sayısının enine şekildeğiştirmeler üzerindeki etkisi Şekil 6.24’de sunulmuştur. Enine doğrultuda şekildeğiştirmeölçerler ile bazı numunelerde deney sonuna kadar ölçüm alınamamıştır. Buna göre sağlıklı bir yorum yapmak zor olmakla birlikte literatürde yer alan çalışmalar ışığında, enine doğrultudaki şekildeğiştirmelerin CFRP tabaka sargı sayısı artışı ile değişmediği söylenebilir.



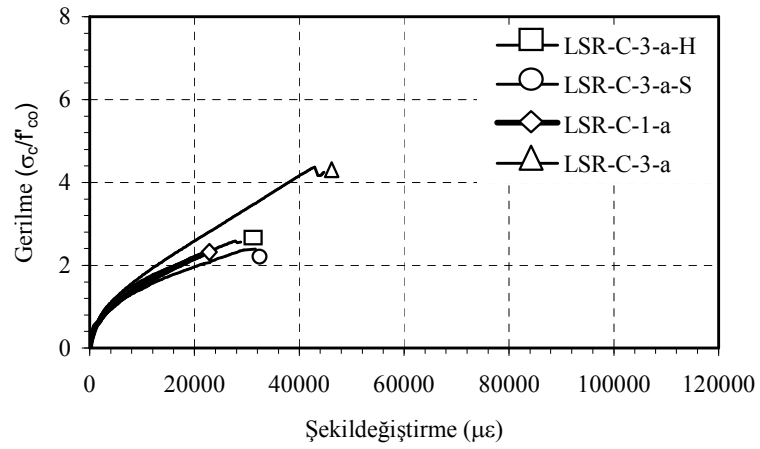
Şekil 6.24 CFRP Tabaka Sayısı Artışının Enine Davranışa Etkisi

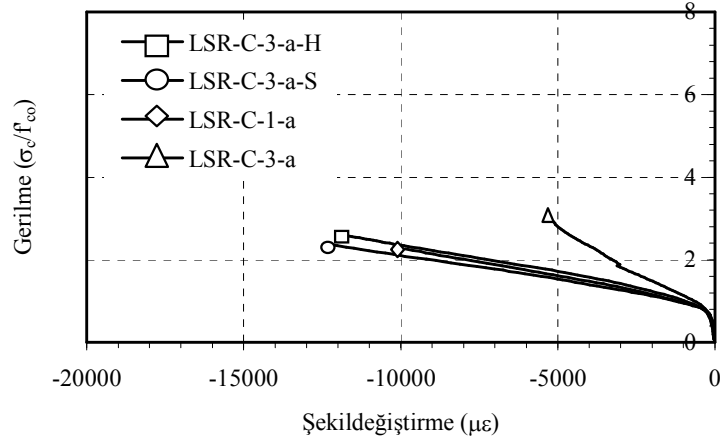
Önceden hasar verilip onarıldıktan sonra 3 kat CFRP sargılanarak güçlendirilen LSR-C-3-a-PD ve LSR-C-3-b-PD numunelerinin, doğrudan güçlendirilen LSR-C-3-a ve LSR-C-3-b numunelerinin davranışlarının karşılaştırması Şekil 6.25’de sunulmuştur. Buna göre hem boyuna hem de enine doğrultudaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir. Bu da hasarlı yapıların onarıldıktan sonra güçlendirmesinde CFRP kullanılabileceğinin ve bunun yüksek performans sağlayan bir uygulama olabileceğinin bir göstergesidir.



Şekil 6.25 Ön Hasar Verilmiş Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Davranışlarının Doğrudan Güçlendirilen Numuneler ile Karşılaştırması

Farklı sargı şekillerinin davranışa etkisinin incelendiği LSR-C-3-a-H ve LSR-C-3-a-S numunelerine ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.26'da verilmiştir.





Şekil 6.26 Farklı Sargı Şekillerinin Davranışa Etkisi

Hacimsel olarak 3 kat sargının yarısı kadar CFRP içeren bu numunelerde beklenen davranış 1 kat sargıdan daha iyi ancak 3 kat sargıdan da kötü olması yönündedir. Deney sonuçları bu doğrultuda incelenecek olursa, dayanım açısından her iki numunenin de neredeyse 1 kat sargıyla aynı davrandığı ancak özellikle enine doğrultudaki şekildeğiştirme yeteneklerinin 1 kattan daha iyi olduğu sonucuna ulaşılabilir. 3 kat CFRP sargılı LSR-C-3-a numunesinde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeölçerler pik yükten önce devre dışı kaldığından gerçekçi bir yorum yapmak yanıltır. Ancak yinede ulaşılan şekildeğiştirme mertebesi 3 kat sargılı ön hasar verilmiş numunelere ve hatta 5 kat sargılı LSR-C-5-a numunesine çok yakın olduğundan bu tür sargı şekillerinin özellikle enine şekildeğiştirme yeteneğini artırdığı söylenebilir.

Tablo 6.8’de daire enkesitli numunelere ait deneysel sonuçlar görülmektedir. Bu tabloda f'_{co} , f'_{cc} , ϵ_{cc} ve ϵ_{ch} sırasıyla numunenin deney günündeki sargısız beton dayanımını ($f'_{co}=0.85 \times f'_c$), sargılanmış dayanımını, 500 mm ölçüm boyundaki aksenal şekildeğiştirmesini, 60 mm ölçüm boyundaki enine şekildeğiştirmesini göstermektedir. f'_{cc}/f'_{co} değeri dayanımdaki artışı, $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ ise şekildeğiştirme kapasitesindeki artışı göstermektedir. Tüm numuneler için sargılanmamış durumdaki aksenal şekildeğiştirme değeri ϵ_{co} , 0.002 kabul edilmiştir.

Tablo 6.8 Daire Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları

Numune	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{ch}	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}}$	D.A. (%)	Ş.A. (%)
LSR-C-0-a	12.22	—	0.0030	—	—	—	—	—
LSR-C-0-b	12.22	—	0.0043	—	—	—	—	—
LSR-C-1-a	12.84	29.04	0.022	0.010	2.3	11.0	126	1000
LSR-C-1-b	13.14	30.66	0.024	0.008*	2.3	12.0	133	1100
LSR-C-3-a-PD	13.27	55.64	0.047	0.012	4.2	23.5	319	2250
LSR-C-3-b-PD	13.53	57.24	0.047	0.012	4.2	23.5	323	2250
LSR-C-3-a	12.84	56.12	0.044	0.005*	4.4	22.0	337	2100
LSR-C-3-b	13.14	60.04	0.054	0.004*	4.6	27.0	357	2600
LSR-C-3-a-H	13.53	35.06	0.028	0.012	2.6	14.0	159	1300
LSR-C-3-a-S	13.53	32.46	0.032	0.012	2.4	16.0	140	1500
LSR-C-5-a	12.84	84.88	0.065	0.013*	6.3	32.5	561	3150
LSR-C-5-b	13.53	92.61	0.066	0.004*	7.2	33.0	584	3200

D.A. : Dayanım artışı, Ş.A. : Şekildeğiştirme kapasitesi artışı, * Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı

6.3 Kare Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçları

180 günlük basınç dayanımı 15.92 MPa olan düşük dayanımlı beton ile üretilen, boyutları 250×250 mm ($b \times h$) olan kare enkesite sahip 500 mm yüksekliğindeki numuneler monoton veya tekrarlı artan eksenel basınç gerilmeleri altında deneye tabi tutulmuştur. Orijinal (sargısız) olarak denenen 2 numune dışında kalan 12 numune 1, 3 veya 5 kat CFRP tabakaları ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Bu enkesite sahip numunelerde değişkenler; farklı yükleme tipi (monoton veya tekrarlı artan), köşe yarıçapı değişimi (10, 20 veya 40) ve CFRP sargı etkinliğini artırıcı detay uygulamasıdır. Numuneler ile ilgili bilgiler Tablo 1.2’de görülebileceği gibi Tablo 6.9’da da özet bilgi sunulmuştur.

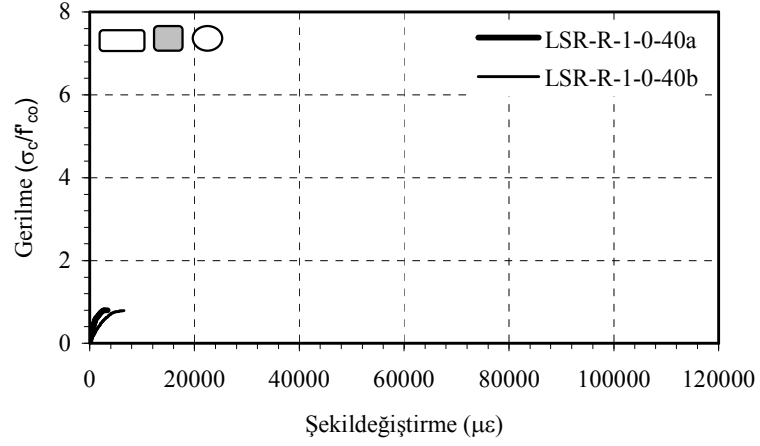
Tablo 6.9 Kare Enkesitli Numunelere Ait Özet Bilgiler

Numune İsmi	f'_{coi} (MPa)	Numune $b \times h \times l$ (mm)	Polimer Lif Sargı Sayısı	Ek Değişken	Yükleme Tipi
LSR-R-1-0-40a	13.27	$250 \times 250 \times 500$	0	–	M
LSR-R-1-0-40b	13.53	$250 \times 250 \times 500$	0	–	T
LSR-R-1-1-40a	13.53	$250 \times 250 \times 500$	1	–	M
LSR-R-1-1-40b	13.53	$250 \times 250 \times 500$	1	–	T
LSR-R-1-1-40a-A	13.53	$250 \times 250 \times 500$	1	Etkinlik Artırıcı Detay	M
LSR-R-1-1-40b-A	13.53	$250 \times 250 \times 500$	1	Etkinlik Artırıcı Detay	M
LSR-R-1-3-10a	13.53	$250 \times 250 \times 500$	3	Köşe Yarıçapı	M
LSR-R-1-3-10b	13.53	$250 \times 250 \times 500$	3	Köşe Yarıçapı	T
LSR-R-1-3-20a	13.53	$250 \times 250 \times 500$	3	Köşe Yarıçapı	M
LSR-R-1-3-20b	13.53	$250 \times 250 \times 500$	3	Köşe Yarıçapı	T
LSR-R-1-3-40a	13.53	$250 \times 250 \times 500$	3	–	M
LSR-R-1-3-40b	13.53	$250 \times 250 \times 500$	3	–	T
LSR-R-1-5-40a	13.53	$250 \times 250 \times 500$	5	–	M
LSR-R-1-5-40b	13.53	$250 \times 250 \times 500$	5	–	T

f'_{coi} : Deneyin yapıldığı güne karşılık gelen standart silindirik basınç dayanımının 0.85’i. M: monoton artan yükleme, T: tekrarlı artan yükleme

6.3.1 LSR-R-1-0-40a ve LSR-R-1-0-40b

Bu iki numune kare enkesite sahip tüm numuneler için referans teşkil etmesi bakımından önemlidir. Sargılanmadan orijinal halde denenen bu iki numune için tüm boydan (500 mm) alınan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.27'de verilmiştir. Deney sonrasında elde edilen bilgiler Tablo 6.10'da, fotoğraflar Şekil 6.28'de verilmiştir.



Şekil 6.27 LSR-R-1-0-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Tablo 6.10 LSR-R-1-0-40a ve LSR-R-1-0-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	P_{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}
LSR-R-1-0-40a *	88	10.75	0.0033
LSR-R-1-0-40b **	88.5	10.83	0.0059

* Beton yaşı: 166, ** Beton yaşı 203 P_{maks} : En büyük yük, σ_{maks} : En büyük gerilme, ϵ_{cc} : 500 mm için göçme anındaki şekildeğiştirme



(LSR-R-1-0-40a)

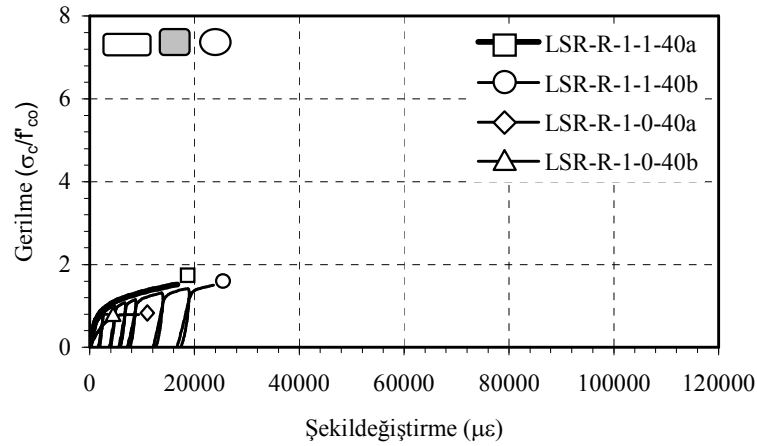


(LSR-R-1-0-40b)

Şekil 6.28 Numunelerin Deney Sonrasındaki Görüntüleri

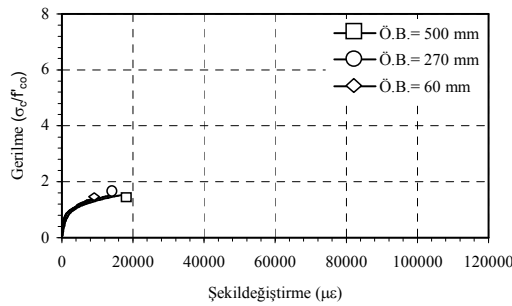
6.3.2 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b

1 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.29'da verilmiştir. Tekrarlı artan yükler altında denenen b numunesi, a numunesiyle benzer ancak biraz daha sünek davranış göstermiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde önemli ölçüde artış gözlenmektedir.

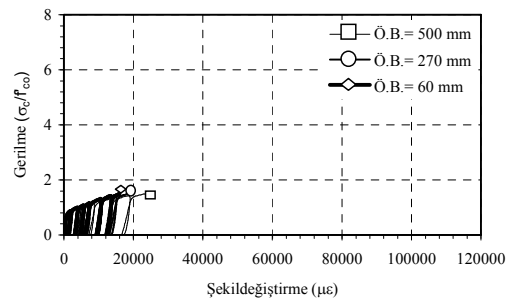


Şekil 6.29 LSR-R-1-1-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan sonuçlar karşılaştırıldığında birbirine benzer davranışlar gözlenmiştir, Şekil 6.30. Bu grafiklerde, tüm boydaki (500 mm) ve ölçüm çerçevesindeki (270 mm) yerdeğiştirmeölçerlerden ayrıca 60 mm ölçüm boyuna ait şekildeğiştirmeölçerlerden alınan veriler kullanılmıştır.



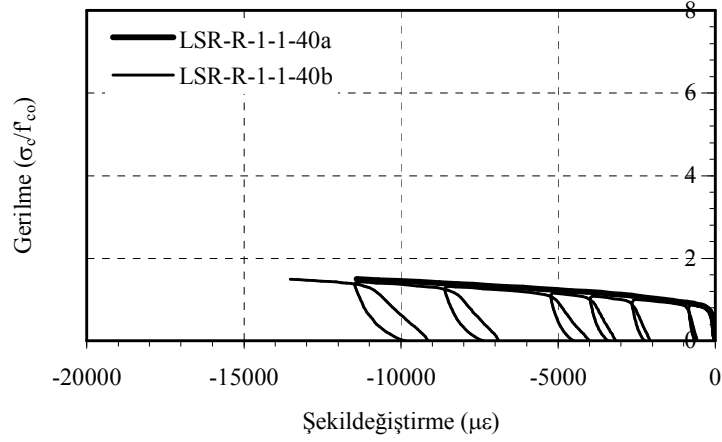
(LSR-R-1-1-40a)



(LSR-R-1-1-40b)

Şekil 6.30 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.31’de numunelere ait enine şekildeğiştirmeler görülmektedir. Her iki numune enine doğrultuda da birbirine yakın davranış göstermiştir.

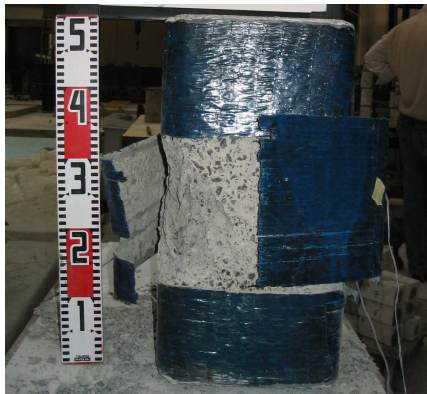


Şekil 6.31 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

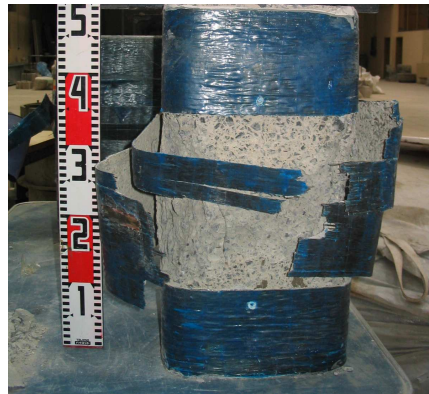
Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.11 ve Şekil 6.32’de görülebilir.

Tablo 6.11 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-1-40a	20.58	0.017	0.011	203 mm tek parça	203 mm genişliğinde tek parça
LSR-R-1-1-40b	20.33	0.025	0.013	225 mm çok parçalı	20–155 mm arası değişen 2–3 parça



(LSR-R-1-1-40a)

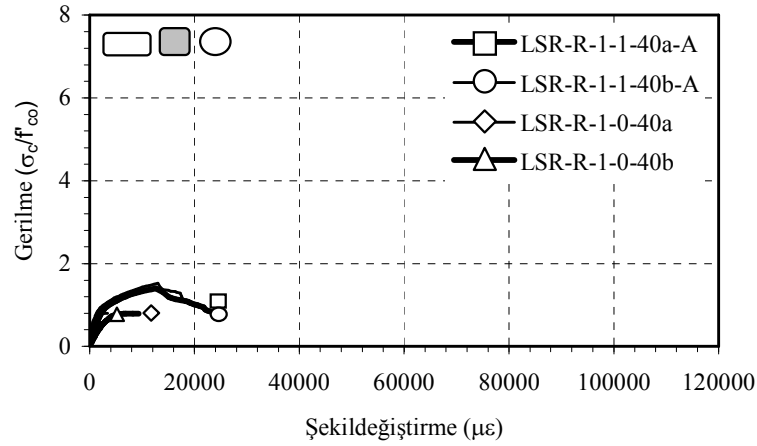


(LSR-R-1-1-40b)

Şekil 6.32 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

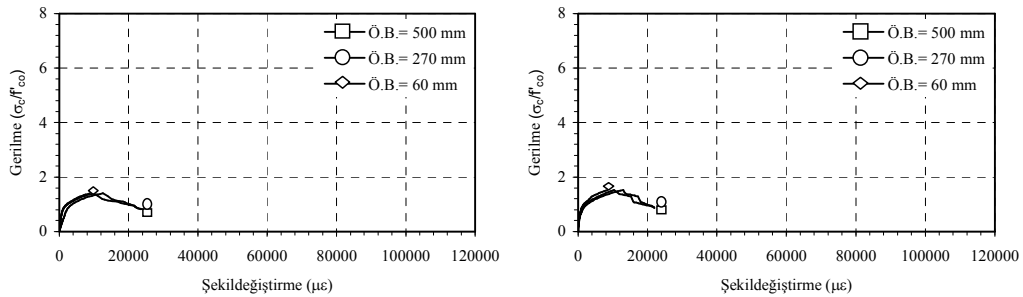
6.3.3 LSR-R-1-1-40a-A ve LSR-R-1-1-40b-A

1 kat CFRP ile sargılandıktan sonra etkinlik artırıcı detay uygulaması ile güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.33'de verilmiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde artış gözlenmektedir. Ancak detay uygulamasının olumlu bir etkisi gözlenmemiştir. 1 kat sargılı numuneler ile yaklaşık aynı dayanım, şekildeğiştirmede ise bir miktar artış gözlenmiştir.



Şekil 6.33 LSR-R-1-1-40a-A ve b-A Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.34'de numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırılmıştır. Bütün ölçüm boylarından alınan verilerin birbirine yakın olmasından, sağlıklı veriler toplandığı anlaşılmaktadır.

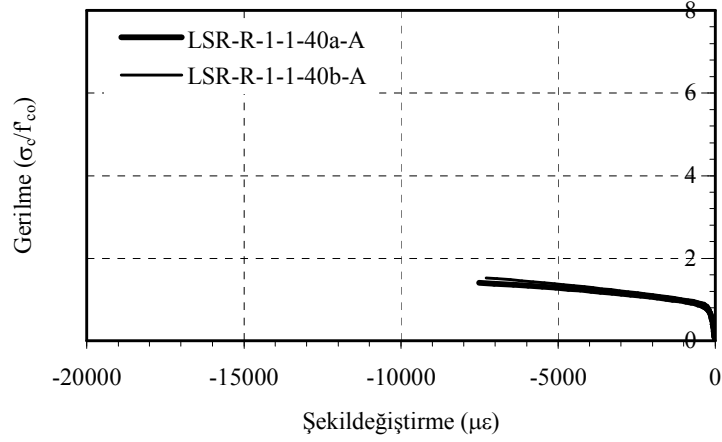


(LSR-R-1-1-40a-A)

(LSR-R-1-1-40b-A)

Şekil 6.34 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.35’de numunelere ait enine şekildeğiştirmeler görülmektedir. Her iki numune enine doğrultuda da birbirine yakın davranış göstermiştir.

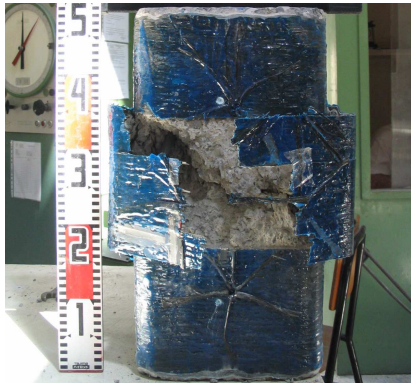


Şekil 6.35 LSR-R-1-1-40a-A ve LSR-R-1-1-40b-A Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.12 ve Şekil 6.36’da görülebilir.

Tablo 6.12 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-1-40a-A	19.02	0.013	0.008	162 mm çok parçalı	40–90 mm arası değişen 3–4 parça
LSR-R-1-1-40b-A	20.64	0.014	0.007	250 mm tek parça	250 mm tek parça



(LSR-R-1-1-40a-A)

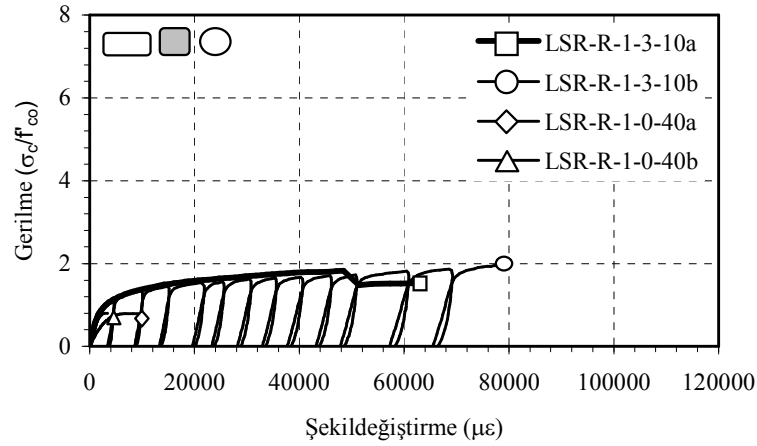


(LSR-R-1-1-40b-A)

Şekil 6.36 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

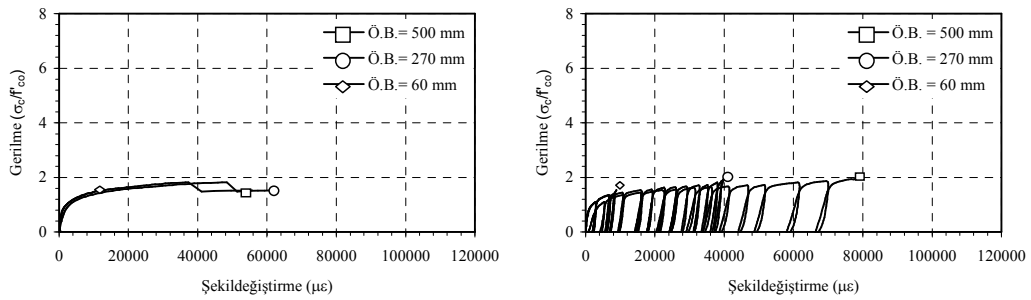
6.3.4 LSR-R-1-3-10a ve LSR-R-1-3-10b

Köşe yarıçapının davranışa olan etkisinin araştırılması için, köşeleri 10 mm çapında yuvarlatıldıktan sonra 3 kat CFRP ile güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.37’de verilmiştir. Tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen b numunesi, benzer dayanım ancak daha sünek bir davranış göstermiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde önemli ölçüde artış gözlenmektedir.



Şekil 6.37 LSR-R-1-3-10a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırıldığında a numunesi için benzer sonuçlar alındığı gözlenebilir, Şekil 6.38. Ancak b numunesinde test bölgesinde daha az deformasyon tespit edilmiştir.

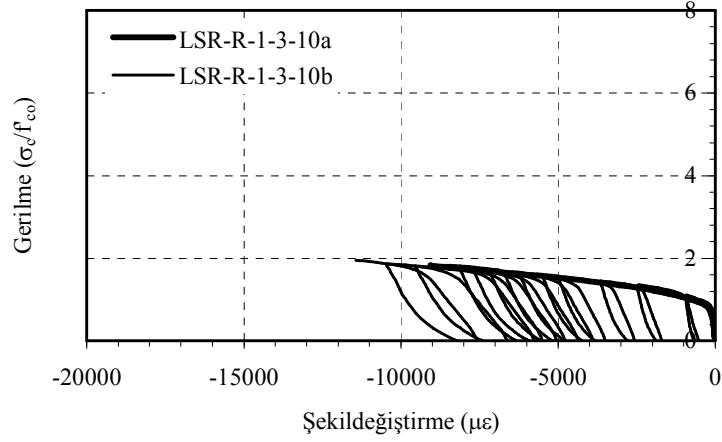


(LSR-R-1-3-10a)

(LSR-R-1-3-10b)

Şekil 6.38 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numunelere ait enine şekildeğiştirmeler incelendiğinde, her iki numune enine doğrultuda da birbirine yakın davranış göstermiştir, Şekil 6.39.



Şekil 6.39 LSR-R-1-3-10a ve LSR-R-1-3-10b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.13 ve Şekil 6.40'da görülebilir.

Tablo 6.13 LSR-R-1-3-10a ve LSR-R-1-3-10b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-3-10a	24.74	0.049	0.009	130 mm çok parçalı	20–70 mm arası değişen 4–5 parça
LSR-R-1-3-10b	26.32	0.078	0.011	100 mm çok parçalı	10–50 mm arası değişen 5–6 parça



(LSR-R-1-3-10a)

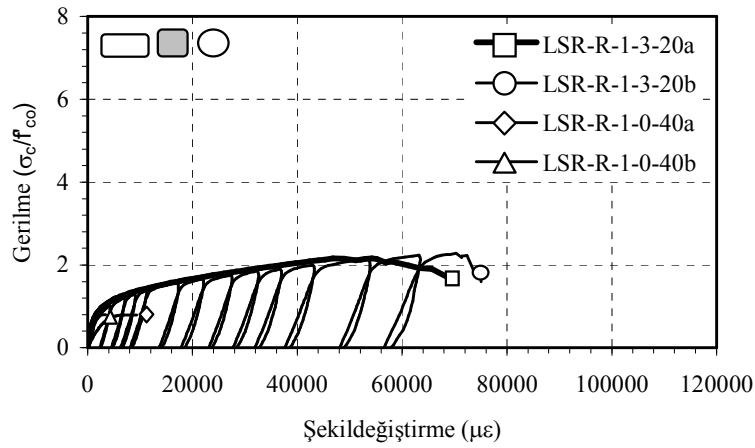


(LSR-R-1-3-10b)

Şekil 6.40 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

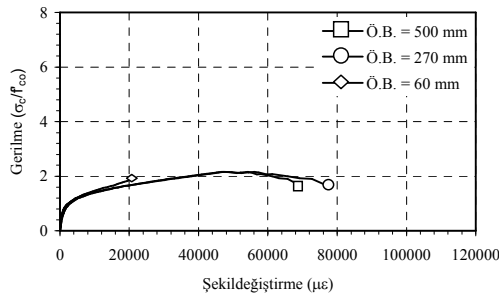
6.3.5 LSR-R-1-3-20a ve LSR-R-1-3-20b

Köşe yarıçapının davranışa olan etkisinin araştırılması için, köşeleri 20 mm çapındaki çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatıldıktan sonra 3 kat CFRP ile güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.41'de verilmiştir. Tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen b numunesi, benzer dayanım ancak daha sünek bir davranış göstermiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde önemli ölçüde artış gözlenmektedir.

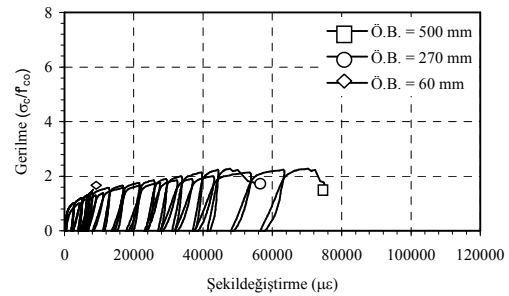


Şekil 6.41 LSR-R-1-3-20a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırıldığında a numunesi için benzer sonuçlar alındığı gözlenebilir, Şekil 6.42. Ancak tekrarlı yükleme yapılan 10 mm köşe yarıçapına sahip b numunesinde olduğu gibi LSR-R-1-3-20b numunesinde de test bölgesinde daha az deformasyon tespit edilmiştir.



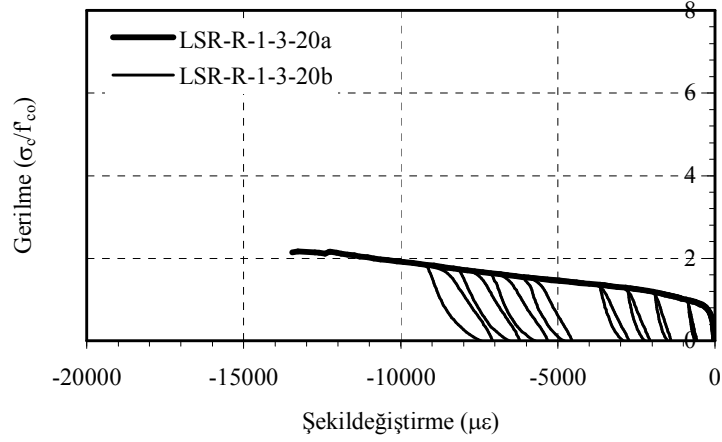
(LSR-R-1-3-20a)



(LSR-R-1-3-20b)

Şekil 6.42 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numunelere ait enine şekildeğiştirmeler incelendiğinde, her iki numune enine doğrultuda da birbirine yakın davranış göstermiştir, Şekil 6.43.



Şekil 6.43 LSR-R-1-3-20a ve LSR-R-1-3-20b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.14 ve Şekil 6.44'de görülebilir.

Tablo 6.14 LSR-R-1-3-20a ve LSR-R-1-3-20b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-3-20a	29.25	0.055	0.014	200 mm çok parçalı	10–40 mm arası değişen 10–15 parça
LSR-R-1-3-20b	30.83	0.072	0.010*	70 mm çok parçalı	10–30 mm arası değişen 3–4 parça

* Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-R-1-3-20a)

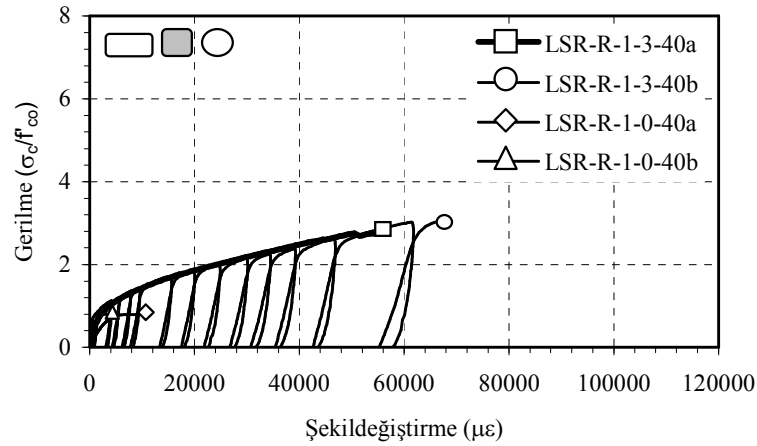


(LSR-R-1-3-20b)

Şekil 6.44 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

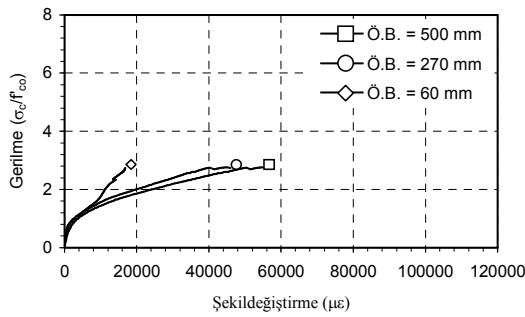
6.3.6 LSR-R-1-3-40a ve LSR-R-1-3-40b

Enine doğrultuda 3 kat CFRP sarılarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.45'de verilmiştir. Tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen b numunesi, benzer dayanım ancak daha sünek bir davranış göstermiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde önemli ölçüde artış gözlenmektedir.

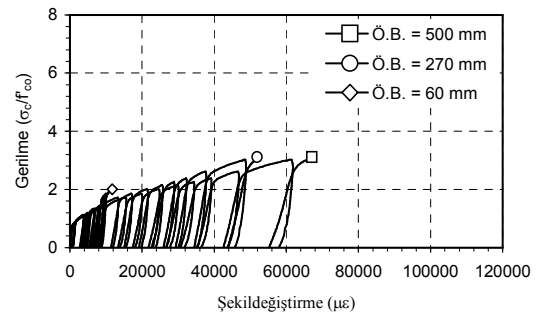


Şekil 6.45 LSR-R-1-3-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırıldığında a numunesi için benzer sonuçlar alındığı gözlenebilir, Şekil 6.46. Ancak tekrarlı yükleme yapılan 10 ve 20 mm köşe yarıçapına sahip b numunelerinde olduğu gibi LSR-R-1-3-40b numunesinde de test bölgesinde daha az deformasyon tespit edilmiştir.



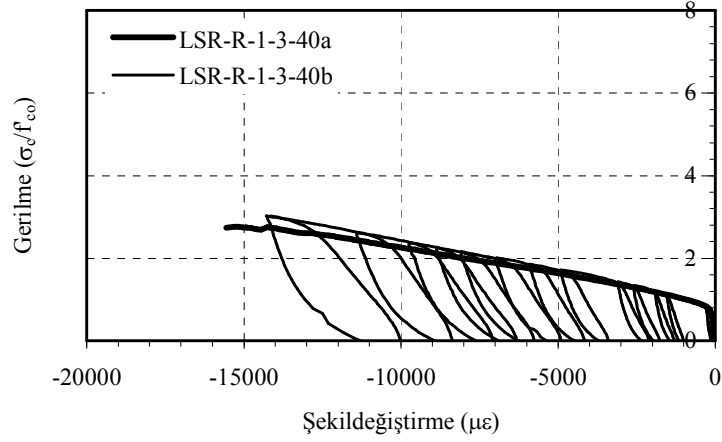
(LSR-R-1-3-40a)



(LSR-R-1-3-40b)

Şekil 6.46 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.47’de numunelere ait enine şekildeğiştirmeler incelendiğinde, her iki numunenin enine doğrultuda da birbirine yakın davranış gösterdiği anlaşılabılır.



Şekil 6.47 LSR-R-1-3-40a ve LSR-R-1-3-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.15 ve Şekil 6.48’de görülebilir.

Tablo 6.15 LSR-R-1-3-40a ve LSR-R-1-3-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-3-40a	37.36	0.055	0.016	150 mm çok parçalı	20–90 mm arası değişen 5–6 parça
LSR-R-1-3-40b	40.92	0.066	0.014	70 mm çok parçalı	10–30 mm arası değişen 3–4 parça



(LSR-R-1-3-40a)

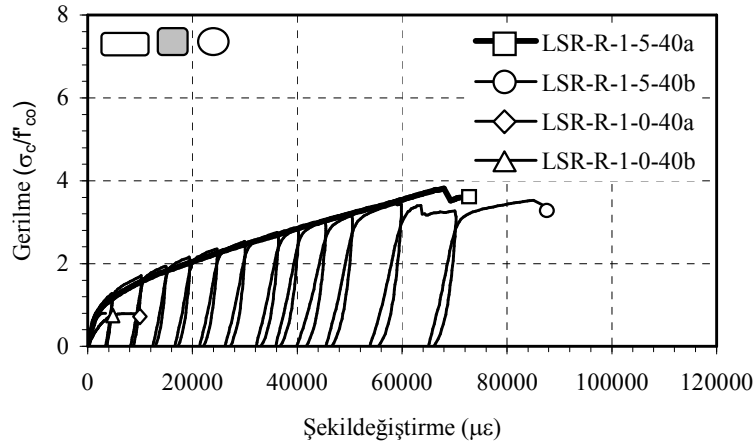


(LSR-R-1-3-40b)

Şekil 6.48 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

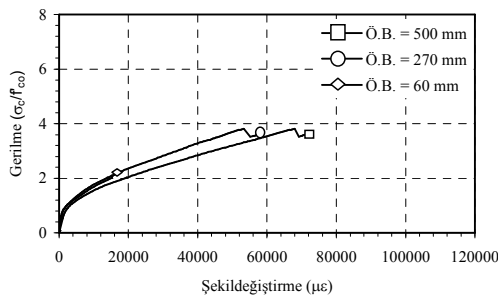
6.3.7 LSR-R-1-5-40a ve LSR-R-1-5-40b

Şekil 6.49'da, enine doğrultuda 5 kat CFRP sarılarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Tekrarlı artan aksenal yükler altında denenen b numunesi, monoton artan şekilde yüklenen a numunesine göre benzer dayanım ancak daha sünek bir davranış göstermiştir. Orijinal numunelere göre her iki numunede de önemli ölçüde dayanım ve şekildeğiştirme yeteneği artışı gözlenmektedir.

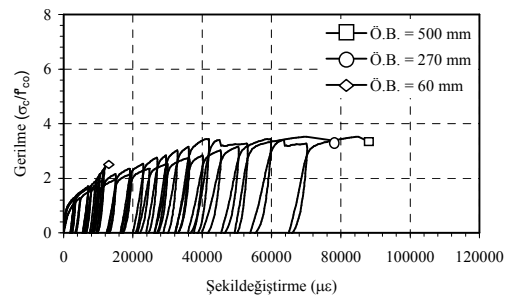


Şekil 6.49 LSR-R-1-5-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.50'de numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri karşılaştırıldığında a ve b numuneleri için test bölgesinde, tekrarlı yükleme yapılan 3 kat CFRP sargılı b numunelerinde olduğu gibi daha az deformasyon tespit edilmiştir. Tekrarlı artan yükleme yapılan tüm numunelerde test bölgesi daha az deformasyona uğramıştır. Buna karşın monoton artan yükleme yapılan numunelerden sadece 5 kat sargılı LSR-R-1-5-40a numunesinde test bölgesi daha az şekildeğiştirme yapmıştır.



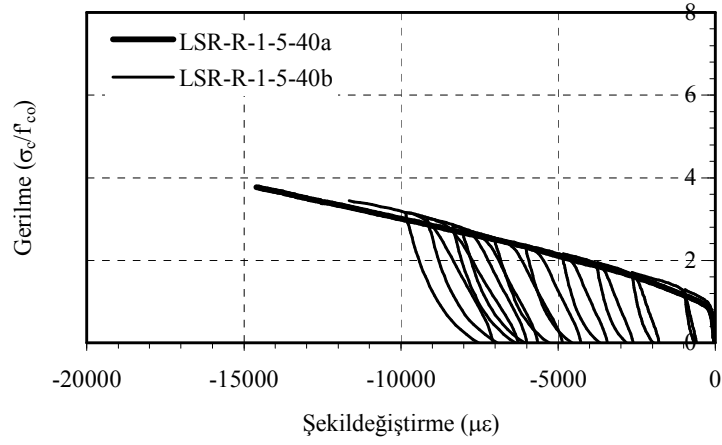
(LSR-R-1-5-40a)



(LSR-R-1-5-40b)

Şekil 6.50 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.51’de numunelere ait enine şekildeğiştirmeler incelendiğinde, her iki numune enine doğrultuda da birbirine yakın davranış gösterdiği anlaşılabılır. Ancak b numunesinin şekildeğiştirmeölçeri pik yükten önce devre dışı kalmıştır.



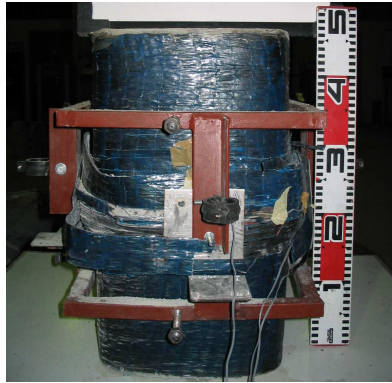
Şekil 6.51 LSR-R-1-5-40a ve LSR-R-1-5-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.16 ve Şekil 6.52’de görülebilir.

Tablo 6.16 LSR-R-1-5-40a ve LSR-R-1-5-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-5-40a	51.65	0.069	0.015	170 mm çok parçalı	10–30 mm arası değişen çok parça
LSR-R-1-5-40b	47.77	0.085	0.012*	130 mm çok parçalı	5–30 mm arası değişen çok parça

* Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-R-1-5-40a)



(LSR-R-1-5-40b)

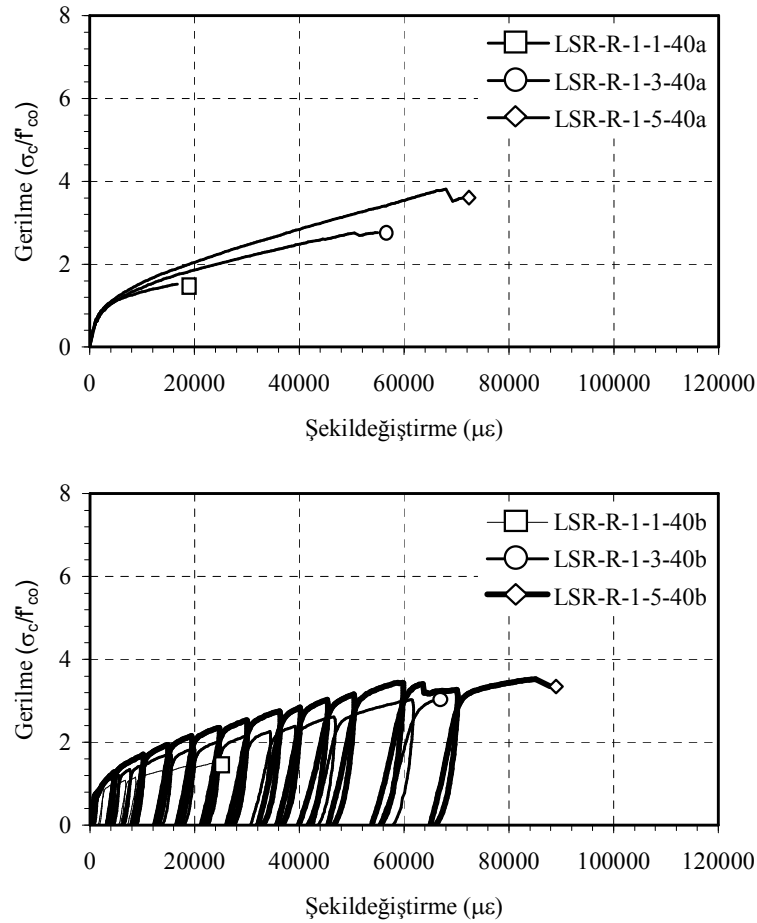
Şekil 6.52 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

6.3.8 Kare Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen numunelere ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Kare enkesite sahip numunelerde incelenen değişkenler:

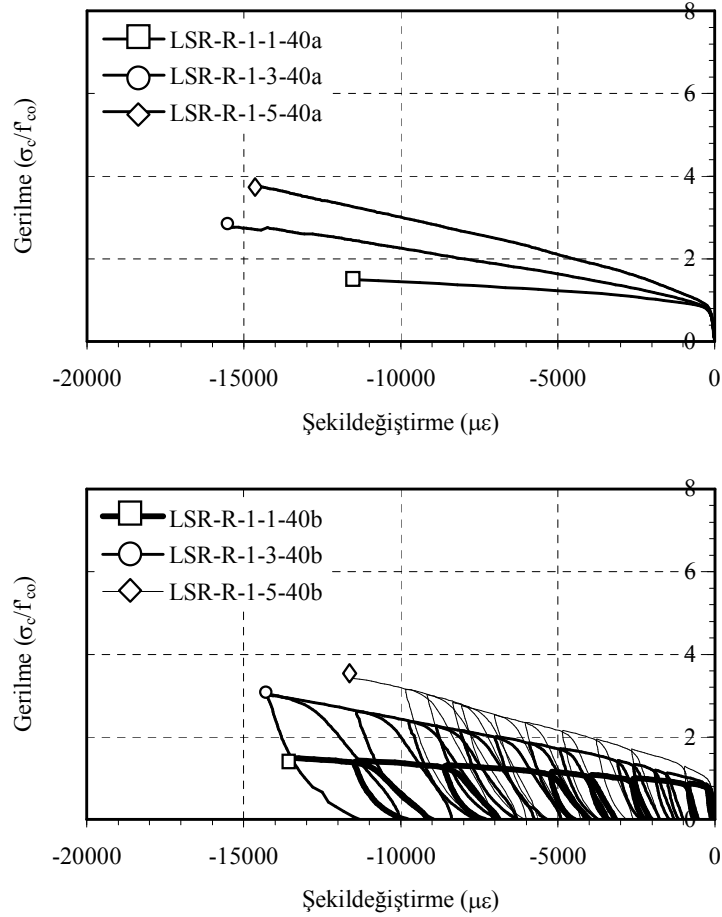
- CFRP Tabaka Sayısı
- Köşe Yarıçapı
- Yükleme Tipi
- Etkinlik Artırıcı Detay Uygulaması'dır.

Şekil 6.53'de CFRP tabaka sayısı artışının dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Tekrarlı artan yükleme ile denenen numuneler benzer dayanıma ulaşmış ancak daha sünek bir davranış göstermişlerdir. 1, 3 ve 5 kat sargılanan numuneler için sırasıyla ortalama %51, %189 ve %267 oranında dayanım, %950, %2925 ve %3750 oranında da şekildeğiştirme kapasitesi artışı gözlenmiştir.



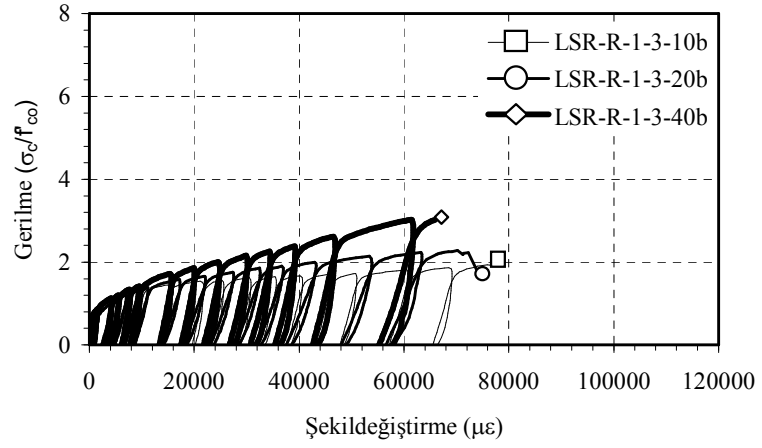
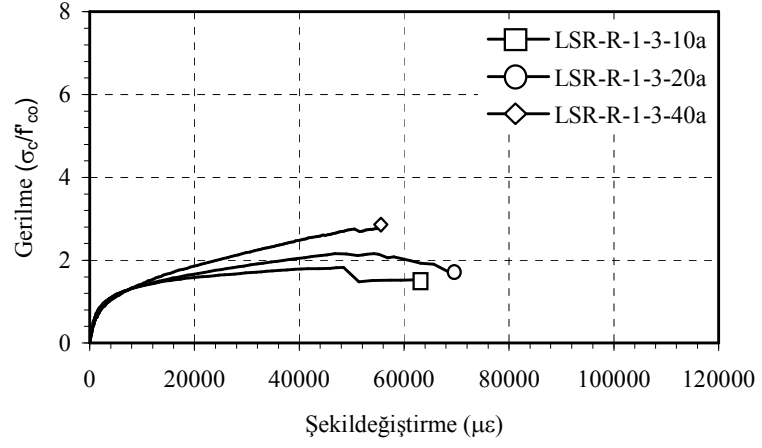
Şekil 6.53 CFRP Tabaka Sayısı Artışının Boyuna Davranışa Etkisi

CFRP tabaka sargı sayısının enine şekildeğiştirmeler üzerindeki etkisi Şekil 6.54'de sunulmuştur. Birçok numunede şekildeğiştirmeölçerlerden deney sonuna kadar sağlıklı veri alınabilmiştir buna göre enine doğrultudaki şekildeğiştirmelerin CFRP tabaka sargı sayısı artışı ile değışmediğı söylenebilir.



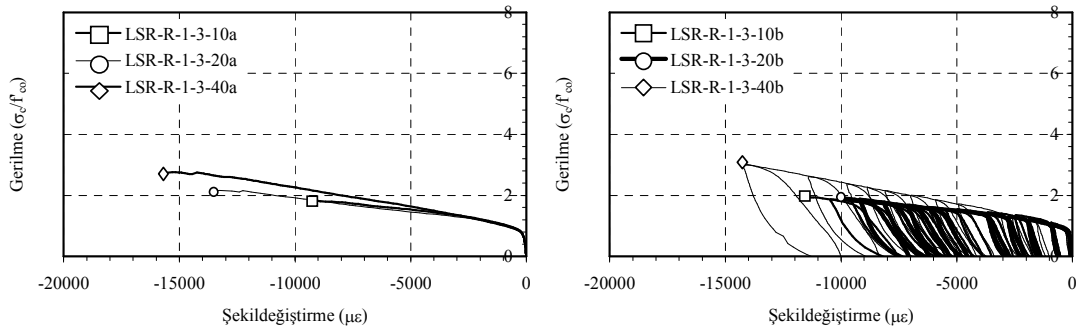
Şekil 6.54 CFRP Tabaka Sayısı Artışının Enine Davranışa Etkisi

Dörtgen enkesit şeklindeki numunelerin köşeleri gerilme yığılmalarını önlemek için köşeleri 10, 20 veya 40 mm çapında çeyrek daire formunda yuvarlatılmıştır. Köşe yarıçapı değışimin davranışa olan etkisinin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 6.55'de sunulmuştur. Buna göre hem monoton hem de tekrarlı artan yükler altında test edilen numunelerde köşe yarıçapının artması (enkesit şeklinin daire formuna yaklaşması) oluşan enine gerilmelerin CFRP liflere daha çok yayılmasını ve dayanımın buna bağılı olarak artmasını sağlamıştır. Ancak 10 ve 20 mm köşe yarıçapına sahip numuneler daha sünek bir davranış göstermişlerdir.



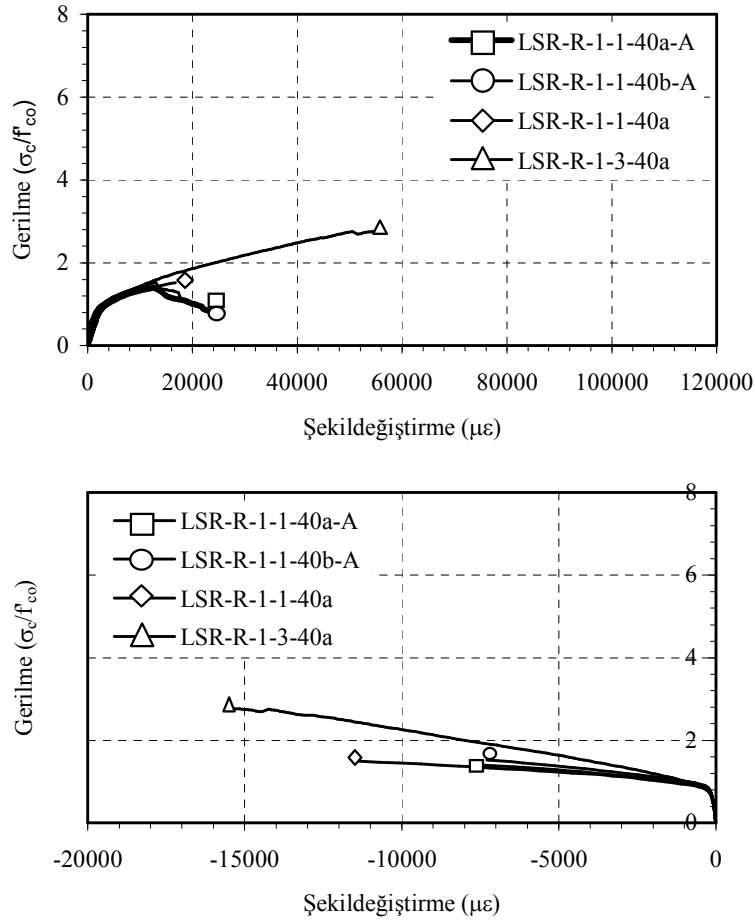
Şekil 6.55 Köşe Yarıçapı Değişiminin Boyuna Davranışa Etkisi

Enine şekildeğiştirmeler incelendiğinde köşe yarıçapının artmasının hem monoton hem de tekrarlı artan yüklemede, numunenin enine doğrultuda daha fazla şekildeğiştirme yapabilmesini sağladığı gözlenebilir, Şekil 6.56.



Şekil 6.56 Köşe Yarıçapı Değişiminin Enine Davranışa Etkisi

1 kat CFRP ile sargılandıktan sonra etkinlik artırıcı a ve b türü detay uygulaması ile güçlendirilen numunelerin davranışının 1 ve 3 kat CFRP sargılı numuneler ile karşılaştırıldığı grafikler Şekil 6.57'de sunulmuştur. Her iki numune de 1 kat sargılı numuneye yakın dayanım ancak pik yüke ulaştıktan sonra daha sünek bir dayanım kaybı davranışı göstermiştir. Yapılan detay uygulamasının bir zorunluluğu olarak CFRP tabakasına delik açılmış ve deney sırasında ilk hasar bu bölgelerde gözlenmiştir. (b) türü uygulamada numune köşelerine yapıştırılan ek CFRP tabakalar, hasar ankraj bölgelerinde başladığı için çok fazla gerilme alamamışlardır. İki numunenin davranışın birbirine çok yakın olmasının sebebi budur. Uygulama, henüz CFRP tabakalar numuneye sarılırken yapılabilsen daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülebilir. Sağlanan sünek davranış, uygulamanın zorluğuyla karşılaştırıldığında yeterli değildir.



Şekil 6.57 Etkinlik Artırıcı Detay Uygulamasının Boyuna ve Enine Davranışa Etkisi

Tablo 6.17’de kare enkesitli numunelere ait deneysel sonuçlar görülmektedir. Bu tabloda f'_{co} , f'_{cc} , ϵ_{cc} ve ϵ_{ch} sırasıyla numunenin deney günündeki sargısız beton dayanımını ($f'_{co}=0.85 \times f'_c$), sargılanmış dayanımını, 500 mm ölçüm boyundaki eksenel şekildeğiştirmesini, 60 mm ölçüm boyundaki enine şekildeğiştirmesini göstermektedir. f'_{cc}/f'_{co} değeri dayanımdaki artışı, $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ ise şekildeğiştirme kapasitesindeki artışı göstermektedir. Tüm numuneler için sargılanmamış durumdaki eksenel şekildeğiştirme değeri ϵ_{co} , 0.002 kabul edilmiştir.

Tablo 6.17 Kare Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları

Numune	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	ϵ_{ch}	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}}$	D.A. (%)	Ş.A. (%)
LSR-R-1-0-40a	13.27	—	0.0033	—	—	—	—	—
LSR-R-1-0-40b	13.53	—	0.0059	—	—	—	—	—
LSR-R-1-1-40a	13.53	20.58	0.017	0.011	1.3	8.5	52	750
LSR-R-1-1-40b	13.53	20.33	0.025	0.013	1.3	12.5	50	1150
LSR-R-1-1-40a-A	13.53	19.02	0.013	0.008	1.2	6.5	41	550
LSR-R-1-1-40b-A	13.53	20.64	0.014	0.007	1.3	7.0	53	600
LSR-R-1-3-40a	13.53	37.36	0.055	0.016	2.3	27.5	176	2650
LSR-R-1-3-40b	13.53	40.92	0.066	0.014	2.6	33.0	202	3200
LSR-R-1-3-10a	13.53	24.74	0.049	0.009	1.6	24.5	83	2350
LSR-R-1-3-10b	13.53	26.32	0.078	0.011	1.7	39.0	95	3800
LSR-R-1-3-20a	13.53	29.25	0.055	0.014	1.8	27.5	116	2650
LSR-R-1-3-20b	13.53	30.83	0.072	0.010*	1.9	36.0	128	3500
LSR-R-1-5-40a	13.53	51.65	0.069	0.015	3.2	34.5	282	3350
LSR-R-1-5-40b	13.53	47.77	0.085	0.012*	3.0	42.5	253	4150

D.A. : Dayanım artışı, Ş.A. : Şekildeğiştirme kapasitesi artışı, * Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı

6.4 Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçları

180 günlük basınç dayanımı 15.92 MPa olan düşük dayanımlı beton ile üretilen, boyutları 150×300 ($b \times h$) olan dikdörtgen enkesite sahip 500 mm yüksekliğindeki numuneler monoton artan veya tekrarlı eksenel basınç gerilmeleri altında deneye tabi tutulmuştur. Orijinal (sargısız) olarak denenen 2 numune dışında kalan 12 numune 1, 3 veya 5 kat CFRP tabakaları ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Bu enkesite sahip numunelerde değişkenler; farklı yükleme tipi (monoton veya tekrarlı artan), farklı sargı şekilleri kullanılarak güçlendirme, ön hasar verilip güçlendirme ve CFRP sargı etkinliğini artırıcı detay uygulamasıdır. Numuneler ile ilgili bilgiler Tablo 1.3’de görülebileceği gibi Tablo 6.18’de de özet bilgi sunulmuştur.

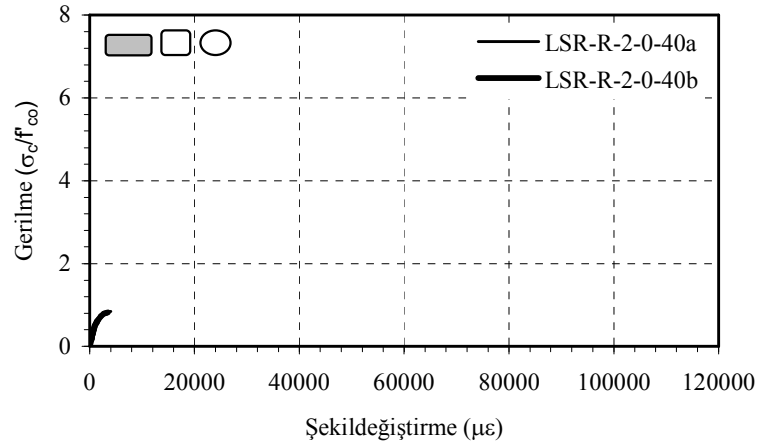
Tablo 6.18 Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Özet Bilgiler

Numune İsmi	f'_{coi} (MPa)	Numune $b \times h \times l$ (mm)	Polimer Lif Sargı Sayısı	Ek Değişken	Yükleme Tipi
LSR-R-2-0-40a	12.09	$150 \times 300 \times 500$	0	–	M
LSR-R-2-0-40b	12.09	$150 \times 300 \times 500$	0	–	T
LSR-R-2-1-40a	13.53	$150 \times 300 \times 500$	1	–	M
LSR-R-2-1-40b	13.53	$150 \times 300 \times 500$	1	–	T
LSR-R-2-1-40a-A	13.53	$150 \times 300 \times 500$	1	Etkinlik Artırıcı Detay	M
LSR-R-2-1-40b-A	13.53	$150 \times 300 \times 500$	1	Etkinlik Artırıcı Detay	M
LSR-R-2-3-40a	13.53	$150 \times 300 \times 500$	3	–	M
LSR-R-2-3-40b	13.53	$150 \times 300 \times 500$	3	–	T
LSR-R-2-3-40a-PD	13.53	$150 \times 300 \times 500$	3	Ön Hasar	M
LSR-R-2-3-40b-PD	13.53	$150 \times 300 \times 500$	3	Ön Hasar	T
LSR-R-2-3-40a-H	13.53	$150 \times 300 \times 500$	3	Farklı Sargı Şekilleri	M
LSR-R-2-3-40a-S	13.53	$150 \times 300 \times 500$	3	Farklı Sargı Şekilleri	M
LSR-R-2-5-40a	13.53	$150 \times 300 \times 500$	5	–	M
LSR-R-2-5-40b	13.53	$150 \times 300 \times 500$	5	–	T

f'_{coi} : Deneyin yapıldığı güne karşılık gelen standart silindirik basınç dayanımının 0.85'i. M: monoton artan yükleme, T: tekrarlı artan yükleme

6.4.1 LSR-R-2-0-40a ve LSR-R-2-0-40b

Bu iki numune dikdörtgen enkesite sahip tüm numuneler için referans teşkil etmesi bakımından önemlidir. Sargılanmadan orijinal halde denenen bu iki numune için tüm boydan (500 mm) alınan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.58’de verilmiştir. Her iki numune de birbiriyle uyumlu davranış göstermiştir. Bu da imalatın özenli yapıldığının göstergesidir. Deney sonrasında elde edilen bilgiler Tablo 6.19’da, deney sırasındaki fotoğraflar Şekil 6.59’da verilmiştir.



Şekil 6.58 LSR-R-2-0-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Tablo 6.19 LSR-R-2-0-40a ve LSR-R-2-0-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune*	P _{maks} (ton)	σ _{maks} (MPa)	ε _{cc}
LSR-R-2-0-40a	61.5	10.14	0.0041
LSR-R-2-0-40b	60.0	9.92	0.0036

* Her iki numunenin de beton yaşı 103’tür. P_{maks} : En büyük yük, σ_{maks} : En büyük gerilme, ε_{cc} : 500 mm için göçme anındaki şekildeğiştirme



(LSR-R-2-0-40a)

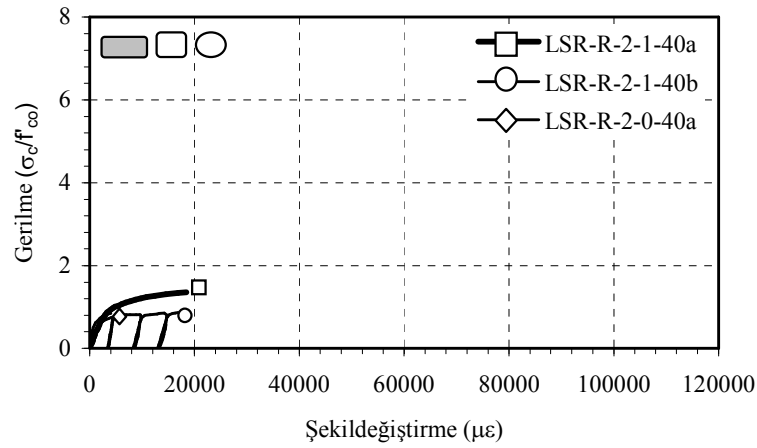


(LSR-R-2-0-40a)

Şekil 6.59 Numunelerin Deney Sırasındaki Görüntüleri

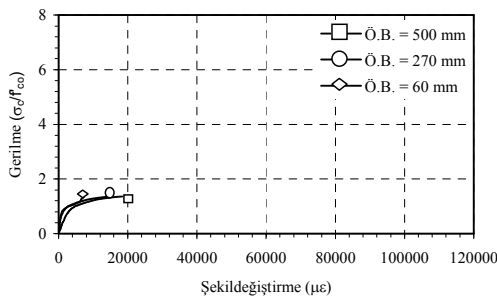
6.4.2 LSR-R-2-1-40a ve LSR-R-2-1-40b

1 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.60'de verilmiştir. Tekrarlı artan yükler altında denenen b numunesi, a numunesine göre daha az dayanım ancak benzer şekildeğiştirme göstermiştir. Orijinal numunelere göre a numunesi hem dayanım hem de şekildeğiştirme yeteneğinde artışı göstermiştir. b numunesinde dayanım artışı olmamıştır ancak şekildeğiştirme kapasitesi önemli ölçüde artmıştır.

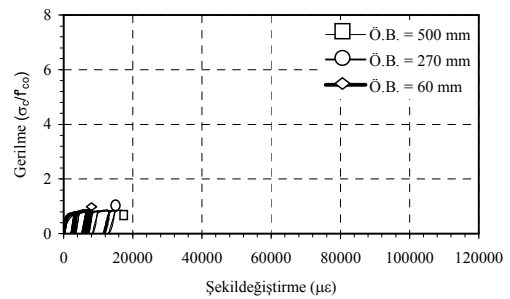


Şekil 6.60 LSR-R-2-1-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan sonuçlar karşılaştırıldığında birbirine benzer davranışlar gözlenmiştir, Şekil 6.61. Bu grafiklerde, tüm boydaki (500 mm) ve ölçüm çerçevesindeki (270 mm) yerdeğiştirmeölçerlerden ayrıca 60 mm ölçüm boyuna ait şekildeğiştirmeölçerlerden alınan veriler kullanılmıştır.



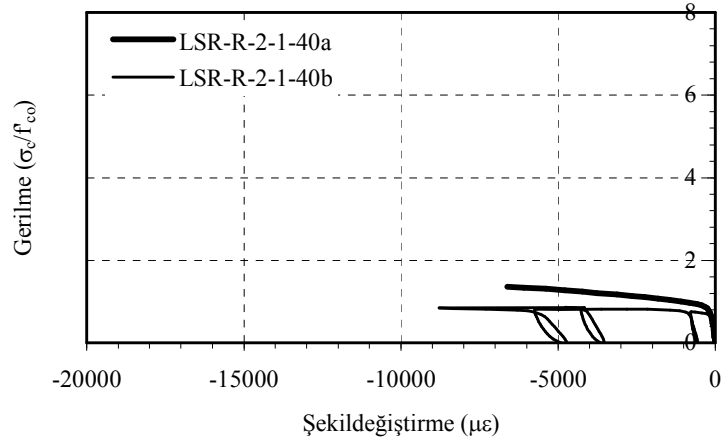
(LSR-R-2-1-40a)



(LSR-R-2-1-40b)

Şekil 6.61 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.62'de numunelere ait enine şekildeğişiklikler görülmektedir. Buna göre tekrarlı artan yükleme yapılan b numunesinde enine doğrultuda daha fazla şekildeğişiklik tespit edilmiştir.



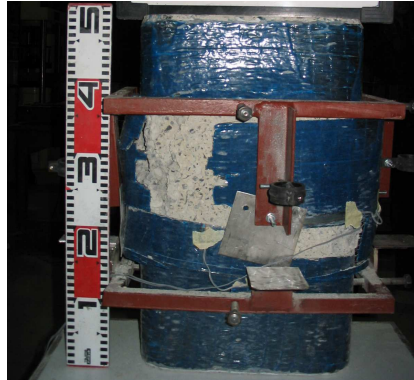
Şekil 6.62 LSR-R-2-1-40a ve LSR-R-2-1-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.20 ve Şekil 6.63'de görülebilir.

Tablo 6.20 LSR-R-2-1-40a ve LSR-R-2-1-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}			Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine _{uzun}	Enine _{kısa}		
LSR-R-2-1-40a	18.38	0.018	0.007	—	220 mm 2 parça	60 ve 160 mm uzunluğunda 2 parça
LSR-R-2-1-40b	11.70	0.017	0.009	0.010*	213 mm tek parça	20–140 mm arası değişen 3 parça

*Şekildeğişiklikölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-R-2-1-40a)

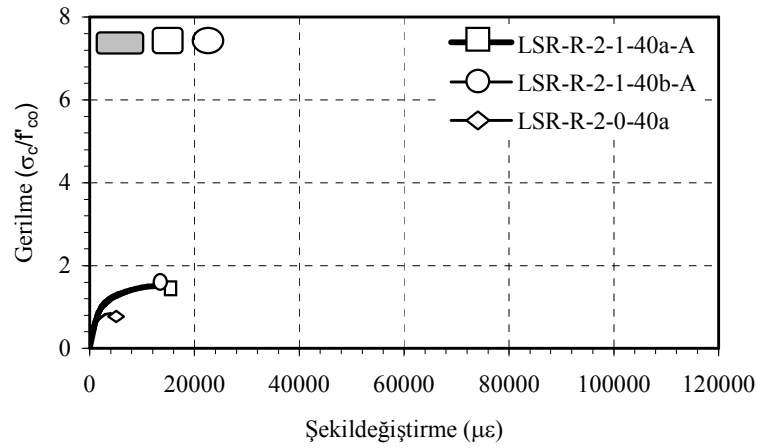


(LSR-R-2-1-40b)

Şekil 6.63 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

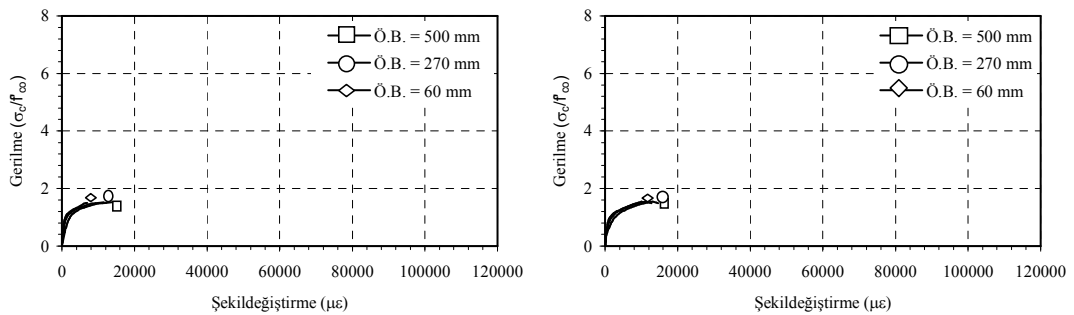
6.4.3 LSR-R-2-1-40a-A ve LSR-R-2-1-40b-A

1 kat CFRP ile sargılandıktan sonra etkinlik artırıcı detay uygulaması ile güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.64'de verilmiştir. Orijinal numuneye göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde artış gözlenmektedir. Ancak detay uygulamasının olumlu bir etkisi gözlenmemiştir. 1 kat sargılı numuneler ile yaklaşık aynı dayanım, şekildeğiştirmede ise bir miktar artış gözlenmiştir



Şekil 6.64 LSR-R-2-1-40a-A ve b-A Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan sonuçlar karşılaştırıldığında birbirine yakın davranışlar gözlenmiştir, Şekil 6.65. Birbirine yakın sonuçlardan, toplanan verilerin sağlıklı olduğu sonucu çıkarılabilir.

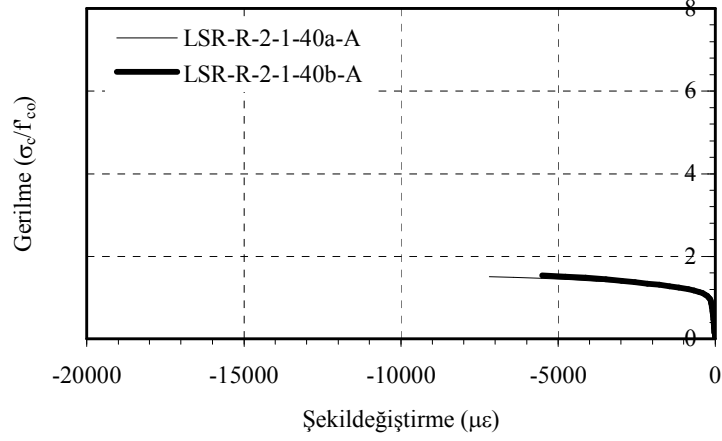


(LSR-R-2-1-40a-A)

(LSR-R-2-1-40b-A)

Şekil 6.65 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.66'da numunelere ait enine şekildeğiştirmeler görülmektedir. Boyuna doğrultudaki davranışla benzer olarak enine şekildeğiştirme değerleri de birbirine çok yakındır.



Şekil 6.66 LSR-R-2-1-40a-A ve LSR-R-2-1-40b-A Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

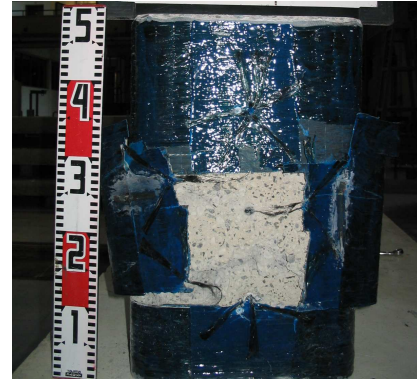
Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.21 ve Şekil 6.67'de görülebilir.

Tablo 6.21 LSR-R-2-1-40a-A ve LSR-R-2-1-40b-A Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}			Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine _{uzun}	Enine _{kısa}		
LSR-R-2-1-40a-A	20.58	0.014	0.008	0.006	165 mm tek parça	165 mm tek parça
LSR-R-2-1-40b-A	20.88	0.014	0.007	0.005	165 mm tek parça	165 mm tek parça



(LSR-R-2-1-40a-A)

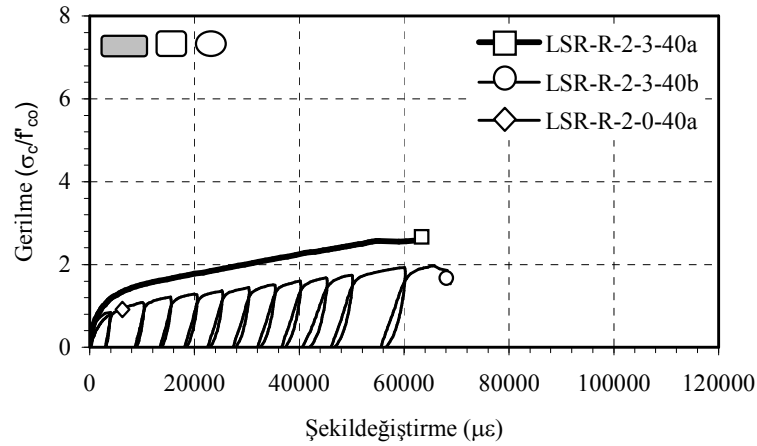


(LSR-R-2-1-40b-A)

Şekil 6.67 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

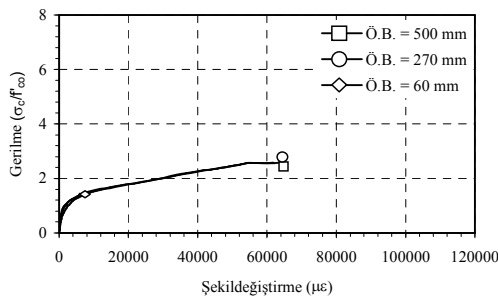
6.4.4 LSR-R-2-3-40a ve LSR-R-2-3-40b

3 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.68’de verilmiştir. Orijinal numuneye göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde artış gözlenmektedir. Tekrarlı artan yükler altında denenen b numunesi, a numunesine göre daha az dayanıma ulaşmış ancak biraz daha sünek davranış göstermiştir.

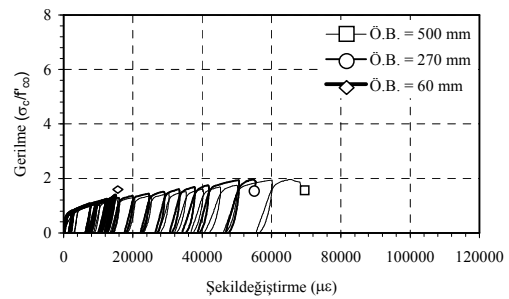


Şekil 6.68 LSR-R-2-3-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 6.69’da numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan sonuçlar karşılaştırıldığında monoton artan yükler altında test edilen a numunesinde birbirine yakın davranışlar gözlenmektedir. Buna karşın kare enkesitli numunelerde olduğu gibi tekrarlı artan yüklemede b numunesinde de test bölgesinde daha az deformasyon tespit edilmiştir.



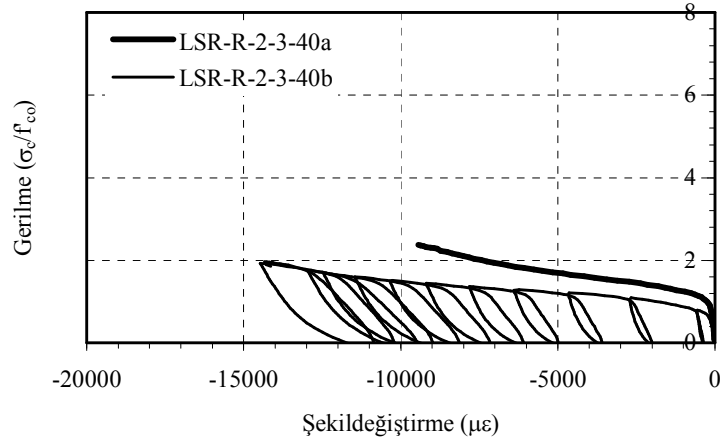
(LSR-R-2-3-40a)



(LSR-R-2-3-40b)

Şekil 6.69 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.70’de gerilme – enine şekildeğiştirme grafiği incelendiğinde tekrarlı artan yükler altında denenen b numunesinin daha fazla şekildeğiştirme yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.70 LSR-R-2-3-40a ve LSR-R-2-3-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.22 ve Şekil 6.71’de görülebilir.

Tablo 6.22 LSR-R-2-3-40a ve LSR-R-2-3-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}			Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine _{uzun}	Enine _{kısa}		
LSR-R-2-3-40a	34.91	0.062	0.009	—	130 mm çok parçalı	28–80 mm arası değişen 2–3 parça
LSR-R-2-3-40b	26.58	0.065	0.015*	0.014	140 mm çok parçalı	20–60 mm arası değişen 4–5 parça

*Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-R-2-3-40a)

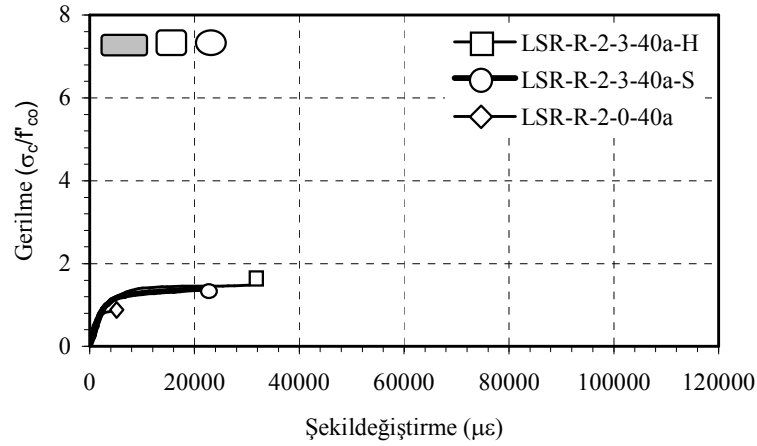


(LSR-R-2-3-40b)

Şekil 6.71 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

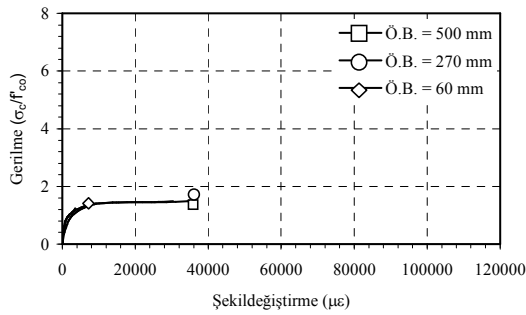
6.4.5 LSR-R-2-3-40a-H ve LSR-R-2-3-40a-S

3 kat CFRP ile etriye (hoop) ve spiral şeklinde sargılanarak güçlendirilen bu iki numunenin tüm boydaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.72'de verilmiştir. Orijinal numuneye göre her iki numunenin de dayanım, özellikle de şekildeğiştirme kapasitesinde artış gözlenmektedir. Etriye ve spiral türü sargılanan numuneler, benzer dayanıma ulaşmış ancak LSR-R-2-3-40a-H numunesi daha sünek bir davranış göstermiştir.

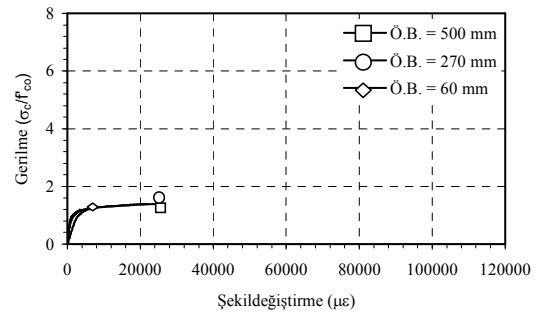


Şekil 6.72 LSR-R-2-3-40a-H ve a-S Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.73'de numuneler için farklı ölçüm boylarından alınan sonuçlar karşılaştırıldığında her iki numunenin de kendi içinde birbiriyle uyumlu davranış gösterdiği gözlenebilir. Özellikle 270 ve 500 mm'lik ölçüm boylarından deney sonuna kadar aynı veri alınmıştır.



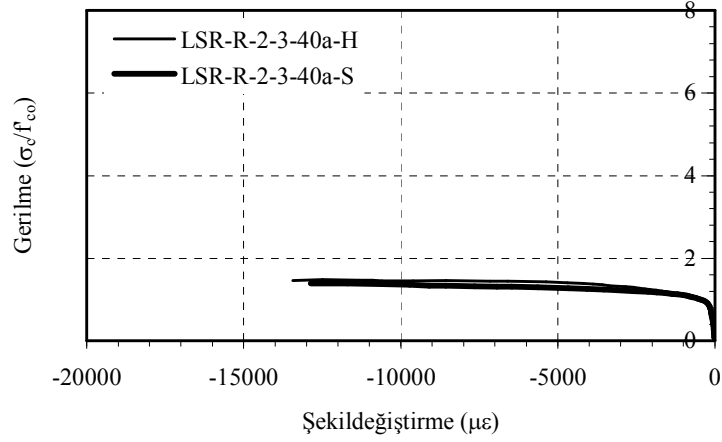
(LSR-R-2-3-40a-H)



(LSR-R-2-3-40a-S)

Şekil 6.73 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Gerilme – enine şekildeğiştirme grafiği incelendiğinde numunelerin birbirine çok yakın davranış gösterdiği anlaşılabılır, Şekil 6.74.

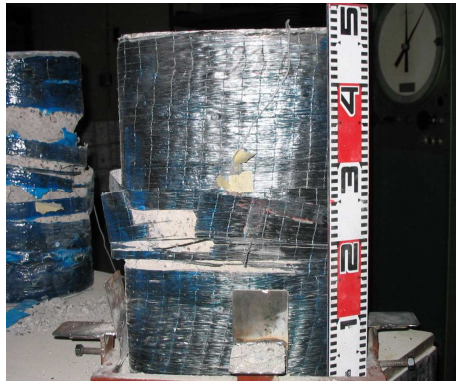


Şekil 6.74 LSR-R-2-3-40a-H ve LSR-R-2-3-40a-S Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.23 ve Şekil 6.75’de görülebilir.

Tablo 6.23 LSR-R-2-3-40a-H ve LSR-R-2-3-40a-S Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}			Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine _{uzun}	Enine _{kısa}		
LSR-R-2-3-40a-H	20.05	0.031	0.012	0.017	110 mm çok parçalı	10–60 mm arası değişen 9–10 parça
LSR-R-2-3-40a-S	18.81	0.021	0.010	0.014	190 mm çok parçalı	35–45 mm arası değişen 3–4 parça



(LSR-R-2-3-40a-H)

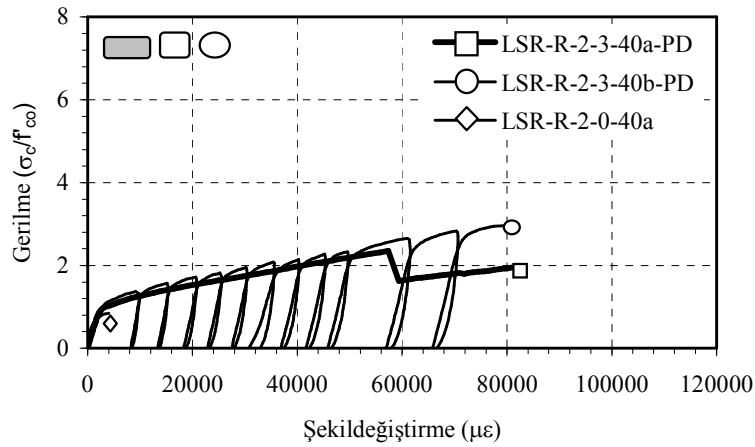


(LSR-R-2-3-40a-S)

Şekil 6.75 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

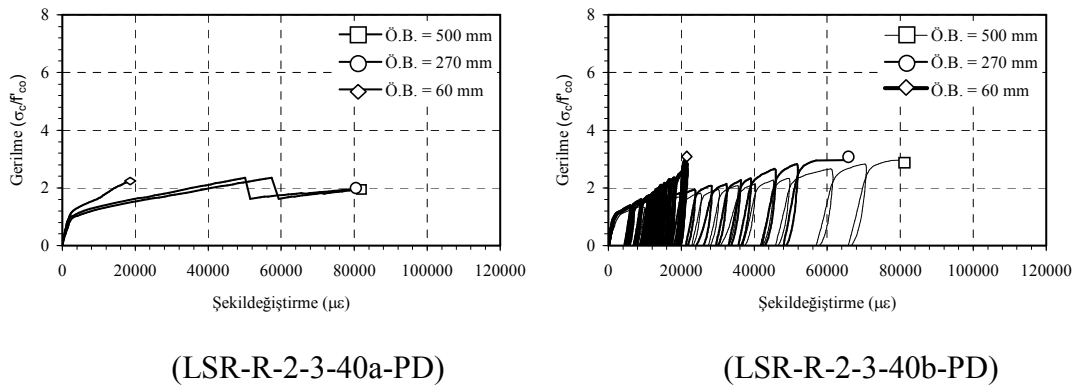
6.4.6 LSR-R-2-3-40a-PD ve LSR-R-2-3-40b-PD

Sargısız halde yaklaşık 0.003~0.004 mertebesinde şekil değiştirme yapacak şekilde ve pik yüklerine ulaşana dek yüklenip hasar verildikten sonra özel tamir harçlarıyla onarılıp 3 kat CFRP sargılanarak güçlendirilen bu iki numuneye ait gerilme – şekil değiştirme ilişkileri Şekil 6.76’da verilmiştir. Dikdörtgen enkesite sahip diğer numunelerden farklı olarak tekrarlı artan yüklenen b numunesi, a numunesine benzer davranış göstermiştir. Ancak a numunesi 0.06 şekil değiştirme mertebesinde bölgesel üretim hatasından kaynaklandığı düşünülen bir sebepten dolayı erken dayanım kaybına uğramıştır. Her iki numunenin deney sonundaki şekil değiştirmeleri çok yakın olmasına rağmen a numunesinin dayanımı bahsedilen sebepten dolayı daha azdır.



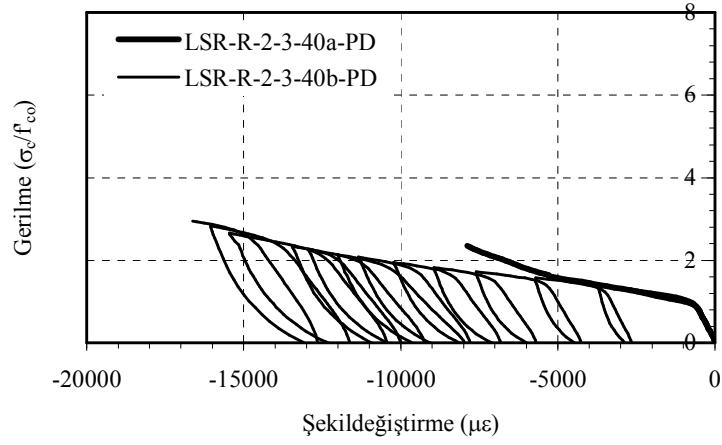
Şekil 6.76 LSR-R-2-3-40a-PD ve b-PD Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Tekrarlı yükler altında denenen b numunesi test bölgesinde daha az deformasyon göstermiş, a numunesinde ise 270 mm’de alınan ölçüm, pik yük dolayında farklı olmasına rağmen deney sonunda 500 mm ile benzerdir, Şekil 6.77.



Şekil 6.77 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.78'de gerilme – enine şekildeğiştirme grafiği incelendiğinde tekrarlı artan yükler altında denenen b numunesinin enine doğrultuda daha fazla şekildeğiştirme yaptığı görülebilir.



Şekil 6.78 LSR-R-2-3-40a-PD ve LSR-R-2-3-40b-PD Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.24 ve Şekil 6.79'de görülebilir.

Tablo 6.24 LSR-R-2-3-40a-PD ve LSR-R-2-3-40b-PD Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}			Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine _{uzun}	Enine _{kısa}		
LSR-R-2-3-40a-PD	31.77	0.058	0.007	0.008	170 mm çok parçalı	15–60 mm arası değişen 5–6 parça
LSR-R-2-3-40b-PD	40.11	0.080	0.018	0.016	150 mm çok parçalı	20–65 mm arası değişen 3–4 parça



(LSR-R-2-3-40a-PD)

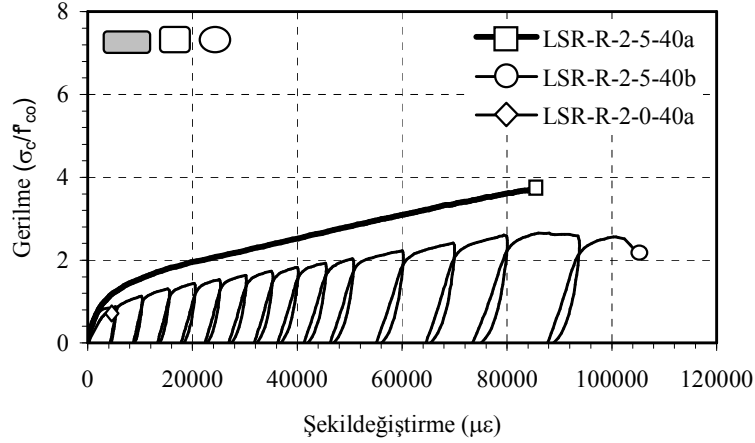


(LSR-R-2-3-40b-PD)

Şekil 6.79 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

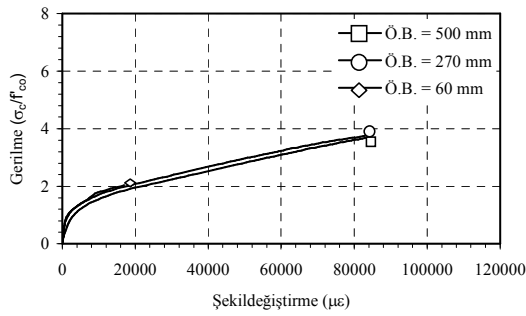
6.4.7 LSR-R-2-5-40a ve LSR-R-2-5-40b

5 kat CFRP sargılanarak güçlendirilen bu iki numuneye ait gerilme – şekil değiştirme ilişkileri Şekil 6.80’de verilmiştir. Tekrarlı artan yükler altında denenen b numunesi diğer dikdörtgen numunelere benzer olarak a numunesinden daha az dayanıma ulaşabilmiş ancak daha sünek bir davranış göstermiştir.

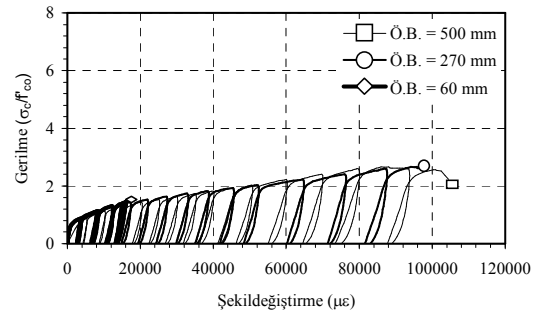


Şekil 6.80 LSR-R-2-5-40a ve b Numunelerinin Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Tekrarlı yükler altında denenen b numunesi test bölgesinde daha az deformasyon göstermiş, a numunesinde tüm ölçüm boylarından alınan veriler birbiriyle benzerdir ancak boyuna doğrultudaki şekil değiştirme ölçerinin pik yükten önce devre dışı kaldığı unutulmamalıdır, Şekil 6.81.



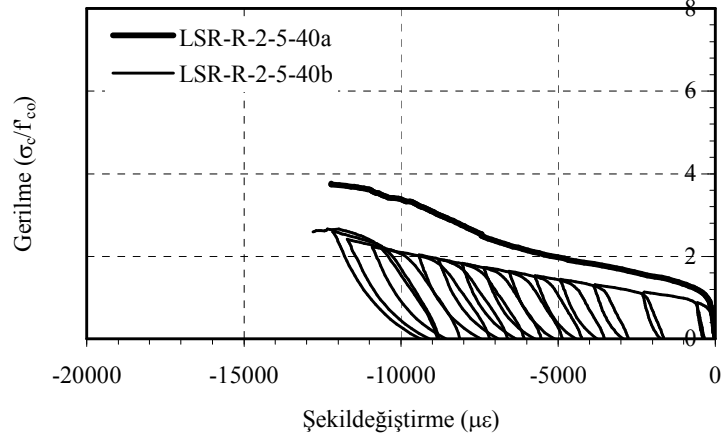
(LSR-R-2-5-40a)



(LSR-R-2-5-40b)

Şekil 6.81 a ve b Numunelerinin Farklı Ölçüm Boylarındaki Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Şekil 6.82’de gerilme – enine şekildeğiştirme grafiği incelendiğinde her iki numunenin enine doğrultudaki şekildeğiştirme yeteneklerinin benzer olduğu görülebilir.



Şekil 6.82 LSR-R-2-5-40a ve LSR-R-2-5-40b Gerilme- Enine Ş.D. İlişkileri

Numuneler için deney sonrası özet bilgiler ve resimler sırasıyla Tablo 6.25 ve Şekil 6.83’de görülebilir.

Tablo 6.25 LSR-R-2-5-40a ve LSR-R-2-5-40b Deney Sonrası Bilgileri

Numune	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{maks}			Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine _{uzun}	Enine _{kısa}		
LSR-R-2-5-40a	50.81	0.086	0.009*	0.017	190 mm çok parçalı	20–120 mm arası değişen 3–4 parça
LSR-R-2-5-40b	35.98	0.100	0.011*	0.015*	150 mm çok parçalı	20–65 mm arası değişen 3–4 parça

*Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı



(LSR-R-2-5-40a)



(LSR-R-2-5-40b)

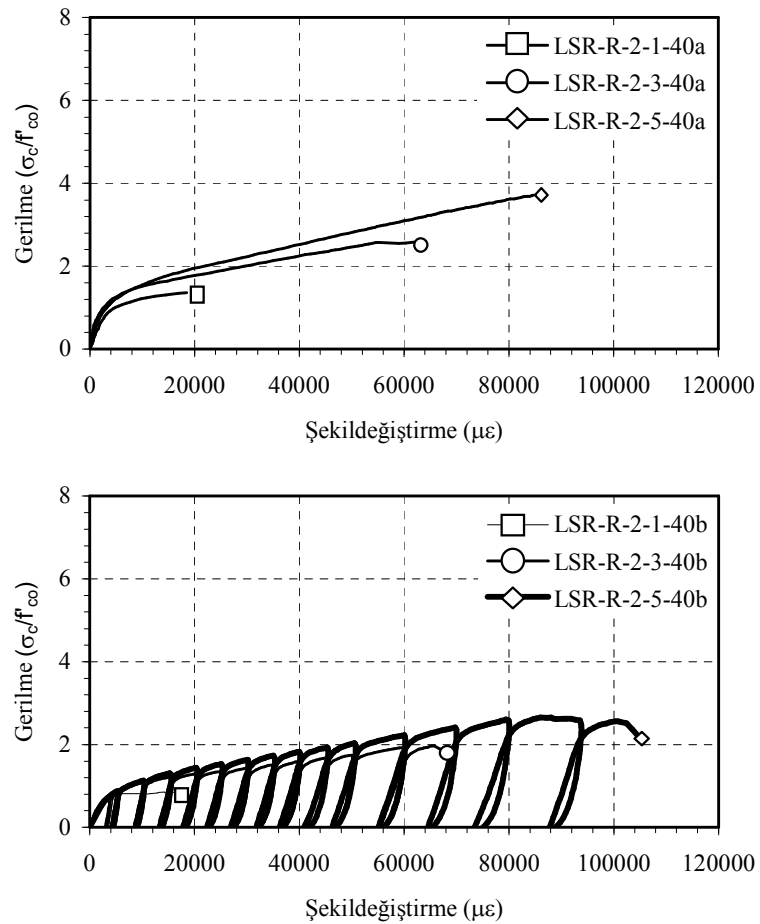
Şekil 6.83 Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

6.4.8 Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen numunelere ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Dikdörtgen enkesite sahip numunelerde incelenen değişkenler:

- CFRP Tabaka Sayısı
- Yükleme Tipi
- Ön Hasar
- Farklı Sargı Şekilleri
- Etkinlik Artırıcı Detay Uygulaması'dır.

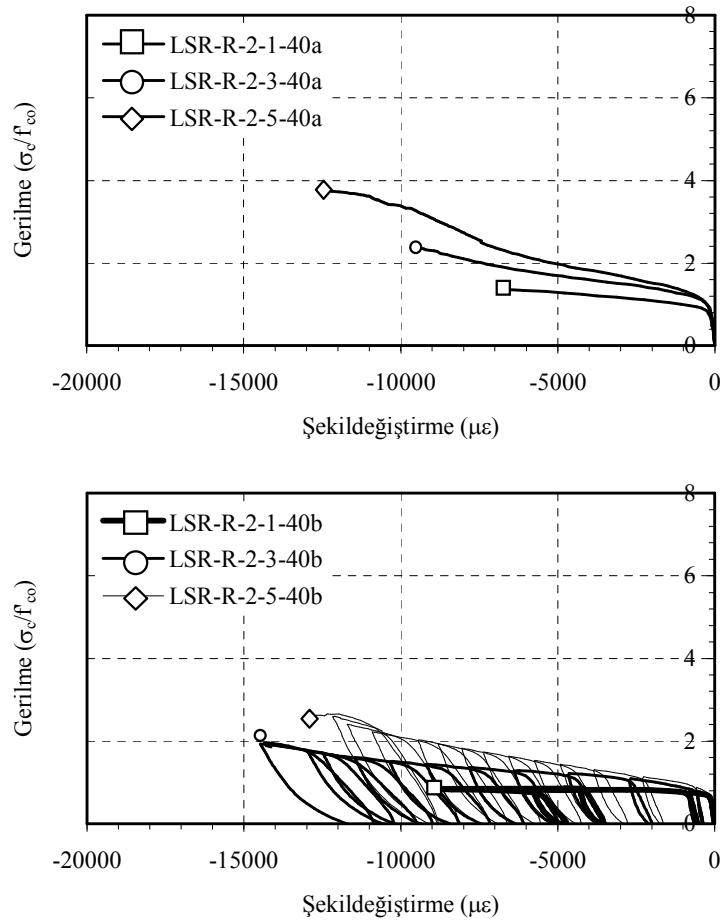
Şekil 6.84'de CFRP tabaka sayısı artışının dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.



Şekil 6.84 CFRP Tabaka Sayısı Artışının Boyuna Davranışa Etkisi

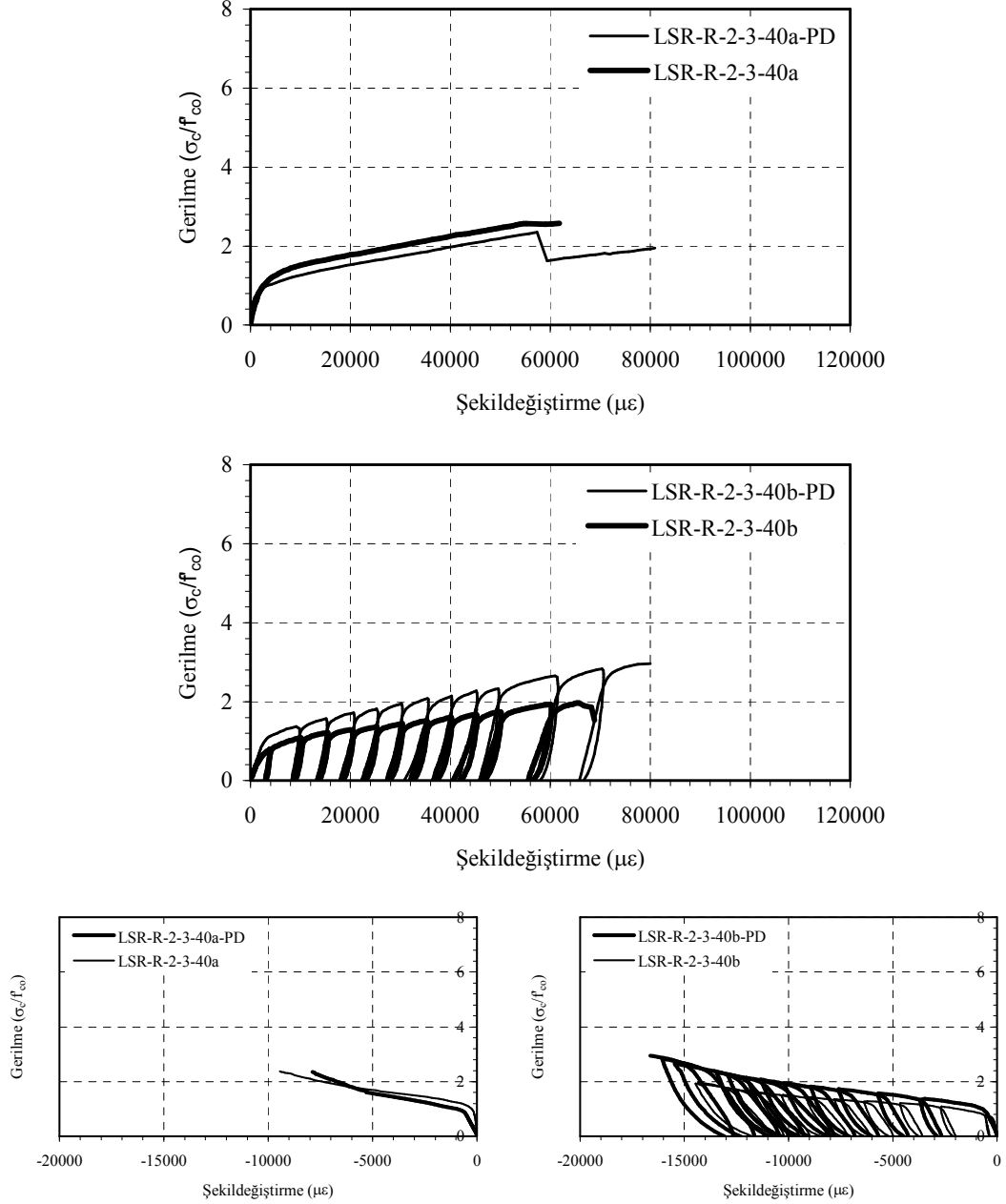
Tekrarlı artan yükleme etkisi altında genellikle numuneler daha az dayanıma ulaşmış ancak daha sünek bir davranış göstermişlerdir. 1, 3 ve 5 kat sargılanan numuneler için sırasıyla ortalama %11, %127 ve %221 oranında dayanım %775, %3075 ve %4550 oranında da şekildeğiştirme kapasitesi artışı gözlenmiştir.

CFRP tabaka sayısının artmasının enine doğrultudaki davranışa olan etkisi Şekil 6.85'de görülebilir. Buna göre her ne kadar monoton artan yükler etkisi altında denenen numunelerde şekildeğiştirme artışı sağlanmış gibi görünse de tekrarlı yükler altında denenen b numunelerinde böyle bir davranıştan söz edilemez. Daire ve kare enkesitli numunelerde CFRP tabaka sayısı artmasının enine şekildeğiştirmeleri etkilemediği bilindiğinden, dikdörtgen enkesitli numunelerde de bu durumun söz konusu olduğu söylenebilir.



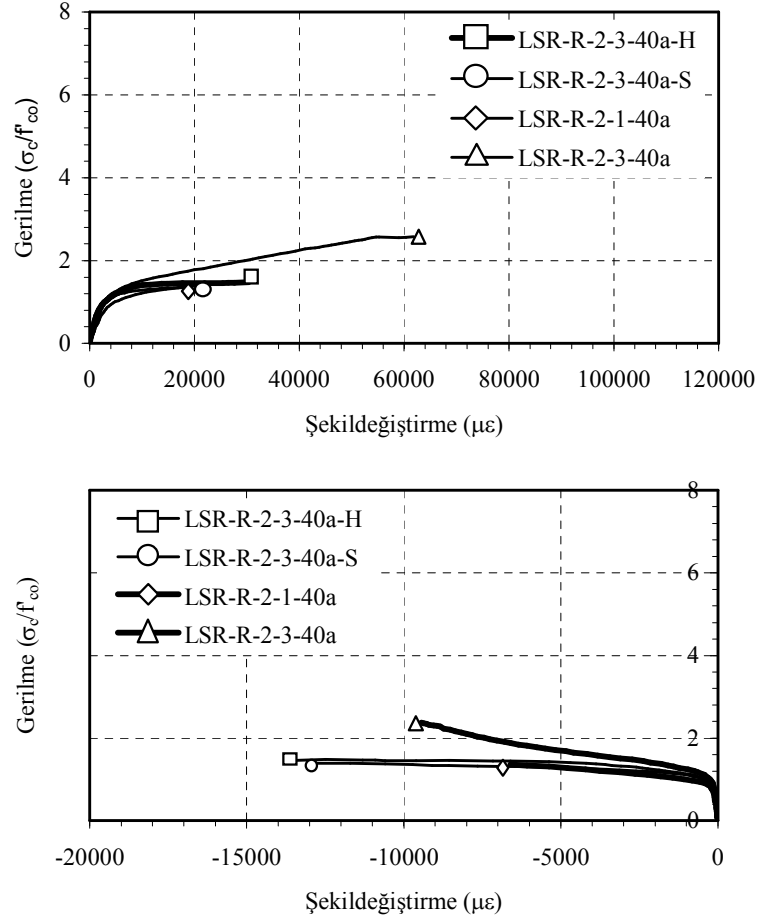
Şekil 6.85 CFRP Tabaka Sayısı Artışının Enine Davranışa Etkisi

Önceden hasar verildikten sonra onarılıp 3 kat CFRP sargılanarak güçlendirilen numuneler, orijinal durumda iken güçlendirilen numuneler ile benzer davranış göstermişlerdir, Şekil 6.86. Bu da çeşitli sebeplerden dolayı önceden hasar görmüş yapıların onarıldıktan sonra CFRP kompozitler ile güçlendirilebileceğinin bir göstergesidir.



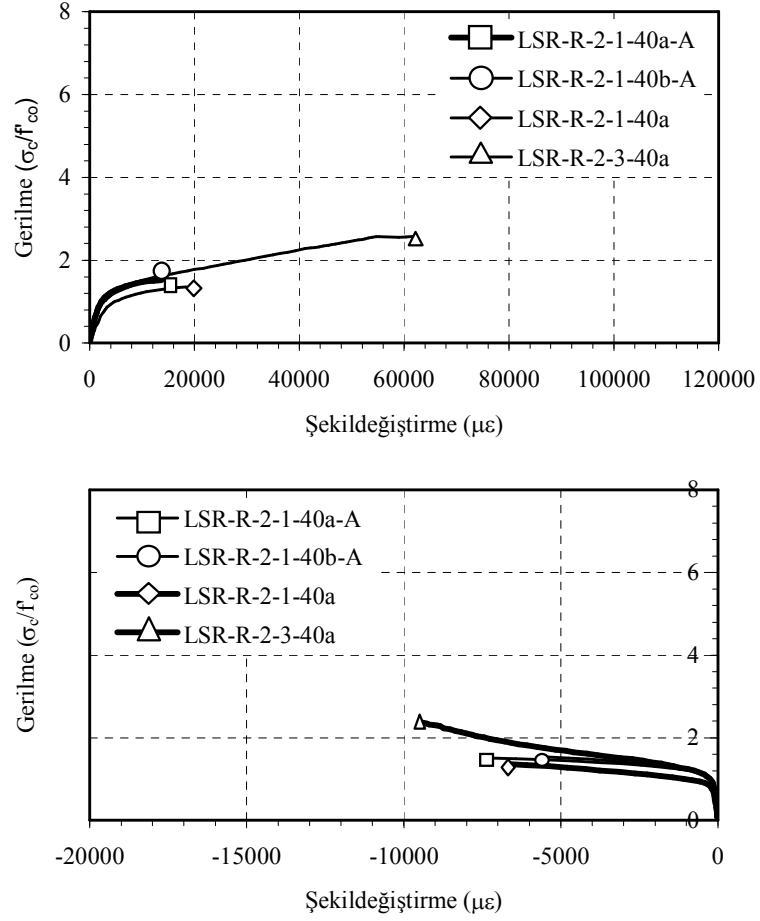
Şekil 6.86 Önceden Hasar Verilip Güçlendirilen Numunelerin Boyuna ve Enine Davranışlarının Doğrudan Güçlendirilen Numuneler ile Karşılaştırılması

Farklı sargı şekillerinin (etkiye ve spiral türü) davranışa etkisi incelendiğinde hacimsel olarak 3 kat sargının yarısı kadar CFRP içeren bu numunelerin 1 ile 3 kat arası bir dayanım ve süneklik göstermesi beklenmektedir. Ancak daire enkesitli numunelerden farklı olarak, 1 kat sargı ile benzer dayanım buna karşın daha büyük şekildeğiştirme yeteneği gözlenmiştir, Şekil 6.87. Özellikle enine doğrultuda daha az olan hacimsel orandan dolayı gerilmeler, 50 mm genişliğindeki şeritler üzerine yığılmış bu da enine şekildeğiştirmeleri %1.4 mertebesine kadar çıkarmıştır.



Şekil 6.87 Farklı Sargı Şekillerinin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Davranışa Olan Etkisi

İki farklı türde tasarlanıp, 1 kat CFRP sargı üzerine gerçekleştirilen etkinlik artırıcı detay uygulaması, CFRP liflerin uygulama sırasında delinmesinden ve deney esnasında hasarın bu bölgelerde başlayıp yoğunlaşmasından dolayı olumlu ya da olumsuz bir etki göstermemiştir, Şekil 6.88. 1 kat sargıdan biraz daha büyük dayanıma ulaşan her iki numune de boyuna şekildeğiştirmelerde 1 kat sargının gerisinde kalmıştır. Enine şekildeğiştirmeler içinde benzer şeyler söylenebilir.



Şekil 6.88 Etkinlik Artırıcı Detay Uygulamasının Boyuna ve Enine Davranışa Olan Etkisi

Tablo 6.26'da dikdörtgen enkesitli numunelere ait deneysel sonuçlar görülmektedir. Bu tabloda f'_{co} , f'_{cc} , ϵ_{cc} ve $\epsilon_{chkısa/uzun}$ sırasıyla numunenin deney günündeki sargısız beton dayanımını ($f'_{co}=0.85 \times f'_c$), sargılanmış dayanımını, 500 mm ölçüm boyundaki eksenel şekildeğiştirmesini, 60 mm ölçüm boyundaki enine şekildeğiştirmesini (kısa ve uzun kenar) göstermektedir. f'_{cc}/f'_{co} değeri dayanımdaki artışı, $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ ise şekildeğiştirme kapasitesindeki artışı göstermektedir. Tüm numuneler için sargılanmamış durumdaki eksenel şekildeğiştirme değeri ϵ_{co} , 0.002 kabul edilmiştir.

Tablo 6.26 Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları

Numune	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	$\epsilon_{chkısa}$	ϵ_{chuzun}	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}}$	D.A. (%)	Ş.A. (%)
LSR-R-2-0-40a	12.09	—	0.004	—	—	—	—	—	—
LSR-R-2-0-40b	12.09	—	0.004	—	—	—	—	—	—
LSR-R-2-1-40a	13.53	18.38	0.018	0.007	—	1.2	9.0	36	800
LSR-R-2-1-40b	13.53	11.70	0.017	0.009	0.010*	0.7	8.5	-14	750
LSR-R-2-1-40a-A	13.53	20.58	0.014	0.008	0.006	1.3	7.0	52	600
LSR-R-2-1-40b-A	13.53	20.88	0.014	0.007	0.005	1.3	7.0	54	600
LSR-R-2-3-40a-PD	13.53	31.77	0.058	0.007	0.008	2.0	29.0	135	2800
LSR-R-2-3-40b-PD	13.53	40.11	0.080	0.018	0.016	2.5	40.0	196	3900
LSR-R-2-3-40a	13.53	34.91	0.062	0.009	—	2.2	31.0	158	3000
LSR-R-2-3-40b	13.53	26.58	0.065	0.015*	0.014	1.7	32.5	96	3150
LSR-R-2-3-40a-H	13.53	20.05	0.031	0.012	0.017	1.3	15.5	48	1450
LSR-R-2-3-40a-S	13.53	18.81	0.021	0.010	0.014	1.2	10.5	39	950
LSR-R-2-5-40a	13.53	50.81	0.086	0.009*	0.017	3.2	43.0	276	4200
LSR-R-2-5-40b	13.53	35.98	0.100	0.011*	0.015*	2.3	50.0	166	4900

D.A. : Dayanım artışı, Ş.A. : Şekildeğiştirme kapasitesi artışı, * Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı

6.5 Farklı Enkesite Sahip Numunelerin Karşılaştırmaları

Bu bölümde, farklı enkesit şekillerine sahip numunelerin karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Enkesit şekillerinin farklılığından dolayı kullanılan hacimsel CFRP oranları değişmektedir. Her bir enkesit tipi için 1, 3 ve 5 kat sargılı numunelerdeki hacimsel oranlar Tablo 6.27’de verilmiştir. Hacimsel CFRP oranı ρ_f , kullanılan CFRP hacminin, numunenin hacmine bölünmesiyle bulunur. Tablodan anlaşılabileceği gibi kare enkesitli numuneler daire ve dikdörtgen enkesitli numunelerden daha az CFRP içermektedir. Aynı sargı sayısı için en fazla CFRP ile dikdörtgen enkesitli numuneler sargılanmıştır. Tablo 6.28’de kare enkesitli numunenin içerdiği CFRP miktarı 1 kabul edilerek daire ve dikdörtgen enkesitli numunelerin içerdikleri CFRP miktarları verilmiştir.

Tablo 6.27 Farklı Enkesit Tipleri için Hacimsel CFRP Oranları

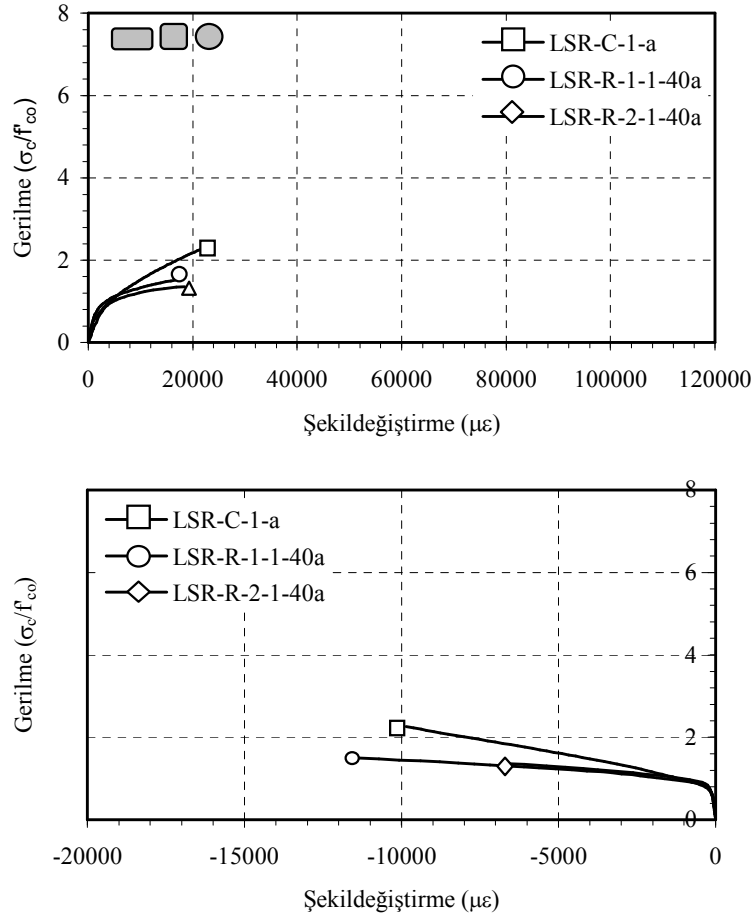
Enkesit	ρ_f		
	1 kat CFRP	3 kat CFRP	5 kat CFRP
Daire	0.0031	0.0084	0.0137
Kare	0.0029	0.0079	0.0130
Dikdörtgen	0.0037	0.0099	0.0163

Tablo 6.28 Hacimsel CFRP Oranları Karşılaştırması

Enkesit	1 kat CFRP	3 kat CFRP	5 kat CFRP
Daire	1.069	1.063	1.054
Kare	1.000	1.000	1.000
Dikdörtgen	1.276	1.253	1.254

1 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen ve monoton artan eksenel yükler altında denenen daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.89’da verilmiştir. Buna göre daire enkesitli numune, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere göre daha yüksek dayanım ve şekildeğiştirme değerlerine ulaşmıştır. Kare enkesitli numune,

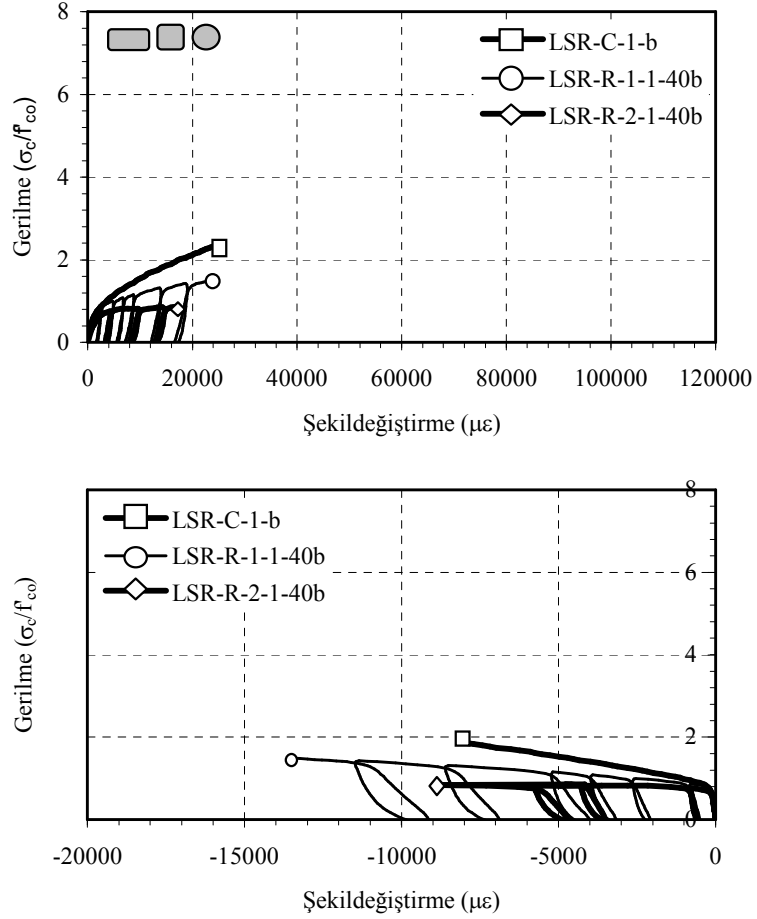
dikdörtgen enkesitli numuneye göre daha yüksek dayanıma ulaşırken, daha az şekildeğiştirme göstermiştir.



Şekil 6.89 1 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde en büyük şekildeğiştirmeyi kare enkesitli numune gösterirken, daire enkesitli numune de dikdörtgen enkesitli numuneden enine doğrultuda daha fazla şekildeğiştirmiştir. Her üç numunenin de şekildeğiştirmeölçer'leri deney sonuna kadar çalışmıştır.

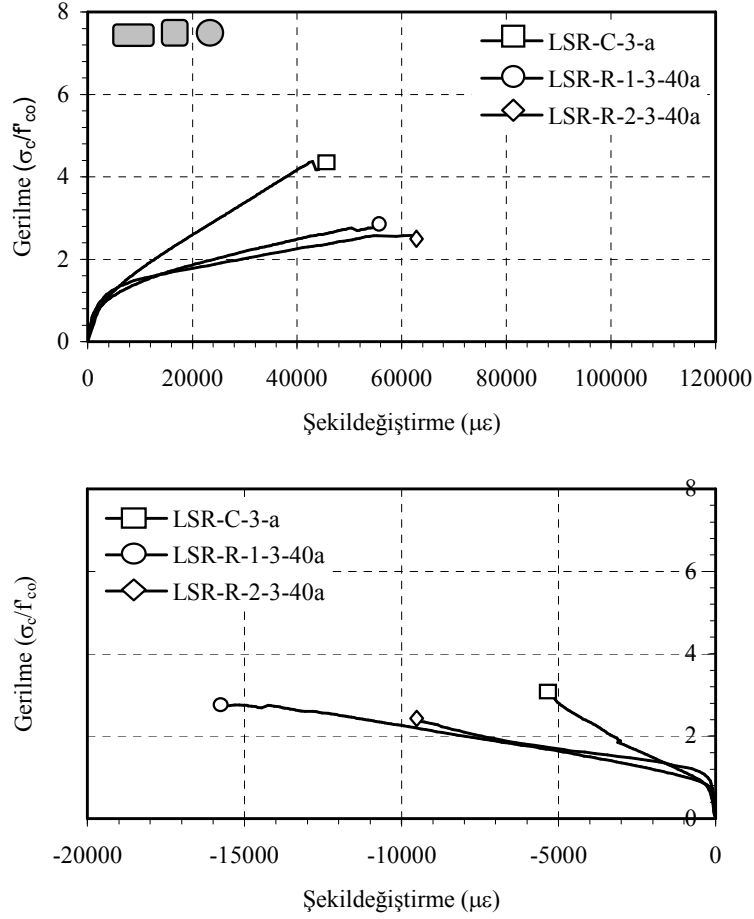
Şekil 6.90'da 1 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen ve monoton artan eksenel yükler altında denenen daire ile tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri görülmektedir. Sırasıyla daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler birbirlerine göre daha fazla dayanım ve şekildeğiştirme değerlerine ulaşmışlardır.



Şekil 6.90 1 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde en büyük şekildeğiştirmeyi kare enkesitli numune gösterirken, dikdörtgen enkesitli numune de daire enkesitli numuneden enine doğrultuda daha fazla şekildeğiştirmiştir. Kare enkesitli numunenin enine doğrultudaki şekildeğiştirmeölçeri deney sonuna kadar çalışırken, daire ve dikdörtgen enkesitli numunelerde şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı kalmıştır.

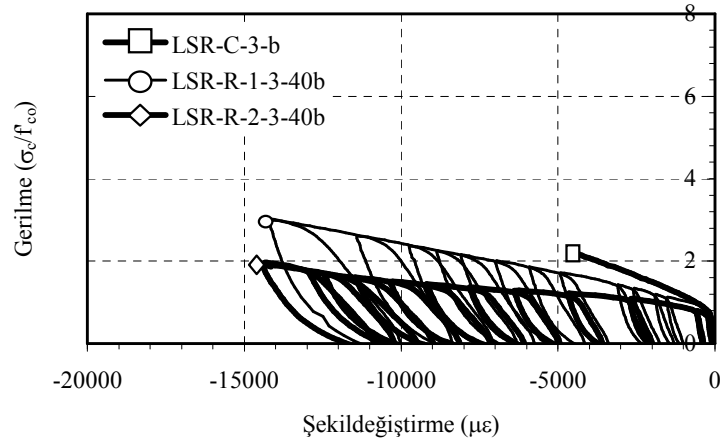
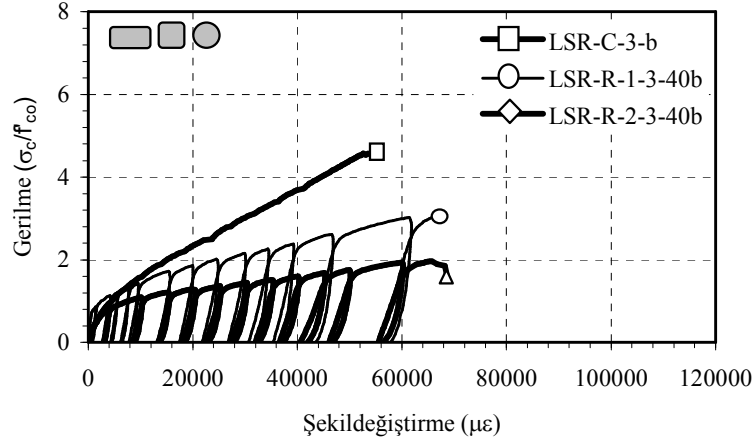
3 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen ve monoton artan eksenel yükler altında denenen daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.91’de verilmiştir. Buna göre daire enkesitli numune, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere göre daha yüksek dayanıma ulaşırken kare ve dikdörtgen enkesite sahip numuneler daha fazla şekildeğiştirme yapmışlardır.



Şekil 6.91 3 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde en büyük şekildeğiştirmeyi kare enkesitli numune gösterirken, dikdörtgen enkesitli numune de daire enkesitli numuneden enine doğrultuda daha fazla şekildeğiştirmiştir. Kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin şekildeğiştirmeölçerleri deney sonuna kadar çalışırken, daire enkesitli numunenin enine doğrultudaki şekildeğiştirmeölçeri pik yükten önce devre dışı kalmıştır.

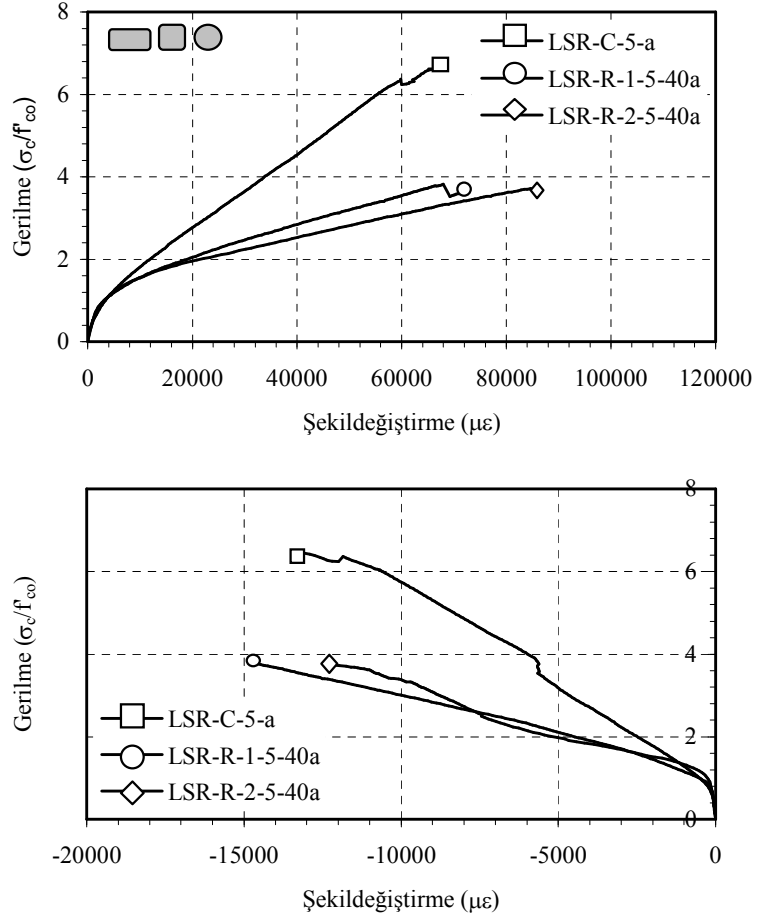
Şekil 6.92’de 3 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen ve monoton artan aksenal yükler altında denenen daire ile tekrarlı artan aksenal yükler altında denenen kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri görülmektedir. Buna göre daire enkesitli numune daha yüksek dayanıma ulaşırken, kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler daha fazla aksenal şekildeğiştirme yapmışlardır.



Şekil 6.92 3 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler benzer şekildeğiştirme değerlerine ulaşmışlardır. Her iki numune de üreticinin verdiği kopma şekildeğiştirmesi değerine (%1.5) çok yakın şekildeğiştirmelere ulaşmıştır. Daire enkesitli numunenin şekildeğiştirmeölçeri pik yükten önce devre dışı kalmıştır. Kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin şekildeğiştirmeölçerlerinden deney sonuna kadar sağlıklı veri alınmıştır.

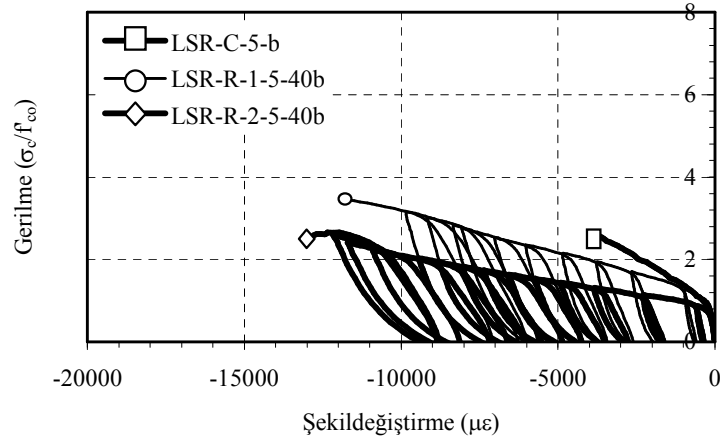
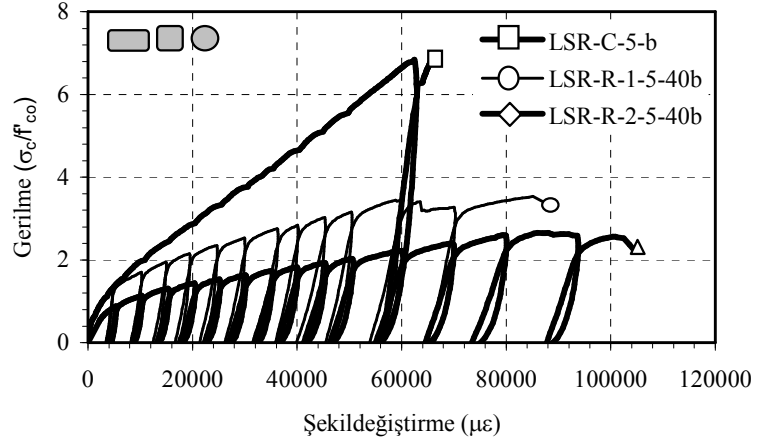
5 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen ve monoton artan aksenal yükler altında denenen daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.93’de verilmiştir. Buna göre daire enkesitli numune, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere göre daha yüksek dayanıma ulaşırken kare ve özellikle de dikdörtgen enkesite sahip numuneler daha fazla şekildeğiştirme yapmışlardır.



Şekil 6.93 5 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde tüm numunelerin yüksek şekildeğiştirme değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Kare enkesitli numune üreticinin verdiği kopma şekildeğiştirmesi (%1.5) değerine ulaşmıştır. Daire ve dikdörtgen enkesitli numunelerin şekildeğiştirmeölçerleri pik yükten önce devre dışı kalmıştır.

Şekil 6.94'de 5 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen ve monoton artan eksenel yükler altında denenen daire ile tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere ait boyuna ve enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri görülmektedir. Buna göre daire enkesitli numune daha yüksek dayanıma ulaşırken, kare ve özellikle dikdörtgen enkesitli numuneler daha fazla eksenel şekildeğiştirme yapmışlardır.



Şekil 6.94 5 kat CFRP ile Güçlendirilmiş Farklı Enkesitli Numunelerin Boyuna ve Enine Doğrultudaki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri

Enine doğrultudaki gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde kare ve dikdörtgen enkesitli numunenin birbirine yakın, daire enkesitli numunenin ise daha az şekildeğiştirme yaptığı görülmektedir. Ancak üç numunenin de enine şekildeğiştirmeölçeri pik yükten önce devre dışı kalmıştır.

6.6 Literatürde Yer Alan Benzer Çalışma ile Karşılaştırmalar

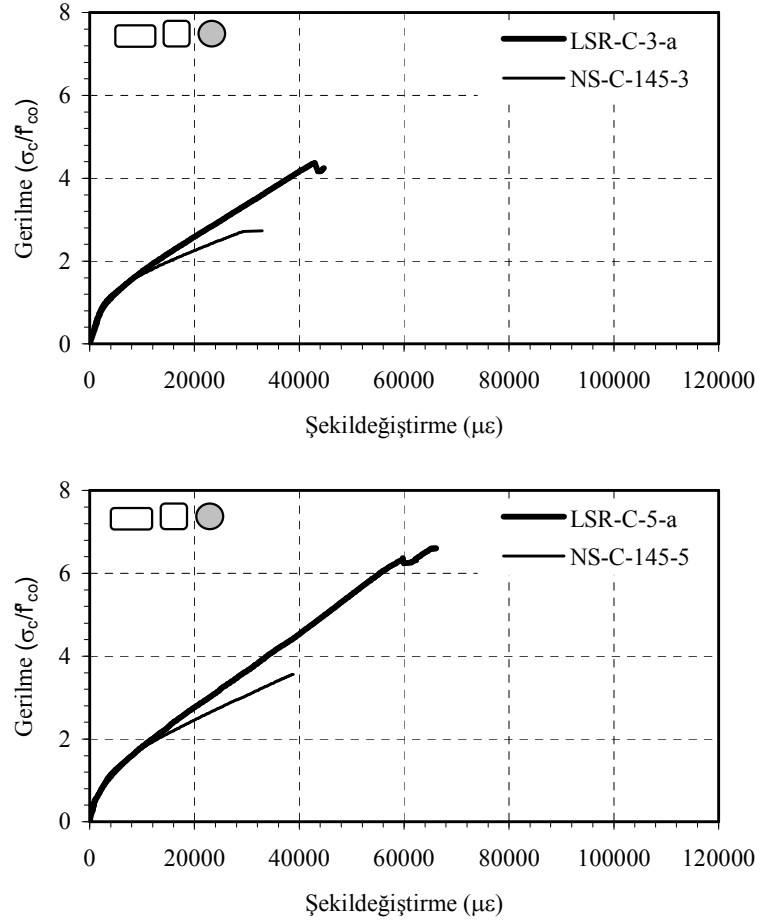
Karamuk E. tarafından yapılan bu çalışmada 180 günlük standart silindir basınç dayanımı 31.0 MPa olan beton ile üretilen, 3 veya 5 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilen daire ($\phi 250 \times 500$ mm), kare ($250 \times 250 \times 500$ mm) ve dikdörtgen ($150 \times 300 \times 500$ mm) enkesite sahip numuneler monoton veya tekrarlı artan eksenel yükler altında test edilmiştir. Çalışmanın ana değişkeni etriye aralığı değişiminin numunelerin davranışına olan etkisinin incelenmesidir. Beton dayanımları haricinde tüm özellikleri aynı olan numuneler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırılan numunelere ait deneysel sonuçlar Tablo 6.29’da verilmiştir.

Tablo 6.29 Düşük ve Normal Dayanımlı Elemanlara Ait Deneysel Sonuçlar

Numune	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	$\epsilon_{chkısa}$	ϵ_{chuzun}	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}}$	D.A. (%)	Ş.A. (%)
NS-C-145-3	26.35	71.83	0.033	0.012	—	2.3	16.5	173	1550
NS-C-145-5	26.35	94.25	0.045	0.013	—	3.0	22.5	258	2150
NS-R-1-200-3-40	26.35	41.97	0.033	0.014	—	1.4	16.5	59	1550
NS-R-1-200-5-40	26.35	58.26	0.052	0.015	—	1.9	26.0	121	2500
NS-R-2-175-3-40	26.35	40.63	0.034	0.013	0.011	1.3	17.0	54	1600
NS-R-2-175-5-40-A	26.35	47.81	0.040	0.012	0.015	1.5	20.0	81	1900
LSR-C-3-a	12.84	56.12	0.044	0.005*	—	4.4	22.0	337	2100
LSR-C-5-a	12.84	84.88	0.065	0.013*	—	6.3	32.5	561	3150
LSR-R-1-3-40a	13.53	37.36	0.055	0.016	—	2.3	27.5	176	2650
LSR-R-1-5-40a	13.53	51.65	0.069	0.015	—	3.2	34.5	282	3350
LSR-R-2-3-40a	13.53	34.91	0.062	0.009	—	2.2	31.0	158	3000
LSR-R-2-5-40a	13.53	50.81	0.086	0.009*	0.017	3.2	43.0	276	4200

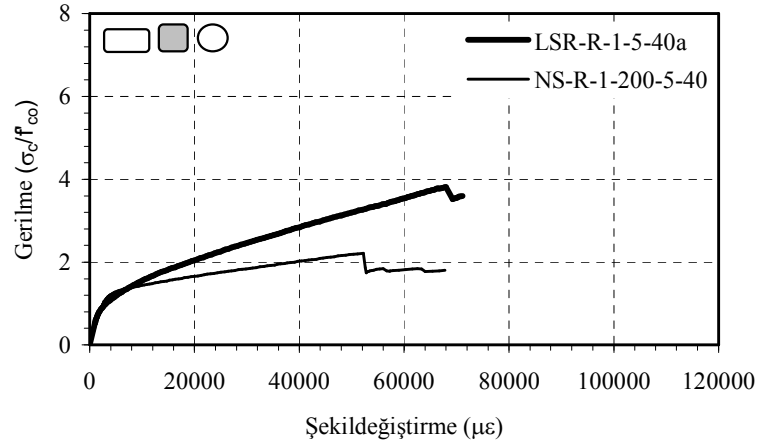
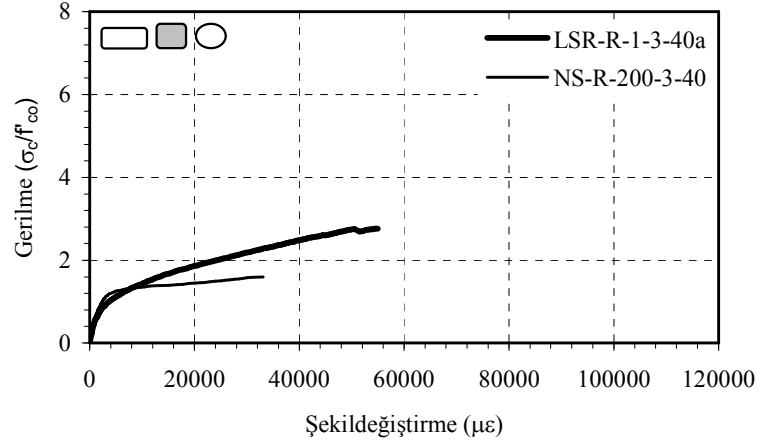
D.A. : Dayanım artışı, Ş.A. : Şekildeğiştirme kapasitesi artışı, * Şekildeğiştirmeölçer pik yükten önce devre dışı

Şekil 6.95'de düşük ve normal beton dayanımına sahip 3 ve 5 kat CFRP ile sargılanmış daire enkesitli numunelere ait gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri görülmektedir. Buna göre düşük dayanımlı beton ile üretilen numunede sağlanan dayanım ve şekildeğiştirme kapasite artışı daha fazladır.



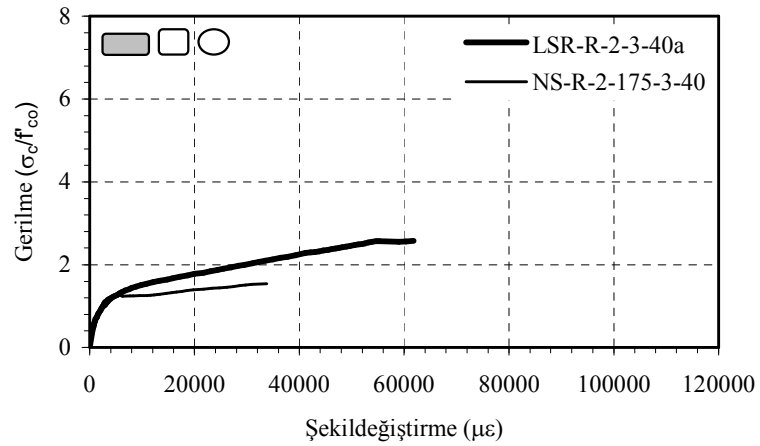
Şekil 6.95 Düşük ve Normal Beton Dayanımına Sahip 3 ve 5 Kat CFRP ile Sargılanmış Daire Enkesitli Numunelere ait Gerilme – Ş.D. İlişkileri

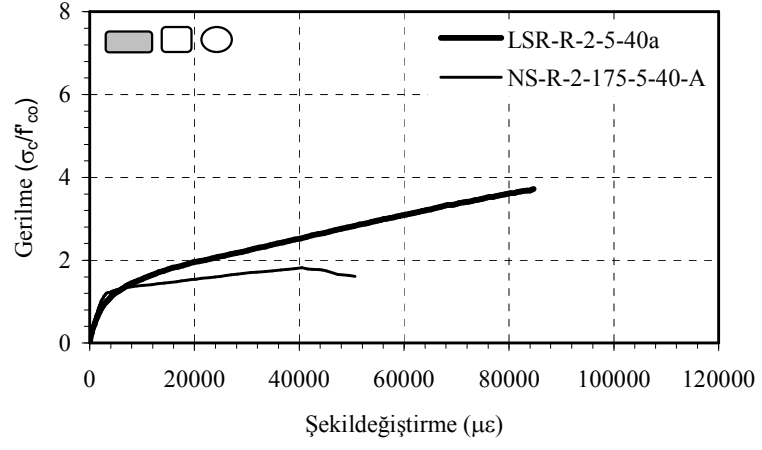
Düşük ve normal beton dayanımına sahip 3 ve 5 kat CFRP ile sargılanmış kare enkesitli numunelere ait gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.96'da görülmektedir. Daire enkesitli numunede olduğu gibi düşük dayanımlı beton ile üretilen kare enkesitli numunede de sağlanan dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesi artışı daha fazladır.



Şekil 6.96 Düşük ve Normal Beton Dayanımına Sahip 3 ve 5 Kat CFRP ile Sargılanmış Kare Enkesitli Numunelere ait Gerilme – Ş.D. İlişkileri

Düşük ve normal beton dayanımına sahip 3 ve 5 kat CFRP ile sargılanmış dikdörtgen enkesitli numunelere ait gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6.97’de görülmektedir. Daire ve kare enkesitli numunelerde olduğu gibi düşük dayanımlı beton ile üretilen dikdörtgen enkesitli numunede de sağlanan dayanım ve şekildeğiştirme kapasite artışı normal dayanımlı numuneye göre daha fazladır.





Şekil 6.97 Düşük ve Normal Beton Dayanımına Sahip 3 ve 5 Kat CFRP ile Sargılanmış Dikdörtgen Enkesitli Numunelere ait Gerilme – Ş.D. İlişkileri

7. DAYANIM VE EKSENEL ŞEKİLDEĞİŞTİRMENİN TAHMİNİ

Bu bölümde CFRP tabakalarla enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilen numunelerin deney sonuçlarından elde edilen en büyük dayanım ve şekildeğiştirme değerleri, bu konu ile ilgili daha önceden sunulan ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada İlki ve diğ. (2004c) [26] tarafından sunulan bağıntılar kullanılmıştır, Denklem 7.1 ve 7.2. Bu bağıntılar daire, kare ve dikdörtgen enkesitli CFRP tabakalarla enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş beton numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir.

$$\left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} \right]_{CFRP} = \left[1 + 2.4 \left(\frac{f'_{lmax}}{f'_{co}} \right)^{1.2} \right] \quad (7.1)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} \right]_{CFRP} = \left[1 + 20 \left(\frac{h}{b} \right) \left(\frac{f'_{lmax}}{f'_{co}} \right)^{0.5} \right] \quad (7.2)$$

1. ve 2. denklemlerdeki f'_{cc} ve ε_{cc} sırasıyla sargılanmış beton basınç dayanımını ve eksenel şekildeğiştirmesini, f'_{co} ve ε_{co} sargısız beton basınç dayanımını ve şekildeğiştirmesini, f'_{lmax} en büyük efektif yanal gerilme değerini, b ve h sırasıyla numune genişliği ve derinliğini ifade etmektedir. f'_{lmax} değeri (7.3) denklemiyle elde edilmektedir.

$$f'_{lmax} = \frac{\kappa_a \rho_f \varepsilon_{h,rup} E_{frp}}{2} \quad (7.3)$$

Denklem (7.3)'deki, κ_a kesit şekline bağlı etki faktörünü, E_{frp} ve ρ_f sırasıyla CFRP tabakasının elastisite modülünü ve CFRP tabakasıyla oluşturulan sargı kesit alanının beton kesit alanına oranını ifade etmektedir.

$\varepsilon_{h,rup}$ beton elemanlara sargılanmış CFRP tabakaların en büyük çekme dayanımını ifade etmektedir. Bu değer FRP tabakasının şekildeğiştirme değerinin (ε_{frp}) %70'i olarak kabul edilir, Denklem (7.4)

$$\varepsilon_{h,rup} = \varepsilon_{frp} \times 0.7 \quad (7.4)$$

Sargılanmış beton basınç dayanımını (f'_{cc}) ve şekildeğiştirme (ε_{cc}) değerlerini tahmin ederken betonarme elemanlarda enine sargı donatısının etkisini de göz önüne almak gerekmektedir. Enine sargı donatılarının sargılama etkisini hesaplamak için Mander ve diğ. (1988) [2] tarafından sunulan ampirik bağıntılar kullanılmıştır, Denklem 7.5, 7.6.

$$\left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} \right]_{ITR} = \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right] \quad (7.5)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} \right]_{ITR} = \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (7.6)$$

Bu çalışma kapsamında güçlendirilerek deneye tabi tutulan numunelerde beton enine doğrultuda hem etriyelerle, hem de CFRP tabakalarla sargılanmıştır. CFRP tabakaların ve etriyelerin enine doğrultudaki sargılama etkisi sonucunda dayanım ve şekildeğiştirme değerlerindeki artışlar yukarıdaki bağıntılarla ayrı ayrı hesaplanmıştır. Denklem 7.7 ve 7.8 kullanılarak toplam dayanım ve şekildeğiştirme artışları hesaplanmıştır.

$$\left[\frac{f'_{cc} - f'_{co}}{f'_{co}} \right]_{TOTAL} = \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right]_{CFRP} + \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right]_{ITR} \quad (7.7)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{co}} \right]_{TOTAL} = \left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} - 1 \right]_{CFRP} + \left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} - 1 \right]_{ITR} \quad (7.8)$$

Ampirik bağıntılardan elde edilen değerler ile deneysel çalışma sonucunda ulaşılan sonuçlar daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler için karşılaştırılmıştır, Tablo 7.1, 7.2 ve 7.3. Daha önceden CFRP tabakalarla sargılanarak güçlendirilmiş donatısız beton elemanların deneyleri sonucunda geliştirilen bağıntılar, CFRP tabakalarla sargılanarak güçlendirilmiş donatılı betonarme elemanlar için deneylere kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar üretmiştir. Ortalama deneysel sonuçların analitik sonuçlardan büyük olması da ampirik bağıntıların güvenli tarafta kalan sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Tablo 7.1 Daire Enkesitli Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune	Deneysel		Analitik		f'_l (FRP)	f'_l (ETRİYE)	$\frac{f'_{ccden}}{f'_{ccanali}}$	$\frac{\epsilon_{ccden}}{\epsilon_{ccanali}}$
	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}				
LSR-C-1-a	29.0	0.022	23.72	0.025	3.188	0.723	1.22	0.88
LSR-C-1-b	30.6	0.024	23.72	0.025	3.188	0.723	1.29	0.96
LSR-C-3-a-PD	55.6	0.047	39.40	0.039	9.563	0.723	1.41	1.21
LSR-C-3-b-PD	57.2	0.047	39.40	0.039	9.563	0.723	1.45	1.21
LSR-C-3-a	56.1	0.044	39.40	0.039	9.563	0.723	1.42	1.13
LSR-C-3-b	60.0	0.054	39.40	0.039	9.563	0.723	1.52	1.38
LSR-C-3-a-H	35.0	0.028	27.31	0.029	4.782	0.723	1.28	0.97
LSR-C-3-a-S	32.4	0.032	27.31	0.029	4.782	0.723	1.19	1.10
LSR-C-5-a	84.8	0.065	57.51	0.049	15.939	0.723	1.48	1.33
LSR-C-5-b	92.6	0.066	57.51	0.049	15.939	0.723	1.61	1.35
					Ortalama		1.37	1.11
					Std. Sapma		0.14	0.18

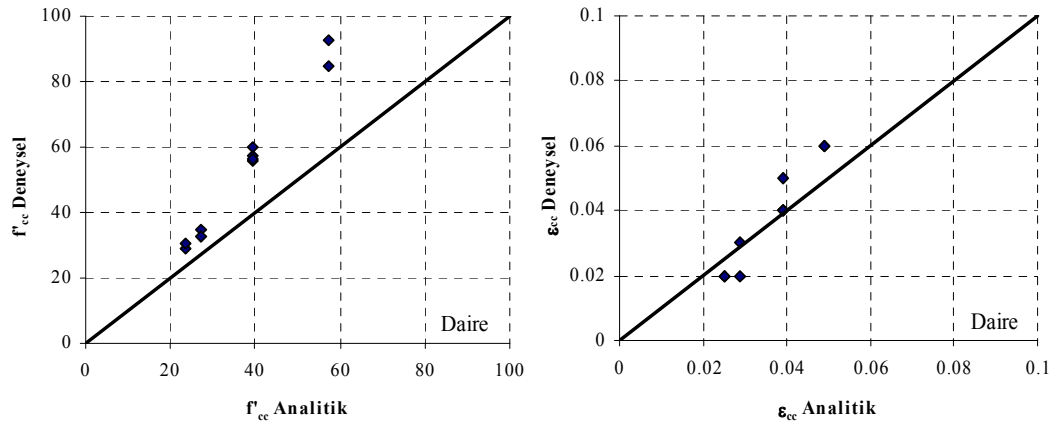
Tablo 7.2 Kare Enkesitli Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune	Deneysel		Analitik		f'_l (FRP)	f'_l (ETRİYE)	$\frac{f'_{ccden}}{f'_{ccanali}}$	$\frac{\epsilon_{ccden}}{\epsilon_{ccanali}}$
	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}				
LSR-R-1-1-40a	20.5	0.017	18.20	0.019	2.103	0.177	1.13	0.89
LSR-R-1-1-40b	20.3	0.025	18.20	0.019	2.103	0.177	1.12	1.32
LSR-R-1-1-40a-	19.0	0.013	18.20	0.019	2.103	0.177	1.05	0.68
LSR-R-1-1-40b-	20.6	0.014	18.20	0.019	2.103	0.177	1.13	0.74
LSR-R-1-3-40a	37.3	0.055	27.72	0.030	6.310	0.177	1.35	1.83
LSR-R-1-3-40b	40.9	0.066	27.72	0.030	6.310	0.177	1.48	2.20
LSR-R-1-3-10a	24.7	0.049	22.38	0.025	4.058	0.177	1.11	1.98
LSR-R-1-3-10b	26.3	0.078	22.38	0.025	4.058	0.177	1.18	3.15
LSR-R-1-3-20a	29.2	0.055	24.36	0.027	4.917	0.177	1.20	2.04
LSR-R-1-3-20b	30.8	0.072	24.36	0.027	4.917	0.177	1.27	2.67
LSR-R-1-5-40a	51.6	0.069	38.72	0.038	10.516	0.177	1.33	1.82
LSR-R-1-5-40b	47.7	0.085	38.72	0.038	10.516	0.177	1.23	2.24
					Ortalama		1.22	1.80
					Std. Sapma		0.12	0.77

Tablo 7.3 Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

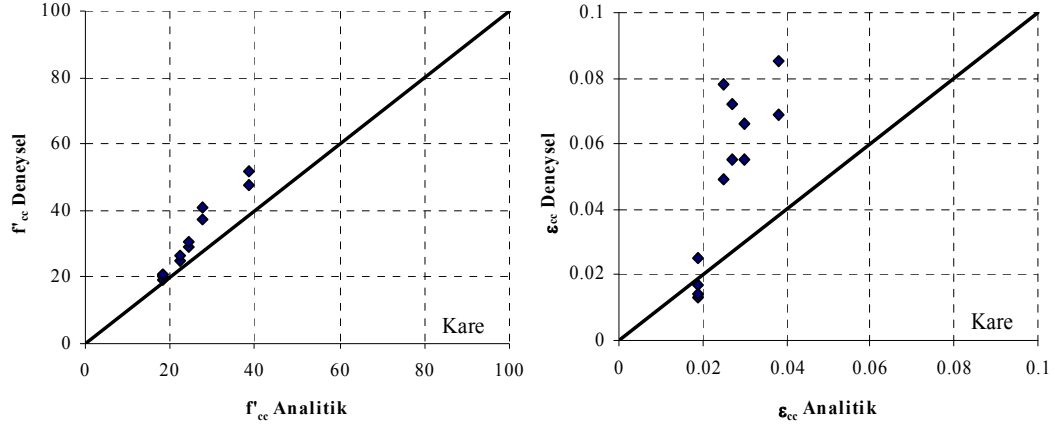
Numune	Deneysel		Analitik		f'_l	f'_l	$\frac{f'_{ccden}}{f'_{ccanali}}$	$\frac{\varepsilon_{ccden}}{\varepsilon_{ccanali}}$
	f'_{cc} (MPa)	ε_{cc}	f'_{cc} (MPa)	ε_{cc}	(FRP)	(ETRİYE)		
LSR-R-2-1-40a	18.3	0.018	18.90	0.036	2.250	0.240	0.97	0.50
LSR-R-2-1-40b	11.7	0.017	18.90	0.036	2.250	0.240	0.62	0.47
LSR-R-2-1-40a-A	20.5	0.014	18.90	0.036	2.250	0.240	1.09	0.39
LSR-R-2-1-40b-A	20.8	0.014	18.90	0.036	2.250	0.240	1.10	0.39
LSR-R-2-3-40a-PD	31.7	0.058	29.23	0.060	6.750	0.240	1.09	0.97
LSR-R-2-3-40b-PD	40.1	0.080	29.23	0.060	6.750	0.240	1.37	1.33
LSR-R-2-3-40a	34.9	0.062	29.23	0.060	6.750	0.240	1.19	1.03
LSR-R-2-3-40b	26.5	0.065	29.23	0.060	6.750	0.240	0.91	1.08
LSR-R-2-3-40a-H	20.0	0.031	21.26	0.043	3.375	0.240	0.94	0.72
LSR-R-2-3-40a-S	18.8	0.021	21.26	0.043	3.375	0.240	0.88	0.49
LSR-R-2-5-40a	50.8	0.086	41.15	0.076	11.250	0.240	1.23	1.13
LSR-R-2-5-40b	35.9	0.100	41.15	0.076	11.250	0.240	0.87	1.32
					Ortalama		1.02	0.82
					Std. Sapma		0.20	0.36

Şekil 7.1'de daire enkesitli numunelere ait deneyel – analitik dayanım (f'_{cc}) ve şekildeğiştirme (ε_{cc}) sonuçları karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



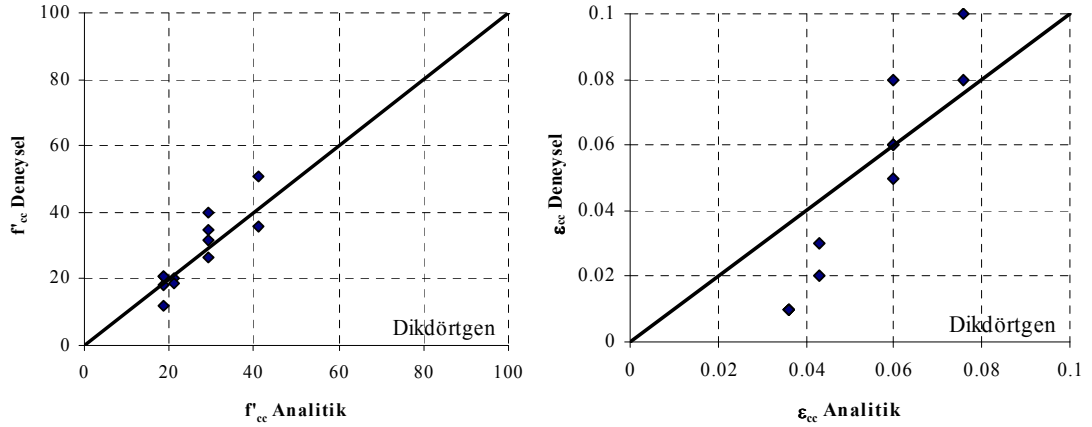
Şekil 7.1 Daire Enkesitli Numuneler için Deneyel – Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 7.2’de kare enkesitli numunelere ait deneysel – analitik dayanım (f'_{cc}) ve şekildeğiştirme (ϵ_{cc}) sonuçları karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.2 Kare Enkesitli Numuneler için Deneysel – Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 7.3’de dikdörtgen enkesitli numunelere ait deneysel – analitik dayanım (f'_{cc}) ve şekildeğiştirme (ϵ_{cc}) sonuçları karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.3 Dikdörtgen Enkesitli Numuneler için Deneysel – Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

8. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada, daire, kare ve dikdörtgen enkesite ve düşük beton dayanımına sahip betonarme elemanlar, farklı sargı sayılarında CFRP ile güçlendirilerek monoton veya tekrarlı artan eksenel yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Çalışmada incelenen başlıca değişkenler; enkesit şekli, CFRP sargı sayısı, yükleme tipi, köşe yarıçapı değişimi ve farklı güçlendirme teknikleridir. Deneyler sırasında çok sayıda şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçer ile farklı ölçüm boylarından (500, 270 ve 60 mm) veri toplanarak, yapılan ölçümün gerçeğe mümkün olduğunca yakın olması hedeflenmiştir. Numune tasarımında, imalatında, deney düzeneğindeki ölçüm cihazlarının seçiminde ve deney öncesi yerleşimlerinde azami gayret sarf edilerek elde edilecek sonuçların hata payının olası en küçük değerde olması sağlanmaya çalışılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen önemli sonuçlar şöyledir:

- Farklı ölçüm boylarından alınan veriler ve özdeş numunelerin davranışları birbirine çok yakındır. Bu deney ve yükleme düzeneklerinin sağlıklı veri topladığının ve numune imalatının yeterli hassasiyette yapıldığının göstergesidir.
- Düşük beton dayanımına sahip betonarme elemanların CFRP kompozitler ile sargılanması, numune davranışını önemli ölçüde değiştirmiştir. CFRP sargı kalınlığının artması bütün enkesit tiplerinde dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Daire enkesite sahip numunelerde dayanım artışı daha fazla olurken, kare ve özellikle de dikdörtgen enkesite sahip numunelerde şekildeğiştirme kapasitesi artışı daha fazla olmuştur, Tablo 8.1. Dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesindeki artışın sonucu olarak, numunenin enerji yutma yeteneğini de orijinal (sargısız) olarak denenen numunelere göre önemli ölçüde artmıştır.

Tablo 8.1 Ortalama Dayanım ve Şekildeğiştirme Kapasitesi Artış Miktarları

Enkesit Tipi	CFRP Sargı Sayısı	Dayanım Artışı (%)	Şekildeğiştirme Kapasitesi Artışı (%)
Daire	1	121	1050
	3	329	2350
	5	556	3175
Kare	1	51	950
	3	189	2925
	5	267	3750
Dikdörtgen	1	11	775
	3	127	3075
	5	221	4550

- Boyuna donatıların burkulması amacıyla, numune tasarımı sırasında her bir enkesit tipi için boyuna donatı çapı ve test bölgesindeki enine donatı aralığı özel olarak seçilmiştir. Boyuna donatıların burkulması sonucunda, deney sırasında numunelerde oluşabilecek erken dayanım ve süneklik kaybı, CFRP sargı sayesinde çok yüksek şekildeğiştirmelere kadar engellenmiştir.
- Enine şekildeğiştirmeler, CFRP sargı kalınlığından bağımsız olarak daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerde sırasıyla 0.011, 0.012 ve 0.010_(uzunkenar), 0.014_(kısakenar) mertebelerinde gerçekleşmiştir. Ortalama şekildeğiştirme değerlerine pik yük öncesi devre dışı kalan şekildeğiştirmeölçerlerden alınan veriler dâhil değildir.
- Kare enkesite sahip numunelerde, yükleme tipinin davranışı önemli ölçüde etkilemediği yapılan deneyler sonucunda gözlenmiştir. Monoton veya tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen kare enkesitli numuneler benzer dayanıma ulaşmış, tekrarlı artan yükleme yapılan numunelerde deney sonunda daha fazla şekildeğiştirme tespit edilmiştir.
- Dikdörtgen enkesite sahip numunelerde, tekrarlı artan eksenel yükler altında davranış değişmiştir. Numunelerin dayanımları monoton artan şekilde

yüklenen numunelerden daha az olurken, bu numunelerde deney sonunda daha fazla şekildeğiştirme olduğu gözlenmiştir.

- Kare enkesitli numunelerde, köşeler 10, 20 veya 40 mm çapında yuvarlatılarak bu bölgelerde oluşan gerilme yığılmaları azaltılmaya çalışılmıştır. Köşe yarıçapının artması oluşan gerilmelerin liflere daha iyi şekilde yayılmasını ve sonucunda daha yüksek dayanımlara ulaşılmasını sağlamıştır. Genel olarak, numune enkesiti daire formuna ne kadar yakınsa oluşan gerilmeler lifler boyunca o derecede iyi yayılacağı ve bunun sonucunda numune davranışının iyileşeceği söylenebilir. Ancak köşe yarıçapının azalması numunenin deney sonunda daha yüksek şekildeğiştirme yapabilmesini sağlamıştır.
- Önceden hasar verilip, onarıldıktan sonra 3 kat CFRP sargılanarak güçlendirilen numuneler, doğrudan güçlendirilen numuneler ile benzer davranış göstermiş, dayanım ve şekildeğiştirme özelliklerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Buna göre hasar görmüş yapılar onarıldıktan sonra bu çalışmada anlatılan teknik kullanılarak güçlendirilirse, dayanım ve şekildeğiştirme özellikleri önemli ölçüde iyileştirilebilir.
- Daha az miktarda lif kullanılarak, yüksek dayanım ve şekildeğiştirme değerlerine ulaşmak hedefiyle, daire ve dikdörtgen enkesite sahip bazı numuneler 50 mm genişliğinde etriye veya spiral tipi şeritler kullanılarak ve şeritler arasında 50 mm boşluk bırakılarak 3 kat CFRP ile güçlendirilmiştir. Hacimsel olarak 3 kat CFRP sargının yarısı kadar lif içeren bu tür güçlendirmede, numuneler 1 kat CFRP sargı ile güçlendirilen numunelerle benzer davranış göstermiş buna karşın boyuna doğrultudaki şekildeğiştirme yeteneklerinde 1 kat CFRP sargıdan daha büyük değerlere ulaşıldığı gözlenmiştir. Elde edilen şekildeğiştirme artışının, uygulamanın zorluğu dikkate alındığında yeterli olmadığı söylenebilir.
- Kare ve dikdörtgen enkesite sahip bazı numunelerde 1 kat CFRP sargının üzerine ek olarak etkinlik artırıcı detay uygulaması yapılmıştır. Bu güçlendirme tekniğindeki amaç da daha az lif kullanılarak, yüksek dayanım ve şekildeğiştirme değerlerine ulaşmaktır. Numunenin enine doğrultuda genişlemesini engellemek için şemsiye tipi ankrajlar ile yapılan a tipi ve bu

ankrajlara ek olarak numune köşelerine 1 kat CFRP sargı ile b tipi şeklinde iki farklı güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Bu teknik kullanılarak güçlendirilen numuneler 1 kat CFRP sargı ile benzer dayanıma ulaşmış ancak göçme anından sonra ani dayanım kaybı olmayıp sünek bir davranış gözlenmiştir. Deney sırasında ilk hasar oluşumlarının ankraj uygulaması sırasında delinen lif bölgelerinde başlamasından, uygulamanın lifleri delmeden, sargı sırasında yapılmasının dayanımı ve şekildeğiştirmeyi daha yüksek değerlere çıkarılabileceği sonucuna varılabilir. Elde edilen göçme sonrası süneklik artışının ise imalatın zorluğu göz önüne alındığında yeterli düzeyde olmadığı söylenebilir.

- Deneyler sonucunda elde edilen en büyük dayanım $f'_{cc(den)}$ ve buna karşı gelen eksenel şekildeğiştirme $\varepsilon_{cc(den)}$ değerleri, bu konu ile ilgili daha önceden İlki ve diğ. (2004c) tarafından sunulan ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre elde edilen ortalama deneysel/analitik oranlar Tablo 8.2'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre analitik sonuçların, deneysel sonuçlara kabul edilebilir yakınlıkta olduğu söylenebilir. Ortalamaların 1'den büyük çıkması da, ampirik formüllerin güvenli tarafta kalacak şekilde değerler ürettiğini göstermektedir.

Tablo 8.2 Ortalama Deneysel/Analitik Oranlar

	Daire Enkesit	Kare Enkesit	Dikdörtgen Enkesit	Ortalama
Ortalama $f'_{cc(deny)} / f'_{cc(anly)}$	1.37	1.22	1.02	1.20
Standart Sapma $f'_{cc(deny)} / f'_{cc(anly)}$	0.14	0.12	0.2	0.15
Ortalama $\varepsilon_{cc(deny)} / \varepsilon_{cc(anly)}$	1.11	1.80	0.82	1.24
Standart Sapma $\varepsilon_{cc(deny)} / \varepsilon_{cc(anly)}$	0.18	0.77	0.36	0.44

- Deney sonrasındaki incelemelerde 1, 3 ve 5 kat CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin benzer göçme biçimleri olduğu gözlenmiştir. Buna göre 1 kat sargılı numuneler taşıma gücüne ulaşıldığı anda ani dayanım kaybı yaşayarak test bölgesi içinde düşeyde tek bir yırtıkla, 3 kat sargılı numuneler taşıma gücüne ulaşana kadar birkaç farklı kesitte oluşan yırtıktan sonra ani dayanım kaybı yaşayarak 3 – 4 parça düşey ve çok sayıda yatay yırtıkla, 5 kat sargılı numuneler ise taşıma gücüne yakın mertebede ufak lif açılmalarından sonra genelde bir miktar yük kaybından sonra bir süre daha şekil değiştirme yaptıktan sonra ani olmayan şekilde çok sayıda düşey ve yatay yırtıkla taşıma güçlerini kaybetmişlerdir.
- Literatürde yer alan benzer çalışmayla yapılan karşılaştırmaya göre, CFRP sargının etkinliği düşük dayanımlı betonlarda daha yüksek mertebede yer almaktadır. Sargısız beton basınç dayanımı yüksek olan aynı özelliklere sahip numunelere göre, düşük dayanımlı numuneler, daha yüksek dayanım ve şekil değiştirme değerlerine ulaşmışlardır.

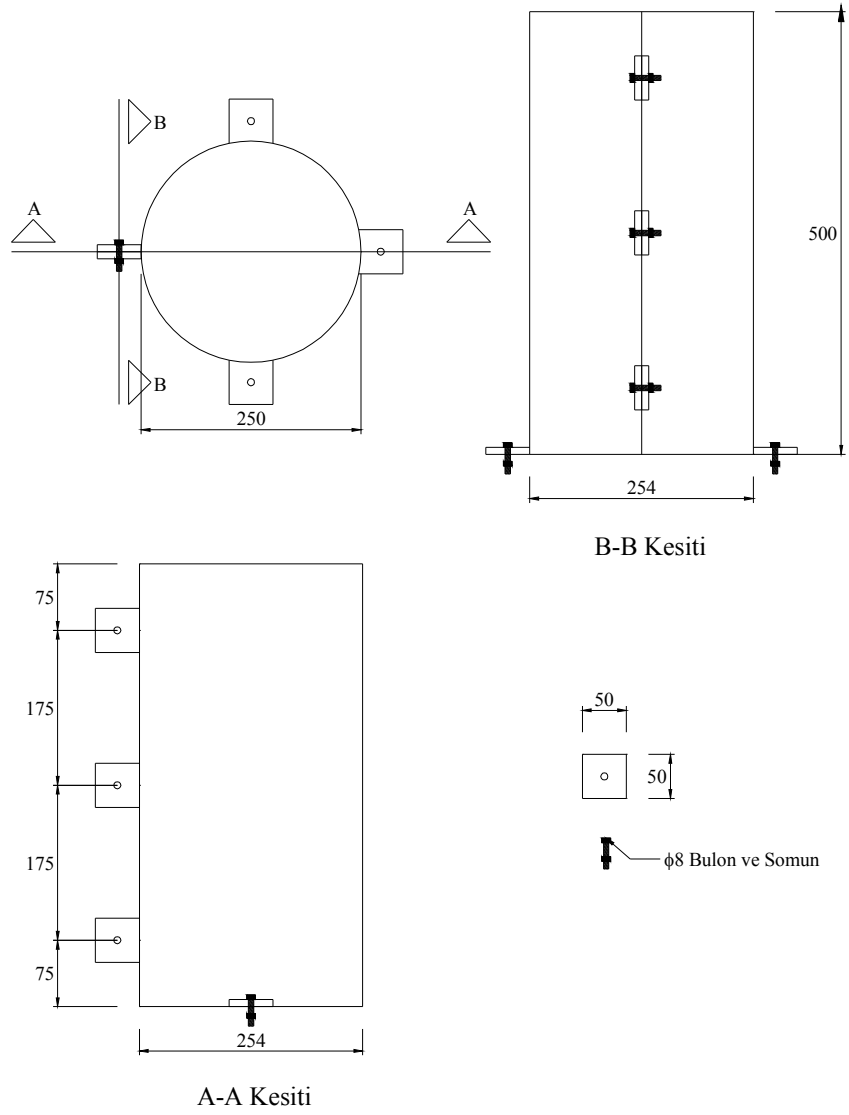
KAYNAKLAR

- [1] **Ahmad, S.H. and Shah, S.P.**, 1982. Stress-Strain Curves of Concrete Confined Spiral Reinforcement, Journal of the American Concrete Institute, **779**, No. 6, 484-490.
- [2] **Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.**, 1988. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of the Structural Division, **114**, No. 8, 1804-1826.
- [3] **Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.**, 1988. Observed Stress- Strain Behavior of Confined Concrete, ASCE Journal of the Structural Division, **114**, No. 8, 1827-1849.
- [4] **Saatcioglu, M. and Ravzi, S.R.**, 1992 Strength and Ductility of Confined Concrete, ASCE Journal of the Structural Division, **118**, No. 6, 1590-1607.
- [5] **İlki, A., Özdemir, P. and Fukuta, T.**, Confinement Effect of Reinforced Concrete Columns with Circular Cross-Section, BRI Research Paper, No. 143, Building Research Institute, Tsukuba, Japan.
- [6] **Fukuyama, H. and Sugano, S.**, 2000, Japanese Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings After The Hyokogen-Nanbu Earthquake, Cement and Concrete Composites, No 22, 59-79.
- [7] **Mirmiran, A. and Shahawy, M.**, 1997, Behaviour of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, ASCE Journal of Structural Engineering, **123**, No. 5 583-590.
- [8] **Toutanji, H.A.**, 1999, Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets, ACI Materials Journal, **96**, No. 3, 397-403.
- [9] **Demers, M. and Neale, K.W.**, 1999, Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets – an experimental study, Can. J. Civ. Eng. **26**, No. 2, 226-241.

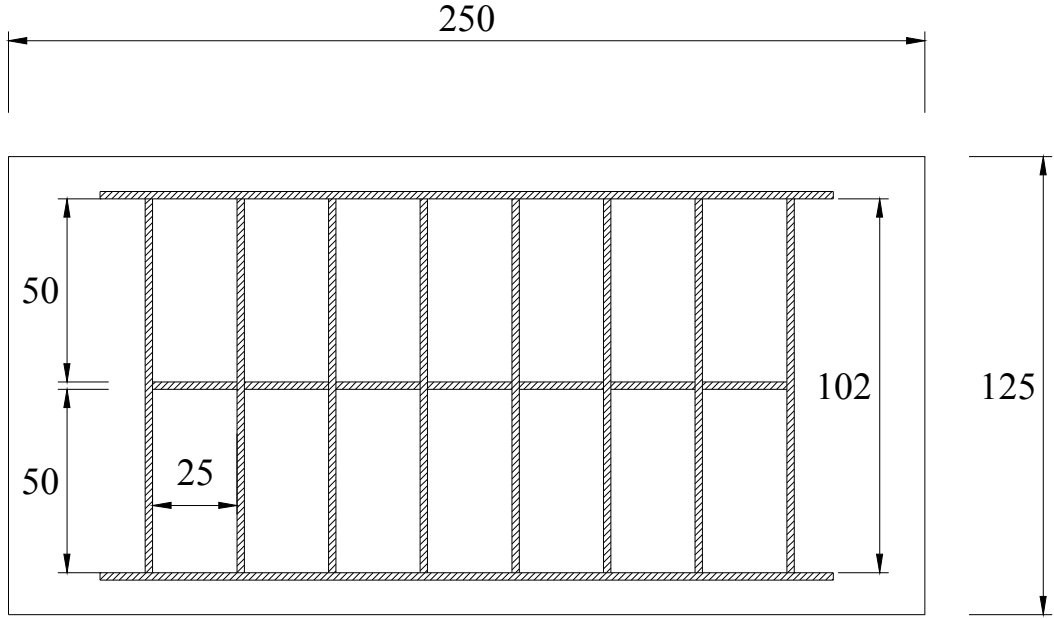
- [10] **Xiao, Y. and Wu, H.**, 2000, Compressive Behaviour of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **12**, No. 2, 139-146.
- [11] **Wang, Y.C. and Restrepo, J.**, 2001, Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets, *ACI Structural Journal*, **98**, No. 3, 377-385.
- [12] **Tan, K.H.**, 2002, Strength Enhancement of Rectangular Reinforced Concrete Columns using Fiber-Reinforced Polymer, *ASCE Journal of Composites for Construction*, **6**, No. 3, 175-183.
- [13] **Ilki, A. and Kumbasar, N.**, 2002, Behaviour of Damaged and Undamaged Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets, *Structural Engineering and Mechanics*, **13**, No. 1, 75-90
- [14] **Chaallal, O., M. ASCE, Shahawy, M., and Hassan, M .**, 2003, Performance of axially loaded short rectangular columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer wrapping, *ASCE Journal of Composites for Construction*, **7**, No. 3, 200-208.
- [15] **Ilki, A. and Kumbasar, N.**, 2003, Compressive Behavior of Carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-Circular Cross Sections”, *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, No. 3, 381-406.
- [16] **Ilki, A., Kumbasar, N. and Koc, V.**, 2003, Low and Medium Strength Concrete Members Confined by Fiber Reinforced Polymer Jackets, *ARI, The Bulletin of the Istanbul Technical University*, **53**, No. 1, 118-123.
- [17] **Ilki, A., Koc, V., Ergun, B., Altan, M.O., and Kumbasar, N.**, 2003, Photogrammetrically measured deformation of FPR wrapped low strength concrete, 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6, July, , Singapore.
- [18] **Rochette, P. and Labossiere, P.**, 2000, Axial testing of rectangular column models confined with composites, *ASCE Journal of Composites for Construction*, **4**, No. 3, 129-136.
- [19] **Saadatmanesh,H., Ehsani,M.R. and Jin, L.**, 1997, Repair of earthquake damaged reinforced concrete columns with FRP wraps, *Struct. J., ACI*, **94**,No. 2, 206-215.
- [20] **Fardis, M.N., and Khalili, H.**, 1982, FRP-encased concrete as a structural material, *Magazine of Concrete Research*, **34**,No. 121,191-202.

- [21] **American Concrete Institute-Committee 440**, 2001, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP rebars, ACI 440. IR-01. Farmington Hills, MI, USA: ACI
- [22] **Concrete Society Technical Report 55**, 2000, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials.
- [23] **Lam, L., and Teng, J.G.**, 2002, Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete, J. Struct. Eng., **128**, No. 5, 612-623.
- [24] **Lam, L. and Teng, J. G.**, 2003a, Design-oriented Stress-Strain Model for FRP- confined Concrete, Construction and Building Materials, **17**, 471-489.
- [25] **Lam, L., and Teng, J.G.**, 2003b, Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **22**, No.13, 1149-1186.
- [26] **Ilki, A., Kumbasar, N., and Koc, V.**, 2004, Low strength concrete members externally confined with FRP sheets, Struct. Eng. And Mechanics.
- [27] **Koç, V.**, 2004, Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzemeler İle Güçlendirilmiş Düşük ve Normal Dayanımlı Beton Elemanların Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] **Karamuk, E.**, 2005, Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzemeler İle Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

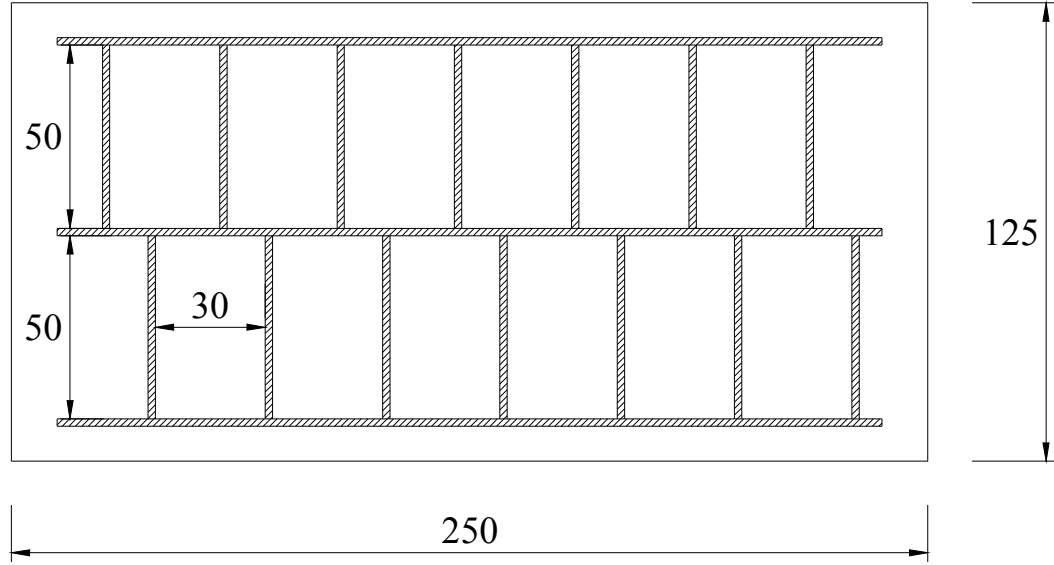
EK A. KALIP ÇİZİMLERİ



Daire Enkesitli Numuneler Kalıp
(Ölçüler : mm)

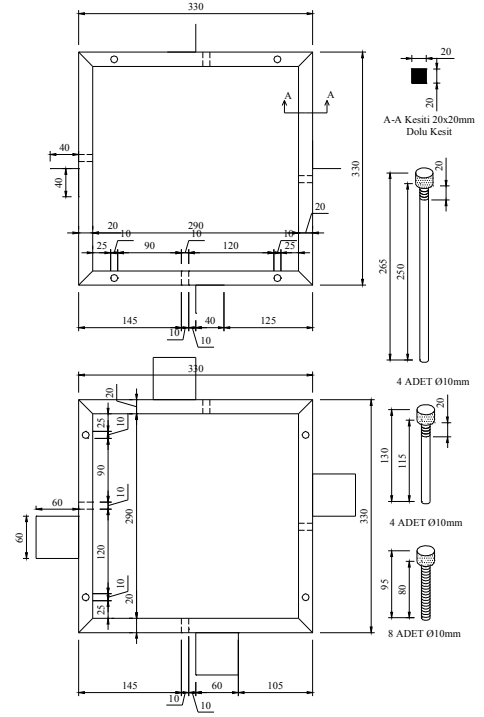
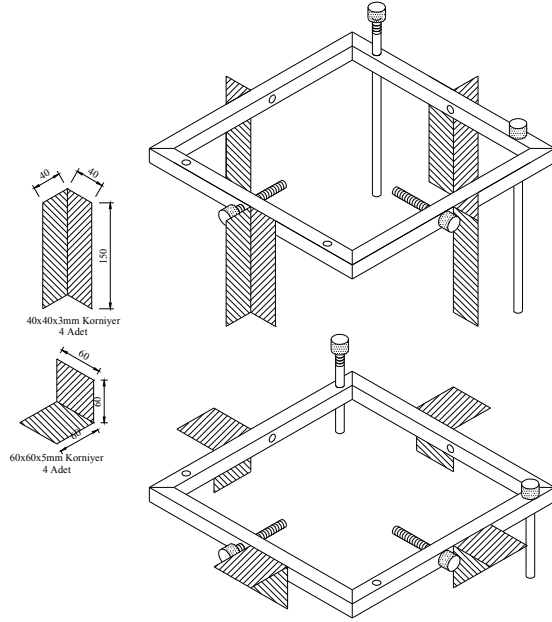


Kare Enkesitli Numune Kalıp
(Ölçüler : cm)



Dikdörtgen Enkesitli Numune Kalıp
(Ölçüler : cm)

EK B. ÖLÇÜM ÇERÇEVESİ ÇİZİMLERİ



EK C. NUMUNE ÜZERİNE ETKİYEN GERİLMENİN BULUNMASI

Sargılı betonun gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri bulunurken, boyuna donatıların aldığı gerilme, sahip oldukları gerilme – şekildeğiştirme ilişkilerine göre hesaplanarak numune üzerine gelen toplam gerilmeden çıkarılmıştır. Boyuna donatıların aldığı eksenel gerilme $\sigma_{s(\varepsilon)}$, lineer-elastik bölgede ve akma bölgesinde sırasıyla Denklem 1 ve 2 ile hesaplanmıştır. Pekleşme bölgesinde ise $\phi 10$, $\phi 12$, $\phi 14$ çapları için sırasıyla Denklem 3, 4 ve 5 kullanılmıştır. Bu denklem donatılar için yapılan çekme deneylerinden elde edilen gerilme – şekildeğiştirme ilişkilerinde, pekleşme bölgesindeki parabol denklemleridir. Bu denklemlerde, E , ε_s , ε_y ve ε_{sh} , sırasıyla elastisite modülünü, boyuna donatıların eksenel kısalmasını, donatı akma dayanımını ve pekleşmeye karşılık gelen gerilme değerini göstermektedir. Numuneye etkiyen net gerilmenin bulunması için Denklem 6 kullanılmıştır. Bu denklemde P , A_s ve A_c , sırasıyla eksenel yükü, boyuna donatı alanını ve beton enkesit alanını göstermektedir.

$$\sigma_{s(\varepsilon)} = E \times \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s < \varepsilon_y) \quad (1)$$

$$\sigma_{s(\varepsilon)} = f_y \quad (\varepsilon_y < \varepsilon_s < \varepsilon_{sh}) \quad (2)$$

$$\sigma_{s(\varepsilon)} = -5148.5 \times \varepsilon_s^2 + 1997.6 \times \varepsilon_s + 329.1 \quad (3)$$

$$\sigma_{s(\varepsilon)} = -2993.2 \times \varepsilon_s^2 + 1376.9 \times \varepsilon_s + 312.7 \quad (4)$$

$$\sigma_{s(\varepsilon)} = -2993.2 \times \varepsilon_s^2 + 1376.9 \times \varepsilon_s + 318.7 \quad (5)$$

$$\sigma_{net} = \frac{P - (\sigma_{s(\varepsilon)} \times A_s)}{A_c - A_s} \quad (6)$$

ÖZGEÇMİŞ

Önder Peker 1980 senesinde Ankara’da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladıktan sonra 1998 senesinde Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başlamıştır. 2002 senesinde bu bölümden mezun olduktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.