

**KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER MALZEME
İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KOLONLARIN EKSENEL YÜKLER ALTINDA
DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Emre KARAMUK
501021166**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Ocak 2005**

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

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

Yrd.Doç.Dr. Hilmi LUŞ (BÜ)

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında, karbon lif takviyeli polimer tabakalar ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilen normal dayanımlı, daire, kare ve dikdörtgen enkesitli betonarme elemanların, eksenel basınç gerilmeleri altında davranışı üzerine yapılan deneysel çalışma sonuçları sunulmaktadır

Yoğun emek, sabır ve bilgi gerektiren bu deneysel çalışma sırasında ve yüksek lisans öğrenimim boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Alper İLKİ'ye teşekkür ederim.

Bu deneysel çalışma boyunca yardımları ile büyük destek olan İnş.Müh. Önder PEKER ve İnş.Yük.Müh. Volkan KOÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Maddi desteklerinden dolayı YKS (Yapkim Yapı Kimyasalları Sanayi), Sayın Bülent Turgut, Sayın Metin Tiryaki'ye teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım ve bu çalışma sırasında bana gösterdikleri sabır, maddi ve manevi destekleri için çok değerli babam, annem ve ablama teşekkür ederim

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

OCAK 2005

Emre KARAMUK

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR	7
3. NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE HAZIRLANMASI, MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ	11
3.1. Giriş	11
3.2. Numune Özellikleri	11
3.3. Numunelerin Üretilmesi	11
3.3.1. Donatı İskeletinin Oluşturulması.....	11
3.3.2. Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması.....	14
3.3.3. Kalıpların Hazırlanması	16
3.3.4. Beton Dökümü.....	17
3.3.5. Kür Uygulanması	18
3.4. Malzeme Özellikleri ve Malzeme Deneyleri	19
3.4.1. Beton.....	19
3.4.2. Donatı Çeliği	23
3.4.3 Güçlendirme Malzemeleri	27
4. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ	32
4.1. Giriş	32
4.2. Karbon Lifli Kompozitlerin Sarılması	33
4.3. Ek Önlem Uygulaması	37
5. DENEY DÜZENEĞİ	42
6. DENEY SONUÇLARI	47
6.1. Genel Davranış	47
6.2. Kare Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları	49
6.2.1. NS-R-1-200-0-40	50
6.2.2. NS-R-1-200-3-40	51

6.2.3. NS-R-1-200-5-40.....	53
6.2.4. NS-R-1-100-0-40.....	55
6.2.5. NS-R-1-100-3-40.....	56
6.2.6. NS-R-1-100-5-40.....	58
6.2.7. NS-R-1-050-0-40.....	60
6.2.8. NS-R-1-050-3-40.....	61
6.2.9. NS-R-1-050-5-40.....	63
6.2.10. NS-R-1-000-3-40.....	65
6.2.11. Karşılaştırmalar	67
6.3. Dikdörtgen Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları.....	74
6.3.1. NS-R-2-175-0-40.....	75
6.3.2. NS-R-2-175-3-40.....	76
6.3.3. NS-R-2-175-5-40-A.....	78
6.3.4. NS-R-2-100-0-40.....	80
6.3.5. NS-R-2-100-3-40.....	81
6.3.6. NS-R-2-100-5-40.....	83
6.3.7. NS-R-2-050-0-40.....	85
6.3.8. NS-R-2-050-3-40.....	86
6.3.9. NS-R-2-050-5-40.....	88
6.3.10. Karşılaştırmalar	90
6.4. Daire Enkesitli Numunelere Ait Deney Sonuçları.....	97
6.4.1. NS-C-145-0	98
6.4.2. NS-C-145-3	99
6.4.3. NS-C-145-5	101
6.4.4. NS-C-100-0	103
6.4.5. NS-C-100-3	104
6.4.6. NS-C-100-5	106
6.4.7. NS-C-050-0	108
6.4.8. NS-C-050-3	109
6.4.9. NS-C-050-5	111
6.4.10. Karşılaştırmalar	113
6.5. Farklı Kesit Tiplerindeki Numunelerin Deney Sonuçlarının	
Karşılaştırılması	120
6.5.1. Boyuna Doğrultudaki Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	120

6.5.2. Enine Doğrultudaki Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	123
6.6. Literatürdeki Benzer Çalışmayla Yapılan Karşılaştırma	126
7. ANALİTİK ÇALIŞMA	129
8. SONUÇLAR.....	137
KAYNAKLAR	141
EK ÖLÇÜM ÇERÇEVESİ (KOMPRESSOMETRE) ÇİZİMLERİ	144

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1.	Kare Enkesitli Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özet Bilgileri..... 4
Tablo 1.2.	Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özet Bilgileri..... 5
Tablo 1.3.	Daire Enkesitli Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özet Bilgileri..... 6
Tablo 3.4.1.1.	Tüm Numuneler İçin Kullanılan Beton Karışım Oranları 19
Tablo 3.4.1.2.	Beton Karışım Oranları 20
Tablo 3.4.1.3.	Standart Silindir Basınç Deneyleri Sonuçları 23
Tablo 3.4.2.1.	Boyuna ve Enine Donatı Özellikleri 27
Tablo 3.4.3.1.	FRP Malzemelerin ve Çeliğin Birim Ağırlıkları (t/m ³)..... 28
Tablo 3.4.3.2.	Farklı Türdeki FRP Malzemelerin Mekanik Özellikleri..... 28
Tablo 3.4.3.3.	C1-30 Türü Karbon Lif Takviyeli Polimer Tabakaların Geometrik Özellikleri..... 28
Tablo 3.4.3.4.	C1-30 Türü CFRP Malzemenin Mekanik Özellikleri..... 29
Tablo 3.4.3.5.	Yapkim Degussa Primerin Mekanik Özellikleri..... 30
Tablo 3.4.3.6.	Yapkim Degussa Rasatura Putty'nin Mekanik Özellikleri 30
Tablo 3.4.3.7.	Yapkim Degussa Saturantın Mekanik Özellikleri..... 31
Tablo 4.1.1.	Kare En kesitli Numunelerin İsimleri ve Özet Bilgileri 32
Tablo 4.1.2.	Dikdörtgen En kesitli Numunelerin İsimleri ve Özet Bilgileri 32
Tablo 4.1.3.	Daire En kesitli Numunelerin İsimleri ve Özet Bilgileri 33
Tablo 6.2.11.1.	Orijinal ve Güçlendirilmiş Numunelerin Dayanım ve Şekildeğiştirmeleri 72
Tablo 6.3.10.1.	Orijinal ve Güçlendirilmiş Numunelerin Dayanım ve Şekildeğiştirmeleri 95
Tablo 6.4.10.1.	Orijinal ve Güçlendirilmiş Numunelerin Dayanım ve Şekildeğiştirmeleri 118
Tablo 7.1.	Daire Enkesitli Numunelerin Analitik ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması 131
Tablo 7.2.	Kare Enkesitli Numunelerin Analitik ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması 131
Tablo 7.3.	Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Analitik ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması..... 132

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.3.1.1	: Numune Kesitleri ve Donatı Detayları	12
Şekil 3.3.1.2	: Silindir Numunelerin Etriyeleri	13
Şekil 3.3.1.3	: Boyuna Donatı Çubukları	13
Şekil 3.3.1.4	: Silindir Numunelerin Etriye Üretimi	14
Şekil 3.3.1.5	: Donatı İskeletlerinin Hazırlanması	14
Şekil 3.3.2.1	: Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması	15
Şekil 3.3.2.2	: Şekildeğiştirmeölçerlerin Üzerine Koruyucu N1 Sürülmesi	16
Şekil 3.3.3.1	: Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Kalıp İmalatı	16
Şekil 3.3.3.2	: Kare ve Silindir Enkesitli Numunelerin Donatı İskeletlerinin Yerleştirilmesi	16
Şekil 3.3.4.1	: Kare Enkesitli Numunelerin Beton Dökümü ve Vibrasyon Uygulanması	17
Şekil 3.3.4.2	: Silindir ve Kare Enkesitli Numunelerin Beton Döküm Aşamaları	17
Şekil 3.3.4.3	: Kare ve Dikdörtgen EnKesitli numuneler	18
Şekil 3.3.4.4	: Silindir Enkesitli Numuneler ve Standart Silindir numuneler	18
Şekil 3.3.5.1	: Kare Enkesitli Numuneler ve Standart Silindir Numunelerin Kür İşlemi	18
Şekil 3.4.1.1	: Taze Betonda Çökme ve Yayılma Çapı Ölçülmesi	20
Şekil 3.4.1.2	: Standart Silindir Basınç Deneyi İçin Hazırlanan Düzenek	21
Şekil 3.4.1.3	: 28 Günlük Beton Silindir Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	21
Şekil 3.4.1.4	: 90 Günlük Beton Silindir Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	22
Şekil 3.4.1.5	: 180 Günlük Beton Silindir Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	22
Şekil 3.4.1.6	: Dayanım Beton Yaşı İlişkisi	22
Şekil 3.4.2.1	: Çelik Çekme Deneyi	24
Şekil 3.4.2.2	: Enine Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 8$)	25
Şekil 3.4.2.3	: Boyuna Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 10$)	25
Şekil 3.4.2.4	: Boyuna Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 12$)	25
Şekil 3.4.2.5	: Boyuna Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 14$)	26
Şekil 3.4.2.6	: Çekme Çubuğunda Kopma ve Düzgün Doğrusal Uzama Bölgeleri	26
Şekil 3.4.3.1	: CFRP Tabakası	27
Şekil 3.4.3.2	: Çalışmada Kullanılan C1-30 Türü CFRP İçin Gerilme- Şekildeğiştirme İlişkisi	29
Şekil 4.2.1	: Numunelerin Taşlanması	33
Şekil 4.2.2	: Numunelerin Köşelerinin Yuvarlatılmış Hali	34
Şekil 4.2.3	: Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Köşelerinin	

	Yuvarlatılmış Durumu	34
Şekil 4.2.4	: Numune Yüzeyinin Temizlenmesi	35
Şekil 4.2.5	: Astar Uygulaması	36
Şekil 4.2.6	: Epoksi Esaslı Macun Karışımının Sürülmesi	36
Şekil 4.2.7	: CFRP Tabakaların Kesilmesi	36
Şekil 4.2.8	: Karbon Lif Tabakalar Sarılmadan Önce Epoksi Esaslı Yapıştırıcı Sürülmesi	37
Şekil 4.2.9	: CFRP Tabakaların Sarılması	37
Şekil 4.3.1	: Ek Önlem Detayları	38
Şekil 4.3.2	: Ankraj Deliklerinin Açılması	39
Şekil 4.3.3	: Ankraj Deliklerinin Açıldıktan Sonraki Görüntüler	39
Şekil 4.3.4	: CFRP Tabakalarından Kesilen Parçalar	40
Şekil 4.3.5	: CFRP Parçalarından Hazırlanan Ankrajlar	40
Şekil 4.3.6	: Yapıştırıcının Hazırlanması ve Ankraj Yapılacak Yerlere Yapıştırıcının Sürülmesi	40
Şekil 4.3.7	: Ankrajların Açılan Deliklere Sokulması	41
Şekil 4.3.8	: Ankrajların Numune Yüzeyine Yapıştırılması	41
Şekil 4.3.9	: Ankraj Yapıldıktan Sonraki Numune Görüntüsü	41
Şekil 5.1	: Standart Silindir Basınç Deneyi İçin Hazırlanan Düzenek	43
Şekil 5.2	: Deney Düzeneği (Birimler: mm)	43
Şekil 5.3	: Dikdörtgen Numunelerin Uzun ve Kısa Kenarlarına Yapıştırılan Şekildeğiştirmeölçerler	45
Şekil 5.4	: Kare ve Silindir Numunelere Yapıştırılan Şekildeğiştirmeölçerler	45
Şekil 5.5	: Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numunelerdeki Yüzey Şekildeğiştirmeölçerlerinin Yerleri	45
Şekil 5.6	: Enine ve Boyuna Donatılardaki Şekildeğiştirmeölçerlerin Konumları	46
Şekil 6.1.1.1	: Tip Eksenel Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi ($f'_{cc}=f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}=\epsilon_{cu}$)	48
Şekil 6.1.2.2	: Tip Eksenel Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi ($f'_{cc}>f'_{cu}>f'_{co}$, $\epsilon_{cc}<\epsilon_{cu}$)	48
Şekil 6.1.3.3	: Tip Eksenel Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi ($f'_{cc}>f'_{co}>f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}<\epsilon_{cu}$)	48
Şekil 6.2.1.1	: NS-R-1-200-0-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm)	50
Şekil 6.2.1.2	: Deney Sırasında Numunede Oluşan Çatlak ve Ezilmeler	50
Şekil 6.2.2.1	: NS-R-1-200-0-40 ve NS-R-1-200-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	51
Şekil 6.2.2.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a), Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	51
Şekil 6.2.2.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	52
Şekil 6.2.2.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	52
Şekil 6.2.3.1	: NS-R-1-200-0-40 ve NS-R-1-200-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	53
Şekil 6.2.3.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	53
Şekil 6.2.3.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	54
Şekil 6.2.3.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	54
Şekil 6.2.4.1	: NS-R-1-100-0-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	

	(ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm).....	55
Şekil 6.2.4.2	: Numunenin $\varepsilon = 0.003$ (a) ve $\varepsilon = 0.035$ (b) Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.....	55
Şekil 6.2.5.1	: NS-R-1-100-0-40 ve NS-R-1-100-3-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm).....	56
Şekil 6.2.5.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	56
Şekil 6.2.5.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	57
Şekil 6.2.5.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	57
Şekil 6.2.6.1	: NS-R-1-100-0-40 ve NS-R-1-100-5-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm).....	58
Şekil 6.2.6.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri	58
Şekil 6.2.6.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	59
Şekil 6.2.6.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	59
Şekil 6.2.7.1	: NS-R-1-050-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm).....	60
Şekil 6.2.7.2	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	60
Şekil 6.2.8.1	: NS-R-1-050-0-40 ve NS-R-1-050-3-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm).....	61
Şekil 6.2.8.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	61
Şekil 6.2.8.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	62
Şekil 6.2.8.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	62
Şekil 6.2.9.1	: NS-R-1-050-0-40 ve NS-R-1-050-5-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm).....	63
Şekil 6.2.9.2	: 500, 270 ve 60 mm ölçüm boyları için başlangıç (a) ve tam (b) gerilme–şekildeğiştirme ilişkileri	63
Şekil 6.2.9.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	64
Şekil 6.2.9.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	64
Şekil 6.2.10.1	: NS-R-1-000-3-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm).....	65
Şekil 6.2.10.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri	65
Şekil 6.2.10.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	66
Şekil 6.2.10.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	66
Şekil 6.2.11.1	: Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığının Gerilme- Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi.....	68
Şekil 6.2.11.2	: Farklı CFRP Kalınlıkları İçin Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme- Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi.....	69
Şekil 6.2.11.3	: Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığı Değişiminin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi.....	70
Şekil 6.2.11.4	: Farklı CFRP Kalınlıkları İçin Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme- Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi.....	71
Şekil 6.3.1.1	: NS-R-2-175-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm).....	75
Şekil 6.3.1.2	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	75
Şekil 6.3.2.1	: NS-R-2-175-0-40 ve NS-R-2-175-3-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm).....	76
Şekil 6.3.2.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b)	

	Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	76
Şekil 6.3.2.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	77
Şekil 6.3.2.4	: Numunenin Deney Sırasındaki ve Deney Sonrasındaki Görüntüsü.....	77
Şekil 6.3.3.1	: NS-R-2-175-0-40 ve NS-R-2-175-5-40-A Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	78
Şekil 6.3.3.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	78
Şekil 6.3.3.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	79
Şekil 6.3.3.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	79
Şekil 6.3.4.1	: NS-R-2-100-0-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm).....	80
Şekil 6.3.4.2	: Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.	80
Şekil 6.3.5.1	: NS-R-2-100-0-40 ve NS-R-2-100-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	81
Şekil 6.3.5.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	81
Şekil 6.3.5.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	82
Şekil 6.3.5.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	82
Şekil 6.3.6.1	: NS-R-2-100-0-40 ve NS-R-2-100-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	83
Şekil 6.3.6.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	83
Şekil 6.3.6.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	84
Şekil 6.3.6.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	84
Şekil 6.3.7.1	: NS-R-2-050-0-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm).....	85
Şekil 6.3.7.2	: Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Adımlarındaki Görüntüleri.....	85
Şekil 6.3.8.1	: NS-R-2-050-0-40 ve NS-R-2-050-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	86
Şekil 6.3.8.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	86
Şekil 6.3.8.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	87
Şekil 6.3.8.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	87
Şekil 6.3.9.1	: NS-R-2-050-0-40 ve NS-R-2-050-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	88
Şekil 6.3.9.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	88
Şekil 6.3.9.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	89
Şekil 6.3.9.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	89
Şekil 6.3.10.1	: Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığının Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi	91
Şekil 6.3.10.2	: Farklı CFRP Kalınlıklarında Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi	92
Şekil 6.3.10.3	: Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığı Artışının Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi.....	93
Şekil 6.3.10.4	: Farklı CFRP Aralıklarında Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi	94
Şekil 6.4.1.1	: NS-C-145-0 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	

	(ölçüm boyu: 500 ve 270 mm)	98
Şekil 6.4.1.2	: Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.	98
Şekil 6.4.2.1	: NS-C-145-0 ve NS-C-145-3 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	99
Şekil 6.4.2.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	99
Şekil 6.4.2.3	: Gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi	100
Şekil 6.4.2.4	: Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri	100
Şekil 6.4.3.1	: NS-C-145-0 ve NS-C-145-5 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	101
Şekil 6.4.3.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	101
Şekil 6.4.3.3	: Gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi	102
Şekil 6.4.3.4	: Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri	102
Şekil 6.4.4.1	: NS-C-100-0 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 ve 270 mm)	103
Şekil 6.4.4.2	: Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.	103
Şekil 6.4.5.1	: NS-C-100-0 ve NS-C-100-3 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	104
Şekil 6.4.5.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	104
Şekil 6.4.5.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	105
Şekil 6.4.5.4	: Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri	105
Şekil 6.4.6.1	: NS-C-100-0 ve NS-C-100-5 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	106
Şekil 6.4.6.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	106
Şekil 6.4.6.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	107
Şekil 6.4.6.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	107
Şekil 6.4.7.1	: NS-C-050-0 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 ve 270 mm)	108
Şekil 6.4.7.2	: Deney Sırasındaki Çeşitli Adımlardaki Görüntüler.....	108
Şekil 6.4.8.1	: NS-C-050-0 ve NS-C-050-3 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	109
Şekil 6.4.8.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	109
Şekil 6.4.8.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	110
Şekil 6.4.8.4	: Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri	110
Şekil 6.4.9.1	: NS-C-050-0 ve NS-C-050-5 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)	111
Şekil 6.4.9.2	: 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkileri.....	111
Şekil 6.4.9.3	: Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	112
Şekil 6.4.9.4	: Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri	112
Şekil 6.4.10.1	: Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığının Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi	114
Şekil 6.4.10.2	: Farklı CFRP Kalınlığına Sahip Numunelerde Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme–Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi	115

Şekil 6.4.10.3	: Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığı Değişiminin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi.....	116
Şekil 6.4.10.4	: Farklı CFRP Aralıklarında Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi	117
Şekil 6.5.1.1	: Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve Enine Donatı Oranına Sahip Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	121
Şekil 6.5.1.2	: Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 100 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	122
Şekil 6.5.1.3	: Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 050 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	123
Şekil 6.5.2.1	: Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve Enine Donatı Oranına Sahip Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkileri	124
Şekil 6.5.2.2	: Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 100 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkileri	125
Şekil 6.5.2.3	: Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 050 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkiler	125
Şekil 6.6.1	: 5 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Kare Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması	126
Şekil 6.6.2	: 3 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Kare Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması	126
Şekil 6.6.3	: 5 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması	127
Şekil 6.6.4	: 3 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması	127
Şekil 6.6.5	: 5 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Daire Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması	128
Şekil 6.6.6	: 3 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Daire Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması	128
Şekil 7.1	: Silindir Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Dayanım Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Dayanım Artışının Karşılaştırılması	132
Şekil 7.2	: Kare Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Dayanım Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Dayanım Artışının Karşılaştırılması	133
Şekil 7.3	: Dikdörtgen Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Dayanım Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Dayanım Artışının Karşılaştırılması	133
Şekil 7.4	: Silindir Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Şekildeğiştirme	

	Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Şekildeğiştirme Artışının Karşılaştırılması.....	133
Şekil 7.5	: Kare Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Şekildeğiştirme Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Şekildeğiştirme Artışının Karşılaştırılması.....	134
Şekil 7.6	: Dikdörtgen Numuneler İçin Etriye Ve CFRP Sargının Şekildeğiştirme Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini Ve Deneysel Olarak Bulunan Şekildeğiştirme Artışının Karşılaştırılması.	134
Şekil 7.7	: Daire Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan f'_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması	135
Şekil 7.8	: Kare Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan f'_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması	135
Şekil 7.9	: Dikdörtgen Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan f'_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması	135
Şekil 7.10	: Daire Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan ϵ_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması.....	136
Şekil 7.11	: Kare Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan ϵ_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması.....	136
Şekil 7.12	: Dikdörtgen Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan ϵ_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması.....	136

KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER MALZEME İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KOLONLARIN EKSENEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

ÖZET

Türkiye’de mevcut yapıların önemli bir bölümünün depreme karşı dayanıklı olarak inşa edilmemiş olduğu bilinmektedir. Zaman ve çevresel koşullara bağlı olarak veya yaşanan depremler sonucunda oluşan hasarlar mevcut yapıların deprem dayanımını daha da azaltabilmektedir. Olası depremler karşısında can ve mal kaybını en aza indirgeyebilmek için riskli yapıların güçlendirilmesinin gerektiği açıktır.

Mevcut yapıların güçlendirilmesinde farklı teknikler kullanılabilmektedir. Her yapı için uygun olan güçlendirme tekniği aynı olmayıp, taşıyıcı sistem özellikleri, yapının mevcut durumu, malzeme özellikleri, binanın kullanım amacı, mimari ve komşu binalarla ilgili kısıtlamaları, imar durumu gibi ön koşullar dikkate alınarak en uygun güçlendirme yöntemi seçilmelidir.

Son yıllarda, uygulama zorlukları, dikkat gerektirmesine rağmen özensiz tasarım ve imalat, özellikle üretim tesislerinde çalışmanın durmasına yol açan uygulama problemleri, imalatın kirli oluşu, mimari açıdan uygun olmayan değişiklikler gerektirmesi, tesisatın yeniden yapımını gerektirmesi, imar durumu ve komşu binalar ile ilgili problemlerden dolayı oluşan kısıtlamalar gibi nedenlerle alışlagelen güçlendirme yöntemlerinin yerine yeni yöntemler araştırılmaya başlanmıştır. Karbon, cam ve aramid gibi FRP (lif takviyeli polimer) kompozitlerin kullanıldığı yöntemler de bunlar arasındadır. FRP kompozitler ile enine doğrultuda yapılan güçlendirme, sargılama etkisini artırmakta dolayısıyla elemanın basınç dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini geliştirmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, karbon lif takviyeli polimer tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilen normal dayanımlı, kare, dikdörtgen, daire enkesitli betonarme ve bir adet beton elemanın, eksenel yükler altındaki davranışı üzerine yapılan deneysel çalışma sonuçları bulunmaktadır. Bu deneysel çalışmada polimer lif tabakası kalınlığı, kesit şekli, enine donatı oranı ve polimer lif sargının etkinliğini artırıcı detayların davranışa olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda incelenen güçlendirme yönteminin numunelerin dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerini önemli oranda artırdığı görülmüştür.

Bu deneysel çalışma sonucunda elde edilen f_{cc} ve ϵ_{cc} değerleri teorik model kullanılarak hesap edilen f_{cc} ve ϵ_{cc} değerleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar

sonucunda kullanılan teorik modelin kabul edilir düzeyde sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Karbon Lif Takviyeli Polimer Tabakalar, Sargılı Beton, Süneklik, Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri, Analitik Model.

AXIAL BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENED WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS

SUMMARY

It is known that most of the structures in Turkey have not been properly constructed against earthquakes. Related with time and enviromental effects or damages caused by the effects of past eathquakes may reduce resistince of existing structures against earthquakes. In a case of a probable earthquake to reduce effects it is obvious to retrofit existing risky structures.

Different techniques can be used for retrofitting of existing strucutres. A proper retrofitting technique may not valid for every structure so a proper technique could be determined according to preconditions like properties of frame structure, existing condition of structure, objective of strucutre, development plan, restrictions about architecture and neighbouring structures.

Difficulties in application, carelessly done design and manufacturing, especially application problems prevent production in facilities, dirty application, not proper requirements against architecture, requirement of new installations, restrictions caused by development plan and problems with neighbouring buildings caused investigation of new retrofitting techniques against ordinary techniques. This technique is one of them that carbon, glass and aramid like FRP composites were used. Retrofitting with FRP composites in transverse direction improves confinement effect so improves axial load capacity and ductility of the member.

This thesis gives the results of the experiments carried on circular, square and rectangular normal strength concrete members strengthened by carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite sheets in transverse direction externally and tested under axial loads. The aim was to investigate the effects of the concrete quality, cross sectional shape, thickness of the CFRP jacket, corner radius, cyclic loading and initial damage on the axial stress-axial strain behaviour of CFRP jacketed concrete member. Test results showed that significant improvement on the strength, deformability and energy absorption characteristics can be obtained by strengthening concrete members using CFRP composites externally in transverse direction.

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets, Confined Concrete, Ductility, Stres-Strain, Analytic Model.

1. GİRİŞ

Her yıl dünyanın birçok ülkesinde insanlar depremlerin yıkıcı etkisi yüzünden hayatını kaybediyor, sakat kalıyor, ekonomik zararlara uğruyor. Depremler tüm dünyanın ve Türkiye'nin önemli bir gerçeğidir. Ülkemizin büyük bir kısmı, özellikle de nüfus yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler 1. ve 2. derece deprem bölgeleri içindedir. Depremler yurdumuz için bu kadar önemli ve tehlikeli olmasına rağmen depreme dayanıklı tasarım ve yapım konusunda yeterli hassasiyet gösterilememiştir. Son yıllarda ülkemizde yaşanan depremler (1992 Erzincan (M=6.8), 1995 Dinar (M=5.9), 1998 Adana-Ceyhan (M=6.3), 1999 Kocaeli (M=7.4) ve 1999 Düzce (M=7.1)) ülkemizdeki yapıların önemli bir bölümünün depreme dayanıklı olarak inşa edilmemiş olduğunu ve bu yapılaşma anlayışının ne derece kötü sonuçlara neden olabileceğini bir kez daha göstermiştir. Zaman ve çevresel veya yaşanan depremler sonucunda oluşan hasarlara bağlı olarak mevcut yapıların depreme karşı dayanımı daha da azalabilmektedir. Deprem yapının ömrü boyunca karşılaşılabileceği en ağır etki olabilir, ancak deprem etkisiyle karşılaşılma olasılığı çok fazla olmayabilir. Bu nedenle özel yapılar dışında (hastane, okul, vs) toptan göçmeye neden olmayacak şekilde hasar oluşmasına izin veren, optimum bir çözüm bulunmalıdır. Yapının elastik sınırların ötesinde plastik şekildeğiştirme yapabilmesi betonarme elemanların belli bir dayanıma sahip olmasının yanında süneklik kapasitesinin de yüksek olmasına bağlıdır. Genelde ülkemizdeki mevcut yapılar düşük beton kalitesi, düzensiz taşıyıcı sistem, yetersiz yanal rijitlik, yetersiz ve yanlış üretilen enine donatı, boyuna donatılarda yetersiz bindirme boyu gibi sebeplerden dolayı deprem kuvvetleri altında ağır hasar almakta yada toptan göçmektedir. Bu sebeple olası depremler karşısında can ve mal kaybını en aza indirebilmek için riskli yapıların uygun yöntemlerle güçlendirilmesi gerekmektedir.

Mevcut yapıların güçlendirilmesinde farklı teknikler kullanılabilir. Her yapı için uygun olan güçlendirme tekniği aynı olmayıp, taşıyıcı sistem özellikleri, yapının mevcut durumu, malzeme özellikleri, binanın kullanım amacı, mimari ve komşu

binalarla ilgili kısıtlamalar, imar durumu gibi ön koşullar dikkate alınarak en uygun güçlendirme yöntemi seçilmelidir.

Son yıllarda, uygulama zorlukları, dikkat gerektirmesine rağmen özensiz tasarım ve imalat, özellikle üretim tesislerinde çalışmanın durmasına yol açan uygulama problemleri, imalatın kirli oluşu, mimari açıdan uygun olmayan değişiklikler gerektirmesi, tesisatın yeniden yapımını gerektirmesi, imar durumu ve komşu binalar ile ilgili problemlerden dolayı oluşan kısıtlamalar gibi nedenlerle alışlagelen güçlendirme yöntemlerinin yerine yeni yöntemler araştırılmaya başlanmıştır. Karbon, cam ve aramid gibi FRP (lif takviyeli polimer) kompozitlerin kullanıldığı yöntemler de bunların arasındadır. FRP kompozitler ile enine doğrultuda yapılan güçlendirme sargılama etkisini artırmakta, dolayısıyla elemanın basınç dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini geliştirmektedir.

Bu yöntem, gevrek kesme göçmesinin ve boyuna donatı burkulmasının önlenmesinde ve bindirme boyu eksikliğinin giderilmesinde etkili olabilmektedir. Bu şekilde, donatı burkulması, aderans kaybı ve kesme göçmesi gibi erken dayanım kayıpları engellenebilmekte, sargılama sayesinde oluşturulan üç eksenli basınç durumu ile elemanın sünekliği ve dayanımı artmaktadır.

Bu yöntem diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha kolay ve kısa sürede uygulanabilir olması, malzemenin hafif ve yüksek dayanımlı olması, korozyona karşı dayanıklılığı ve bazı durumlarda da rijitlik artışına sebep olmaması diğer yöntemlere karşı olan avantajlarıdır.

Bu araştırma kapsamında CFRP kompozitler ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş 27 adet betonarme ve 1 adet beton numunenin monoton artan veya tekrarlı eksenel yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada Türkiye'deki mevcut yapı stoğunun durumu gözönüne alınarak tüm betonarme elemanlarda St 220 düz donatı çeliği kullanılmıştır. Tüm elemanlarda ortalama 28 günlük standart silindir basınç dayanımı 24 MPa olan hazır beton kullanılmıştır. Betonarme tüm numunelerin boyuna donatı oranı yaklaşık 0.01'dir.

Bu çalışmada 9 adet kare, 9 adet dikdörtgen ve 9 adet daire enkesitli betonarme, 1 adet kare enkesitli beton eleman olmak üzere toplam 28 adet numune üretilmiştir ve 3 ve 5 kat CFRP kompozitlerle güçlendirilerek denenmiştir. Karşılaştırma

yapabilmek amacı ile her farklı gruptan birer numune güçlendirilmeden doğrudan deneye tabi tutulmuştur.

Çalışmada değişken olarak;

- Polimer lif sargı kalınlığı
- Kesit şekli
- Etriye aralığı
- Polimer lif sargının etkinliğini artırıcı detaylar

göz önüne alınmıştır.

Daha önceden yapılmış [27] ve [28] çalışmalarında köşe yarıçapı, ön hasar gibi parametreler yeterince incelenmiş, bu konularla ilgili gerekli bilgiler elde edilmiştir, bu yüzden bu çalışmada bu değişkenlere yer verilmemiştir.

Bu çalışma sonucunda CFRP kompozitlerle sargılanmış betonarme numunelerin eksenel yük taşıma kapasiteleri ve sünekliklerinin belirgin oranlarda arttığı gözlenmiştir. Sargılama sonucunda boyuna donatıdaki burkulma önemli oranda geciktirilmiştir. Özdeş numunelerde etriye aralığı azaldıkça süneklik artmış olmakla birlikte dıştan yapılan sargılama sağlanan süneklikte çok daha büyük rol oynamıştır.

Bu çalışmaya başlarken numunelerin özellikleri gözönüne alınarak isimlendirme yapılmıştır. Numunelerin isimlendirilmesinde numunenin beton basınç dayanımı, enkesiti, kenar uzunlukları oranları, karbon lif sargı tabaka sayısı ve köşelerinde yapılan yuvarlatılma miktarı dikkate alınmıştır. İlk olarak beton basınç dayanımını ifade eden NS (normal strength) harfleri kullanılmıştır. Daha sonra enkesit şekline göre dairesel elemanlar için C (cylinder), dairesel olmayan numuneler için R (rectangular) harfi kullanılmıştır. Dairesel olmayan elemanların isimlendirilmesinde, bunu izleyen ilk sayı kenar uzunlukları oranını, ikinci sayı test bölgesindeki etriye aralığını “mm” biriminde göstermektedir. Üçüncü sayı uygulanan karbon lif sargı tabaka sayısını göstermektedir. Son sayı, numunelerin köşelerinde uygulanan yuvarlatılmayı temsilen, oluşturulan yeni formun (çeyrek dairenin) yarıçapını “mm” biriminde göstermektedir. Örneğin NS-R-1-050-3-40 isimli numune, normal beton basınç dayanımına sahip, test bölgesindeki etriye aralığı 50 mm, köşeleri 40 mm yarıçapında yuvarlatılmış, enine doğrultuda 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş ve uzun kenarının kısa kenarına oranı 1 olan kare numunedir. Dairesel

elemanlarda kenar oranlarını ve köşe yarıçapını temsil eden sayılar yoktur. NS-C-100-3, normal dayanımlı, test bölgesinde 100 mm etriye aralığına sahip, 3 kat karbon lif sargı tabakası ile güçlendirilmiş numuneyi temsil etmektedir. Bütün kesit tiplerine ait numunelerin isimleri ve özet bilgileri ilgili tablolarda sunulmuştur, Tablo 1.1, 1.2, 1.3. Aşağıdaki tablolarda f_{ck} değeri karakteristik silindir beton basınç dayanımını ifade etmektedir, b, h ve l sırasıyla numune genişliği, derinliği ve yüksekliğini ifade etmektedir.

Tablo 1.1 Kare Enkesitli Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özet Bilgileri

Numune İsmi	Beton f_{ck} (MPa) 28 gün	Numune b x h x l (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
NS-R-1-050-0-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/050	0
NS-R-1-100-0-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/100	0
NS-R-1-200-0-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/200	0
NS-R-1-050-3-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/050	3
NS-R-1-100-3-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/100	3
NS-R-1-200-3-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/200	3
NS-R-1-050-5-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/050	5
NS-R-1-100-5-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/100	5
NS-R-1-200-5-40	23.86	250x250x500	4Ø14	Ø8/200	5
NS-R-1-000-0-40	23.86	250x250x500	-	-	3

Tablo 1.2 Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özet Bilgileri

Numune İsmi	Beton f_{ck} (MPa) 28 gün	Numune b x h x l (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
NS-R-2-050-0-40	23.86	150x300x500	4Ø12	Ø8/050	0
NS-R-2-100-0-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/100	0
NS-R-2-175-0-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/175	0
NS-R-2-050-3-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/050	3
NS-R-2-100-3-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/100	3
NS-R-2-175-3-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/175	3
NS-R-2-050-5-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/050	5
NS-R-2-100-5-40	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/100	5
NS-R-2-175-5-40-A	23.86	50x300x500	4Ø12	Ø8/175	5

Tablo 1.3 Daire Enkesitli Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özet Bilgileri

Numune İsmi	Beton f_{ck} (MPa) 28 gün	Numune d x l (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
NS-C-050-0	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/050	0
NS-C-100-0	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/100	0
NS-C-145-0	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/145	0
NS-C-050-3	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/050	3
NS-C-100-3	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/100	3
NS-C-145-3	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/145	3
NS-C-050-5	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/050	5
NS-C-100-5	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/100	5
NS-C-145-5	23.86	250x500	6Ø10	Ø8/145	5

2. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Dünyanın bir çok ülkesinde her yıl yaşanan depremler sonucunda önemli miktarda insan hayatını kaybetmekte ve ülke ekonomilerine zarar verecek boyutta maddi kayıplar olmaktadır. Bu kayıpların en büyük nedeni yapıların ilgili yönetmeliklere uygun inşa edilmemesi ve bu sebeple yapıların deprem etkileri altında beklenen performansı gösterememesidir. Bu tür yapıların yıkılıp yeniden yapılması ekonomik sebeplerden ve çeşitli zorluklardan dolayı zor olduğu için bir çok güçlendirme yöntemi ortaya atılmış olup bu yöntemler üzerine bir çok araştırmacı çalışmaktadır. Bu çalışmada da betonarme elemanların karbon lif takviyeli polimer (CFRP) malzemelerle enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmesi üzerine çalışılmıştır. Polimer lifli kompozitlerin yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılması yeni bir konudur, ancak donatısız kesitlerin polimer lifli kompozitlerle güçlendirilmesi üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Donatısız kesitler üzerinde bir çok parametreye bağlı deneyler gerçekleştirilmiş olup genel olarak polimer lifli kompozitlerle enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilen elemanların davranışı modellenmiştir. Ancak polimer lifli kompozitlerle enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş betonarme kesitlerin eksenel yük altındaki davranışı ile ilgili çok fazla sayıda çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmaya başlamadan önce incelenen bazı çalışmaların özeti aşağıdadır.

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.

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.

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.

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 artırdığını 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.

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.

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.

İlki ve Kumbasar (2003), karbon lif takviyeli polimer (CFRP) malzeme ile güçlendirilmiş 8 adet kare, 8 adet dikdörtgen, 27 adet daire enkesitli numunenin, monotonik 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.

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.

Chaallal ve 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.

3. NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE HAZIRLANMASI, MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ

3.1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında normal dayanımlı betonarme elemanların polimer lifli kompozitlerle enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmesi konu olarak alınmıştır. Üretilen numuneler düşey yükler altında denenerek güçlendirme malzemesinin sargılama etkisi incelenmiştir. Numuneler 500 mm yüksekliğindeki kolon parçalarını temsil etmektedir. Çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği ve Yapı Malzemesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

3.2. NUMUNE ÖZELLİKLERİ

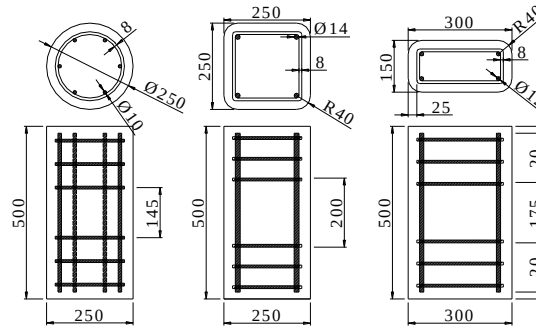
Bu çalışma kapsamında 9 adet kare, 9 adet dikdörtgen, 9 adet daire enkesitli normal dayanımlı betonarme, 1 adet kare enkesitli normal dayanımlı beton elaman olmak üzere toplam 28 tane numune üretilmiş ve eksenel basınç gerilmeleri altında deneye tabi tutulmuştur. Numunelerin 28 günlük ortalama basınç dayanımları 23.86 MPa, 90 günlük ortalama basınç dayanımları 32.0 MPa, 180 günlük ortalama basınç dayanımları 27.58 MPa'dır. Kare enkesitli numuneler $250 \times 250 \times 500$ mm boyutlarında, dikdörtgen enkesitli numuneler $150 \times 300 \times 500$ mm boyutlarında, daire enkesitli numuneler 250 mm çapında 500 mm yüksekliğindedir.

3.3. NUMUNELERİN ÜRETİLMESİ

3.3.1. Donatı İskeletinin Oluşturulması

Bu çalışmada numuneler tasarlanırken Türkiye'deki mevcut yapı stoğunu durumu gözönünde bulundurularak tasarım yapılmıştır, bu amaçla tüm numunelerde St 220 düz donatı kullanılmıştır. Kare enkesitli numunelerde 4 ϕ 14, dikdörtgen enkesitli numunelerde 4 ϕ 12, daire enkesitli numunelerde 6 ϕ 10 çapında boyuna donatı kullanılmıştır. Enine donatı aralıkları 3 farklı şekilde tasarlanmıştır. Numunelerin test bölgesi olarak üstten 125 mm altta ve alttan 125 mm yukarıda 250 mm'lik kısım alınmıştır. Numuneler tasarlanırken eksenel yük altında bu test bölgesinde hasar

oluşması planlanmıştır, bu yüzden orta 250 mm'lik kısımdaki etriye aralığı değişiminin aynı özellikteki numunelerde nasıl bir davranış göstereceğini tespit etmek için 3 farklı tip etriye aralığı seçilmiştir. Kare enkesitli numunelerde $\phi 8/200$, $\phi 8/100$, $\phi 8/50$ St 220 düz yüzeyli enine donatı kullanılmıştır. Dikdörtgen enkesitli numunelerde $\phi 8/175$, $\phi 8/100$, $\phi 8/50$ St 220 düz yüzeyli enine donatı kullanılmıştır. Daire enkesitli numunelerde $\phi 8/145$, $\phi 8/100$, $\phi 8/50$ St 220 düz yüzeyli enine donatı kullanılmıştır. Tüm numunelerde boyuna donatı oranı yaklaşık 0.01 olarak alınmıştır. Kare enkesitli numunelerde enine donatı oranları ise 200 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.005$, 100 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.01$ ve 50 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.02$, dikdörtgen enkesitli numunelerde enine donatı oranları 175 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.008$, 100 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.014$ ve 50 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.028$, daire enkesitli numunelerde enine donatı oranları 145 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.007$, 100 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.01$ ve 50 mm etriye aralığı olan numuneler için $\rho_{sh} = 0.02$ olarak tasarlanıp uygulanmıştır. Test bölgesi dışında kalan kısımlarda ise test bölgesinden önce göçme ve ezilmelerin olmaması için etriye sıklaştırması yapılmıştır.



Şekil 3.3.1.1 Numune Kesitleri ve Donatı Detayları

Numuneler tasarlanırken düşey yükler altında etriye kancalarında sıyrılma açılma gibi sebeplerden göçme olmaması istenmiştir, bu sebeple kare ve dikdörtgen numunelerde etriye kancaları 135° ve $10 \times \phi$ olarak üretilmiştir. Silindir numunelerin etriyeleri 7ϕ bindirme boyunda kaynaklanarak bağlanmıştır, Şekil 3.3.1.2.



Şekil 3.3.1.2 Silindir Numunelerin Etriyeleri

Silindir şeklindeki kolonlarda genelde spiral şeklinde enine donatı kullanılır. Ancak bu çalışmada test bölgesindeki etriye aralığı değişimi incelendiği için normal dairesel etriye şeklinde yapılmıştır.

Donatılar hazırlanırken öncelikle boyuna donatılar spiralle 46 cm boyunda çubuklar halinde kesilmişlerdir, Şekil 3.3.1.3.



Şekil 3.3.1.3 Boyuna Donatı Çubukları

Bunun sebebi numunenin üstünden ve altından 2 cm boşluk bırakarak eksenel yükleme sırasında boyuna donatıların direk yük almasını engellemektir. Etriyeler için gerekli uzunluktaki donatılar kesilip kare ve dikdörtgen en kesitli numuneler için

etriye kolu yardımıyla daire enkesitli numuneler için ise hazırladığımız tezgah yardımıyla etriyeler hazırlanmıştır.



Şekil 3.3.1.4 Silindir Numunelerin Etriye Üretimi

Bağ teli kullanılarak boyuna donatılara etriyeler bağlanarak donatı iskeletleri oluşturulmuştur, Şekil 3.3.1.5.



Şekil 3.3.1.5 Donatı İskeletlerinin Hazırlanması

3.3.2. Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması

Donatı iskeletinin hazırlanmasından sonra hem boyuna hem de enine donatılara şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler boyuna donatılarda burkulmanın beklendiği orta bölgeye gelecek şekilde etriye kancasının bağlanmadığı çapraz 2 boyuna donatıya yapıştırılmıştır. Boyuna donatılarda 3 mm ölçüm boyuna sahip FLA-3-11-1L tipli şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Enine donatılarda ise kare enkesitli numunelerde kancaya zıt komşu 2 kenarın her birinin ortasına gelecek şekilde 1'er tane olmak üzere toplam 2 tane, dikdörtgen enkesitli numunelerde ise etriye kancalarına zıt komşu kısa ve uzun kenarın birbirine yakın köşelerine ve

kolların orta kısımlarına 1'er tane olmak üzere toplam 4 tane YFLA-5-IL tipi şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır. Silindir numunelerde ise etriye kancalarının bindirmelerine uzak olacak şekilde birbirlerine 180° açılı 2 adet YFLA-5-IL tipi şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır.

Şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmadan önce donatılar üzerinde belirlenen noktalar kalın ve ince zımpara, tel fırça yardımı ile pastan arındırılmış sonra pamuk ve aseton yardımı ile tozlu yüzeyler temizlenmiştir. Tam olarak temizlenmiş bu yüzeylere şekildeğiştirmeölçerler cyanacrylat esaslı bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve ardından su ve nem yalıtımı ile mekanik koruma sağlamak için iki kat kimyasal yalıtım malzemesi (N-1, water proofing material), bir kat bitüm esaslı bant (VM Tape, a vinyl/mastic for insulating and moisture sealing) ve bunun üzerine izolebant sarılmıştır. Tüm şekildeğiştirmeölçerlerin kablolarının ucuna konumunu, cinsini belirtmek üzere numaralar ve notlar yazılmıştır. Kablolar en kısa mesafeden beton yüzeyine çıkacak şekilde demetlenmiştir. Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması ile ilgili bazı aşamalar, Şekil 3.3.2.1 ve Şekil 3.3.2.2'de verilmiştir.



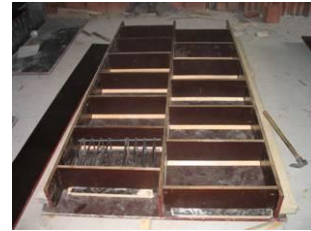
Şekil 3.3.2.1 Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması



Şekil 3.3.2.2 Şekildeğiştirmeölçerlerin Üzerine Koruyucu N1 Sürülmesi

3.3.3. Kalıpların Hazırlanması

Numuneler için 3 farklı set kalıp hazırlanmıştır, kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler için 20 mm kalınlığında plywood malzemesiyle oluşturulan özel kalıplar kullanılmıştır. Silindir numuneler içinde 2 mm kalınlığında saçtan silindir kalıplar tasarlanmıştır, numunelerin kalıptan kolay çıkarılabilmesi için silindir kalıplar kilitli olarak tasarlanmıştır. Güçlendirilecek numunelerin köşelerinin yuvarlatılmasını kolaylaştırmak amacıyla kalıpların dört köşesine dik kenarları 25 mm olan ikizkenar üçgen şeklinde çıtalar çakılmıştır. Donatı iskeletleri yerleştirilmeden önce kalıplar özel kalıp yağı ile yağlanmış ve donatı iskeletlerindeki enine donatılara istenilen 25 mm kalınlığındaki beton örtüsünün oluşturulabilmesi amacı ile hazır plastik paspayları takılmıştır. Kalıp imalatı ve donatı iskeletlerinin kalıplara yerleştirilmesi ile ilgili aşamalar, Şekil 3.3.3.1 ve Şekil 3.3.3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3.3.1 Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Kalıp İmalatı



Şekil 3.3.3.2 Kare ve Silindir Enkesitli Numunelerin Donatı İskeletlerinin Yerleştirilmesi

3.3.4. Beton Dökümü

Çalışmada Set Beton tarafından imal edilen hazır beton kullanılmıştır. Tüm numunelerin beton dökümü aynı gün içinde (06.10.2003) yaklaşık 20 C° hava sıcaklığında yapılmıştır. Beton elarabaları ve kürekler yardımıyla kalıplara dökülmüştür, döküm sırasında betonun iyi yerleşmesi için vibrasyon uygulanmıştır. Beton dökümü sırasında donatı iskeletlerinin kalıp içinde hareket etmemesine ve şekildeğiştirmeölçerlerin zarar görmemesine dikkat edilmiştir. Numunelerin betonu dökülürken malzeme deneyleri için de 16 adet standart silindir numune alınmış ve aynı şartlarda saklanmıştır. Beton döküm aşamaları, Şekil 3.3.4.1, 3.3.4.2, 3.3.4.3 ve 3.3.4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3.4.1 Kare Enkesitli Numunelerin Beton Dökümü ve Vibrasyon Uygulanması



Şekil 3.3.4.2 Silindir ve Kare Enkesitli Numunelerin Beton Döküm Aşamaları



Şekil 3.3.4.3 Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numuneler



Şekil 3.3.4.4 Silindir Enkesitli Numuneler ve Standart Silindir Numuneler.

3.3.5. Kür Uygulanması

Beton dökümünü izleyen 7 gün boyunca numuneler sabah ve akşam olmak üzere günde iki kez sulanarak kür uygulanmıştır. Sulama işleminden sonra numunelerin üstü ıslak amerikan beziyle kapatılarak numunelerin sürekli nemli kalması sağlanmış ve rötre çatlaklarının oluşması engellenmiştir. Kür işlemi standart silindirlere de aynı şartlarda aynı şekilde uygulanmıştır. Kür işlemiyle ilgili görüntüler, Şekil 3.3.5.1’de verilmektedir.



Şekil 3.3.5.1 Kare Enkesitli Numuneler ve Standart Silindir Numunelerin Kür İşlemi

3.4. Malzeme Özellikleri ve Malzeme Deneyleri

3.4.1. Beton

Tüm numunelerin beton dökümü 6 Ekim 2003 tarihinde yaklaşık 20 derece sıcaklıkta yapılmıştır. Beton 28 günlük basınç dayanımı olarak 20 MPa hedeflenmiş olup, 180 mm çökme elde edilecek kıvamda hazır beton kullanılmıştır. Beton karışım oranı Tablo.3.4.1.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.4.1.1 Tüm Numuneler İçin Kullanılan Beton Karışım Oranları

Çimento (c)	(kg/m ³)	285
Su (w)	(kg/m ³)	210
Kum	(kg/m ³)	413
Taş Kumu	(kg/m ³)	496
Mıcır I No	(kg/m ³)	925
Akışkanlaştırıcı	(kg/m ³)	1.43
w/c	-	0.74

Karışımın su-çimento oranı 0.74 olup beton birim hacim ağırlığı 2294 kg/m³’dür. Çimento olarak PÇ 42.5 cinsi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan 1 nolu kırmataşın agrega çapları 5-15 mm arasında değişmektedir. Kimyasal katkı malzemesi olarak YKS MR25S akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkının su oranını % 10-17 azalttığı, işlenebilirliği yükselttiği, nihai mukavemeti artırdığı üretici tarafından belirtilmektedir. Katkı çimento ağırlığının 0.005’i kadar kullanılmıştır.

Taze betonda çökme ve yayılma çapını belirlemek amacı ile 3 ayrı çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyi için 300 mm yüksekliğinde, alt ve üst çapları sırasıyla 200 mm ve 100 mm olan tabanı kesik koni kullanılmıştır. Koninin doldurulması 3 defada yapılmış ve her doldurma işleminin ardından uzun demir bir çubukla beton 25 defa şişlenerek iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Koninin tamamı doldurulduktan sonra 3 dakika beklenerek koni yavaşça çekilmiştir. Koni çekildikten sonra, yayılma çapı ve çökme ölçülmüştür, Şekil 3.4.1.1. Taze betonda yapılan çökme deneyi sonuçları Tablo 3.4.1.2’de verilmiştir.



Şekil 3.4.1.1 Taze Betonda Çökme ve Yayılma Çapı Ölçülmesi

Tablo 3.4.1.2 Beton Karışım Oranları

Deney	Çökme (mm)	Yayılma Çapları (mm×mm)
1	195	310×310
2	210	300×290
3	200	330×320

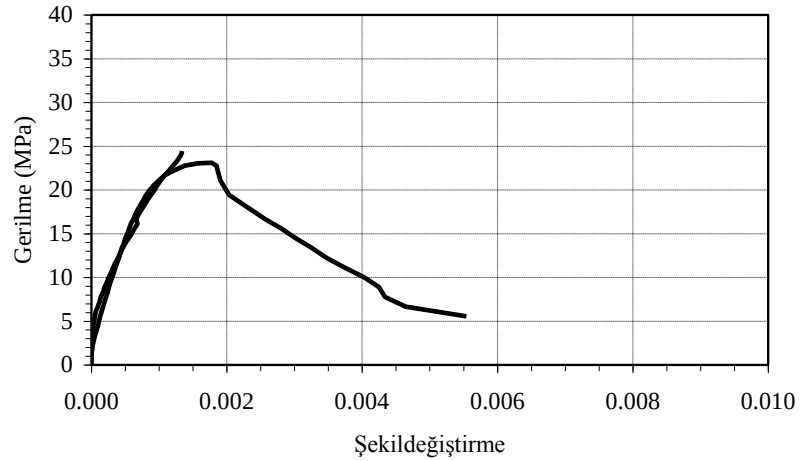
Üretilen numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenebilmesi ve betonun farklı yaşlardaki basınç dayanımının belirlenmesi amacı ile 16 adet 150 mm × 300 mm boyutlarında standart silindir numunesi alınmıştır. Standart silindir numunelerinin hazırlamasında ve betonun yerleştirilmesinde çökme deneyinde dikkat edilen unsurlar gözönüne alınmıştır. Standart silindirler dış ortamdan uzaklaştırılmış deney gününe kadar laboratuarda numuneler ile aynı koşullarda saklanmıştır. Kür amacı ile standart silindirler ve kolon numuneler 7 gün boyunca nemli tutulmuştur. Standart silindir numuneler 500 ton kapasiteli Amsler yükleme cihazı kullanılarak eksenel basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekildeğiştirmelerin belirlenmesi amacı ile TML CM-15 ölçüm çerçevesi (kompresometre) ve 2 adet yerdeğiştirmeölçer (CDP25) kullanılmıştır. Bu kompresometre üzerinde bulunan hassas yerdeğiştirmeölçerler (TML CDP5) ile standart silindir numunenin ortasında 150 mm yüksekliğindeki bölgede oluşan ortalama şekildeğiştirmeler belirlenebilmektedir. Silindir numunenin iki yanına yerleştirilen CDP25 tipi yerdeğiştirmeölçerler silindir numunenin etrafına, aralarında 180° açı ve numune yüzeyinden 100 mm uzaklıkta ölçüm alınacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Bu şekildeğiştirmeölçerler ile toplam

boyda oluşan yerdeğiştirmeler ölçölüp, bu ölçömlerden yararlanılarak tüm boydaki ortalama şekildeğiştirmeler belirlenmektedir.

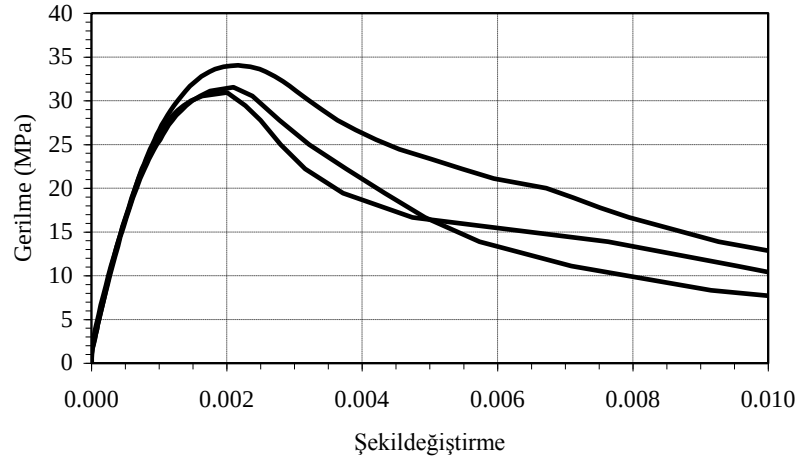


şekil 3.4.1.2 Standart Silindir Basıncı Deneyi İçin Hazırlanan Dözenek

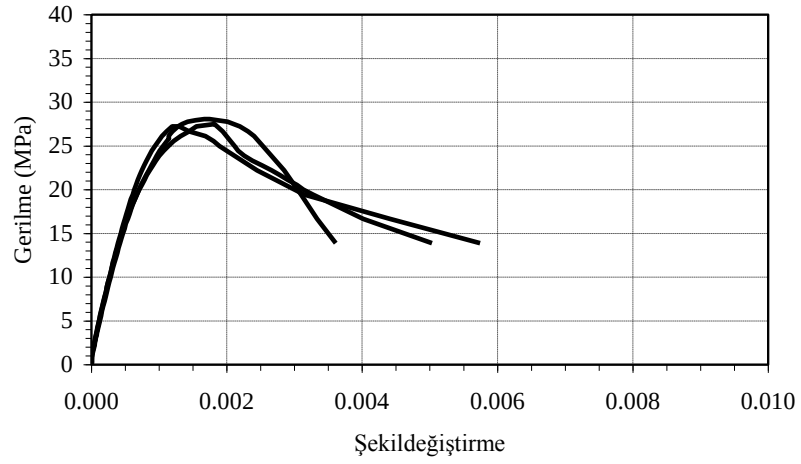
Yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme verileri TML TDS-303 veri toplayıcı kullanılarak saklanmış, daha sonra elle kaydedilen yük değerleri ile birlikte bilgisayarda işlenerek beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. 28, 90 ve 180 günlük standart silindirlerden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri sırasıyla, şekil 3.4.1.3, şekil 3.4.1.4 ve şekil 3.4.1.5’de verilmiştir



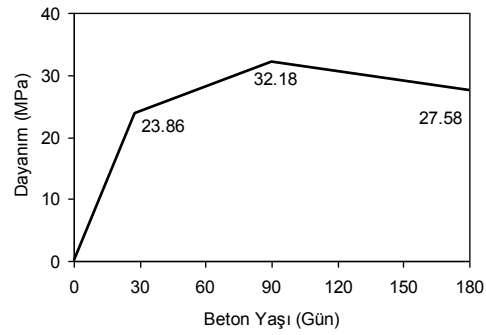
şekil 3.4.1.3 28 Günlük Beton Silindir Numunelerin Gerilme-şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 3.4.1.4 90 Günlük Beton Silindir Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 3.4.1.5 180 Günlük Beton Silindir Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 3.4.1.6 Dayanım Beton Yaşı İlişkisi

Numuneler için elastisite modülü belirlenirken, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde yaklaşık olarak dayanımın %5 ve %45'i arasında elde edilen deneysel noktalar arasından en küçük kareler yöntemi kullanılarak bir doğru geçirilmiş, belirlenen doğrunun eğimi elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Farklı yaşlarda elde edilen beton basınç dayanımları, ortalama beton basınç dayanımları, elastisite modülü ve ortalama elastisite modülü değerleri Tablo 3.4.1.3'de sunulmuştur.

Tablo 3.4.1.3 Standart Silindir Basınç Deneyleri Sonuçları

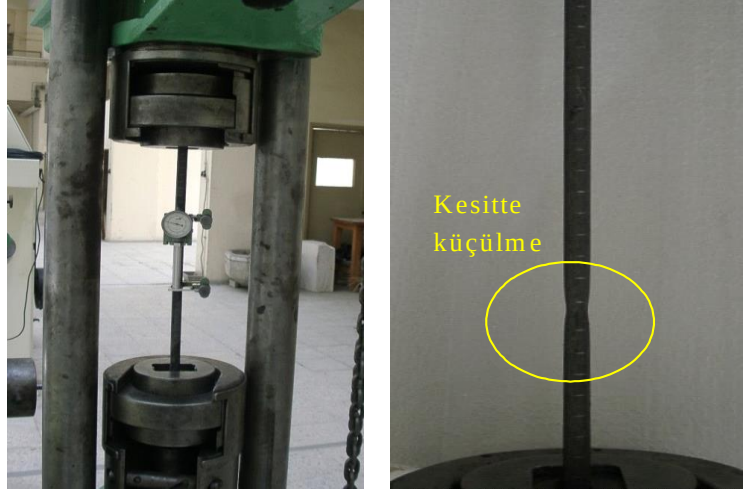
Numune	Basınç Dayanımı (f_c) (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (f_{cort}) (MPa)	$(f_c - f_{cort}) / f_{cort}$	Elastisite Modülü, E (MPa)	Ortalama Elastisite M. (MPa)
SS1 ²⁸	24.66	23.86	0.033	27795	27716
SS2 ²⁸	23.10	23.86	0.032	27637	27716
SS4 ⁹⁰	34.05	32.18	0.058	30146	31002
SS5 ⁹⁰	30.94	32.18	0.038	31767	31002
SS6 ⁹⁰	31.55	32.18	0.019	31094	31002
SS7 ¹⁸⁰	27.49	27.58	0.000	33004	32940
SS8 ¹⁸⁰	28.05	27.58	0.017	31886	32940
SS9 ¹⁸⁰	27.21	27.58	0.013	33931	32940

Not: ^{28, 90, 180} : Üst indisler gün olarak beton yaşını göstermektedir.

f_{cort} : Aynı gün denenen numunelerin basınç dayanımları ortalamasıdır

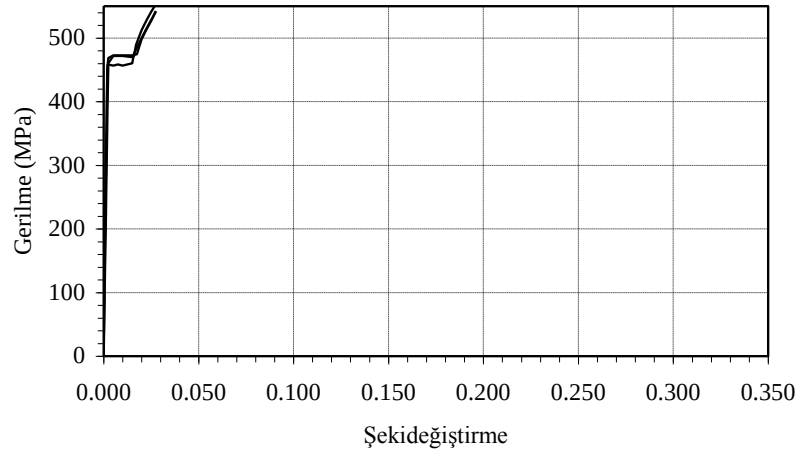
3.4.2. Donatı Çeliği

Çalışmanın amacına uygun olması bakımından tüm numunelerde hem boyuna, hem de enine donatı için St 220 kalitesinde düz yüzeyli donatı çeliği kullanılmıştır. Tasarım ve numune üretimi öncesinde kullanılacak çeliğin beklenen dayanıma sahip olup olmadığını anlamak üzere standartlara uygun olarak (TS 708 (1985), Beton Çelik Çubukları) çelik çekme deneyi yapılmıştır, Şekil 3.4.2.1.

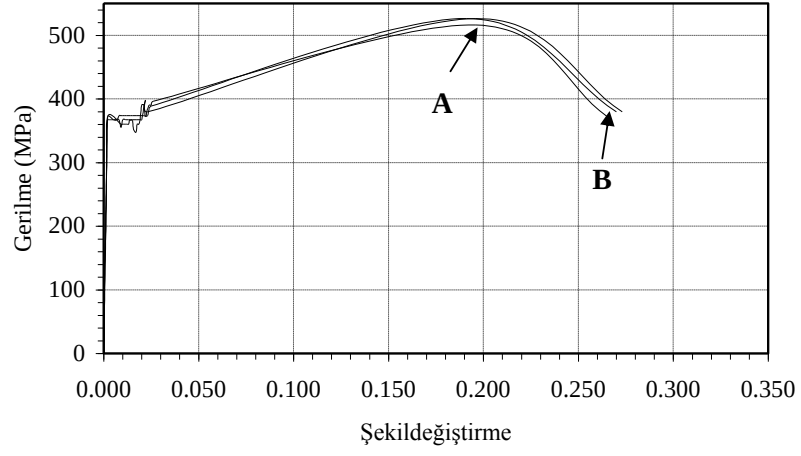


Şekil 3.4.2.1. Çelik Çekme Deneyi

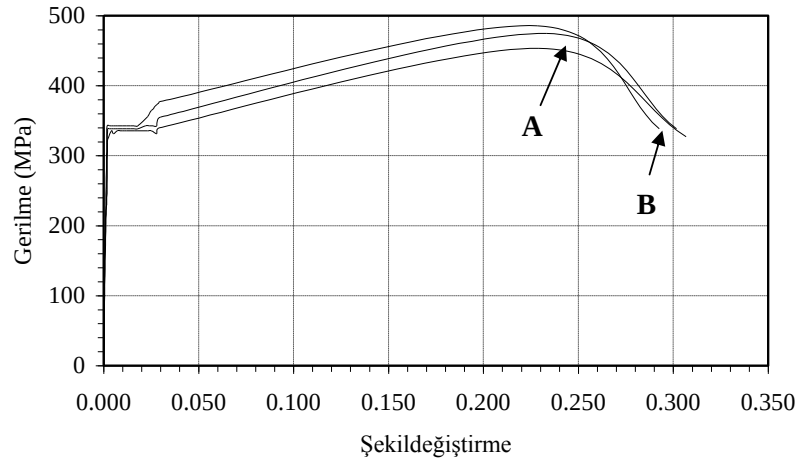
Çekme deneylerinde 200 kN kapasiteli Alfred J.Amsler marka mekanik çekme cihazı kullanılmıştır. 14 mm, 12 mm, 10 mm ve 8 mm çaplı donatılar için 12 adet çekme deneyi yapılmıştır. Her donatının gerçek çapı kumpas ile en az üç kere ölçülerek bulunmuştur. Çekme deneyi sırasında donatılarda oluşan uzamaları kaydedebilmek için ekstansometre kullanılmıştır. Ekstansometrenin ölçüm boyu 100 mm, hassasiyeti 1/100 mm'dir. Ekstansometrede okunan belli yerdeğiştirme seviyelerinde etkitilen çekme kuvveti deney boyunca elle kaydedilmiştir. Donatı çeliğinin akma limiti, elastik limitten hemen sonra yük sabit iken şekildeğiştirmelerin hızla artmaya başlaması ile belirlenir. Bu andaki gerilme değeri akma dayanımı (f_y) ve buna karşı gelen şekildeğiştirme akma şekildeğiştirmesi (ϵ_y) olarak tanımlanır. Akma sahanlığını pekleşme bölgesi izler ve gerilme tekrar artmaya başlar. Bu bölgede A noktasına kadar çubuğun her noktasında oluşan uzamalar uniformdur ve bu anda en büyük çekme kuvvetine erişilir. Belirli bir gerilme anına gelindiğinde çubuğun bir noktasında kesit küçülmeye başlar ve bu noktada oluşan aşırı uzamaların ardından kopma (B noktası) gerçekleşir. Boyuna ve enine donatılar için elde edilen tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, Şekil 3.4.2.2, Şekil 3.4.2.3, Şekil 3.4.2.4 ve Şekil 3.4.2.5'de verilmiştir.



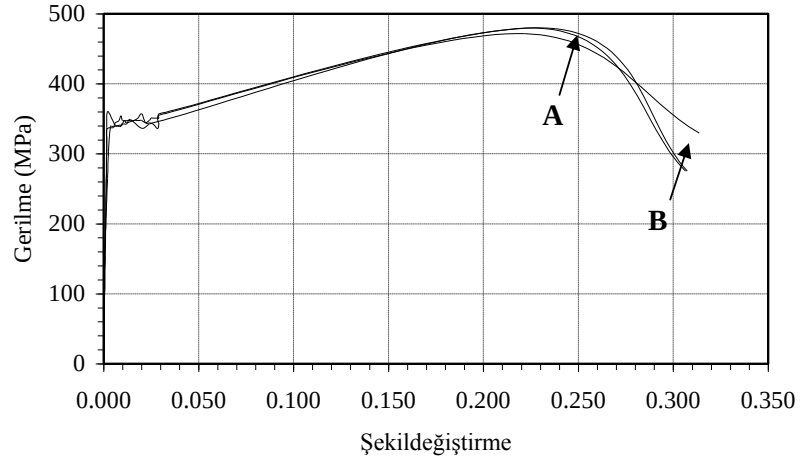
Şekil 3.4.2.2. Enine Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 8$)



Şekil 3.4.2.3. Boyuna Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 10$)

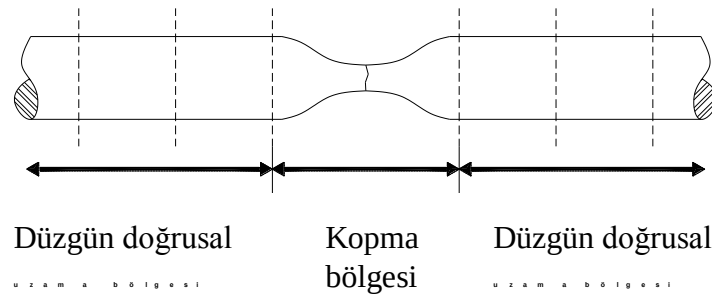


Şekil 3.4.2.4. Boyuna Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri ($\phi 12$)



Şekil 3.4.2.5. Boyuna Donatı Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri (φ14)

Kopma birim uzaması (ϵ_{su}) ve düzgün doğrusal uzamanın (ϵ_{sunif}) 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 3.4.2.6’da çekme kuvveti uygulanan çubukta kopma ve düzgün doğrusal uzama bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4.2.6. Çekme Çubuğunda Kopma ve Düzgün Doğrusal Uzama Bölgeleri

Donatıların elastisite modülleri belirlenirken, gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin %5 ve %80’i arasında kalan noktalarından en küçük kareler yöntemine göre bir doğru geçirilmiş ve bu doğrunun eğimi elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Tablo 3.4.2.1’de boyuna ve enine donatı özellikleri verilmiştir. Tabloda sırası ile ϵ_y :

Donatıda akma birim uzaması ve kısılması, ϵ_{su} : Kopma birim uzaması, ϵ_{smax} : En büyük uzama ve kısılma, f_y : Donatı akma dayanımı, f_{su} : Donatının kopma dayanımı, f_{smax} : Donatının en büyük çekme dayanımıdır

Tablo 3.4.2.1. Boyuna ve Enine Donatı Özellikleri

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

3.4.3 Güçlendirme Malzemeleri

Polimer lif bazlı (FRP) güçlendirme malzemeleri çok eski olmamalarına rağmen dünyada ve Türkiye’de malzemelerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu malzemeler kopmaya kadar doğrusal elastik davranış gösterirler, yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahiptirler, ayrıca düşük birim ağırlıkları ve çevre etkilerine karşı dayanıklılıkları da bazı özellikleri arasındadır. Özellikle düşük birim ağırlığına sahip olmaları diğer güçlendirme malzeme ve teknikleri karşısında önemli bir avantajdır. Uygulandığı elemanın boyutunu ve ağırlığını artırmazlar, bu özellik hem uygulama hem de taşıyıcı sistem davranışı açısından çok büyük bir avantajdır. Bu malzemeler tek parça halinde istenilen uzunlukta kesilip her türlü kesitte kolay ve hızlı bir şekilde uygulanabilir. Bu çalışmada 50 cm eninde tek yönlü CFRP malzemesi kullanılmıştır, Şekil 3.4.3.1.



Şekil 3.4.3.1. CFRP Tabakası

FRP malzemelerin dezavantajı yüksek maliyetleridir, ancak ekonomik karşılaştırma yapılırken tüm uygulama ve yukarıda bahsedilen özellikleri göz önüne alınırsa çok

pahalı bir malzeme olmadığı anlaşılr. FRP malzemelerle ilgili en önemli dezavantaj halen ülkemizde bu malzemelerin uygulanmasına yönelik bir yönetmeliğin hazırlanmamış olmasıdır.

Tablo 3.4.3.1’de yaygın olarak kullanılan farklı tür FRP malzemelerin ve yapısal çeliğin birim ağırlıkları, Tablo 3.4.3.2’de ise FRP malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 3.4.3.1 FRP Malzemelerin ve Çeliğin Birim Ağırlıkları (t/m³)

Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
7.9	1.2~2.1	1.5~1.8	1.2~1.5

Tablo 3.4.3.2 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

Bu çalışmada kullanılan MBrace C1-30 türü CFRP malzemenin, üretici tarafından verilen, geometrik ve mekanik özellikleri sırası ile, Tablo 3.4.3.3 ve 3.4.3.4’de sunulmuştur.

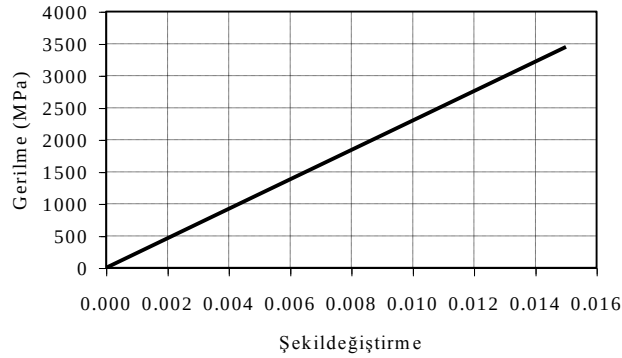
Tablo 3.4.3.3 C1-30 Türü Karbon Lif Takviyeli Polimer Tabakaların Geometrik Özellikleri

Lif türü	Yüksek dayanımlı karbon
Tabaka örgü şekli	Tek yönlü
Alan yoğunluğu (kg/m ²)	0.3
Birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	1820
Etkili tabaka kalınlığı (mm)	0.165
Birim genişlik için etkili enkesit alanı (mm ² /cm)	1.65

Tablo 3.4.3.4 C1-30 Türü CFRP Malzemenin Mekanik Özellikleri

Karakteristik çekme elastisite modülü (MPa)	230000
Maksimum uzama (%)	1.5
Karakteristik kopma dayanımı (MPa)	3430
20 cm bindirme ile eklenme durumunda kopma dayanımı (MPa)	3430

FRP malzemeler, kopma dayanımına ulaşana dek, doğrusal bir gerilme şekildeğiştirme ilişkisi gösterir, Şekil 3.4.3.2.



Şekil 3.4.3.2 Çalışmada Kullanılan C1-30 Türü CFRP İçin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi

Güçlendirme aşamasında ise, uygulanacak FRP malzemenin betona aderansını tam olarak sağlamak için ilk olarak Yapkim Degussa Primer astar kullanılmıştır. Yapkim Degussa Primer, iki bileşenli düşük viskoziteli, katı madde oranı %100 olan epoksi poliamin bir üründür. Karışım oranı ağırlıkça; %77 A ve %23 B olarak belirlenmiştir. İlk olarak komponent A mekanik olarak karıştırılmış, ardından komponent B homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Özgül ağırlığı 1.08 ± 0.024 kg/lt, uygulama kalınlığı 90 μm 'dir. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler, Tablo 3.4.3.5'de verilmiştir

Tablo 3.4.3.5. Yapkim Degussa Primerin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)	
• Çekme (kesme), ASTM D638	>700
• Eğilme, ASTM D790	>580
Çekme Dayanımı (MPa)	
• Direk, ASTM D638	>12
• Eğilme, ASTM D790	>24

Yapkim Degussa Primer astar uygulamasının ardından Yapkim Degussa Rasatura Putty macun kullanılmıştır. Yapkim Degussa Rasatura Putty, güçlendirilecek elemanların yüzeylerinin düzeltilmesi amacı ile kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 1.26 ± 0.024 kg/lt'dir. Karışım oranı ağırlıkça; %78 A ve %22 B olarak belirlenmiştir. İlk olarak komponent A mekanik olarak karıştırılmış, ardından komponent B homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 3 dakika karıştırılmıştır. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler, Tablo 3.4.3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.4.3.6. Yapkim Degussa Rasatura Putty'nin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)	
• Çekme (kesme), ASTM D638	>1800
• Eğilme, ASTM D790	>900
Çekme Dayanımı (MPa)	
• Direk, ASTM D638	>12
• Eğilme, ASTM D790	>26
Maksimum Uzama, ASTM D638	%1.6

FRP tabakaların betona ve birbirlerine yapışmasını sağlamak için Yapkim Degussa Saturant kullanılmıştır. Yapkim Degussa Saturant, katı madde oranı yüksek, iki bileşenli, özgül ağırlığı 1.02 ± 0.024 kg/lt olan özel bir yapıştırıcıdır. Karışım oranı ağırlıkça; %76 A ve %24 B olarak belirlenmiştir. İlk olarak komponent A mekanik olarak karıştırılmış, ardından komponent B homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler, Tablo 3.4.3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.4.3.7. Yapkim Degussa Saturantın Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)	
• Çekme (kesme), ASTM D638 • Eğilme, ASTM D790	>1800 >900
Çekme Dayanımı (MPa)	
• Direk, ASTM D638 • Eğilme, ASTM D790	>12 >26
Maksimum Uzama, ASTM D638	%1.6
Basınç Dayanımı (MPa), ASTM D695	>80

4. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ

4.1. GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerin bir kısmı karbon lifli kompozitler ile güçlendirilip, bir kısmı da güçlendirme yapılmadan orijinal olarak denenmiştir.

Bütün enkesit tiplerinde aynı özelliğe sahip numunelerden 3'er tane üretilmiştir, bu numuneler 0, 3 ve 5 kat enine doğrultuda karbon lifli kompozitlerle sargılanarak güçlendirilmişlerdir. Bunun amacı aynı özellikteki sargısız, 3 ve 5 kat sargılı numunelerin davranışlarını karşılaştırabilmektir.

Tablo 4.1.1 Kare En kesitli Numunelerin İsimleri ve Genel Özellikleri

Numune İsmi	Kesit Tipi	Kesit Özellikleri (mm×mm×mm)	Boyuna donatı	Enine donatı	Sargı sayısı
NS-R-1-050-0-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/50	0
NS-R-1-100-0-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/100	0
NS-R-1-200-0-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/200	0
NS-R-1-050-3-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/50	3
NS-R-1-100-3-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/100	3
NS-R-1-200-3-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/200	3
NS-R-1-000-3-40	Kare	250×250×500	-	-	3
NS-R-1-050-5-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/50	5
NS-R-1-100-5-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/100	5
NS-R-1-200-5-40	Kare	250×250×500	4φ14	φ8/200	5

Tablo 4.1.2 Dikdörtgen En kesitli Numunelerin İsimleri ve Genel Özellikleri

Numune İsmi	Kesit Tipi	Kesit Özellikleri (mm×mm×mm)	Boyuna donatı	Enine donatı	Sargı sayısı
NS-R-2-050-0-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/050	0
NS-R-2-100-0-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/100	0
NS-R-2-175-0-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/175	0
NS-R-2-050-3-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/050	3
NS-R-2-100-3-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/100	3
NS-R-2-175-3-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/175	3
NS-R-2-050-5-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/050	5
NS-R-2-100-5-40	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/100	5
NS-R-2-175-5-40-A	Dikdörtgen	150×300×500	4φ12	φ8/175	5

Tablo 4.1.3 Daire En kesitli Numunelerin İsimleri ve Genel Özellikleri

Numune İsmi	Kesit Tipi	Kesit Özellikleri (mm×mm)	Boyuna donatı	Enine donatı	Sargı sayısı
NS-C-050-0	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/050	0
NS-C-100-0	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/100	0
NS-C-145-0	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/145	0
NS-C-050-3	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/050	3
NS-C-100-3	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/100	3
NS-C-145-3	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/145	3
NS-C-050-5	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/050	5
NS-C-100-5	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/100	5
NS-C-145-5	Daire	φ 250×500	6φ10	φ8/145	5

Enine doğrultuda sargılanarak güçlendirmeye ek olarak dikdörtgen enkesitli 175 mm etriye aralığına sahip 5 kat sargılı bir adet numuneye de CFRP kompozit malzemeden oluşturulan ankrajlarla performansı iyileştirmeyi hedefleyen bir detay uygulanmıştır. Bu ankrajların amacı dikdörtgen enkesitli numunedeki sargının etkisini artırıp, CFRP tabakasının beton yüzeyinden ayrılmasını engellemektir.

4.2. KARBON LİFLİ KOMPOZİTLERİN SARILMASI

Güçlendirme işlemine başlamadan önce hazırlanan kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin köşeleri (R40) 40 mm yarıçapında çeyrek daire formunda yuvarlatılmıştır. Bu yuvarlatmanın amacı eksenel yük altında elemanların köşelerindeki gerilme yığılmalarını en aza indirerek göçmenin bu bölgede olmasını engellemektir. Bu yuvarlatma işlemi spiralle yapılmıştır, Şekil 4.2.1 ve 4.2.2.

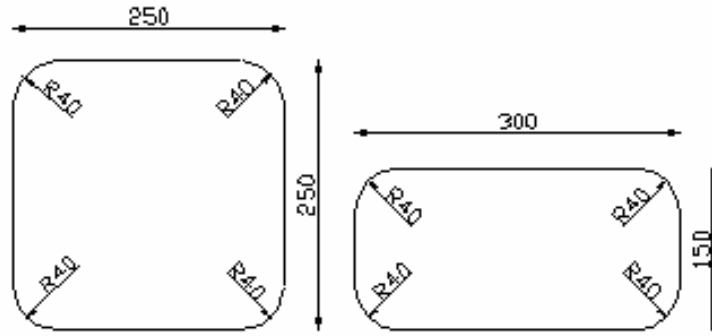


Şekil 4.2.1 Numunelerin Taşlanması



Şekil 4.2.2 Numunelerin Köşelerinin Yuvarlatılmış Hali

Güçlendirilecek ve orijinal olarak denenecek numunelerin enkesitlerinin aynı olması amacı ile orijinal olarak denenecek kare ve dikdörtgen numunelerin köşeleri de yarıçapı 40 mm olacak şekilde yuvarlatılmıştır.



Şekil 4.2.3 Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Köşelerinin Yuvarlatılmış Durumu

Güçlendirme adımları tüm numuneler için aynıdır, numuneler için sargılama işlemine geçilmeden önce yüzey hazırlıkları tamamlanmıştır. Yuvarlatma işleminden sonra güçlendirme malzemelerinin numune yüzeyine iyi yapışmasını sağlamak amacıyla numunelerin yüzü fırça vs. kullanılarak toz, kir, yağ ve benzeri maddelerden arındırılmıştır, Şekil 4.2.4. Numunelerin yüzeylerinin kuru olması da güçlendirme uygulaması sırasında dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husustur.



Şekil 4.2.4 Numune Yüzeyinin Temizlenmesi

Temizlenen numunelere çift bileşenli epoksi polyamin astar karışımı sürülmüştür, (Mbrace primer, bu karışım ağırlıkça 0.77:A ve 0.23:B olacak şekilde hazırlanmıştır). Bu karışım sarılacak lif sargı tabakaları ile beton yüzeyi arasındaki yapışmanın daha iyi olmasını sağlamak amacıyla sürülmüştür. Astar karışımı sürülen numunelerde bir sonraki aşamaya geçmeden önce yaklaşık 24 saat beklenmiştir. Bu süre sonunda çift bileşenli epoksi harcı (Mbrace Concrasive 1406, 0.75:A ve 0.25:B) ile yüzeyde veya numunenin kenarlarında oluşmuş kırıklıklar doldurulmuştur. Bu işlemi çift bileşenli epoksi esaslı macun karışımının sürülmesi izlemiştir, (Mbrace Rasatura Putty Base, 0.78:A ve 0.22:B). Bu karışım yüzeyde bulunan boşluklar, ezik ya da kopmuş parçaların doldurulması için kullanılmıştır. Bu karışımın sürülmesiyle yüzeydeki tüm pürüzler düzeltilmiş ve tamamen düz, esnek ve yapışmaya uygun düzgün bir yüzey oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra numuneler karbon lifli kompozitlerle (CFRP) sarılmaya uygun duruma gelmişlerdir. CFRP tabakanın numuneye ve CFRP tabaka sargılarının birbirlerine yapışmasını sağlamak için epoksi esaslı çift bileşenli yapıştırıcı kullanılmıştır (Saturant 0.76:A ve 0.24:B). İlk CFRP tabakası sarılmadan önce numuneye bir kat epoksi esaslı yapıştırıcı sürülmüştür, ardından daha öncede yeterli boyda tek parça halinde kesilip hazırlanmış CFRP tabakaları sarılmaya başlanmıştır. Sargı sırasında CFRP liflerinin enine doğrultuda sargılanmasına dikkat edilmiştir. Her sargı arasına epoksi esaslı yapıştırıcı yeniden sürülerek tabakaların birbirine yapışması sağlanmıştır. CFRP tabakaları sarılırken sarılan bölgenin üstünden bir rulo yardımıyla yapışacak kısmın içindeki hava dışarı

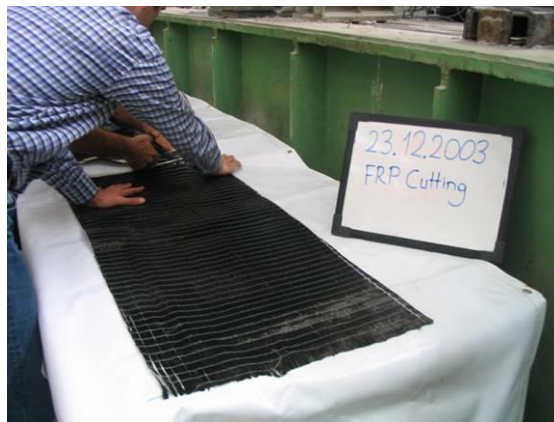
Çıkarılmış ve daha iyi yapışma sağlanmıştır. Belirlenen tabaka sayısı ve bindirme payı sarıldıktan sonra bir kat daha epoksi esaslı yapıştırıcı sürölerek güçlendirme işlemleri tamamlanmış ve deney öncesi yüzey hazırlığı ve CFRP tabaka sargılama işlemlerinde kullanılan epoksi bazlı malzemelerin dayanımlarını kazanmaları için gerekli kür süresi kadar zaman bırakılmıştır. CFRP tabakaların uygulama adımları, Şekil 4.2.5, 4.2.6, 4.2.7, 4.2.8 ve 4.2.9’da verilmektedir.



Şekil 4.2.5 Astar Uygulaması



Şekil 4.2.6 Epoksi Esaslı Macun Karışımının Sürülmesi



Şekil 4.2.7 CFRP Tabakaların Kesilmesi



Şekil 4.2.8 Karbon Lif Tabakalar Sarılmadan Önce Epoksi Esaslı Yapıştırıcı Sürülmesi

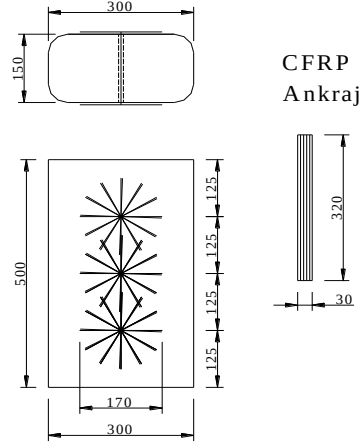


Şekil 4.2.9 CFRP Tabakaların Sarılması

4.3. EK ÖNLEM UYGULAMASI

Ek önlem için numunede öncelikle ankrajların yapılacağı yerler belirlenmiştir. Bu belirlenen yerlere delikler açılmış olup, delikler numunenin uzun kenarlarının tam ortasına gelecek şekilde numune üstünden 125 mm aşağıda, numunenin tam ortasında yani üstten 250 mm aşağıda ve numune tabanından 125 mm yükseklikte olmak üzere toplam 3 adettir. Ankraj delikleri numunenin bir uzun kenarından diğer uzun kenarına kadar uzanmaktadır. Ankrajlar 320 mm uzunluğunda 30 mm

genişliğinde CFRP tabakalarından kesilmiş parçalardan oluşmaktadır. Ankrajlarla ilgili detaylar, Şekil 4.3.1’de verilmiştir.



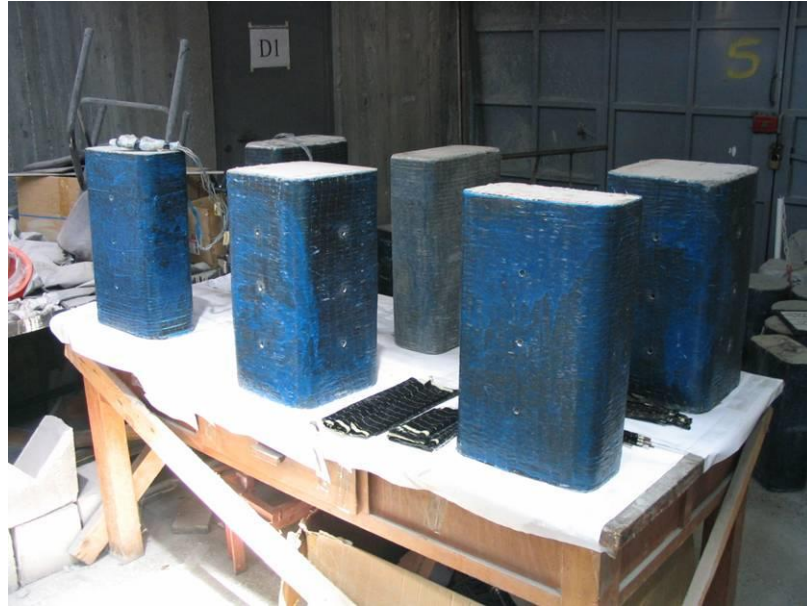
Şekil 4.3.1 Ek Önlem Detayları

Ankraj uygulamasında ilk olarak ankrajların yapılacağı yerlere delikler açılmıştır, sonra bu deliklerin içi ankrajların iyi yapışması için pompa yardımıyla toz, kir, vs'den arındırılmıştır. Ankrajlar için gerekli boyuttaki CFRP parçaları kesilmiştir, CFRP parçalarının ankraj deliklerine sokulabilmesi için CFRP tabakaları ince tellerin etrafına sarılmıştır, ancak bu sarma işlemi sırasında CFRP liflerinin yönlerinin bozulmamasına dikkat etmek gerekmektedir aksi takdirde lifler istediğimiz gibi çekme yönünde çalışmazlar. Hazırlanan CFRP ankrajlar deliklerden geçirilmeden önce deliklere çift bileşenli epoksi bazlı yapıştırıcı (saturant) bir enjektör yardımıyla pompalanmıştır.

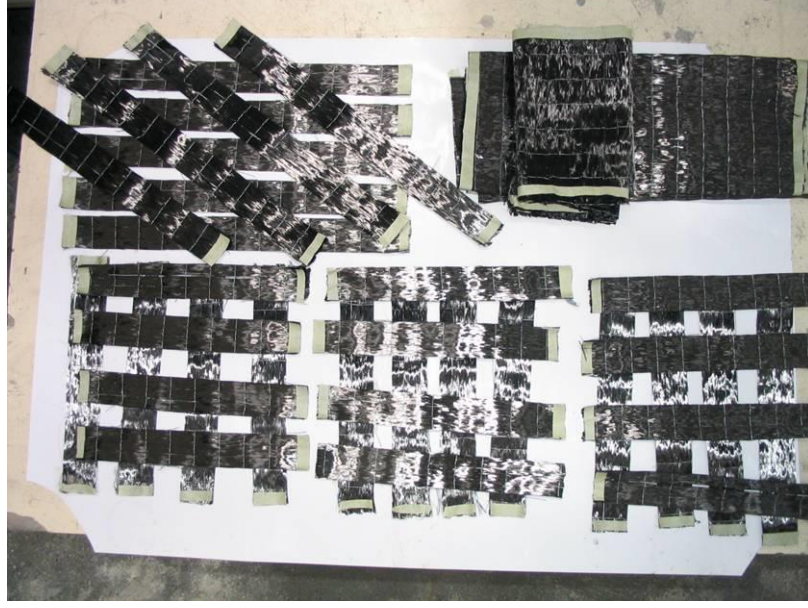
CFRP ankrajlar deliklerden geçirilip lifler şemsiye şeklinde açılmıştır ve bütün lifler yapıştırıcıya bulanarak numune yüzeyine yapıştırılmıştır, tüm liflerin üzerlerine 1 kat daha yapıştırıcı sürülerek ankraj işlemi tamamlanmıştır. Ankraj işlemi ile ilgili adımlar sırasıyla aşağıdaki, Şekil 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7, 4.3.8 ve 4.3.9’da verilmektedir.



Şekil 4.3.2 Ankraj Deliklerinin Açılması



Şekil 4.3.3 Ankraj Deliklerinin Açıldıktan Sonraki Görüntüler



Şekil 4.3.4 CFRP Tabakalarından Kesilen Parçalar



Şekil 4.3.5 CFRP Parçalarından Hazırlanan Ankrajlar



Şekil 4.3.6 Yapıştırıcının Hazırlanması ve Ankraj Yapılacak Yerlere Yapıştırıcının Sürülmesi



Şekil 4.3.7 Ankrajların Açılan Deliklere Sokulması



Şekil 4.3.8 Ankrajların Numune Yüzeyine Yapıştırılması



Şekil 4.3.9 Ankraj Yapıldıktan Sonraki Numune Görüntüsü

5. DENEY DÜZENİ

Hazırlanan tüm numune ve bu numunelere ait standart silindir deneyleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 500 ton kapasiteli üst tablası sabit alt tablası hareket ederek eksenel yük veren AMSLER yükleme aleti kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde numunelerin taşınması beklenen yük gözönünde bulundurularak ölçümlerin hassasiyetini artırmak amacıyla yükleme aleti için uygun yükleme aralığı (50, 100, 250, 500 ton) seçilmiştir.

Her yükleme adımında yerdeğiştirmeölçerler, şekildeğiştirmeölçerler ve elektronik veri toplayıcı (TS 303) yardımı ile yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçümleri elektronik yolla yapılmıştır.

Yerdeğiştirmeölçerler numunelerin ortalama eksenel boy değişiminin (şekildeğiştirmesinin) belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerlerse hem boyuna hem de enine şekildeğiştirmeleri ölçmek için kullanılmışlardır.

Bu deneysel çalışma sırasında numuneler için öngörülen şekildeğiştirme kapasiteleri gözönüne alınarak TML CDP-10, CDP-25, CDP-50 ve CDP100 türü yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. CDP-10 türü yerdeğiştirmeölçerler 1/1000 mm, CDP-25 türü yerdeğiştirmeölçerler 1/500 mm, CDP-50 türü yerdeğiştirmeölçerler 1/200 mm, CDP-100 türü yerdeğiştirmeölçerler ise 1/100 mm hassasiyetine sahiptir.

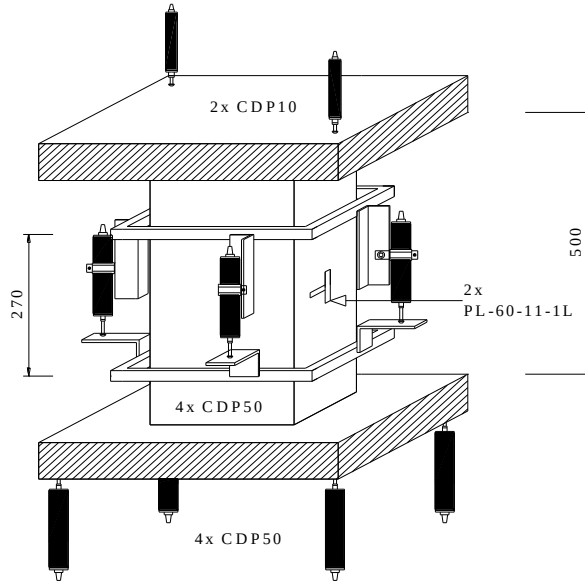
28, 90 ve 180. günlerde yapılan standart silindir deneyleri sırasında TML CM-15 ölçüm çerçevesi (kompresometre) ve 2 adet CDP-25 tipi yerdeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Ölçüm çerçevesi üzerinde 2 adet CDP-5 türü yerdeğiştirmeölçer kullanılarak 150 mm yüksekliğindeki kısımdan ölçüm alınmıştır. CDP-25 türü yerdeğiştirmeölçerler numune yüzeyinden 100 mm uzaklıkta aralarında 180° açı olacak şekilde yerleştirilerek ölçüm alınmıştır, Şekil 5.1.



Şekil 5.1 Standart Silindir Basınç Deneyi İçin Hazırlanan Düzenek

Güçlendirilmiş ve orijinal durumda denenen numunelerin ölçüm sisteminde numunelerin boyuna şekildeğiştirmeleri gözönünde bulundurularak yükleme cihazının yukarı doğru hareket eden alt tablasının 4 köşesine alttan, boyuna şekildeğiştirmelerin az olduğu numunelerde CDP-50 tipi, boyuna şekildeğiştirmelerin fazla olduğu 5 kat sargılı ve etriye aralığı az olan numunelerde CDP-100 tipi yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır.

Yükleme cihazının üst başlığındaki hareket az olduğu için üst başlığın çapraz iki köşesinde 1'er adet CDP-10 tipi şekildeğiştirmeölçer kullanılmıştır, Şekil 5.2. Alt başlıktaki yerdeğiştirme değerinden üst başlıktaki yerdeğiştirme değeri çıkarılarak tüm boydaki şekildeğiştirme elde edilmiştir.



Şekil 5.2 Deney Düzeneği (Birimler: mm)

Orta 270 mm yüksekliğindeki kısımdan ölçüm alıp şekildeğiştirmeleri tespit etmek amacıyla kare, dikdörtgen ve daire enkesitli numuneler için üzerine 4 adet yerdeğiştirme ölçer takılabilen ölçüm çerçevesi tasarlanıp üretilmiştir (EK A). Ölçüm çerçevesi tasarım ve üretimi İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır. Ölçüm çerçevesi, ilki kare ve silindir, ikincisi dikdörtgen numunelerde kullanılmak üzere 2 tip olarak üretilmiştir. Üzerine CDP-50 ve CDP-25 tipi yerdeğiştirme ölçer takılacak şekilde tasarlanmıştır. Ölçüm çerçevesi orta 270 mm'lik bölgeden deney sonuna kadar ölçüm alınacak şekilde, göçme anında yerdeğiştirmeölçerlerin hasar görmesini engelleyecek şekilde tasarlanmıştır.

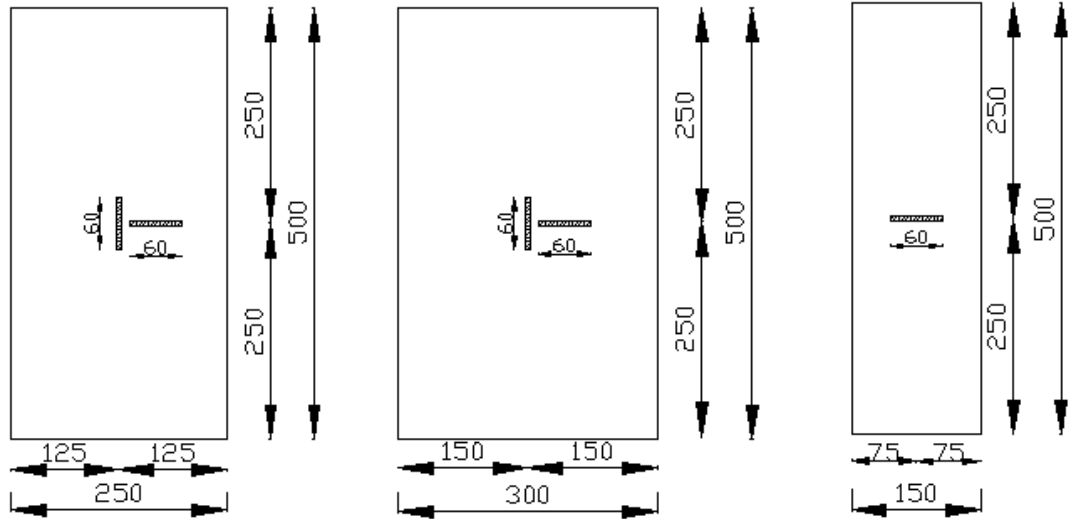
Boyuna ve enine doğrultudaki şekildeğiştirmeleri ölçmek için enine ve boyuna doğrultuda şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Bu şekildeğiştirmeölçerler yaklaşık 0.01 şekildeğiştirme düzeyine kadar sağlıklı ölçüm değerleri verebilen şekildeğiştirmeölçerlerdir. Bu şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla hem enine doğrultudaki şekildeğiştirmeleri ölçmek mümkün olmuştur, hem de boyuna doğrultudaki şekildeğiştirmeleri ölçüp yerdeğiştirmeölçelerden alınan değerlerle kıyaslama imkanı sağlanmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler numune üzerinde düzgün yüzey oluşturulduktan sonra kuvvetli yapıştırıcılarla numune yüzeyine yapıştırılırlar, yüzeyde kullanılan şekildeğiştirmeölçerler PL-60-11-1L tipinde olup 60 mm ölçüm boyuna sahiptirler. Kare enkesitli numunelerde bindirmenin olduğu kenara zıt 2 karşılıklı kenarın tam ortasına boyuna ve enine doğrultuda olmak üzere her bir numunede 4 adet kullanılmıştır. Daire enkesitli numunelerde bindirmeye uzak olacak şekilde birbirine 180° açıyla numunenin yüzüne boyuna ve enine doğrultuda olmak üzere toplam 4 adet şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır. Dikdörtgen enkesitli numunelerde ise uzun kenarlardan bindirmeye uzak olan uzun kenarın ortasına 1 boyuna, 1 enine doğrultuda, diğer uzun kenara da 1 boyuna ve kısa kenarlardan birine enine doğrultuda toplam 4 adet şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır, Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5.



Şekil 5.3. Dikdörtgen Numunelerin Uzun ve Kısa Kenarlarına Yapıştırılan Şekildeğiştirmeölçerler



Şekil 5.4. Kare ve Silindir Numunelere Yapıştırılan Şekildeğiştirmeölçerler



Şekil 5.5. Kare ve Dikdörtgen Enkesitli Numunelerdeki Yüzey Şekildeğiştirmeölçerlerinin Yerleri

Numune yüzündeki yerdeğiştirmeölçerler dışında hem boyuna hem de enine donatılardaki şekildeğiştirmeleri ölçmek amacıyla boyuna ve enine donatılara şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır. Etriyelere yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerler yardımı ile deney sırasında etriyelerin davranışı tespit edilip CFRP tabakaların sargılama etkisiyle, etriyelerin sargılama etkisi birbirinden bağımsız değerlendirilmiştir.

Tüm betonarme numunelerde çapraz 2 boyuna donatının tam ortasında 1'er adet FLA-3-11-1L tipi şekildeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Kare enkesitli numunelerde test bölgesinin hemen üstündeki etriyenin kancasına uzak olan kenarının ortasına ve köşesine yakın kısmına 1'er tane olmak üzere toplam 2 tane YFLA-5-1L tipi, dikdörtgen enkesitli numunelerde test bölgesinin hemen üstündeki etriyenin kancasına zıt komşu kısa ve uzun kenarların ortasına ve bu kenarların birbirlerine yakın köşelerine olmak üzere toplam 4 adet YFLA-5-1L tipi, daire enkesitli numunelerde test bölgesinin hemen üstündeki etriyenin bindirmesine uzak olacak şekilde birbirine 180° açılı 2 adet YFLA-5-1L tipi şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır, şekil 5.6.



şekil 5.6. Enine ve Boyuna Donatılardaki şekildeğiştirmeölçerlerin Konumları

Deney sırasında veriler (yük verileri hariç) elektronik yolla toplanmıştır. Yerleştirilen yerdeğiştirmeölçer ve şekildeğiştirmeölçerlerin “çoğaltma kutusuna” bağlantıları yapılmış, veriler buradan “veri toplayıcı” ya iletilmiştir. Deney sonrasında toplanan veriler, “veri toplayıcı” dan bir diskete kaydedilerek alınmıştır. Bu veriler ve yük verileri bilgisayarda değerlendirilmiş ve numunelerin davranışı belirlenmiştir.

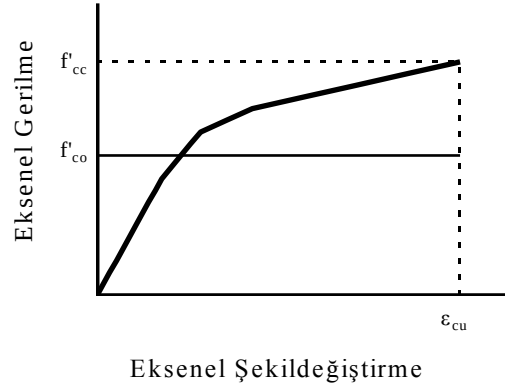
6. DENEY SONUÇLARI

6.1. GENEL DAVRANIŞ

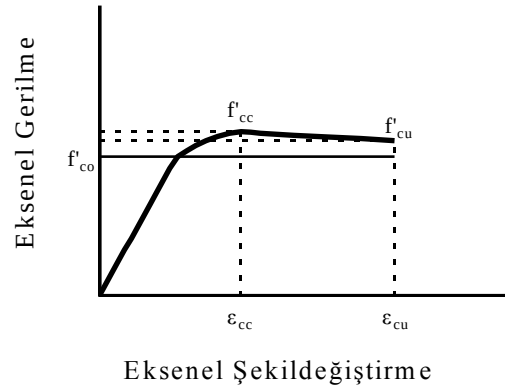
Bu bölümde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler her seri için ayrı alt bölümlerde sunulmuştur. Deney sonuçları genel olarak aksenal gerilme-aksenal şekildeğiştirme ve aksenal gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri ile verilmiştir.

Bu tez kapsamında ve literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre FRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilen beton elemanlarda genel olarak 3 tip aksenal gerilme-aksenal şekildeğiştirme ilişkisi gözlenmektedir. İki lineer doğru ile ifade edilebilecek olan birinci tip ilişkide aksenal gerilme, sarılmamış beton basınç dayanımı (f_{co}) değerine ulaştıktan sonra monotonik bir şekilde artmaya devam eder. FRP tabakanın kopması ile maksimum aksenal gerilme (f_{cc}) ve maksimum aksenal şekildeğiştirme (ϵ_{cu}) değerlerine ulaşılır, Şekil 6.1.1. Şekil 6.1.2’de verilen 2. tip ilişkide aksenal gerilme, sarılmamış beton basınç dayanımı (f_{co}) değerini aşar, maksimum değerine (f_{cc}) ulaştıktan sonra kopma anına dek azalır. Kopma gerçekleştiği anda maksimum aksenal şekildeğiştirme (ϵ_{cu}) ve bu şekildeğiştirmeye karşı gelen aksenal gerilme (f_{cu}) değeri elde edilir. Maksimum aksenal şekildeğiştirmeye karşı gelen bu kopma gerilmesi (f_{cu}), maksimum aksenal gerilmeden (f_{cc}) küçük, sarılmamış beton basınç dayanımından (f_{co}) ise büyüktür. Maksimum aksenal gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirme ise ϵ_{cc} ile gösterilmektedir. 3. tip ilişkinin 2. tip ilişkiden tek farkı kopma gerilmesinin (f_{cu}), sarılmamış beton basınç dayanımından da düşük bir değerde olmasıdır, Şekil 6.1.3.

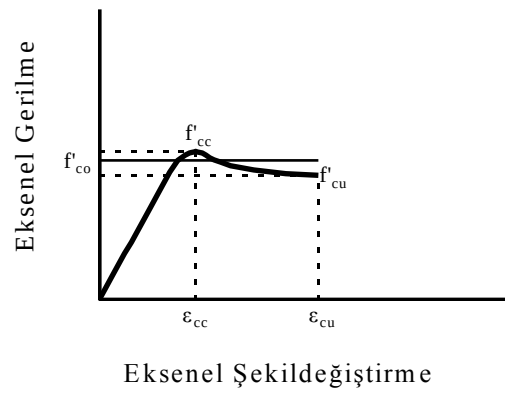
Deney sonuçları ile ilgili alt bölümlerdeki tablolarda yukarıda bahsedilen tanımlara ait sayısal değerler verilmiştir. Genel davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için burada verilen tanımların büyük önemi vardır.



Şekil 6.1.1 1. Tip Eksenel Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi ($f'_{cc}=f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}=\epsilon_{cu}$)



Şekil 6.1.2 2. Tip Eksenel Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi ($f'_{cc}>f'_{cu}>f'_{co}$, $\epsilon_{cc}<\epsilon_{cu}$)



Şekil 6.1.3 3. Tip Eksenel Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi ($f'_{cc}>f'_{co}>f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}<\epsilon_{cu}$)

6.2. KARE ENKESİTLİ NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

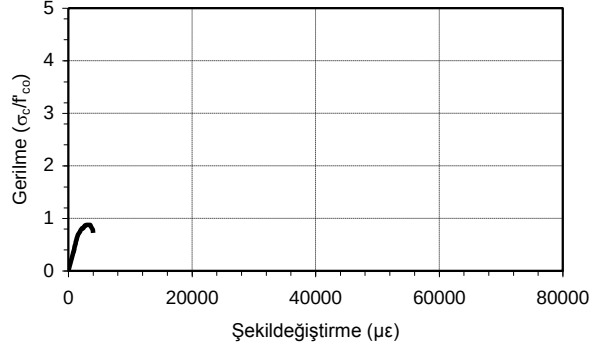
Bu seride ortalama 28 günlük standart silindir basınç dayanımları 24 MPa olan 250×250×500 mm boyutlarında kare enkesitli 9 adet betonarme, 1 adet beton numuneden 4 tanesi 3 kat, 3 tanesi 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş ve monoton artan yükler altında denenmiştir. Numunelerin genel özellikleri, Tablo.1.1.ve Tablo 4.1.1’de verilmiştir.

Deneyler sırasında yerdeğiştirmeölçerler kullanılarak numunelerin tüm boyundan (Ö.B = 500 mm), orta 270 mm’lik test bölgesinden, yüzeydeki (Ö.B = 60 mm) ve donatılardaki (Ö.B = 3 mm ve Ö.B = 5 mm) şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla hem enine doğrultudaki hem boyuna doğrultudaki şekildeğiştirmeler ölçülmüş ve elde edilen değerlerle boyutsuz gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri grafiklerle sunulmuştur.

Bu grafiklerde dikey eksen, numuneye deney sırasında etkiyen gerilmenin (σ_c), söz konusu numunenin orijinal basınç dayanımına (f'_{co}) oranını temsil eden boyutsuz, σ_c/f'_{co} oranıdır. σ_c değeri tüm numuneye deney sırasında etkiyen yüklerden donatının aldığı gerilme çıkarılarak bulunur. Grafiklerdeki yatay eksen ise şekildeğiştirmeyi (ϵ) göstermektedir, şekildeğiştirmenin birimi microstrain ($\mu\epsilon$) olarak verilmiştir.

6.2.1. NS-R-1-200-0-40

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 200 mm etriye aralığına sahip olup köşe yarıçapı 40 mm'dir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 50 ve 100 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.2.1.1 NS-R-1-200-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi
(ölçüm boyu: 500 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri kaydı yapılmıştır. 140 ton yük düzeyinde numunenin arka yüzünde ilk çatlak oluşmuştur, Şekil 6.2.1.2a. 160 t mertebesinde numunenin ön yüzünde boyuna çatlak, üst kesitlerde köşelerde ezilme ve kabuk atma gözlenmiştir, Şekil 6.2.1.2b. Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 166 t olmuştur.



(a)

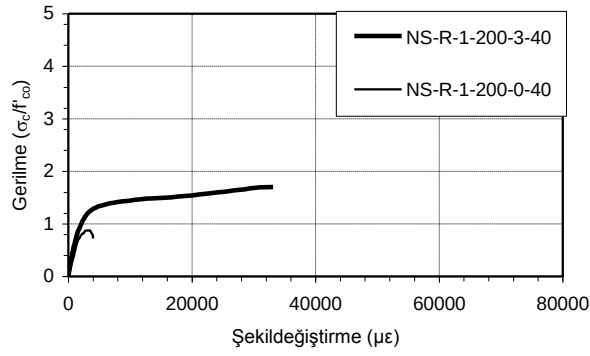


(b)

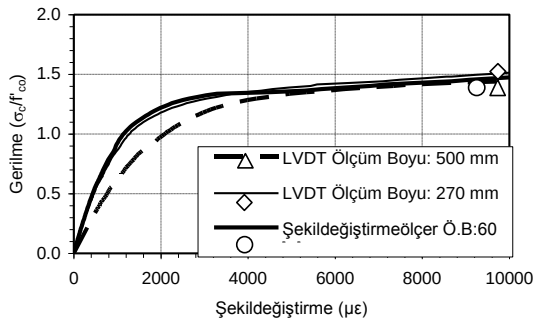
Şekil 6.2.1.2 Deney Sırasında Numunede Oluşan Çatlak ve Ezilmeler

6.2.2. NS-R-1-200-3-40

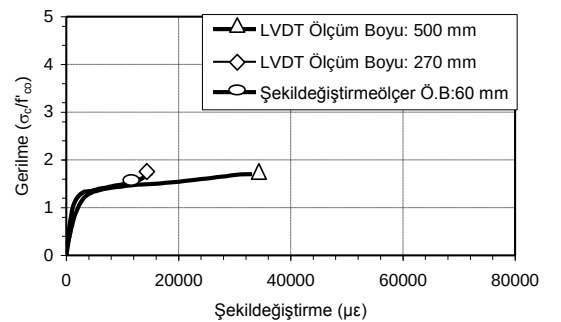
Şekil 6.2.2.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-1-200-0-40 ve NS-R-1-200-3-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin hem eksenel yük taşıma kapasitesinin, hem de sünekliliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.2.2.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-200-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.2.2.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.2.2.1 NS-R-1-200-0-40 ve NS-R-1-200-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)

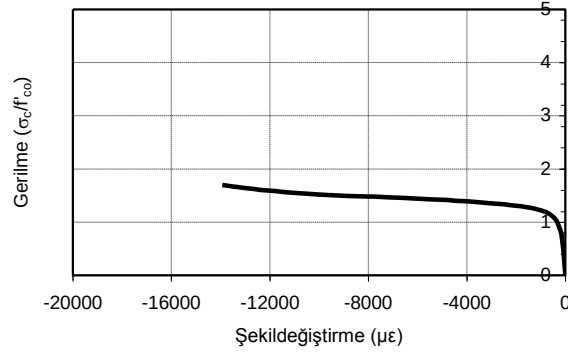


(a)



(b)

Şekil 6.2.2.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a), Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.2.2.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

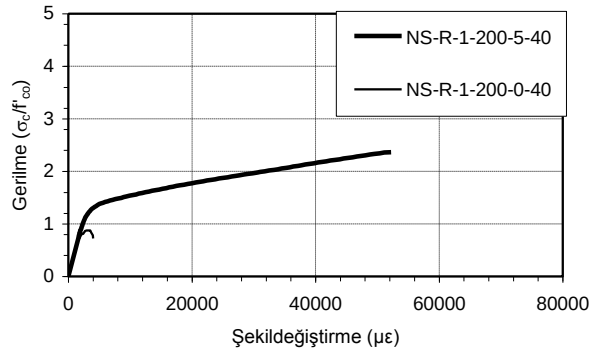
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 281 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.033 ve 0.014 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık orta 230 mm'lik kısımda köşenin bittiği yerde ve orta kısımlarda olmak üzere 3-4 farklı parça halinde oluşmuştur, Şekil 6.2.2.4. Taşıma gücüne ulaşıp, FRP yırtıldıktan sonra, düşey donatılar test bölgesinin olduğu yerde burkulmuştur.



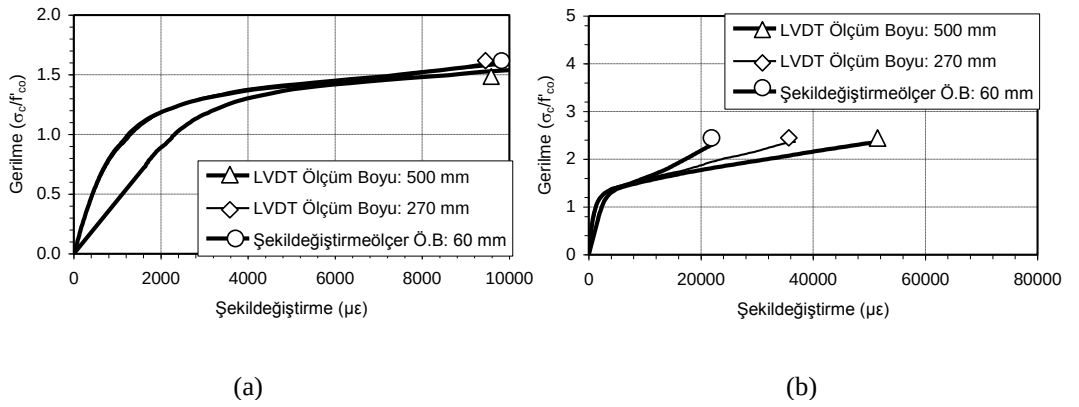
Şekil 6.2.2.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.3. NS-R-1-200-5-40

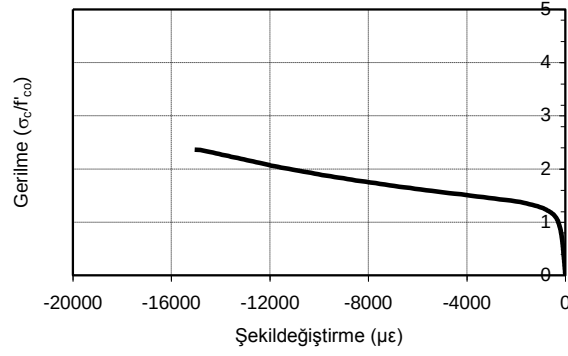
Şekil 6.2.3.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-1-200-0-40 ve NS-R-1-200-5-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin hem eksenel yük taşıma kapasitesinin, hem de sünekliliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.2.3.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-200-5-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.2.3.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.2.3.1 NS-R-1-200-0-40 ve NS-R-1-200-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.2.3.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.2.3.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

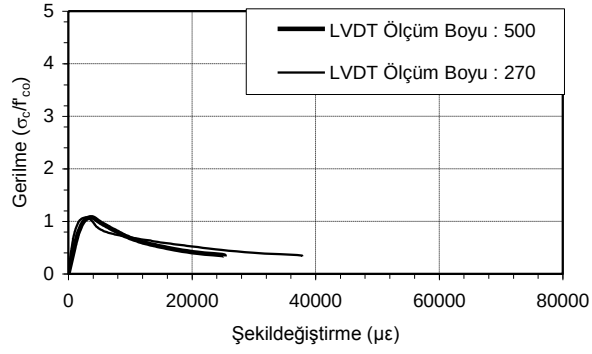
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 385 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.052 ve 0.015 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Düşey yırtıklar orta 200 mm'lik kısımda 4-5 parça halinde köşenin bittiği yerde ve orta kısımda olmak üzere 3-4 farklı kesitte oluşmuştur. Düşey yırtıkların haricinde sayılamayacak kadar çok yatay yırtık oluşmuştur, Şekil 6.2.3.4. Numune imalatının çok iyi olmadığı gözlemlenmiştir, bazı FRP liflerin betona tam yapışmadığı görülmüştür.



Şekil 6.2.3.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.4. NS-R-1-100-0-40

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 100 mm etriye aralığına sahip olup köşe yarıçapı 40 mm'dir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 50 ve 200 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.2.4.1 NS-R-1-100-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 165 ton için 0.0015, 180 ton için 0.002 boyuna şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir, 183 ton için ise 0.0025 şekildeğiştirme değeri ölçülmüştür bu mertebede ilk boyuna çatlaklar gözlenmiştir. 185 ton için 0.003 şekildeğiştirme mertebesinde numune taşıyabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşmıştır, Şekil 6.2.4.2a. Bu mertebeden sonrada yük düşerken de 2 ton aralıkla 0.035 şekildeğiştirme düzeyine kadar veri alınmıştır, Şekil 6.2.4.2b. Bu şekildeğiştirme düzeyinde numunenin taşıdığı yük 77 ton düzeyindeydi.



(a)

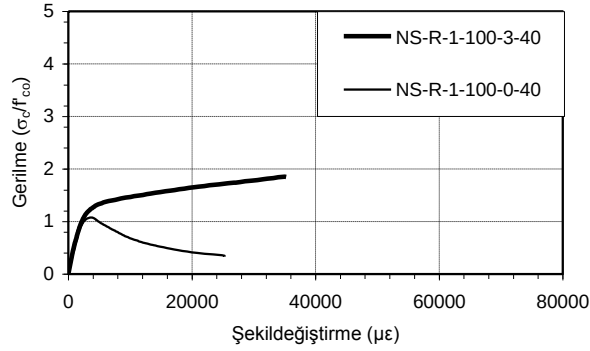


(b)

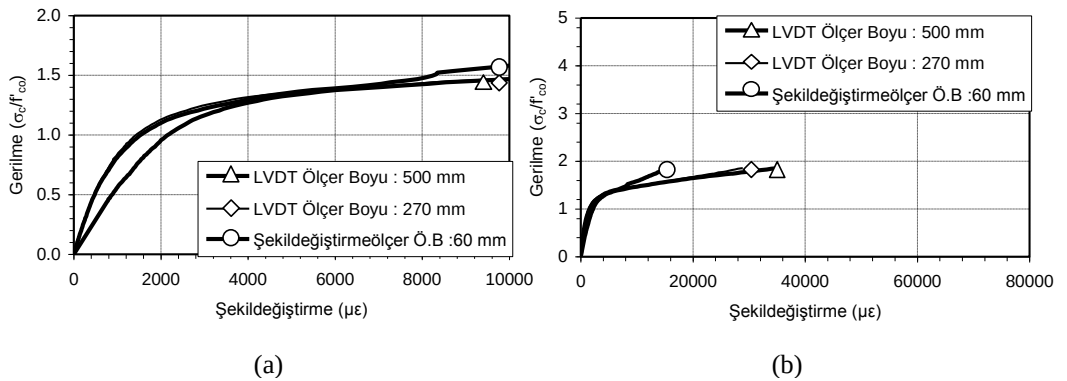
Şekil 6.2.4.2 Numunenin $\epsilon=0.003$ (a) ve $\epsilon=0.035$ (b) Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.

6.2.5. NS-R-1-100-3-40

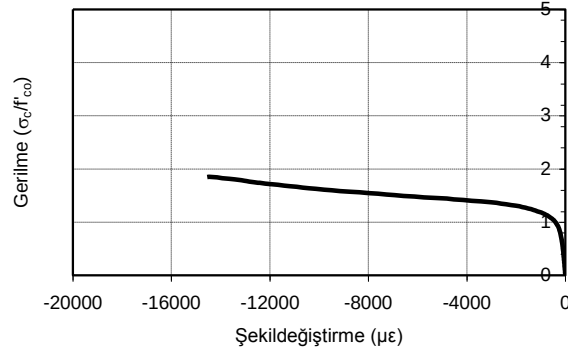
Şekil 6.2.5.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-1-100-0-40 ve NS-R-1-100-3-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.2.5.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-100-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.2.5.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.2.5.1 NS-R-1-100-0-40 ve NS-R-1-100-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.2.5.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.2.5.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

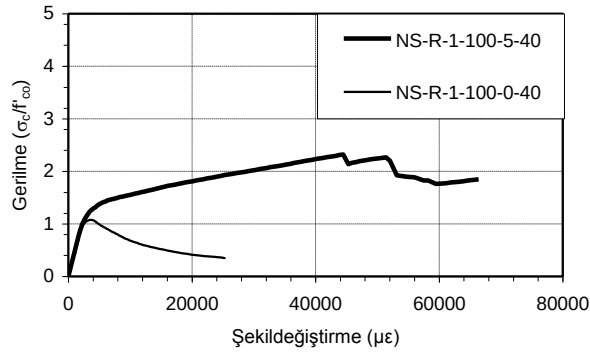
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 304 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.035 ve 0.015 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Düşey yırtıklar orta 210 mm'lik kısımda 5 mm ile 50 mm arasında değişen 5-6 yatay parça halinde köşenin bittiği yerde oluşmuştur, Şekil 6.2.5.4.



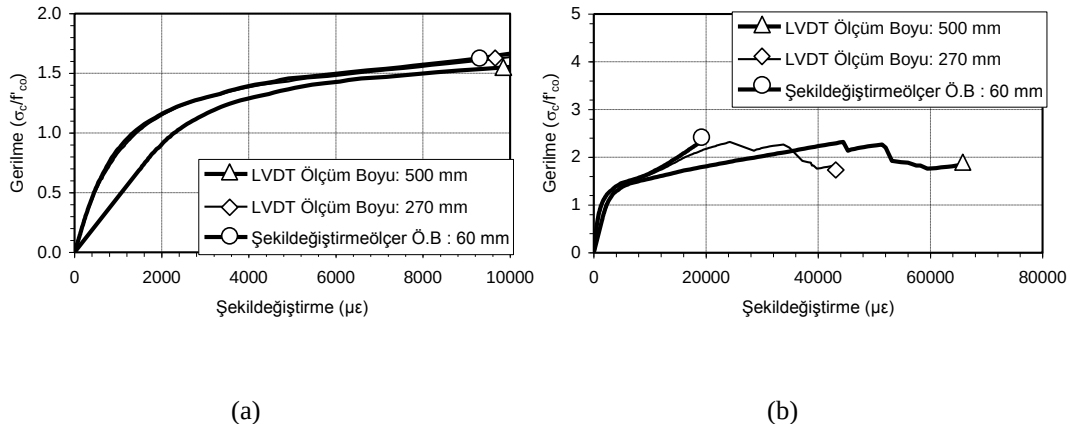
Şekil 6.2.5.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.6. NS-R-1-100-5-40

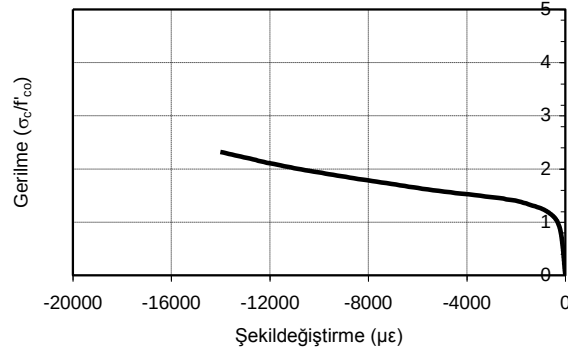
Şekil 6.2.6.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-1-100-0-40 ve NS-R-1-100-5-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.2.6.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-100-5-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. 60 ve 270 mm ölçüm boyuna sahip kısımların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri benzerlik göstermektedir, ancak 500 mm ölçüm boyuna sahip kısmın davranışı diğerlerine göre biraz daha farklılık göstermiştir. Şekil 6.2.6.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.2.6.1 NS-R-1-100-0-40 ve NS-R-1-100-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.2.6.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.2.6.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

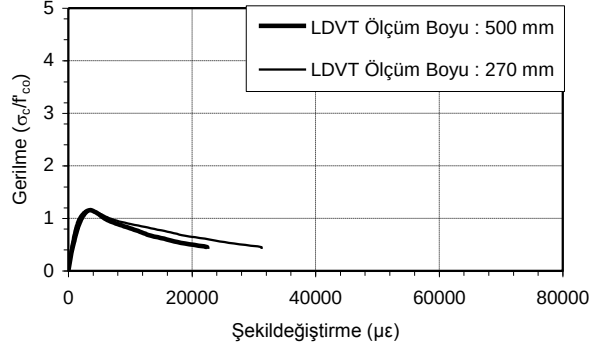
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 378 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.066 ve 0.014 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP tabakası yırtılmış ve göçme olmuştur. 215 mm'lik düşey yırtık çok parçalı olarak 40 ile 80 mm arasında değişen boyutta 4-5 yatay parça şeklinde oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık bindirmenin olmadığı yerde meydana gelmiştir. Bu numunede genel göçme tipinin dışında yani test bölgemizin dışında numunenin üstünden 10 mm aşağıda 70 mm genişliğinde köşenin bittiği yerde CFRP tabakasında yırtık oluşmuştur. Bu yırtığın sebebi deneyin ilerleyen adımlarında numunenin üstündeki yaklaşık 10 mm'lik başlığın ezilip CFRP tabakasının doğrudan aksenal yüke maruz kalmasıdır, Şekil 6.2.6.4.



Şekil 6.2.6.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

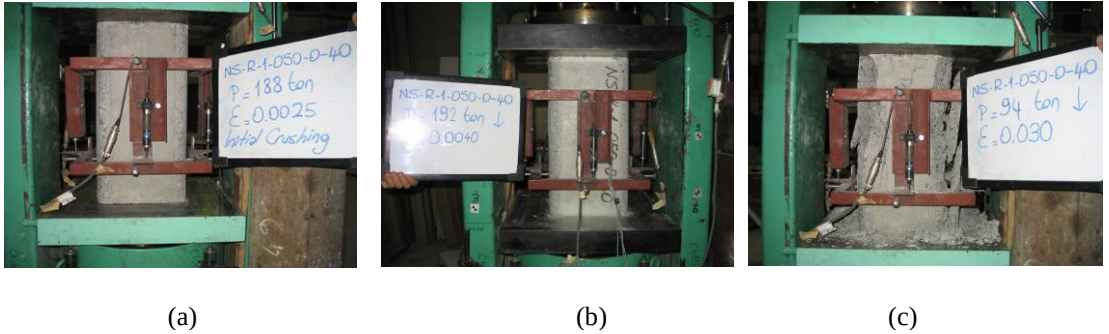
6.2.7. NS-R-1-050-0-40

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 50 mm etriye aralığına sahip olup köşe yarıçapı 40 mm'dir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 100 ve 200 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.2.7.1 NS-R-1-050-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm)

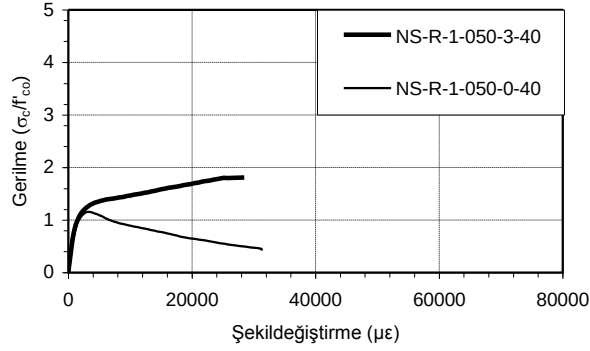
Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 168 ton için 0.0015, 180 ton için 0.002, 188 ton için 0.0025 şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir. 0.0025 şekildeğiştirme mertebesinde numunede ezilme başlamıştır, Şekil 6.2.7.2a. 192 t için 0.0035 şekildeğiştirme düzeyinde numunenin taşıyabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşılmıştır, Şekil 6.2.7.2b. Bu mertebeden sonra yük düşerken de 2 ton aralıkla 0.030 şekildeğiştirme düzeyine kadar veri alınmıştır, Şekil 6.2.7.2c. Bu şekildeğiştirme düzeyinde numune 94 ton yük taşımıştır.



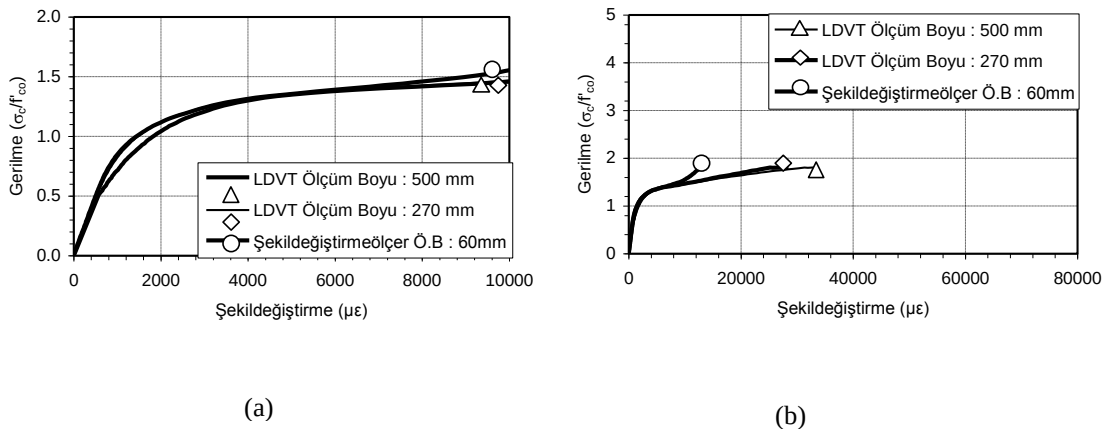
Şekil 6.2.7.2 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.8. NS-R-1-050-3-40

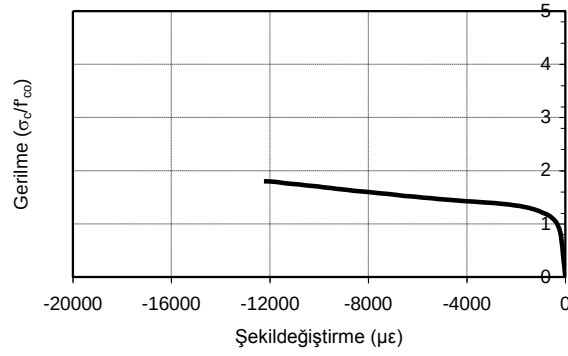
Şekil 6.2.8.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-1-050-0-40 ve NS-R-1-050-3-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.2.8.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-050-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.2.8.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir..



Şekil 6.2.8.1 NS-R-1-050-0-40 ve NS-R-1-050-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.2.8.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkiler



Şekil 6.2.8.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

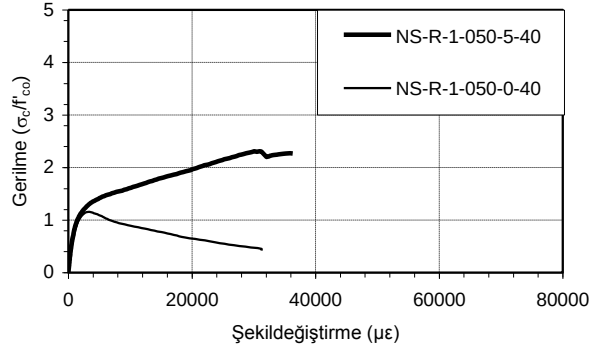
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 297 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.033 ve 0.012 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP tabakası yırtılmış ve göçme olmuştur. 130 mm'lik düşey yırtık çok parçalı olarak yaklaşık 50 ile 150 mm arasında değişen boyutta 4-5 yatay parça şeklinde oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık 3 farklı düşey kesitte köşenin bittiği yerde meydana gelmiştir, Şekil 6.2.8.4.



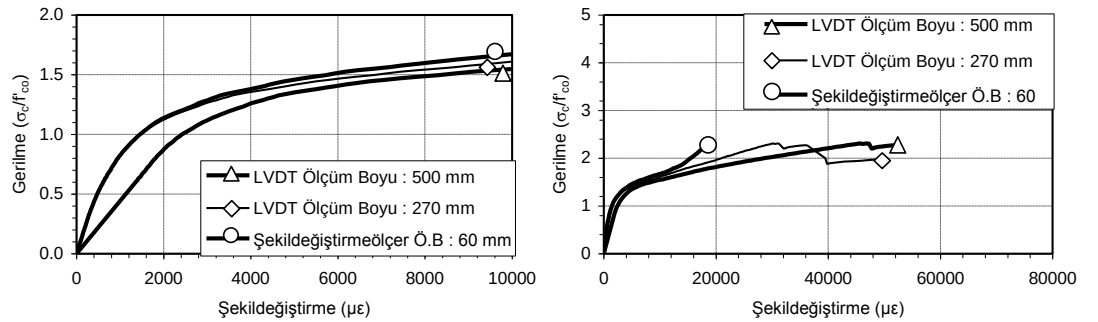
Şekil 6.2.8.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.9. NS-R-1-050-5-40

Şekil 6.2.9.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-1-050-0-40 ve NS-R-1-050-5-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.2.9.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-050-5-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.2.9.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir..



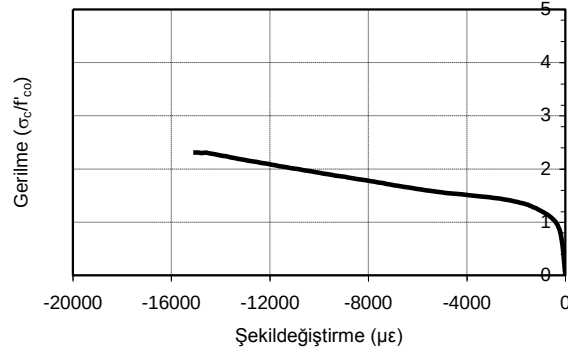
Şekil 6.2.9.1 NS-R-1-050-0-40 ve NS-R-1-050-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



(a)

(b)

Şekil 6.2.9.2 500, 270 ve 60 mm ölçüm boyları için başlangıç (a) ve tam (b) gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 6.2.9.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

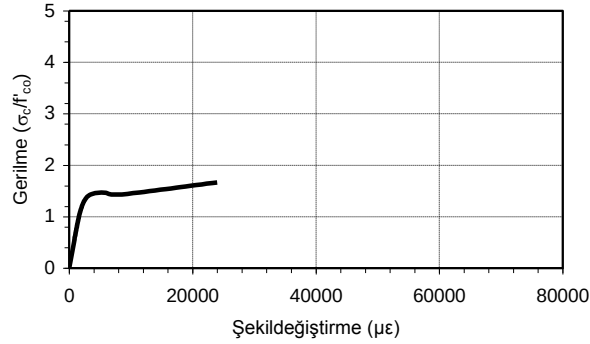
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 376 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.045 ve 0.015 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP tabakası yırtılmış ve göçme olmuştur. 200 mm'lik düşey yırtık çok parçalı olarak 30 ile 120 mm arasında değişen boyutta 7-8 yatay parça şeklinde oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık 3 farklı düşey kesitte köşenin bittiği yerde, numunenin ortasında ve köşeye yakın yerlerde meydana gelmiştir, Şekil 6.2.9.4.



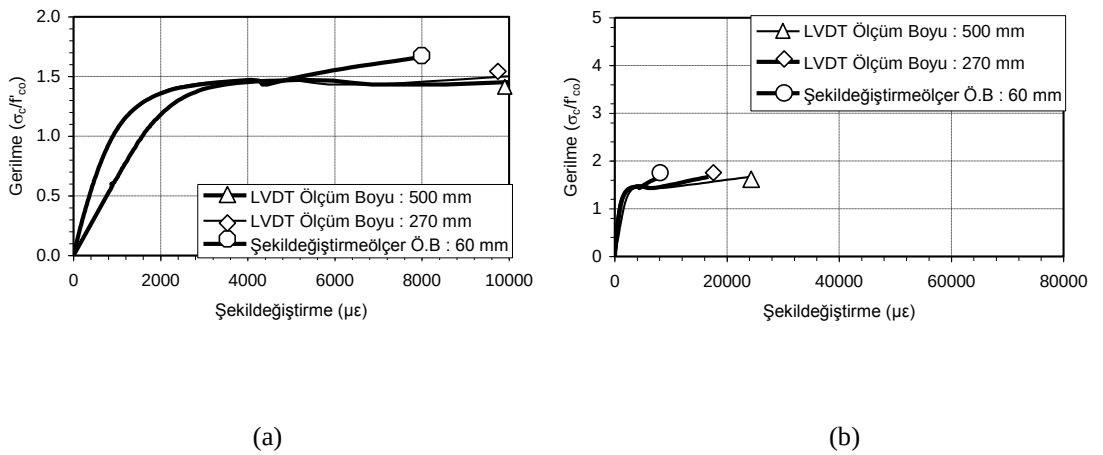
Şekil 6.2.9.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.10. NS-R-1-000-3-40

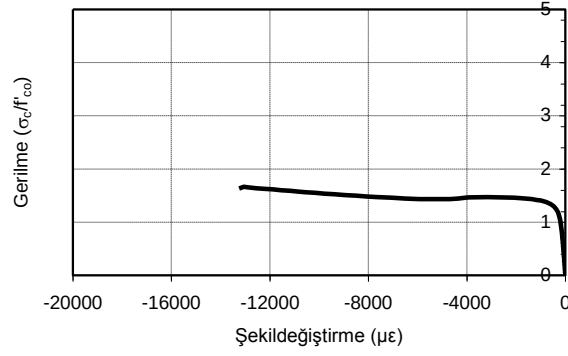
Şekil 6.2.10.1’de numunenin gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir. Bu numuneyi diğerlerinden ayıran özelliği bu numunenin beton eleman olmasıdır. Bu numune aynı enkesit özelliğine ve aynı sargı sayısına sahip betonarme elemanlarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla denenmiştir. Şekil 6.2.10.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-1-000-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.2.10.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.2.10.1 NS-R-1-000-3-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm)

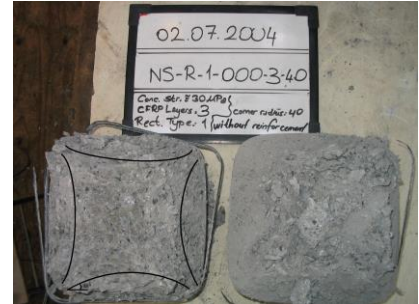
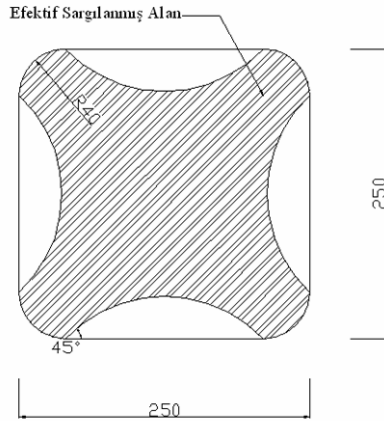


Şekil 6.2.10.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.2.10.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

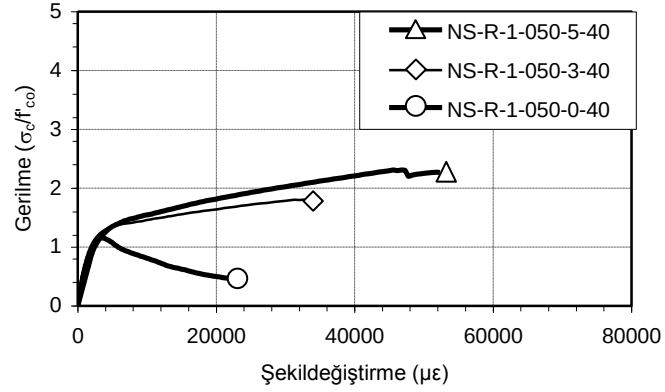
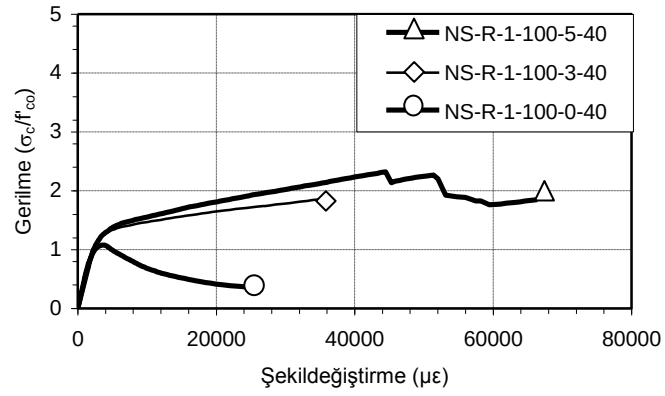
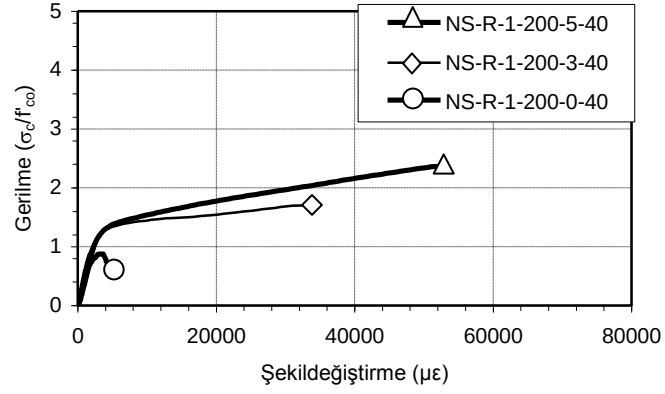
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 256 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.024 ve 0.013 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP tabakası yırtılmış ve göçme olmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık numunenin orta 250 mm'lik kısmında kenarların bitim noktasında oluşmuştur. Deney sonrasında numune kesiti incelendiğinde yaklaşık 45° başlangıç eğimine sahip ikinci derece parabollerin oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 6.2.10.4. Bu parabollerin dışında kalan alan etkili olarak sargılanmayan beton alanını göstermektedir.



Şekil 6.2.10.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.2.11. KARŞILAŞTIRMALAR

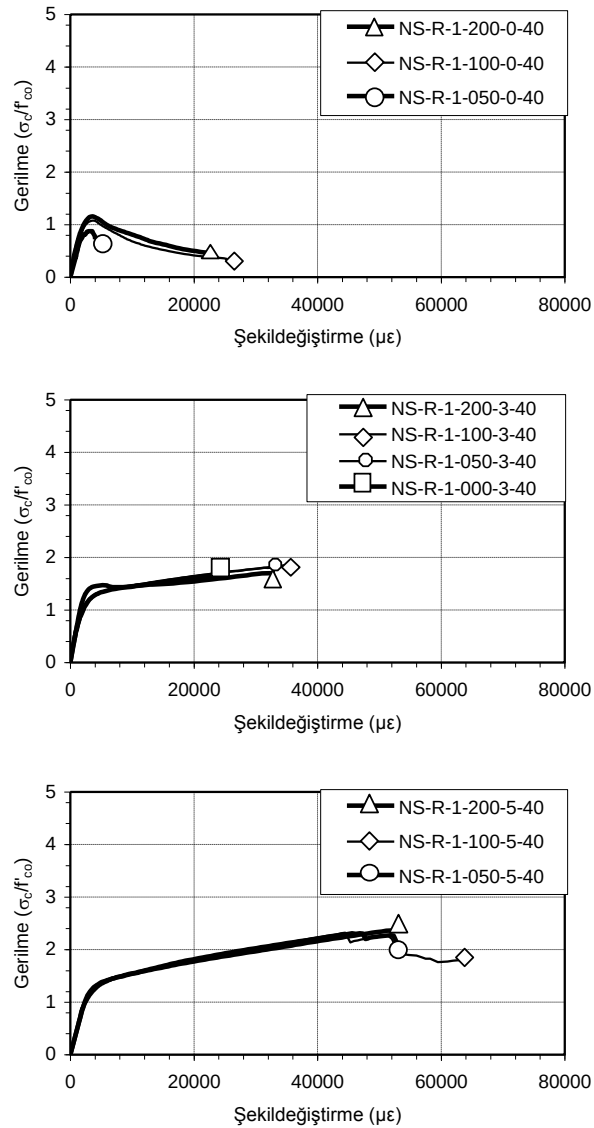
Şekil 6.2.11.1’de aynı özelliğe sahip numunelerde farklı CFRP tabaka kalınlığının davranışa olan etkisinin incelendiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. 200, 100 ve 50 mm etriye aralığı için bu ilişki ayrı ayrı incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde CFRP tabaka kalınlığı arttıkça dayanımın, özellikle sünekliğin önemli oranda arttığı gözlenmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde sargılanmamış numunelere göre bir kıyaslama yapıldığında 200 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları sırasıyla 3 ve 5 kat için %79 ve %148, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1550 ve %2500, 100 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları %95 ve %144, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1650 ve %2150, 50 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları %90 ve %143, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1650 ve %2200 arttığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar yorumlandığında aynı sargı sayısına sahip numuneler için etriye aralığı fazla olan numunelerde dayanım artış oranının daha fazla olduğu gözlenmiştir, Tablo 6.2.11.1



Şekil 6.2.11.1 Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığının Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

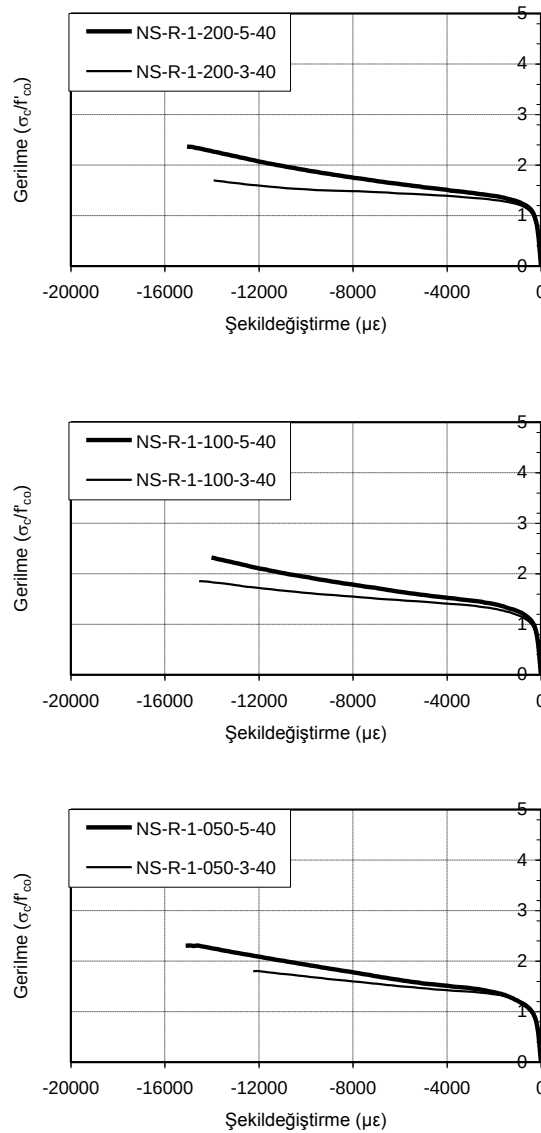
Aşağıdaki Şekil 6.2.11.2’de aynı CFRP sargı kalınlığına sahip numunelerde etriye aralığının davranışa olan etkisini ifade eden gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini gösteren grafikler verilmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde

eğrilerin benzer eğilim gösterdiği gözlenmiştir. 200 mm etriye aralığına sahip NS-R-1-200-0-40'da enine sargı donatıları ile yeterince etkin sargılama gerçekleştirilemediği için gevrek davranış gözlenmiştir. Aynı sargı kalınlığına sahip numunelerde etriye aralığı değişimi dayanımı ve eksenel şekildeğiştirme kapasitesini önemli oranda değiştirmemektedir. Bu eğilim CFRP tabakalarının sargılama etkisinin yeterince fazla olduğunu, enine sargı donatısının miktarının değişiminin davranışa fazla etkisi olmadığını göstermektedir. 3 ve 5 kat sargılanmış numunelere bakıldığı zaman farklı etriye aralığına sahip numunelerin elastisite modüllerinin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir.



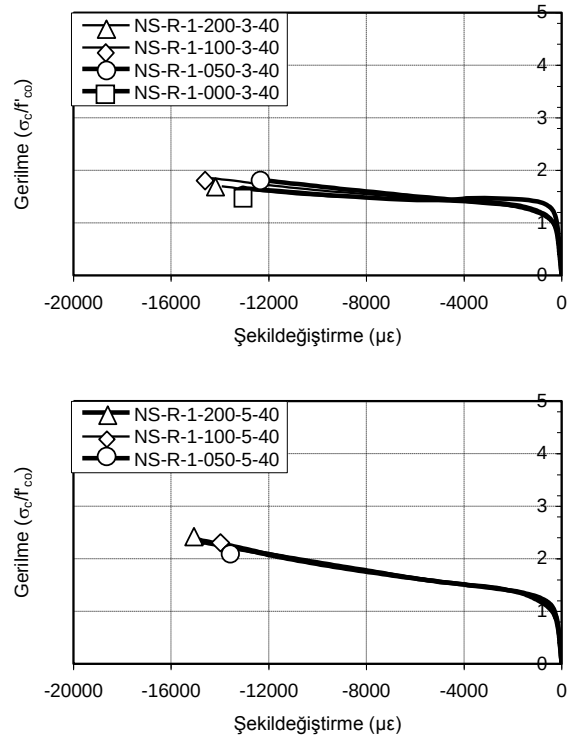
Şekil 6.2.11.2 Farklı CFRP Kalınlıkları İçin Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Aşağıdaki Şekil 6.2.11.3’de aynı özelliğe sahip 3 ve 5 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerin enine doğrultudaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde enine şekildeğiştirmelerin CFRP tabaka kalınlığından bağımsız olduğu gözlenmektedir, enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler 200 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0145, 100 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0150, 50 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0130 düzeyindedir.



Şekil 6.2.11.3 Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığı Değişiminin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Aşağıdaki, Şekil 6.2.11.4’de aynı sargı kalınlığına sahip, etriye aralığı değişen numunelere ait gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri grafiklerle sunulmuştur. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiği zaman etriye aralığı değişiminin dayanım ve enine şekildeğiştirme kapasitelerini önemli oranda artırmadığı görülmüştür. Özellikle de 5 kat sargılı numunelere ait gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde eğrilerin yaklaşık olarak aynı eğilimde oldukları gözlenmiştir, numunelerin bu eğilimi CFRP tabakasının sargılama etkisinin çok yüksek mertebelerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.2.11.4 Farklı CFRP Kalınlıkları İçin Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Tablo 6.2.11.1. Orijinal ve Güçlendirilmiş Numunelerin Dayanım ve Şekildeğiştirmeleri

Numune	f'_{cj} MPa	f'_{coj} MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc} 500 mm	ϵ_{cc} 270 mm	ϵ_{cu} 500 mm	ϵ_{ch} 60 mm	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
NS-R-1-050-0-40	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-1-100-0-40	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-1-200-0-40	27.58	25.19	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-1-050-3-40	27.58	23.44	0.002	44.55	44.55	0.035	0.029	0.033	0.014	90	1650
NS-R-1-100-3-40	27.58	23.44	0.002	45.68	45.68	0.035	0.029	0.035	0.015	95	1650
NS-R-1-200-3-40	27.58	23.44	0.002	41.97	41.97	0.033	0.016	0.033	0.014	79	1550
NS-R-1-050-5-40	27.58	23.44	0.002	56.89	55.82	0.046	0.030	0.052	0.017	143	2200
NS-R-1-100-5-40	27.58	23.44	0.002	57.23	45.58	0.045	0.024	0.066	0.016	144	2150
NS-R-1-200-5-40	27.58	23.44	0.002	58.26	58.20	0.052	0.037	0.052	0.015	148	2500
NS-R-1-000-3-40	27.58	23.44	0.002	41.08	41.08	0.024	0.017	0.024	0.013	75	1100

¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımlarıdır.

² : ϵ_{ch} değeri, şekildeğiştirmeölçerler ile alınabilen en büyük enine şekildeğiştirme değeriştir.

Numune	Hasarın Oluştığı Yer	Düsey Yırtık Uzunluğu ve Sayısı	Yatay Yırtık Genişliği ve Sayısı	Normalin Dışında Gözlenen Davranış	Diğer Gözlemler
NS-R-1-050-3-40	Orta 130 mm'de köşenin bittiği yerde	130 mm ve 3 kesitte	15-70 mm arasında 4-5 yatay parça	-	
NS-R-1-100-3-40	Orta 210mm'de köşenin bittiği yerde ve ortada	210mm ve 2 farklı kesitte	5-50 mm arasında 5-6 yatay parça	-	
NS-R-1-200-3-40	Orta 200mm'de köşenin bittiği yerde ve ortada	230 mm ve 3 farklı kesitte	10-50 mm arasında 6-7 yatay parça	-	
NS-R-1-050-5-40	Orta 200mm'de köşenin bittiği yerde ve ortada	200 mm ve 4 farklı kesitte	30-120 mm arasında 7-8 parça	-	
NS-R-1-100-5-40	Üst köşede ve orta 110 mm'lik kısımda	215 mm ve 3 farklı kesitte	40-80 mm arasında 4-5 yatay parça	İlk göçme numune üst köşesinde gerçekleşti	
NS-R-1-200-5-40	Orta 200mm'de köşenin bittiği yerde ve ortada	200 mm ve 3 farklı kesitte	20-80 mm arasında çok parçalı	Numune imalatı çok iyi değil. Epoksi yetersiz.	

6.3. DİKDÖRTGEN ENKESİTLİ NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

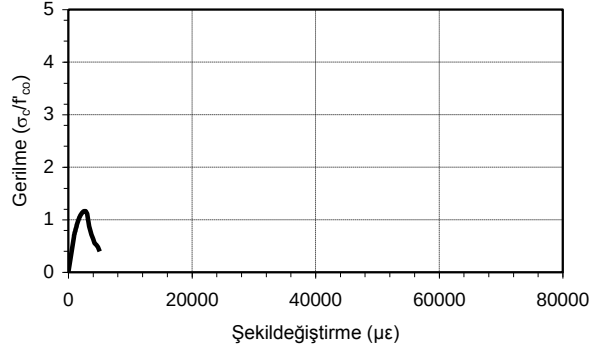
Bu seride ortalama 28 günlük standart silindir basınç dayanımları 24 MPa olan 150×300×500 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli 9 adet betonarme numunenin 3 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumda denenmiş. 3 adedi 3 kat. 3 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş ve monoton artan yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin köşeleri 40 mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır. Numunelerin genel özellikleri, Tablo.1.2 ve 4.1.2’de verilmiştir.

Deneyler sırasında yerdeğiştirmeölçerler kullanılarak numunelerin tüm boyundan (Ö.B = 500 mm), orta 270 mm’ lik test bölgesinden, yüzeydeki (Ö.B = 60 mm) ve donatılardaki (Ö.B = 3 mm ve Ö.B = 5 mm) şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla hem enine doğrultudaki hem boyuna doğrultudaki şekildeğiştirmeler ölçülmüş ve elde edilen değerlerle boyutsuz gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri grafiklerle sunulmuştur.

Bu grafiklerde düşey eksen, numuneye deney sırasında etkiyen gerilmenin (σ_c), söz konusu numunenin orijinal basınç dayanımına (f'_{co}) oranını temsil eden boyutsuz. σ_c/f'_{co} oranıdır. σ_c değeri tüm numuneye deney sırasında etkiyen yüklerden donatının aldığı gerilme çıkarılarak bulunur. Grafiklerdeki yatay eksen ise şekildeğiştirmeyi (ϵ) göstermektedir, şekildeğiştirmenin birimi microstrain ($\mu\epsilon$) olarak verilmiştir.

6.3.1. NS-R-2-175-0-40

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 175 mm etriye aralığına sahip olup köşe yarıçapı 40 mm'dir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 50 ve 100 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.3.1.1 NS-R-2-175-0-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi (ölçüm boyu: 500 mm)

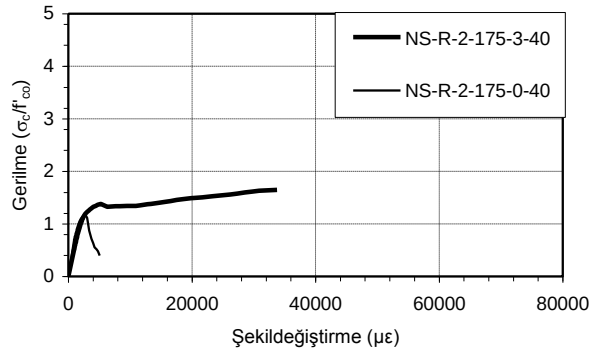
Deney sırasında 2 ton aralıkla veri kaydı yapılmıştır. Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 156 t olmuştur. Bu yük düzeyinde 0.0038 şekildeğiştirme değerine ulaşılmıştır. Göçme anına kadar numunede çatlak ve ezilme tespit edilmemiştir.



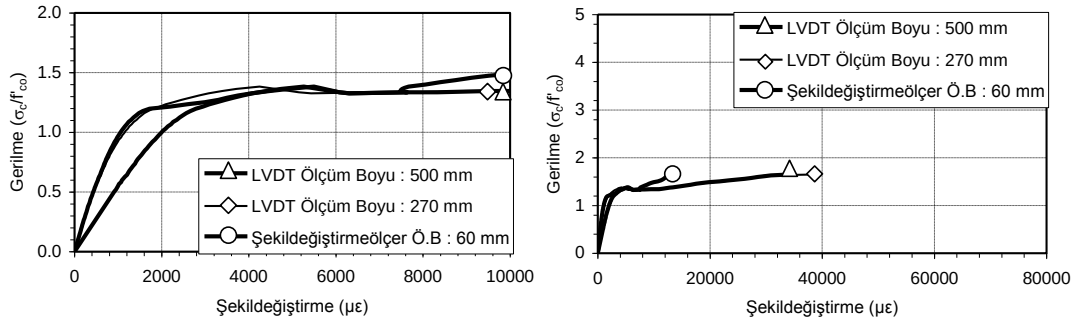
Şekil 6.3.1.2 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.3.2. NS-R-2-175-3-40

Şekil 6.3.2.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-2-175-0-40 ve NS-R-2-175-3-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin hem eksenel yük taşıma kapasitesinin, hem de sünekliliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.3.2.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-2-175-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.3.2.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



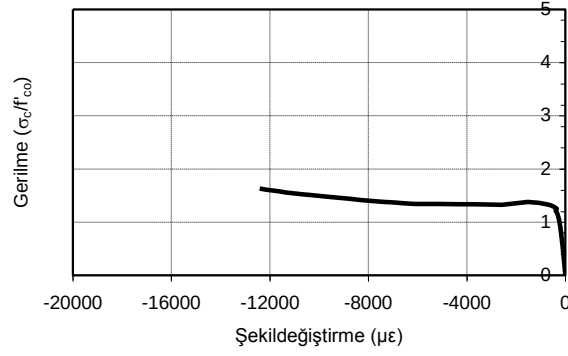
Şekil 6.3.2.1 NS-R-2-175-0-40 ve NS-R-2-175-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



(a)

(b)

Şekil 6.3.2.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.3.2.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 196 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.034 ve 0.012 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık orta 190 mm'lik kısımda köşenin bittiği yerde ve orta kısımlarda olmak üzere genişliği 30 ile 90 mm arasında değişen 3-4 farklı yatay parça halinde oluşmuştur, Şekil 6.3.2.4a. 166 t yük seviyesinde numunenin uzun kenarlarından birinde lokal burkulma tespit edilmiştir, bu seviyede yükte düşüş gözlenmiştir, enine şekildeğiştirmeler 0.0014'ten 0.0040'a yükselmiştir, Şekil 6.2.2.4b. Numune üretiminin yeterince iyi yapılmadığı tespit edilmiştir. CFRP tabakalarına yeterince yapıştırıcı sürülmediği görülmüştür.



(a)

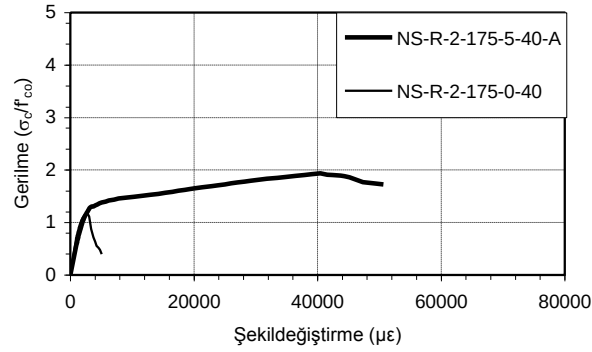


(b)

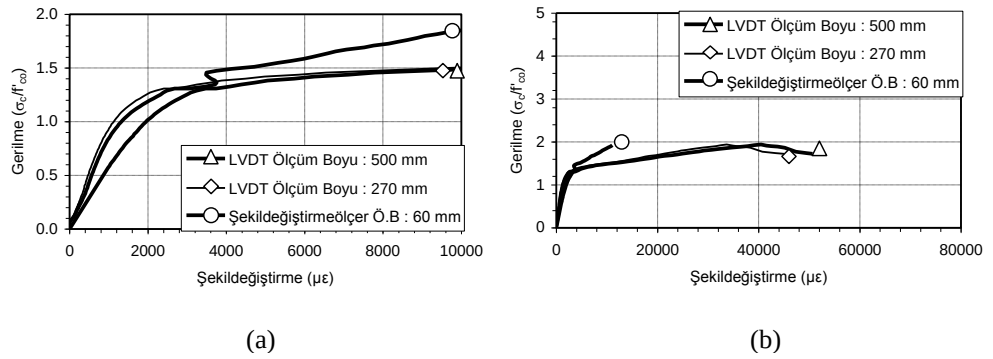
Şekil 6.3.2.4 Numunenin Deney Sırasındaki ve Deney Sonrasındaki Görüntüsü

6.3.3. NS-R-2-175-5-40-A

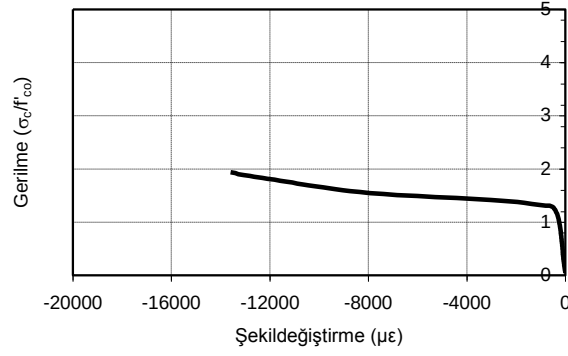
Şekil 6.3.3.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-2-175-0-40 ve NS-R-2-175-5-40-A numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Bu numunede diğer numunelerden farklı olarak CFRP tabakasının etkinliğini artırıcı ek önlem uygulanmıştır. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin hem eksenel yük taşıma kapasitesinin, hem de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.3.3.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-2-175-5-40-A numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. 500 ve 270 mm ölçüm boylarını gösteren eğriler birbirine çok yakın davranış göstermiştir, 60 mm ölçüm boyunu gösteren eğri başlangıçta diğer ölçüm boylarına yakın davranış göstermiştir ancak sonradan farklı eğilim göstermiştir. Şekil 6.3.3.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.3.3.1 NS-R-2-175-0-40 ve NS-R-2-175-5-40-A Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.3.3.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.3.3.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

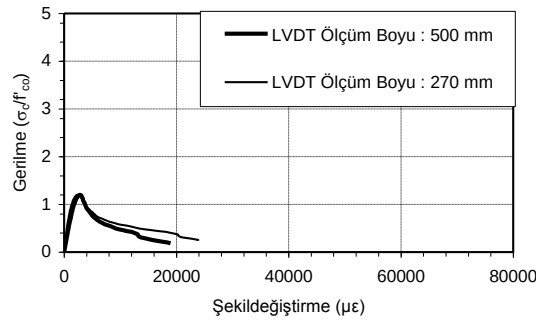
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 228 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.042 ve 0.014 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Düşey yırtıklar orta 200 mm'lik kısımda 2 parça halinde köşenin bittiği yerde ve orta kısımda olmak üzere 3 farklı parça halinde oluşmuştur. Düşey yırtıkların haricinde sayılamayacak kadar çok yatay yırtık oluşmuştur.



Şekil 6.3.3.4 Numunenin Deney Öncesindeki Görüntüleri

6.3.4. NS-R-2-100-0-40

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 100 mm etriye aralığına sahip olup köşe yarıçapı 40 mm'dir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 50 ve 175 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.3.4.1 NS-R-2-100-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi
(ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 140 ton için 0.0028 şekildeğiştirme mertebesinde ilk boyuna çatlak gözlenmiştir, Şekil 6.3.4.2a. 130 ton için 0.004 şekildeğiştirme seviyesinde ezilme başlamıştır, Şekil 6.3.4.2b. 146.5 ton için 0.0033 şekildeğiştirme düzeyinde numunenin taşıyabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşılmıştır, bu mertebeden sonra yük düşerken de 2 ton aralıkla 0.014 şekildeğiştirme düzeyine kadar veri alınmıştır, Şekil 6.2.4.2c. Bu şekildeğiştirme düzeyinde numune 50 ton yük taşımıştır. 0.010 şekildeğiştirme seviyesi için boyuna donatılarda önemli derece burkulma gözlenmemiştir. Numune başlığındaki eğim nedeniyle deney sırasında salt eksenel basınç uygulanamamıştır.



(a)



(b)

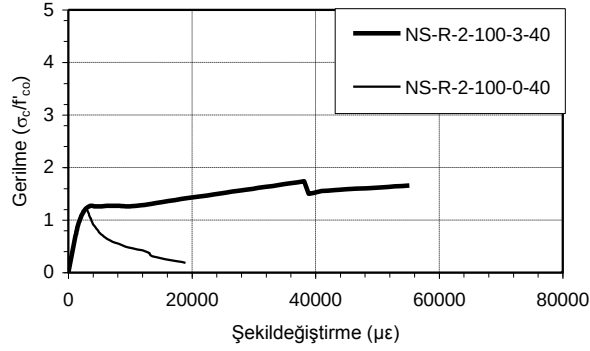


(c)

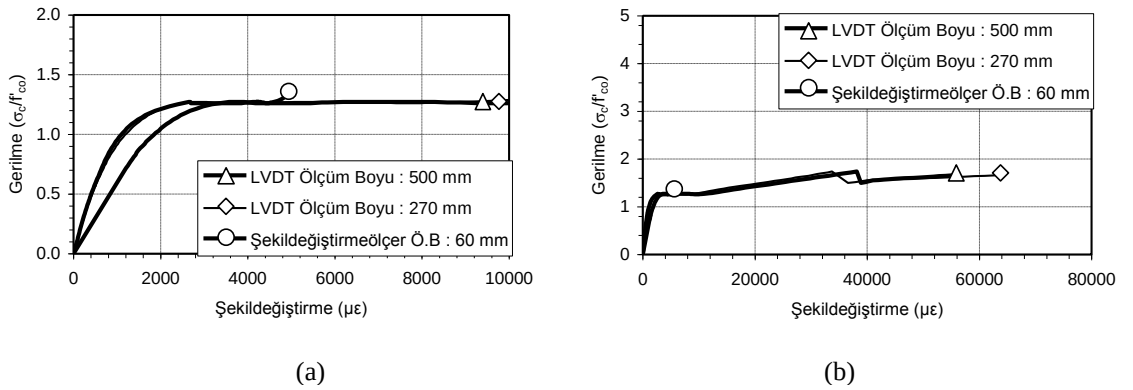
Şekil 6.3.4.2 Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.

6.3.5. NS-R-2-100-3-40

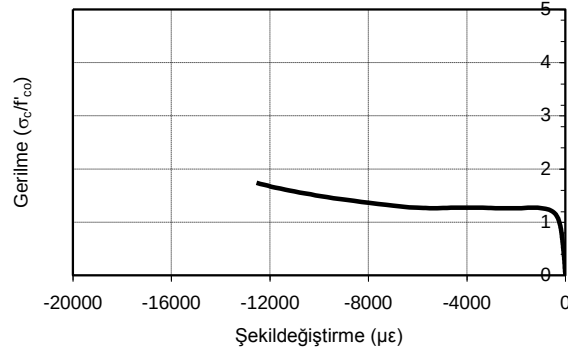
Şekil 6.3.5.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-2-100-0-40 ve NS-R-2-100-3-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.3.5.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-2-100-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.3.5.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.3.5.1 NS-R-2-100-0-40 ve NS-R-2-100-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.3.5.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.3.5.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 206 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.055 ve 0.012 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Bu numunede CFRP tabakasındaki yırtık bir kenarın ortasında oluşmuştur, deney sırasında bu kenarın deformasyonlarının diğer uzun kenara göre daha fazla olduğu tesbit edilmiştir, Şekil 6.3.5.4a. Düşey yırtıklar orta 210 mm'lik kısımda 10 mm ile 60 mm arasında değişen 6-7 yatay parça halinde oluşmuştur, Şekil 6.3.5.4b.



(a)

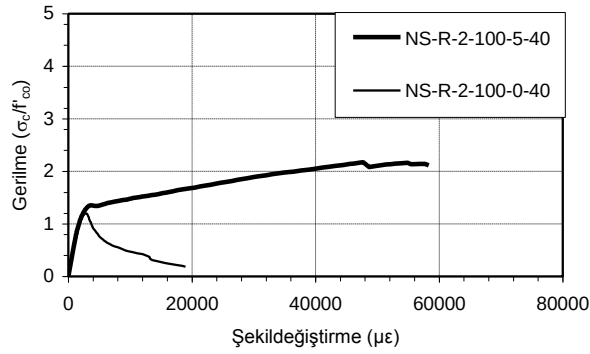


(b)

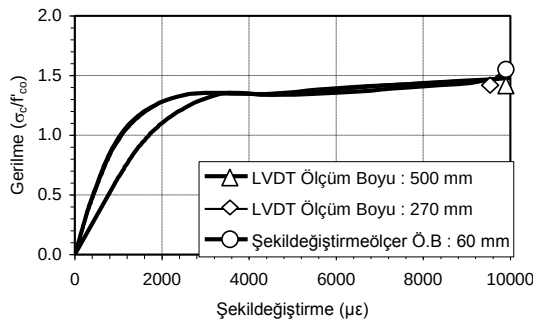
Şekil 6.3.5.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.3.6. NS-R-2-100-5-40

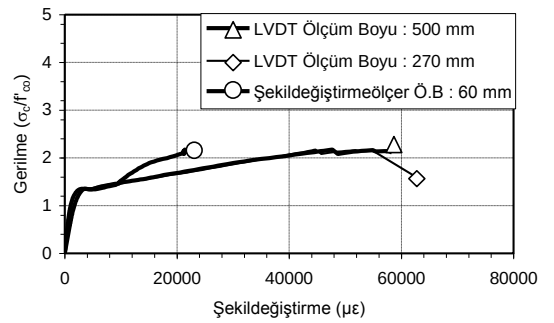
Şekil 6.3.6.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-2-100-0-40 ve NS-R-2-100-5-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.3.6.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-2-100-5-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. 60 ve 270 mm ölçüm boyuna sahip kısımların gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri benzerlik göstermektedir, ancak 500 mm ölçüm boyuna sahip kısmın davranışı diğerlerine göre biraz daha farklılık göstermiştir. Şekil 6.3.6.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.3.6.1 NS-R-2-100-0-40 ve NS-R-2-100-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)

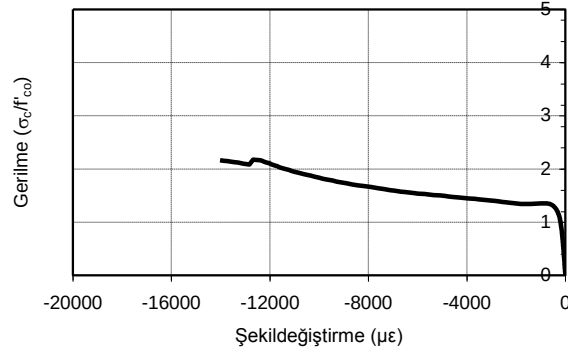


(a)



(b)

Şekil 6.3.6.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.3.6.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

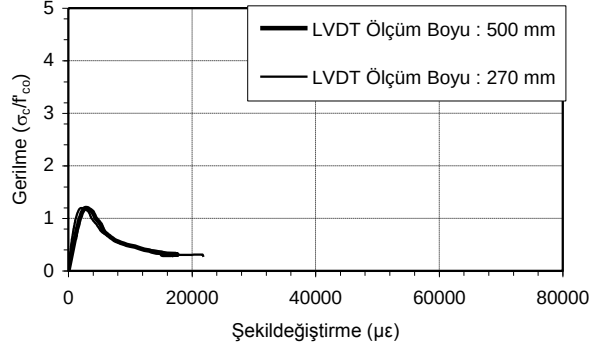
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 254 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.058 ve 0.014 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Düşey yırtıklar numune üstünden 100 mm aşağıda 120 mm'lik kısımda yaklaşık 5 mm ile 70 mm arasında değişen çok sayıda yatay parça halinde uzun kenarın ortasında ve köşenin bittiği yerlerde oluşmuştur, Şekil 6.2.5.4.



Şekil 6.3.6.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.3.7. NS-R-2-050-0-40

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 50 mm etriye aralığına sahip olup köşe yarıçapı 40 mm'dir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 100 ve 175 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.3.7.1 NS-R-2-050-0-40 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi
(ölçüm boyu: 500 mm ve 270 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 114 ton için 0.001 şekildeğiştirme mertebesinde ilk boyuna çatlaklar gözlenmiştir, Şekil 6.3.7.2a. 146 ton için 0.003 şekildeğiştirme seviyesinde ezilme başlamıştır, Şekil 6.3.7.2b. 146 ton için 0.003 şekildeğiştirme mertebesinde numune taşıyabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşmıştır, bu mertebeden sonrada yük düşerken de 2 ton aralıkla 0.018 şekildeğiştirme düzeyine kadar veri alınmıştır, Şekil 6.2.7.2c. bu şekildeğiştirme düzeyinde numunenin taşıdığı yük 48 ton düzeyindeydi. Bu seviyede boyuna donatılarda burkulma gözlenmemiştir. Numune başlığındaki eğim nedeniyle deney sırasında salt eksenel basınç uygulanamamıştır.



(a)



(b)

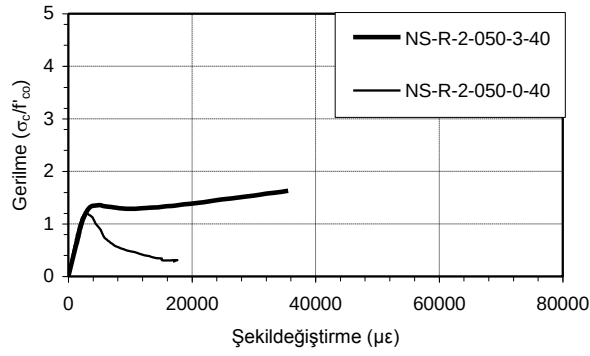


(c)

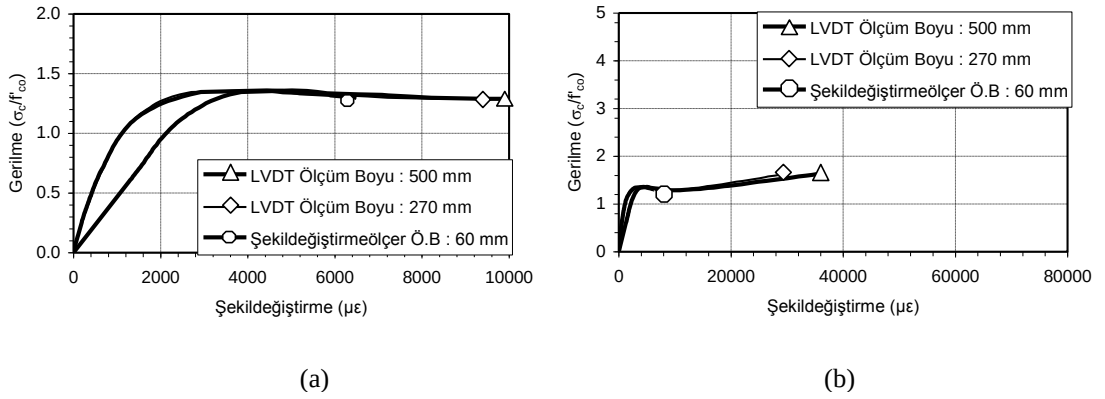
Şekil 6.3.7.2 Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Adımlarındaki Görüntüleri

6.3.8. NS-R-2-050-3-40

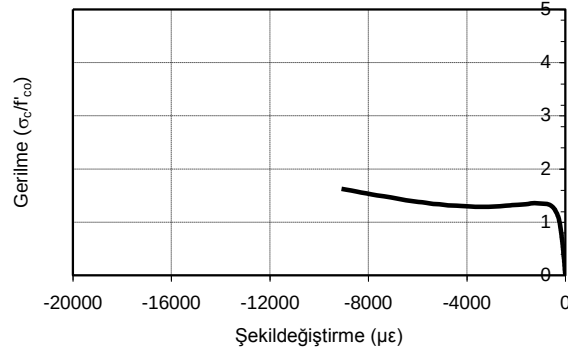
Şekil 6.3.8.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-2-050-0-40 ve NS-R-2-050-3-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin aksenal yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.3.8.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-2-050-3-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.3.8.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.3.8.1 NS-R-2-050-0-40 ve NS-R-2-050-3-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.3.8.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.3.8.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 194 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.036 ve 0.010 şekildeğiştirme düzeylerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Düşey yırtıklar numunenin orta 180 mm'lik kısımda 35 mm ile 90 mm arasında değişen 4-5 yatay parça halinde köşenin bittiği yerde oluşmuştur, Şekil 6.3.8.4.



(a)

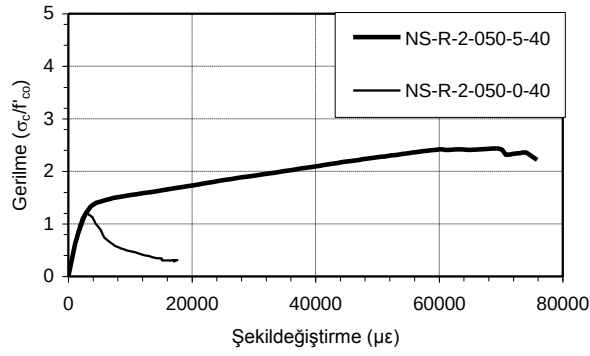


(b)

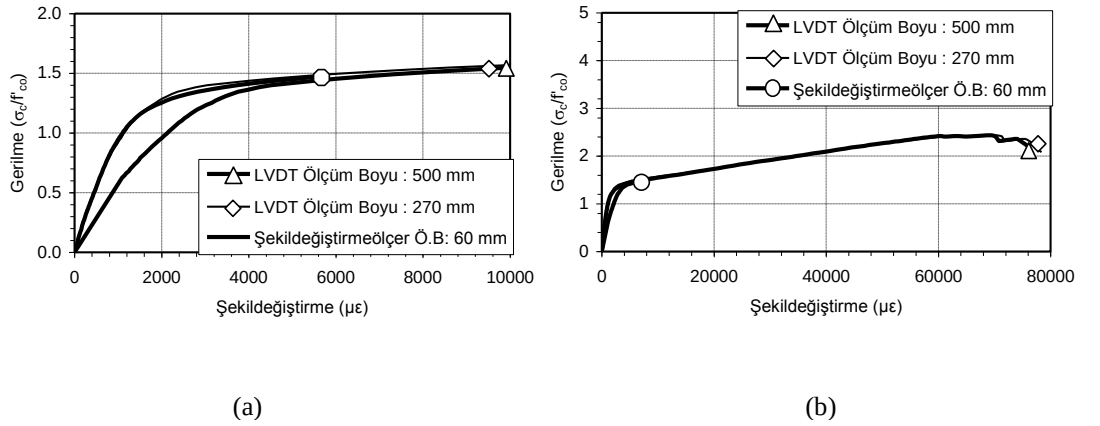
Şekil 6.3.8.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.3.9. NS-R-2-050-5-40

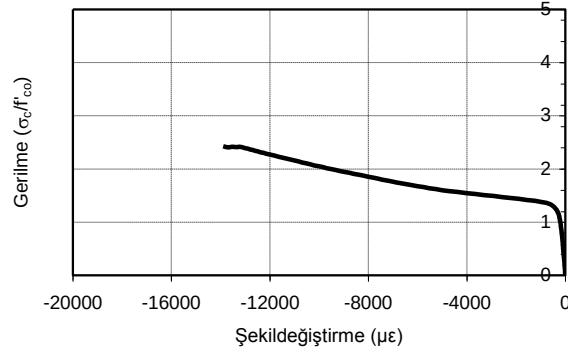
Şekil 6.3.9.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-R-2-050-0-40 ve NS-R-2-050-5-40 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.3.9.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-R-2-050-5-40 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.3.9.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.3.9.1 NS-R-2-050-0-40 ve NS-R-2-050-5-40 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)

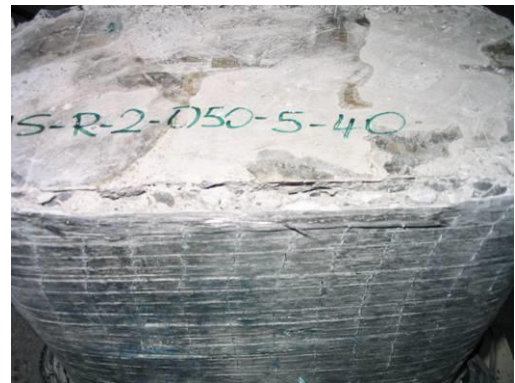


Şekil 6.3.9.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.3.9.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

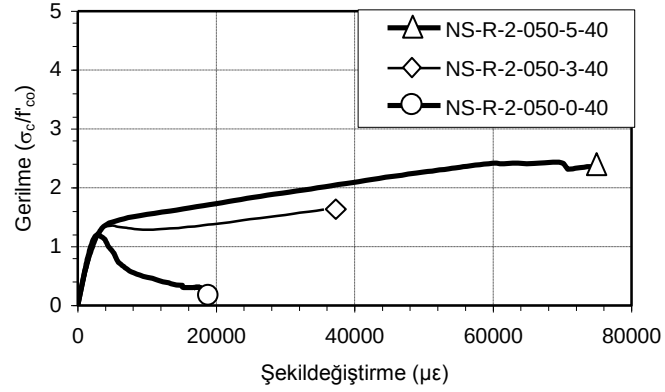
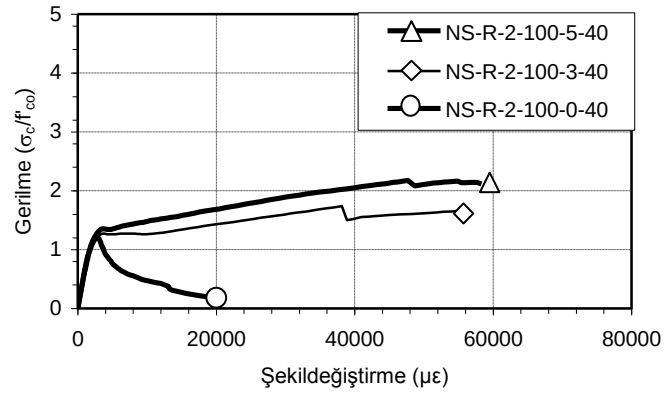
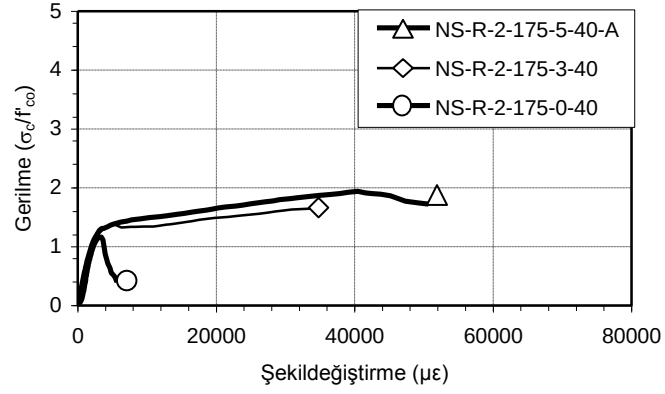
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 283 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.075 ve 0.014 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. Numunenin üst 190 mm'lik kısmında çok fazla sayıda düşey ve yatay yırtıklar oluşmuştur, numunenin üst kısmında CFRP tabaka betondan ayrılmıştır, Şekil 6.3.9.4.



Şekil 6.3.9.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.3.10. KARŞILAŞTIRMALAR

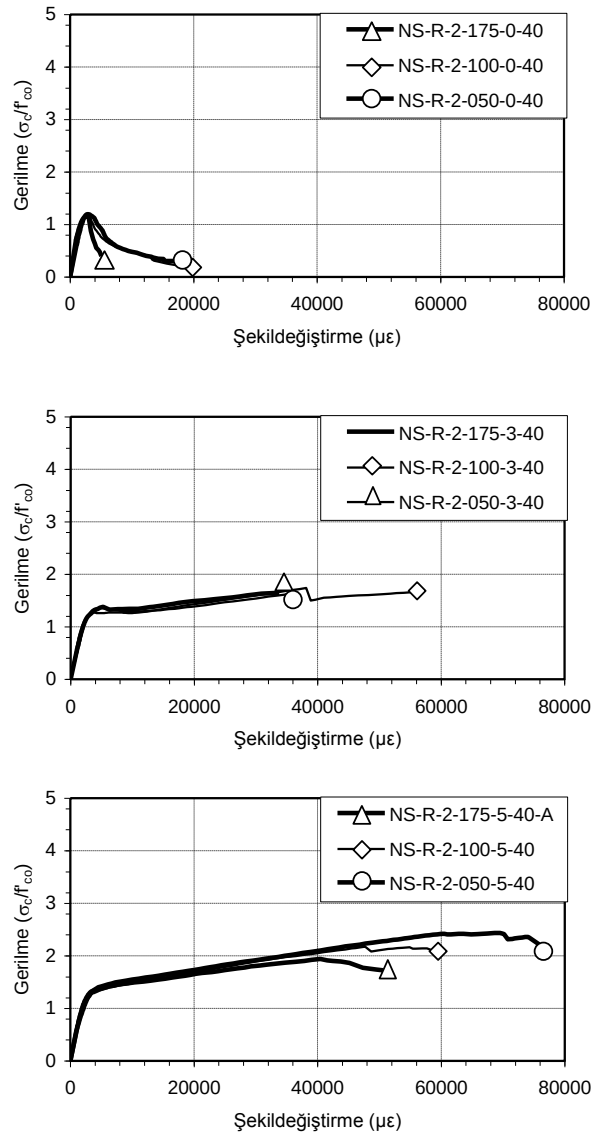
Şekil 6.3.10.1’de aynı özelliğe sahip numunelerde farklı CFRP tabaka kalınlığının davranışa olan etkisinin incelendiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. 175, 100 ve 50 mm etriye aralığı için bu ilişki ayrı ayrı incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde CFRP tabaka kalınlığı arttıkça dayanımın, özellikle de sünekliğin önemli oranda arttığı gözlenmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde, sargılanmamış numunelere göre bir kıyaslama yapılırsa 175 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları sırasıyla 3 ve 5 kat için %73 ve %104, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1600 ve %1950, 100 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları %83 ve %129, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1850 ve %2300, 50 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımlarının %71 ve %155, eksenel şekildeğiştirme kapasitelerinin %1700 ve %3350 mertebelerine kadar arttığı gözlenir, Tablo 6.3.10.1.



Şekil 6.3.10.1 Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığının Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

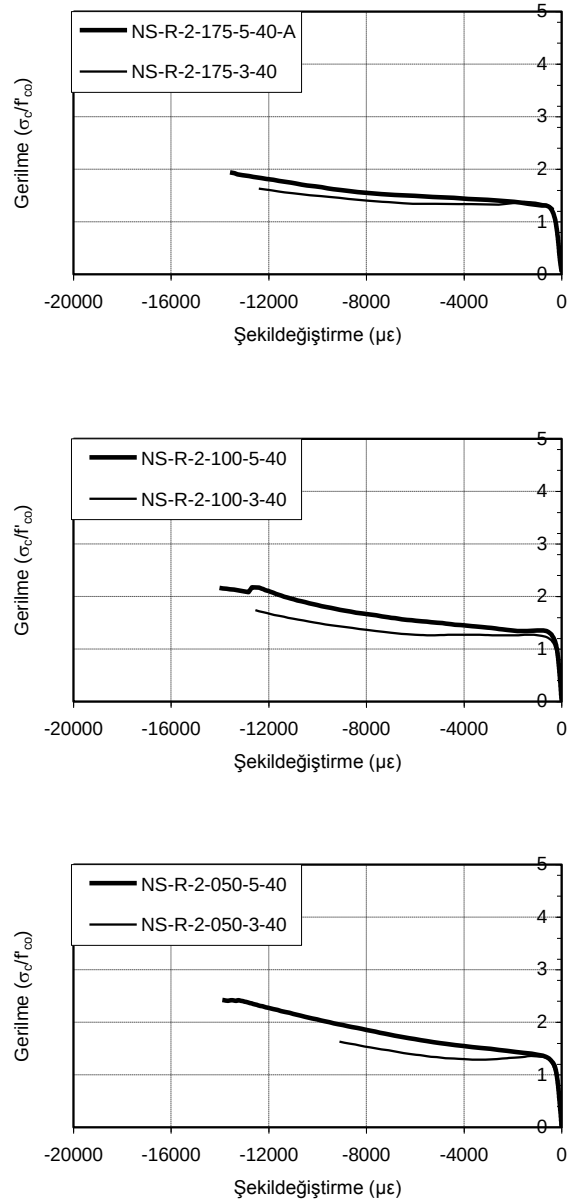
Şekil 6.3.10.2’de aynı CFRP sargı kalınlığına sahip numunelerde etriye aralığının davranışa olan etkisini ifade eden gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini gösteren grafikler verilmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde eğrilerin benzer eğilim gösterdiği gözlenmiştir. Aynı sargı kalınlığına sahip numunelerde etriye aralığı değişimi dayanımı ve eksenel şekildeğiştirme kapasitesini önemli oranda

değiştirmemektedir, ancak CFRP tabakasıyla sargılanmamış numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi incelenirse 175 mm etriye aralığına sahip numunenin 50 ve 100 mm etriye aralığına sahip numunelere göre daha gevrek bir davranış gösterdiği gözlenmektedir. Sargılanmış numunelerin gösterdiği benzer eğilim CFRP tabakalarının sargılama etkisinin yeterince fazla olduğunu, enine sargı donatısının miktarının değişiminin davranışa fazla etkisi olmadığını göstermektedir. 3 ve 5 kat sargılanmış numunelere bakıldığı zaman farklı etriye aralığına sahip numunelerin elastisite modüllerinin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir.



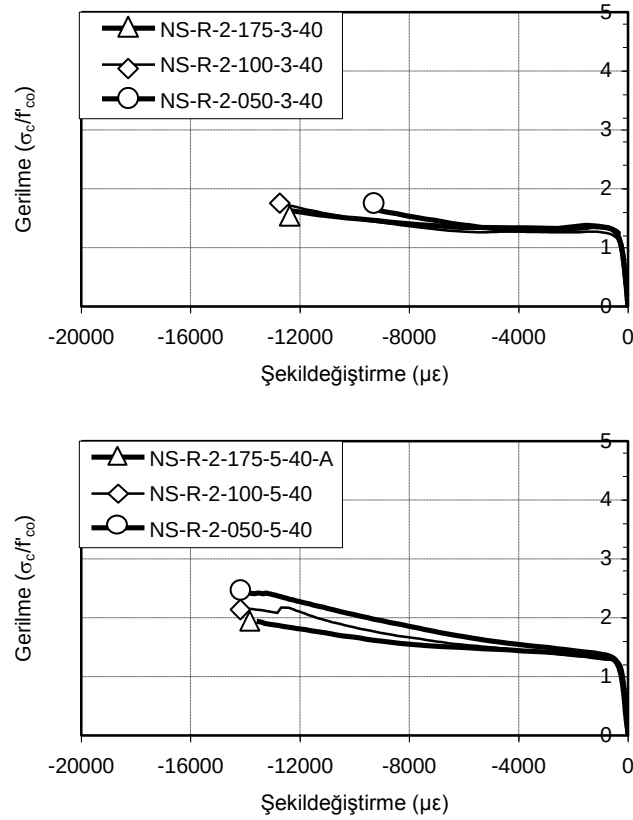
Şekil 6.3.10.2 Farklı CFRP Kalınlıklarında Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Şekil 6.3.10.3’de aynı özelliğe sahip 3 ve 5 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerin enine doğrultudaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde enine şekildeğiştirmelerin CFRP tabaka kalınlığından bağımsız olduğu gözlenmektedir. Enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler 175 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0135, 100 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0140, 50 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0110 düzeyindedir.



Şekil 6.3.10.3 Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığı Artışının Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Şekil 6.3.10.4’de aynı sargı kalınlığına sahip, etriye aralığı değişen numunelere ait gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri grafiklerle sunulmuştur. Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri incelendiği zaman etriye aralığı değişiminin dayanım ve enine şekil değiştirme kapasitelerini önemli oranda artırmadığı gözlenmiştir. Farklı etriye aralığına sahip numunelere ait gerilme-enine şekil değiştirme eğrileri benzer eğilim göstermiştir, bu eğilim CFRP tabakasının sargılama etkisinin çok yüksek mertebelerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.3.10.4 Farklı CFRP Aralıklarında Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekil değiştirme İlişkisine Etkisi

Tablo 6.3.10.1 Orijinal ve Güçlendirilmiş Numunelerin Dayanım ve Şekildeğiştirmeleri

Numune	f'_{co} MPa	f'_{coj} MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{co} 500 mm	ϵ_{co} 270 mm	ϵ_{cu}	ϵ_{chs} 60 mm	ϵ_{chl} 60 mm	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
NS-R-2-050-0-40	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-2-100-0-40	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-2-175-0-40	29.64	25.19	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-2-050-3-40	27.58	23.44	0.002	40.15	40.15	0.036	0.030	0.036	0.005	0.012	71	1700
NS-R-2-100-3-40	27.58	23.44	0.002	42.84	40.82	0.039	0.034	0.055	0.013	0.012	83	1850
NS-R-2-175-3-40	27.58	23.44	0.002	40.63	40.63	0.034	0.038	0.034	0.011	0.013	73	1600
NS-R-2-050-5-40	27.58	23.44	0.002	59.99	57.89	0.069	0.069	0.074	0.014	0.014	155	3350
NS-R-2-100-5-40	27.58	23.44	0.002	53.63	52.15	0.048	0.045	0.058	0.012	0.014	129	2300
NS-R-2-175-5-40	27.58	23.44	0.002	47.81	42.46	0.041	0.034	0.050	0.015	0.012	104	1950

¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımlarıdır.

² : ϵ_{ch} değerleri, şekildeğiştirmeölçerler ile alınabilen en büyük enine şekildeğiştirme değerleridir.

Numune	Hasarın Oluştuğu Yer	Düşey Yırtık Uzunluğu ve Sayısı	Yatay Yırtık Genişliği ve Sayısı	Diğer Gözlemler	
NS-R-2-050-3-40	Orta 180 mm’de köşenin bittiği yerde	180 mm ve 5 farklı kesitte	35-90 mm arasında 4-5 yatay parça	Numune imalatı çok iyi değil. Epoksi yetersiz.	
NS-R-2-100-3-40	Orta 200mm’de numune uzun kenarının ortasında	200mm ve 3 farklı kesitte	10-60 mm arasında 6-7 yatay parça	-	
NS-R-2-175-3-40	Orta 190mm’de köşenin bittiği yerde ve ortada	2190 mm ve 3 farklı kesitte	30-90 mm arasında 3 yatay parça	Deney sırasında 160 t yük seviyesinde numune uzun kenarlarından birinde orta kısımda lokal burkulma gözlemlendi.	
NS-R-2-050-5-40	Üst 190mm’de çok çok fazla sayıda ve farklı kesitte	190 mm ve çok farklı kesitte	İnce lifler halinde çok parçalı	-	
NS-R-2-100-5-40	Orta 120 mm’lik kısımda köşenin bittiği yerde ve uzun kenarın ortasında	120 mm ve 4 farklı kesitte	5-70 mm arasında çok fazla sayıda yatay parça	Numune imalatı çok iyi değil. Epoksi yetersiz.	
NS-R-2-175-5-40-A	Orta 200mm’de köşenin bittiği yerde ve ortada	200 mm ve 3 farklı kesitte	20-80 mm arasında çok parçalı	-	

6.4. DAİRE ENKESİTLİ NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

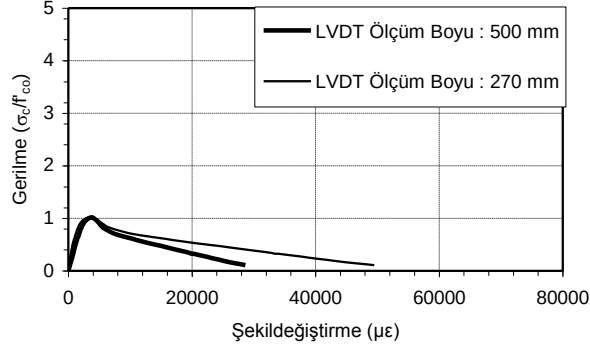
Bu seride ortalama 28 günlük standart silindir basınç dayanımları 24 MPa olan 250×500 mm boyutlarında daire enkesitli 9 adet betonarme numunenin 3 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumda denenmiş, 3 adedi 3 kat, 3 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiştir. Bu seride numunelerin bir kısmı monoton artan bir kısmı ise tekrarlı artan yükler altında denenmiştir. Numunelerin genel özellikleri, Tablo 1.3. ve Tablo 4.1.3’de verilmiştir.

Deneyler sırasında yerdeğiştirmeölçerler kullanılarak numunelerin tüm boyundan (Ö.B = 500 mm), orta 270 mm’lik test bölgesinden, yüzeydeki (Ö.B = 60 mm) ve donatılardaki (Ö.B = 3 mm ve Ö.B = 5 mm) şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla hem enine doğrultudaki hem boyuna doğrultudaki şekildeğiştirmeler ölçülmüş ve elde edilen değerlerle boyutsuz gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri grafiklerle sunulmuştur.

Bu grafiklerde dikey eksen. numuneye deney sırasında etkiyen gerilmenin (σ_c), söz konusu numunenin orijinal basınç dayanımına (f'_{co}) oranını temsil eden boyutsuz. σ_c/f'_{co} oranıdır. σ_c değeri tüm numuneye deney sırasında etkiyen yüklerden donatının aldığı gerilme çıkarılarak bulunur. Grafiklerdeki yatay eksen ise şekildeğiştirmeyi (ϵ) göstermektedir, şekildeğiştirmenin birimi microstrain ($\mu\epsilon$) olarak verilmiştir.

6.4.1. NS-C-145-0

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 145 mm etriye aralığına sahiptir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 50 ve 100 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.4.1.1 NS-C-145-0 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi
(ölçüm boyu: 500 ve 270 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 140 ton için 0.004 şekildeğiştirme mertebesinde ezilme başlamıştır, Şekil 6.4.1.2a. 142.5 ton yük seviyesinde numune taşıyabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşmıştır. Yük azalırken 130 ton için 0.005 şekildeğiştirme seviyesinde ilk çatlak gözlenmiştir, Şekil 6.4.1.2b. Numune 0.015 şekildeğiştirme seviyesine ulaştığı adımda numune boyuna donatılarında burkulma gözlenmiştir. Bu mertebeden sonrada yük düşerken de 2 ton aralıkla 0.05 şekildeğiştirme düzeyine kadar veri alınmıştır, Şekil 6.4.1.2c.



(a)

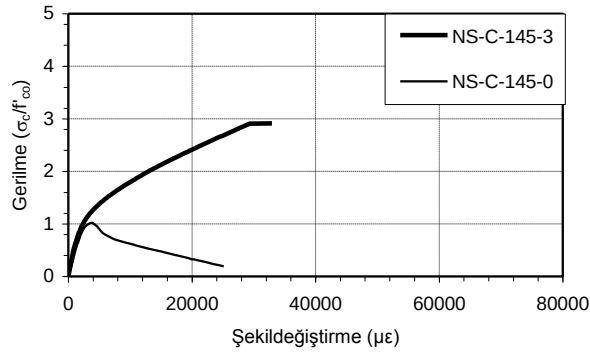
(b)

(c)

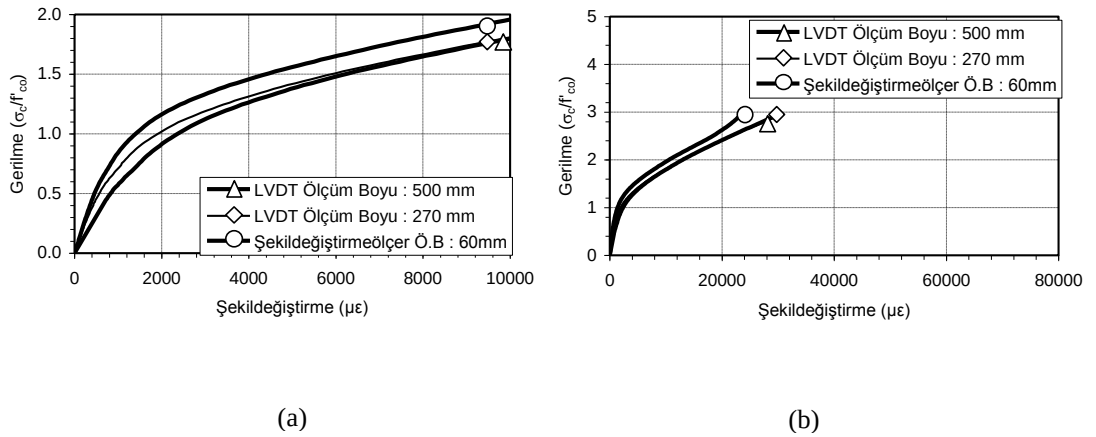
Şekil 6.4.1.2 Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.

6.4.2. NS-C-145-3

Şekil 6.4.2.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-C-145-0 ve NS-C-145-3 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin hem eksenel yük taşıma kapasitesinin, hem de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.4.2.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-C-145-3 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir. Şekil 6.4.2.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



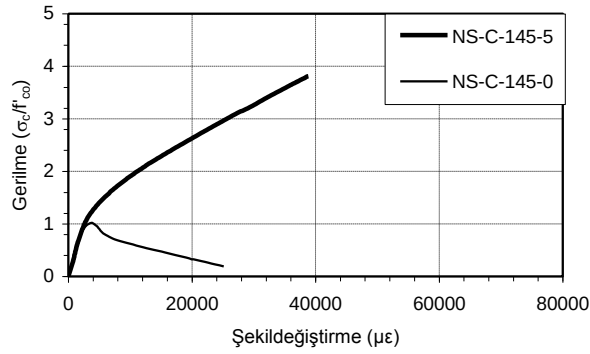
Şekil 6.4.2.1 NS-C-145-0 ve NS-C-145-3 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



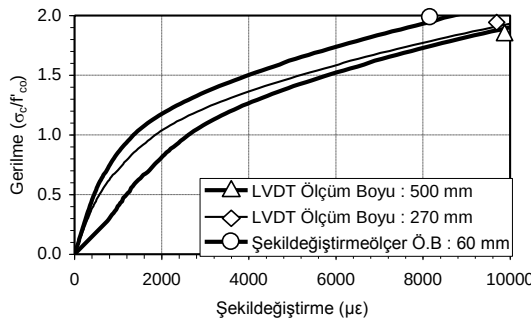
Şekil 6.4.2.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.

6.4.3. NS-C-145-5

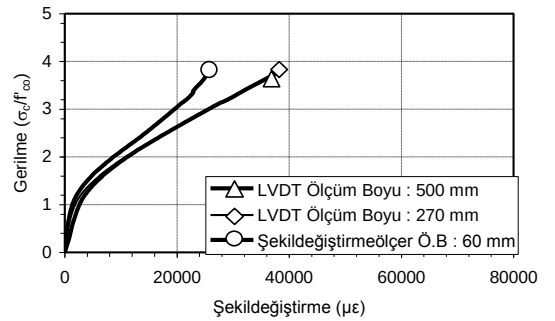
Şekil 6.4.3.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-C-145-0 ve NS-C-145-5 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin hem eksenel yük taşıma kapasitesinin, hem de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir, Şekil 6.4.3.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-C-145-5 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir, Şekil 6.4.3.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.4.3.1 NS-C-145-0 ve NS-C-145-5 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)

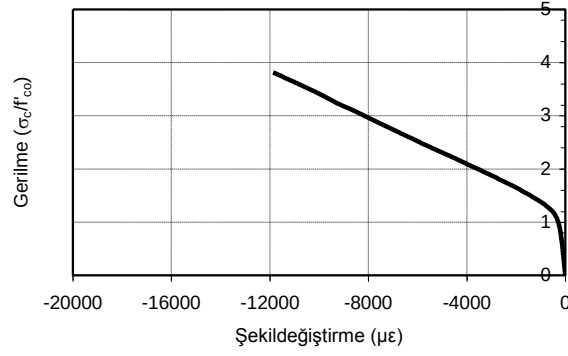


(a)



(b)

Şekil 6.4.3.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.4.3.3 Gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi

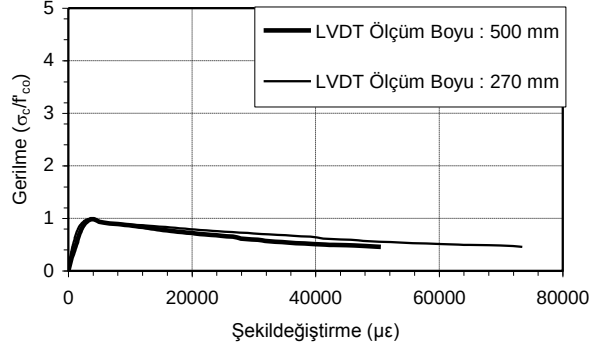
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 487 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.039 ve 0.012 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık 130 mm'lik kısımda genişliği 5 mm ile 50 mm arasında değişen çok sayıda lif şeklinde oluşmuştur, Şekil 6.4.3.4.



Şekil 6.4.3.4 Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri

6.4.4. NS-C-100-0

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 100 mm etriye aralığına sahiptir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 50 ve 145 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.4.4.1 NS-C-100-0 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi
(ölçüm boyu: 500 ve 270 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 100 ton için 0.001, 125 ton için 0.002 boyuna şekildeğiştirme mertebelerine ulaşılmıştır, Şekil 6.4.4.2a, 6.4.4.2b, 138 ton yük seviyesinde numune taşıyabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşmıştır. Yük azalırken 124 ton için 0.01, 114 ton için 0.03 ve 105 ton için 0.02 şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. bu adımdan sonra boyuna donatılarda burkulma gözlenmiştir, Şekil 6.4.4.2c.



(a)

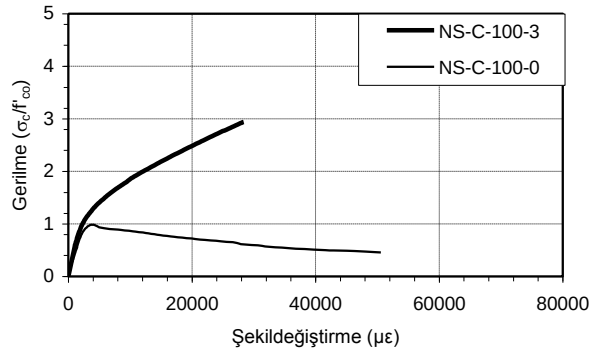
(b)

(c)

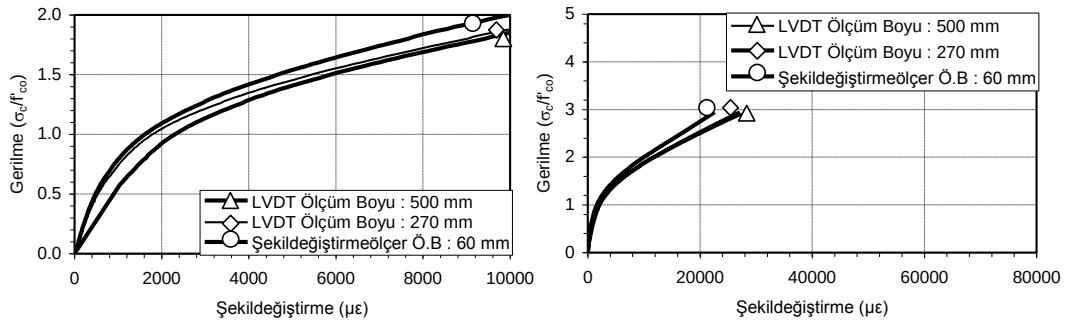
Şekil 6.4.4.2 Numunenin Çeşitli Şekildeğiştirme Mertebelerindeki Görüntüleri.

6.4.5. NS-C-100-3

Şekil 6.4.5.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-C-100-0 ve NS-C-100-3 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.4.5.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-C-100-3 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir, Şekil 6.4.5.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



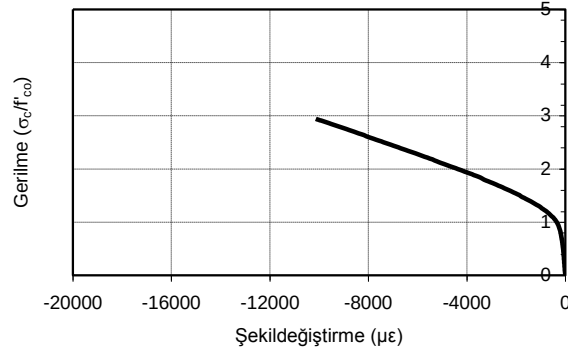
Şekil 6.4.5.1 NS-C-100-0 ve NS-C-100-3 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



(a)

(b)

Şekil 6.4.5.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.4.5.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

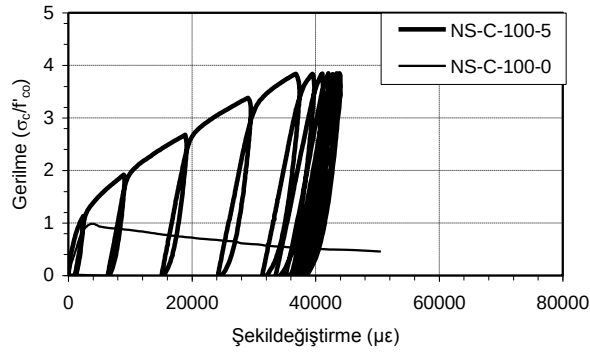
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 378 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.028 ve 0.010 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık 230 mm'lik kısımda düşeyde üç farklı kesitte olmak üzere genişliği 20 mm ile 70 mm arasında değişen 6-7 yatay parça şeklinde oluşmuştur, Şekil 6.4.5.4.



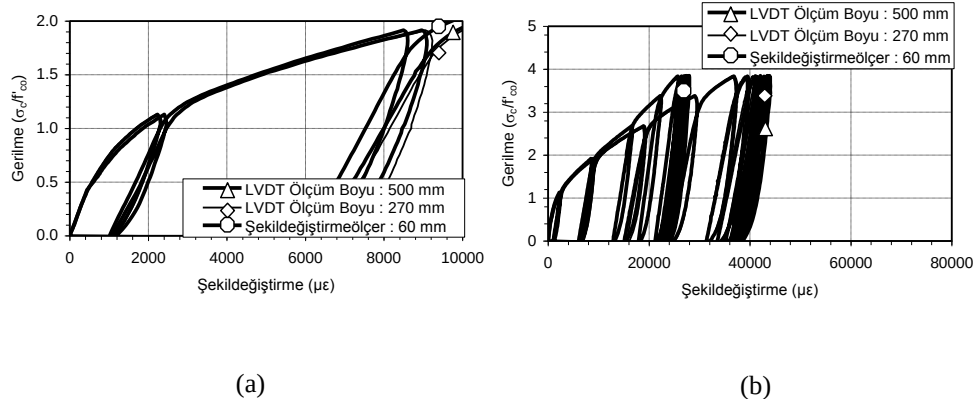
Şekil 6.4.5.4 Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri

6.4.6. NS-C-100-5

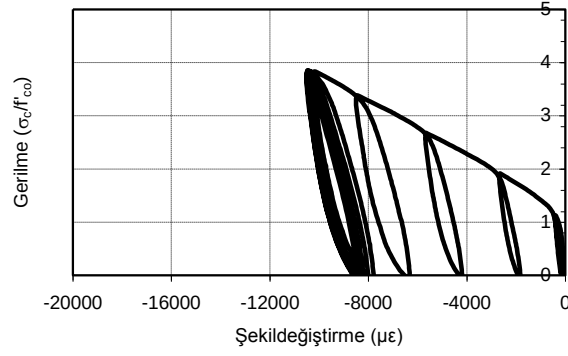
Bu numune diğer numunelerden farklı olarak tekrarlı artan yükler altında denenmiştir ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Şekil 6.4.6.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-C-100-0 ve NS-C-100-5 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir, Şekil 6.4.6.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-C-100-5 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir, Şekil 6.4.6.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.4.6.1 NS-C-100-0 ve NS-C-100-5 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)

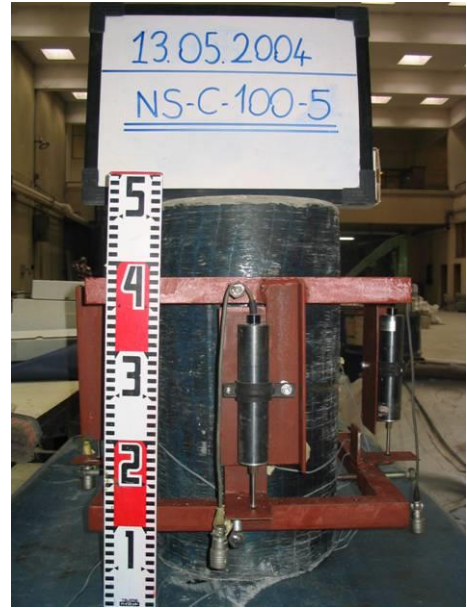


Şekil 6.4.6.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.4.6.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

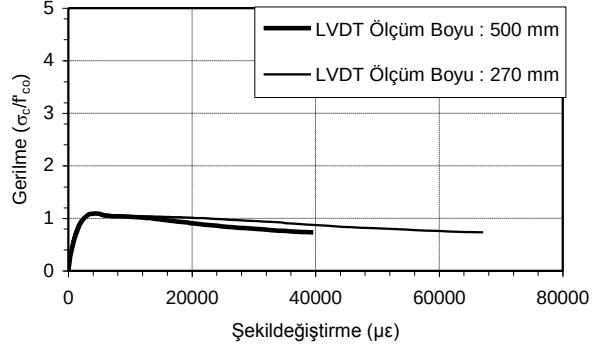
Numuneye uygulanan en büyük eksenel yük 487 t olmuştur. Bu deneyde yükleme aletinin kapasitesi numuneyi taşıma gücüne ulaştırmaya yetmemiştir. Yükleme aletinin uygulayabileceği en büyük yük değerine ulaşılan kadar sırasıyla 0.003, 0.01, 0.02, 0.03 ve 0.04 şekildeğiştirme seviyelerine kadar tekrarlı yükleme yapılmıştır. Yükleme aletinin uygulayabileceği en büyük yük değerine ulaşıldıktan sonra bu mertebede 6 çevrim daha uygulanmıştır ve toplam 11 çevrim sonunda deneye son verilmiştir. Bu çevrimler sonunda numune 0.045 boyuna ve 0.010 enine doğrultuda şekildeğiştirme yapmıştır. ancak numune taşıma gücünü ulaşamadığı için göçme olmamıştır, Şekil 6.4.6.4.



Şekil 6.4.6.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.4.7. NS-C-050-0

Aşağıda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilen numune 50 mm etriye aralığına sahiptir. Bu numune kendisiyle özdeş 3 ve 5 kat sargılanarak güçlendirilen numunelerle ve etriye aralığı 100 ve 145 mm olan numunelerle karşılaştırılabilmek amacıyla orijinal durumda denenmiştir.



Şekil 6.4.7.1 NS-C-050-0 Gerilme–Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi
(ölçüm boyu: 500 ve 270 mm)

Deney sırasında 2 ton aralıkla veri alınmıştır. 0.002 şekildeğiştirme seviyesinde numunede ilk düşey çatlaklar gözlenmiştir, 0.0025-0.003 şekildeğiştirme düzeyleri arasında numunede ezilme başlamıştır. 151 t için 0.005 şekildeğiştirme seviyesinde numune taşıyabileceği en büyük yük değerine ulaşmıştır, 0.007-0.008 şekildeğiştirme mertebelerinde beton örtüsü dökülmeye başlamıştır, Şekil 6.4.7.2a. 0.02 şekildeğiştirme seviyesinde boyuna donatılarda burkulma gözlenmiştir, Şekil 6.4.7.2b.



(a)

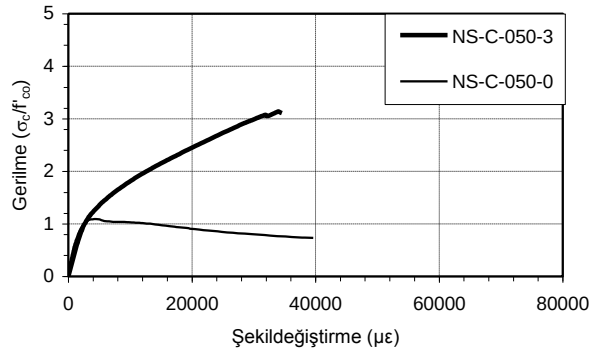


(b)

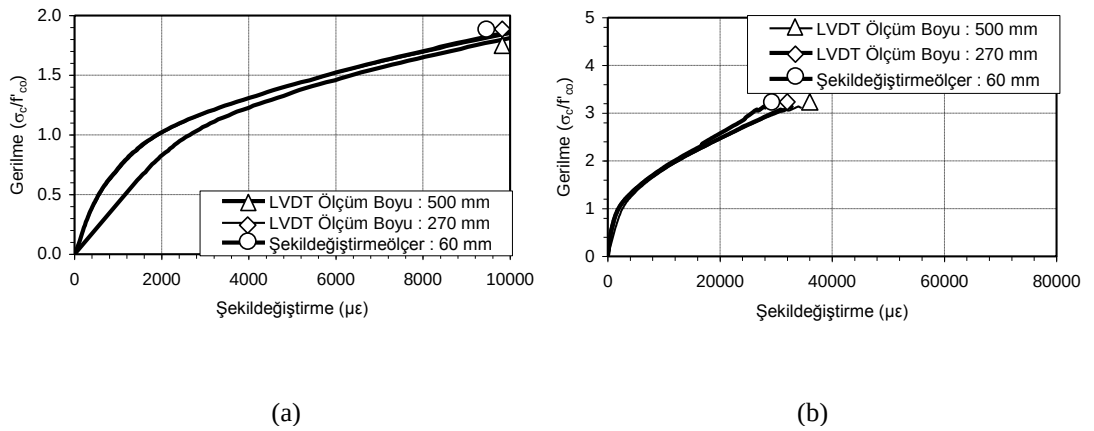
Şekil 6.4.7.2. Deney Sırasındaki Çeşitli Adımlardaki Görüntüler

6.4.8. NS-C-050-3

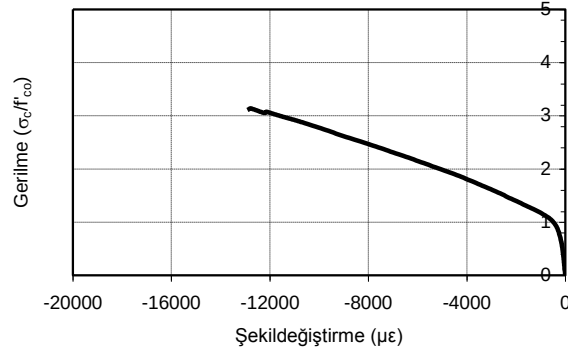
Şekil 6.4.8.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 3 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-C-050-0 ve NS-C-050-3 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.4.8.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-C-050-3 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir, Şekil 6.4.8.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir. Orijinal olarak denenen numunelerde enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler fazla olmayacağı için ölçüm alınmamıştır.



Şekil 6.4.8.1 NS-C-050-0 ve NS-C-050-3 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)

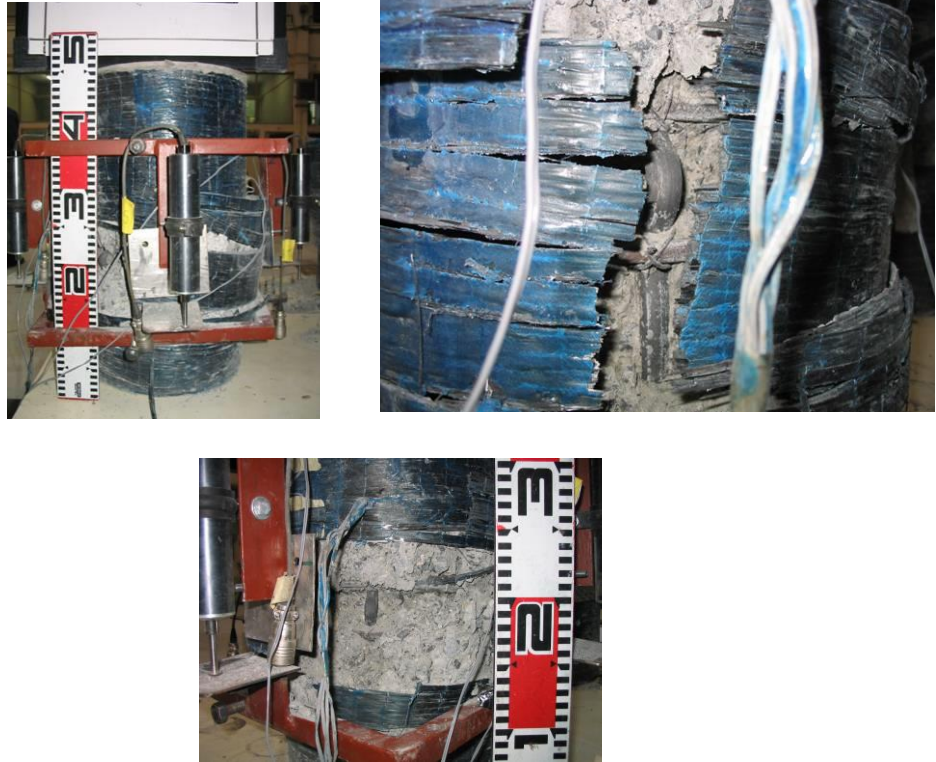


Şekil 6.4.8.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.4.8.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

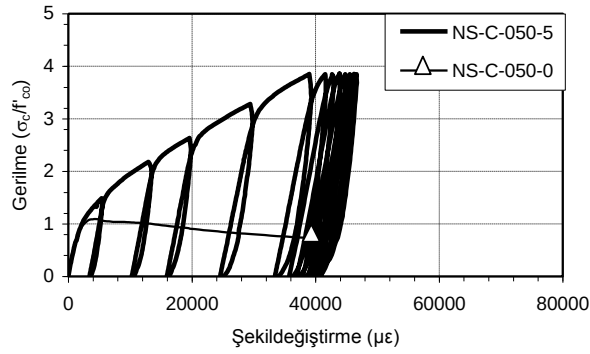
Numunenin taşıyabildiği en büyük yük 403 t olmuştur. Bu mertebede sırasıyla boyuna ve enine doğrultuda 0.035 ve 0.013 şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Numune taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP yırtılmış ve göçme oluşmuştur. CFRP tabakasındaki yırtık 170 mm'lik kısımda düşeyde bir büyük 130 mm ve bir küçük 40 mm olmak üzere iki farklı kesitte, genişliği 10 mm ile 35 mm arasında değişen 6-7 yatay parça şeklinde oluşmuştur, Şekil 6.4.8.4.



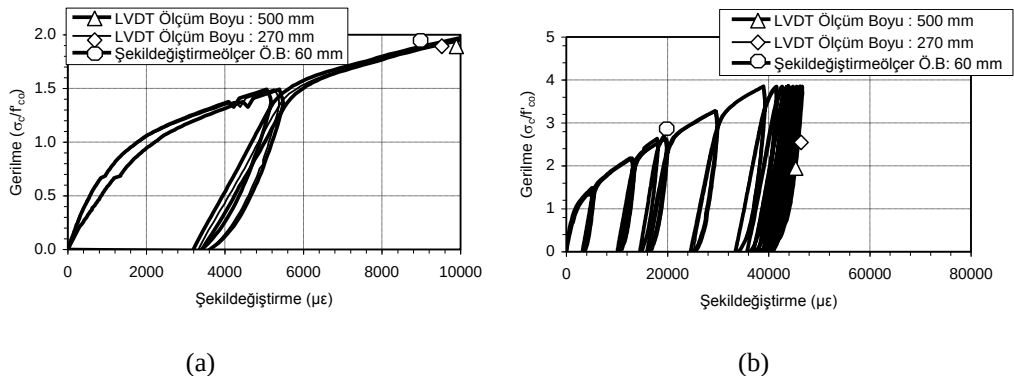
Şekil 6.4.8.4 Numunenin Deney Sonrasındaki Görüntüleri

6.4.9. NS-C-050-5

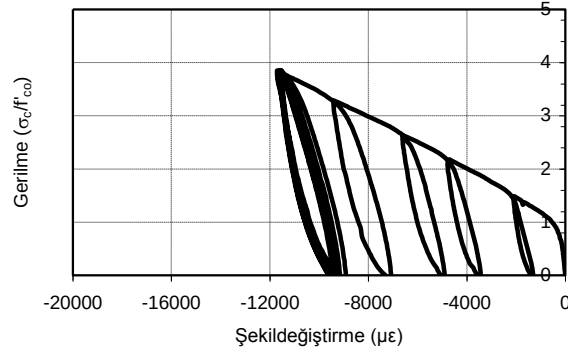
Bu numune diğer numunelerden farklı olarak tekrarlı artan yükler altında denenmiştir ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Şekil 6.4.9.1’de aynı kesit şekline, donatı iskeletine ve beton kalitesine sahip, orijinal haldeki ve 5 kat enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş NS-C-050-0 ve NS-C-050-5 numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman güçlendirilmiş numunenin eksenel yük taşıma kapasitesinin, özellikle de sünekliğinin önemli oranda arttığı gözlenmektedir. Şekil 6.4.9.2a ve b’de farklı ölçüm boyları için NS-C-050-5 numunesine ait başlangıç ve tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Farklı ölçüm boylarında da birbirine çok yakın davranış gözlenmiştir, Şekil 6.4.9.3’de enine doğrultudaki gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.4.9.1 NS-C-050-0 ve NS-C-050-5 Gerilme-Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri (ölçüm boyu: 500 mm)



Şekil 6.4.9.2 500, 270 ve 60 mm Ölçüm Boyları İçin Başlangıç (a) ve Tam (b) Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.



Şekil 6.4.9.3 Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

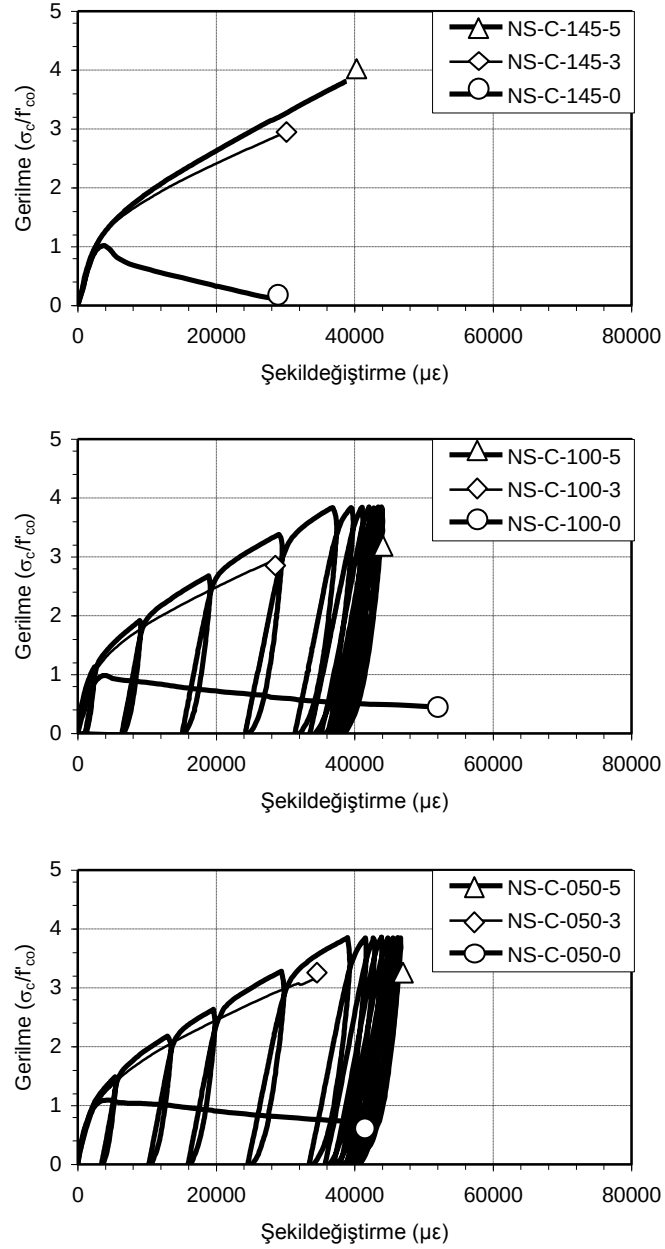
Numuneye uygulanan en büyük 490 t olmuştur. Bu deneyde yükleme aletinin kapasitesi numuneyi taşıma gücüne ulaştırmaya yetmemiştir. Yükleme aletinin uygulayabileceği en büyük eksenel yük değerine ulaşılan kadar sırasıyla 0.005, 0.01, 0.02, 0.03 ve 0.04 şekildeğiştirme seviyelerine kadar tekrarlı yükleme yapılmıştır. Yükleme aletinin uygulayabileceği en büyük yük değerine ulaşıldıktan sonra bu mertebede 6 çevrim daha uygulanmıştır ve toplam 11 çevrim sonunda deneye son verilmiştir. Bu çevrimler sonunda numune 0.047 boyuna ve 0.012 enine doğrultuda şekildeğiştirme değerlerine ulaşmıştır, ancak numune taşıma gücünü ulaşamadığı için göçme olmamıştır, Şekil 6.4.9.4.



Şekil 6.4.9.4 Numunenin Deney Öncesi ve Sonrasındaki Görüntüleri

6.4.10. KARŞILAŞTIRMALAR

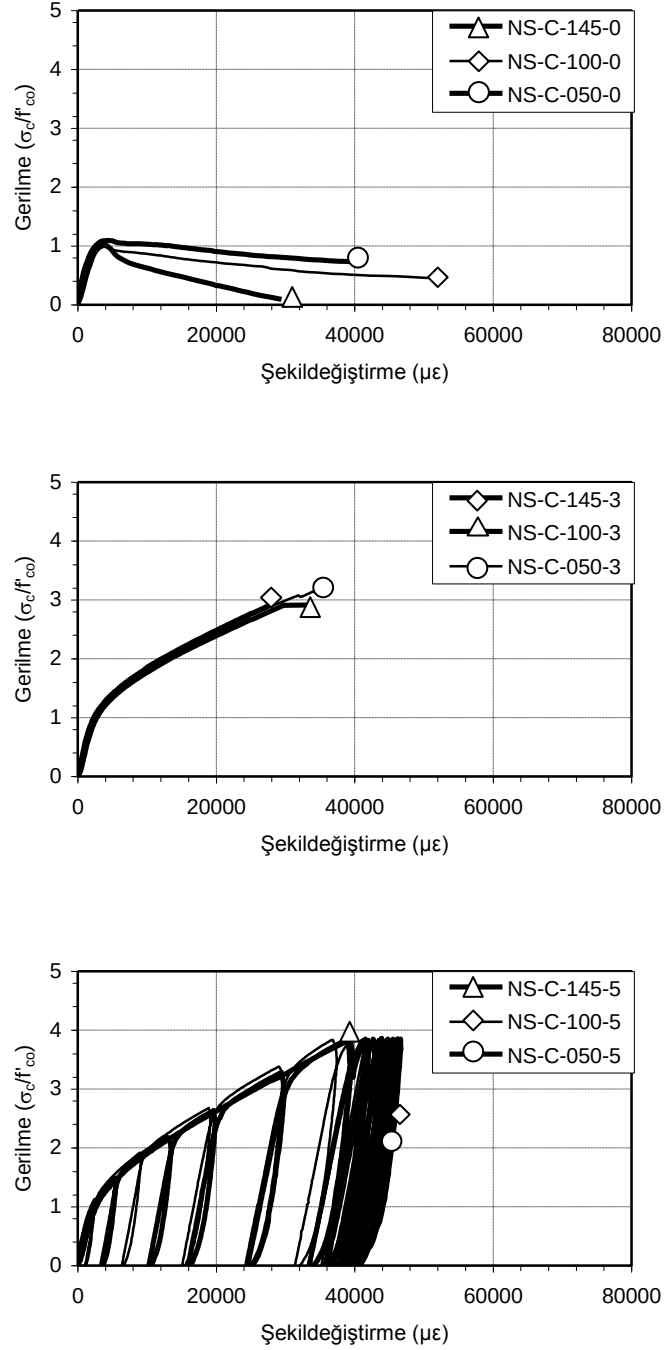
Şekil 6.4.10.1’de aynı özelliğe sahip numunelerde farklı CFRP tabaka kalınlığının davranışa olan etkisinin incelendiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. 145, 100 ve 50 mm etriye aralığı için bu ilişki ayrı ayrı incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde CFRP tabaka kalınlığı arttıkça dayanımın, özellikle sünekliğin önemli oranda arttığı gözlenmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde sargılanmamış numunelere göre bir kıyaslama yapıldığında 145 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları sırasıyla 3 ve 5 kat için %206 ve %302 eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1550 ve %2100, 100 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları %210 ve %304, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1350 ve %2050, 50 mm etriye aralığına sahip numunelerin dayanımları %230 ve %305, eksenel şekildeğiştirme kapasiteleri %1600 ve %2100 arttığı gözlenmiştir, Tablo 6.4.10.1.



Şekil 6.4.10.1 Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığının Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

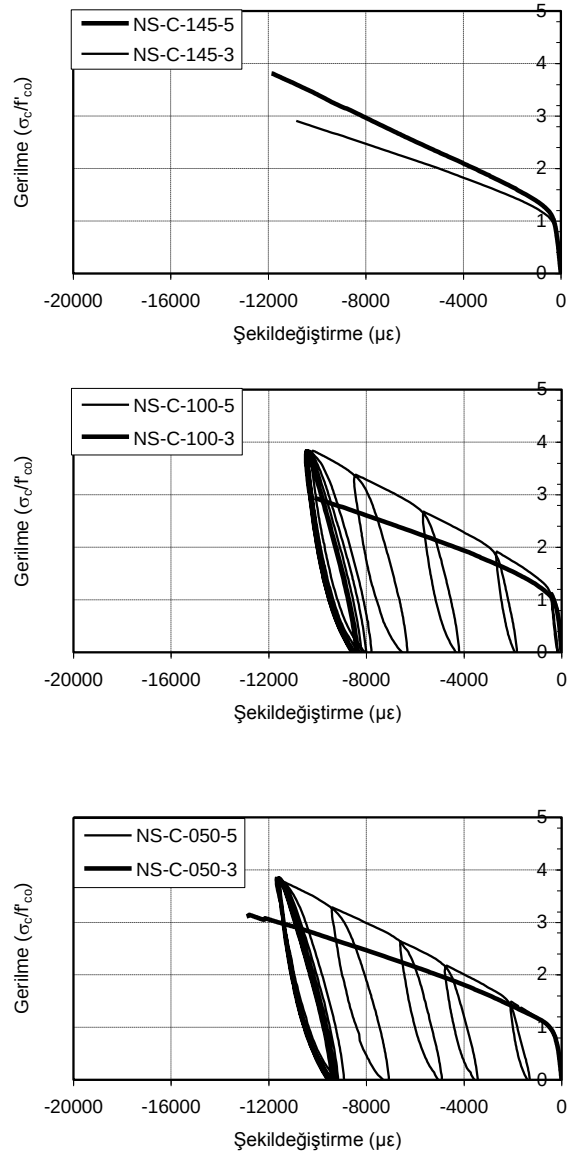
Şekil 6.4.10.2’de aynı CFRP sargı kalınlığına sahip numunelerde etriye aralığının davranışa olan etkisini ifade eden gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini gösteren grafikler verilmiştir. Gerime-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde eğrilerin benzer eğilim gösterdiği gözlenmiştir. Aynı sargı kalınlığına sahip numunelerde etriye aralığı değişimi dayanımı ve eksenel şekildeğiştirme kapasitesini önemli oranda değiştirmemektedir. Bu eğilim CFRP tabakalarının sargılama etkisinin yeterince

fazla olduğunu. enine sargı donatısının miktarının değişiminin davranışa fazla etkisi olmadığını göstermektedir. 3 ve 5 kat sargılanmış numunelere bakıldığı zaman farklı etriye aralığına sahip numunelerin elastisite modüllerinin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir.



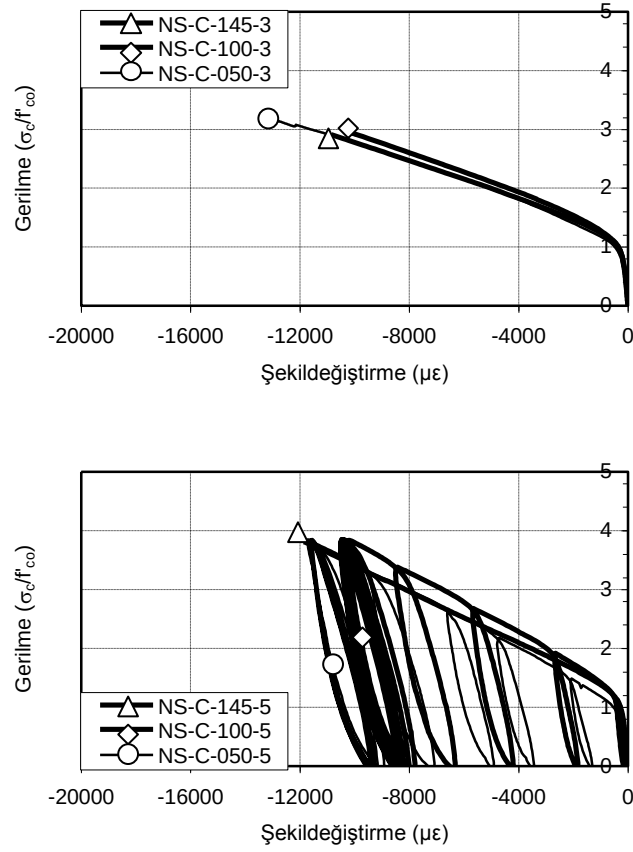
Şekil 6.4.10.2 Farklı CFRP Kalınlığına Sahip Numunelerde Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Şekil 6.4.10.3’de aynı özelliğe sahip 3 ve 5 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerin enine doğrultudaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde enine doğrultuda şekildeğiştirmelerin CFRP tabaka kalınlığından bağımsız olduğu gözlenmektedir. Enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler 145 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0115, 100 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0110, 50 mm etriye aralığına sahip numuneler için ortalama 0.0120 düzeyindedir.



Şekil 6.4.10.3 Farklı Etriye Aralıklarında CFRP Sargı Kalınlığı Değişiminin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkisine Etkisi

Şekil 6.4.10.4’de aynı sargı kalınlığına sahip, etriye aralığı değişen numunelere ait gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri grafiklerle sunulmuştur. Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri incelendiği zaman etriye aralığı değişiminin dayanım ve enine şekil değiştirme kapasitelerini önemli oranda artırmadığı gözlenmiştir. Farklı etriye aralığına sahip numunelere ait gerilme-enine şekil değiştirme eğrileri benzer eğilim göstermiştir, bu eğilim CFRP tabakasının sargılama etkisinin çok yüksek mertebelerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.4.10.4 Farklı CFRP Aralıklarında Etriye Aralığı Değişiminin Gerilme-Şekil değiştirme İlişkisine Etkisi

Tablo 6.4.10.1. Orijinal ve Güçlendirilmiş Numunelerin Dayanım ve Şekildeğiştirmeleri

Numune	f'_{co} MPa	f'_{coj} MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc} 500 mm	ϵ_{cc} 270 mm	ϵ_{cu}	ϵ_{ch} 60 mm	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
NS-C-050-0	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-C-100-0	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-C-145-0	27.58	23.44	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-C-050-3	27.58	23.44	0.002	77.46	77.46	0.034	0.033	0.034	0.013	230	1600
NS-C-100-3	27.58	23.44	0.002	72.51	72.51	0.029	0.027	0.029	0.011	210	1350
NS-C-145-3	27.58	23.44	0.002	71.83	71.83	0.033	0.030	0.033	0.012	206	1550
NS-C-050-5	27.58	23.44	0.002	95.07	95.07	0.044	0.044	0.044	0.012	305	2100
NS-C-100-5	27.58	23.44	0.002	94.88	94.88	0.043	0.042	0.043	0.011	304	2050
NS-C-145-5	27.58	23.44	0.002	94.25	94.25	0.044	0.045	0.047	0.013	302	2100

¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımlarıdır.

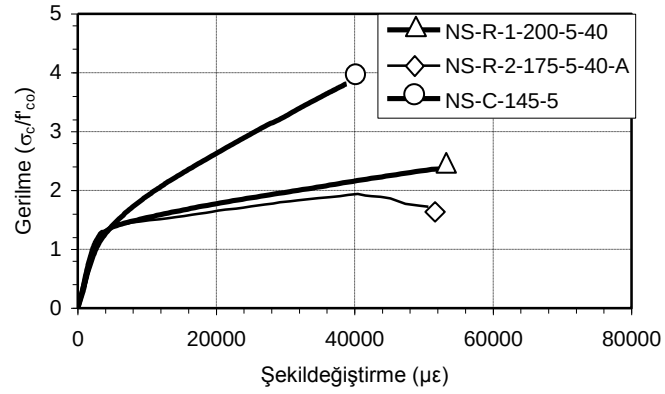
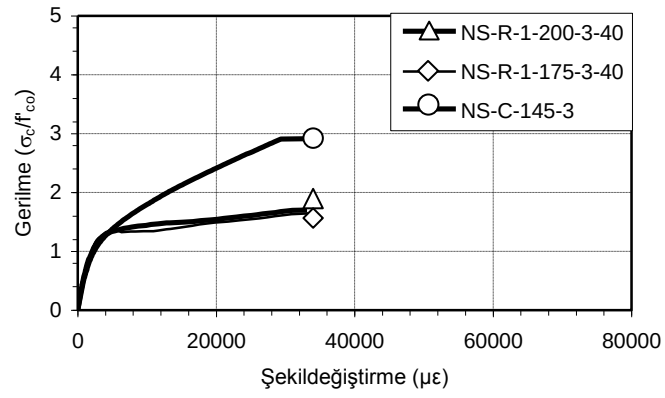
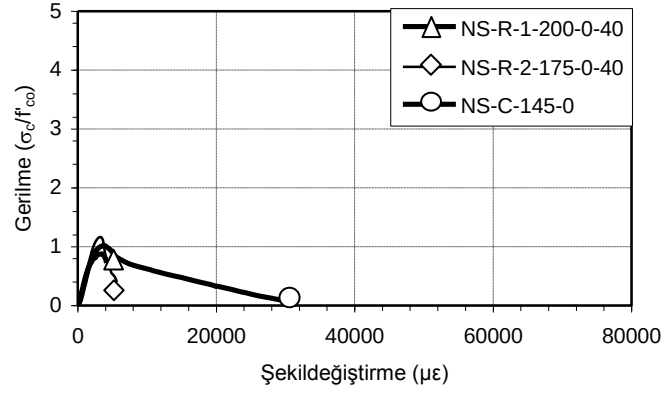
² : ϵ_{ch} değerleri, şekildeğiştirmeölçerler ile alınabilen en büyük enine şekildeğiştirme değerleridir.

Numune	Hasarın Oluştuğu Yer	Düşey Yırtık Uzunluğu ve Sayısı	Yatay Yırtık Genişliği ve Sayısı	Diğer Gözlemler	Hasar Görüntüleri	
NS-C-050-3	Orta 170 mm'de.	130 mm'lik büyük, 40 mm'lik küçük olmak üzere 2 farklı kesitte	10-35 mm arasında 5-6 yatay parça	-		
NS-C-100-3	Orta 230mm'de.	230mm ve 3 farklı kesitte	20-70 mm arasında 6-7 yatay parça	-		
NS-C-145-3	Orta 280mm'de.	280 mm ve 3 farklı kesitte	20-110 mm arasında 5-6 yatay parça	-		
NS-C-050-5	Göçme oluşmadı	-	-	-		
NS-C-100-5	Göçme oluşmadı	-	-	-		
NS-C-145-5	Orta 130mm'de.	130 mm ve çok farklı kesitte	5-50 mm arasında çok sayıda lif halinde	-		

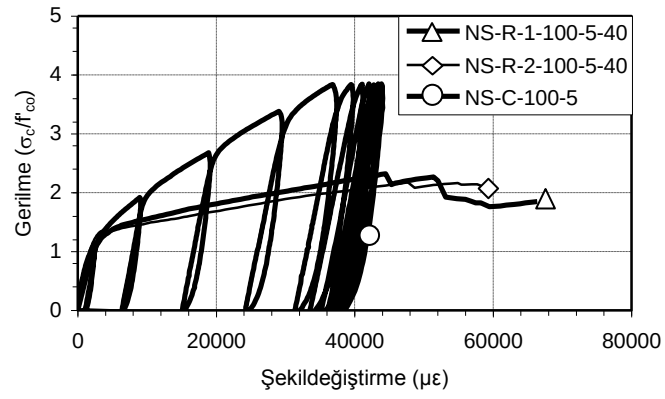
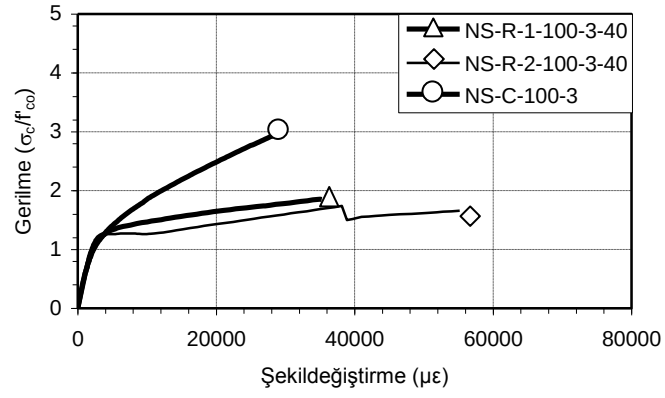
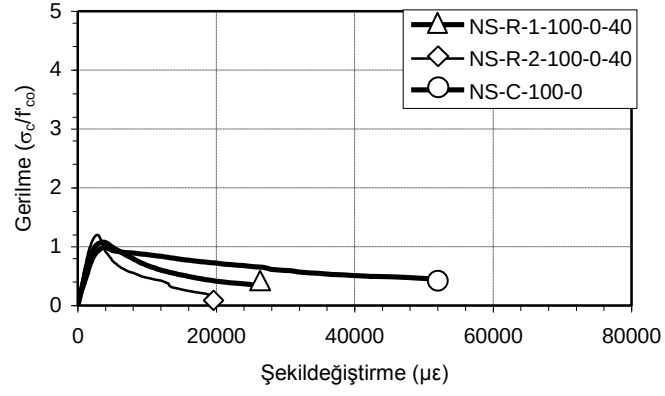
6.5. FARKLI KESİT TİPLERİNDEKİ NUMUNELERİN DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

6.5.1. Boyuna Doğrultudaki Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

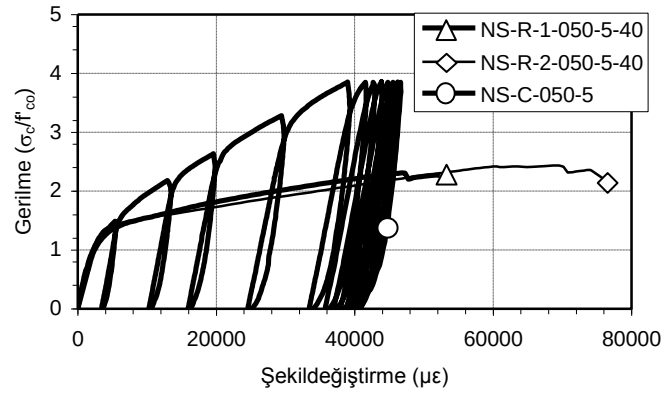
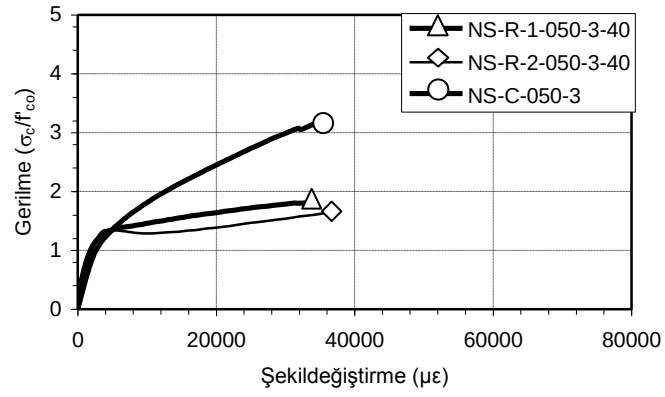
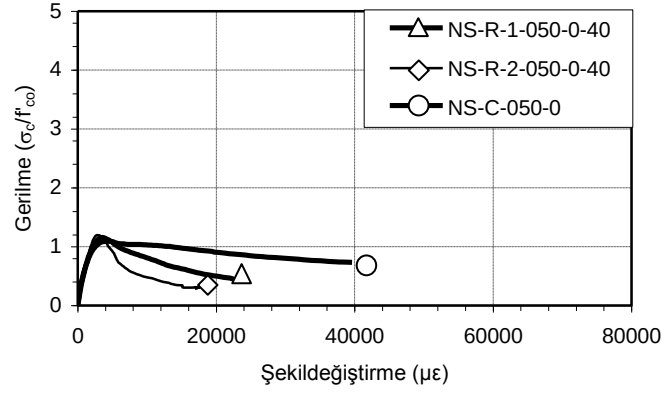
Şekil 6.5.1.1, 6.5.1.2 ve 6.5.1.3’de aynı sargı kalınlığına sahip farklı kesit tipindeki numunelerin değişik etriye aralıkları için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmektedir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde kare, dikdörtgen ve daire enkesitli güçlendirilmiş tüm numunelerin dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinin arttığı gözlenmiştir. Daire enkesitli numunelerin dayanım artışının kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir, ancak kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerinde şekildeğiştirme kapasiteleri daire enkesitli numunelere oranla daha fazla artış göstermiştir. Kare ve dikdörtgen numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde eğrilerde genelde benzer eğilim görülmüştür.



Şekil 6.5.1.1 Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve Enine Donatı Oranına Sahip Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 6.5.1.2 Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 100 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

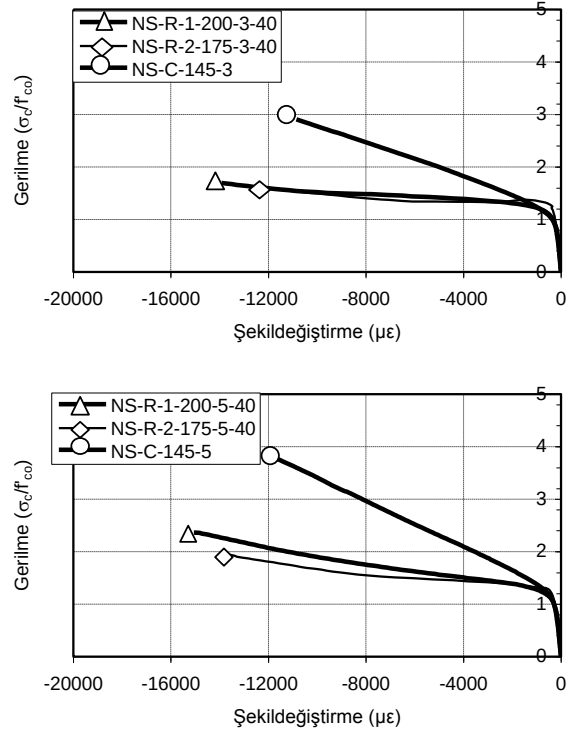


Şekil 6.5.1.3 Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 050 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

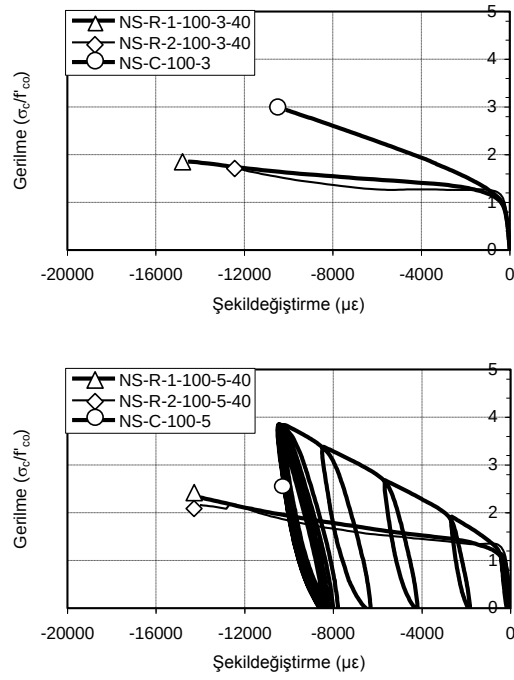
6.5.2. Enine Doğrultudaki Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

Aşağıdaki, Şekil 6.5.2.1, Şekil 6.5.2.2 ve Şekil 6.5.2.3’de aynı sargı kalınlığına sahip farklı kesit tipindeki numunelerin değişik etriye aralıkları için eninde doğrultudaki

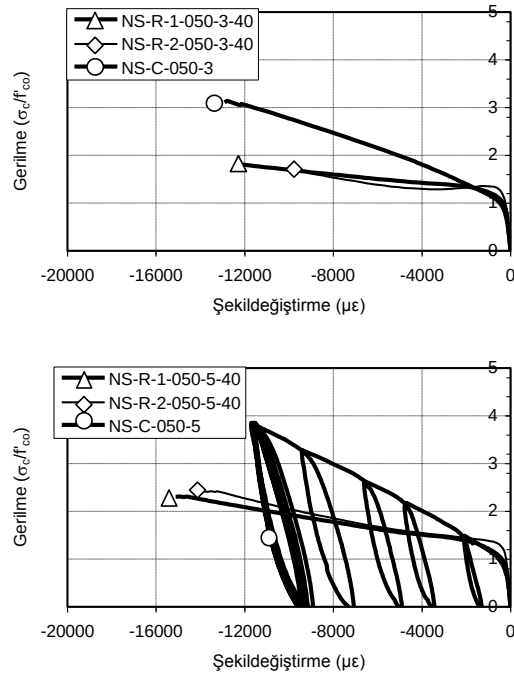
gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri verilmektedir. CFRP tabakalarla enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş kare, dikdörtgen ve daire enkesitli tüm numunelerin gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinin önemli oranda arttığı gözlenmiştir.



Şekil 6.5.2.1 Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve Enine Donatı Oranına Sahip Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme İlişkileri



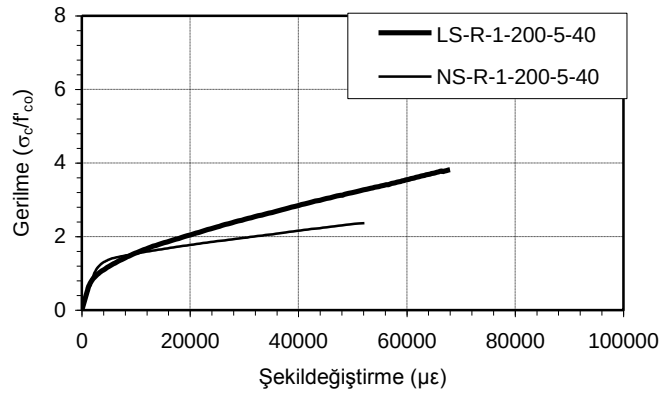
Şekil 6.5.2.2 Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 100 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme ilişkileri



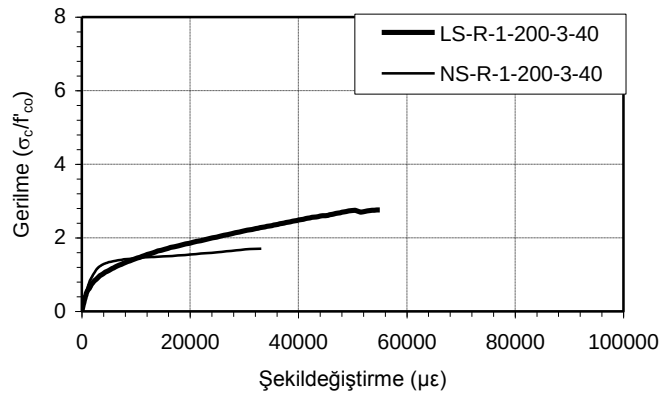
Şekil 6.5.2.3 Farklı Kesit Tiplerindeki Aynı Sargı Sayısına ve 050 mm Etriye Aralığına Sahip Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme ilişkileri

6.6. LİTERATÜRDEKİ BENZER ÇALIŞMAYLA YAPILAN KARŞILAŞTIRMA

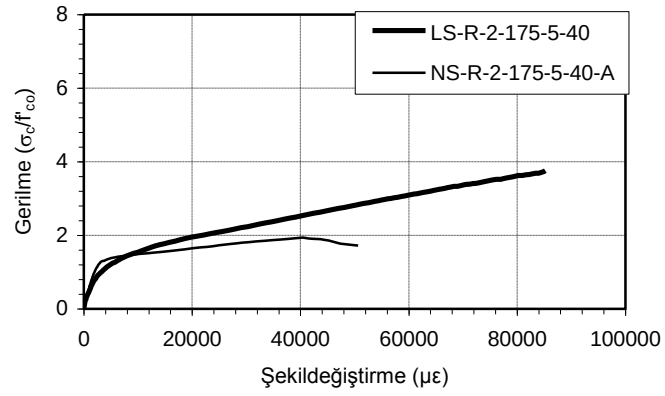
PEKER.Ö [28] tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada ortalama 28 günlük standart silindir basınç dayanımı 10.93 MPa olan kare, dikdörtgen ve daire enkesitli betonarme elemanlar üretilmiş ve denenmiştir. Aşağıdaki, Şekil 6.6.1, 6.6.2, 6.6.3, 6.6.4, 6.6.5 ve 6.6.6’da numune donatı, kesit özellikleri ve CFRP tabaka kalınlığı bizim çalışmamızdaki numunelerle aynı olan sadece beton basınç dayanımı farklılık gösteren elemanlar arasındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırmaları grafiklerle sunulmuştur.



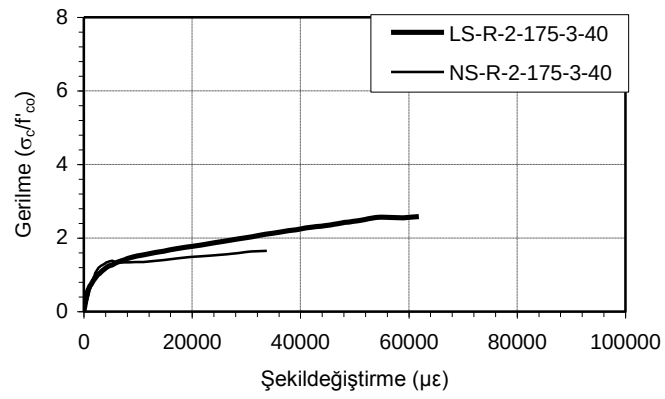
Şekil 6.6.1 5 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Kare Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması



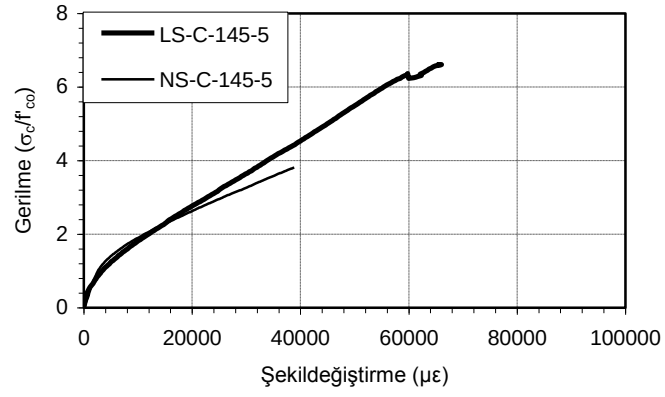
Şekil 6.6.2 3 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Kare Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması



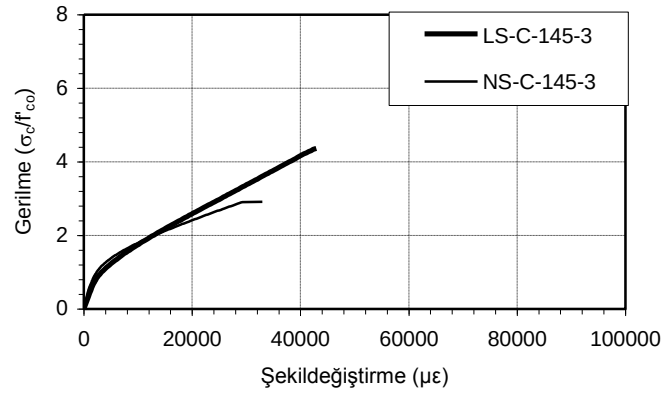
Şekil 6.6.3 5 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması



Şekil 6.6.4 3 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması



Şekil 6.6.5 5 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Daire Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması



Şekil 6.6.6 3 Kat CFRP Tabakasıyla Sargılanmış Aynı Özellikteki Düşük ve Normal Dayanımlı Daire Enkesitli Betonarme Elemanların Karşılaştırılması

7. ANALİTİK ÇALIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında 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. (2004) [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.

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

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

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.

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

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.

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

$\varepsilon_{h, \text{rup}}$ 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)

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) 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.

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

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

Analitik modellerden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonucunda ulaşılan sonuçlar daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler için karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, Tablo 7.1, 7.2 ve 7.3'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere daha önceden CFRP tabakalarla sarılarak güçlendirilmiş donatısız beton elemanların

denenmesi sonucunda geliştirilen bağıntılar CFRP tabakalarla sargılanarak güçlendirilmiş donatılı betonarme elemanlar için deneylere beklenene yakınlıkta sonuçlar üretmektedir.

Tablo 7.1. Daire Enkesitli Numunelerin Analitik ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

NUMUNE	h/b	f'_{co}	Sargı	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ρ_f	f'_{lmax}	f'_{lmax}/f'_{co}	f'_{cc}		ϵ_{cc}	
		(MPa)	Sayısı	(MPa)	(lvd)		(MPa)		(MPa)	5 / 10		6 / 12
				(deny.)	(deny.)				(analitik)		(analitik)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
NS-C-050-3	1	23.44	3	77.46	0.034	0.00792	9.56	0.41	62.95	1.23	0.036	0.94
NS-C-100-3	1	23.44	3	72.31	0.028	0.00792	9.56	0.41	51.49	1.40	0.031	0.89
NS-C-145-3	1	23.44	3	71.83	0.033	0.00792	9.56	0.41	47.29	1.52	0.030	1.12
NS-C-050-5	1	23.44	5	95.07	0.044	0.01320	15.94	0.68	79.18	1.20	0.044	1.01
NS-C-100-5	1	23.44	5	94.88	0.042	0.01320	15.94	0.68	67.72	1.40	0.039	1.08
NS-C-145-5	1	23.44	5	94.25	0.045	0.01320	15.94	0.68	63.53	1.48	0.037	1.22

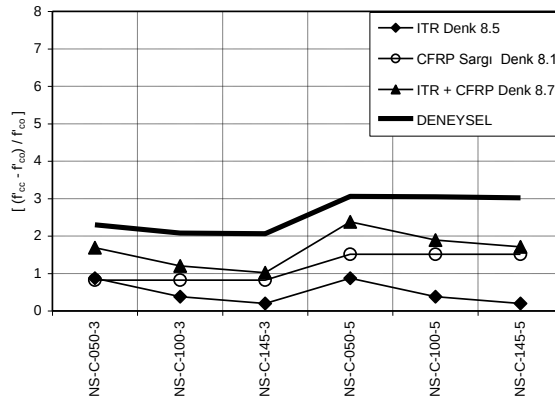
Tablo 7.2. Kare Enkesitli Numunelerin Analitik ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

NUMUNE	h/b	f'_{co}	Sargı	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ρ_f	f'_{lmax}	f'_{lmax}/f'_{co}	f'_{cc}		ϵ_{cc}	
		(MPa)	Sayısı	(MPa)	(lvd)		(MPa)		(MPa)	5 / 10		6 / 12
				(deny.)	(deny.)				(analitik)		(analitik)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
NS-R-1-050-3-40	1	23.44	3	44.55	0.033	0.0079	6.31	0.27	47.882	0.93	0.028	1.17
NS-R-1-100-3-40	1	23.44	3	45.68	0.035	0.0079	6.31	0.27	40.338	1.13	0.025	1.40
NS-R-1-200-3-40	1	23.44	3	41.97	0.033	0.0079	6.31	0.27	36.296	1.16	0.023	1.42
NS-R-1-050-5-40	1	23.44	5	56.89	0.046	0.0132	10.52	0.45	57.735	0.99	0.034	1.34
NS-R-1-100-5-40	1	23.44	5	56.92	0.044	0.0132	10.52	0.45	50.191	1.13	0.031	1.42
NS-R-1-200-5-40	1	23.44	5	58.26	0.052	0.0132	10.52	0.45	46.149	1.26	0.029	1.77

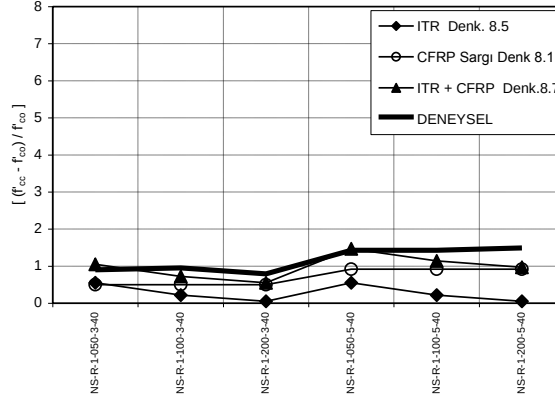
Tablo 7.3. Dikdörtgen Enkesitli Numunelerin Analitik ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

NUMUNE	h/b	f'_{co}	Sargı	f'_{cc}	ϵ_{cc}	ρ_f	f'_{lmax}	f'_{lmax}/f'_{co}	f'_{cc}		ϵ_{cc}	
		(MPa)	Sayısı	(MPa)	(lvd)		(MPa)		(MPa)	5 / 10		6 / 12
				(deny.)	(deny.)				(analitik)		(analitik)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
NS-R-2-050-3-40	2	23.44	3	40.150	0.035	0.0099	6.75	0.29	44.933	0.89	0.049	0.72
NS-R-2-100-3-40	2	23.44	3	42.840	0.038	0.0099	6.75	0.29	38.866	1.10	0.046	0.82
NS-R-2-175-3-40	2	23.44	3	40.630	0.034	0.0099	6.75	0.29	36.314	1.12	0.045	0.76
NS-R-2-050-5-40	2	23.44	5	59.990	0.069	0.0165	11.25	0.48	55.617	1.08	0.061	1.13
NS-R-2-100-5-40	2	23.44	5	53.630	0.048	0.0165	11.25	0.48	49.549	1.08	0.059	0.82
NS-R-2-175-5-40	2	23.44	5	47.810	0.040	0.0165	11.25	0.48	46.998	1.02	0.058	0.70

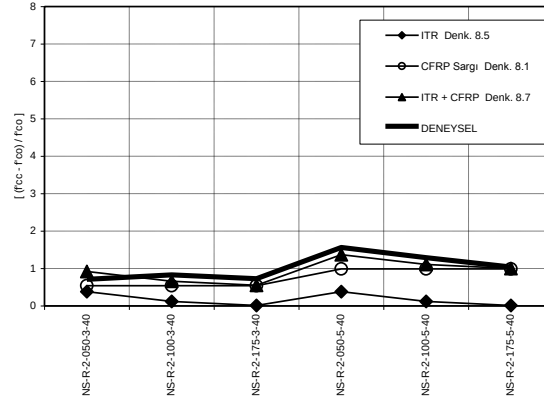
Geliştirilen amprik formüller kullanılarak CFRP tabakalar ve enine sargı donatılarıyla sağlanan dayanım ve şekildeğiştirme artışı tahmin edilmiş ve Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 ve 7.6’da sunulmuştur. Aynı grafiklerde CFRP tabakalar ve enine sargı donatıları için analitik yöntemlerle tahmin edilen toplam dayanım ve şekildeğiştirme artışı deneysel olarak bulunan dayanım ve şekildeğiştirme artışıyla karşılaştırılmıştır.



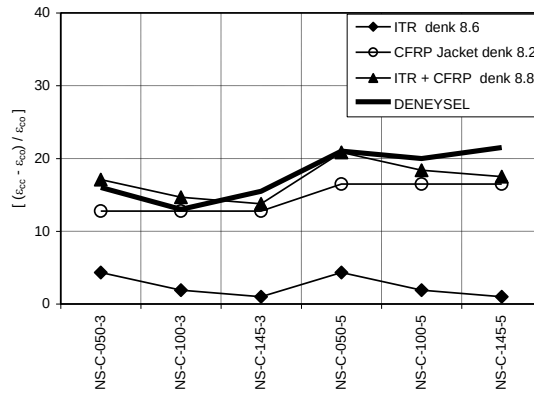
Şekil 7.1 Silindir Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Dayanım Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Dayanım Artışının Karşılaştırılması



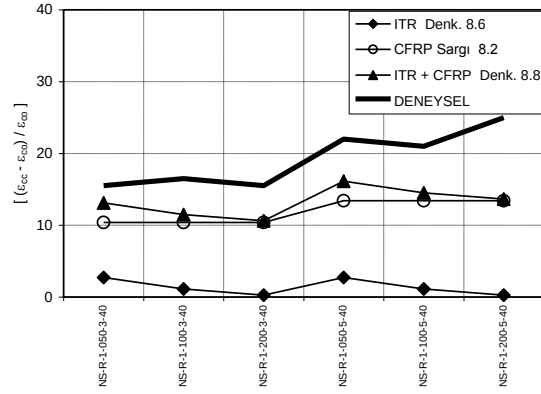
Şekil 7.2 Kare Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Dayanım Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Dayanım Artışının Karşılaştırılması



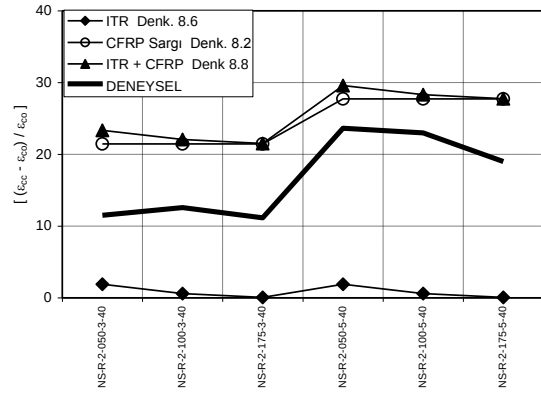
Şekil 7.3 Dikdörtgen Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Dayanım Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Dayanım Artışının Karşılaştırılması



Şekil 7.4 Silindir Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Şekildeğiştirme Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneysel Olarak Bulunan Şekildeğiştirme Artışının Karşılaştırılması

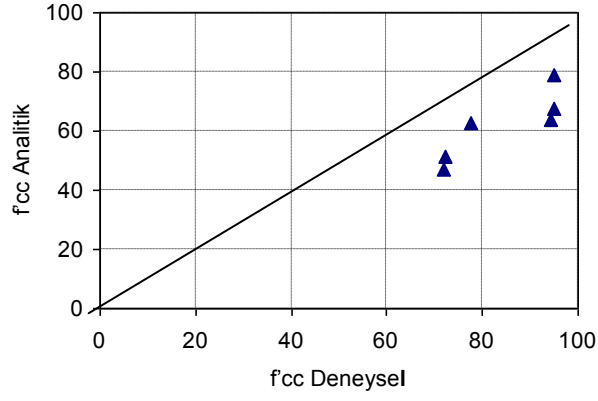


Şekil 7.5 Kare Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Şekildeğiştirme Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneyisel Olarak Bulunan Şekildeğiştirme Artışının Karşılaştırılması.

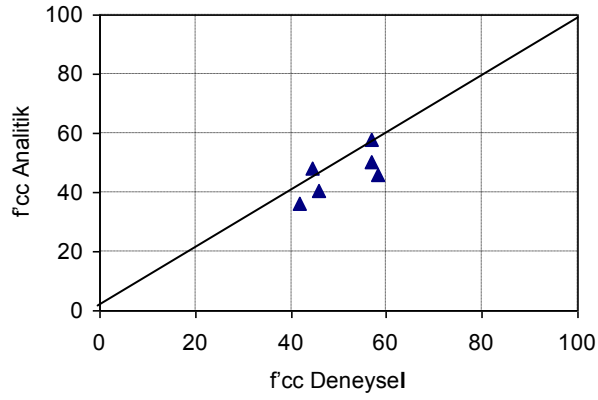


Şekil 7.6 Dikdörtgen Numuneler İçin Etriye ve CFRP Sargının Şekildeğiştirme Artışı Üzerine Etkisi, Tahmini ve Deneyisel Olarak Bulunan Şekildeğiştirme Artışının Karşılaştırılması.

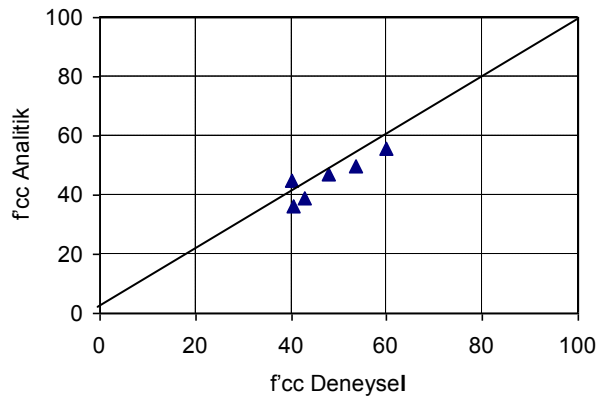
Aşağıdaki, Şekil 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11 ve 7.12’de deneysel olarak ve analitik model yardımıyla bulunan f_{cc} ve ϵ_{cc} değerlerinin karşılaştırıldığı grafikler sunulmuştur.



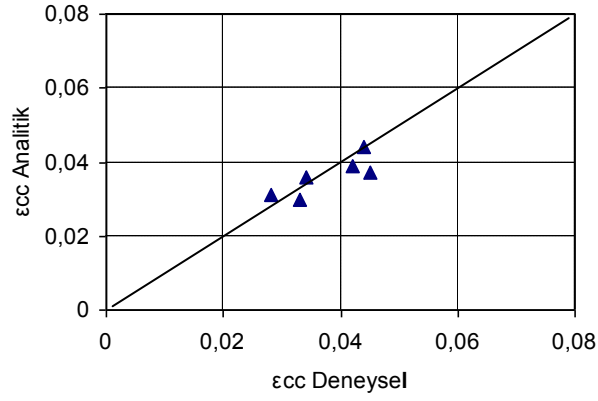
Şekil 7.7 Daire Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan f'_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması



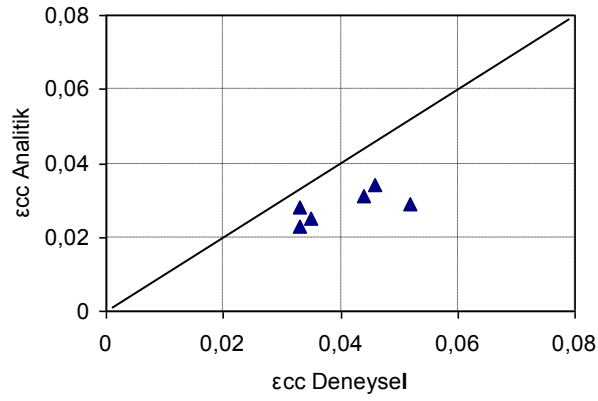
Şekil 7.8 Kare Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan f'_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması



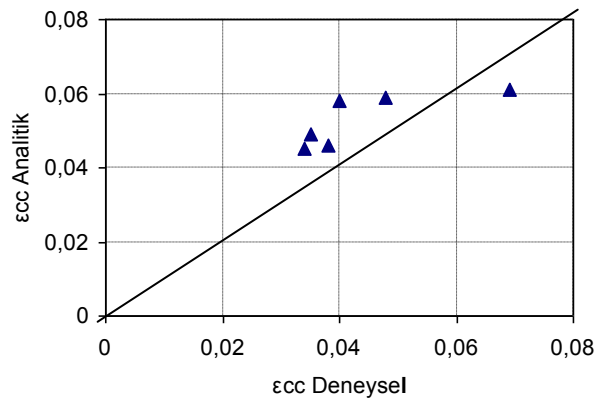
Şekil 7.9 Dikdörtgen Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan f'_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.10 Daire Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan ϵ_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.11 Kare Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan ϵ_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 7.12 Dikdörtgen Enkesitli Numuneler İçin Deneysel Olarak ve Analitik Yöntemle Hesaplanan ϵ_{cc} Değerlerinin Karşılaştırılması

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada kare, dikdörtgen ve daire enkesitli CFRP tabakalarla enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş normal dayanımlı betonarme elemanların eksenel yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Deney sırasında yeterince hassas veriler toplamak amacıyla farklı ölçüm boylarından en az iki veya 4 adet ölçüm aletinden veriler toplanmış ve bu verilerin ortalamaları alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçerlerle farklı ölçüm boylarından (500, 270, 60 mm) alınan verilerin değerlendirilmesi sonucunda farklı ölçüm boyları için birbirlerine yakın şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Farklı ölçüm boylarından elde edilen sonuçların benzerlik göstermesi ölçüm sisteminin yeterince iyi çalıştığının bir göstergesidir. Deneyler sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- CFRP tabaka sargı kalınlığının artması betonarme elemanların davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Tüm kesit tiplerinde CFRP sargı kalınlığı artışının, dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesini önemli oranda artırdığı gözlenmektedir. Kare enkesitli 3 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerde ortalama dayanım ve şekildeğiştirme artışı sırasıyla %85 ve % 1600, 5 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerde ortalama dayanım ve şekildeğiştirme artışı sırasıyla % 145 ve % 2300, dikdörtgen enkesitli 3 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerde ortalama dayanım ve şekildeğiştirme artışı sırasıyla % 75 ve % 1700, 5 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerde ortalama dayanım ve şekildeğiştirme artışı sırasıyla % 130 ve % 2500, daire enkesitli 3 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerde ortalama dayanım ve şekildeğiştirme artışı sırasıyla % 215 ve % 1500, 5 kat CFRP tabakasıyla sargılanmış numunelerde ortalama dayanım ve şekildeğiştirme artışı sırasıyla % 303 ve % 2100'dür. Güçlendirilen numunelerde dayanım ve şekildeğiştirme artışları incelendiğinde aynı sargı kalınlığına ve kesit şekline sahip numunelerde etriye aralığı değişimi dayanım ve şekildeğiştirme artışını önemli oranda etkilememektedir, bu davranış ve

yapılan analitik inceleme CFRP tabakaların enine donatıya göre çok yüksek mertebede sargılama etkisinin olduğunu göstermiştir.

- Orijinal durumda denenen numunelerle güçlendirilmiş numuneler karşılaştırıldığında güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma kapasitelerinin büyük oranda arttığı görülmektedir. Enerji yutma kapasitesinde sağlanan bu artış dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesindeki artışın bir sonucudur.
- Enkesit şekli numunelerin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Daire enkesitli numunelerde CFRP tabakalar ile elde edilen yanal sargı basıncı üniform olarak dağıldığı için dayanım artışı kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere oranla daha fazladır.
- Kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler ise boyuna doğrultuda daha fazla şekildeğiştirme yapabilme yeteneğine sahiptirler.
- Enine donatı aralığı değişimi bu çalışmada incelenen değişkenlerden birisidir. Orijinal halde denenen numunelerde etriye aralığı azaldıkça numunenin dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesinin arttığı gözlenmiştir. Ancak CFRP tabakalarla enine doğrultuda güçlendirilmiş, özellikle 5 kat sargılanmış numunelerde farklı etriye aralığına sahip numuneler birbirine benzer davranış göstermişlerdir. Etriye aralığı değişiminin sargılanmış numunelerde davranışı önemli ölçüde değiştirmemesi CFRP tabakalarla enine doğrultuda sağlanan sargılamanın, enine donatılar ile sağlanan sargılamaya göre çok daha etkin olduğunun bir göstergesidir.
- Enine gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde enine şekildeğiştirme davranışının CFRP tabaka kalınlığından bağımsız olduğu gözlenmiştir. Kare enkesitli numunelerde ortalama 0.0148, dikdörtgen enkesitli numunelerde ortalama 0.0138, daire enkesitli numunelerde ortalama 0.0120 enine şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir.
- Bu çalışma kapsamında güçlendirilmeden orijinal durumda denenen numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri incelendiğinde kare enkesitli numunelerdeki 200 mm ve dikdörtgen enkesitli numunelerdeki 175 mm etriye aralığına sahip numunelerin etriye aralığı 50 ve 100 mm olan numunelere göre daha gevrek davranış gösterdikleri gözlenmiştir. Ancak daire enkesitli 145 mm etriye aralığına sahip numune 50 ve 100 mm etriye

aralığına sahip numunelere benzer davranış göstermiştir. Sargılanmadan denenen bu numunelerin dayanımları incelendiğinde farklı etriye aralıklarına sahip numunelerin dayanımlarının birbirlerine yakın olduğu gözlenmiştir.

- Bu deneysel çalışmada elde edilen $f_{cc(deny)}$ ve $\varepsilon_{cc(deny)}$ değerleri, teorik modeller kullanılarak hesaplanan $f_{cc(anly)}$ ve $\varepsilon_{cc(anly)}$ değerleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen $f_{cc(deny)}$ değeri teorik olarak elde edilen $f_{cc(anly)}$ değerine bölünmüştür. Tüm numuneler için elde edilen $f_{cc(deny)}/f_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.174 ve standart sapması 0.180 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde deneysel olarak elde edilen $\varepsilon_{cc(deny)}$ değerlerinin teorik modelden bulunan $\varepsilon_{cc(anly)}$ değerlerine oranı hesaplanmıştır. Tüm numuneler için elde edilen $\varepsilon_{cc(deny)}/\varepsilon_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.096 ve standart sapması 0.288'dir. Karşılaştırma işlemi her kesit tipi için kendi içinde incelendiğinde kare enkesitli numuneler için $f_{cc(deny)}/f_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.099 ve standart sapması 0.117, $\varepsilon_{cc(deny)}/\varepsilon_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.420 ve standart sapması 0.240'dır. Dikdörtgen enkesitli numuneler için $f_{cc(deny)}/f_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.048 ve standart sapması 0.078, $\varepsilon_{cc(deny)}/\varepsilon_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 0.823 ve standart sapması 0.158'dir. Daire enkesitli numuneler için $f_{cc(deny)}/f_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.373 ve standart sapması 0.184, $\varepsilon_{cc(deny)}/\varepsilon_{cc(anly)}$ değerlerinin ortalaması 1.043 ve standart sapması 0.110'dur. Elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde f_{cc} ve ε_{cc} değerlerinin hesaplanmasında kullanılan analitik modelin kabul edilir düzeyde sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
- Bu çalışma kapsamında bazı numuneler tekrarlı yükler altında denenmiştir. Tekrarlı yüklemenin güçlendirilen numunelerin eksenel yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini değiştirmedeği gözlenmiştir.
- Bu çalışmada güçlendirilen numunelerde genelde benzer tipte göçme oluşmuştur. 3 kat CFRP tabakasıyla sarılmış numunelerde göçme genelde numunenin taşıma gücüne ulaştığı anda CFRP tabakasının ani yırtılması şeklinde oluşmuştur. 5 kat CFRP tabakasıyla sarılmış numunelerde ise genelde numune taşıma gücüne ulaşınca CFRP tabakaları ince lifler halinde yavaş yavaş kopmaktadır, yükte ani düşüş gözlenmemektedir. CFRP tabakasındaki yırtık orta 250 mm'lik kısımda genelde numune köşesine yakın

yerde, bazen de numunenin orta kısmında çok sayıda farklı düşey ve yatay kesitte oluşmaktadır.

- Bu çalışma kapsamında CFRP tabakasının sargılama etkisini artırmak amacıyla yapılan ek önlem uygulaması numunenin dayanım ve şekildeğiştirme özelliklerini önemli oranda etkilememiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ahmad, S.H. and Shah, S.P.**, “Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement”, *Journal of the American Concrete Institute*, V. 779, No. 6, 484-490, 1982.
- [2] **Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.**, “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *ASCE Journal of the Structural Division*, V. 114, No. 8, 1804-1826, 1988.
- [3] **Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.** (1988a), “Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete”, *ASCE Journal of the Structural Division*, V. 114, No. 8, 1827-1849, 1988.
- [4] **Saatcioglu, M. and Ravzi, S.R.**, “Strength and Ductility of Confined Concrete”, *ASCE Journal of the Structural Division*, V. 118, No. 6, 1590-1607, 1992.
- [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.**, “Japanese Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings After The Hyokogen-Nanbu Earthquake” *Cement and Concrete Composites*, No 22, 59-79, 2000.
- [7] **Mirmiran, A. and Shahawy, M.**, “Behaviour of Concrete Columns Confined by Fiber Composites”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, V. 123, No. 5 583-590, 1997.
- [8] **Toutanji, H.A.**, “Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets”, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 3, 397-403, 1999.
- [9] **Xiao, Y. and Wu, H.**, “Compressive Behaviour of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 12, No. 2, 139-146, 2000.
- [10] **Wang, Y.C. and Restrepo, J.**, “Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets”, *ACI Structural Journal*, Vol. 98,

No. 3, 377-385, 2001.

- [11] **Demers, M. and Neale, K.W.,** “Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets – an experimental study”, *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 26, No. 2, 226-241,1999
- [12] **Tan, K.H.,** “Strength Enhancement of Rectangular Reinforced Concrete Columns using Fiber-Reinforced Polymer”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, No. 3, 175-183,2002.
- [13] **Chaallal, O., M. ASCE, Shahawy, M., and Hassan, M .,** “Performance of axially loaded short rectangular columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer wrapping”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No. 3, 200-208,2003.
- [14] **Ilki, A. and Kumbasar, N.,** “Behaviour of Damaged and Undamaged Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 13, No. 1, 75-90, 2002.
- [15] **Ilki, A. and Kumbasar, N.,** “Compressive Behavior of Carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-Circular Cross Sections”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 3, 381-406, 2003.
- [16] **Ilki, A., Kumbasar, N. and Koc, V.,** “Low and Medium Strength Concrete Members Confined by Fiber Reinforced Polymer Jackets”, *ARI, The Bulletin of the Istanbul Technical University*, Vol. 53, No. 1, 118-123, 2003.
- [17] **Ilki, A., Koc, V., Ergun, B., Altan, M.O., and Kumbasar, N.,** “Photogrammetrically measured deformation of FPR wrapped low strength concrete”, *6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6*, July, 2003, Singapore.
- [18] **Rochette, P. and Labossiere, P.,** “Axial testing of rectangular column models confined with composites”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 4, No. 3, 129-136, 2000.
- [19] **Saadatmanesh,H., Ehsani,M.R. and Jin, L.,** “Repair of earthquake damaged reinforced concrete columns with FRP wraps” *Struct. J., ACI*, Vol. 94,No. 2, 206-215,1997.

- [20] **Fardis, M.N., and Khalili, H.,** "FRP-encased concrete as a structural material", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 34, No. 121, 191-202, 1982.
- [21] **American Concrete Institute-Committee 440,** "Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP rebars" *ACI 440. IR-01*. Farmington Hills, MI, USA: ACI 2001
- [22] **Concrete Society Technical Report 55,** "Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials", 2000.
- [23] **Lam, L., and Teng, J.G.,** "Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete", *J. Struct. Eng.*, Vol. 128, No. 5, 612-623, 2002.
- [24] **Lam, L. and Teng, J. G.,** "Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-confined Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 17, 471-489, 2003a.
- [25] **Lam, L., and Teng, J.G.,** "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 13, 1149-1186, 2003b.
- [26] **Ilki, A., Kumbasar, N., and Koc, V.,** "Low strength concrete members externally confined with FRP sheets", *Struct. Eng. And Mech.*, (accepted for publication), 2004.
- [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] **PEKER, Ö.,** 2005. Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzemeler İle Güçlendirilmiş Düşük Dayanımlı Betonarme Elemanların Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü (Hazırlanıyor)*, İstanbul.

EK A ÖLÇÜM ÇERÇEVESİ (KOMPRESSOMETRE) ÇİZİMLERİ

