

**KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER
MALZEMELER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DÜŞÜK VE
NORMAL DAYANIMLI BETON ELEMANLARIN
DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Volkan KOÇ
501021070**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2004**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Alper İLKİ (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Kadir GÜLER (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Şevket ÖZDEN (KOÜ)**

OCAK 2004

ÖNSÖZ

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

Deneysel çalışma yoğun emek, sabır ve bir hayli zaman gerektiren zorlu bir süreç. 3 yılı aşkın süredir bana her konuda sonsuz desteğini esirgemeyen, yardımcı olan, deneysel çalışmayı bilim için kendisine yol edinmiş, çok değerli danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Alper İlki'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisiyle birlikte çalışabildiğim bu süreyi tüm hayatımın en verimli, en eğlenceli dönemlerinden biri olarak anacağım.

Bu deneysel çalışma sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Aziz Karadeniz, Esen Yılmaz ve Cem Demir'e teşekkürlerimi sunarım. Maddi desteklerinden ötürü Türkiye Deprem Vakfı'na ve Yapkim Yapı Kimya Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ve annem, babam, biricik kardeşim. Uzun süredir uzak kaldığım, ama sevgilerini ve desteklerini her zaman çok yakınımnda bulduğum ailem. Bugüne kadar bana verdiğiniz tüm emek, manevi ve maddi tüm destek, gösterdiğiniz sabır ve hoşgörü için size minnettarım.

Ocak 2004

Volkan KOÇ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ, NUMUNELERİN HAZIRLANMASI VE MALZEME DENEYLERİ	7
3. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ	31
4. DENEY DÜZENİĞİ	39
5. DENEY SONUÇLARI	43
5.1. Normal Dayanımlı Daire Enkesitli (1. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları	45
5.2. Normal Dayanımlı Kare Enkesitli (2. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları	61
5.3. Normal Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (3. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları ($h/b=2.0$)	68
5.4. Düşük Dayanımlı Daire Enkesitli (4. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları	74
5.5. Düşük Dayanımlı Kare Enkesitli (5. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları	82
5.6. Düşük Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (6. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları ($h/b=2.0$)	90
5.7. Düşük Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (7. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları ($h/b=3.0$)	96
5.8. Düşük Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (8. Seri) Numunelere Ait Deney Sonuçları ($h/b=1.5$)	102
6. SONUÇLAR	108
KAYNAKLAR	110
EKLER	112
ÖZGEÇMİŞ	121

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Çalışma kapsamında denenen numunelere ait genel özellikler	6
Tablo 2.1 FRP malzemelerin ve çeliğin birim ağırlıkları (t/m^3)	8
Tablo 2.2 Farklı türdeki FRP malzemelerin mekanik özellikleri.....	8
Tablo 2.3 C1-30 türü karbon lif takviyeli polimer tabakaların geometrik özellikleri.	8
Tablo 2.4 C1-30 türü CFRP malzemenin mekanik özellikleri.....	9
Tablo 2.5 Normal dayanımlı daire enkesitli numuneler için kullanılan beton karışımları (1. seri 1. 2. ve 3. karışım)	11
Tablo 2.6 1. seri 1. 2. ve 3. karışım için betonda çökme deneyi sonuçları	12
Tablo 2.7 1. seri 1. karışım için standart silindir basınç deneyleri sonuçları.....	15
Tablo 2.8 1. seri 2. karışım için standart silindir basınç deneyleri sonuçları.....	18
Tablo 2.9 1. seri 3. karışım için standart silindir basınç deneyleri sonuçları.....	21
Tablo 2.10 2. ve 3. seri numuneler için kullanılan beton karışımı.....	21
Tablo 2.11 2. ve 3. seri numuneler için kullanılan betonda çökme deneyi sonuçları	22
Tablo 2.12 2. ve 3. seride kullanılan beton için standart silindir basınç deneyleri sonuçları	24
Tablo 2.13 4., 5. ve 6. seri numuneleri için kullanılan beton karışımı.....	25
Tablo 2.14 4., 5. ve 6. seride kullanılan beton için standart silindir basınç deneyleri sonuçları	27
Tablo 2.15 7. ve 8. seri numuneleri için kullanılan beton karışımı.....	28
Tablo 2.16 7. ve 8. seride kullanılan beton için standart silindir deneyleri sonuçları	30
Tablo 3.1 1. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	34
Tablo 3.2 2. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	35
Tablo 3.3 3. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	35
Tablo 3.4 4.Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	35
Tablo 3.5 5. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	36

Tablo 3.6 3. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	36
Tablo 3.7 7. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	36
Tablo 3.8 8. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri.....	36
Tablo 5.1.1 1. seri kapsamında denenen numunelere ait bilgiler.....	59
Tablo 5.2.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (2. seri).....	66
Tablo 5.3.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (3. seri).....	72
Tablo 5.4.1 4. seri kapsamında denenen numunelere ait bilgiler.....	81
Tablo 5.5.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (5. seri).....	86
Tablo 5.6.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (6. seri).....	95
Tablo 5.7.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (7. seri).....	101
Tablo 5.8.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (8. seri).....	107
Tablo 6.1. Beton basınç dayanımına ve enkesit şekline göre numunelerin kazandıkları ortalama dayanım ve şekildeğiştirme değerleri	110

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Çalışmada kullanılan C1-30 türü CFRP için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi	9
Şekil 2.2 2. ve 3. seri numune kalıplarının plan görünüşü	10
Şekil 2.3 2. ve 3. seri kalıplarının pahlı enkesitleri	10
Şekil 2.4 2. ve 3. seri numune üretiminde kullanılan ahşap kalıplar	10
Şekil 2.5 Standart silindir basınç deneyi için hazırlanan düzeneç	11
Şekil 2.6 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 7 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	13
Şekil 2.7 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	13
Şekil 2.8 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	13
Şekil 2.9 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	14
Şekil 2.10 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	14
Şekil 2.11 1. seri 1. karışım için beton basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi	14
Şekil 2.12 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 7 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	16
Şekil 2.13 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	16
Şekil 2.14 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	16
Şekil 2.15 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	17

Şekil 2.16 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	17
Şekil 2.17 1. seri 2. karışım için beton basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi	17
Şekil 2.18 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 7 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	19
Şekil 2.19 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	19
Şekil 2.20 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	19
Şekil 2.21 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	20
Şekil 2.22 1. seri 3. karışım için beton basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi	20
Şekil 2.23 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	22
Şekil 2.24 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	23
Şekil 2.25 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	23
Şekil 2.26 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	23
Şekil 2.27 2. ve 3. seri için kullanılan betonun basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi	24
Şekil 2.28 4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	25
Şekil 2.29 4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	26
Şekil 2.30 4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	26
Şekil 2.31 4. 5. ve 6. seri için kullanılan betonun basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi	26
Şekil 2.32 7. ve 8. seri için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	28

Şekil 2.33 7. ve 8. seri için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	28
Şekil 2.34 7. ve 8. seri için kullanılan betonun 237 günlük standart silindir deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	29
Şekil 2.35 7. ve 8. seri için kullanılan betonun basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi	29
Şekil 3.1 Hasarlı numunelere özel kalıpların içerisinde epoksi enjeksiyonu uygulanması.....	32
Şekil 3.2 Kalıplardan alınan numunelerin özel geçirimsiz kağıtlara sarılıp bekletilmektesi.....	32
Şekil 3.3 Onarım işleminde son aşama: numunelerin taşlanarak eski formuna getirilmesi	32
Şekil 3.4 Kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin köşelerinin yuvarlatılmış durumu.....	32
Şekil 3.5 Köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen enkesitli numuneler ($h/b=1$, $h/b=2$)	33
Şekil 3.6 8. seri numunelerin ($h/b=1.5$) plan görünümü	33
Şekil 3.7 Astar uygulaması	38
Şekil 3.8 Epoksi esaslı macun karışımının sürülmesi	38
Şekil 3.9 Epoksi esaslı macun karışımı sürülme işlemi bittikten sonraki görünüm..	38
Şekil 3.10 Karbon lif tabakaları sarılmadan hemen önce epoksi esaslı yapıştırıcı sürülmesi	38
Şekil 3.11 CFRP tabakalarının sarılması	38
Şekil 4.1 Deney düzeneği.....	40
Şekil 4.2 Kare ve dikdörtgen enkesitli şekildeğiştirmeölçerlerin yerleri.....	41
Şekil 4.3 Dikdörtgen enkesitli numunede kısa kenara yapıştırılmış PL-60 ve YFLA-10 tipi şekildeğiştirmeölçerler	41
Şekil 4.4 Enine şekildeğiştirmenin ölçülebilmesi için yerleştirilmiş PL-60 ve YFLA-10 şekildeğiştirmeölçerler ile boyuna doğrultuda kullanılan YFLA-10 şekildeğiştirmeölçer.....	41
Şekil 4.5 Fotogrametrik ölçüm boyları ve ölçüm noktalarının yerleri.....	42
Şekil 4.6 Fotogrametrik ölçüm alınan bir numune	42
Şekil 4.7 Veri toplama sistemi	42
Şekil 5.1 1. tip eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi ($f'_{cc}=f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}=\epsilon_{cu}$).....	44

Şekil 5.2 2. tip aksenal gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi	
(f' _{cc} >f' _{cu} >f' _{co} , ε _{cc} <ε _{cu}).....	44
Şekil 5.3 3. tip aksenal gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi	
(f' _{cc} >f' _{co} >f' _{cu} , ε _{cc} <ε _{cu}).....	44
Şekil 5.1.1. NS-C-0a ve NS-C-1a gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	46
Şekil 5.1.2 NS-C-0b ve NS-C-1b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	46
Şekil 5.1.3 NS-C-0c ve NS-C-1c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	46
Şekil 5.1.4 NS-C-0d ve NS-C-1d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	47
Şekil 5.1.5 NS-C-0e ve NS-C-1e gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	47
Şekil 5.1.6 NS-C-1f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi.....	47
Şekil 5.1.7 NS-C-0f ve NS-C-3a gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	48
Şekil 5.1.8 NS-C-0g ve NS-C-3b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	48
Şekil 5.1.9 NS-C-0h ve NS-C-3c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	48
Şekil 5.1.10 NS-C-0i ve NS-C-3d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	49
Şekil 5.1.11 NS-C-3e gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi.....	49
Şekil 5.1.12 NS-C-3f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi.....	49
Şekil 5.1.13 NS-C-0j ve NS-C-5a gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	50
Şekil 5.1.14 NS-C-0k ve NS-C-5b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	50
Şekil 5.1.15 NS-C-5c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi.....	50
Şekil 5.1.16 NS-C-5d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi.....	51
Şekil 5.1.17 NS-C-1c gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	51
Şekil 5.1.18 NS-C-1d gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	51
Şekil 5.1.19 NS-C-1e gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	52
Şekil 5.1.20 NS-C-1f gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	52
Şekil 5.1.21 NS-C-3a gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	52
Şekil 5.1.22 NS-C-3c gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	53
Şekil 5.1.23 NS-C-3d gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	53
Şekil 5.1.24 NS-C-3e gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	53
Şekil 5.1.25 NS-C-3f gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	54
Şekil 5.1.26 NS-C-5b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	54
Şekil 5.1.27 NS-C-5c gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	54
Şekil 5.1.28 NS-C-5d gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	55
Şekil 5.1.29 NS-C-1a ve NS-C-1d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	55
Şekil 5.1.30 NS-C-3a ve NS-C-3c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	56

Şekil 5.1.31 NS-C-3b ve NS-C-3d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	56
Şekil 5.1.32 NS-C-1c ve NS-C-1f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri	57
Şekil 5.1.33 NS-C-1a, NS-C-3a ve NS-C-5b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	57
Şekil 5.1.34 NS-C-1f, NS-C-3e, NS-C-3f, NS-C-5c ve NS-C-5d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri	58
Şekil 5.1.35 NS-C-3e ve NS-C-3f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri	58
Şekil 5.1.36 NS-C-5c ve NS-C-5d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	59
Şekil 5.1.37 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışların değişimi	60
Şekil 5.2.1 NS-R-1-0-40a ve NS-R-1-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	62
Şekil 5.2.2 NS-R-1-1-40a ve NS-R-1-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	62
Şekil 5.2.3 NS-R-1-3-40a ve NS-R-1-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	63
Şekil 5.2.4 NS-R-1-5-40a ve NS-R-1-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	63
Şekil 5.2.5 NS-R-1-0-40a gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi	64
Şekil 5.2.6 NS-R-1-1-40a ve NS-R-1-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri.....	64
Şekil 5.2.7 NS-R-1-3-40a ve NS-R-1-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri.....	65
Şekil 5.2.8 NS-R-1-5-40a ve NS-R-1-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri.....	65
Şekil 5.2.9 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi	66
Şekil 5.2.10 2. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	67
Şekil 5.3.1 NS-R-2-0-40a ve NS-R-2-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	69
Şekil 5.3.2 NS-R-2-1-40a ve NS-R-2-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	69
Şekil 5.3.3 NS-R-2-3-40a ve NS-R-2-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	70
Şekil 5.3.4 NS-R-2-5-40a ve NS-R-2-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	70

Şekil 5.3.5 NS-R-2-1-40a ve NS-R-2-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	71
Şekil 5.3.6 NS-R-2-3-40a ve NS-R-2-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	71
Şekil 5.3.7 NS-R-2-5-40a ve NS-R-2-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	72
Şekil 5.3.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi	73
Şekil 5.3.9 3. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	73
Şekil 5.4.1. LS-C-1a ve LS-C-1b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	75
Şekil 5.4.2. LS-C-2a ve LS-C-2b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	75
Şekil 5.4.3. LS-C-3a ve LS-C-3b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	76
Şekil 5.4.4. LS-C-4a ve LS-C-4b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	76
Şekil 5.4.5. LS-C-5a ve LS-C-5b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	77
Şekil 5.4.6. LS-C-6a ve LS-C-6b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	77
Şekil 5.4.7. LS-C-1a ve LS-C-1b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	78
Şekil 5.4.8. LS-C-2a ve LS-C-2b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	78
Şekil 5.4.9. LS-C-3a ve LS-C-3b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	79
Şekil 5.4.10. LS-C-4a ve LS-C-4b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	79
Şekil 5.4.11. LS-C-5a ve LS-C-5b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	80
Şekil 5.4.12. LS-C-6a ve LS-C-6b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	80
Şekil 5.4.13 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışların değişimi	81
Şekil 5.5.1 LS-R-1-0-40a ve LS-R-1-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	83
Şekil 5.5.2 LS-R-1-1-40a ve LS-R-1-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	83
Şekil 5.5.3 LS-R-1-3-40a ve LS-R-1-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	84
Şekil 5.5.4 LS-R-1-5-40a ve LS-R-1-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	84
Şekil 5.5.5 LS-R-1-1-40a ve LS-R-1-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	85
Şekil 5.5.6 LS-R-1-3-40a ve LS-R-1-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	85
Şekil 5.5.7 LS-R-1-5-40a ve LS-R-1-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	86
Şekil 5.5.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi	87

Şekil 5.5.9 5. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	87
Şekil 5.5.10 LS-R-1-0-40b, LS-R-1-1-40b, LS-R-1-3-40b ve LS-R-1-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	88
Şekil 5.5.11 LS-R-1-5-40b için farklı ölçüm boylarından fotogrametrik yöntemle elde edilen gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri	89
Şekil 5.5.12 LS-R-1-5-40b için aynı ölçüm boyundan fotogrametrik yöntem ve şekildeğiştirmeölçerlerle elde edilen gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.	89
Şekil 5.5.13 LS-R-1-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri.....	89
Şekil 5.6.1 LS-R-2-0-40a ve LS-R-2-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	92
Şekil 5.6.2 LS-R-2-1-40a ve LS-R-2-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	93
Şekil 5.6.3 LS-R-2-3-40a ve LS-R-2-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	93
Şekil 5.6.4 LS-R-2-5-40a ve LS-R-2-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	94
Şekil 5.6.5 LS-R-2-1-40a ve LS-R-2-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	94
Şekil 5.6.6 LS-R-2-3-40a ve LS-R-2-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	95
Şekil 5.6.7 LS-R-2-5-40a ve LS-R-2-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	95
Şekil 5.6.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi	96
Şekil 5.6.9 6. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	96
Şekil 5.7.1 LS-R-3-0-40a ve LS-R-3-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	98
Şekil 5.7.2 LS-R-3-1-40a ve LS-R-3-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	98
Şekil 5.7.3 LS-R-3-3-40a ve LS-R-3-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	99
Şekil 5.7.4 LS-R-3-5-40a ve LS-R-3-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	99
Şekil 5.7.5 LS-R-3-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	100
Şekil 5.7.6 LS-R-3-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	100

Şekil 5.7.7 LS-R-3-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi.....	100
Şekil 5.7.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi	101
Şekil 5.7.9 7. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	102
Şekil 5.8.1 LS-R-1.5-0-40a ve LS-R-1.5-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	104
Şekil 5.8.2 LS-R-1.5-3-10a ve LS-R-1.5-3-10b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	104
Şekil 5.8.3 LS-R-1.5-3-20a ve LS-R-1.5-3-20b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	105
Şekil 5.8.4 LS-R-1.5-3-40a ve LS-R-1.5-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	105
Şekil 5.8.5 LS-R-1.5-3-10a gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	106
Şekil 5.8.6 LS-R-1.5-3-20b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri	106
Şekil 5.8.7 LS-R-1.5-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri.....	106
Şekil 5.8.8 Köşe yarıçapı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi	107
Şekil 5.8.9 8. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri.....	108

KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER MALZEMELER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DÜŞÜK VE NORMAL DAYANIMLI BETON ELEMANLARIN DAVRANIŞI

ÖZET

Betonarme yapıların şiddetli depremler sırasında, göçme olmadan, elastik ötesi şekildeğiştirmeler yapmasına izin verilir. Taşıyıcı elemanların yapacakları plastik şekildeğiştirmeler ile daha fazla enerji yutulması ve böylece yapının ayakta kalabilmesi istenir. Ancak betonarme taşıyıcı elemanların dayanım kaybına uğramadan büyük plastik şekildeğiştirmeler yapabilmeleri için yeterli miktarda enine donatı ile sarılmış olmaları gerekmektedir. Yeterli miktarda enine donatı ile sarılmış betonun, sarılmamış betona oranla, daha büyük dayanıma ulaşabildiği ve daha büyük şekildeğiştirme yapabildiği pek çok araştırmacı tarafından gösterilmiştir.

Ülkemizde mevcut yapıların önemli bir bölümü yürürlükte olan ilgili yönetmelik ve standartlara uygun değildir. Bir çok eksiklik arasında en önemlilerinden ikisi; taşıyıcı elemanların beton basınç dayanımlarının düşük, enine sargı donatılarının da yetersiz olmasıdır. Bu durumdaki taşıyıcı elemanlar deprem esnasında meydana gelen yatay ve düşey kuvvetler etkisinde gevrek bir davranış göstererek hasar görmekte, ya da tamamen göçmektedir. Bu eksiklikleri gidermek için uygulanan güçlendirme yöntemleri arasında lif takviyeli polimer tabakalar ile güçlendirme tüm dünyada gün geçtikçe daha fazla uygulanmaya başlayan bir yöntemdir.

Sunulan bu tezin kapsamında, karbon lif takviyeli polimer tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilen düşük ve normal dayanımlı, daire, kare ve dikdörtgen enkesitli beton elemanların, aksenal yükler altındaki davranışı üzerine yapılan deneysel çalışma sonuçları sunulmaktadır. Bu deneysel çalışmada beton kalitesi ve eleman kesit şekli dışında tekrarlı yükleme durumunun, ön hasar durumunun, güçlendirmede kullanılan lif takviyeli polimer tabaka kalınlığının ve dairesel olmayan elemanlarda köşe yarıçapının davranışa etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda incelenen güçlendirme yönteminin gerek normal gerekse düşük dayanımlı beton elemanlarda, dayanım ve şekildeğiştirebilme özelliklerini önemli oranda arttırdığı görülmüştür.

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

BEHAVIOR OF LOW AND MEDIUM STRENGTH CONCRETE MEMBERS STRENGTHENED WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS

SUMMARY

Although Turkey is located in a very active seismic zone and experienced catastrophic earthquakes in the past, most of the existing structures do not have sufficient earthquake resistance. In the last two destructive earthquakes in 1999, thousands of people died. The economical loss was also huge. Besides not exactly known, the loss estimations were about 25 billion dollars for these earthquakes.

There are various parameters affecting the seismic behavior of structures. Poor concrete quality and inadequate confinement reinforcement of the structural members are among the major deficiencies of the existing structures in Turkey. These deficiencies cause significant reductions in strength and ductility. Other than insufficient existing structural members, there are also situations where the load carrying capacity of a structure needs to be increased, due to change of loading or use. For several decades various strengthening techniques have been developed. One of them is jacketing concrete members with fiber reinforced polymer (FRP) composite sheets. This kind of strengthening provides lateral confinement and consequently enhancement in strength and deformability. Besides being relatively expensive than the conventional techniques like concrete or steel jacketing, usage of FRP jacketing system has many important advantages like easy and quick application, low weight to strength ratio and high durability. The availability of long lengths and the flexibility of the materials also simplify installation. An additional advantage of FRPs over some types of strengthening is that the weight of the structure and the dimensions of the members are not increased. The materials (fibres and resins) are durable if correctly specified, and require little maintenance. If they are damaged in service, it is relatively simple to repair them, by adding an additional layer. In terms of environmental impact and sustainability, studies have shown that the energy required to produce FRP materials is less than that for conventional materials. Because of their light weight, the transport of FRP materials has minimal environmental impact. Besides fiber reinforced polymers are relatively new materials they have a significant amount of usage for the last years in construction industry. A significant disadvantage of FRPs is the lack of accepted national design standards. However there are guidelines and standards which are published in recent years.

This thesis gives the results of the experiments carried on circular, square and rectangular low and 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, repeated

loading and initial damage on the axial stress-axial strain behavior of CFRP jacketed concrete members. 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: Compression; Concrete; Confinement; Ductility; Fiber Reinforced Polymers (FRP); Stress-Strain Curves.

1. GİRİŞ

Depremler, dünyanın birçok yerinde, gerekli önlemler alınmadığı takdirde, can ve mal kaybına yol açan en büyük doğal afetler arasındadır. Son senelerde yurdumuzda yaşanan depremler, (1995-Dinar, 1998-Ceyhan, 1999-Marmara ve Düzce) ülkemizdeki yapıların depreme dayanıklı olarak inşa edilememiş olduğunu ve bu yapılaşma anlayışının ne derece kötü sonuçlara neden olabileceğini bir kez daha göstermiştir. Meydana gelen depremler pek çok can kaybına yol açtığı gibi, önemli ekonomik kayıplara da neden olmuştur.

Yapıların depremlerde gösterdiği kötü davranışın bir çok farklı nedeni olmakla beraber, mevcut betonarme yapılarda en büyük sorunlardan ikisi, taşıyıcı elamanların beton kalitesinin düşük olması ve yapı elemanlarının sünek davranamamasıdır. Düşük dayanımlı beton kullanılarak yapılan taşıyıcı elemanların eksenel yük taşıma kapasiteleri büyük ölçüde azalmakta ve bu elemanlar deprem sırasında meydana gelen ek zorlanmalara karşı koyamamaktadırlar. Ayrıca düşük beton dayanımı kolonlar üzerindeki eksenel gerilmenin artmasına neden olmakta, bu da elemanların gevrek davranması sonucunu doğurmaktadır. Yapı, deprem kuvvetlerine maruz kaldığında, taşıyıcı sistem elemanlarının sünek davranış göstermesi ve enerji yutması, yapının göçmeden ayakta kalabilmesi açısından önemlidir. Mevcut yapılarda bu sünekliğin sağlanamamasının en büyük nedenlerinden biri enine donatının yetersizliğidir. Enine sargı donatısının etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve enine donatının önemi bu araştırmalarla açıkça ortaya konmuştur [1-5]. Bu nedenle yapılacak yeni yapılar için gerek beton kalitesi, gerekse enine donatı için ilgili yönetmeliklerce istenen şartlar yerine getirilmelidir. Mevcut yetersiz yapılarda ise istenilen dayanım ve süneklik düzeyi güçlendirme çalışmaları ile elde edilmelidir.

Çoğu zaman bir yapının güçlendirilmesi oldukça yüksek maliyet getirmekle beraber, en başta insan hayatı olmak üzere diğer kayıpların olabildiğince aza indirilebilmesi açılarından, güçlendirme çoğu kez gereklidir. Günümüzde farklı amaçlar için birçok güçlendirme tekniği uygulanmaktadır. Bu tekniklere her geçen gün yenileri

eklenmekte ve mevcut yöntemlerin geliştirilmesi için birçok araştırmacı çalışmalarını sürdürmektedir. Taşıyıcı elemanların lif takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemeler kullanılarak güçlendirilmesi bu tekniklerden biridir. Karbon, cam ve aramid lifler günümüzde bu amaçla en yaygın kullanım bulan malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek elastisite modülüne ve dayanımına sahip, birim ağırlığı düşük, uygulaması oldukça hızlı ve kolay yapılabilen, çevre koşullarına dayanıklı malzemelerdir. Eksenel kuvvete maruz mevcut taşıyıcı elemanlar, dayanım ve süneklik özelliklerinin geliştirilmesi için, FRP kompozit malzemeler ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilebilmektedirler.

Karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kompozitler ile güçlendirme yeni bir teknik olmasına rağmen bu konuda bugüne kadar yapılmış çalışmalar bir hayli fazladır. Fukuyama ve Sugano [6], 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. Mirmiran ve Shahawy [7], 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 [8], yaptığı deneysel ve analitik çalışmada, 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. Xiao ve Wu [9], CFRP sargıları ile güçlendirilmiş daire enkesitli numuneler üzerinde çalışarak, CFRP sargı kalınlığının ve numune beton dayanımlarının davranışa olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonunda karbon lif ile sargılamanın dayanım ve sünekliği arttırdığını göstermiş ve bu ilişkiyi vermesi amacıyla bir analitik model önermişlerdir. Wang ve Restrepo [10], cam lif takviyeli polimer (GFRP) malzeme ile güçlendirdikleri enine ve boyuna donatılı (3 adet) kare ve (3 adet) dikdörtgen enkesitli numunenin, eksenel yükler altında davranışlarını

incelemişler ve bir analitik model önermişlerdir. Bu çalışma sonucunda, numunelerin dayanım ve şekildeğiştirme özelliklerinin iyileştiğini, ayrıca sargılamının boyuna donatıların burkulmasını önleyici özelliği olduğunu belirtmişlerdir. İlki ve Kumbasar [11], daire enkesitli, orijinal durumları denenmiş hasarlı numuneleri ve hasarsız numuneleri CFRP tabakalar ile enine doğrultuda sararak güçlendirmişler ve bu numuneleri monoton artan veya tekrarlı yükler altında test etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş elemanların dayanım ve şekildeğiştirmesinin CFRP tabaka kalınlığı ile orantılı olarak önemli ölçüde arttığını belirtmiş, ayrıca önerdikleri analitik modeli, çalışmalarındaki ve literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. İlki ve Kumbasar bir diğer çalışmalarında [12], CFRP tabakalar ile güçlendirdikleri daire, kare ve dikdörtgen enkesitli beton elemanlar üzerinde yaptıkları eksenel basınç deneyleri sonunda elde ettikleri sonuçları dayanım, eksenel ve enine şekildeğiştirme ve enerji yutma özelliklerine göre sunmuşlardır. İlki ve diğ. [13], 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.

Bu çalışmada normal ve düşük beton basınç dayanımına sahip daire, kare ve dikdörtgen enkesitli beton elemanlar enine doğrultuda farklı kalınlıkta CFRP tabakaları ile güçlendirilmiş, bu güçlendirme tekniğinin eksenel yüklere maruz betonun davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, numuneler iki farklı beton basınç dayanımında üretilmiştir. Bir kısmı ülkemiz için deprem bölgelerinde kullanılması hedeflenen normal dayanımlı beton kalitesinde, diğerleri ise ülkemizdeki mevcut duruma benzer olarak düşük beton basınç dayanımında üretilmiştir. Farklı kesitlerde hazırlanan numunelerin deneylerinden elde edilen sonuçlarla, kesit şeklinin davranışa etkisi incelenmiştir. Normal dayanımlı daire enkesitli numunelerden bir kısmı önceden hasar verilip güçlendirilmiş, bir kısmı ise doğrudan güçlendirilmiştir. Bu serideki numunelerden bazıları tekrarlı yükler altında, bazıları ise monoton artan yükler altında denenmiştir. Bu seri deneylerinden elde edilen bilgiler, sonraki çalışmalara ışık tutmuş ve bu çalışmalarda parametre sayısının azaltılabilesini sağlamıştır.

Normal dayanımlı üretilen ilk seri, daire enkesitli toplam 16 adet numuneyi içermektedir. Bu numunelerden 5 adedi doğrudan güçlendirilerek, kalan 11 adedi ise orijinal durumunda denenip sonradan onarılıp güçlendirilerek deneye tabi tutulmuştur. Hasar verildikten sonra onarılıp güçlendirilen 11 adet numune, ilk deneyler sırasında 0,004 ila 0,008 arasında eksenel kısalmaya maruz bırakılmış, sonra onarılmış ve daha sonra da enine doğrultuda farklı kalınlıklarda CFRP tabakaları ile sarılarak güçlendirilmiştir. Bu numunelerden bir kısmı tekrarlı, bir kısmı ise monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Bu seri deneyleri ile, ön hasarın, tekrarlı yüklerin, beton basınç dayanımının (4. seri ile karşılaştırılarak), enkesit şeklinin (2. ve 3. seri ile karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

İkinci seride normal dayanımlı, kare enkesitli, $250 \times 250 \times 500$ mm boyutlarında, 8 adet numune monoton artan basınç gerilmeleri altında denenmiştir. 8 adet numunenin 2 adedi 1 kat, 2 adedi 3 kat, 2 adedi 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, kalan 2 adet numune ise orijinal durumunda denenmiştir. Beton basınç dayanımının (5. seri ile karşılaştırılarak), enkesit şeklinin (1. ve 3. serilerle karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

Üçüncü seride normal dayanımlı, dikdörtgen enkesitli, $150 \times 300 \times 500$ mm boyutlarında, 8 adet numune monoton artan basınç gerilmeleri altında denenmiştir. 2. seriye benzer şekilde, 8 adet numunenin 2 adedi 1 kat, 2 adedi 3 kat, 2 adedi 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, kalan 2 adet numune ise orijinal durumunda denenmiştir. Beton basınç dayanımının (6. seri ile karşılaştırılarak), enkesit şeklinin (1. ve 2. serilerle karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

Dördüncü seride düşük dayanımlı olarak üretilen 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde daire enkesitli, 12 adet numune 2'şerli gruplar halinde 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 kat enine doğrultuda CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiştir. Bunlara özdeş 2 adet numune ise orijinal durumda denenmiştir. Monoton artan basınç gerilmeleri altında yapılan deneyler ile beton basınç dayanımının (1. seri ile karşılaştırılarak), enkesit şeklinin (5. 6. 7. ve 8. serilerle karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

Beşinci seride düşük dayanımlı, kare enkesitli, $250 \times 250 \times 500$ mm boyutlarında 8 adet numune monoton artan basınç gerilmeleri altında denenmiştir. 8 adet numunenin 2 adedi 1 kat, 2 adedi 3 kat, 2 adedi 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, kalan 2 adet numune ise orijinal durumunda denenmiştir. Beton basınç dayanımının (2. seri ile karşılaştırılarak), enkesit şeklinin (4. 6. 7. ve 8. seri ile karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

Altıncı seride düşük dayanımlı, dikdörtgen enkesitli, $150 \times 300 \times 500$ mm boyutlarında, 8 adet numune monoton artan basınç gerilmeleri altında denenmiştir. 8 adet numunenin 2 adedi 1 kat, 2 adedi 3 kat, 2 adedi 5 CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, kalan 2 adet numune ise orijinal durumunda denenmiştir. Beton basınç dayanımının (3. seri ile karşılaştırılarak), enkesit şeklinin (4. 6. 7. ve 8. seri ile karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

Yedinci seride düşük dayanımlı, dikdörtgen enkesitli, $150 \times 450 \times 500$ mm boyutlarında, 8 adet numune monoton artan basınç gerilmeleri altında denenmiştir. 8 adet numunenin 2 adedi 1 kat, 2 adedi 3 kat, 2 adedi 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, kalan 2 adet numune ise orijinal durumunda denenmiştir. Enkesit şeklinin (4. 5. 6. ve 8. seri ile karşılaştırılarak) ve CFRP tabaka kalınlığının, davranışa etkileri incelenmiştir.

Sekizinci seride düşük dayanımlı, dikdörtgen enkesitli, $150 \times 225 \times 500$ mm boyutlarında, 8 adet numunenin 6 adedi doğrudan güçlendirilerek, monoton artan basınç gerilmeleri altında denenmiştir. Güçlendirilen 6 numune de 3 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, kalan 2 adet numune ise orijinal durumunda denenmiştir. Güçlendirilen 6 adet numunenin, 2 adedinin köşeleri 10 mm, 2 adedinin köşeleri 20 mm ve 2 adedinin köşeleri ise 40 mm yarıçapında yuvarlatılmıştır. Kesit şekli ve köşe yarıçapının davranışa etkisi incelenmiştir.

Bu tez kapsamında deneye tabi tutulan numunelerin özellikleri hakkında özet tablo Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Çalışma kapsamında denenen numunelere ait genel özellikler

Seri	Beton Dayanımı	Kesit	Numune Sayısı	Güçlendirme	Yükleme
1	Normal	Daire	16	Hasar verilip güçlendirme Doğrudan güçlendirme	Tekrarlı Monoton artan
2	Normal	Kare (250×250)	8	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan
3	Normal	Dikdörtgen (150×300)	8	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan
4	Düşük	Daire	14	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan
5	Düşük	Kare (250×250)	8	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan
6	Düşük	Dikdörtgen (150×300)	8	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan
7	Düşük	Dikdörtgen (150×450)	8	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan
8	Düşük	Dikdörtgen (150×225)	8	Doğrudan güçlendirme	Monoton artan

Yapılan deneyler sonucunda CFRP tabakaları ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş, eksenel yükler etkisindeki numunelerin dayanımının ve şekildeğiştirme yapabilme yeteneğinin, CFRP tabaka kalınlığı ile orantılı olarak, önemli ölçüde arttığı belirlenmiş, sağlanan bu artışın düşük dayanımlı elemanlarda daha belirgin olduğu görülmüştür.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİ, NUMUNELERİN HAZIRLANMASI VE MALZEME DENEYLERİ

Bu çalışma kapsamında normal dayanımlı 16 adet daire, 8 adet kare, 8 adet dikdörtgen enkesitli toplam 32 adet numune, düşük dayanımlı 14 adet daire, 8 adet kare ve 24 adet dikdörtgen enkesitli toplam 46 adet numune eksenel basınç gerilmeleri altında deneye tabi tutulmuştur. Normal dayanımlı numunelerde sarılmamış 28 günlük beton basınç dayanımı 17.07 MPa ile 29.28 MPa arasında, düşük dayanımlı numunelerde ise 5.69 MPa ile 10.51 MPa arasındadır. Numunelerin bir kısmı orijinal halde denenirken diğer numuneler enine doğrultuda CFRP tabakalar ile sarılarak güçlendirildikten sonra denenmiştir. Daire enkesitli numuneler 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde, kare enkesitli numuneler $250 \times 250 \times 500$ mm boyutlarında, dikdörtgen enkesitli numuneler ise $150 \times 300 \times 500$, $150 \times 450 \times 500$ ve $150 \times 225 \times 500$ mm boyutlarındadır.

FRP malzemeler göreceli olarak yeni olmalarına karşın son yıllarda yurtdışında bu malzemelerin kullanımı önemli oranda artmaya başlamıştır. Kopmaya kadar doğrusal elastik davranış gösteren bu malzemelerin en önemli avantajı yüksek dayanım ve elastisite modülleri, düşük birim ağırlıkları ve çevresel etkilere dayanıklılıklarıdır. Kolayca istenilen uzunluklara kesilebilmeleri ve tek parça halinde çok uzun olarak kullanılabilmesi, kolayca istenilen şeklin verilebilmesi (özellikle dairesel elemanlar için) diğer bazı avantajlarıdır. Bu özellikler FRP malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme uygulamalarının, diğer güçlendirme teknikleri karşısında önemli oranda kolay ve hızlı olabildiğini sağlamaktadır. Çoğu durumda oldukça önemli olabilecek bir başka avantajı ise, uygulandığı elemanların boyutlarını ve yapının ağırlığını arttırmamasıdır.

FRP malzemelerin bir dezavantajı yüksek maliyetleri olarak görülse de, karşılaştırma sadece malzemenin fiyatı üzerinden değil de tüm uygulama ve sonrası üzerinden yapılırsa çoğu zaman uygun bir maliyete sahip olmaktadır. En önemli dezavantajı ise, şu ana kadar bu uygulama ile ilgili geniş ölçüde kabul görmüş bir yönetmeliğin

hazırlanmamış olmasıdır. Bu eksikliğe yönelik, tasarım kriterleri ile ilgili çalışmalar sürmektedir, [14,15].

Tablo 2.1’de yaygın olarak kullanılan farklı tür FRP malzemelerin ve yapısal çeliğin birim ağırlıkları, Tablo 2.2’de ise FRP malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 2.1 FRP malzemelerin ve çeliğin birim ağırlıkları (t/m^3)

Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
7,9	1,2~2,1	1,5~1,8	1,2~1,5

Tablo 2.2 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 2.3 ve 2.4’te sunulmuştur.

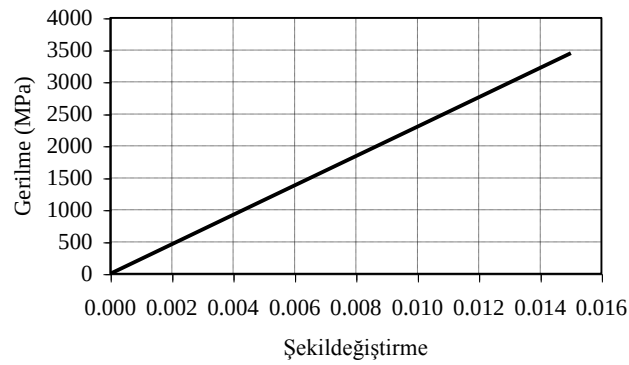
Tablo 2.3 C1-30 türü karbon lif takviyeli polimer tabakaların geometrik özellikleri

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 2.4 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

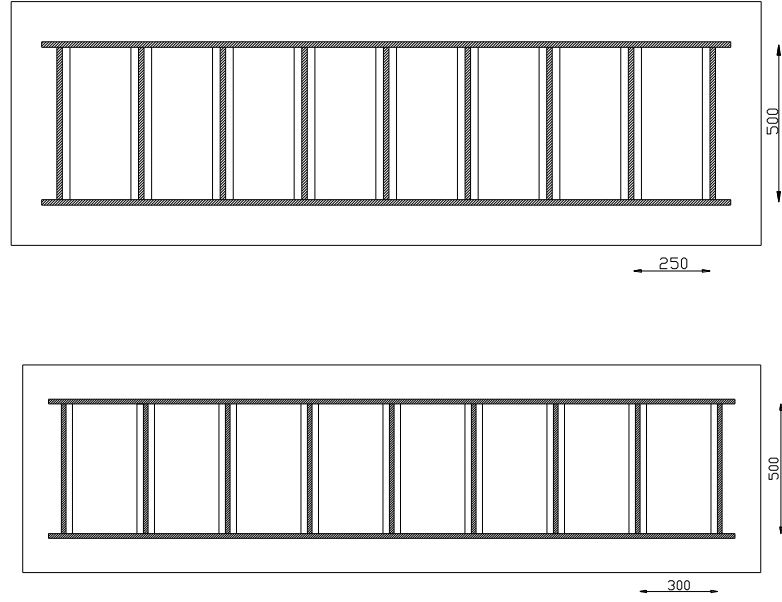
FRP malzemeler, kopma dayanımına ulaşana dek, doğrusal bir gerilme şekildeğiştirme ilişkisi gösterir, Şekil 2.1.



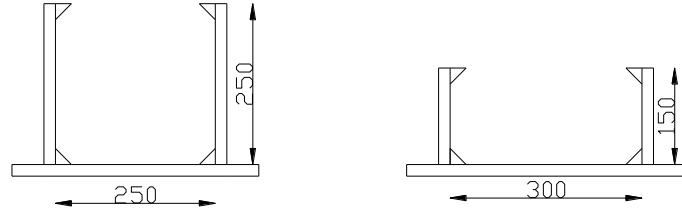
Şekil 2.1 Çalışmada kullanılan C1-30 türü CFRP için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Numunelerin beton dökümü, kürü, güçlendirilmesi ve deneyleri İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Laboratuarlarında gerçekleştirilmiştir. Eksenel gerilmelere maruz ve dairesel enkesitli olmayan betonarme elemanlarda enine sargı uygulanması durumunda, yükleme sırasında kesit köşelerinde gerilme yığılmaları oluşacağı bilinmektedir. Bu nedenle, deneyler sırasında meydana gelecek gerilme yığılmalarını azaltmak amacıyla, güçlendirilecek kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin köşeleri, 8. seri hariç, 40 mm yarıçapında çeyrek daire şekline gelecek biçimde yuvarlatılmıştır. Yuvarlatma işleminde kolaylık sağlamak amacıyla, kalıplara dik kenarları 25 mm olan ikizkenar üçgen enkesitli tahtalar çakılarak, numunelerin kalıplardan pahlı olarak çıkması sağlanmıştır. 2. ve 3. seri numunelerinin üretimi için hazırlanan kalıplara ait şekiller aşağıda sunulmuştur, Şekil 2.2, 2.3 ve 2.4. Her seri numuneleri için beton dökümünü izleyen 14 gün boyunca numuneler, sabah ve akşam birer kez olmak üzere günde iki kez sulanarak kür yapılmıştır. Sulama işleminden sonra numunelerin üzeri ıslak amerikan bezi ile örtülerek numunelerin devamlı nemli kalması sağlanmış ve rötre çatlaklarının oluşması engellenmiştir.

Gerek deney numuneleri, gerekse standart silindirler aynı şartlarda saklanmış ve aynı kür uygulanmıştır.



Şekil 2.2 2. ve 3. seri numune kalıplarının plan görünüşü



Şekil 2.3 2. ve 3. seri kalıplarının pahlı enkesitleri



Şekil 2.4 2. ve 3. seri numune üretiminde kullanılan ahşap kalıplar

Üretilen numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenebilmesi ve betonun farklı yaşlardaki dayanımının bilinmesi önemlidir. Bu nedenle, beton dökümünü izleyen 28. 90. ve 180. günlerde, standart silindir eksenel basınç deneyleri yapılmıştır. Şekildeğiştirmelerin elde edilebilmesi için, yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Bu amaçla hem kompresometre hem de CDP-25 türü yerdeğiştirmeölçerlerden yararlanılmıştır. Kompresometrede bulunan iki adet CDP-5 türü yerdeğiştirmeölçerler kullanılarak numunenin orta 150 mm yüksekliğindeki kısmından ölçüm alınmıştır. Kullanılan iki adet CDP-25 türü yerdeğiştirmeölçer ile de tüm boydan ölçüm alınmıştır. Bu yerdeğiştirmeölçerler silindir numunenin etrafına, aralarında 180° açı ve numune yüzeyinden 100 mm uzaklıkta ölçüm alacak şekilde yerleştirilmişlerdir, Şekil 2.5. Toplanan veriler yardımıyla tüm numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir.



Şekil 2.5 Standart silindir basınç deneyi için hazırlanan düzenek

1. Seri olarak tanımlanan, normal dayanımlı daire enkesitli numuneler 3 farklı beton karışımı ile üretilmiştir. Beton basınç dayanımı olarak ilk iki karışım için yaklaşık 20 MPa, 3. karışım için ise 35 MPa amaçlanmıştır. Her üç karışımında, betonun iyi yerleşmesini sağlamak amacıyla 180 mm çökme elde edilecek kıvamda hazır beton kullanılmıştır. 1. ve 2. karışımında maksimum agrega çapı 8 mm, 3. karışımında ise 16 mm dir. Kullanılan beton karışımları Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5 Normal dayanımlı daire enkesitli numuneler için kullanılan beton karışımları (1. seri 1. 2. ve 3. karışım)

Karışım	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (lt)	1 No Kırmataş (kg)	2 No Kırmataş (kg)	Taş Tozu (kg)	Kum (kg)	Katkı (kg)
1-2	278	40	210	720	—	535	540	1.2
3	420	—	180	750	200	400	450	4.2

1. ve 2. karışımlarda Su/Çimento oranı 0.76, Su/(Çimento+Kül) oranı 0.66 olup, beton birim hacim ağırlığı 2324 kg/m^3 değerindedir. Kullanılan Portland çimentosu PÇ 42.5 cinsi olup Bolu Çimento tarafından üretilmiştir. Mineral katkı malzemesi olarak termik santrallerden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan 1 No kırmataşın agrega çapları 4 ve 8 mm arasında değişmektedir. Her üç karışım için kullanılan taş tozu, dane çapı kum ile 1 No kırmataş arasında olan ve kırmataşlardan elde edilmiş tozdur. Her üç karışım kum olarak Akpınar yöresinden elde edilen deniz kumu kullanılmıştır. Kimyasal katkı malzemesi SİKA Bv40 akışkanlaştırıcıdır. Akışkanlaştırıcı katkı (çimento+kül) ağırlığının 0.004'ü kadar kullanılmıştır.

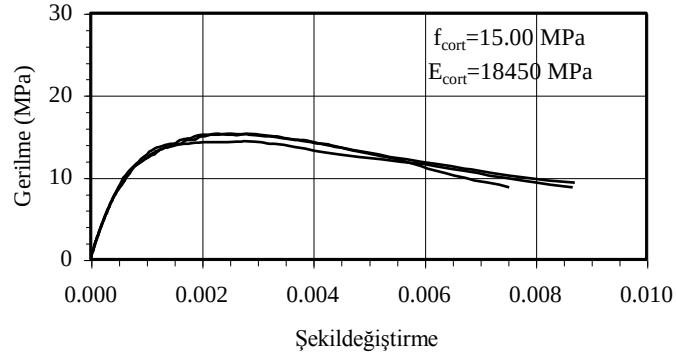
3. karışımında Su/Çimento oranı 0.43, beton birim hacim ağırlığı 2404 kg/m^3 değerindedir. Kullanılan Portland çimentosu PÇ 42.5 cinsi olup Bolu Çimento tarafından üretilmiştir. Kullanılan 1 No kırmataş agrega çapları 4 ve 8 mm, 2 No kırmataş agrega çapları ise 8 ve 16 mm arasında değişmektedir. Kimyasal katkı malzemesi olarak süper akışkanlaştırıcı SİKA Sikament FF kullanılmıştır. Bu katkının yüksek oranda su azalttığı (%25-30), 28 günlük basınç dayanımında yaklaşık %40 artış ve 8 saat içinde erken yüksek dayanım kazandırdığı üreticisi tarafından belirtilmektedir. Katkı çimento ağırlığının 0.01'i kadar kullanılmıştır.

Her üç karışım ile hazırlanan numunelerin üretimi sırasında çökme deneyleri de yapılmıştır. Standart çökme konisi kullanılarak yapılan deneyler sonrası elde edilen taze beton deney sonuçları Tablo 2.6'da verilmiştir.

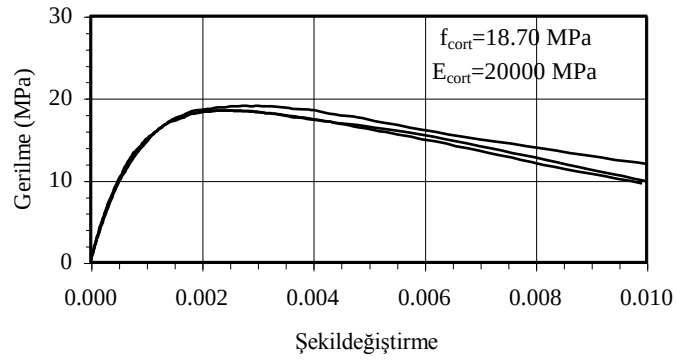
Tablo 2.6 1. seri 1. 2. ve 3. karışım için betonda çökme deneyi sonuçları

Karışım	Çökme (mm)	Yayılma Çapları (mm×mm)
1	230	310×330
2	220	320×340
3	140	260×270

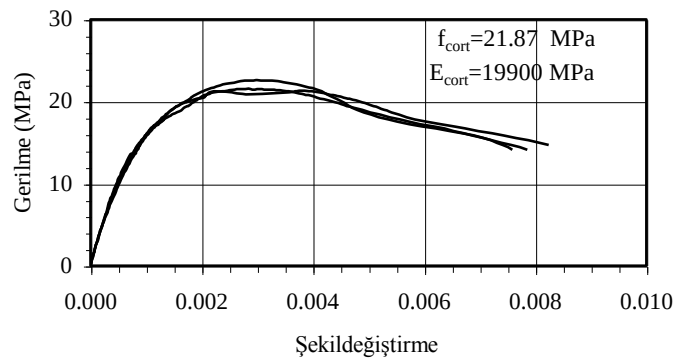
1. seri 1. karışım için kullanılan betonun, beton dökümünü izleyen 7., 14., 28., 90. ve 180. günde yapılan standart silindir basınç deneyleri ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla aşağıda verilmiştir, Şekil 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, ve 2.10. Şekil 2.11'de beton dayanımının zamanla değişimi görülmektedir.



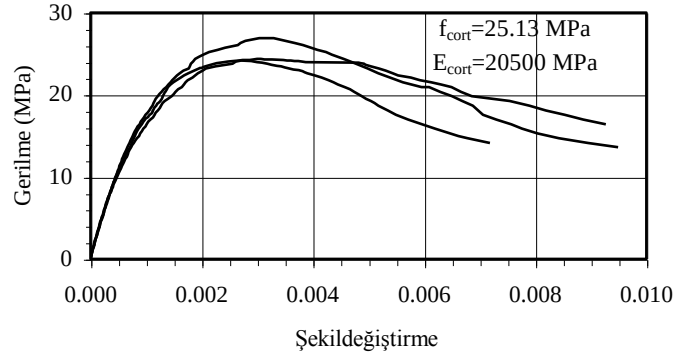
Şekil 2.6 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 7 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



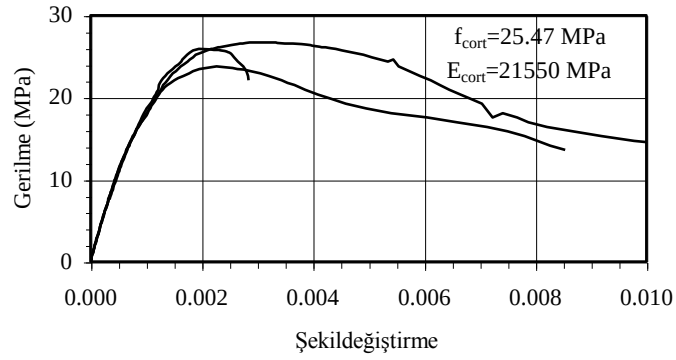
Şekil 2.7 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



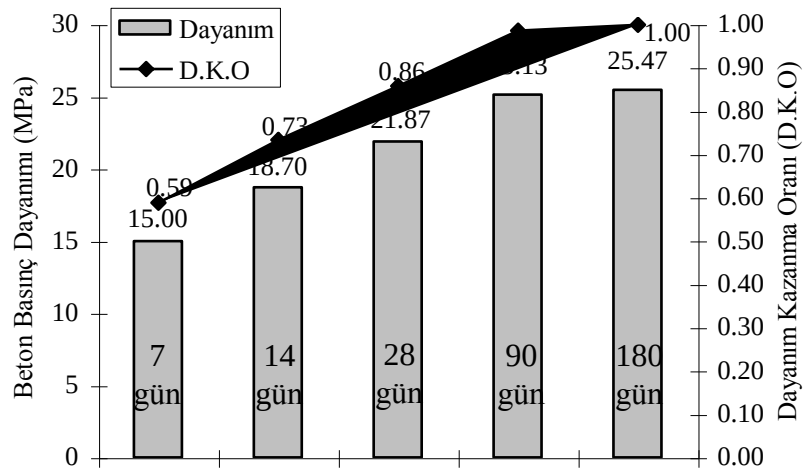
Şekil 2.8 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.9 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.10 1. seri 1. karışım için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.11 1. seri 1. karışım için beton basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi

1. seri 1. karışım numunelerinde kullanılan beton ile yapılan standart silindir basınç dayanımı deneylerinde, aynı günde denenen numunelerin basınç dayanımları ile bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı arasındaki en büyük fark yaklaşık % 7.2'dir. Numuneler için elastisite modülü belirlenirken, gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde 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. Her numune için belirlenen bu doğrunun, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin incelenen bölümünü yeterince yansıtıp yansıtmadığını belirlemek amacı ile korelasyon katsayısı hesaplanmış ve korelasyon katsayıları tüm numuneler için 0.998 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür, Tablo 2.7.

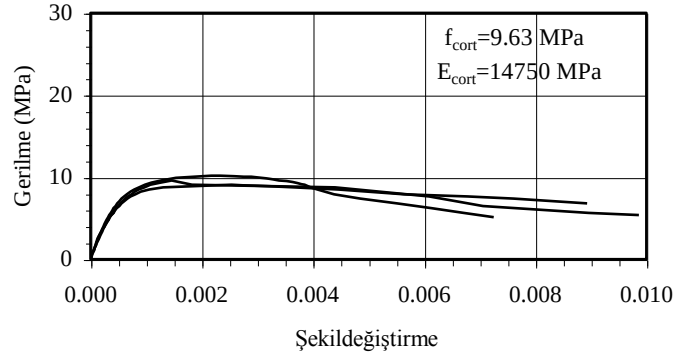
Tablo 2.7 1. seri 1. karışım için standart silindir basınç deneyleri sonuçları

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)	Korelasyon Katsayısı
SS1 ⁷	14.40	15.00	0.040	18700	18450	0.999
SS2 ⁷	15.30	15.00	0.020	18650	18450	0.999
SS3 ⁷	15.30	15.00	0.020	18000	18450	0.998
SS4 ¹⁴	18.50	18.70	0.011	20650	20000	0.998
SS5 ¹⁴	18.50	18.70	0.011	19850	20000	0.998
SS6 ¹⁴	19.10	18.70	0.021	19400	20000	0.998
SS8 ²⁸	21.40	21.87	0.022	19900	19900	0.998
SS10 ²⁸	21.60	21.87	0.014	18700	19900	0.998
SS11 ²⁸	22.60	21.87	0.032	21150	19900	0.999
SS12 ⁹⁰	24.30	25.13	0.032	20700	20500	0.998
SS13 ⁹⁰	24.20	25.13	0.036	20100	20500	0.998
SS15 ⁹⁰	26.90	25.13	0.072	20700	20500	0.999
SS16 ¹⁸⁰	23.80	25.47	0.067	21900	21550	1.000
SS17 ¹⁸⁰	26.70	25.47	0.047	20650	21550	0.999
SS18 ¹⁸⁰	25.90	25.47	0.016	22050	21550	0.999

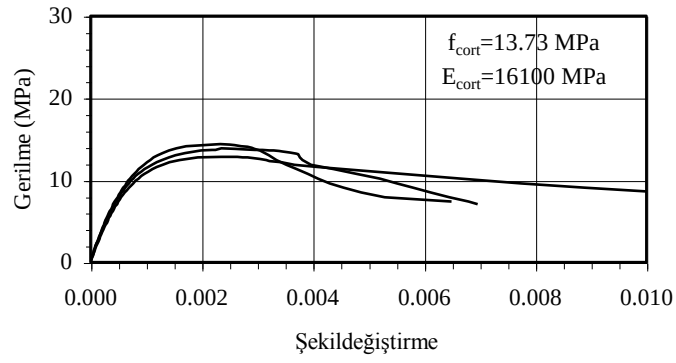
Not: ^{7, 14, 28, 90, 180} : Üst indisler gün olarak beton yaşını göstermektedir.

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

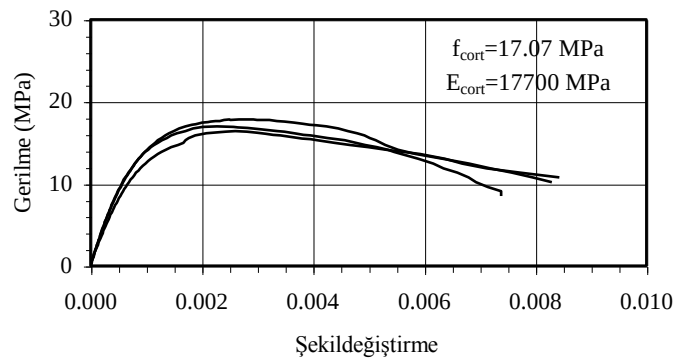
1. seri 2. karışım için kullanılan betonun, beton dökümünü izleyen 7., 14., 28., 90. ve 180. günde yapılan standart silindir basınç deneyleri ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla aşağıda verilmiştir, Şekil 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 ve 2.16. Şekil 2.17'de beton dayanımının zamanla değişimi görülmektedir.



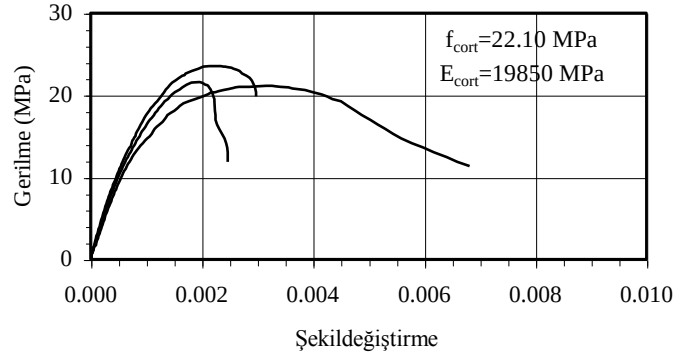
Şekil 2.12 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 7 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



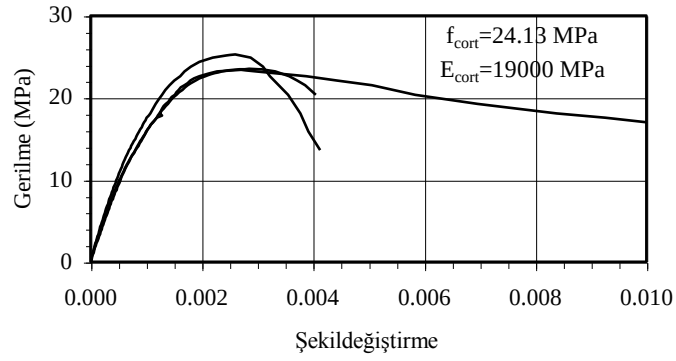
Şekil 2.13 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



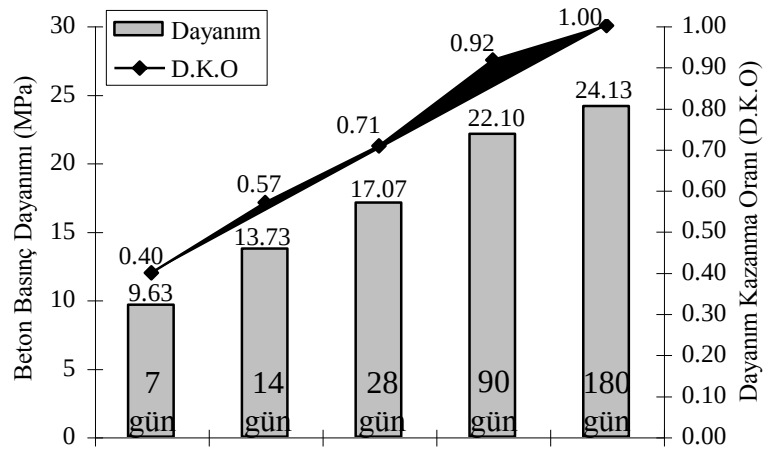
Şekil 2.14 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.15 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.16 1. seri 2. karışım için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.17 1. seri 2. karışım için beton basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi

1. seri 2. karışım numunelerinde kullanılan beton ile yapılan standart silindir basınç dayanımı deneylerinde, aynı günde denenen numunelerin basınç dayanımları ile bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı arasındaki en büyük fark yaklaşık % 6.8'dir. Elastisite modülü için geçirilen doğru ile gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ilgili bölümü için hesaplanan korelasyon katsayılarının, tüm numuneler için 0.993 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür, Tablo 2.8.

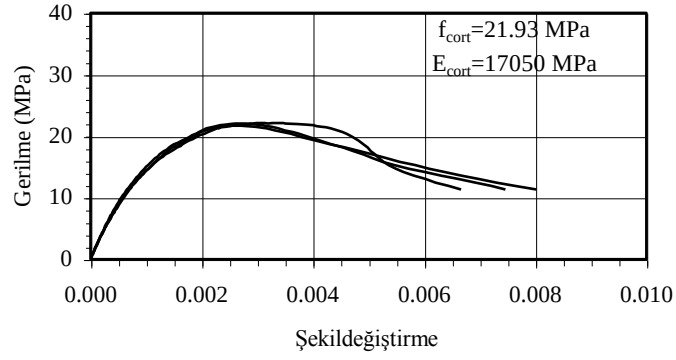
Tablo 2.8 1. seri 2. karışım için standart silindir basınç deneyleri sonuçları

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)	Korelasyon Katsayısı
SS2 ⁷	9.60	9.63	0.003	13400	14750	0.993
SS3 ⁷	10.20	9.63	0.059	16300	14750	0.999
SS4 ⁷	9.10	9.63	0.055	14600	14750	0.999
SS6 ¹⁴	14.40	13.73	0.049	17000	16100	0.998
SS7 ¹⁴	13.90	13.73	0.012	16000	16100	0.998
SS8 ¹⁴	12.90	13.73	0.060	15300	16100	0.999
SS9 ²⁸	16.40	17.07	0.039	15850	17700	0.999
SS10 ²⁸	17.80	17.07	0.043	18450	17700	0.999
SS11 ²⁸	17.00	17.07	0.004	18800	17700	0.999
SS12 ⁹⁰	23.60	22.10	0.068	20950	19850	0.998
SS13 ⁹⁰	21.60	22.10	0.023	20050	19850	0.999
SS14 ⁹⁰	21.10	22.10	0.045	18500	19850	0.999
SS15 ¹⁸⁰	23.60	24.13	0.022	18500	19000	0.999
SS16 ¹⁸⁰	23.50	24.13	0.026	18250	19000	0.999
SS17 ¹⁸⁰	25.30	24.13	0.048	20250	19000	0.999

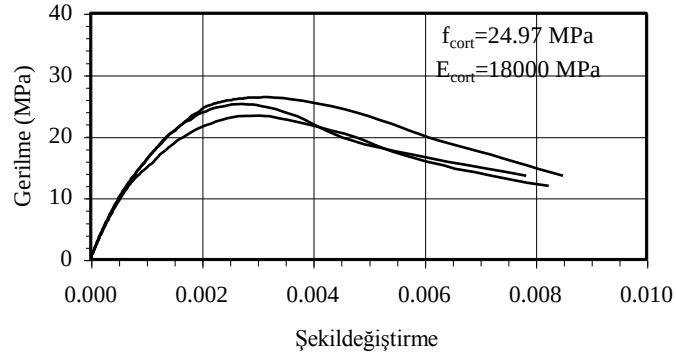
Not: ^{7, 14, 28, 90, 180} : Üst indisler gün olarak beton yaşını göstermektedir.

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

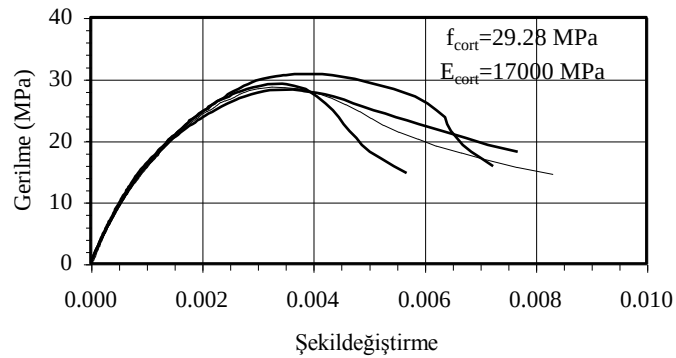
1. seri 3. karışım için kullanılan betonun, beton dökümünü izleyen 7., 14., 28. ve 90. günde yapılan standart silindir basınç deneyleri ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla aşağıda verilmiştir, Şekil 2.18, 2.19, 2.20 ve 2.21. Şekil 2.22'de beton dayanımının zamanla değişimi görülmektedir.



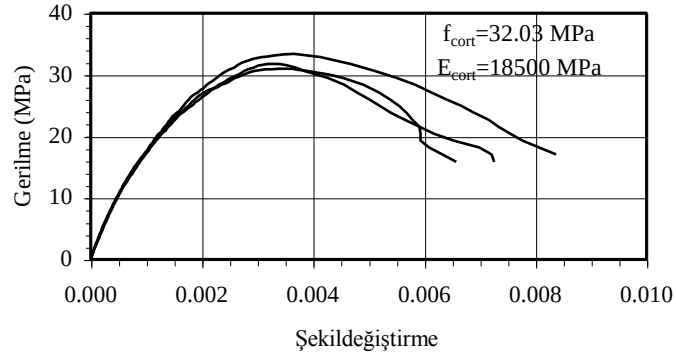
Şekil 2.18 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 7 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



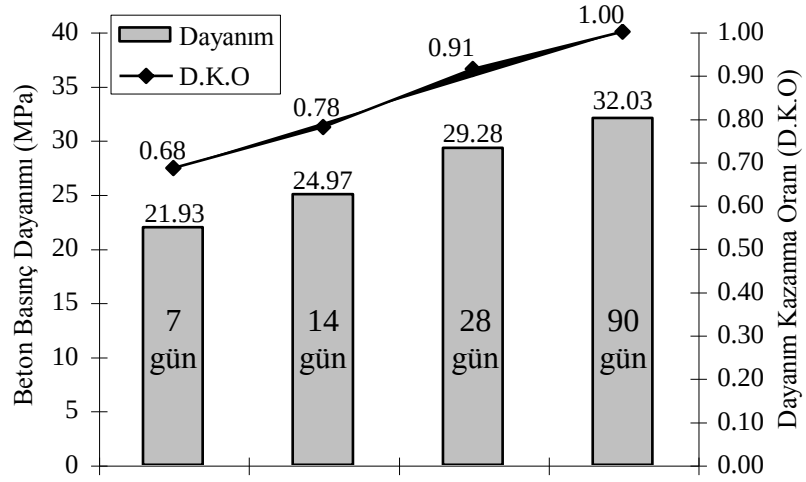
Şekil 2.19 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.20 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.21 1. seri 3. karışım için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.22 1. seri 3. karışım için beton basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi

1. seri 3. karışım numunelerinde kullanılan beton ile yapılan standart silindir basınç dayanımı deneylerinde, aynı günde denenen numunelerin basınç dayanımları ile bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı arasındaki en büyük fark yaklaşık % 6.7'dir. Elastisite modülü için geçirilen doğru ile gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ilgili bölümü için hesaplanan korelasyon katsayılarının, tüm numuneler için 0.996 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür, Tablo 2.9.

Tablo 2.9 1. seri 3. karışım için 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)	Korelasyon Katsayısı
SS1 ⁷	22.10	21.93	0.008	16150	17050	0.998
SS2 ⁷	22.00	21.93	0.003	17750	17050	0.998
SS3 ⁷	21.70	21.93	0.010	17250	17050	0.999
SS4 ¹⁴	25.30	24.97	0.013	18400	18000	0.998
SS5 ¹⁴	26.30	24.97	0.053	18000	18000	0.998
SS6 ¹⁴	23.30	24.97	0.067	17650	18000	0.998
SS7 ²⁸	28.20	29.28	0.037	16900	17000	0.998
SS8 ²⁸	30.80	29.28	0.052	16400	17000	0.998
SS9 ²⁸	29.20	29.28	0.003	17500	17000	0.998
SS10 ²⁸	28.90	29.28	0.013	17100	17000	0.996
SS11 ⁹⁰	31.00	32.03	0.032	18300	18500	0.996
SS12 ⁹⁰	31.80	32.03	0.007	18950	18500	0.997
SS13 ⁹⁰	33.30	32.03	0.040	18300	18500	0.997

2. ve 3. seri olarak tanımlanan, normal dayanımlı 250×250 mm enkesitli 500 mm yüksekliğinde 8 adet kare ve 150×300 mm enkesitli 500 mm yüksekliğinde 8 adet dikdörtgen numunenin beton dökümü 9 Kasım 2000 tarihinde gerçekleştirilmiştir. 20 MPa basınç dayanımına sahip olması beklenen hazır beton kullanılmıştır. İyi yerleşim sağlamak üzere çökme değeri 100~150 mm olacak kıvamda beton istenmiştir. Numuneler kalıba yerleştirilmeden önce kalıplar özel kalıp yağı ile yağlanmıştır. Beton döküm tarihinde hava sıcaklığı yaklaşık 18°C ölçülmüştür. 16 adet numunenin yanında beton basınç dayanımının belirlenebilmesi için 15 adet standart silindir (D=150 mm, h=300 mm) numune alınmıştır. Burada D enkesit çapını, h ise numunenin yüksekliğini göstermektedir. Silindir numunelerin hazırlanmasında ilgili standartlar dikkate alınmıştır. Kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin dökümü sırasında, iyi beton yerleşiminin sağlanarak, betondaki boşlukların azaltılması için vibratör kullanılmıştır. Kullanılan beton karışımı ile ilgili bilgiler Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10 2. ve 3. seri numuneler için kullanılan beton karışımı

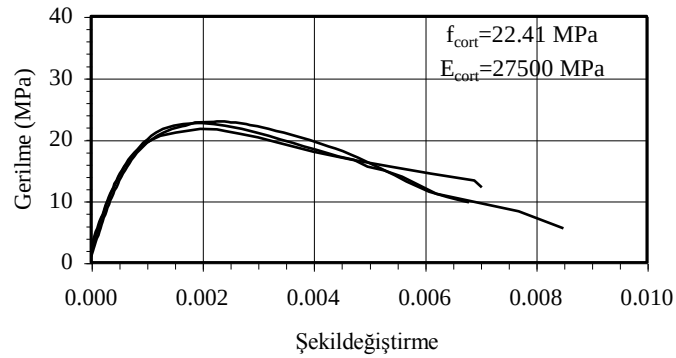
Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (lt)	1 No Kırmataş (kg)	2 No Kırmataş (kg)	Kaba Kum (kg)	İnce Kum (kg)	Katkı (kg)
220	70	185	505	505	490	345	2.32

Su/Çimento oranı 0.84, Su/(Çimento+Kül) oranı 0.64 olan bu karışımda, beton birim hacim ağırlığı 2322 kg/m^3 değerindedir. Kullanılan Portland çimentosu PÇ 42.5 cinsi olup Bolu Çimento tarafından üretilmiştir. Mineral katkı malzemesi olarak Ankara Çayırhan termik santralinden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan 1 No kırmataşta, agrega çapları 5 ve 12 mm arasında, 2 No kırmataşta ise 12 ve 20 mm arasında değişmektedir. Her iki tip kırmataş da Cebeci yöresinden elde edilmiştir. Kaba kum olarak 0.5 mm çapında Cebeci yöresinden elde edilen kum, ince kum olarak ise 0.2 mm çapında Akpınar yöresinden elde edilen deniz kumu kullanılmıştır. Kimyasal beton katkı malzemesi olarak YKS Rheobuild 878 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı, çimento ve uçucu kül ağırlıklarının toplamının 0.008'i kadar kullanılmıştır. Numunelerin betonu dökülürken, aynı anda çökme deneyi yapılmıştır. Standart çökme konisi kullanılarak yapılan taze beton deney sonuçları Tablo 2.11'de verilmiştir.

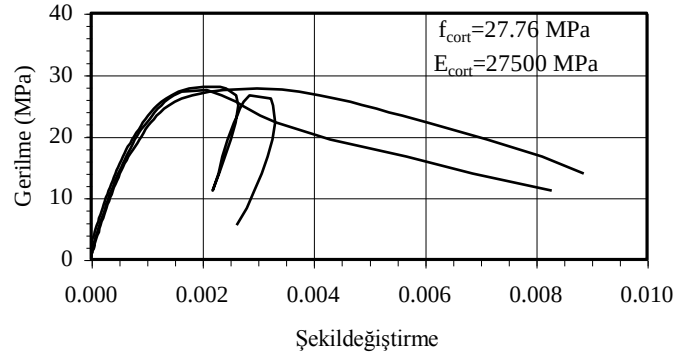
Tablo 2.11 2. ve 3. seri numuneler için kullanılan betonda çökme deneyi sonuçları

Deney	Çökme (mm)	Yayılma Çapları (mm×mm)
1	155	270×260
2	170	300×310

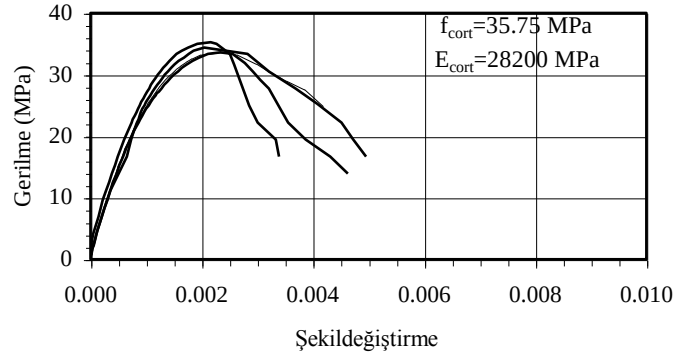
2. ve 3. seri için kullanılan betonun, beton dökümünü izleyen 14., 28., 90. ve 180. günde yapılan standart silindir basınç deneyleri ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla aşağıda verilmiştir, Şekil 2.23, 2.24, 2.25 ve 2.26. Şekil 2.27'de beton dayanımının zamanla değişimi görülmektedir.



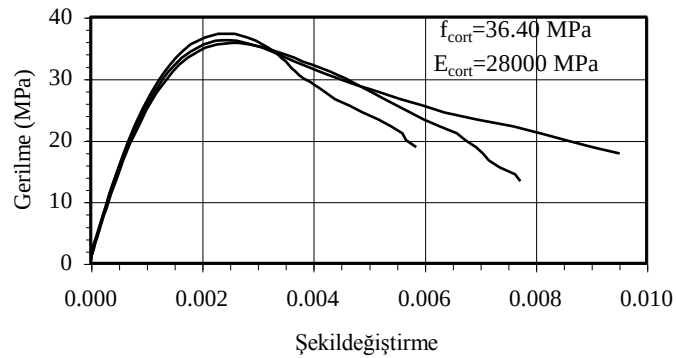
Şekil 2.23 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 14 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



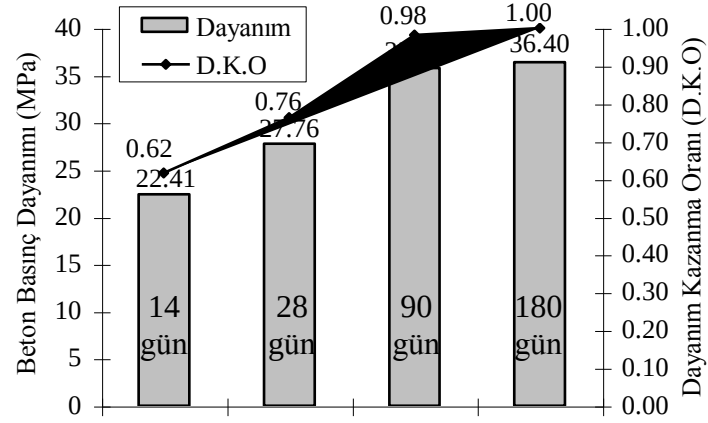
Şekil 2.24 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.25 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.26 2. ve 3. seri için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.27 2. ve 3. seri için kullanılan betonun basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi

2. ve 3. seri numunelerinde kullanılan beton ile yapılan standart silindir basınç dayanımı deneylerinde, aynı günde denenen numunelerin basınç dayanımları ile bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı arasındaki en büyük fark yaklaşık % 5.6'dır. . Elastisite modülü için geçirilen doğru ile gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ilgili bölümü için hesaplanan korelasyon katsayılarının, tüm numuneler için 0.990 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür, Tablo 2.12.

Tablo 2.12 2. ve 3. seride kullanılan beton için 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)	Korelasyon Katsayısı
SS1 ¹⁴	22.93	22.41	0.023	26300	27500	0.999
SS2 ¹⁴	21.65	22.41	0.034	28400	27500	0.999
SS3 ¹⁴	22.65	22.41	0.011	27800	27500	0.990
SS4 ²⁸	27.48	27.76	0.010	27400	27500	0.999
SS5 ²⁸	28.03	27.76	0.010	28000	27500	0.996
SS7 ²⁸	27.76	27.76	0.000	26951	27500	0.999
SS8 ⁹⁰	34.42	35.75	0.037	24800	28200	0.991
SS9 ⁹⁰	35.59	35.75	0.005	27700	28200	0.999
SS10 ⁹⁰	35.25	35.75	0.014	30800	28200	0.995
SS11 ⁹⁰	37.75	35.75	0.056	29400	28200	0.999
SS12 ¹⁸⁰	35.75	36.40	0.018	26600	28000	1.000
SS13 ¹⁸⁰	37.25	36.40	0.023	29500	28000	0.999
SS14 ¹⁸⁰	36.20	36.40	0.006	27900	28000	1.000

Not: ^{14, 28, 90, 180} : Üst indisler gün olarak beton yaşını göstermektedir.

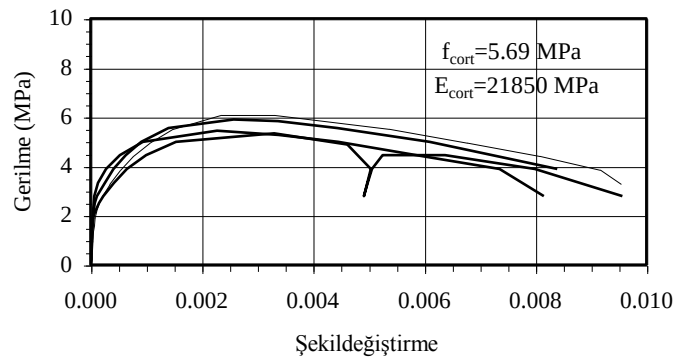
f_{cort} : Aynı gün denenen numunelerin basınç dayanımları ortalamasıdır.

4., 5. ve 6. seri olarak tanımlanan, düşük dayanımlı 14 adet 150 mm çapında daire enkesitli, 8 adet 250×250 mm enkesitli 500 mm yüksekliğinde kare ve 150×300 mm enkesitli 500 mm yüksekliğinde dikdörtgen numunenin beton dökümü 11 Temmuz 2001 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ülkemizdeki mevcut yapıların durumu düşünüldüğünde beton basınç dayanımlarının oldukça düşük olduğu bilinmektedir. Bu durumu yaklaşık olarak temsil etmek üzere, bu seride 10 MPa basınç dayanımına sahip olması beklenen hazır beton kullanılmıştır. 14 adet daire, 8 adet kare ve 8 adet dikdörtgen enkesitli numunenin yanı sıra beton basınç dayanımının belirlenebilmesi için 15 adet standart silindir numune üretilmiştir. Silindir numunelerin hazırlanmasında ilgili standartlar dikkate alınmıştır. Kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin dökümü sırasında, iyi beton yerleşiminin sağlanarak, betondaki boşlukların azaltılması için vibratör kullanılmıştır. Su/Çimento oranı 1.27 olan bu karışımda, beton birim hacim ağırlığı 2347 kg/m^3 değerindedir. Kullanılan beton karışımı ile ilgili bilgiler Tablo 2.13’de verilmiştir.

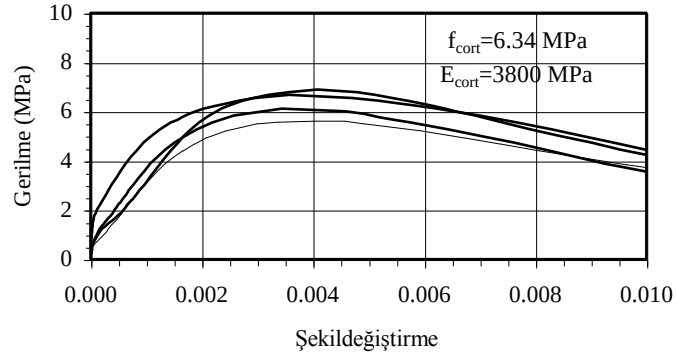
Tablo 2.13 4., 5. ve 6. seri numuneleri için kullanılan beton karışımı

Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (lt)	1 No Kırmataş (kg)	2 No Kırmataş (kg)	Kaba Kum (kg)	İnce Kum (kg)	Katkı (kg)
150	—	191	1074	—	—	932	—

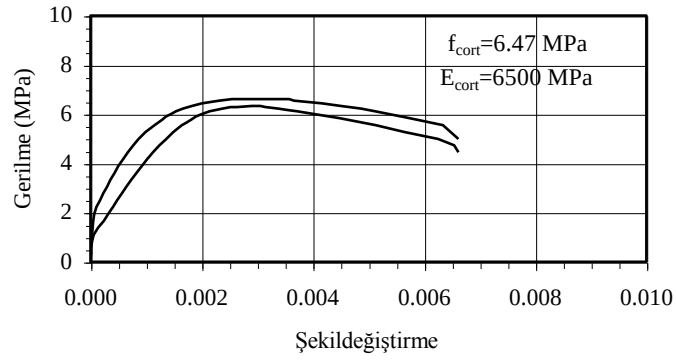
4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun, beton dökümünü izleyen 28., 90. ve 180. günde yapılan standart silindir basınç deneyleri ile elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla aşağıda verilmiştir, Şekil 2.28, 2.29 ve 2.30. Şekil 2.31’de beton dayanımının zamanla değişimi görülmektedir.



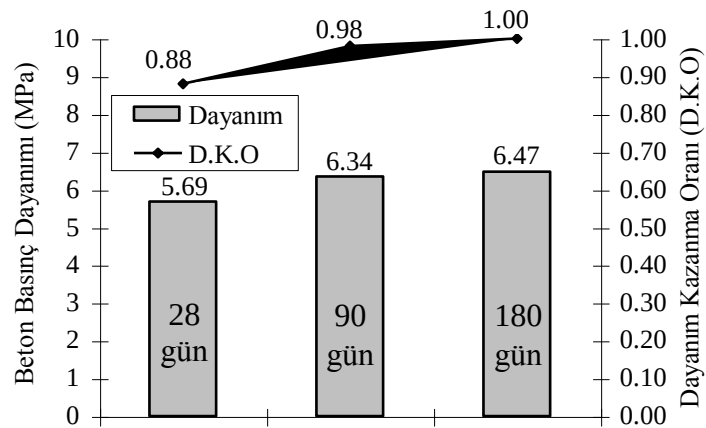
Şekil 2.28 4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.29 4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.30 4., 5. ve 6. seri için kullanılan betonun 180 günlük standart silindir basınç deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.31 4. 5. ve 6. seri için kullanılan betonun basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi

4., 5. ve 6. seri numunelerinde kullanılan beton ile yapılan standart silindir basınç dayanımı deneylerinde, aynı günde denenen numunelerin basınç dayanımları ile bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı arasındaki en büyük fark yaklaşık %10.6'dır. Elastisite modülü için geçirilen doğru ile gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ilgili bölümü için hesaplanan korelasyon katsayılarının, tüm numuneler için 0.882 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür, Tablo 2.14.

Tablo 2.14 4., 5. ve 6. seride kullanılan beton için 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)	Korelasyon Katsayısı
SS1 ²⁸	6.11	5.69	0.074	13200	21850	0.903
SS2 ²⁸	5.89	5.69	0.035	23100	21850	0.930
SS3 ²⁸	5.44	5.69	0.044	38100	21850	0.990
SS4 ²⁸	5.33	5.69	0.063	13000	21850	0.882
SS5 ⁹⁰	5.67	6.34	0.106	2800	3775	0.998
SS6 ⁹⁰	6.67	6.34	0.052	6500	3775	0.927
SS7 ⁹⁰	6.89	6.34	0.087	2500	3775	0.994
SS8 ⁹⁰	6.11	6.34	0.036	3300	3775	0.993
SS9 ¹⁸⁰	6.33	6.47	0.022	4100	6500	0.979
SS10 ¹⁸⁰	6.61	6.47	0.022	8900	6500	0.913

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

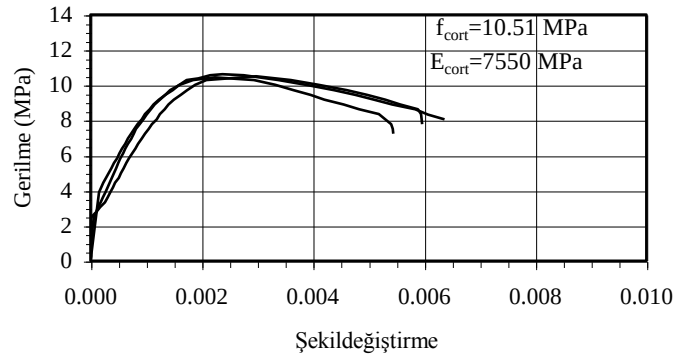
f_{cort} : Aynı gün denenen numunelerin basınç dayanımları ortalamasıdır.

7. ve 8. seri olarak tanımlanan, düşük dayanımlı toplam 16 adet dikdörtgen enkesitli numunenin beton dökümü 18 Temmuz 2002 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerin üretimi sırasında da yaklaşık 10 MPa basınç dayanımına sahip olması beklenen hazır beton kullanılmıştır. Daha önceki beton karışımı için elde edilen basınç dayanımlarından yararlanılarak yeni bir karışım denenmiş ve hedeflenen dayanıma ulaşılmıştır. Beton döküm gününde hava sıcaklığı yaklaşık 27°C dir. 8 adet 150×450 mm enkesitli 500 mm yüksekliğinde ve 8 adet 150×225 enkesitli 500 mm yüksekliğinde dikdörtgen numunenin yanı sıra beton basınç dayanımının belirlenebilmesi için 15 adet standart silindir numune üretilmiştir. Standart numunelerin hazırlanmasında ilgili standart kuralları dikkate alınmıştır. Numunelerin dökümü sırasında, iyi beton yerleşiminin sağlanarak, betondaki boşlukların azaltılması için vibratör kullanılmıştır. Su/Çimento oranı 1.19 olan bu karışımda, beton birim hacim ağırlığı 2357 kg/m³ değerindedir. Kullanılan beton karışımı ile ilgili bilgiler Tablo 2.15'de verilmiştir.

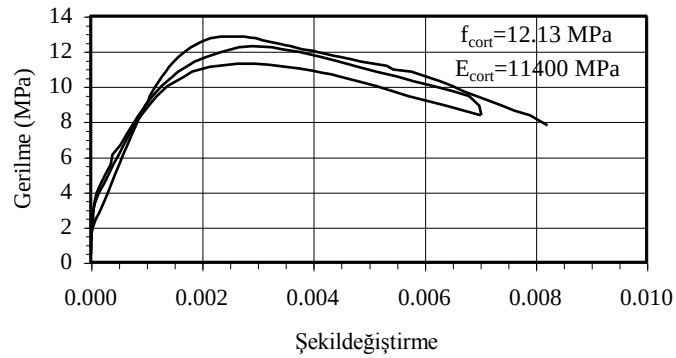
Tablo 2.15 7. ve 8. seri numuneleri için kullanılan beton karışımı

Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (lt)	1 No Kırmataş (kg)	2 No Kırmataş (kg)	Kaba Kum (kg)	İnce Kum (kg)	Katkı (kg)
160	—	191	1074	—	—	932	—

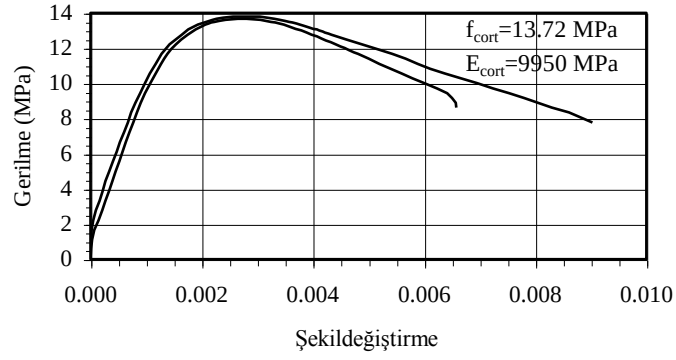
7. ve 8. seri için kullanılan betonun, beton dökümünü izleyen 28., 90. ve 237. gündeki gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla aşağıda verilmiştir, Şekil 2.32, 2.33 ve 2.34. Bu serideki numunelerin deneyleri beton dökümünü izleyen 180. günden sonra gerçekleştirildiği için, son standart silindir deneyleri de numunelerin deneylerinin bitmesinden sonra (beton dökümünü izleyen 237. günde) yapılmıştır. Şekil 2.35’de beton dayanımının zamanla değişimi görülmektedir.



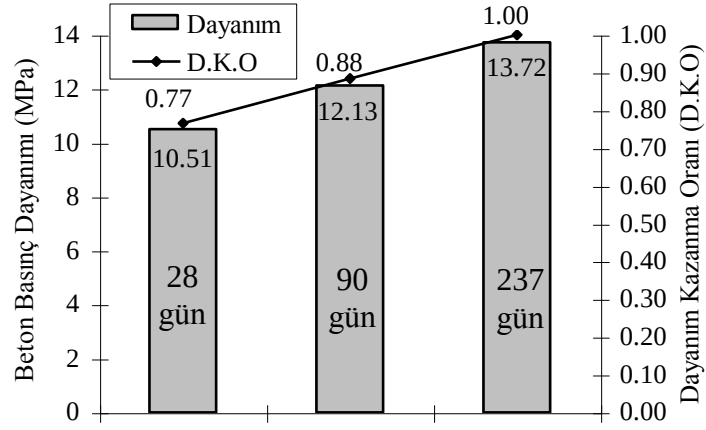
Şekil 2.32 7. ve 8. seri için kullanılan betonun 28 günlük standart silindir deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.33 7. ve 8. seri için kullanılan betonun 90 günlük standart silindir deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.34 7. ve 8. seri için kullanılan betonun 237 günlük standart silindir deneyleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 2.35 7. ve 8. seri için kullanılan betonun basınç dayanımlarının ve dayanım kazanma oranlarının zaman ile değişimi

7. ve 8. seri numunelerinde kullanılan beton ile yapılan standart silindir basınç dayanımı deneylerinde, aynı günde denenen numunelerin basınç dayanımları ile bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı arasındaki en büyük fark yaklaşık % 7.0'dir. Elastisite modülü için geçirilen doğru ile gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ilgili bölümü için hesaplanan korelasyon katsayılarının, tüm numuneler için 0.911 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür, Tablo 2.16.

Tablo 2.16 7. ve 8. seride kullanılan beton için standart silindir 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)	Korelasyon Katsayısı
SS1 ²⁸	10.60	10.51	0.009	9750	7550	0.955
SS2 ²⁸	10.50	10.51	0.001	6600	7550	0.933
SS3 ²⁸	10.44	10.51	0.007	6300	7550	0.999
SS4 ⁹⁰	12.83	12.13	0.058	8550	11400	0.977
SS5 ⁹⁰	12.28	12.13	0.012	13100	11400	0.917
SS6 ⁹⁰	11.28	12.13	0.070	12500	11400	0.911
SS7 ²³⁷	13.77	13.72	0.004	10700	9950	0.981
SS8 ²³⁷	13.66	13.72	0.004	9200	9950	0.998

Not: ^{28, 90, 237} : Üst indisler gün olarak beton yaşını göstermektedir.

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

3. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ

Hazırlanan numunelerin bir kısmı doğrudan güçlendirilmiş, bir bölümü ise önce deneye tabi tutularak hasar verildikten sonra onarılıp güçlendirilmiştir. Numunelere ön hasar verilmesi durumunda, tüm numunelere aynı derecede hasar vermek oldukça zor olmakla beraber, hasarlı elemanların onarılıp güçlendirilmesi ile hasarsız elemanların doğrudan güçlendirilmesinin karşılaştırılması da incelenen güçlendirme tekniğinin bu iki farklı durumdaki performansının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. 1. seri normal dayanımlı daire enkesitli numunelerden bir kısmı, orijinal durumunda denenip hasar verilmiş ve onarılıp güçlendirildikten sonra tekrar denenmiştir. Aynı seriye ait numunelerden bir kısmı ise hasar verilmeden doğrudan güçlendirilip denenmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre, ön hasarlı olup onarılan ve güçlendirilen numuneler ile doğrudan güçlendirilen özdeş elemanların davranışlarının benzer olduğu görülmüştür. Diğer seriler için bu sonuçtan yola çıkılarak, numuneler hasar verilmeden, doğrudan güçlendirilmişlerdir. Bütün serilerde güçlendirilecek numuneler aynı işlemlerden geçirilmiştir. Yalnız 1. seri numunelerinden orijinal durumlarında denenip sonra güçlendirilecek numuneler için ayrıca bir onarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerin orijinal durumlarında yapılan deneyleri, eksenel şekil değiştirme düzeyi 0.004 ila 0.008 arasında iken sonlandırılmıştır. Orijinal durumdaki davranışı elde edilen bu numuneler daha sonra onarım amacı ile özel bir silindir kalıba yerleştirilmiş ve bu kalıbın içine epoksi enjeksiyonu yapılarak, numunede oluşan çatlaklar doldurulmuştur, Şekil 3.1. Epoksi enjeksiyonunun ardından kalıptan çıkartılan numuneler, özel geçirimsiz kağıtlara sarılmış ve enjekte edilen epoksinin dayanımını kazanması için bekletilmiştir, Şekil 3.2. Yaklaşık 48 saat sonra numuneler sarılı oldukları geçirimsiz kağıtlardan çıkartılmış, son olarak formunda bozukluk olanlar spiral ile taşlanarak düzeltilmiş ve onarım işlemi bitmiştir, Şekil 3.3.



Şekil 3.1



Şekil 3.2



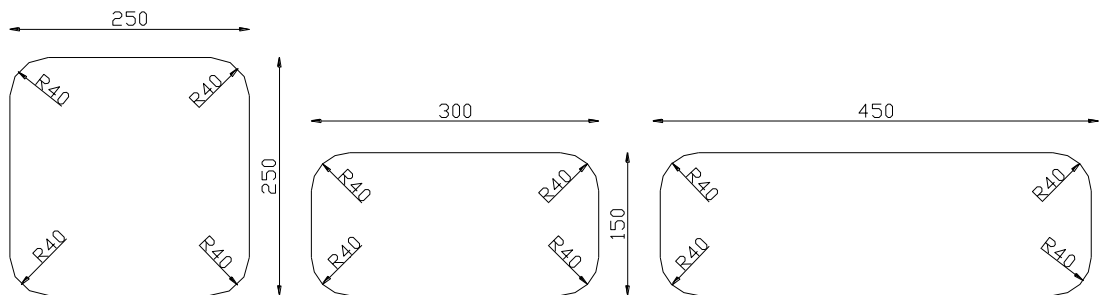
Şekil 3.3

Şekil 3.1 Hasarlı numunelere özel kalıpların içerisinde epoksi enjeksiyonu uygulanması

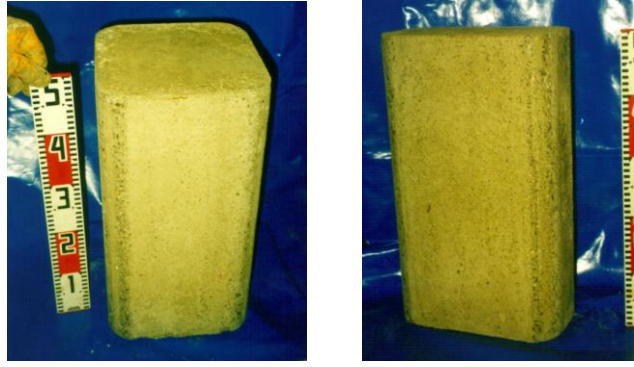
Şekil 3.2 Kalıplardan alınan numunelerin özel geçirimsiz kağıtlara sarılıp bekletilmesi

Şekil 3.3 Onarım işleminde son aşama: numunelerin taşlanarak eski formuna getirilmesi

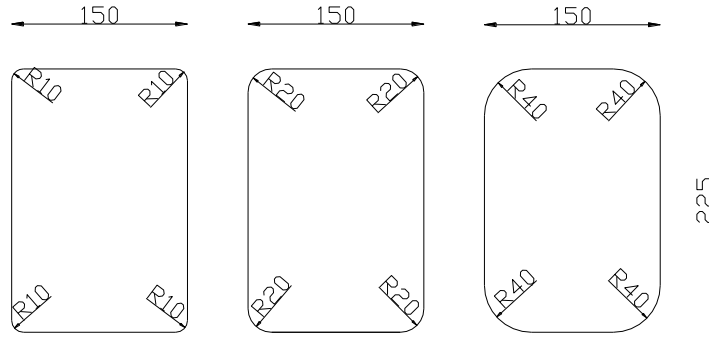
Enkesiti dairesel olmayan elemanlarda eksenel gerilmeler altında köşelerde gerilme yığılmaları olduğu bilinmektedir. Bu numunelerde güçlendirme işlemi yapılmadan önce, güçlendirilecek numunelerin köşeleri iyice yuvarlatılmış ve gerilme yığılmalarının etkilerinin azaltılmasına çalışılmıştır. Bu işlem sonunda 8. seri dışındaki bütün dikdörtgen enkesitli numunelerin köşeleri, yaklaşık 40 mm yarıçaplı bir çeyrek daire formuna gelmiştir, Şekil 3.4 ve 3.5. 8. seri numunelerde ise köşe yarıçapının davranışa etkisini incelemek üzere, aynı kalınlıkta CFRP tabaka ile güçlendirilen numunelerin köşeleri 10, 20 ve 40 mm yarıçapında yuvarlatılmıştır, Şekil 3.6.



Şekil 3.4 Kare ve dikdörtgen enkesitli numunelerin köşelerinin yuvarlatılmış durumu



Şekil 3.5 Köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen enkesitli numuneler ($h/b=1$, $h/b=2$)



Şekil 3.6 8. seri numunelerin ($h/b=1.5$) plan görünümü

Güçlendirilen numunelerde sargı tabaka kalınlığının etkisinin de incelenebilmesi için sargı tabaka sayıları, normal dayanımlı daire enkesitli numunelerde ve 8. seri dışında, 1, 3 ve 5 olarak seçilmiştir. Her seride aynı enkesite sahip 8 adet numunenin 6 adedi (2 adedi 1 kat, 2 adedi 3 kat , 2 adedi 5 kat enine karbon lif tabakaları ile sarılarak) güçlendirilmiştir, Tablo 3.1. Sargılama işleminde, karbon lif tabakaları kesilmeden, sürekli şekilde uygulanmıştır. Güçlendirilen tüm numunelerde en son sargı tabakası bir alt tabaka üzerine yaklaşık 150 mm bindirme yapılarak sonlandırılmıştır. Kalan 2 adet numune ise güçlendirilmiş numuneler ile karşılaştırma yapabilmek amacı ile orijinal durumda bırakılmıştır. Düşük dayanımlı daire enkesitli numunelerden oluşan 4. seride numuneler, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 kat CFRP tabaka ile, köşe yarıçapının davranışa olan etkisinin incelendiği 8. seride ise tüm numuneler 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiştir.

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 dayanımının normal ve düşük olması düşünülerek *NS* (normal strength) ve *LS* (low 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 ise uygulanan karbon lif sargı tabaka sayısını göstermektedir. Son sayı, numunelerin köşelerinde uygulanan yuvarlatılmayı temsilen, oluşturulan yeni formun (çeyrek dairenin) yarıçapını “mm” biriminde göstermektedir. Aynı özellikte ikişer adet numune bulunduğundan bunları belirtmek için isimlerin sonuna “a” ve “b” harfleri eklenmiştir. Örneğin NS-R-1-3-40a isimli numune, normal beton basınç dayanımına sahip, köşeleri 40 mm yuvarlatılmış, enine doğrultuda 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş ve uzun kenarının kısa kenarına oranı 1 olan 1. dikdörtgen numunedir. Düşük dayanımlı beton basınç dayanımına sahip, köşeleri 40 mm yarıçapında yuvarlatılmış, uzun kenarının kısa kenarına oranı 1.5 olan orijinal durumdaki 2. dikdörtgen numune ise, LS-R-1.5-0-40b ismiyle anılmaktadır. Dairesel elemanlarda kenar oranlarını ve köşe yarıçapını temsil eden sayılar yoktur. LS-C-1a, düşük dayanımlı 1 kat karbon lif sargı tabakası ile güçlendirilmiş ilk numuneyi temsil etmektedir. Bütün serilere ait numunelerin isimleri ve özet bilgileri ilgili tablolarda sunulmuştur, Tablo 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8.

Tablo 3.1 1. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (çap;yükseklik) (mm;mm)	Orijinal dayanım ¹ f_{co} , MPa	Güçlendirme ²	Yükleme ³	Orijinal durumdaki ismi
1	NS-C-1a	Daire (150;300)	26.9	D-R-S, 1 kat CFRP	M	NS-C-0a
	NS-C-1b	Daire (150;300)	23.8	D-R-S, 1 kat CFRP	M	NS-C-0b
	NS-C-1c	Daire (150;300)	33.3	D-R-S, 1 kat CFRP	M	NS-C-0c
	NS-C-1d	Daire (150;300)	23.6	D-R-S, 1 kat CFRP	C	NS-C-0d
	NS-C-1e	Daire (150;300)	21.6	D-R-S, 1 kat CFRP	C	NS-C-0e
	NS-C-1f	Daire (150;300)	32.0	S, 1 kat CFRP	C	–
	NS-C-3a	Daire (150;300)	26.7	D-R-S, 3 kat CFRP	M	NS-C-0f
	NS-C-3b	Daire (150;300)	25.5	D-R-S, 3 kat CFRP	M	NS-C-0g
	NS-C-3c	Daire (150;300)	21.1	D-R-S, 3 kat CFRP	C	NS-C-0h
	NS-C-3d	Daire (150;300)	23.6	D-R-S, 3 kat CFRP	C	NS-C-0i
	NS-C-3e	Daire (150;300)	32.0	S, 3 kat CFRP	C	–
	NS-C-3f	Daire (150;300)	32.0	S, 3 kat CFRP	C	–
	NS-C-5a	Daire (150;300)	23.5	D-R-S, 5 kat CFRP	M	NS-C-0j
	NS-C-5b	Daire (150;300)	25.3	D-R-S, 5 kat CFRP	M	NS-C-0k
	NS-C-5c	Daire (150;300)	32.0	S, 5 kat CFRP	C	–
	NS-C-5d	Daire (150;300)	32.0	S, 5 kat CFRP	C	–

¹ : Orijinal durumları denenip güçlendirilen numuneler için, orijinal basınç dayanımını; doğrudan güçlendirilen numuneler için, standart silindir basınç deneyi sonucunda elde edilen değeri gösterir.

² : D, hasar verilmiş; R, onarılmış; S, güçlendirilmiş; anlamında kullanılmıştır.

³ : M, monoton artan yüklem; C, tekrarlı yüklem durumları için kullanılmıştır.

1. Seri dışındaki bütün serilerde numuneler doğrudan güçlendirilmiş ve monoton artan yükler altında denenmiştir. Bu yüzden ilgili tablolarda bu bilginin tekrar verilmesine gerek duyulmamıştır. Güçlendirilmemiş numuneler için ortalama basınç dayanımı; 2. ve 3. seri için 27.76 MPa, 4., 5. ve 6. seri için 5.69 MPa, 7. ve 8. seri için ise 10.51 MPa'dır.

Tablo 3.2 2. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (mm × mm)	Güçlendirme	Köşe yarıçapı
2	NS-R-1-0-40a	Kare (250 × 250)	orijinal	—
	NS-R-1-0-40b	Kare (250 × 250)	orijinal	—
	NS-R-1-1-40a	Kare (250 × 250)	1 kat CFRP	40 mm
	NS-R-1-1-40b	Kare (250 × 250)	1 kat CFRP	40 mm
	NS-R-1-3-40a	Kare (250 × 250)	3 kat CFRP	40 mm
	NS-R-1-3-40b	Kare (250 × 250)	3 kat CFRP	40 mm
	NS-R-1-5-40a	Kare (250 × 250)	5 kat CFRP	40 mm
	NS-R-1-5-40b	Kare (250 × 250)	5 kat CFRP	40 mm

Tablo 3.3 3. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (mm × mm)	Güçlendirme	Köşe yarıçapı
3	NS-R-2-0-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	orijinal	—
	NS-R-2-0-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	orijinal	—
	NS-R-2-1-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	1 kat CFRP	40 mm
	NS-R-2-1-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	1 kat CFRP	40 mm
	NS-R-2-3-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	3 kat CFRP	40 mm
	NS-R-2-3-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	3 kat CFRP	40 mm
	NS-R-2-5-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	5 kat CFRP	40 mm
	NS-R-2-5-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	5 kat CFRP	40 mm

Tablo 3.4 4.Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (çap;yükseklik)	Güçlendirme
4	LS-C-0a	Daire (150;300)	orijinal
	LS-C-0b	Daire (150;300)	orijinal
	LS-C-1a	Daire (150;300)	1 kat CFRP
	LS-C-1b	Daire (150;300)	1 kat CFRP
	LS-C-2a	Daire (150;300)	2 kat CFRP
	LS-C-2b	Daire (150;300)	2 kat CFRP
	LS-C-3a	Daire (150;300)	3 kat CFRP
	LS-C-3b	Daire (150;300)	3 kat CFRP
	LS-C-4a	Daire (150;300)	4 kat CFRP
	LS-C-4b	Daire (150;300)	4 kat CFRP
	LS-C-5a	Daire (150;300)	5 kat CFRP
	LS-C-5b	Daire (150;300)	5 kat CFRP
	LS-C-6a	Daire (150;300)	6 kat CFRP
	LS-C-6b	Daire (150;300)	6 kat CFRP

Tablo 3.5 5. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (mm × mm)	Güçlendirme	Köşe yarıçapı
5	LS-R-1-0-40a	Kare (250 × 250)	orijinal	—
	LS-R-1-0-40b	Kare (250 × 250)	orijinal	—
	LS-R-1-1-40a	Kare (250 × 250)	1 kat CFRP	40 mm
	LS-R-1-1-40b	Kare (250 × 250)	1 kat CFRP	40 mm
	LS-R-1-3-40a	Kare (250 × 250)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-1-3-40b	Kare (250 × 250)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-1-5-40a	Kare (250 × 250)	5 kat CFRP	40 mm
	LS-R-1-5-40b	Kare (250 × 250)	5 kat CFRP	40 mm

Tablo 3.6 3. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (mm × mm)	Güçlendirme	Köşe yarıçapı
6	LS-R-2-0-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	orijinal	—
	LS-R-2-0-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	orijinal	—
	LS-R-2-1-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	1 kat CFRP	40 mm
	LS-R-2-1-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	1 kat CFRP	40 mm
	LS-R-2-3-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-2-3-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-2-5-40a	Dikdörtgen (150 × 300)	5 kat CFRP	40 mm
	LS-R-2-5-40b	Dikdörtgen (150 × 300)	5 kat CFRP	40 mm

Tablo 3.7 7. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (mm × mm)	Güçlendirme	Köşe yarıçapı
7	LS-R-3-0-40a	Dikdörtgen (150 × 450)	orijinal	—
	LS-R-3-0-40b	Dikdörtgen (150 × 450)	orijinal	—
	LS-R-3-1-40a	Dikdörtgen (150 × 450)	1 kat CFRP	40 mm
	LS-R-3-1-40b	Dikdörtgen (150 × 450)	1 kat CFRP	40 mm
	LS-R-3-3-40a	Dikdörtgen (150 × 450)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-3-3-40b	Dikdörtgen (150 × 450)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-3-5-40a	Dikdörtgen (150 × 450)	5 kat CFRP	40 mm
	LS-R-3-5-40b	Dikdörtgen (150 × 450)	5 kat CFRP	40 mm

8. Seri için üretilen numuneler aynı sayıda (3 kat) CFRP tabaka ile güçlendirilmiş, değişken olarak köşelere uygulanan yuvarlatma miktarı seçilmiştir.

Tablo 3.8 8. Seri numunelerin isimlendirilmesi ve özet bilgileri

Seri	İsim	Kesit (mm × mm)	Güçlendirme	Köşe yarıçapı
8	LS-R-1.5-0-40a	Dikdörtgen (150 × 225)	orijinal	—
	LS-R-1.5-0-40b	Dikdörtgen (150 × 225)	orijinal	—
	LS-R-1.5-3-10a	Dikdörtgen (150 × 225)	3 kat CFRP	10 mm
	LS-R-1.5-3-10b	Dikdörtgen (150 × 225)	3 kat CFRP	10 mm
	LS-R-1.5-3-20a	Dikdörtgen (150 × 225)	3 kat CFRP	20 mm
	LS-R-1.5-3-20b	Dikdörtgen (150 × 225)	3 kat CFRP	20 mm
	LS-R-1.5-3-40a	Dikdörtgen (150 × 225)	3 kat CFRP	40 mm
	LS-R-1.5-3-40b	Dikdörtgen (150 × 225)	3 kat CFRP	40 mm

Güçlendirme adımları tüm numuneler için aynıdır. Yuvarlatma işlemi yalnızca dairesel olmayan numunelerin köşelerine uygulanmıştır. Numuneler için sargılama işlemine geçmeden önce yüzey hazırlıkları tamamlanmıştır. Yuvarlatma işleminden sonra numuneler toz, kir, yağ ve benzeri maddelerden arındırılmıştır. Numunelerin yüzeylerinin kuru olması da güçlendirme uygulaması sırasında dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli konudur. Temizlenen numunelere çift bileşenli epoksipolyamin 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, Şekil 3.7. Astar karışımı sürülen numunelerde bir sonraki aşamaya geçmeden önce en az 24 saat beklenmiştir. Bu süre sonunda çift bileşenli epoksi harcı (Mbrace Coneresive 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 yok edilmiş ve tamamen düz, esnek ve yapışmaya uygun düzgün bir yüzey oluşturulmuştur, Şekil 3.8 ve 3.9. Bu aşamadan sonra numuneler CFRP tabaka ile sarılmaya uygun duruma gelmiştir. 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 sürülmüş, Şekil 3.10, ardından CFRP tabakası sarılmaya başlanmıştır, Şekil 3.11. Her sargı arasında 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 sürülerek güçlendirme işlemi tamamlanmış ve deney öncesi, yüzey hazırlığı ve CFRP tabaka sargılama işlemlerinde kullanılan epoksi bazlı malzemelerin dayanımlarını kazanmaları için gerekli kür süresi kadar zaman bırakılmıştır.



Şekil 3.7 Astar uygulaması



Şekil 3.8 Epoksi esaslı macun karışımının sürülmesi



Şekil 3.9 Epoksi esaslı macun karışımı sürülme işlemi bittikten sonraki görünüm



Şekil 3.10 Karbon lif tabakaları sarılmadan hemen önce epoksi esaslı yapıştırıcı sürülmesi



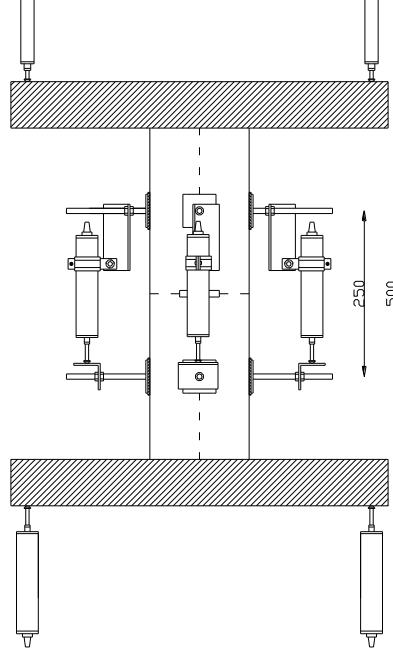
Şekil 3.11 CFRP tabakalarının sarılması

4. DENEY DÜZENEGİ

Hazırlanan güçlendirilmiş numune ve standart silindirlerin deneyleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 500 ton kapasiteli Amsler yükleme aleti kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde yük ölçümlerinde hassasiyeti arttırmak üzere, numunelerin özellikleri de göz önünde tutularak yükleme aleti için uygun yükleme aralığı seçilmiştir.

Monoton artan yükler statik olarak uygulanmış, her yükleme adımında yerdeğiştirmeölçerler, şekildeğiştirmeölçerler ve elektronik veri toplayıcı yardımı ile yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçümleri elektronik yolla yapılmıştır. Yerdeğiştirmeölçerler numunelerin eksenel boy değişiminin (şekildeğiştirmesinin) belirlenmesi amacı ile kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma sırasında numuneler için öngörülen şekildeğiştirme kapasiteleri göz önüne alınarak TML CDP-5, CDP-25, CDP-50 ve CDP-100 türü yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. CDP-5 türü yerdeğiştirmeölçerler 1/2000 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. Çalışmanın konusu, CFRP tabakaları ile güçlendirilen beton elamanların eksenel basınç gerilmeleri altında davranışı olduğundan, numuneler üst tablası sabit, alt tablası yukarı doğru hareket edebilen Amsler yükleme cihazının tablaları arasına yerleştirilmiş, ölçüm cihazlarının yerleştirilmesinden sonra deneye tabi tutulmuştur. Alt tablanın 4 köşesine ve kontrol amacı ile sabit üst tablanın çapraz 2 köşesine yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen verilerin ortalamaları kullanılarak, numunenin tüm boyu için, eksenel şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Ölçüm boyu arasında kalan tablaların deneye tabi tutulan numuneye göre çok yüksek rijitlikte olmasından dolayı, tablalarda meydana gelen şekildeğiştirmeler ihmal edilmiştir. 2. ve 3. seri numunelerinde CDP-50 tipi yerdeğiştirmeölçerler ile numunelerin orta 250 mm yükseklikli kısmından da ölçüm alınmıştır. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 4.1'de sunulmuştur. 2. ve 3. seri numunelerinde orta 250 mm yükseklikten alınan değerlerin şekildeğiştirmeölçerler ve tüm boydan alınan ölçümlerle benzer olması ve numunenin ani göçmesinden

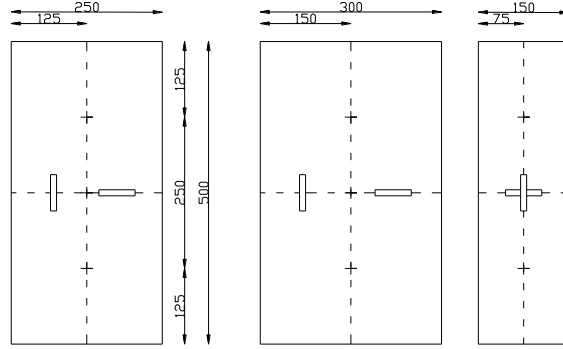
dolayı yerdeğiştirmeölçerlerin zarar görebilme olasılığı yüzünden, daha sonraki serilerde bu boydaki ölçümden vazgeçilmiştir.



Şekil 4.1 Deney düzeneği

Eksenel şekildeğiştirmeler ve enine şekildeğiştirmelerin belirlenmesi amacı ile boyuna ve enine doğrultuda şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Kullanılan şekildeğiştirmeölçerler sadece sınırlı şekildeğiştirmelere (0.002~0.003) kadar sağlıklı ölçüm yapabilen alışılmış şekildeğiştirmeölçerler değil, yaklaşık 0.01~0.02 mertebesinde şekildeğiştirme düzeyine kadar sağlıklı sonuç verebilen özel akma-sonrası türü şekildeğiştirmeölçerlerdir. Bu şekilde hem enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler ölçülmüş, hem de boyuna doğrultuda kullanılan şekildeğiştirmeölçerler ile boyuna doğrultuda kullanılan yerdeğiştirmeölçerlerin sonuçlarının karşılaştırılması mümkün olmuştur. Şekildeğiştirmeölçerler yardımı ile de numunenin yüksekliğinin orta kesitinden veri toplanmıştır. Bu amaçla kullanılan, ölçüm boyu 60 mm olan, PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçerler akma sonrası da ölçüm yapabilmektedir. Tüm bu ölçümlere ilave olarak bazı numunelerde ölçüm boyu 10 mm olan YFLA-10 tipi şekildeğiştirmeölçerler de kullanılmıştır. Boyuna ve enine şekildeğiştirmelerin ölçülebilmesi amacı ile, daire enkesitli numunelerde yarım çevre uzaklıkta iki adet boyuna ve iki adet enine, kare enkesitli numunelerin her kenarına birer adet boyuna ve karşılıklı iki kenarına birer adet enine, dikdörtgen

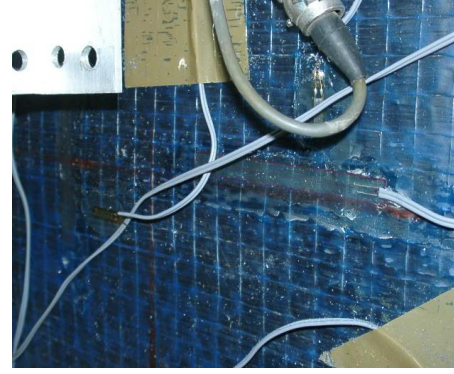
enkesitli numunelerin ise her kenarına birer adet boyuna ve enine şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirmeler konusunda daha detaylı incelenen bazı numunelerde ise bahsedilen tiplerde ve daha fazla sayıda şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır, Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4.



Şekil 4.2 Kare ve dikdörtgen enkesitli şekildeğiştirmeölçerlerin yerleri



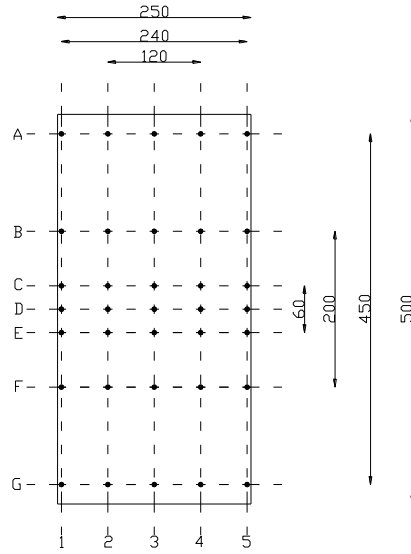
Şekil 4.3 Dikdörtgen enkesitli numunede kısa kenara yapıştırılmış PL-60 ve YFLA-10 tipi şekildeğiştirmeölçerler



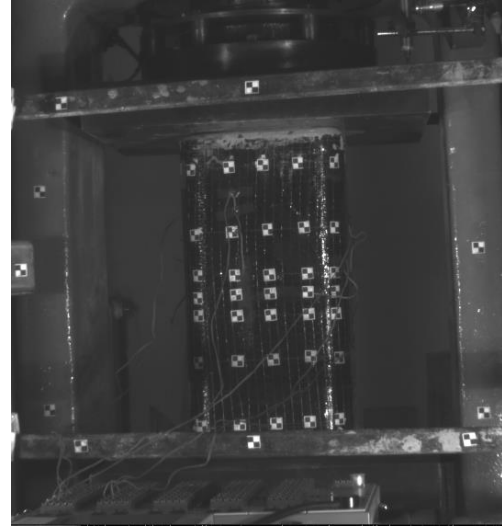
Şekil 4.4 Enine şekildeğiştirmenin ölçülebilmesi için yerleştirilmiş PL-60 ve YFLA-10 şekildeğiştirmeölçerler ile boyuna doğrultuda kullanılan YFLA-10 şekildeğiştirmeölçer

5. ve 6. serilere ait numunelerde yerdeğiştirmeölçerler ve şekildeğiştirmeölçerler ile yapılan ölçümlere ilaveten fotogrametrik yöntem ile de ölçüm yapılmıştır. Belirli yük adımlarında 2 adet metrik kamera ile çekilen resimler Pictran-DE programı kullanılarak değerlendirilmiş ve numune üzerinde belirlenmiş noktaların üç boyutlu sabit bir referans sistemine göre koordinatları elde edilmiştir. Bu koordinatlar yardımıyla yerdeğiştirmelerden şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Noktalar, kullanılan yerdeğiştirmeölçerler ve şekildeğiştirmeölçerler ile elde edilen şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla düşey doğrultuda 1. ve 7. satır arası 450 mm, 2. ve 6. satır arası 200 mm, 3. ve 5. satır arası ise 60 mm,

olacak ve toplam 7 satır, 5 sütun oluşturacak şekilde düzenlenmiştir, Şekil 4.5 Noktaların koordinatları, yükleme yapılmadan önce belirlenmiş ve başlangıç durumu elde edilmiştir. Yüklemenin ilerleyen safhalarında numunede meydana gelen boy değişimine bağlı olarak konumları değişen noktaların koordinatları, çekilen fotoğrafların işlenmesi ile elde edilmiş ve başlangıç durumu ile karşılaştırılarak şekildeğiştirmelere ulaşılmıştır. Şekil 4.6’da fotogrametrik yöntem ile de şekildeğiştirme ölçümü yapılacak olan bir numunenin deney öncesi durumu verilmiştir.



Şekil 4.5

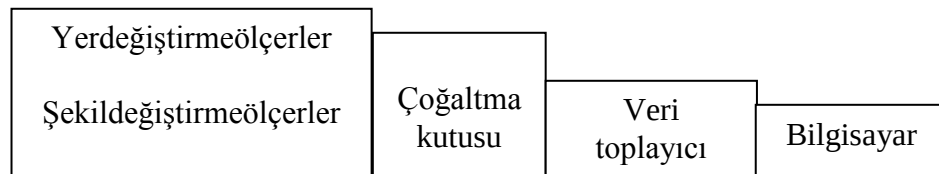


Şekil 4.6

Şekil 4.5 Fotogrametrik ölçüm boyları ve ölçüm noktalarının yerleri

Şekil 4.6 Fotogrametrik ölçüm alınan bir numune

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, Şekil 4.7.



Şekil 4.7 Veri toplama sistemi

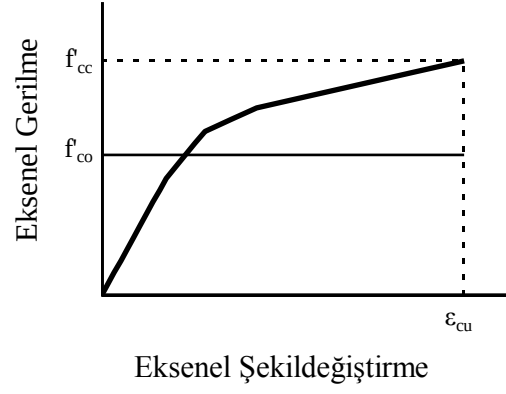
5. DENEY SONUÇLARI

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

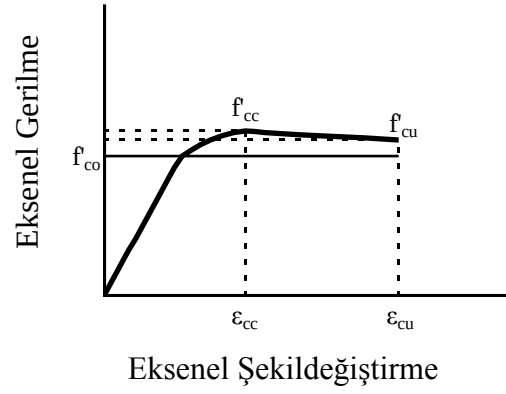
Bu tez kapsamında ve literatürdeki diğer çalışmalardan [16], elde edilen sonuçlara göre FRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilen beton elemanlarda genel olarak 3 tip eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi gözlenmektedir. İki lineer doğru ile ifade edilebilecek olan birinci tip ilişkide eksenel gerilme, sarılmamış beton basınç dayanımı (f'_{co}) değerine ulaştıktan sonra monotonik bir şekilde artmaya devam eder. FRP tabakanın kopması ile maksimum eksenel gerilme (f'_{cc}) ve maksimum eksenel şekildeğiştirme (ϵ_{cu}) değerlerine ulaşılır, Şekil 5.1. Şekil 5.2'de verilen 2. tip ilişkide eksenel gerilme, sarılmamış beton basınç dayanımı (f'_{co}) değerini aşar, maksimum değerine (f'_{cc}) ulaştıktan sonra kopma anına dek azalır. Kopma gerçekleştiği anda maksimum eksenel şekildeğiştirme (ϵ_{cu}) ve bu şekildeğiştirmeye karşı gelen eksenel gerilme (f'_{cu}) değeri elde edilir. Maksimum eksenel şekildeğiştirmeye karşı gelen bu kopma gerilmesi (f'_{cu}), maksimum eksenel gerilmeden (f'_{cc}) küçük, sarılmamış beton basınç dayanımından (f'_{co}) ise büyüktür. Maksimum eksenel 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 5.3.

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.

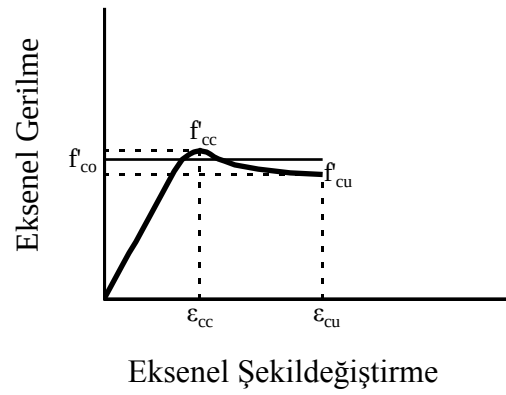
Verilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinde, beton basınç dayanımlarına bağlı olarak farklı ölçekler düzenlendiği için, seriler arası karşılaştırma yapılırken ölçeklere dikkat edilmelidir.



Şekil 5.1 1. tip eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi ($f'_{cc}=f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}=\epsilon_{cu}$)



Şekil 5.2 2. tip eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi ($f'_{cc}>f'_{cu}>f'_{co}$, $\epsilon_{cc}<\epsilon_{cu}$)



Şekil 5.3 3. tip eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi ($f'_{cc}>f'_{co}>f'_{cu}$, $\epsilon_{cc}<\epsilon_{cu}$)

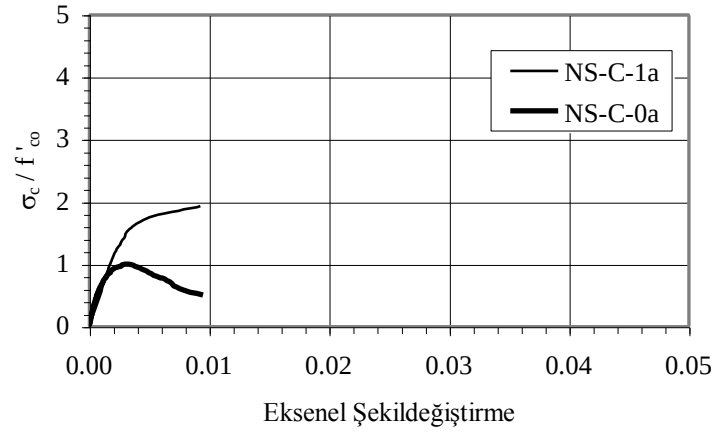
5.1. NORMAL DAYANIMLI DAİRE ENKESİTLİ (1. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

Bu seri için üretilen ve deney günündeki basınç dayanımları 21.1 MPa ile 33.3 MPa arasında değişen 150 mm çapında daire enkesitli, 300 mm yüksekliğindeki 16 adet numunenin 11 adedi orijinal durumunda deneye tabi tutulduktan sonra onarılmış ve güçlendirilmiş, 5 adedi ise doğrudan güçlendirilmiştir. Güçlendirilen 16 adet numuneden, 7 adedi monoton artan eksenel yükler, 9 adedi ise tekrarlı eksenel yükler altında denenmiştir. Bu seri deneyleri ile, hasar verilip onarıldıktan sonra güçlendirilen numuneler ile doğrudan güçlendirilen numunelerin davranışları arasındaki ilişkinin ve yükleme şeklinin davranışa olan etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

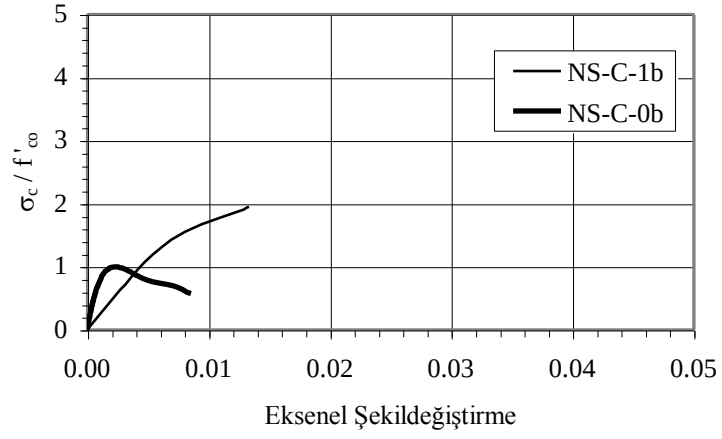
Orijinal durumunda denenip hasar verilen ve onarılıp güçlendirilen numunelerin basınç dayanımları ve doğrudan güçlendirilen numunelerin standart silindir basınç deneyleri sonucunda elde edilen basınç dayanımları ve bu seri ile ilgili özet bilgiler Tablo 3.1’de, deneyler sonucu elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme Şekil 5.1.1’den Şekil 5.1.16’ya ve boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri ise Şekil 5.1.17’den Şekil 5.1.28’e kadar olan grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklerde dikey eksen, numuneye deney sırasında etkiyen gerilmenin (σ_c), söz konusu numunenin orijinal basınç dayanımına (f'_{co}) oranını temsil eden, σ_c / f'_{co} oranıdır.

Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım, boyuna ve enine şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.1.1’de verilmiştir.

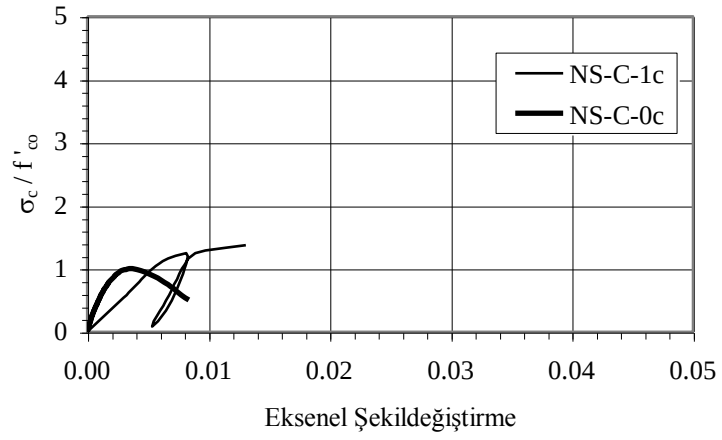
Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.1.37’de verilmiştir.



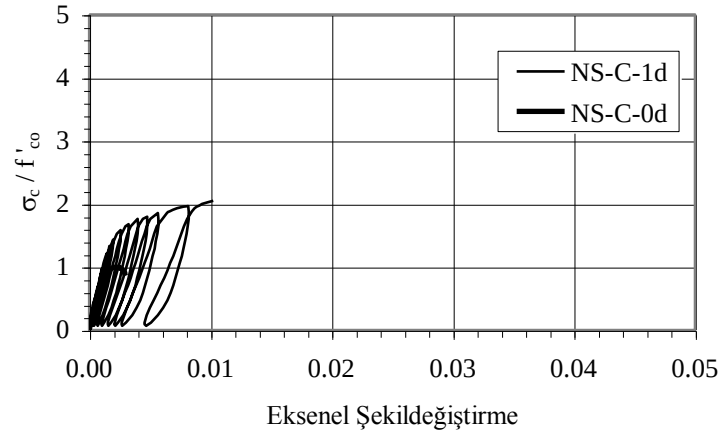
Şekil 5.1.1. NS-C-0a ve NS-C-1a gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



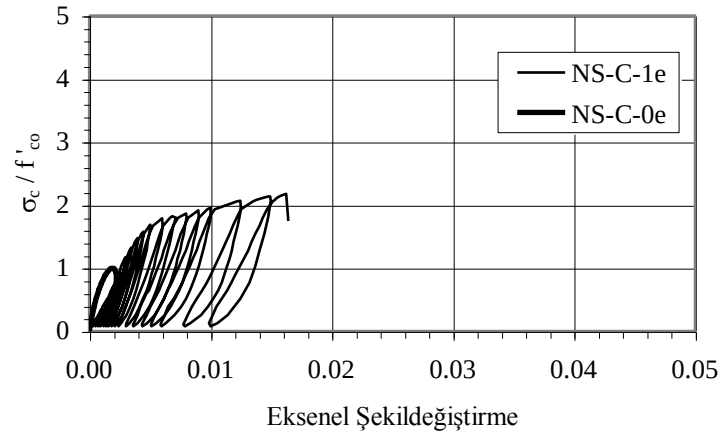
Şekil 5.1.2 NS-C-0b ve NS-C-1b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



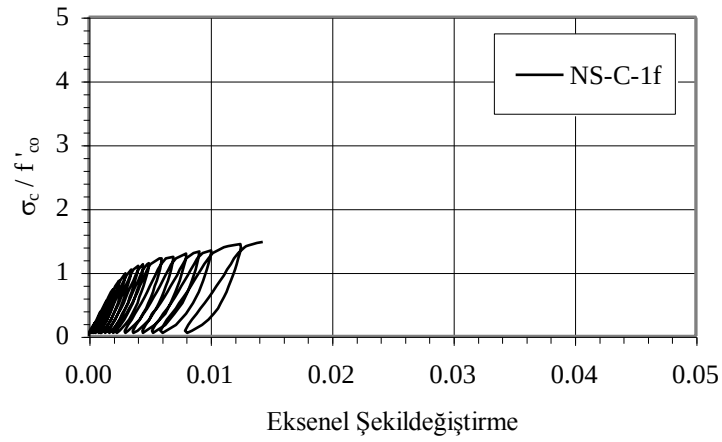
Şekil 5.1.3 NS-C-0c ve NS-C-1c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



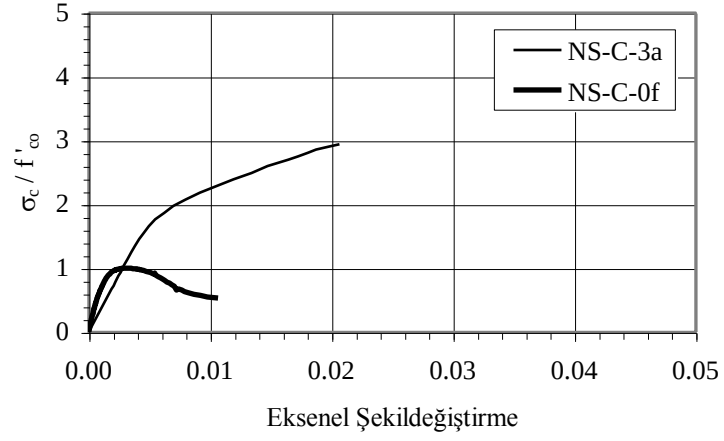
Şekil 5.1.4 NS-C-0d ve NS-C-1d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



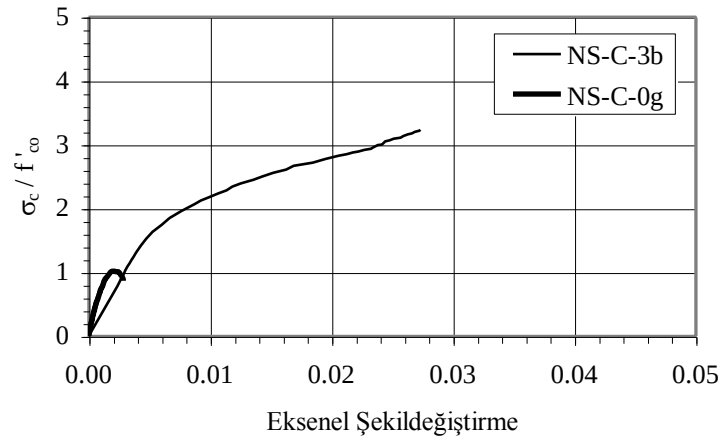
Şekil 5.1.5 NS-C-0e ve NS-C-1e gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



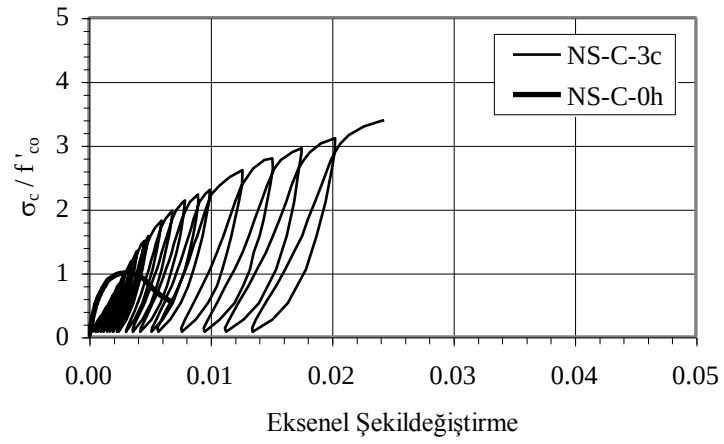
Şekil 5.1.6 NS-C-1f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi



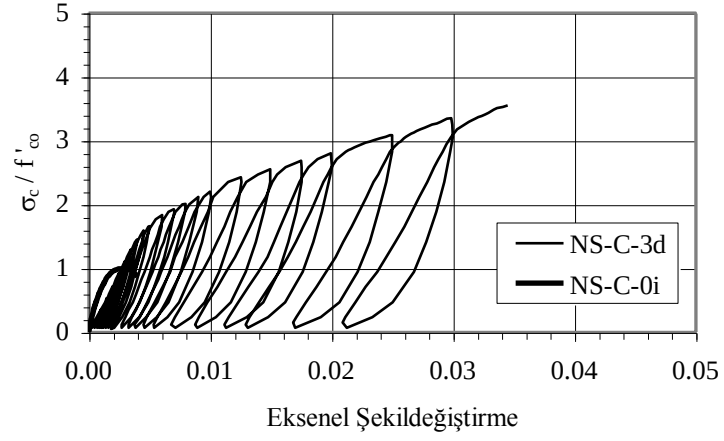
Şekil 5.1.7 NS-C-0f ve NS-C-3a gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



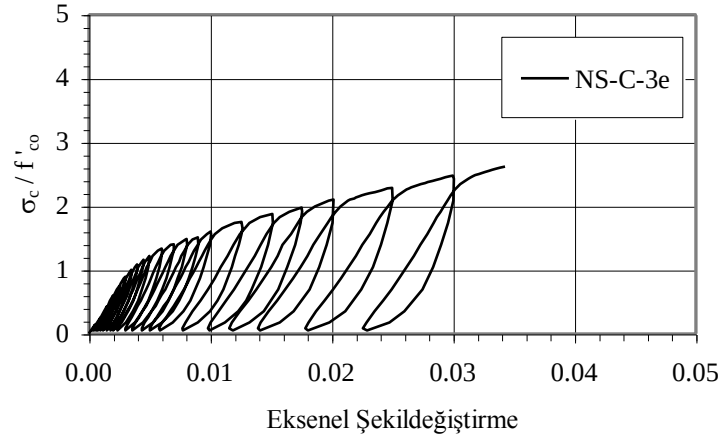
Şekil 5.1.8 NS-C-0g ve NS-C-3b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



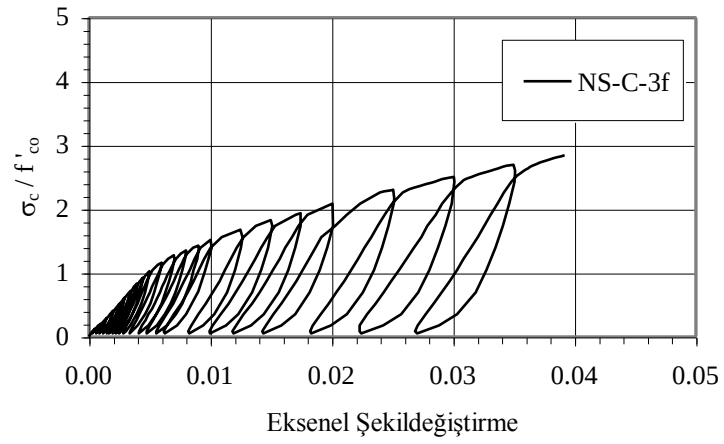
Şekil 5.1.9 NS-C-0h ve NS-C-3c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



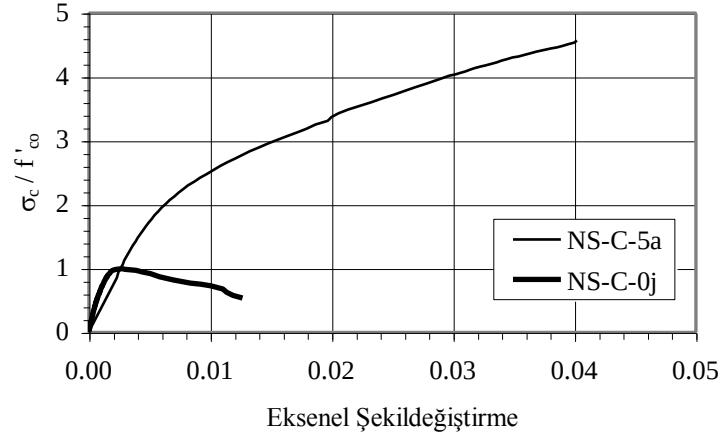
Şekil 5.1.10 NS-C-0i ve NS-C-3d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



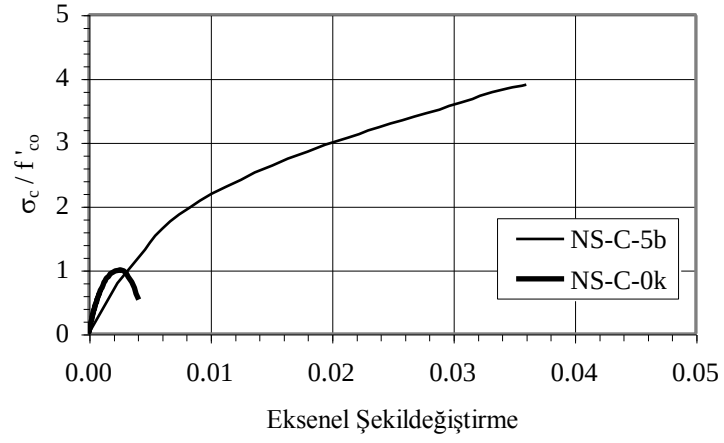
Şekil 5.1.11 NS-C-3e gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi



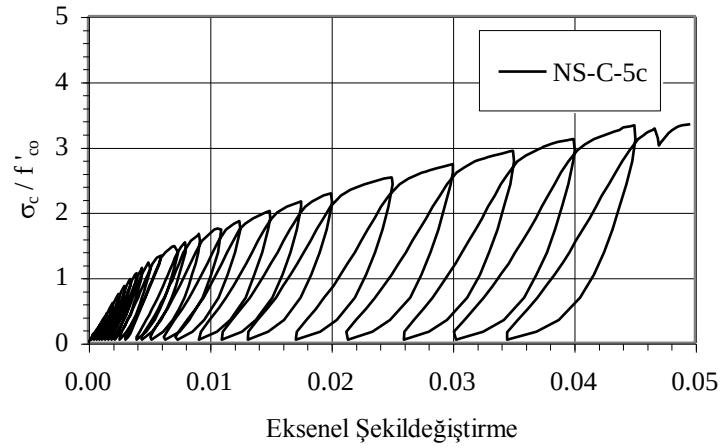
Şekil 5.1.12 NS-C-3f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi



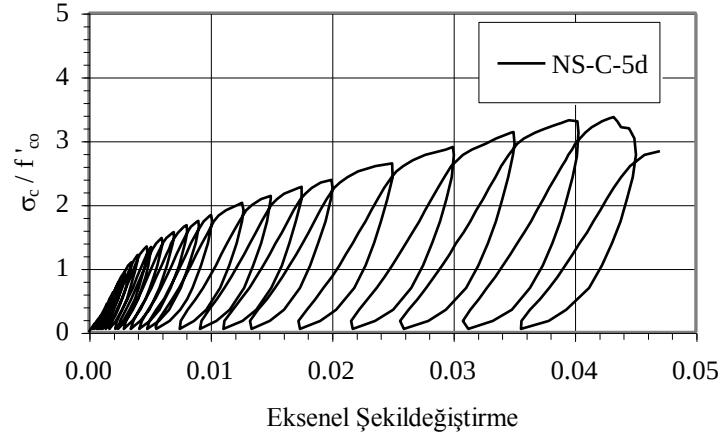
Şekil 5.1.13 NS-C-0j ve NS-C-5a gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri



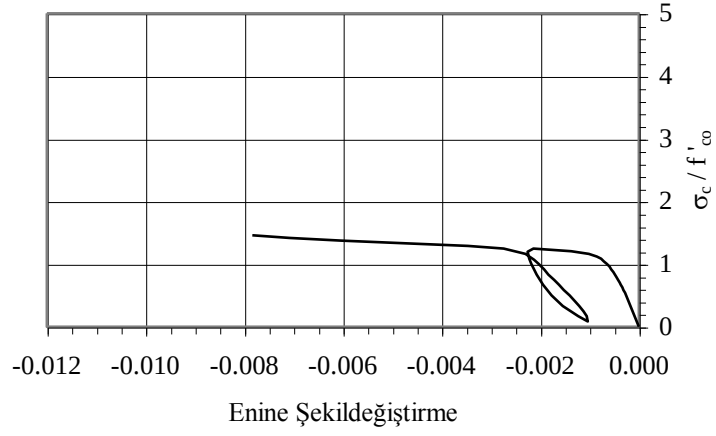
Şekil 5.1.14 NS-C-0k ve NS-C-5b gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri



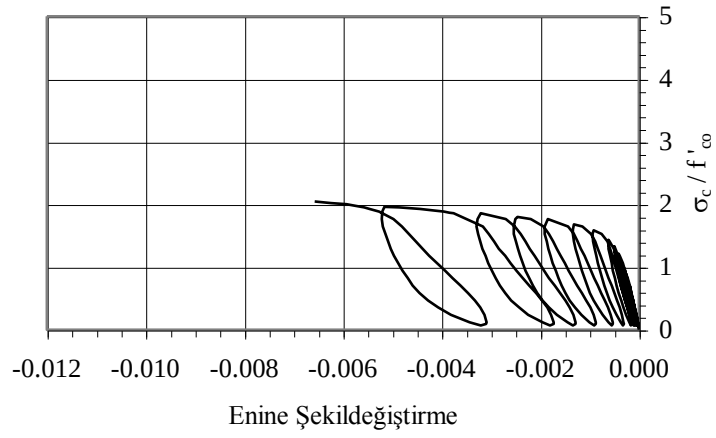
Şekil 5.1.15 NS-C-5c gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkisi



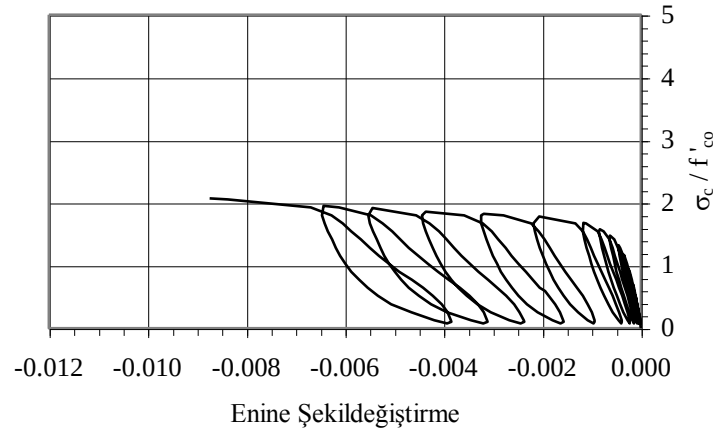
Şekil 5.1.16 NS-C-5d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi



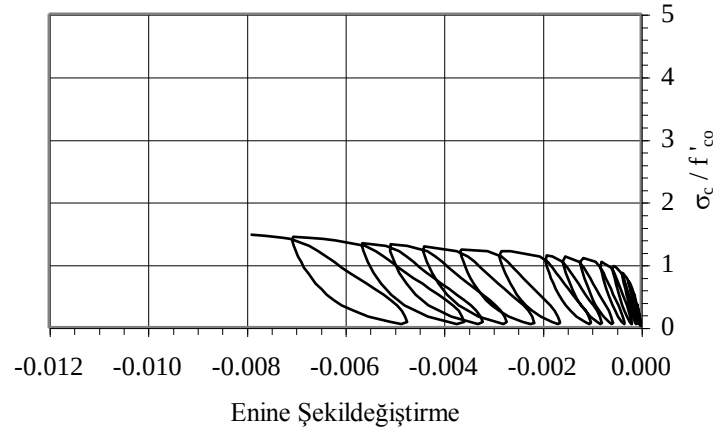
Şekil 5.1.17 NS-C-1c gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



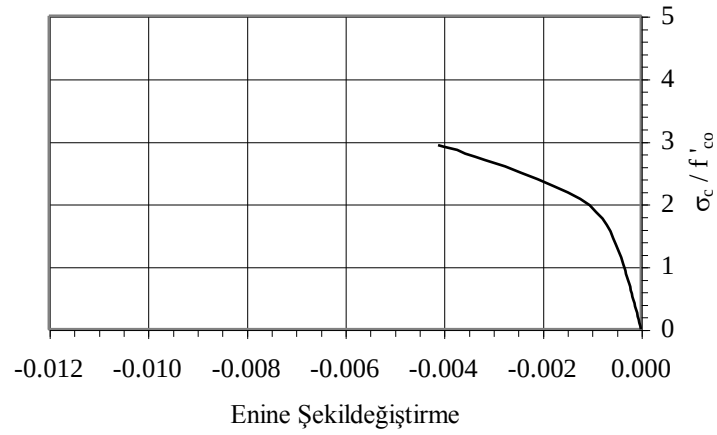
Şekil 5.1.18 NS-C-1d gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



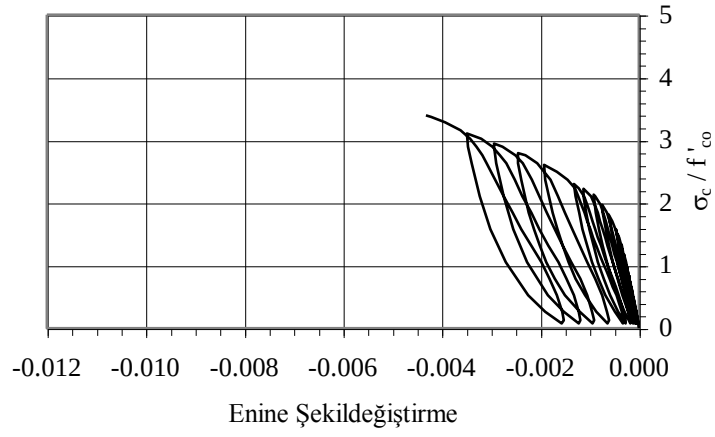
Şekil 5.1.19 NS-C-1e gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



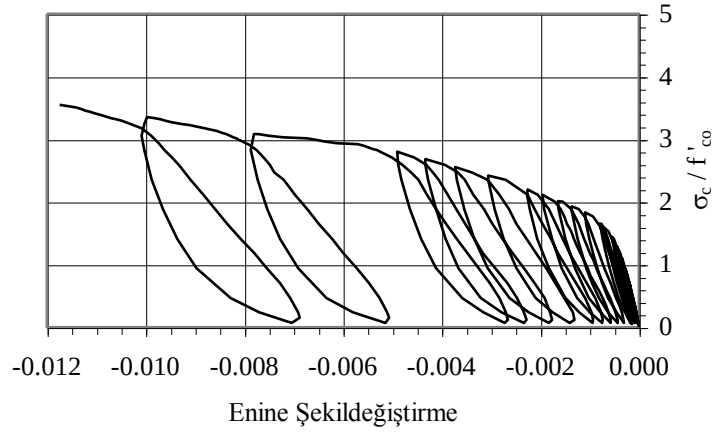
Şekil 5.1.20 NS-C-1f gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



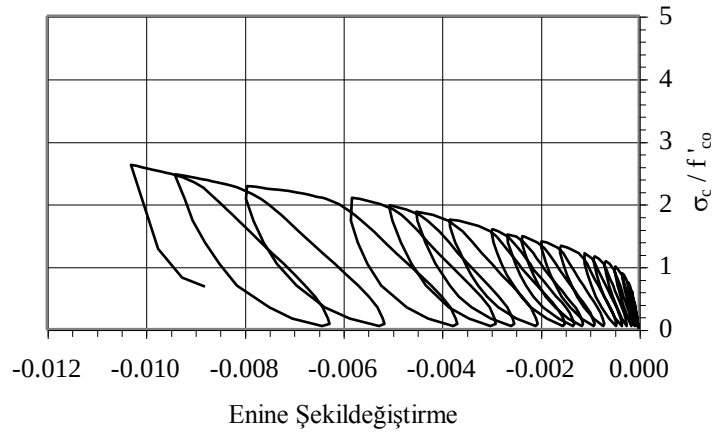
Şekil 5.1.21 NS-C-3a gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



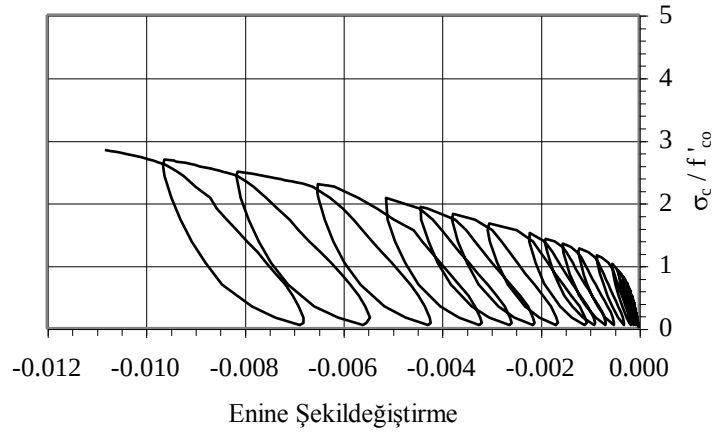
Şekil 5.1.22 NS-C-3c gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



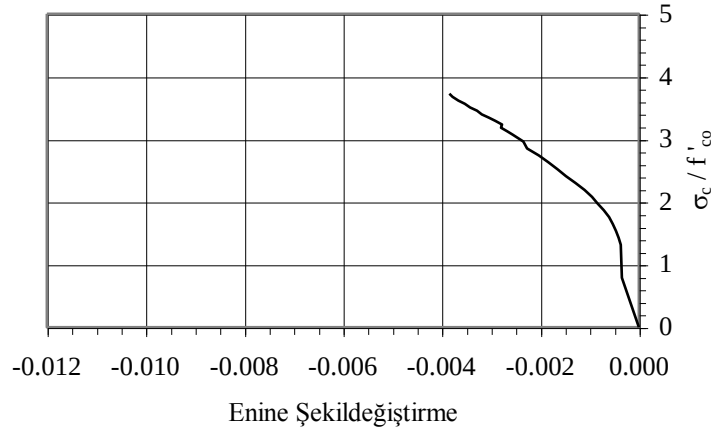
Şekil 5.1.23 NS-C-3d gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



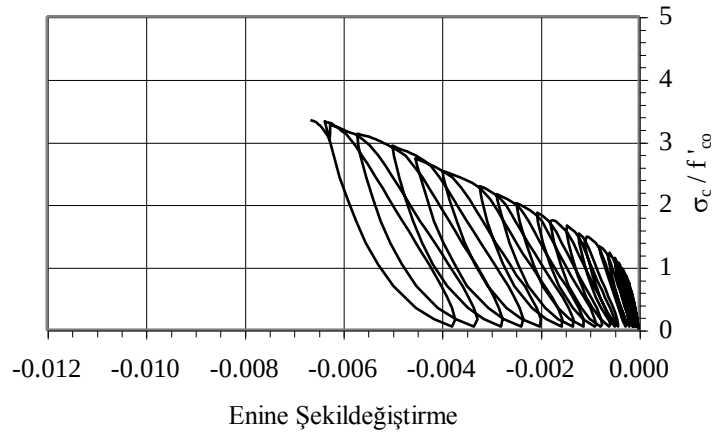
Şekil 5.1.24 NS-C-3e gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



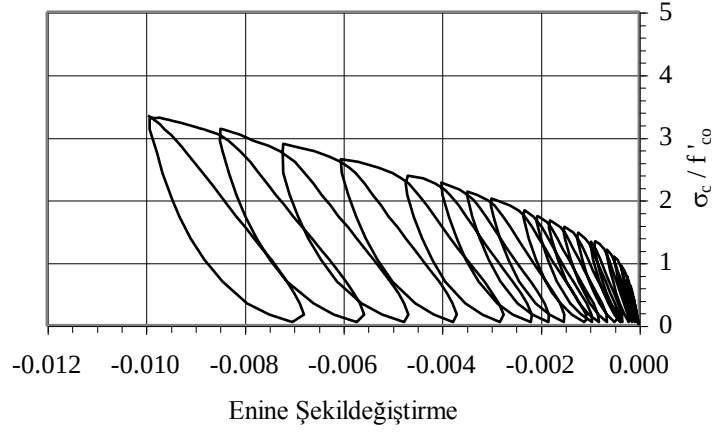
Şekil 5.1.25 NS-C-3f gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 5.1.26 NS-C-5b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi

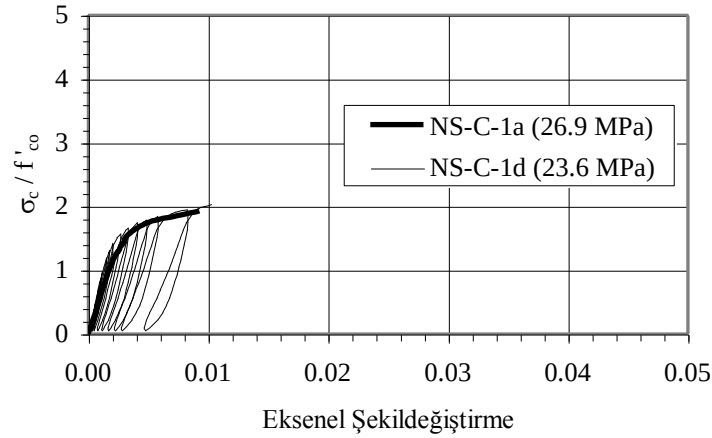


Şekil 5.1.27 NS-C-5c gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi

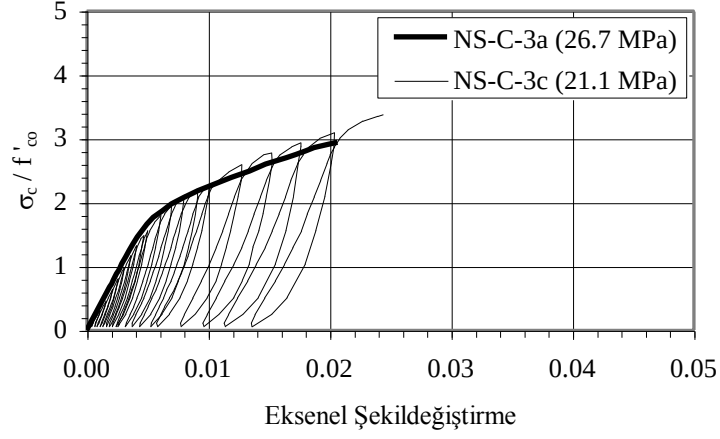


Şekil 5.1.28 NS-C-5d gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi

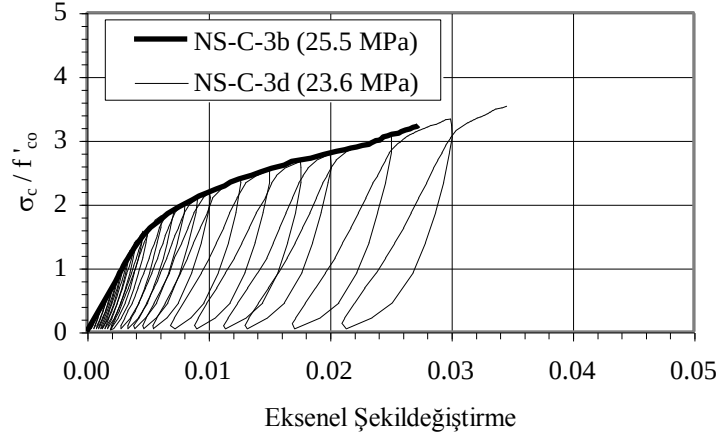
Yapılan deneyler sonucunda yüklemenin monoton artan veya tekrarlı olmasının davranışa önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Şekil 5.1.29’da önceden hasar verilip onarıldıktan sonra, 1 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş ve monoton artan yükler altında denenmiş NS-C-1a ile, yine önceden hasar verilip onarıldıktan sonra, 1 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş ve tekrarlı yükler altında denenmiş NS-C-1d numunelerine ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Benzer şekilde önceden hasar verilip onarıldıktan sonra 3 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş ve monoton artan yükler altında denenmiş NS-C-3a ile, önceden hasar verilip onarıldıktan sonra 3 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş ve tekrarlı yükler altında denenmiş NS-C-3c numunelerine ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.1.30’da verilmiştir. Benzer bir diğer karşılaştırma NS-C-3b ve NS-C-3d numuneleri için Şekil 5.1.31’de verilmiştir.



Şekil 5.1.29 NS-C-1a ve NS-C-1d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

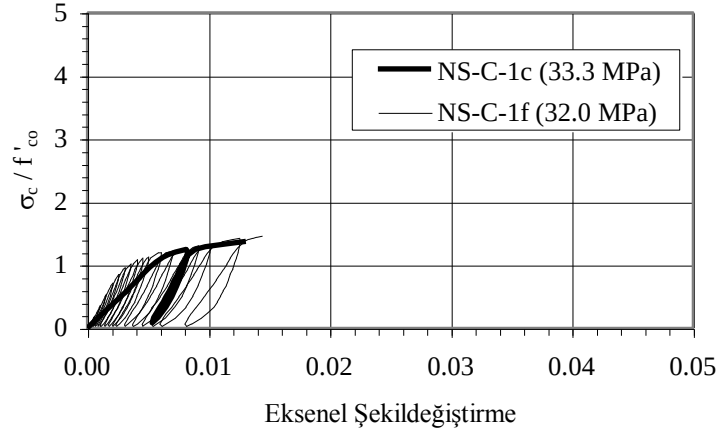


Şekil 5.1.30 NS-C-3a ve NS-C-3c gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



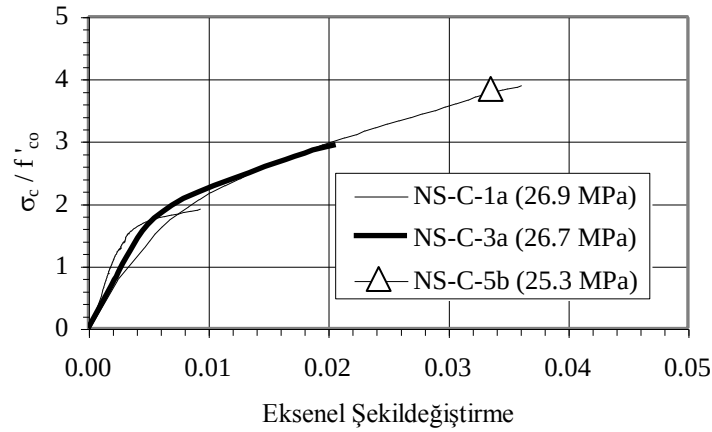
Şekil 5.1.31 NS-C-3b ve NS-C-3d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

Orijinal durumda denenmiş ve onarıldıktan sonra güçlendirilmiş numunelerle, doğrudan güçlendirilmiş numunelerin de benzer davranış gösterdikleri görülmüştür. Ancak onarıldıktan sonra güçlendirilmiş numunelerde rijitliğin, orijinal durumlarına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.1.32’de, monoton artan yükler altında orijinal durumunda denenip hasar verilmiş ve onarıldıktan sonra 1 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş olan numune NS-C-1c ile doğrudan 1 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş ve tekrarlı yükler altında denenmiş olan numune NS-C-1f’ye ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir.

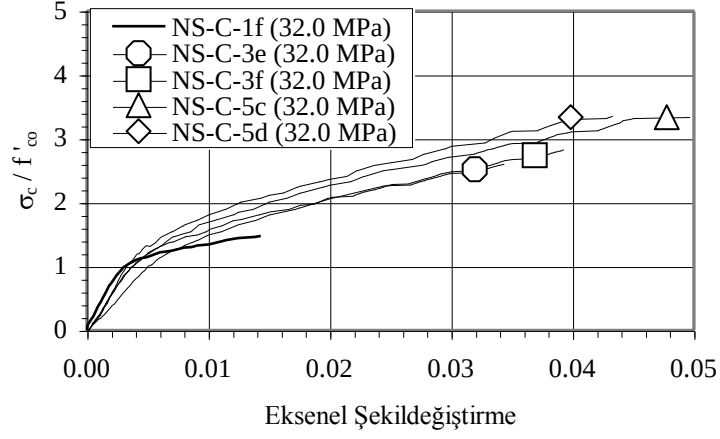


Şekil 5.1.32 NS-C-1c ve NS-C-1f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre karbon lif sargı tabaka sayısının artması ile gerek dayanım gerekse şekildeğiştirebilme özellikleri önemli ölçüde iyileşmektedir. Önceden hasar verilip onarıldıktan sonra güçlendirilen ve monoton artan yükler altında denenen NS-C-1a, NS-C-3a ve NS-C-5b'ye ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.1.33'te verilmiştir. Şekil 5.1.34'te tekrarlı yükler altında denenmiş olan, 1 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numune NS-C-1f, 3'er kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numuneler NS-C-3e ve NS-C-3f ile 5'er kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numuneler NS-C-5c ve NS-C-5d'ye ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkilerinin zarf eğrileri sunulmuştur.

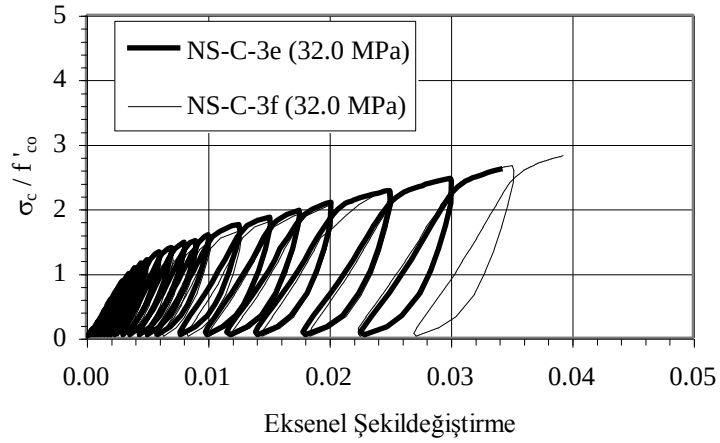


Şekil 5.1.33 NS-C-1a, NS-C-3a ve NS-C-5b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

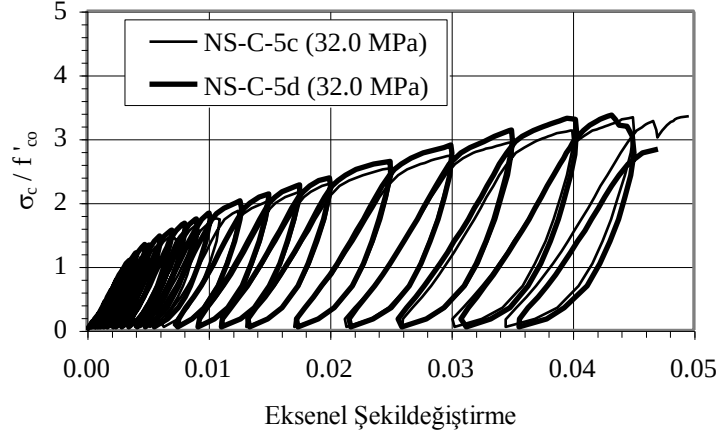


Şekil 5.1.34 NS-C-1f, NS-C-3e, NS-C-3f, NS-C-5c ve NS-C-5d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

Deneyler sonucunda aynı şekilde yükleme ile denenen, aynı şekilde güçlendirilen özdeş numunelerin davranışlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. 3 kat CFRP tabaka ile doğrudan güçlendirilen ve tekrarlı yükler altında denenen NS-C-3e ile NS-C-3f'ye ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.1.35'te ve 5 kat CFRP tabaka ile doğrudan güçlendirilen ve tekrarlı yükler altında denenen NS-C-5c ile NS-C-5d'ye ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.1.36'da verilmiştir.



Şekil 5.1.35 NS-C-3e ve NS-C-3f gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.1.36 NS-C-5c ve NS-C-5d gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

Tablo 5.1.1 1. seri kapsamında denenen numunelere ait bilgiler

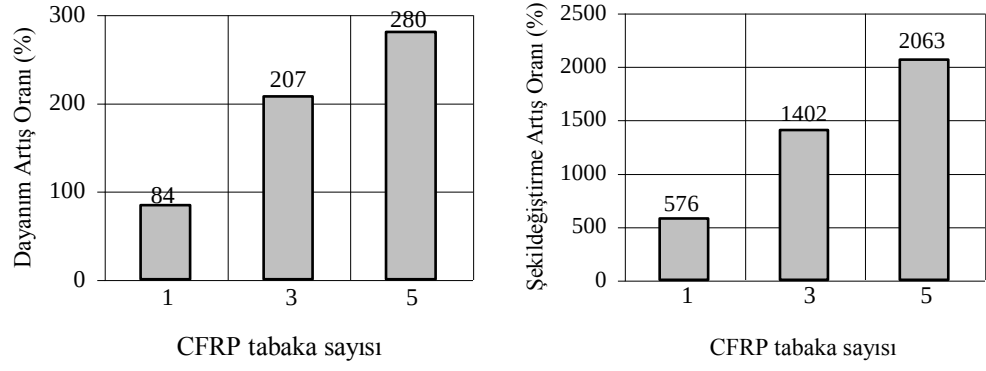
Numune	Orijinal dayanım ¹ f'_{co} , MPa	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{ch}^2	Dayanım Artışı (%)	Şekildeğiştirme Artışı (%)
NS-C-1a	26.9	51.82	51.82	0.0093	0.0093	—	93	365
NS-C-1b	23.8	46.43	46.43	0.0133	0.0133	—	95	565
NS-C-1c	33.3	48.55	48.55	0.0133	0.0133	0.0078	46	565
NS-C-1d	23.6	48.30	48.30	0.0145	0.0145	0.0066	105	625
NS-C-1e	21.6	46.91	46.91	0.0163	0.0163	0.0087*	117	715
NS-C-1f	32.0	47.19	47.19	0.0144	0.0144	0.0079	47	620
NS-C-3a	26.7	78.51	78.51	0.0206	0.0206	0.0041	194	930
NS-C-3b	25.5	77.68	77.68	0.0273	0.0273	—	205	1265
NS-C-3c	21.1	71.61	71.61	0.0243	0.0243	0.0043	239	1115
NS-C-3d	23.6	83.82	83.82	0.0345	0.0345	0.0117	255	1625
NS-C-3e	32.0	83.82	83.82	0.0343	0.0343	0.0103	162	1615
NS-C-3f	32.0	91.04	91.04	0.0392	0.0392	0.0108	185	1860
NS-C-5a	23.5	107.36	107.36	0.0402	0.0402	—	357	1910
NS-C-5b	25.3	98.76	98.76	0.0361	0.0361	0.0036	290	1705
NS-C-5c	32.0	107.14	107.14	0.0496	0.0496	0.0066	235	2380
NS-C-5d	32.0	107.70	90.76	0.0432	0.0471	0.0100*	237	2255

¹ : Orijinal durumları denenip güçlendirilen numuneler için, orijinal basınç dayanımını; doğrudan güçlendirilen numuneler için, standart silindir basınç deneyi sonucunda elde edilen değeri gösterir.

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

* : FRP tabaka kopmadan önce şekildeğiştirmeölçer devre dışı kalmıştır.

Tablo 5.1'den de görüldüğü üzere numune NS-C-5d hariç diğer tüm numuneler 1. tip eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi göstermişlerdir. Dolayısıyla maksimum eksenel gerilme aynı zamanda kopma gerilmesine ve maksimum enine şekildeğiştirme de ϵ_{cc} şekildeğiştirmesine eşit olmuştur.



Şekil 5.1.37 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışların değişimi

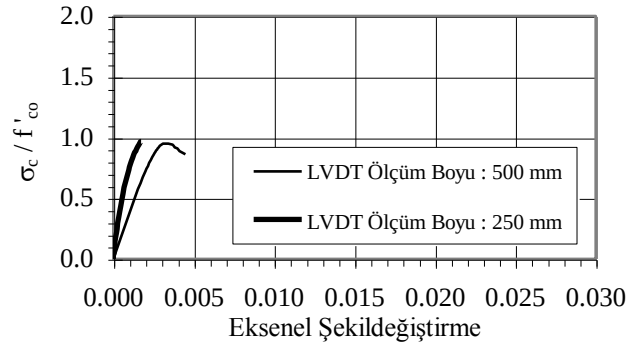
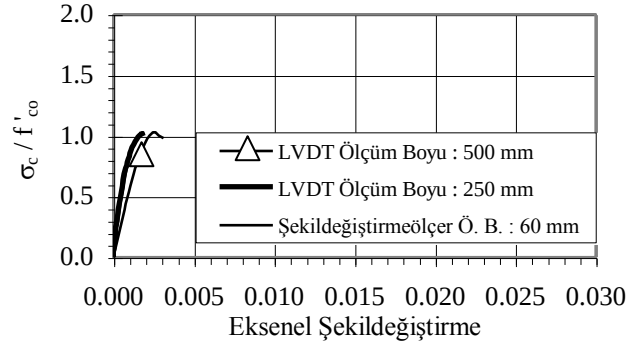
5.2. NORMAL DAYANIMLI KARE ENKESİTLİ (2. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

Orijinal dayanımları 32.75 MPa olan 250×250 mm boyutlarında kare enkesitli, 500 mm yüksekliğinde 8 adet numunenin 2 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumunda denenmiş, 2 adedi 1 kat , 2 adedi 3 kat ve 2 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin köşeleri 40 mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır.

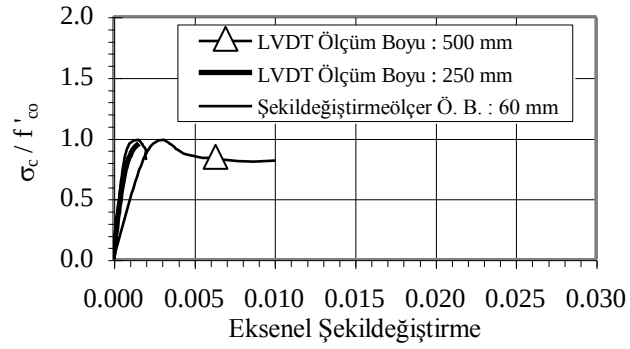
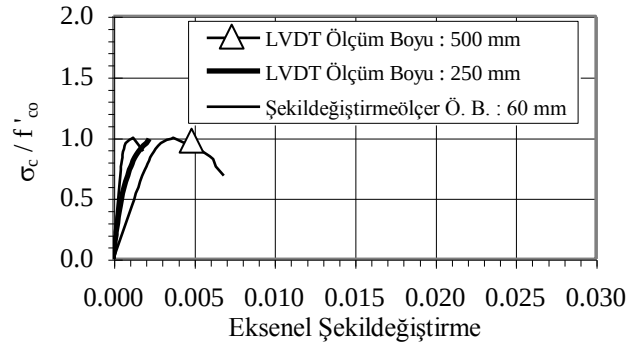
Deneyler sonrasında elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme Şekil 5.2.1'den Şekil 5.2.4'e ve boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.2.5'ten Şekil 5.2.8'e kadar olan grafiklerde sunulmuştur. Bu grafiklerde aynı zamanda farklı ölçüm boylarından alınan şekildeğiştirme verileri de gösterilmiştir. Numunelerde güç tükenmesi ani şekilde gerçekleşebildiği için, orta 250 mm yükseklikten ölçüm almak için yerleştirilmiş olan yerdeğiştirmeölçerler, güç tükenmesi anında zarar görmemeleri için belli bir şekildeğiştirme seviyesinde yerlerinden sökülmüştür. Bazı numunelere ait fotoğraflar, deney düzeneğini ve güç tükenmesi durumunu daha anlaşılabilir kılacağı düşüncesiyle EK A'da sunulmuştur.

Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım, boyuna ve enine şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.2.1'de verilmiştir.

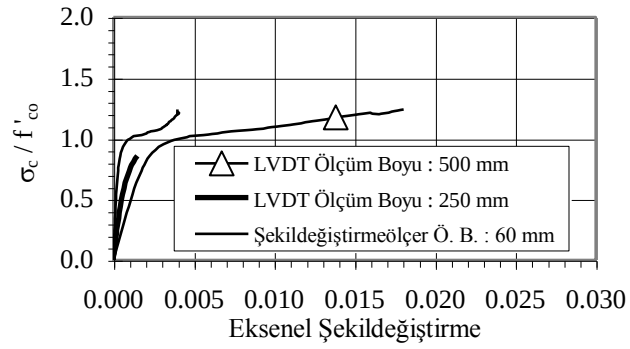
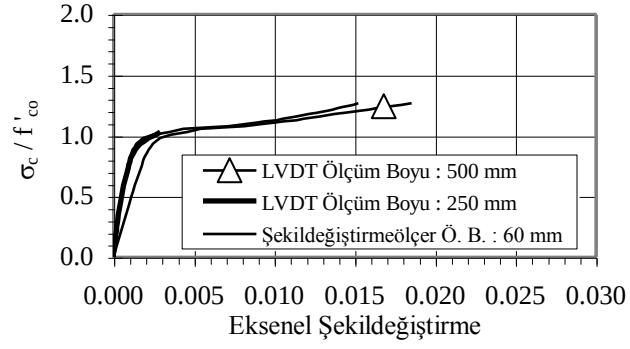
Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.2.9'da verilmiştir.



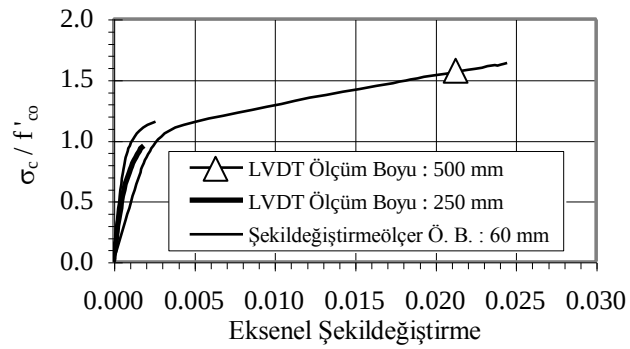
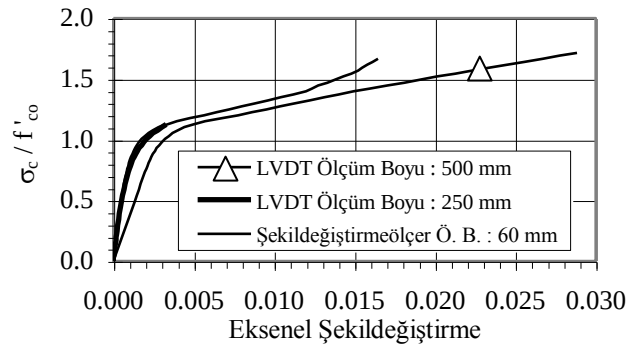
Şekil 5.2.1 NS-R-1-0-40a ve NS-R-1-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.2.2 NS-R-1-1-40a ve NS-R-1-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

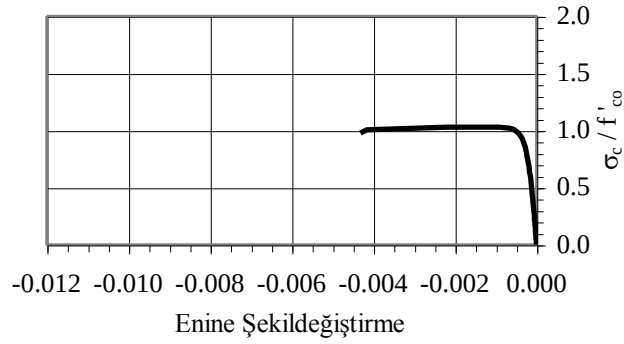


Şekil 5.2.3 NS-R-1-3-40a ve NS-R-1-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

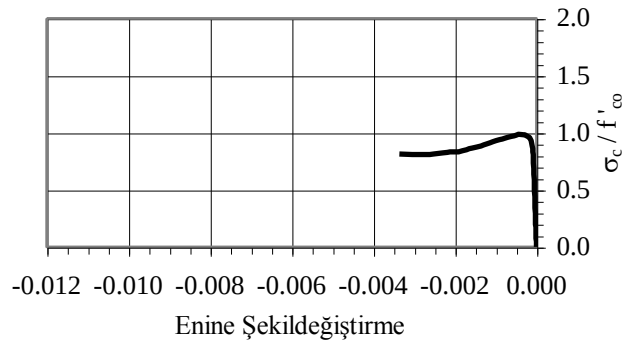
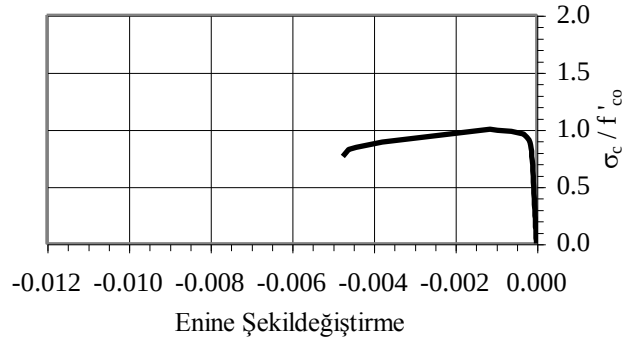


Şekil 5.2.4 NS-R-1-5-40a ve NS-R-1-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

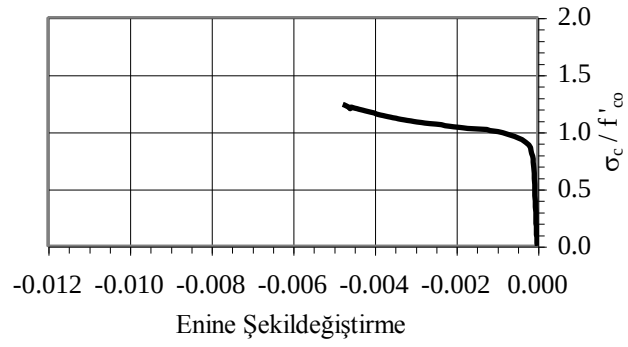
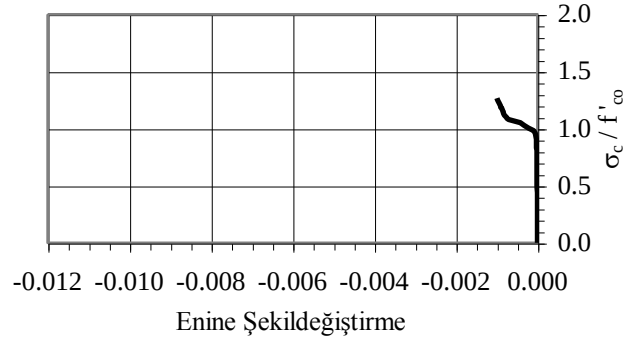
Deneyler sonucu elde edilen boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.2.5'ten Şekil 5.2.8'e kadar olan grafiklerde sunulmuştur. Numune NS-R-1-0-40a için tüm boy ve orta 250 mm yükseklikten yerdeğiştirmeölçerler ile alınan ölçümlere ek olarak boyuna ve enine doğrultuda yerleştirilen şekildeğiştirmeölçerlerden de ölçüm alınmıştır. Numune NS-R-1-0-40b için ise tüm boy ve orta 250 mm yükseklikten yerdeğiştirmeölçerler ile alınan ölçüm alınırken, şekildeğiştirmeölçerler kullanılmamıştır. Bu nedenle aşağıda yalnızca NS-R-1-0-40a'ya ait boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



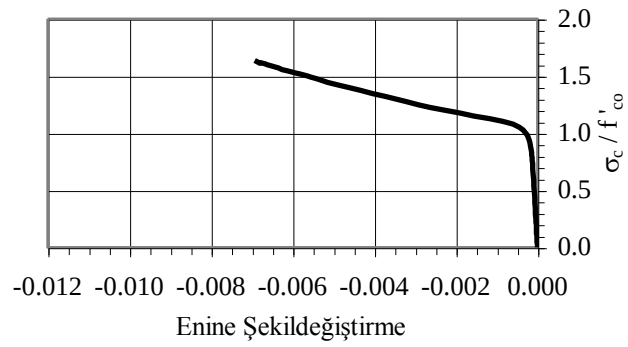
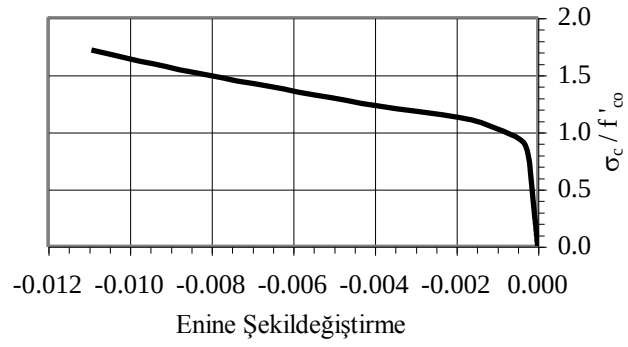
Şekil 5.2.5 NS-R-1-0-40a gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 5.2.6 NS-R-1-1-40a ve NS-R-1-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.2.7 NS-R-1-3-40a ve NS-R-1-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.2.8 NS-R-1-5-40a ve NS-R-1-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri

Tablo 5.2.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğişimleri (2. seri)

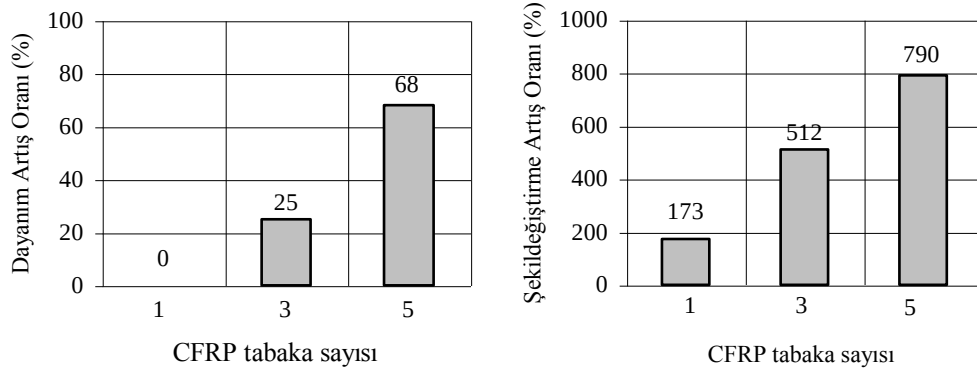
Numune	f'_{co}^1 MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{ch}^2	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
NS-R-1-0-40a	33.71	0.0026	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-1-0-40b	31.79	0.0033	-	-	-	-	0.0043	-	-
NS-R-1-1-40a	32.75	0.0030	32.74	24.78	0.0037	0.0063	0.0048	0	23
NS-R-1-1-40b	32.75	0.0030	32.26	26.64	0.0031	0.0101	0.0034	0	3
NS-R-1-3-40a	32.75	0.0030	41.41	41.41	0.0186	0.0186	0.0010	26	520
NS-R-1-3-40b	32.75	0.0030	40.60	40.60	0.0181	0.0181	0.0048	24	503
NS-R-1-5-40a	32.75	0.0030	56.17	56.17	0.0289	0.0289	0.0109	72	863
NS-R-1-5-40b	32.75	0.0030	53.60	53.60	0.0245	0.0245	0.0069	64	717

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

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

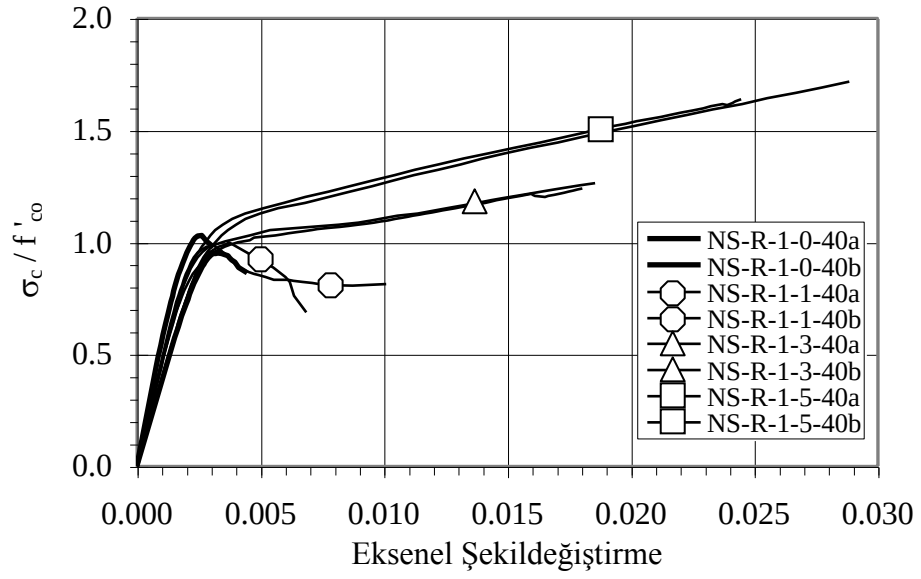
* : FRP tabaka kopmadan önce şekildeğiştirmeölçer devre dışı kalmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, öncelikle her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekildeğiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 1 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde, dayanımda bir artış gözlenmezken, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %173, 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %25, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %512, 5 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %68, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ise ortalama %790 artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan artışların ilişkileri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.2.9.



Şekil 5.2.9 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi

Şekil 5.2.10'da 2. seri olarak deneye tabi tutulan tüm numunelerin boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.



Şekil 5.2.10 2. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri

5.3. NORMAL DAYANIMLI DİKDÖRTGEN ENKESİTLİ (3. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

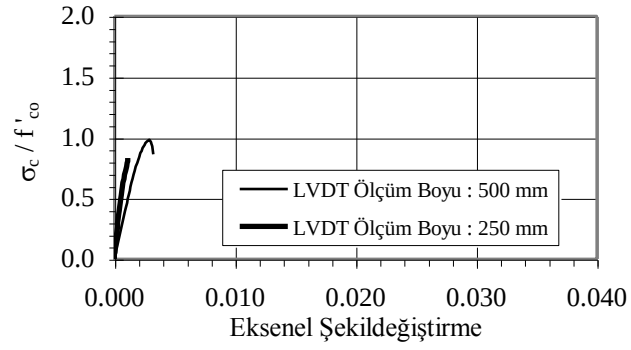
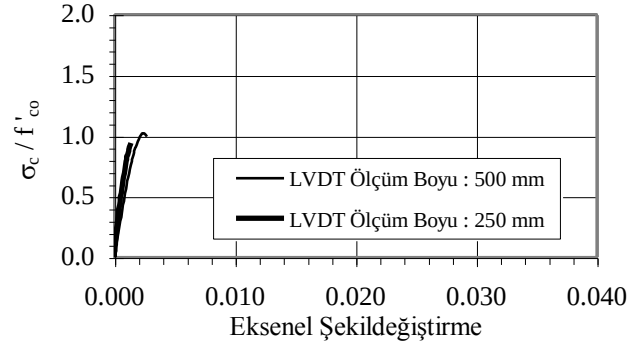
Orijinal dayanımları 33.92 MPa olan 150×300 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli, 500 mm yüksekliğinde 8 adet numunenin 2 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumunda denenmiş, 2 adedi 1 kat , 2 adedi 3 kat ve 2 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan aksenal yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin köşeleri 40 mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır.

Deneyler sonrasında elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme Şekil 5.3.1'den Şekil 5.3.4'e ve boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.3.5'ten Şekil 5.3.7'ye kadar olan grafiklerde sunulmuştur. Bu grafiklerde aynı zamanda farklı ölçüm boylarından alınan şekildeğiştirme verileri de gösterilmiştir. Numunelerde güç tükenmesi ani bir şekilde gerçekleşebildiği için, orta 250 mm yükseklikten ölçüm almak için yerleştirilmiş olan yerdeğiştirmeölçerler, güç tükenmesi anında zarar görmemeleri için belli bir şekildeğiştirme seviyesinde yerlerinden sökülmüştür. Bazı numunelere ait fotoğraflar, deney düzeneğini ve güç tükenmesi durumunu daha anlaşılabilir kılacağı düşüncesiyle EK A'da sunulmuştur.

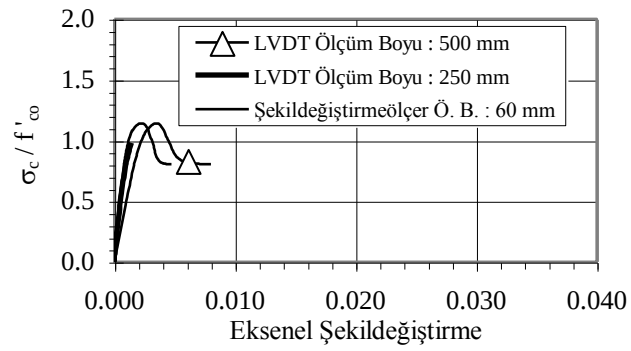
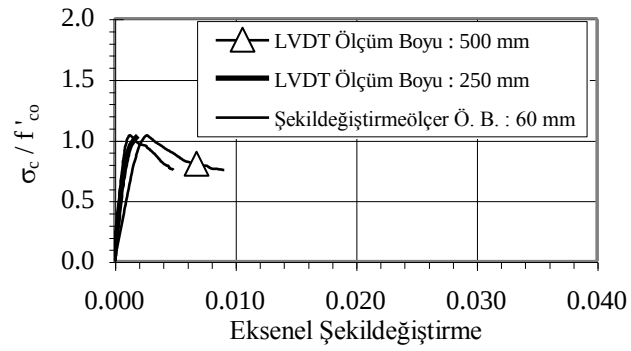
Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım ve şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.3.1'de verilmiştir.

Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.3.8'de verilmiştir.

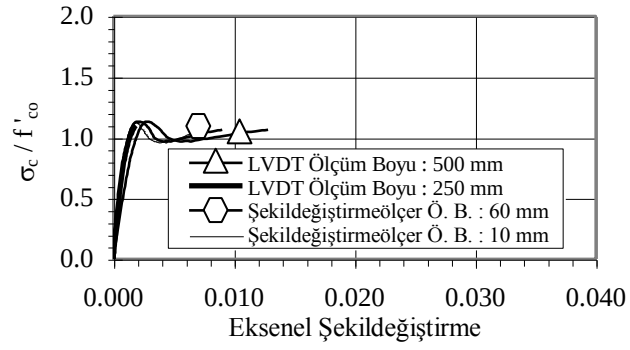
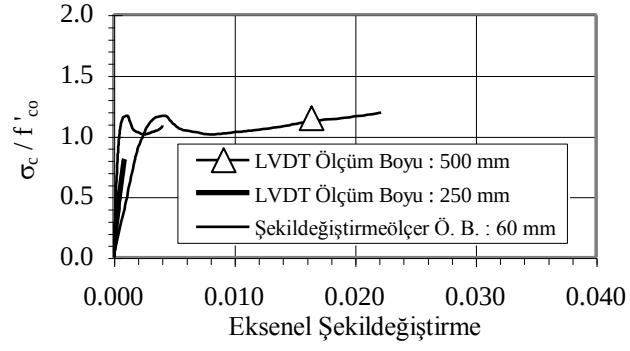
Şekil 5.3.9'da 3. seride denenilen tüm boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.



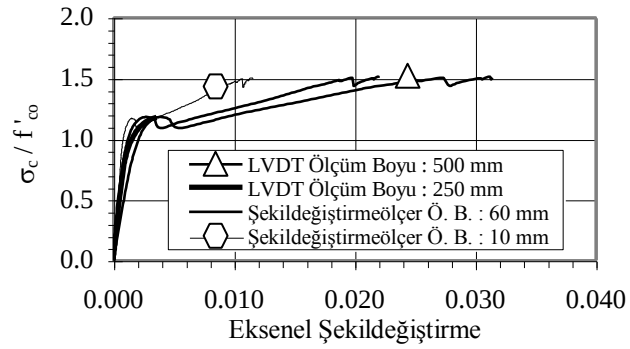
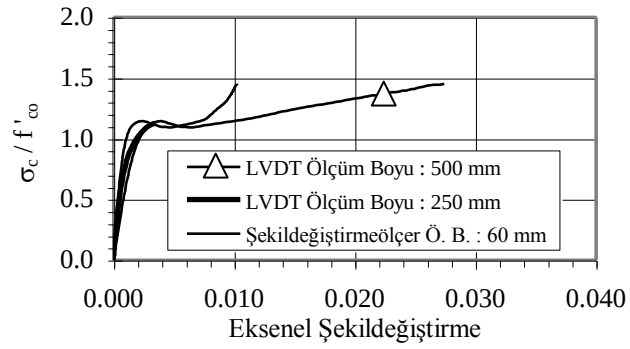
Şekil 5.3.1 NS-R-2-0-40a ve NS-R-2-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



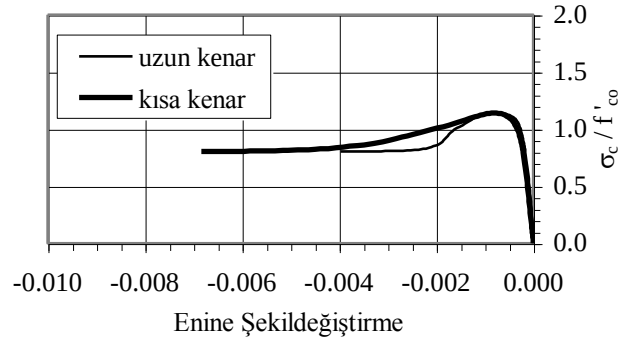
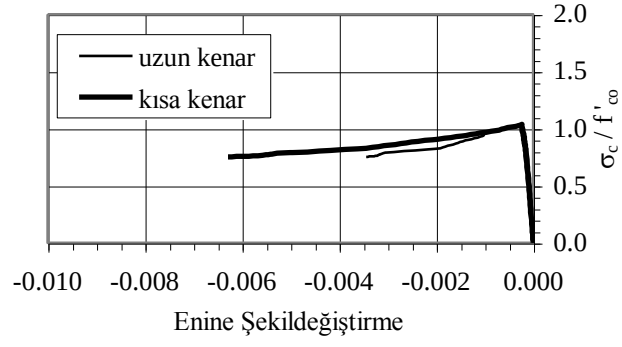
Şekil 5.3.2 NS-R-2-1-40a ve NS-R-2-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



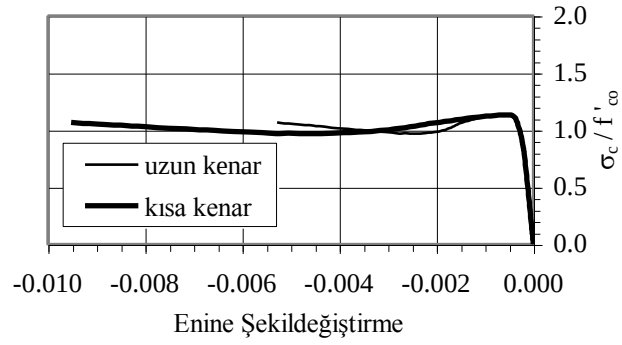
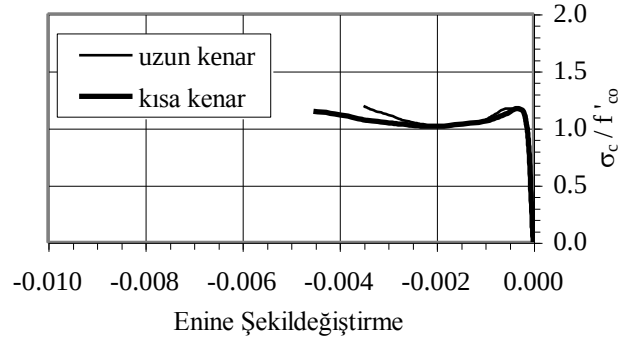
Şekil 5.3.3 NS-R-2-3-40a ve NS-R-2-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



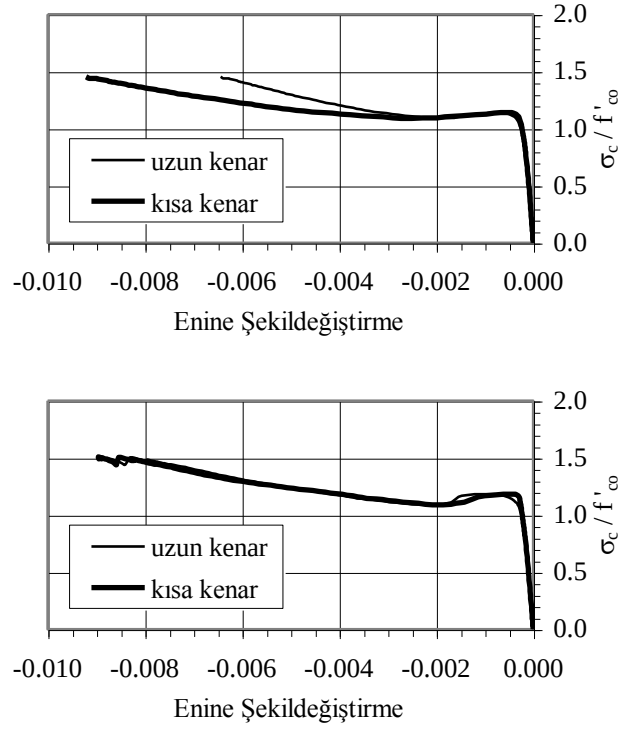
Şekil 5.3.4 NS-R-2-5-40a ve NS-R-2-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.3.5 NS-R-2-1-40a ve NS-R-2-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.3.6 NS-R-2-3-40a ve NS-R-2-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.3.7 NS-R-2-5-40a ve NS-R-2-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri

Tablo 5.3.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğiştirmeleri (3. seri)

Numune	f'_{co}^1 MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{chs}^2	ϵ_{chl}^2	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
NS-R-2-0-40a	34.64	0.0024	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-2-0-40b	33.19	0.0029	-	-	-	-	-	-	-	-
NS-R-2-1-40a	33.92	0.0027	35.19	25.52	0.0027	0.0091	0.0063	0.0034	4	237
NS-R-2-1-40b	33.92	0.0027	38.68	27.32	0.0036	0.0080	0.0068	0.0040	14	196
NS-R-2-3-40a	33.92	0.0027	40.37	40.37	0.0222	0.0222	0.0045*	0.0035	19	722
NS-R-2-3-40b	33.92	0.0027	38.39	36.09	0.0029	0.0128	0.0095	0.0053	13	374
NS-R-2-5-40a	33.92	0.0027	49.25	49.25	0.0274	0.0274	0.0092*	0.0064*	45	915
NS-R-2-5-40b	33.92	0.0027	51.05	51.05	0.0315	0.0315	0.0090*	0.0089*	51	1067

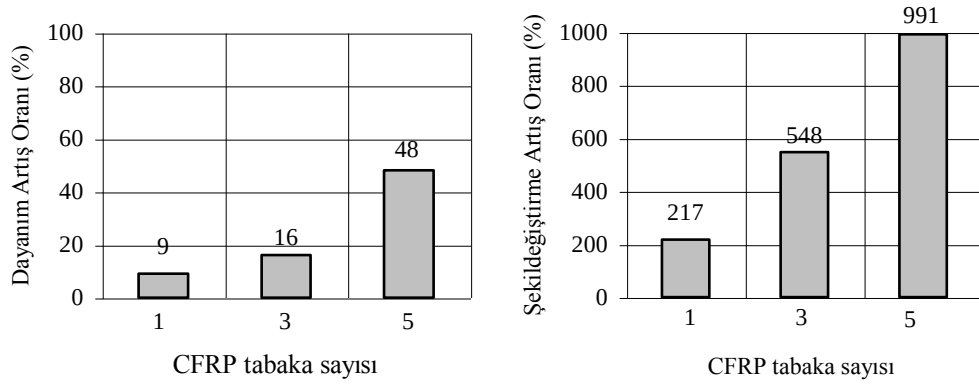
¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımları ortalamasıdır.

² : ϵ_{chs} değerleri kısa kenarda, ϵ_{chl} değerleri ise uzun kenarda şekildeğiştirmeölçerler ile alınabilen en büyük enine şekildeğiştirme değerleridir.

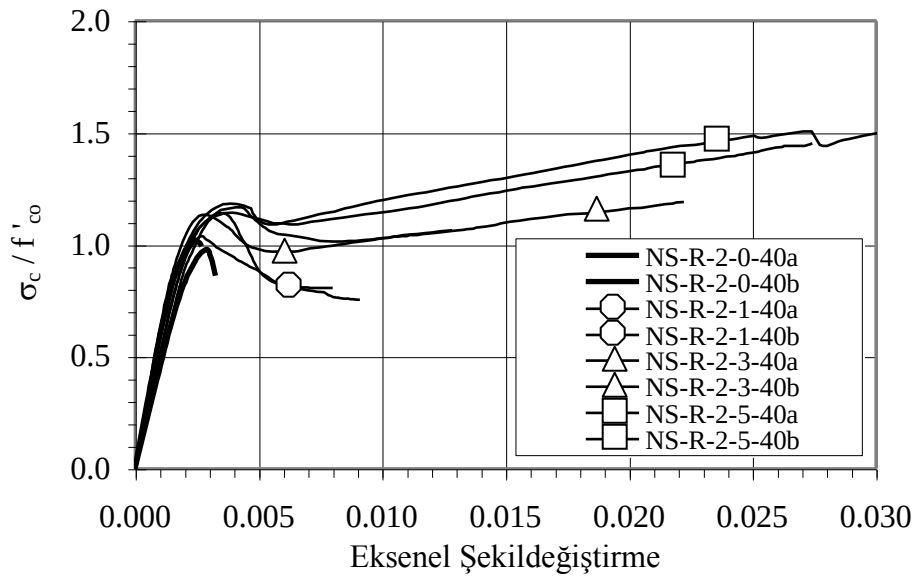
* : FRP tabaka kopmadan önce şekildeğiştirmeölçer devre dışı kalmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, 1. ve 2. seri numunelerde görüldüğü gibi, her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekildeğiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiği görülür. 1 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde, dayanımda ortalama %9, eksenel şekildeğiştirme

kapasitesinde ortalama %217, 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %16, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ortalama %548, 5 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %48, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ise ortalama %991 artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekil değiştirmede kazanılan artışların ilişkileri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.3.8.



Şekil 5.3.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekil değiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi



Şekil 5.3.9 3. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri

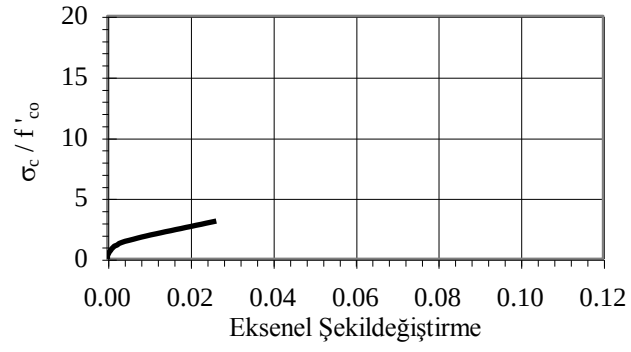
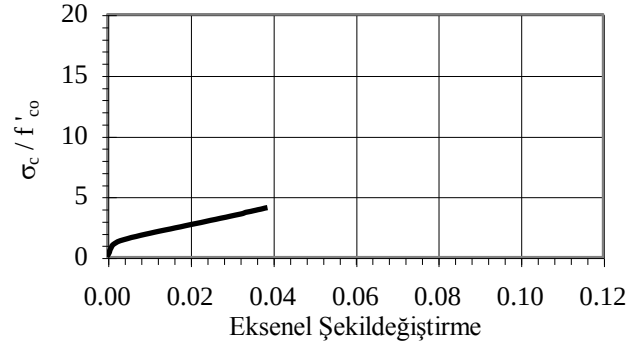
5.4. DÜŞÜK DAYANIMLI DAİRE ENKESİTLİ (4. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

Bu seri için üretilen ve basınç dayanımları 6.2 MPa olan 150 mm çapında daire enkesitli, 300 mm yüksekliğindeki 14 adet numuneden 12 adedi, 2'şerli gruplar halinde 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'şar kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan yükler altında denenmiş, diğer iki adet numune ise orijinal durumda denenmiştir. Güçlendirilen bu numunelerin orijinal durumlarındaki dayanımları, bu seri betonu için yapılan standart silindir basınç deneyleri sonucunda, numunelerin denendiği tarih göz önünde bulundurularak (Şekil 2.31), 6.2 MPa olarak hesaplanmıştır.

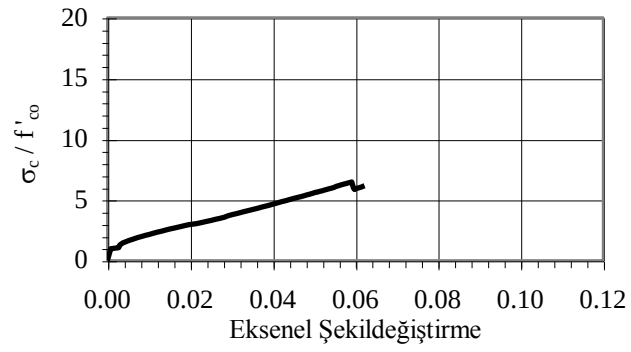
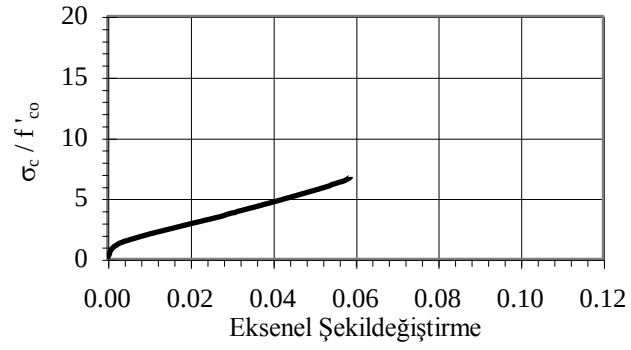
Bu serideki deneyler sonucu elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.4.1'den Şekil 5.4.6'ya, boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri ise Şekil 5.4.7'den Şekil 5.4.12'ye kadar olan grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklerde düşey eksen, numuneye deney sırasında etkiyen gerilmenin (σ_c), söz konusu numunenin orijinal dayanımına oranını temsil eden, σ_c / f'_{co} boyutsuz oranıdır.

Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım, boyuna ve enine şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.4.1'de verilmiştir.

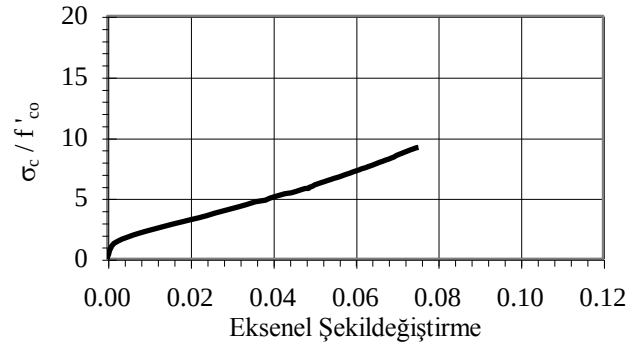
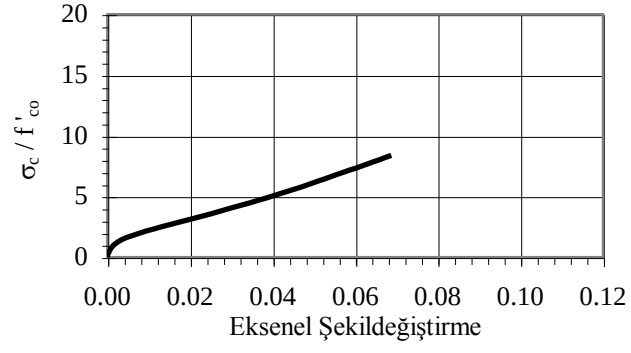
Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.4.13'te verilmiştir.



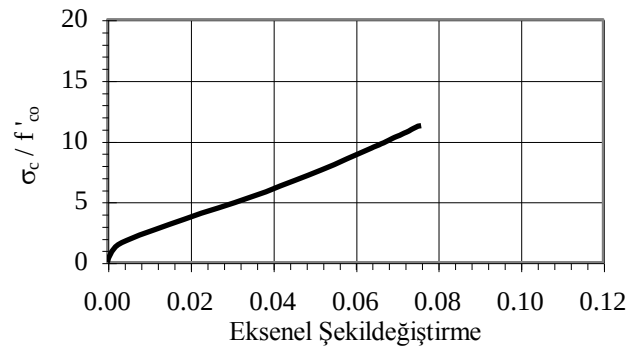
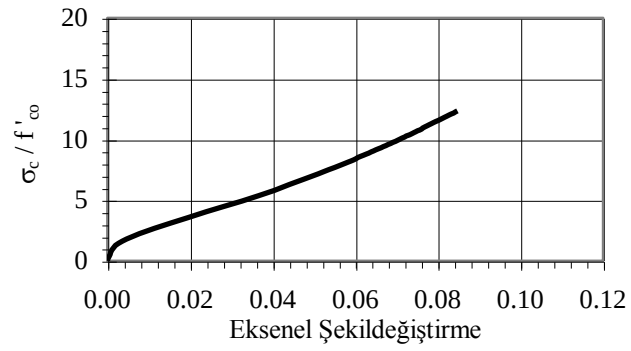
Şekil 5.4.1. LS-C-1a ve LS-C-1b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



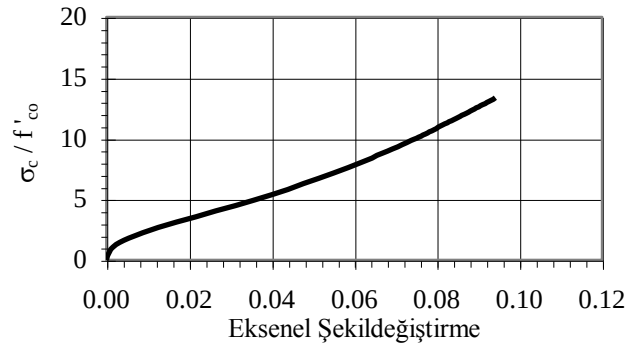
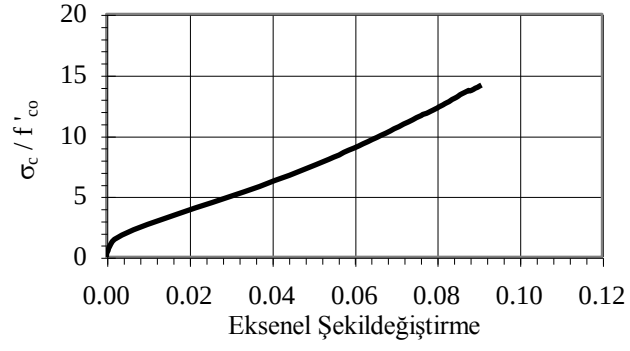
Şekil 5.4.2. LS-C-2a ve LS-C-2b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



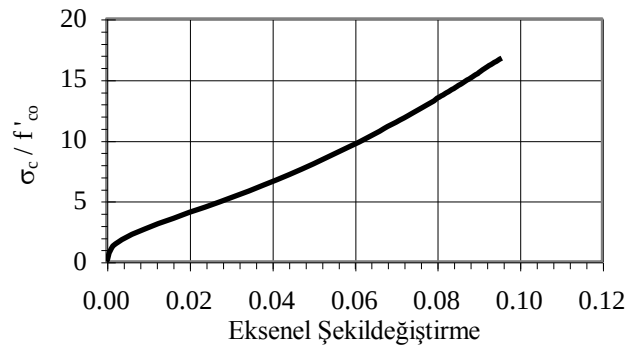
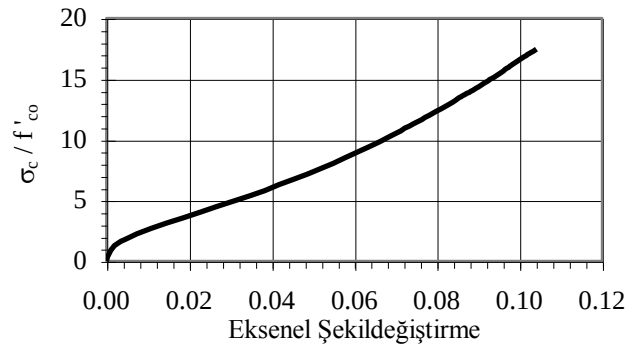
Şekil 5.4.3. LS-C-3a ve LS-C-3b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



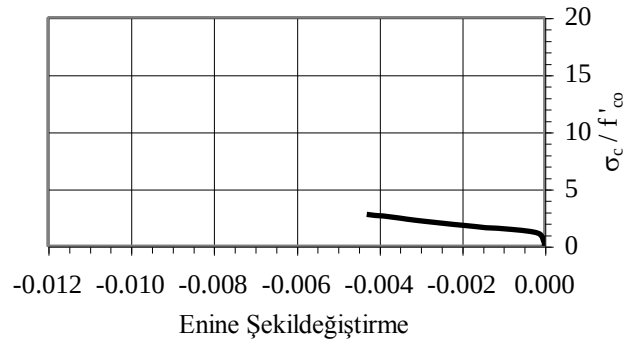
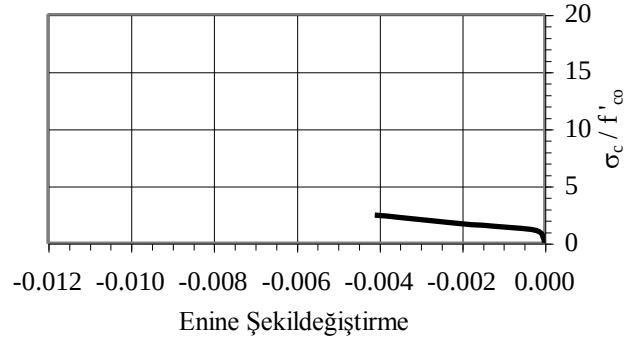
Şekil 5.4.4. LS-C-4a ve LS-C-4b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



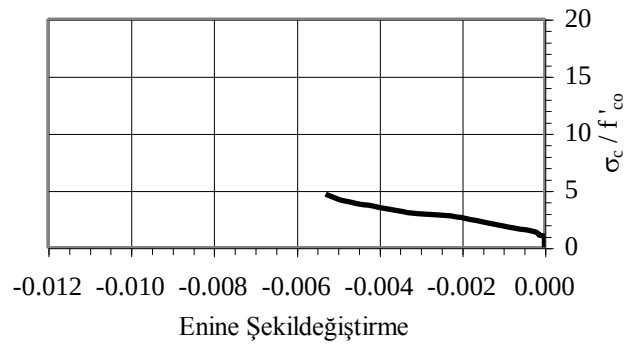
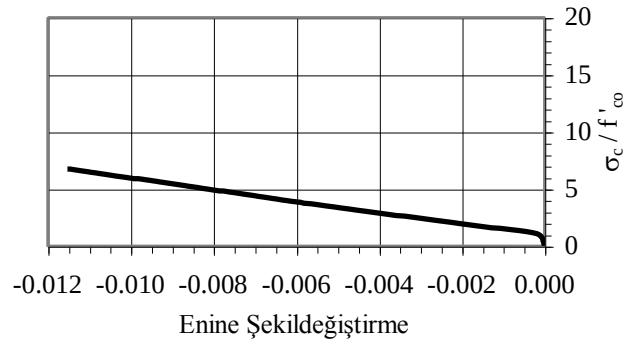
Şekil 5.4.5. LS-C-5a ve LS-C-5b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



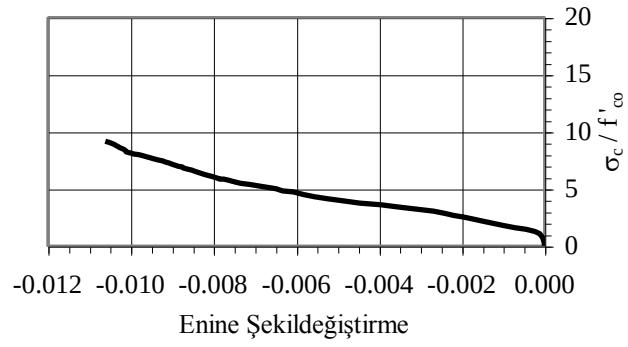
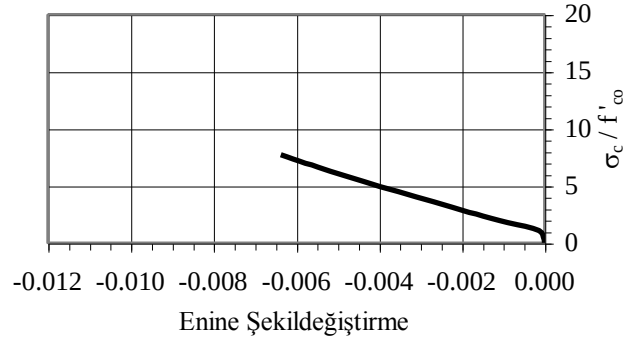
Şekil 5.4.6. LS-C-6a ve LS-C-6b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



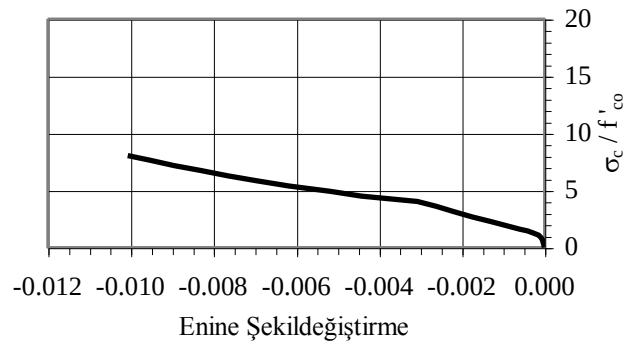
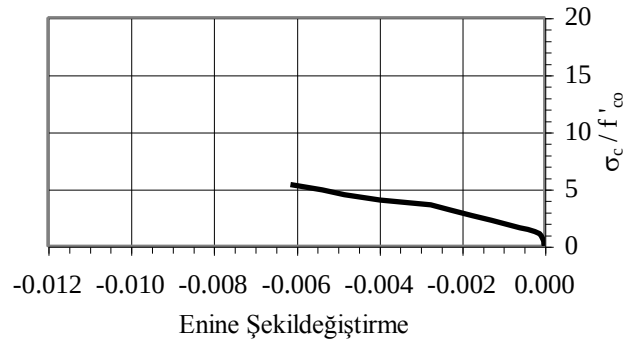
Şekil 5.4.7. LS-C-1a ve LS-C-1b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



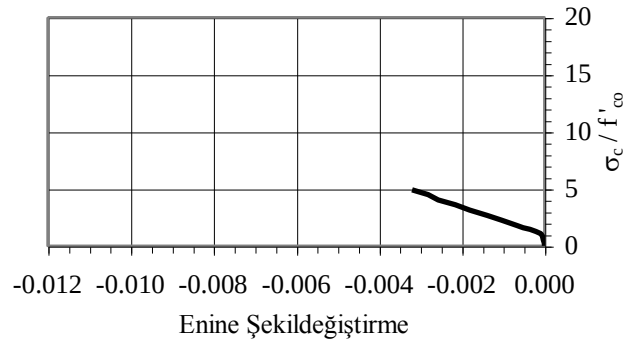
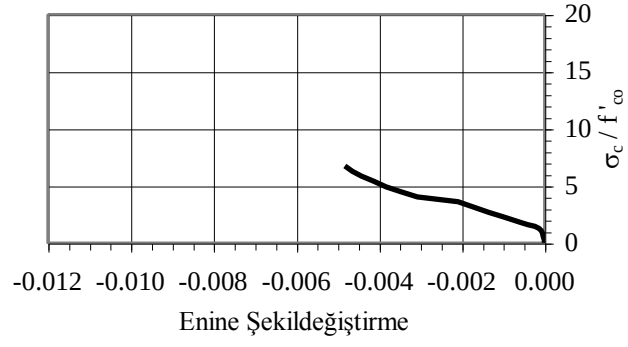
Şekil 5.4.8. LS-C-2a ve LS-C-2b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



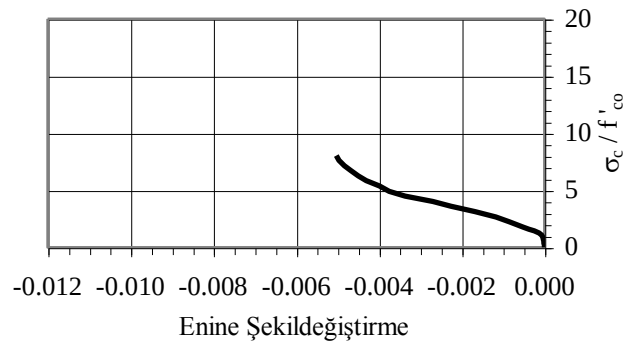
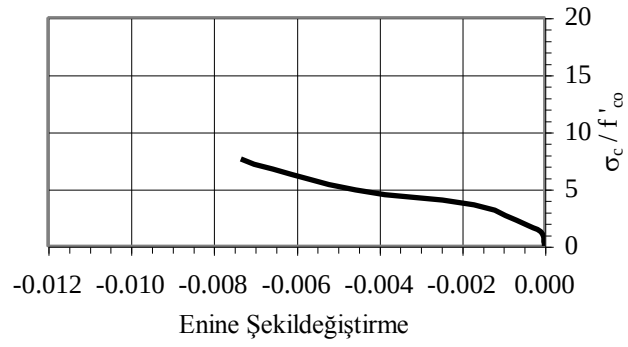
Şekil 5.4.9. LS-C-3a ve LS-C-3b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.4.10. LS-C-4a ve LS-C-4b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.4.11. LS-C-5a ve LS-C-5b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.4.12. LS-C-6a ve LS-C-6b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri

Tablo 5.4.1 4. seri kapsamında denenen numunelere ait bilgiler

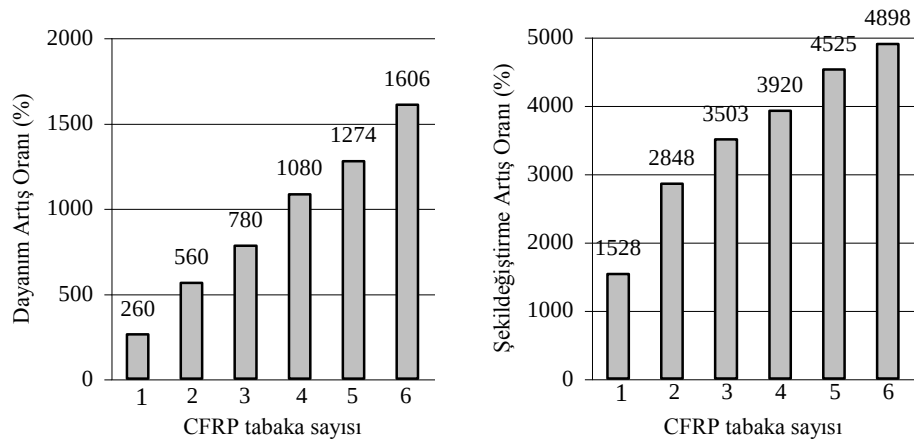
Numune	Orijinal dayanım ¹ f' _{co} , MPa	f' _{cc} MPa	f' _{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{ch}^2	Dayanım Artışı (%)	Şekildeğiştirme Artışı (%)
LS-C-1a	6.20	25.26	25.26	0.0388	0.0388	0.0041*	307	1840
LS-C-1b	6.20	19.43	19.43	0.0263	0.0263	0.0043*	213	1215
LS-C-2a	6.20	41.86	41.86	0.0588	0.0588	0.0115	575	2840
LS-C-2b	6.20	39.97	39.97	0.0591	0.0591	0.0053*	545	2855
LS-C-3a	6.20	52.18	52.18	0.0688	0.0688	0.0064*	742	3340
LS-C-3b	6.20	56.90	56.90	0.0753	0.0753	0.0106	818	3665
LS-C-4a	6.20	76.61	76.61	0.0848	0.0848	0.0061*	1136	4140
LS-C-4b	6.20	69.67	69.67	0.0760	0.0760	0.0101*	1024	3700
LS-C-5a	6.20	87.71	87.71	0.0908	0.0908	0.0048*	1315	4440
LS-C-5b	6.20	82.71	82.71	0.0942	0.0942	0.0032*	1234	4610
LS-C-6a	6.20	108.25	108.25	0.1042	0.1042	0.0073*	1646	5110
LS-C-6b	6.20	103.25	103.25	0.0957	0.0957	0.0050*	1565	4685

¹ : Orijinal durumları denenip güçlendirilen numuneler için, orijinal basınç dayanımını; doğrudan güçlendirilen numuneler için, standart silindir basınç deneyi sonucunda elde edilen değeri gösterir.

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

* : FRP tabaka kopmadan önce şekildeğiştirmeölçer devre dışı kalmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, diğer serilere benzer şekilde her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekildeğiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiği görülür. Sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'şar kat lif takviyeli sargı tabakası ile enine doğrultuda sarılmış numunelerde dayanımda ortalama %260, %560, %780, %1080, %1274 ve %1606'lık, şekildeğiştirme kapasitesinde ise ortalama %1528, %2848, %3503, %3920, %4525 ve %4898 artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve şekildeğiştirme kazanılan artışların grafikleri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.4.13.



Şekil 5.4.13 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve şekildeğiştirme kazanılan ortalama artışların değişimi

5.5. DÜŞÜK DAYANIMLI KARE ENKESİTLİ (5. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

Orijinal dayanımları 6.8 MPa olan 250×250 mm boyutlarında kare enkesitli, 500 mm yüksekliğinde 8 adet numunenin 2 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumunda denenmiş, 2 adedi 1 kat , 2 adedi 3 kat ve 2 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin köşeleri 40 mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır.

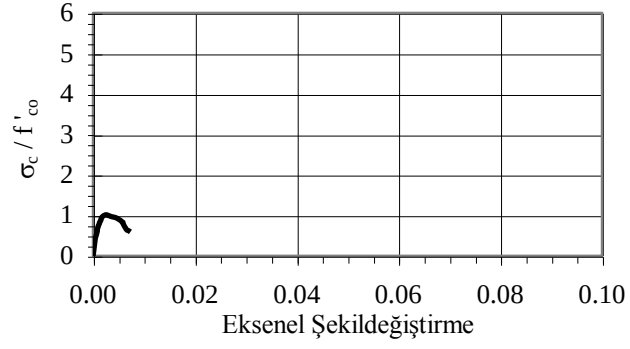
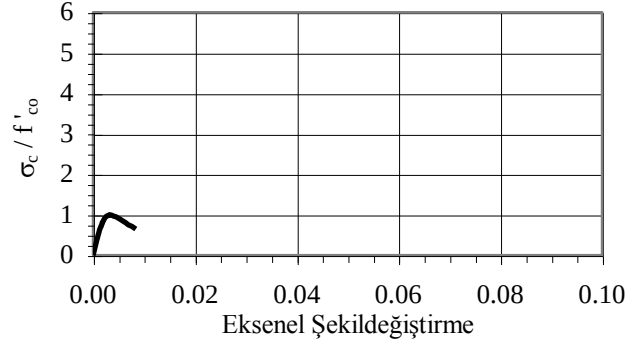
Deneyle sonrasında elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme Şekil 5.5.1'den Şekil 5.5.4'e ve boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.5.5'ten Şekil 5.5.7'ye kadar olan grafiklerde sunulmuştur. Bazı numunelere ait fotoğraflar, deney düzeneğini ve güç tükenmesi durumunu daha anlaşılabilir kılacağı düşüncesiyle EK A'da sunulmuştur.

Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım, boyuna ve enine şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.5.1'de verilmiştir.

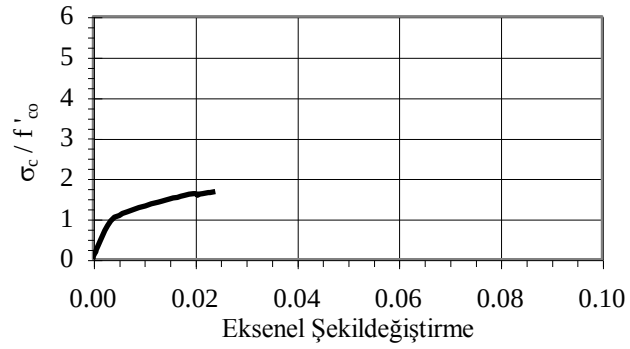
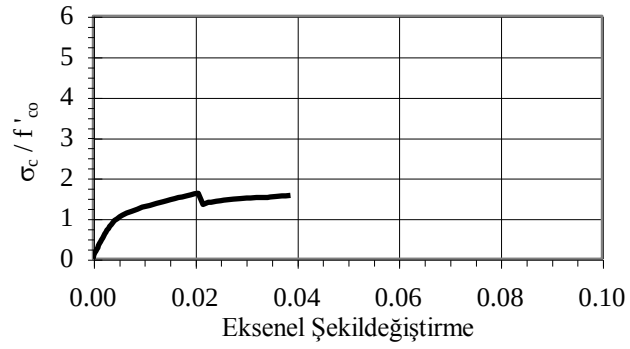
Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.5.8'de verilmiştir.

Şekil 5.5.9'da 5. seri olarak deneye tabi tutulan tüm numunelerin boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.

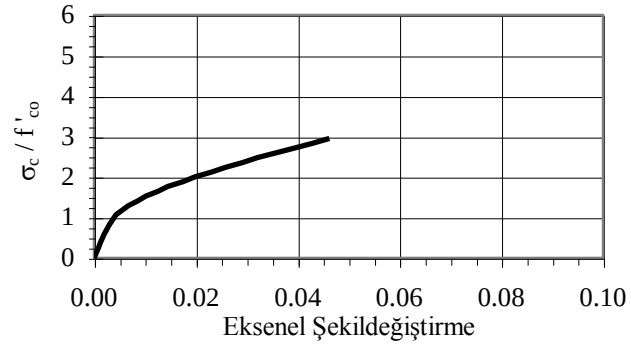
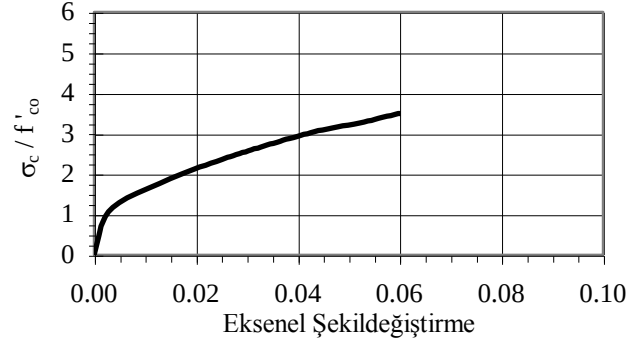
Fotogrametrik yöntem ile elde edilen eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.5.10'da ve eksenel gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri ise Şekil 5.5.11'de sunulmuştur.



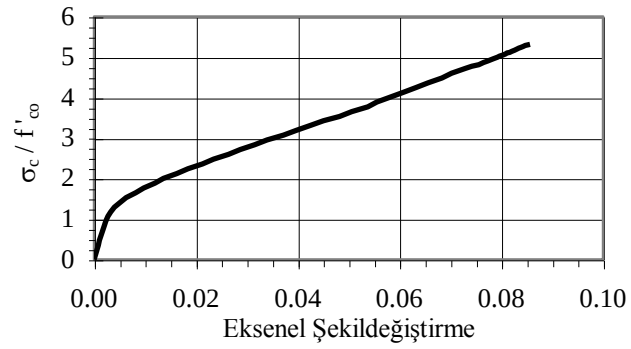
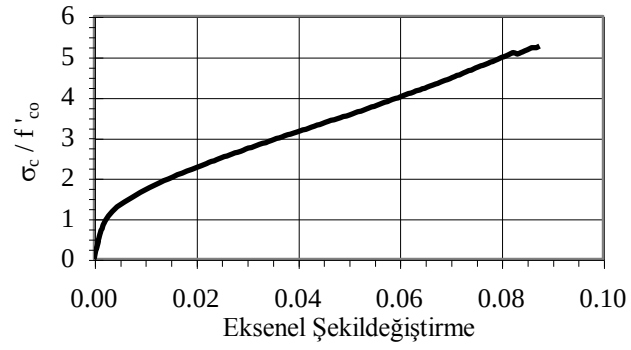
Şekil 5.5.1 LS-R-1-0-40a ve LS-R-1-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



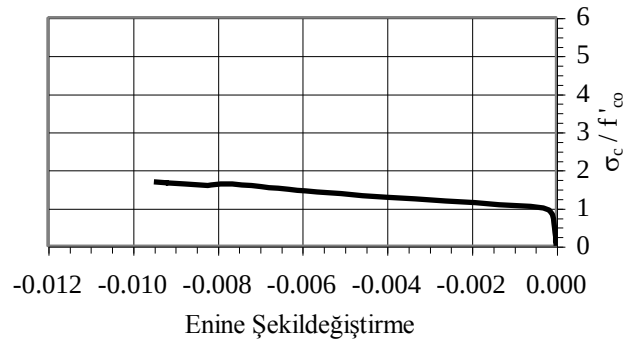
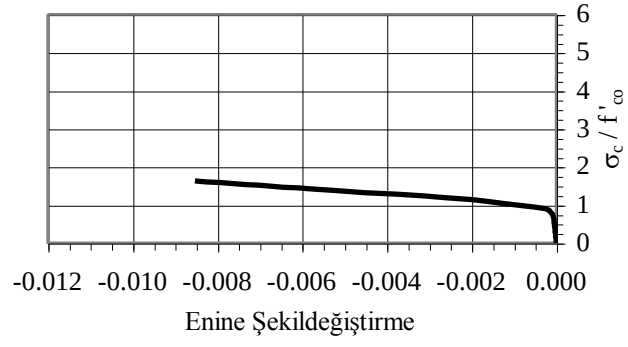
Şekil 5.5.2 LS-R-1-1-40a ve LS-R-1-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



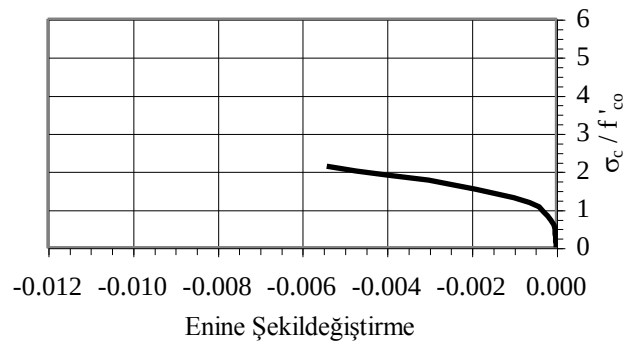
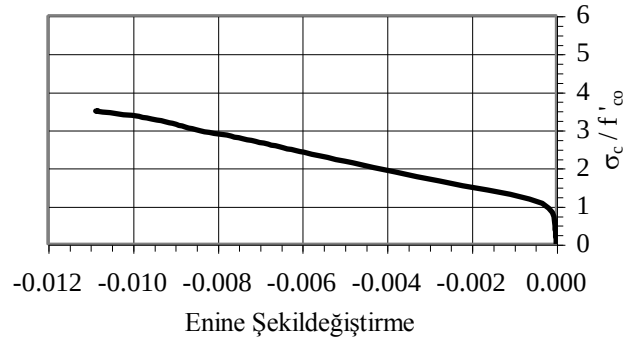
Şekil 5.5.3 LS-R-1-3-40a ve LS-R-1-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



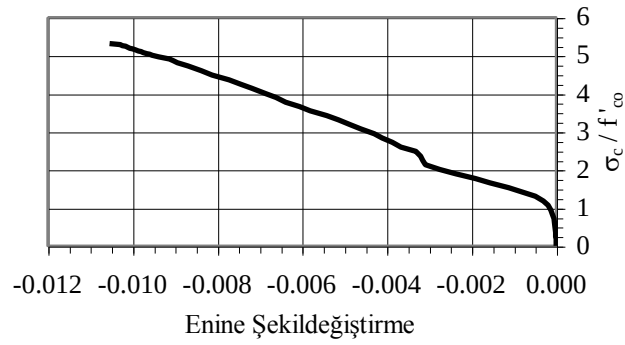
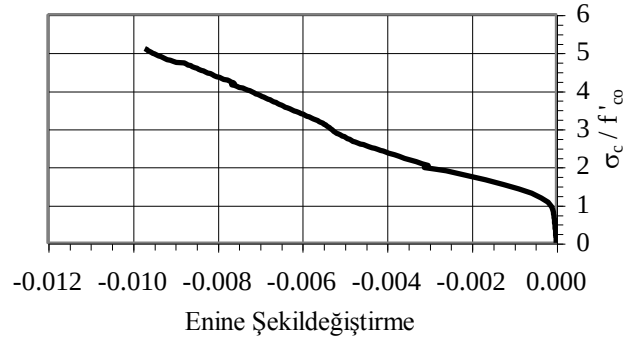
Şekil 5.5.4 LS-R-1-5-40a ve LS-R-1-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.5.5 LS-R-1-1-40a ve LS-R-1-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.5.6 LS-R-1-3-40a ve LS-R-1-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.5.7 LS-R-1-5-40a ve LS-R-1-5-40b gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri

Tablo 5.5.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekil değiştirmeleri (5. seri)

Numune	f'_{co} ¹ MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{ch} ²	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
LS-R-1-0-40a	6.70	0.0032	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-1-0-40b	6.90	0.0024	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-1-1-40a	6.80	0.0028	11.07	10.64	0.0207	0.0388	0.0085*	63	1286
LS-R-1-1-40b	6.80	0.0028	11.39	11.39	0.0240	0.0240	0.0095	68	757
LS-R-1-3-40a	6.80	0.0028	23.75	23.75	0.0603	0.0603	0.0108	248	2054
LS-R-1-3-40b	6.80	0.0028	20.06	20.06	0.0462	0.0462	0.0054*	195	1550
LS-R-1-5-40a	6.80	0.0028	35.79	35.79	0.0875	0.0875	0.0097*	426	3025
LS-R-1-5-40b	6.80	0.0028	36.11	36.11	0.0856	0.0856	0.0105	431	2957

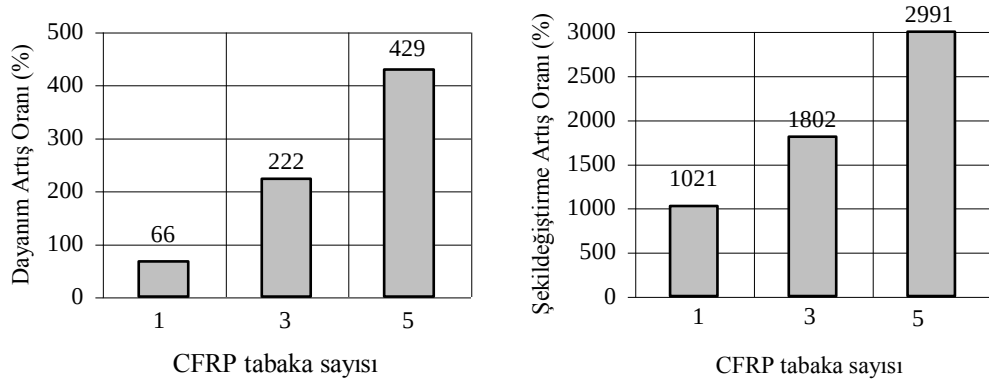
¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımları ortalamasıdır.

² : ϵ_{ch} değerleri, şekil değiştirme ölçerler ile alınabilen en büyük enine şekil değiştirme değerleridir.

* : FRP tabaka kopmadan önce şekil değiştirme ölçer devre dışı kalmıştır.

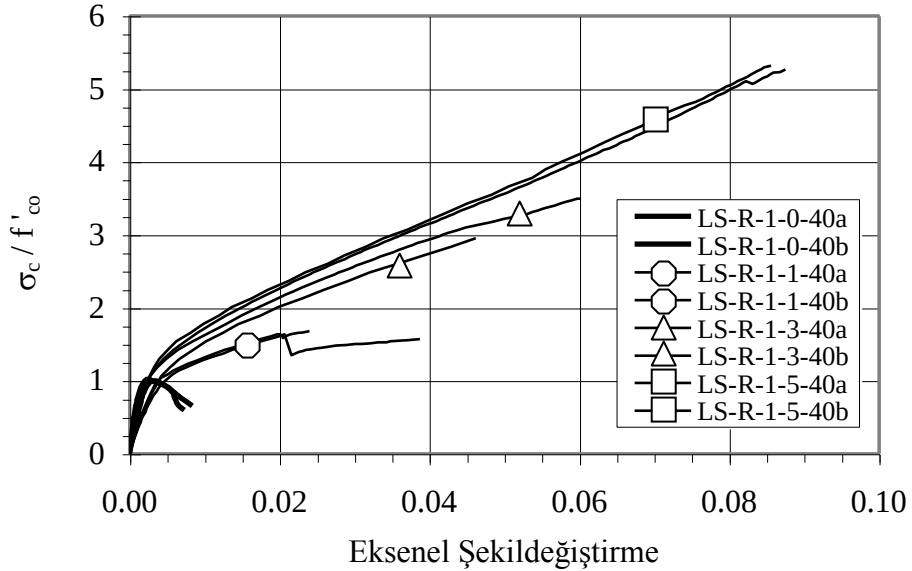
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, öncelikle her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekil değiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 1 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde, dayanımda ortalama %66, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ortalama %1021,

3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %222, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ortalama %1802, 5 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %429, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ise ortalama %2991 bir artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekil değiştirme kazanılan artışların ilişkileri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.5.8.

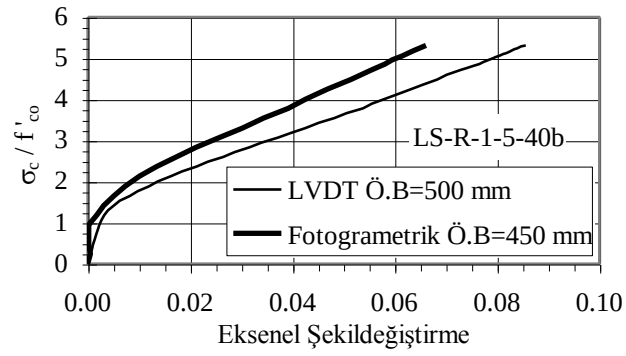
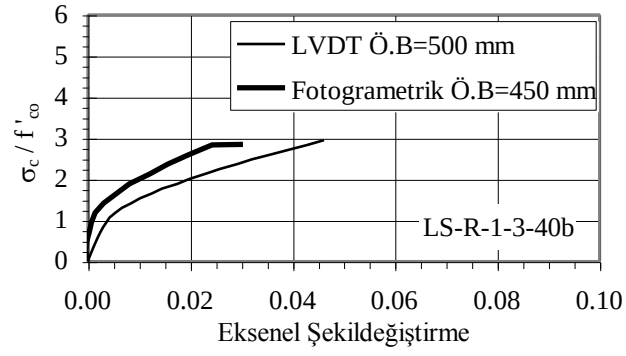
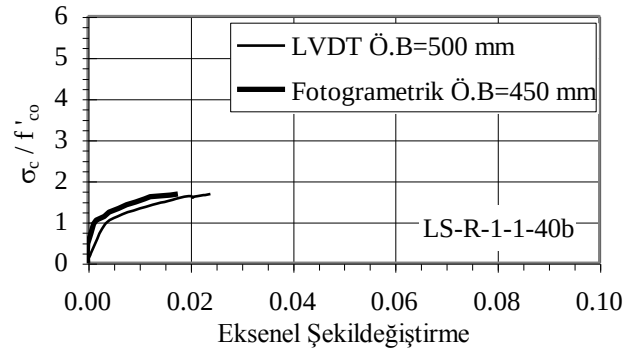
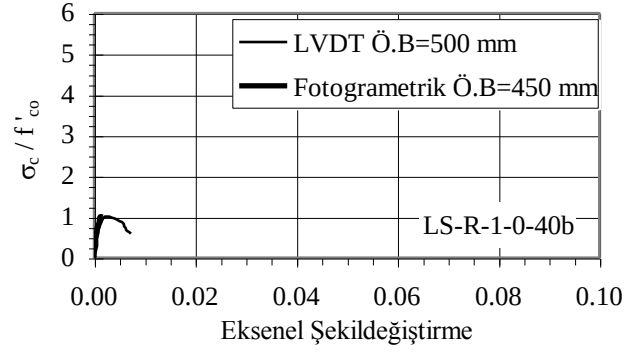


Şekil 5.5.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekil değiştirme kazanılan ortalama artışın değişimi

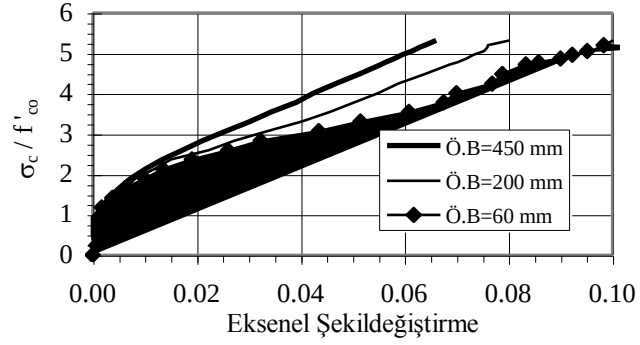
Şekil 5.5.9'da 5. seri olarak deneye tabi tutulan tüm numunelerin boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.



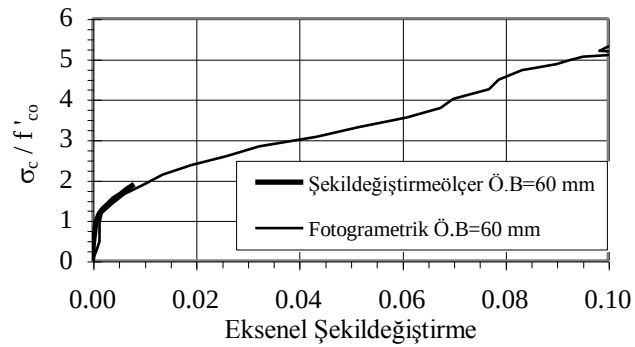
Şekil 5.5.9 5. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri



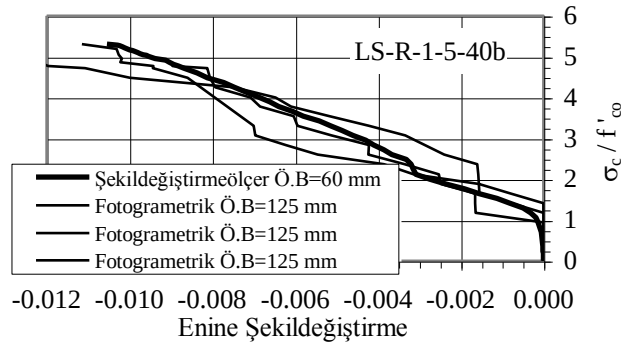
Şekil 5.5.10 LS-R-1-0-40b, LS-R-1-1-40b, LS-R-1-3-40b ve LS-R-1-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.5.11 LS-R-1-5-40b için farklı ölçüm boylarından fotogrametrik yöntemle elde edilen gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.5.12 LS-R-1-5-40b için aynı ölçüm boyundan fotogrametrik yöntem ve şekildeğiştirmeölçerlerle elde edilen gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.5.13 LS-R-1-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri

Şekil 5.5.10'da görüldüğü üzere fotogrametrik yöntem ile elde edilen gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri, yerdeğiştirmeölçerler ile elde edilenlere benzer şekildedir. Şekil 5.5.10'da fotogrametrik ölçüm boyu 450 mm olduğu için, numunenin yükleme tablasına yakın olan alt ve üst bölümlerindeki şekildeğiştirmeler dikkate alınamazken, yerdeğiştirmeölçerler ile (500 mm ölçüm boyu için) söz konusu şekildeğiştirmeler dikkate alınabilmektedir. Dolayısıyla Şekil 5.5.10'da verilen

karşılaştırmalı gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkilerindeki farkın bu nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.5.11’de numune LS-R-1-5-40b için 60, 200 ve 450 mm ölçüm boylarından fotogrametrik yöntemle elde edilen gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri sunulmuştur. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere eksenel şekildeğiştirmelerin numunenin orta kısımlarında daha büyük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca numunenin orta 60 mm’lik ölçüm boylarından fotogrametrik yöntem ve şekildeğiştirmeölçerlerle elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır, Şekil 5.5.12. Ancak şekildeğiştirmeölçerler ile belli bir seviyeye kadar veri alınabilirken, fotogrametrik yöntem ile deney sonuna dek, ileri düzeyde şekildeğiştirmelerde de veri alınabilmekte ve numunenin davranışı hakkında daha çok bilgi elde edilebilmektedir.

Elde edilen bütün bu sonuçlar yöntemle olan güveni arttırmakta ve fotogrametrik ölçüm yönteminin yapı mühendisliği alanında kullanılabilmesi konusunda ümit vermektedir.

5.6. DÜŞÜK DAYANIMLI DİKDÖRTGEN ENKESİTLİ (6. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

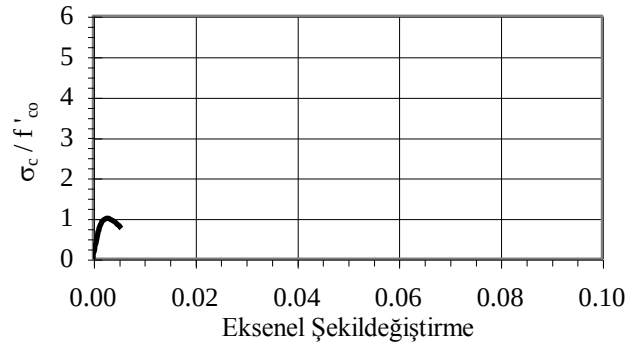
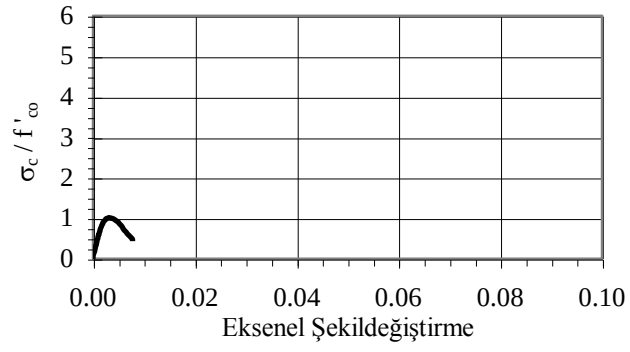
Orijinal dayanımları 7.2 MPa olan 150×300 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli, 500 mm yüksekliğinde 8 adet numunenin 2 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumunda denenmiş, 2 adedi 1 kat , 2 adedi 3 kat ve 2 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin köşeleri 40 mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır.

Deneyler sonrasında elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme Şekil 5.6.1'den Şekil 5.6.4'e ve boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.6.5'ten Şekil 5.6.7'ye kadar olan grafiklerde sunulmuştur.

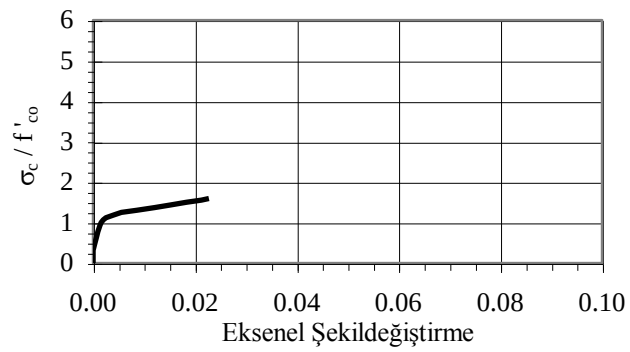
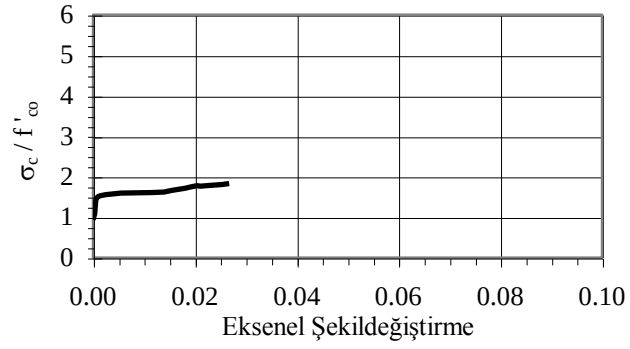
Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım ve şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.6.1'de verilmiştir.

Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.6.8'de verilmiştir.

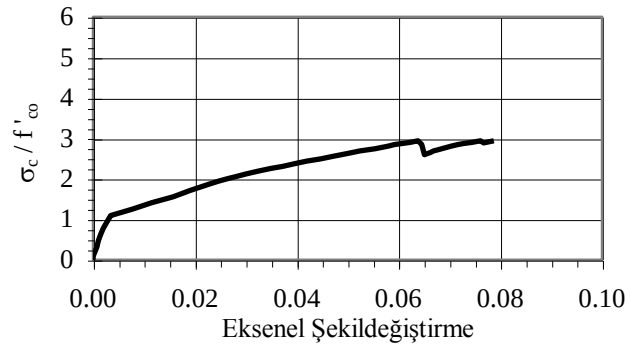
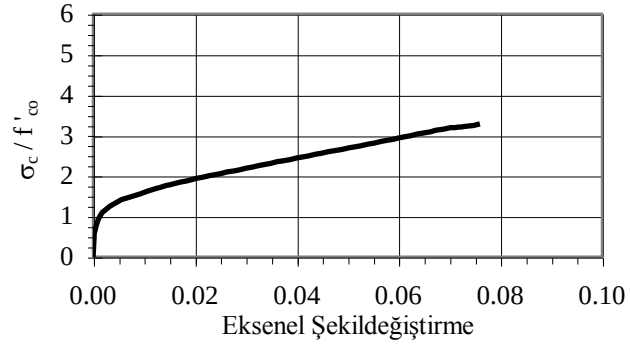
Şekil 5.6.9'da 6. seride denenilen tüm boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.



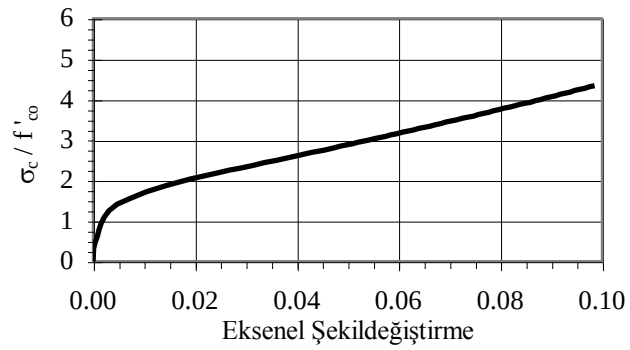
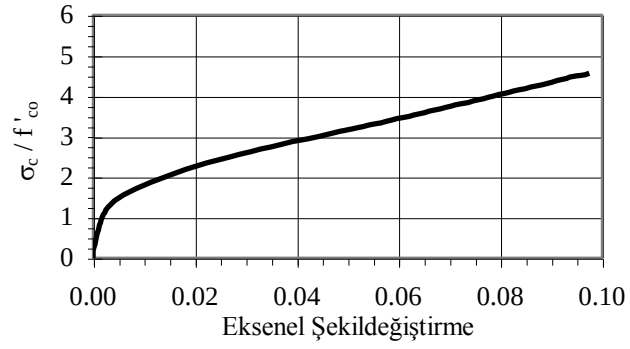
Şekil 5.6.1 LS-R-2-0-40a ve LS-R-2-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



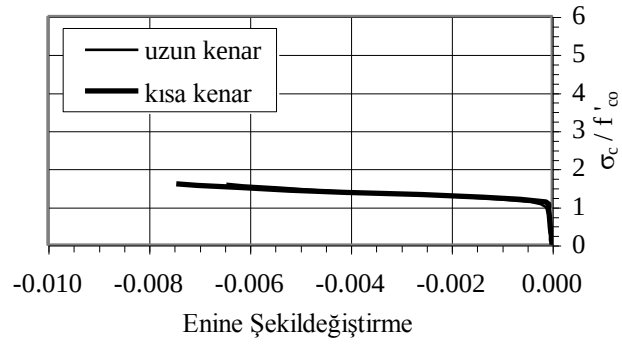
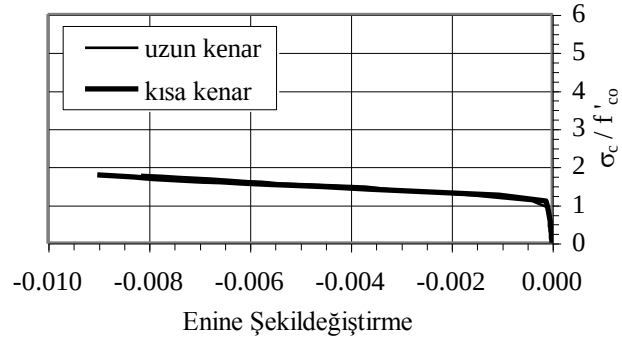
Şekil 5.6.2 LS-R-2-1-40a ve LS-R-2-1-40b gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri



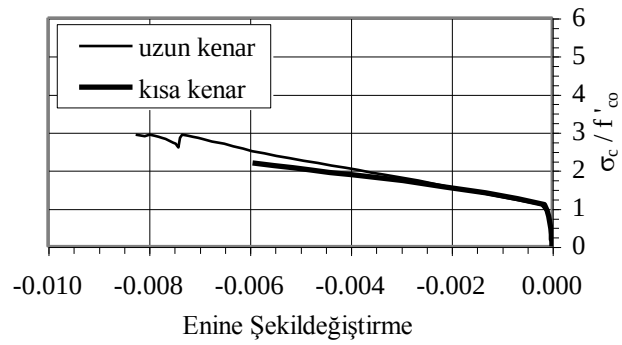
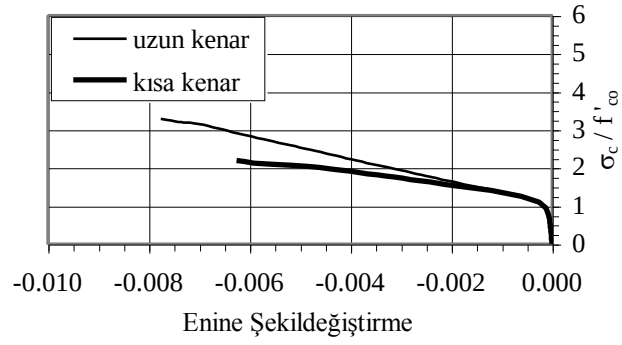
Şekil 5.6.3 LS-R-2-3-40a ve LS-R-2-3-40b gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri



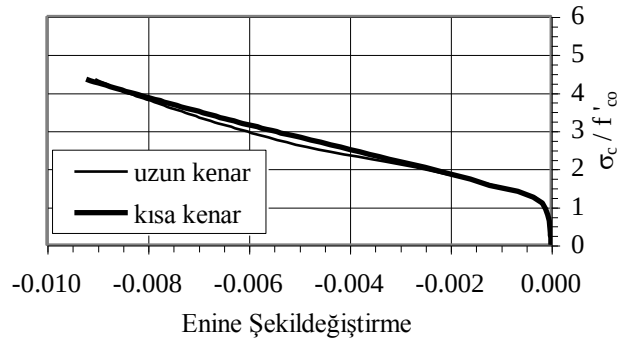
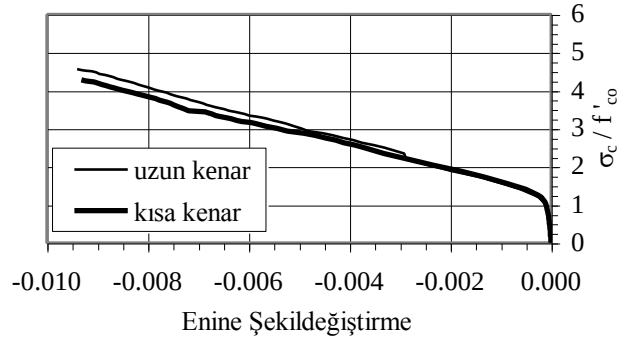
Şekil 5.6.4 LS-R-2-5-40a ve LS-R-2-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.6.5 LS-R-2-1-40a ve LS-R-2-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.6.6 LS-R-2-3-40a ve LS-R-2-3-40b gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri



Şekil 5.6.7 LS-R-2-5-40a ve LS-R-2-5-40b gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri

Tablo 5.6.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekil değiştirmeleri (6. seri)

Numune	f'_{co} ¹ MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{chs} ²	ϵ_{chl} ²	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
LS-R-2-0-40a	7.26	0.0032	-	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-2-0-40b	7.14	0.0024	-	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-2-1-40a	7.20	0.0028	13.16	13.16	0.0317	0.0317	0.0090*	0.0081*	83	1032
LS-R-2-1-40b	7.20	0.0028	11.47	11.47	0.0227	0.0227	0.0075	0.0065	59	711
LS-R-2-3-40a	7.20	0.0028	23.61	23.61	0.0760	0.0760	0.0063*	0.0078	228	2614
LS-R-2-3-40b	7.20	0.0028	21.14	21.14	0.0787	0.0787	0.0059*	0.0083	194	2711
LS-R-2-5-40a	7.20	0.0028	32.83	32.83	0.0975	0.0975	0.0093*	0.0094	356	3382
LS-R-2-5-40b	7.20	0.0028	31.03	31.03	0.0985	0.0985	0.0092	0.0090	331	3418

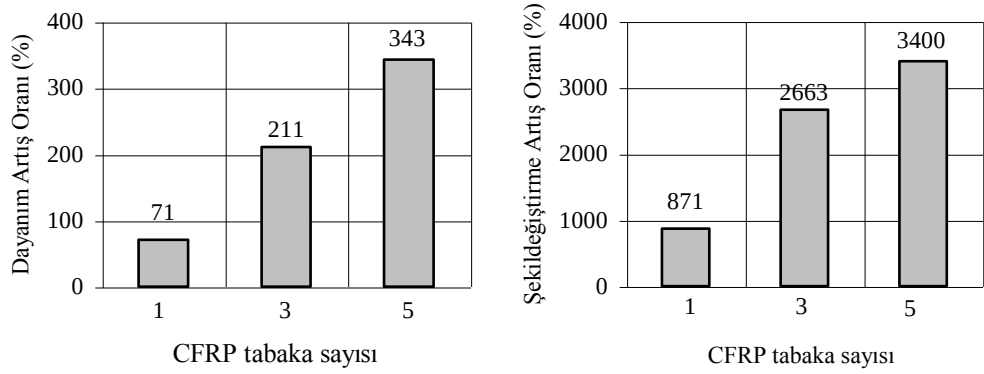
¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımları ortalamasıdır.

² : ϵ_{ch} değerleri, şekil değiştirme ölçerler ile alınabilen en büyük enine şekil değiştirme değerleridir.

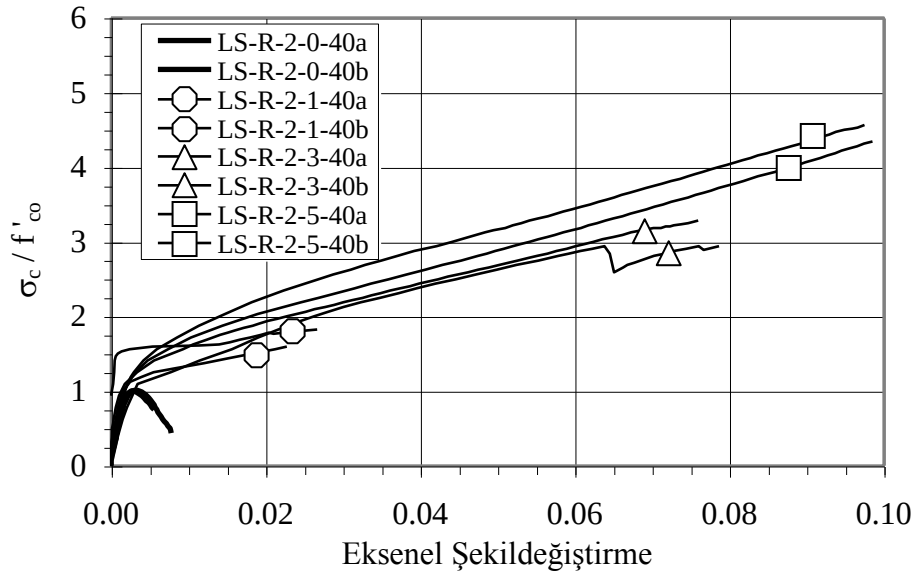
* : FRP tabaka kopmadan önce şekil değiştirme ölçer devre dışı kalmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekil değiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 1 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde, dayanımda ortalama %71,

eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %871, 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %211, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %2663, 5 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %343, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ise ortalama %3400 artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan artışların ilişkileri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.6.8.



Şekil 5.6.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi



Şekil 5.6.9 6. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

5.7. DÜŞÜK DAYANIMLI DİKDÖRTGEN ENKESİTLİ (7. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

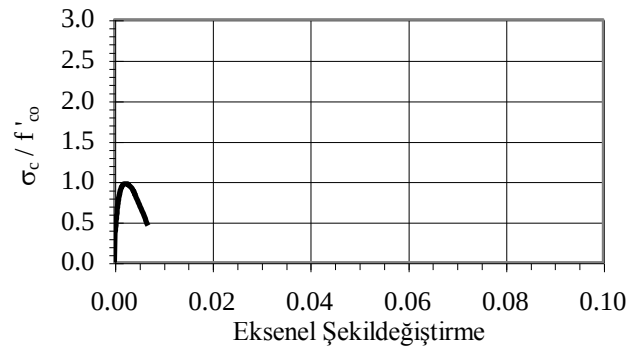
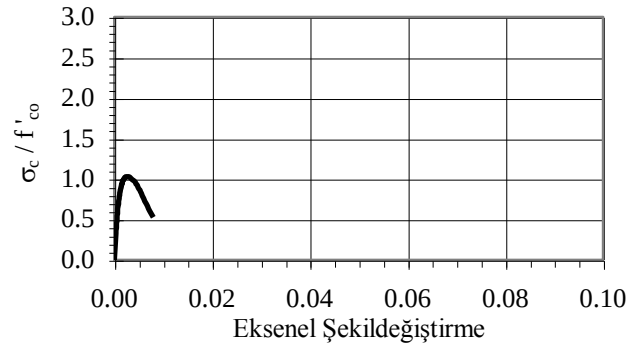
Orijinal dayanımları 9.8 MPa olan 150×450 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli, 500 mm yüksekliğinde 8 adet numunenin 2 adedi güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumunda denenmiş, 2 adedi 1 kat , 2 adedi 3 kat ve 2 adedi de 5 kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerin köşeleri 40 mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır.

Deneyler sonrasında elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme Şekil 5.7.1'den Şekil 5.7.4'e ve boyutsuz gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 5.7.5'ten Şekil 5.7.7'ye kadar olan grafiklerde sunulmuştur.

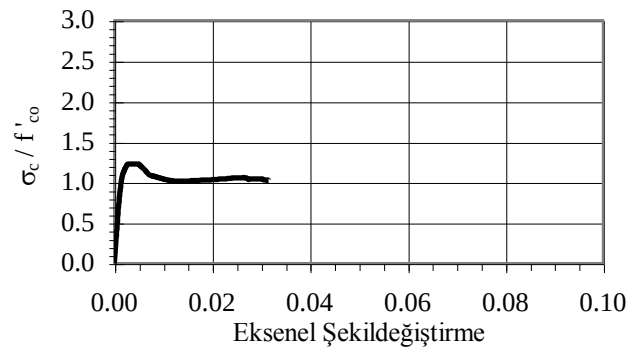
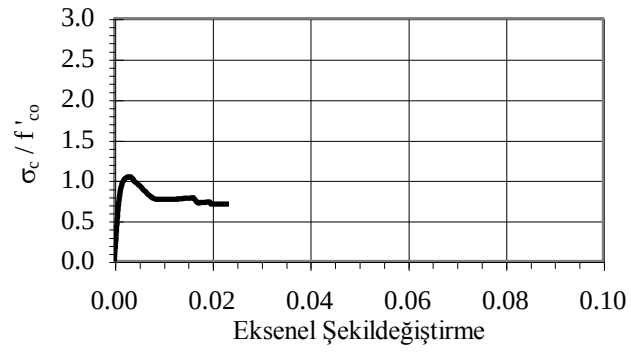
Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım ve şekildeğiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.7.1'de verilmiştir.

Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının CFRP sargı kalınlığı ile değişimi ve şekildeğiştirme özelliğinin CFRP sargı kalınlığı ile değişimi Şekil 5.7.8'de verilmiştir.

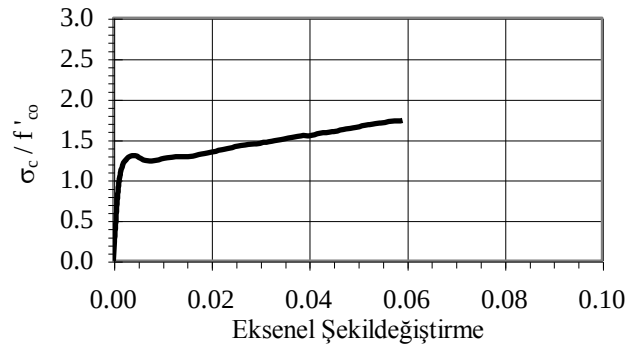
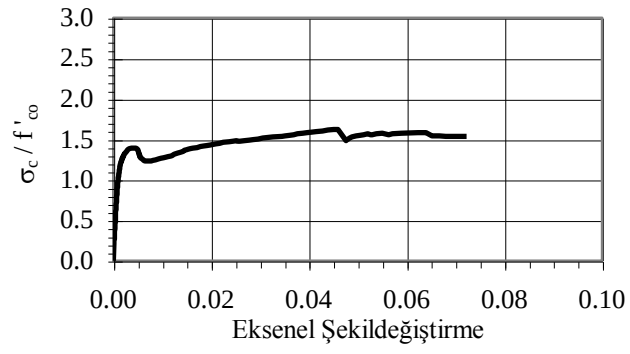
Şekil 5.7.9'da 7. seride denenilen tüm boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.



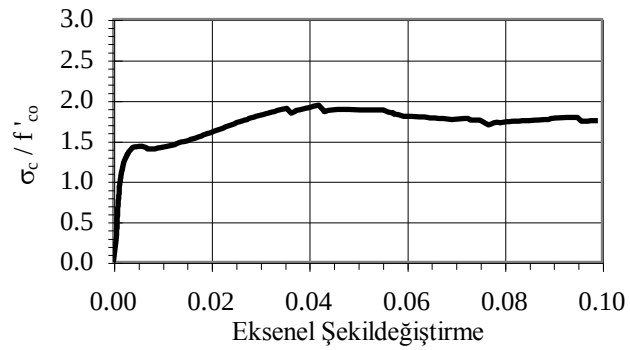
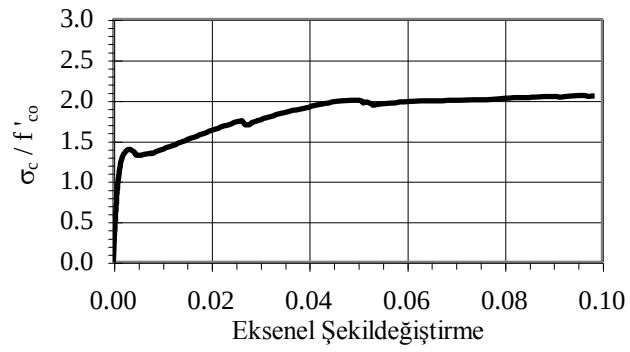
Şekil 5.7.1 LS-R-3-0-40a ve LS-R-3-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



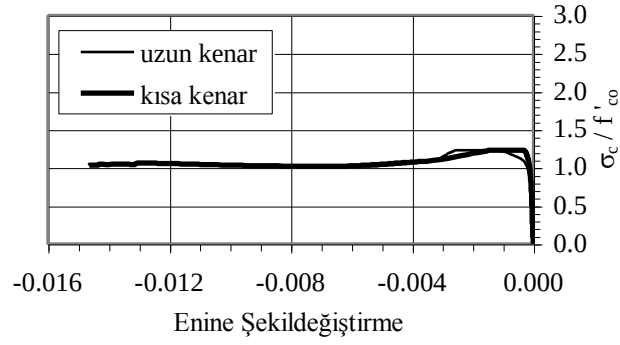
Şekil 5.7.2 LS-R-3-1-40a ve LS-R-3-1-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



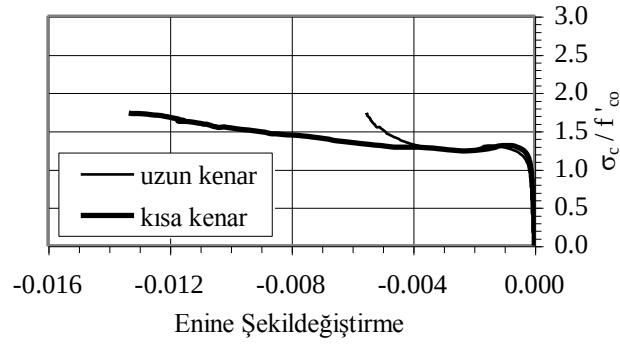
Şekil 5.7.3 LS-R-3-3-40a ve LS-R-3-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



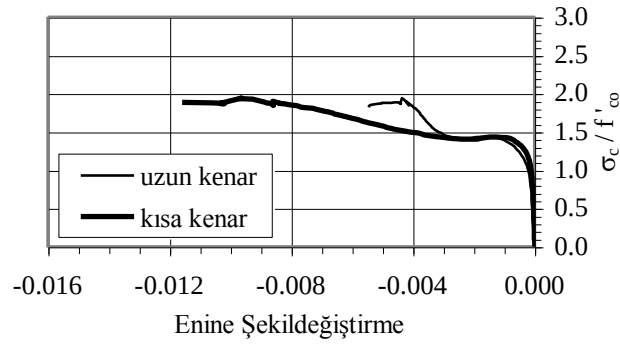
Şekil 5.7.4 LS-R-3-5-40a ve LS-R-3-5-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.7.5 LS-R-3-1-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 5.7.6 LS-R-3-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 5.7.7 LS-R-3-5-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkisi

Elde edilen sonuçlardan, her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekildeğiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 1 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde, dayanımda ortalama %14, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %882,

3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %68, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ortalama %2246, 5 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %99, eksenel şekil değiştirme kapasitesinde ise ortalama %3430 artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekil değiştirme kazanılan artışların ilişkileri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.7.8.

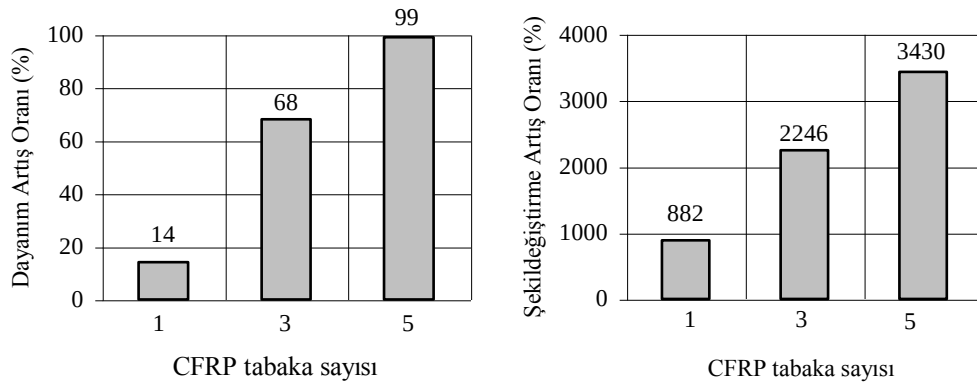
Tablo 5.7.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekil değiştirmeleri (7. seri)

Numune	f'_{co}^1 MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{chs}^2	ϵ_{chl}^2	Dayanım Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
LS-R-3-0-40a	10.07	0.0028	-	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-3-0-40b	9.52	0.0027	-	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-3-1-40a	9.80	0.0028	10.24	6.91	0.0032	0.0235	-	-	4	739
LS-R-3-1-40b	9.80	0.0028	12.02	10.01	0.0048	0.0315	0.0147	0.0059*	23	1025
LS-R-3-3-40a	9.80	0.0028	15.87	15.06	0.0459	0.0722	-	-	62	2479
LS-R-3-3-40b	9.80	0.0028	16.99	16.99	0.0592	0.0592	0.0133	0.0055	73	2014
LS-R-3-5-40a	9.80	0.0028	20.10	20.10	0.0985	0.0985	-	-	105	3418
LS-R-3-5-40b	9.80	0.0028	18.99	17.14	0.0420	0.0992	0.0116*	0.0054*	94	3443

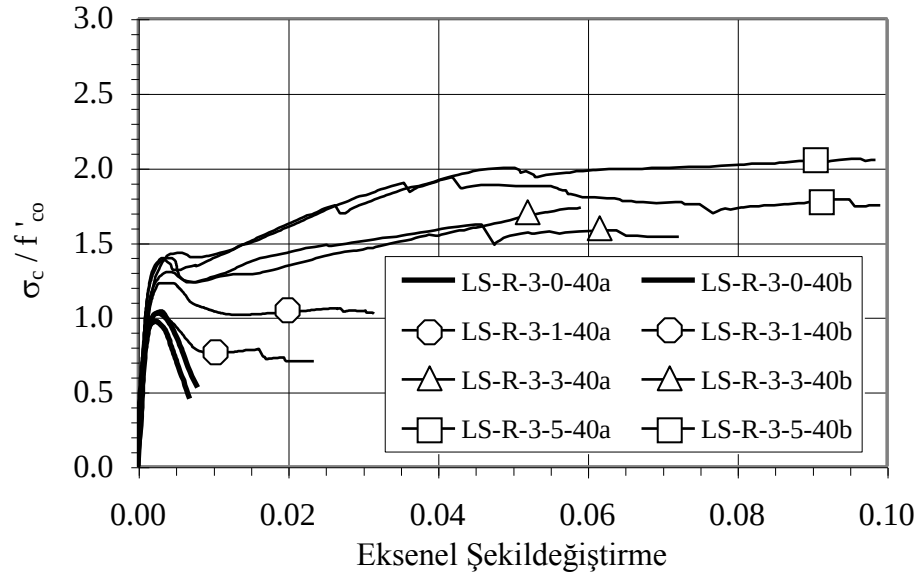
¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımları ortalamasıdır.

² : ϵ_{ch} değerleri, şekil değiştirmeölçerler ile alınabilen en büyük enine şekil değiştirme değerleridir.

* : FRP tabaka kopmadan önce şekil değiştirmeölçer devre dışı kalmıştır.



Şekil 5.7.8 CFRP tabaka sayısı ile dayanım ve eksenel şekil değiştirme kazanılan ortalama artışın değişimi



Şekil 5.7.9 7. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

5.8. DÜŞÜK DAYANIMLI DİKDÖRTGEN ENKESİTLİ (8. SERİ) NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

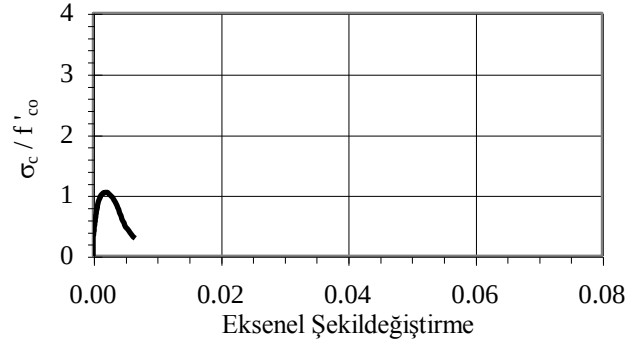
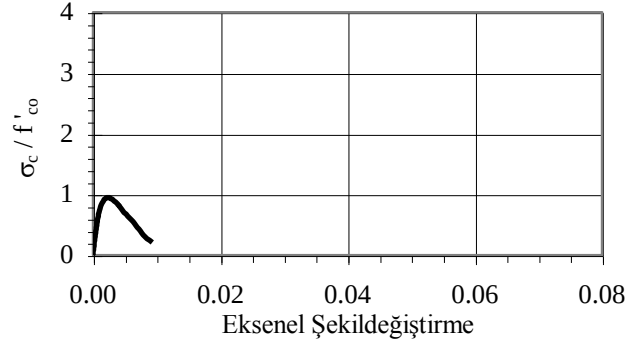
Orijinal dayanımları 9.8 MPa olan 150×225 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli, 500 mm yüksekliğinde 8 adet numunenin 2 adedi, güçlendirilen numunelerle karşılaştırma amacı ile orijinal durumunda denenmiş, kalan 6 adedi ise 3'er kat CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Güçlendirilen numunelerden 2 adedi köşeleri 10 mm, 2 adedi köşeleri 20 mm, 2 adedi ise köşeleri 40mm yarıçapında çeyrek daire formuna gelecek şekilde yuvarlatılmıştır. Bu şekilde köşe yuvarlatılmasının davranışa etkisi incelenmek istenmiştir.

Deneyle sonrasında elde edilen boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.8.1'den Şekil 5.8.4'e ve boyutsuz gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5.8.5'ten Şekil 5.8.7'ye kadar olan grafiklerde sunulmuştur.

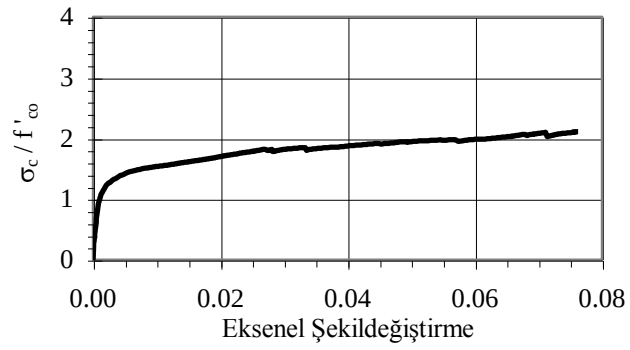
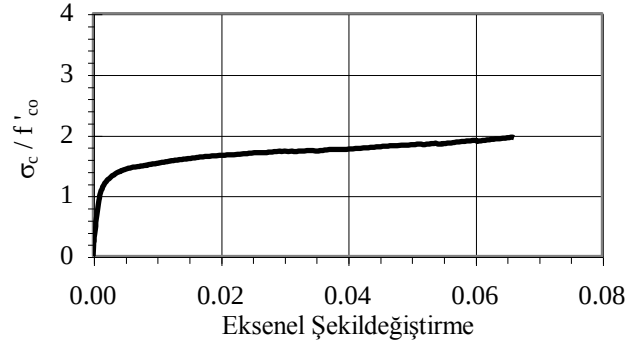
Güçlendirilmiş numunelerin orijinal durumlarıyla dayanım ve şekil değiştirme özellikleri bakımından karşılaştırılması yapılmış ve bu karşılaştırma Tablo 5.8.1'de verilmiştir.

Güçlendirme sonrası numunelerin ortalama dayanım artışının köşe yarıçapı ile değişimi ve şekil değiştirme özelliğinin köşe yarıçapı ile değişimi Şekil 5.8.8'de verilmiştir.

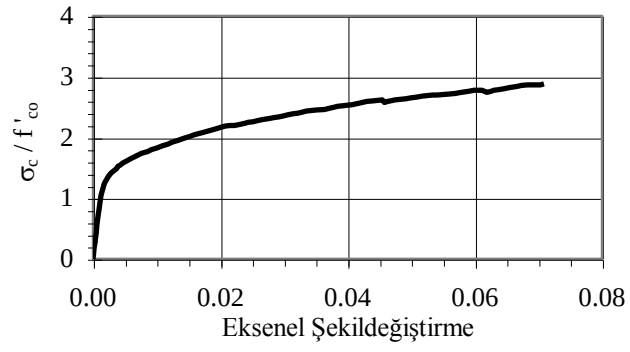
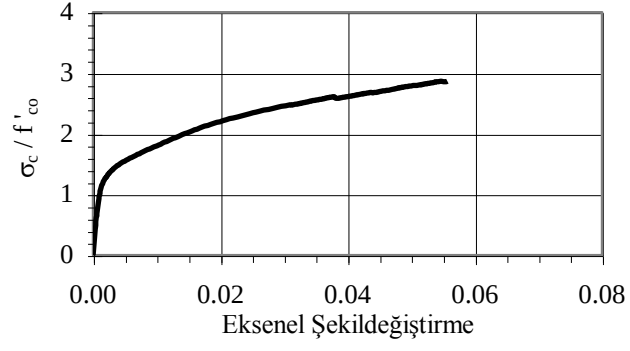
Şekil 5.8.9'da 8. seride denenilen tüm boyutsuz gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkileri aynı grafikte verilmiştir.



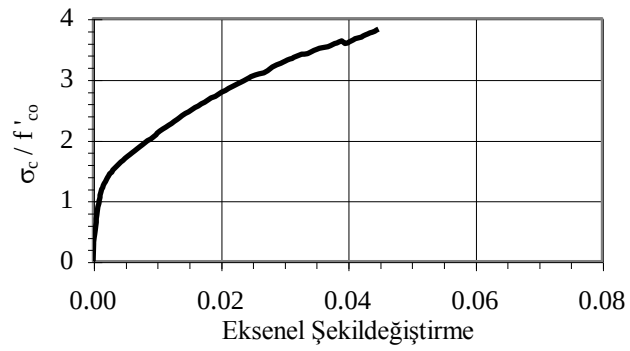
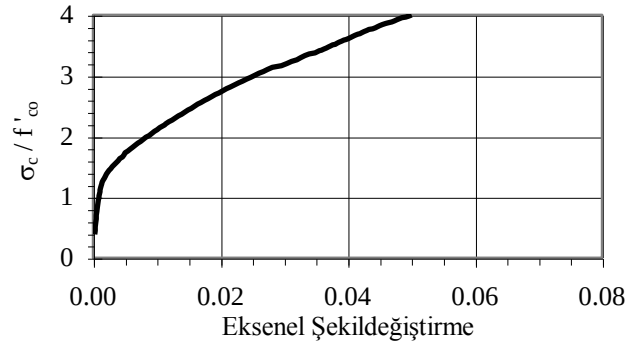
Şekil 5.8.1 LS-R-1.5-0-40a ve LS-R-1.5-0-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



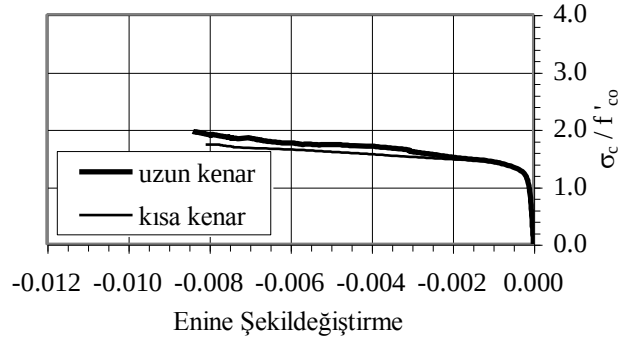
Şekil 5.8.2 LS-R-1.5-3-10a ve LS-R-1.5-3-10b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



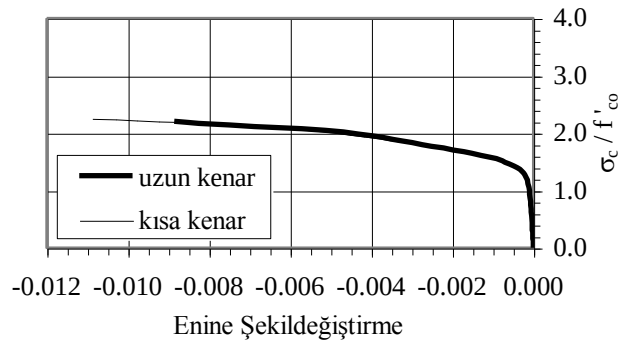
Şekil 5.8.3 LS-R-1.5-3-20a ve LS-R-1.5-3-20b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



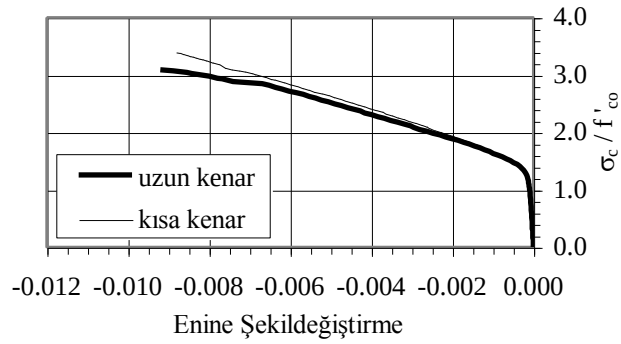
Şekil 5.8.4 LS-R-1.5-3-40a ve LS-R-1.5-3-40b gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.8.5 LS-R-1.5-3-10a gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.8.6 LS-R-1.5-3-20b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri



Şekil 5.8.7 LS-R-1.5-3-40b gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri

Elde edilen sonuçlardan, her numunenin kendine özdeş olan numuneye hem dayanım hem de şekildeğiştirme açısından oldukça yakın sonuçlar verdiğini görülmektedir. Köşeleri 10 mm yarıçapında yuvarlatılmış ve 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde, dayanımda ortalama %104, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %2744, köşeleri 20 mm yarıçapında yuvarlatılmış ve 3 kat CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %187, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ortalama %2492,

köşeleri 40 mm yarıçapında yuvarlatılmış ve 3 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş numunelerde dayanımda ortalama %291, eksenel şekildeğiştirme kapasitesinde ise ortalama %1798 artış sağlanmıştır. Yukarıda verilen sayısal değerler kullanılarak, Köşe yarıçapı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan artışların ilişkileri aşağıda sunulmuştur, Şekil 5.8.8.

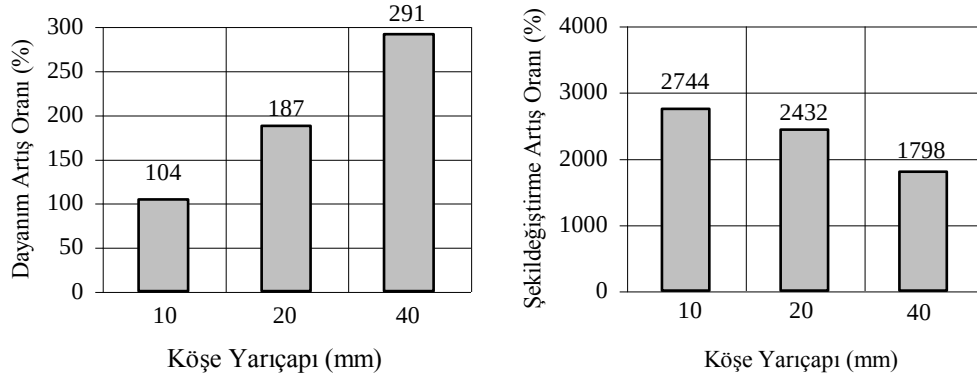
Tablo 5.8.1 Orijinal ve güçlendirilmiş numunelerin dayanım ve şekildeğiştirmeleri (8. seri)

Numune	f'_{co}^1 MPa	ϵ_{co}	f'_{cc} MPa	f'_{cu} MPa	ϵ_{cc}	ϵ_{cu}	ϵ_{chs}^2	ϵ_{chl}^2	Dayanı m Artışı (%)	Şekild. Artışı (%)
LS-R-1.5-0-40a	9.01	0.0025	-	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-1.5-0-40b	9.93	0.0024	-	-	-	-	-	-	-	-
LS-R-1.5-3-10a	9.47	0.0025	18.56	18.56	0.0659	0.0659	-	-	96	2536
LS-R-1.5-3-10b	9.47	0.0025	19.99	19.99	0.0763	0.0763	0.0081*	0.0084	111	2952
LS-R-1.5-3-20a	9.47	0.0025	27.10	27.10	0.0557	0.0557	-	-	186	2128
LS-R-1.5-3-20b	9.47	0.0025	27.31	27.31	0.0709	0.0709	0.0109*	0.0089*	188	2736
LS-R-1.5-3-40a	9.47	0.0025	37.88	37.88	0.0500	0.0500	-	-	300	1900
LS-R-1.5-3-40b	9.47	0.0025	36.21	36.21	0.0449	0.0449	0.0088*	0.0092*	282	1696

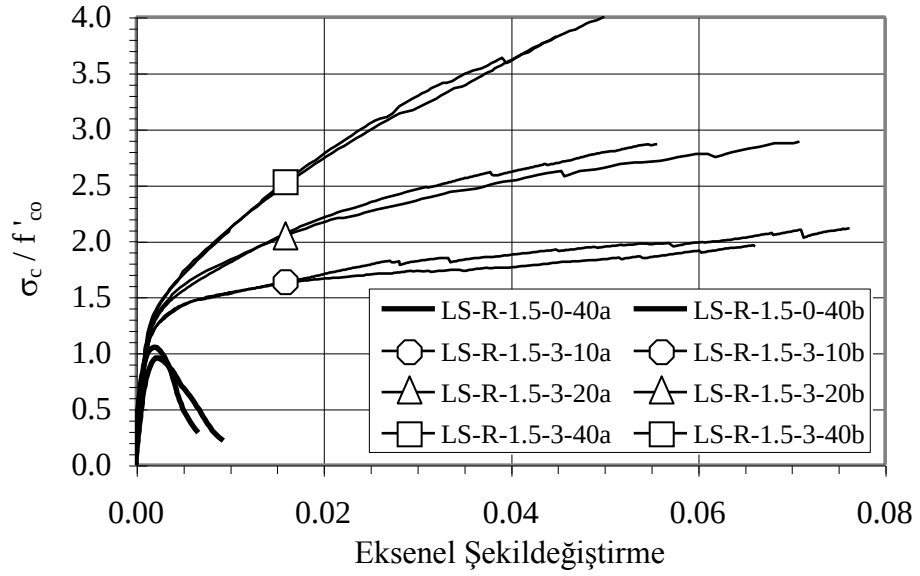
¹ : f'_{co} , orijinal durumdaki numuneler için basınç dayanımları, güçlendirilmiş numuneler için orijinal numune basınç dayanımları ortalamasıdır.

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

* : FRP tabaka kopmadan önce şekildeğiştirmeölçer devre dışı kalmıştır.



Şekil 5.8.8 Köşe yarıçapı ile dayanım ve eksenel şekildeğiştirmede kazanılan ortalama artışın değişimi



Şekil 5.8.9 8. seri numunelere ait boyutsuz gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkileri

Bu seri deneylerinden de görüldüğü üzere, köşe yuvarlatılması miktarı, davranış üzerinde oldukça etkilidir. Köşelerin daha fazla yuvarlatılması ile daha büyük dayanım artışı görülmesine rağmen, aynı olumlu etki şekildeğiştirme için gözlenmemiştir. Köşeleri daha fazla yuvarlatılan numuneler, daha az yuvarlatılanlara göre daha az şekildeğiştirme yapmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, CFRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılmış, eksenel yükler etkisindeki düşük ve normal dayanımlı beton elemanların davranışı incelenmiştir. Bu doğrultuda güvenilir deney sonuçlarına ulaşabilmek amacı ile aynı özellikte özdeş numuneler üretilmiş ve test edilmiş, bunun yanı sıra çok sayıda ölçüm aleti (yerdeğiştirmeölçerler ve şekildeğiştirmeölçerler) kullanılmıştır. Aynı ölçüm boyundan tek bir ölçüm aleti ile veri toplanmamış, en az iki veya dört adet ölçüm aletinden alınan verilerin ortalamaları kullanılmıştır. Özdeş numunelerin birbirine yakın davranış göstermesi, numune imalatından deney sonuna dek yapılan bütün işlemlerin gerekli hassasiyet ve özenle yapıldığının göstergesidir. Yapılan deneyler sonunda elde edilen bilgilerden çıkartılan önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Özdeş numunelerin davranışları birbirlerine oldukça yakındır. Deneyler esnasında veri toplamada kullanılan şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçerler benzer sonuçlar vermiştir. Bu, tasarlanan ölçüm ve yükleme düzeneklerinin iyi çalıştığının ve numune imalatının minimum kusurla gerçekleştirildiğinin bir kanıtıdır.
- CFRP tabaka sargı kalınlığı, gerek düşük gerekse normal dayanımlı beton elemanların davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Sargı tabaka kalınlığının artması numunelerin dayanım ve şekildeğiştirebilme yeteneğini arttırmaktadır. Bu etki beton basınç dayanımı göreceli düşük elemanlarda çok daha belirgindir, Tablo 6.1.
- Orijinal durumla karşılaştırıldığında güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma kapasitelerinde çok büyük artış sağlandığı görülmektedir. Enerji yutma kapasitesinde elde edilen bu artış dayanım ve şekildeğiştirme yeteneğinde sağlanan artışın bir sonucudur.
- Elemanın enkesit şekli davranışa önemli ölçüde etkili olmaktadır. CFRP tabakalar ile elde edilen yanal sargı basıncının daire enkesitli numunelerde üniform olduğu için, daire enkesitli numuneler, kare ve dikdörtgen enkesitli numunelere oranla daha iyi davranış göstermişlerdir, Tablo 6.1.

Tablo 6.1. Beton basınç dayanımına ve enkesit şekline göre numunelerin kazandıkları ortalama dayanım ve şekildeğiştirme değerleri

Dayanım	Enkesit	1 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş		3 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş		5 kat CFRP tabaka ile güçlendirilmiş	
		Ortalama Dayanım Artışı (%)	Ortalama Ş. değiştirme Artışı (%)	Ortalama Dayanım Artışı (%)	Ortalama Ş. değiştirme Artışı (%)	Ortalama Dayanım Artışı (%)	Ortalama Ş. değiştirme Artışı (%)
Normal	Daire	84	576	207	1402	280	2063
	Kare	0	173	25	512	68	790
	Dikdörtgen (h/b=2)	9	217	16	548	48	991
Düşük	Daire	260	1528	780	3503	1274	4525
	Kare	66	1021	222	1802	429	2991
	Dikdörtgen (h/b=1.5)	-	-	191	1798	-	-
	Dikdörtgen (h/b=2)	71	871	211	2663	343	3400
	Dikdörtgen (h/b=3)	14	882	68	2246	99	3430

Bu tablodaki veriler değerlendirilirken, düşük dayanımlı numunelerden daire, kare ve dikdörtgen enkesitli (h/b=2) numunelerin sarılmamış beton basınç dayanımlarının, dikdörtgen enkesitli (h/b=1.5 ve h/b=3) numunelerin sarılmamış beton basınç dayanımlarından daha düşük olduğu dikkate alınmalıdır.

- CFRP tabaka ile enine doğrultuda sarılmış beton elemanların eksenel rijitliklerinde artış yönünde herhangi eğilim gözlenmemiştir.

Normal dayanımlı daire enkesitli (1. seri) numunelerin deneylerinden sonra elde edilen ek sonuçlar şunlardır:

- Monoton artan ve tekrarlı yükler altında denenmiş numuneler birbirine yakın davranış sergilemişlerdir. Buna göre yükleme şeklinin elemanın davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılabılır.

- Orijinal durumda denenmiş, önemli oranda hasar gördükten sonra onarılmış ve güçlendirilmiş numunelerle, doğrudan güçlendirilmiş numunelerin benzer davranış gösterdikleri görülmüştür. Buna göre ön hasar bulunan elemanların onarım sonrası bu çalışmada incelenen teknik kullanılarak güçlendirilmesi durumunda, süneklik ve dayanım özelliklerinin önemli oranda gelişeceği düşünülebilir.

- Düşük dayanımlı dikdörtgen enkesitli (8. seri) numunelerin köşeleri farklı yarıçaplarda yuvarlatılmış ve aynı kalınlıkta CFRP tabaka ile sarılarak güçlendirilmiştir. Bu seri numunelerinin deneyleri sonucunda, köşe yuvarlatılma miktarının davranışta çok etkili olduğu gözlenmiştir. Köşelerin daha fazla yuvarlatılması ile daha büyük dayanım artışı görülmesine rağmen, aynı olumlu etki eksenel şekildeğiştirme için gözlenmemiştir. Köşeleri daha fazla yuvarlatılan numuneler, daha az yuvarlatılanlara göre daha az eksenel şekildeğiştirme yapmıştır.

- Bu çalışmada denenen fotogrametrik ölçüm yönteminin, şekildeğiştirmeölçerler ile yapılan ölçümlere oranla daha ekonomik olması (şekildeğiştirmeölçerlerin pahalı olması dolayısıyla), enstrümantasyonunun kolay ve hızlı yapılabilmesi (şekildeğiştirmeölçerler için yüzey hazırlığı ve yapıştırma işlemleri oldukça zaman almaktadır), ileri düzeyde şekildeğiştirmelerde dahi veri alınabilmesi (şekildeğiştirmeölçerler deney esnasında çoğu zaman devre dışı kalmaktadır) ve fotogrametrik ölçüm yöntemiyle elde edilen sonuçların, yerdeğiştirmeölçer ve şekildeğiştirmeölçerler ile elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde uyumlu olması, yöntemin yapı mühendisliği alanında kullanılabilmesi konusunda ümit vermektedir.

Bu çalışmada ulaşılan sonuçların, denenen numunelerin karakteristik özelliklerinin değiştiği aralıklarda geçerli olduğu, daha genel sonuçların verilebilmesi için farklı özelliklerde daha çok numunenin denenmesi ve analitik çalışmaların yapılması gerektiği açıktır.

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] 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.
- [12] Ilki, A. and Kumbasar, N., "Compressive Behaviour of Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 13, No. 1, 75-90, 2002.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Concrete Society Technical Report 55, "Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials", 2000.
- [16] Lam, L. and Teng, J. G., "Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-confined Concrete", Construction and Building Materials, Vol. 17, 471-489, 2003.

EK A

Normal Dayanımlı Daire Enkesitli (1. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



NS-C-1b



NS-C-1c

Normal Dayanımlı Kare Enkesitli (2. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



NS-R-1-0-40a



NS-R-1-1-40a



NS-R-1-1-40b



NS-R-1-3-40a



NS-R-1-5-40a



NS-R-1-3-40a

Normal Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (3. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



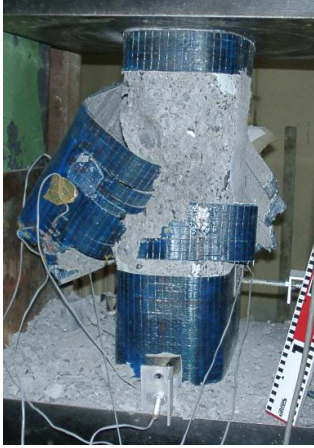
NS-R-2-0-40a



NS-R-2-1-40a



NS-R-2-1-40b



NS-R-2-3-40a



NS-R-2-3-40b



NS-R-2-5-40a



NS-R-2-5-40a



NS-R-2-5-40b



NS-R-2-5-40b

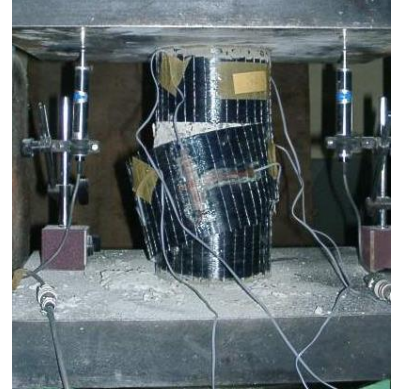
Düşük Dayanımlı Daire Enkesitli (4. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



LS-C-1a, deney öncesi



LS-C-1a, deney sonrası



LS-C-1b



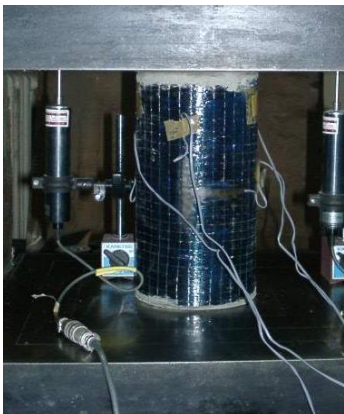
LS-C-2a, deney öncesi



LS-C-2a, deney sonrası



LS-C-2b



LS-C-3a, deney öncesi



LS-C-3a, deney sonrası



LS-C-3b



LS-C-4a



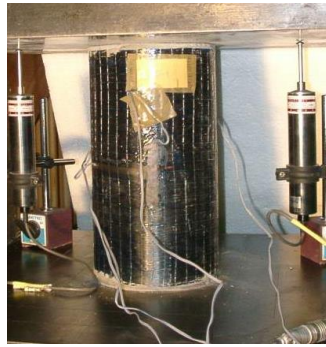
LS-C-4b



LS-C-5a



LS-C-5a



LS-C-6a, deney öncesi



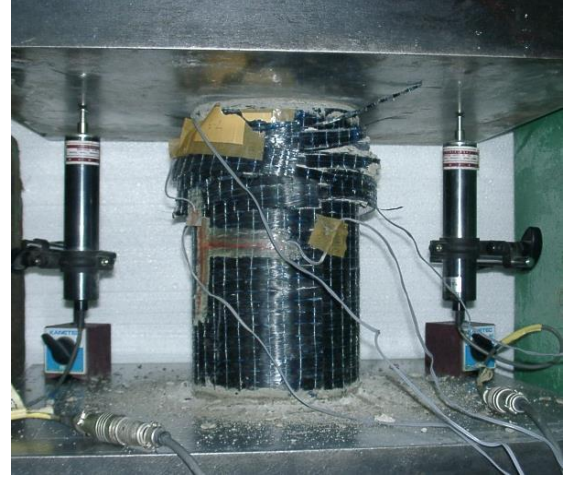
LS-C-6a deney esnasında



LS-C-6a'nın deney esnasında çekilmiş fotoğrafları



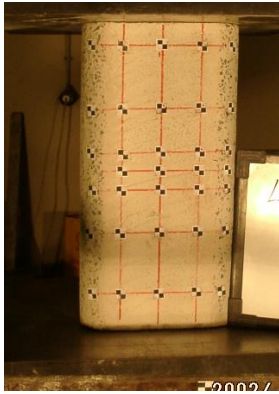
LS-C-6a, deney sonrası



LS-C-6a, deney sonrası; LS-C-6b, deney öncesi

LS-C-6b, deney sonrası

Düşük Dayanımlı Kare Enkesitli (5. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



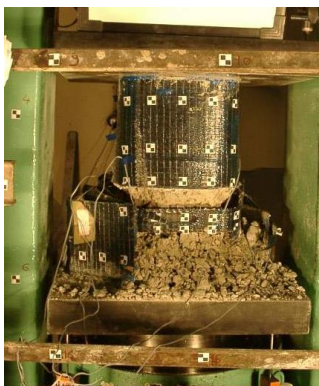
LS-R-1-0-40b



LS-R-1-1-40a



LS-R-1-3-40a



LS-R-1-3-40b



LS-R-1-5-40b



LS-R-1-5-40b

Düşük Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (6. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



LS-R-2-0-40a



LS-R-2-1-40a



LS-R-2-1-40



LS-R-2-3-40a



LS-R-2-5-40a

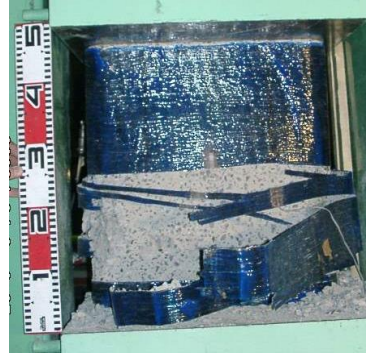


LS-R-2-5-40b

Düşük Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (7. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



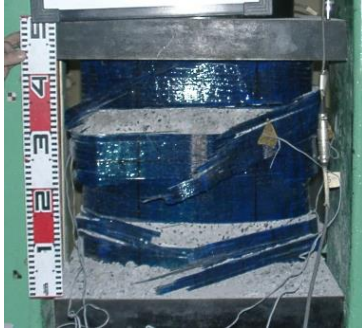
LS-R-3-0-40b



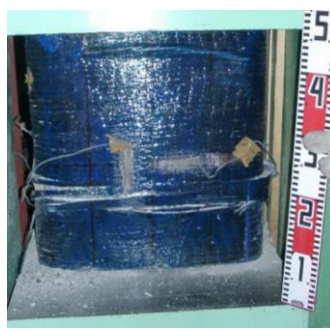
LS-R-3-1-40a



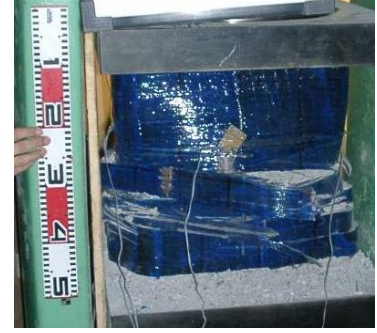
LS-R-3-1-40b



LS-R-3-3-40a



LS-R-3-3-40b



LS-R-3-5-40a



LS-R-3-5-40a, deney sonrası LS-R-3-5-40a, deney sonrası;LS-R-3-5-40b deney önc.

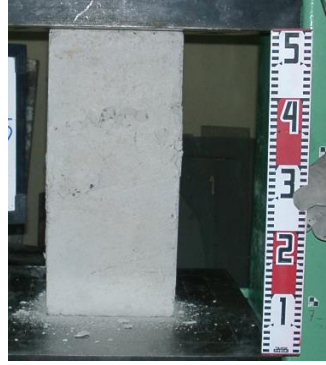


LS-R-3-5-40b'nin deney sonrası fotoğrafları

Düşük Dayanımlı Dikdörtgen Enkesitli (8. Seri) Numunelere Ait Fotoğraflar



LS-R-1.5-0-40a



LS-R-1.5-0-40b



LS-R-1.5-3-10a'nın deney sonrası görünümü

LS-R-1.5-3-10a ve LS-R-1.5-3-10b



LS-R-1.5-3-10b



LS-R-1.5-3-20a



LS-R-1.5-3-20b



LS-R-1.5-3-40a



LS-R-1.5-3-40a

ÖZGEÇMİŞ

Volkan Koç, 1979 Ankara doğumlu olup, ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladıktan sonra 1997 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başlamıştır. Haziran 2001 senesinde lisans öğrenimini başarıyla tamamlayarak, 2002 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.

