

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO
ESASLI KOMPOZİT PANELLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
DÜŞÜK DAYANIMLI BETON ELEMANLAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Doğan AKGÜN**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Alper İLKİ

ARALIK 2005

**YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİT PANELLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DÜŞÜK
DAYANIMLI BETON ELEMANLAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İnş. Müh. Doğan AKGÜN
501031210**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Ocak 2006

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

Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)

Doç.Dr. Engin ORAKDÖĞEN (İTÜ)

ARALIK 2005

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan sayın hocam Doç. Dr. Alper İlki'ye teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkıları için Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir'e ve Prof. Dr. Nahit Kumbasar'a; çalışma süresince yanımda olan Ozan Göray'a, Cem Demir'e, İdris Bedirhanoglu'na, Burcu Akçay'a, Cengiz Şengül'e, İsmail Hakkı Başeğmez'e, Yasin Candan'a, Volkan Koç'a, Esen Yılmaz'a, Önder Peker'e, Emre Karamuk'a, Kıvanç Taşkın'a, Hakan Saruhan'a, Yapı ve Deprem Laboratuvarı personeline, Yapı Malzemesi Laboratuvarı personeline ve adlarını buraya sığdıramadığım tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Çalışmayı destekleyen İstanbul Teknik Üniversitesi'ne, Degussa-YKS 'ye, Beksa'ya, Şişecam'a ve Betonsa'ya ise teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren aileme, tüm kalbimle teşekkür ederim.

Aralık 2005

Doğan Akgün

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ELEMANLARIN TASARIMI, ÜRETİMİ VE GÜÇLENDİRİLMESİ	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Elemanların Tasarımı	7
2.3 Elemanların Üretimi.....	7
2.3.1 Kalıpların Hazırlanması	7
2.3.2 Beton Dökümü	8
2.4 Öndöküm HPFRCC Panellerin Üretimi.....	9
2.4.1 HPFRCC Karışımının Geliştirilmesi	9
2.4.2 Güçlendirme Panellerinin Tasarımı	11
2.4.3 Karışım Sırası.....	12
2.4.4 Kalıba Alınma ve Kür	14
2.5 Güçlendirme Uygulaması.....	16
2.5.1 Yüzey Hazırlığı	16
2.5.2 Güçlendirme Panellerinin Yapıştırılması	17
2.5.3 Çelik Köşebentlerin Yapıştırılması	18
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ	20
3.1 Giriş.....	20
3.2 Elemanların Üretiminde Kullanılan Beton.....	20
3.3 Öndöküm HPFRCC Panellerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler	24
3.3.1 Çelik Lifler	24
3.3.2 Silis Dumanı.....	25
3.3.3 Hiperakışkanlaştırıcı	25

3.3.4 Kum.....	26
3.3.5 Çimento	26
3.4 Panel Üretiminde Kullanılan HPFRCC Karışımlarının Mekanik Özellikleri..	27
3.4.1 HPFRCC Karışımları	27
3.4.2 Basınç ve Çekme Dayanımları.....	28
4. DENEY DÜZENEGİ	34
4.1 Giriş.....	34
4.2 Referans Elemanları için Deney Düzeneği	34
4.3 Güçlendirilmiş Elemanlar için Deney Düzeneği.....	36
5. DENEY SONUÇLARI	43
5.1 Giriş.....	43
5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 1; h=250mm; b=250mm) ..	46
5.2.1 LS-R-1-0-M.....	46
5.2.2 LS-R-1-15-M-I	47
5.2.3 LS-R-1-30-M-I	48
5.2.4 LS-R-1-15-M-II	50
5.2.5 LS-R-1-30-M-II	52
5.2.6 LS-R-1-30-C-II	53
5.2.7 LS-R-1-15-M-II-NSC	55
5.2.8 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	56
5.3 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 2; h=300mm; b=150mm) ..	65
5.3.1 LS-R-2-0-M.....	65
5.3.2 LS-R-2-15-M-I	66
5.3.3 LS-R-2-30-M-I	68
5.3.4 LS-R-2-45-M-I	70
5.3.5 LS-R-2-15-M-II	71
5.3.6 LS-R-2-30-M-II	72
5.3.7 LS-R-2-30-C-II	73
5.3.8 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	75
5.4 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 3; h=450mm; b=150mm) ..	82
5.4.1 LS-R-3-0-M.....	82
5.4.2 LS-R-3-15-M-I	83
5.4.3 LS-R-3-30-M-I	85
5.4.4 LS-R-3-45-M-I	86
5.4.5 LS-R-3-15-M-II	88

5.4.6 LS-R-3-30-M-II	89
5.4.7 LS-R-3-30-C-II	91
5.4.8 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	92
5.5 Hasarların Değerlendirilmesi	100
5.5.1 LS-R-1-15-M-II.....	100
5.5.2 LS-R-1-30-M-II.....	101
5.5.3 LS-R-3-15-M-II.....	102
6. SONUÇLAR	104
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	114

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 R-1 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri	5
Tablo 1.2 R-2 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri	5
Tablo 1.3 R-3 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri	6
Tablo 2.1 HPFRCC Deneme Karışımları	10
Tablo 2.2 K-3 Deneme Karışımına Uygulanan Kürler	11
Tablo 3.1 Beton Karışımı	20
Tablo 3.2 Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları	21
Tablo 3.3 Standart Silindir Basınç Deneylerinin Sonuçları	23
Tablo 3.4 Dramix ZP30/0.55 Çelik Liflerin Mekanik Özellikleri.....	25
Tablo 3.5 Glenium 51 Hiperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri	26
Tablo 3.6 HPFRCC Karışım I	27
Tablo 3.7 HPFRCC Karışım II.....	27
Tablo 3.8 HPFRCC Karışım I Deney Sonuçları	31
Tablo 3.9 HPFRCC Karışım II Deney Sonuçları	33
Tablo 4.1 Şekildeğiştirmeölçer Özellikleri.....	36
Tablo 4.2 Yerdeğiştirmeölçerlerin Özellikleri	42
Tablo 5.1 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti.....	64
Tablo 5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri.....	64
Tablo 5.3 R-1 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri.....	65
Tablo 5.4 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti.....	81
Tablo 5.5 R-2 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri.....	81
Tablo 5.6 R-2 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri.....	82
Tablo 5.7 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti.....	98
Tablo 5.8 R-3 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri.....	99
Tablo 5.9 R-3 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri.....	99

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Kalıpların Hazırlanması.....	8
Şekil 2.2 Beton Dökümü ve Kür.....	9
Şekil 2.3 HPFRCC Panellerin Köşe Birleşim Detayı	12
Şekil 2.4 Düşey Karıştırıcı.....	12
Şekil 2.5 Karışım II için Karıştırma Sırası.....	13
Şekil 2.6 Plastik Kıvam Elde Edilmesi.....	14
Şekil 2.7 HPFRCC Panellerin Kalıpları	14
Şekil 2.8 HPFRCC Panellerin Kalıba Alınması ve Kürü	15
Şekil 2.9 Yüzey Hazırlığı Tamamlanmış Bir Elemanın Şematik Gösterimi	16
Şekil 2.10 Yüzey Hazırlığı.....	16
Şekil 2.11 Güçlendirilecek Elemanların Yüzeylerine Epoksi Harcı Uygulanması ...	17
Şekil 2.12 Güçlendirme Panellerinin Yapıştırılması	18
Şekil 2.13 Çelik Köşebentlerin Yapıştırılması	19
Şekil 2.14 Panel Kalınlıklarına Göre Çelik Köşebent Detayları.....	19
Şekil 3.1 Standart Silindir Basınç Deneyi Düzeneği	21
Şekil 3.2 28 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	22
Şekil 3.3 90 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	22
Şekil 3.4 180 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	22
Şekil 3.5 360 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları.....	23
Şekil 3.6 Dramix ZP30/0.55 Tipi Çelik Lifler	24
Şekil 3.7 Tutkalla Birleştirilmiş Çelik Lif Demetlerinin Suya Değerek Dağılması ..	24
Şekil 3.8 Silis Dumanı İçeren Bir Çimento Hamurunda Sıkı Bir Diziliş Elde Edilmesi	25
Şekil 3.9 Elek Analizi	26
Şekil 3.10 HPFRCC Standart Silindir Basınç Deneyi	28
Şekil 3.11 HPFRCC Yarma Çekme Deneyi	28
Şekil 3.12 28 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	29
Şekil 3.13 90 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	29

Şekil 3.14	180 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	29
Şekil 3.15	360 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	30
Şekil 3.16	28 Günlük HPFRCC Karışım II için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	32
Şekil 3.17	90 Günlük HPFRCC Karışım II için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	32
Şekil 3.18	180 Günlük HPFRCC Karışım II için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları	32
Şekil 4.1	Veri Toplama Sistemi Akış Grafiği	34
Şekil 4.2	Deney Düzenekinin Genel Görünümü	35
Şekil 4.3	Ölçüm Düzenekği	35
Şekil 4.4	Referans Elemanlarının Yüzeyindeki Şekildeğiştirmeölçerler.....	36
Şekil 4.5	LS-R-2-45-M-I Elemanının Ölçüm Düzenekği.....	37
Şekil 4.6	LS-R-1-15-M-I Elemanının Ölçüm Düzenekği.....	37
Şekil 4.7	LS-R- 2-15-M-I Elemanının Ölçüm Düzenekği.....	38
Şekil 4.8	LS-R- 2-30-M-I Elemanının Ölçüm Düzenekği ve CFRP Uygulaması.....	39
Şekil 4.9	LS-R- 1-30-M-I Elemanının Deney Düzenekği	40
Şekil 4.10	LS-R- 3-30-M-I Elemanının Deney Düzenekği	41
Şekil 4.11	Deney Düzenekinin Son Hali	42
Şekil 4.12	Güçlendirilmiş Elemanların Yüzeyindeki Yerdeğiştirmeölçerler	42
Şekil 5.1	Süneklik Değerlerinin Hesabında Kullanılan Şekildeğiştirmeler.....	44
Şekil 5.2	Referans Elemanlarının Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme Eğrileri Altında Kalan Alan	45
Şekil 5.3	Güçlendirilmiş Elemanların Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme Eğrileri Altında Kalan Alan	45
Şekil 5.4	Eleman Yerleşim Planı ve Kenarların İsimlendirilmesi	45
Şekil 5.5	LS–R–1–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	46
Şekil 5.6	LS–R–1–0–M Eksenel Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	47
Şekil 5.7	LS–R–1–15–M–I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	47
Şekil 5.8	LS–R–1–15–M–I Güçlendirme Panellerindeki Eksnel Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi.....	48
Şekil 5.9	LS–R–1–15–M–I’ın Deney Sırasındaki Görünümleri	48
Şekil 5.10	LS–R–1–30–M–I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	49
Şekil 5.11	LS–R–1–30–M–I Farklı Ölçüm Boyları İçin Elde Edilen Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkisi.....	49

Şekil 5.12 LS-R-1-30-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	50
Şekil 5.13 LS-R-1-30-M-I'in Deney Sırasındaki Görünümleri	50
Şekil 5.14 LS-R-1-15-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	51
Şekil 5.15 LS-R-1-15-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	51
Şekil 5.16 LS-R-1-15-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	51
Şekil 5.17 LS-R-1-30-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	52
Şekil 5.18 LS-R-1-30-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	53
Şekil 5.19 LS-R-1-30-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	53
Şekil 5.20 LS-R-1-30-C-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	54
Şekil 5.21 LS-R-1-30-C-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	54
Şekil 5.22 LS-R-1-30-C-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	54
Şekil 5.23 LS-R-1-15-M-II-NSC Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	55
Şekil 5.24 LS-R-1-15-M-II-NSC Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	56
Şekil 5.25 LS-R-1-15-M-II-NSC 'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	56
Şekil 5.26 R-1 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi	57
Şekil 5.27 R-1 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi	57
Şekil 5.28 R-1 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	58
Şekil 5.29 R-1 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	58
Şekil 5.30 R-1 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi	58
Şekil 5.31 R-1 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi	59
Şekil 5.32 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi	59
Şekil 5.33 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	59
Şekil 5.34 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi	60
Şekil 5.35 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi	60
Şekil 5.36 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi	60

Şekil 5.37 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	61
Şekil 5.38 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	61
Şekil 5.39 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Sünekliğe Etkisi	61
Şekil 5.40 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Sünekliğe Etkisi	62
Şekil 5.41 R-1 Enkesitli Elemanlarda Çelik Köşebentlerin Davranışa Etkisi	62
Şekil 5.42 R-1 Enkesitli Elemanlarda Çelik Köşebentlerin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	63
Şekil 5.43 R-1 Enkesitli Elemanlarda Çelik Köşebentlerin Sünekliğe Etkisi	63
Şekil 5.44 LS-R-2-0-M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	65
Şekil 5.45 LS-R-2-0-M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi	66
Şekil 5.46 LS-R-2-15-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	67
Şekil 5.47 LS-R-2-15-M-I Üst Ölçüm Boyundaki Şekildeğiştirme Değerleri.....	67
Şekil 5.48 LS-R-2-15-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	67
Şekil 5.49 LS-R-2-15-M-I’ın Deney Sırasındaki Görünümleri	68
Şekil 5.50 LS-R-2-30-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	68
Şekil 5.51 LS-R-2-30-M-I Üst ve Alt Ölçüm Boylarındaki Şekildeğiştirme Değerleri.....	69
Şekil 5.52 LS-R-2-30-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	69
Şekil 5.53 LS-R-2-30-M-I’ın Deney Sırasındaki Görünümleri	69
Şekil 5.54 LS-R-2-45-M-I Güçlendirme Panellerindeki Enine Şekildeğiştirme Değerleri.....	70
Şekil 5.55 LS-R-2-45-M-I’ın Deney Sırasındaki ve Sonrasındaki Görünümleri..	70
Şekil 5.56 LS-R-2-15-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	71
Şekil 5.57 LS-R-2-15-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	71
Şekil 5.58 LS-R-2-15-M-II’nin Deney Sırasındaki Görünümleri	72
Şekil 5.59 LS-R-2-30-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	72
Şekil 5.60 LS-R-2-30-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	73
Şekil 5.61 LS-R-2-30-M-II’nin Deney Sırasındaki Görünümleri	73
Şekil 5.62 LS-R-2-30-C-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	74

Şekil 5.63 LS-R-2-30-C-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	74
Şekil 5.64 LS-R-2-30-C-II 'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	74
Şekil 5.65 R-2 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi.....	75
Şekil 5.66 R-2 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi.....	76
Şekil 5.67 R-2 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	76
Şekil 5.68 R-2 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	76
Şekil 5.69 R-2 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi.....	77
Şekil 5.70 R-2 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi.....	77
Şekil 5.71 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi.....	77
Şekil 5.72 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	78
Şekil 5.73 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Süneklığe Etkisi.....	78
Şekil 5.74 R-2 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi.....	78
Şekil 5.75 R-2 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi.....	79
Şekil 5.76 R-2 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	79
Şekil 5.77 R-2 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	79
Şekil 5.78 R-2 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Süneklığe Etkisi	80
Şekil 5.79 R-2 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Süneklığe Etkisi	80
Şekil 5.80 LS-R-3-0-M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	82
Şekil 5.81 LS-R-3-0-M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi.....	83
Şekil 5.82 LS-R-3-15-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	84
Şekil 5.83 LS-R-3-15-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	84
Şekil 5.84 LS-R-3-15-M-I'ın Deney Sırasındaki Görünümleri	84
Şekil 5.85 LS-R-3-30-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	85

Şekil 5.86 LS-R-3-30-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	86
Şekil 5.87 LS-R-3-30-M-I'in Deney Sırasındaki Görünümleri	86
Şekil 5.88 LS-R-3-45-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi	87
Şekil 5.89 LS-R-3-45-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	87
Şekil 5.90 LS-R-3-45-M-I'in Deney Sırasındaki Görünümleri	87
Şekil 5.91 LS-R-3-15-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	88
Şekil 5.92 LS-R-3-15-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	89
Şekil 5.93 LS-R-3-15-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	89
Şekil 5.94 LS-R-3-30-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	90
Şekil 5.95 LS-R-3-30-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	90
Şekil 5.96 LS-R-3-30-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	90
Şekil 5.97 LS-R-3-30-C-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi.....	91
Şekil 5.98 LS-R-3-30-C-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri	92
Şekil 5.99 LS-R-3-30-C-II 'nin Deney Sırasındaki Görünümleri	92
Şekil 5.100 R-3 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi.....	93
Şekil 5.101 R-3 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi.....	93
Şekil 5.102 R-3 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	94
Şekil 5.103 R-3 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	94
Şekil 5.104 R-3 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi.....	94
Şekil 5.105 R-3 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi.....	95
Şekil 5.106 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi.....	95
Şekil 5.107 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi.....	95
Şekil 5.108 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi.....	96
Şekil 5.109 R-3 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi.....	96
Şekil 5.110 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi.....	96

Şekil 5.111 R-3 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	97
Şekil 5.112 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi	97
Şekil 5.113 R-3 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Sünekliğe Etkisi	97
Şekil 5.114 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Sünekliğe Etkisi	98
Şekil 5.115 LS-R-1-15-M-II Hasar Gelişimi	100
Şekil 5.116 LS-R-1-30-M-II Hasar Gelişimi	101
Şekil 5.117 LS-R-3-15-M-II Hasar Gelişimi	102

SEMBOL LİSTESİ

b	: dikdörtgen enkesitin eni
D	: çelik lif çapı
ϵ_c	: eksenel şekildeğiştirme
E_c	: beton veya HPFRCC elastisite modülü
$E_{c,ort}$	: beton veya HPFRCC ortalama elastisite modülü
$E_{c,250}$	: elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca 250 mm) elde edilen şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülü
$E_{c,500}$	: elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülü
f_{cts}	: HPFRCC yarma çekme dayanımı
$f_{cts,ort}$	: HPFRCC ortalama yarma çekme dayanımı
f'_c	: 28 günlük standart silindir beton veya HPFRCC basınç dayanımı
f'_{cc}	: güçlendirilmiş eleman basınç dayanımı
f'_{cj}	: deney gününe ait standart silindir beton basınç dayanımı
$f'_{co,j}$	: deney gününe ait güçlendirilmemiş eleman basınç dayanımı
$f'_{c,ort}$	: 28 günlük ortalama standart silindir beton veya HPFRCC basınç dayanımı
f'_{co}	: sargısız eleman beton basınç dayanımı
$f_{HPFRCC,k}$	: deney gününe ait standart silindir HPFRCC basınç dayanımı
$f_{t,HPFRCC,k}$	: deney gününe ait HPFRCC yarma çekme dayanımı
h	: dikdörtgen enkesitin derinliği
j	: beton yaşı
k	: öndöküm HPFRCC panel yaşı
l	: eleman yüksekliği
L	: çelik lif uzunluğu
t	: öndöküm HPFRCC panel kalınlığı
μ	: süneklik

YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PANELLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ DÜŞÜK DAYANIMLI BETON ELEMANLAR

ÖZET

Gelişmekte olan ülkelerin çoğunda, özellikle deprem bölgelerindeki yapılarda; yapı elemanları, deprem anında gerekli sünekliği ve dayanımı sağlayamamaktadır. İlgili yönetmeliklere ve standartlara uyulmayan üretimler ya da eski yönetmelikler bu yetersizliğin en büyük nedenlerindendir. Bu şartlar altında, mevcut yapıların davranışlarının iyileştirilmesine yönelik çabalar, olası kayıpların azaltılması için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada; beton elemanların öndöküm, yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit (HPFRCC) panellerle dışarıdan sargılandığı bir güçlendirme yöntemi araştırılmıştır. Bu kapsamda, HPFRCC panellerle güçlendirilmiş, dikdörtgen enkesitli düşük dayanımlı beton elemanların eksenel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Beton elemanların deney günlerindeki basınç dayanımları yaklaşık 10 MPa, HPFRCC panellerin basınç dayanımları yaklaşık 85-100 MPa ve çekme dayanımları ise yaklaşık 8.5-14 MPa'dır. Enkesit biçimi, HPFRCC panel kalınlığı, HPFRCC karışım türü, yükleme türü ve HPFRCC panel birleşim bölgelerine çelik köşebent uygulaması çalışmada incelenen başlıca değişkenlerdir.

Yapılan deneyler sonucunda, öndöküm HPFRCC paneller ile güçlendirilen beton elemanların; sünekliğinde, dayanımında ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alanda belirgin artış gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, araştırılan yöntemin; kısa sürede uygulanabilen, eleman boyutlarını önemli ölçüde değiştirmeyen, benzerlerine göre ekonomik, (öndöküm oluşu dolayısıyla) kalite kontrolü kolay ve (dikdörtgen enkesitler için de) kolay uygulanabilir, yeni bir güçlendirme tekniği olarak önerilebileceği sonucuna varılabilir.

Anahtar Kelimeler: beton, güçlendirme, kompozit, HPFRCC, öndöküm, sargılama, dayanım, süneklik.

LOW STRENGTH CONCRETE MEMBERS RETROFITTED WITH HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE (HPFRCC) PANELS

SUMMARY

In earthquake prone regions of the world, particularly in developing countries, many existing structures exhibit poor seismic performances during earthquakes. Inadequate ductility and low quality concrete are among the most common reasons of the poor performance. Retrofitting the existing structures, which were neither designed nor constructed according to the current seismic codes, is a vital task in order to prevent significant losses during future earthquakes.

In this study, a retrofit technique in terms of external confinement of low strength concrete members by using prefabricated panels of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) is investigated. For this purpose, concrete members with rectangular cross-section were externally confined by using prefabricated HPFRCC panels and tested under axial loads. At the day of testing the concrete compressive strength of original specimens was around 10 MPa, while the compressive strengths of the prefabricated HPFRCC panels were around 85-100 MPa and tensile strengths of the prefabricated HPFRCC panels were around 8.5-14 MPa, respectively. The main test variables are; shape of cross-section, thickness of HPFRCC panels, loading pattern, type of HPFRCC mixture and application of steel corners around the corners of the section.

Test results showed that external confinement with prefabricated HPFRCC panels provided significant enhancement in ductility and the area under the stress – axial strain curves, as well as compressive strength enhancement. The investigated technique seems to be a promising method due to ease in application, relatively less hindrance to the building occupants, high efficiency in the case of non-circular members, better quality control due to prefabrication and relatively less cost with respect to its alternatives.

Key Words: concrete, retrofitting, composite, HPFRCC, prefabricated, confinement, strength, ductility

1. GİRİŞ

Deprem, dünya varolduğu sürece kendisi ile yüzyüze kalacağımız doğal bir afettir. Bu afeti önleyebilmek ya da önceden bilmek günümüz teknolojisi ile olası değildir. Ancak, gerekli önlemler alındığı takdirde depremin insanlığa ve çevreye verebileceği zararları azaltmak mümkündür. Bu noktada; deprem etkisinin yol açtığı can kayıplarının çoğunluğunun, insanlar tarafından inşa edilen yapıların davranışı ile ilgili olduğunu anımsamakta yarar var, [1]. Ne var ki, yaşanan acı deneyimler sonucu, ülkemizin ciddi bir deprem tehdidiyle yüzyüze olduğu ve bu depremin doğurabileceği yıkıcı etkilere hazırlıklı olmadığı anlaşılmıştır.

Yapıların depremlerde gösterdiği kötü davranışın birçok 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 koyamamaktadır. Ayrıca; düşük beton dayanımı, kolonlar üzerindeki eksenel gerilmenin artmasına neden olmakta, bu da elemanların gevrek davranması sonucunu doğurmaktadır. Bütün bunların sonucunda, taşıyıcı elemanlar; deprem sırasında etkiyen ek yatay ve düşey kuvvetlere karşı koyamayarak, yeterli deprem enerjisinin yutulurak tüketilemediği gevrek bir davranışla hasar görmekte, ya da tamamen göçmektedir. Tüm bu durumların önüne geçebilmek amacıyla; yeni yapılar, yönetmeliklerde yer alan şartlar doğrultusunda inşa edilmeli, mevcut yetersiz yapılar ise uygun teknikler kullanılarak güçlendirilmelidir.

Günümüzde, yapıların güçlendirilmesi için birçok farklı teknik uygulanmaktadır. Çelik yapı elemanlarının güçlendirilmesi, kaynaklı ya da mekanik birleşimlerle çelik kesit eklenmesi yoluyla, betonarme yapı elemanlarına göre oldukça kolay bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir, [2, 3].

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde ise, 1960'lerden başlanarak; dış yüzeye çelik levhalar yapıştırılması ya da çelik - beton - betonarme mantolama

uygulanması yöntemlerine sıklıkla başvurulmuştur. Uygulamaların kolay ve hızlı oluşu yanında; mantolama için sürekliliğinin sağlanmasında ve donatı ankrajında karşılaşılan güçlükler ile alan kaybı, çelik levhalar için de korozyon etkisi önemli olumsuzluklar oluşturmıştır, [4-8].

Dış yüzeye, çelik levhalar yerine, lif takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemeler yapıştırılarak güçlendirme, 1980'lerin ortalarından beri araştırılan yöntemlerden biridir. Karbon, cam ve aramid gibi malzemelerden üretilen, yüksek elastisite modülüne ve dayanıma sahip bu liflerin, güçlendirme alanında kullanımı sırasında; uygulamanın kolay ve hızlı oluşu, yapıya ek yük getirmeyişi ve malzemenin çevre koşullarına dayanıklı oluşu gibi olumlu özelliklerin yanında; yöntemin pahalılığı ve dikdörtgen kesitlerin köşelerine uygulanmasında karşılaşılan güçlükler de ön plana çıkmıştır, [4, 9-12].

Yapı elemanlarının güçlendirilmesinde çimento esaslı kompozitlerin kullanımı ise oldukça yeni bir konudur. Özellikle, son yıllarda beton teknolojisindeki ilerlemeler doğrultusunda, çok yüksek dayanıma sahip özel betonların üretilmesine olanak sağlanmıştır. Ancak, yüksek dayanımlı betonlar tipik olarak gevrek davranış sergiler. Yapılan çalışmalarda, bu olumsuzluk, beton karışımının içine lifler katılarak giderilmeye çalışılmıştır. Böylece; lif donatılı çimento esaslı kompozit (FRCC), lif donatılı beton (FRC), lif donatılı harç (FRM), sünek lif donatılı çimento esaslı kompozit (DFRCC), yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit (HPFRCC), yüksek oranda ağ şeklinde çelik tel içeren çimento bulamacı (SIMCON), yüksek oranda kısa kesilmiş çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON), reaktif pudra betonu (RPC) ve tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC) gibi yeni malzemeler geliştirilmiştir, [13, 14].

Lif katkılı çimento esaslı kompozitlerde en çok kullanılan lif türleri; metalik, mineral ve polimerik liflerdir. Metalik lifler çelik ve paslanmaz çelikten elde edilen farklı kesit ve boyutlardaki liflerdir. Mineral lifler arasında en çok kullanılan cam lifidir. Polimerik lifler sınıfına ise akrilik, aramid, karbon, naylon, polietilen, polipropilen lifler girmektedir.

Çelik lif katkılı kompozitlerin üretimi ve kullanım alanları üzerine yürütülen pek çok çalışma sonucunda; çelik lif kullanımının, eleman davranışını özellikle süneklik ve enerji yutma kapasitesi bakımından oldukça iyileştirilebildiği bir çok araştırmacı tarafından gözlenmiştir, [15-45]. Çelik lif katkılı kompozitlerin güçlendirme alanında

kullanımı üzerine yapılmış çalışmalar ise oldukça sınırlı sayıdadır. Shannag ve diğ. [46] betonarme kirişlerin yerinde döküm SIFCON mantolarla kesmeye karşı güçlendirilmesi üzerine çalışmıştır. Shannag ve diğ. [47] yerinde döküm, yüksek performanslı lif donatılı beton (HPFRC) mantolarla onarılmış yetersiz donatılı kiriş kolon birleşimlerinin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemiştir. Dogan ve Krstulovic-Opara [48], betonarme kolonların eğilme kapasitesini ve bindirme bölgeleri ile kolon-kiriş birleşimlerindeki sargılamayı arttırmak amacıyla yerinde döküm SIMCON mantolar kullanmıştır. Harajli ve Rteil [49] karbon lif takviyeli polimerlerle (CFRP) sarılmış veya kritik bölgede sargı donatısı olarak çelik lifler kullanılmış betonarme kolonların davranışını incelemiştir. Bu çalışmaların tümünde, çelik lif katkılı kompozitler kullanılarak güçlendirilmiş elemanların; dayanım, süneklik, çatlak kontrolü ve enerji yutma kapasitesi özelliklerinde iyileşme sağlanmıştır. Ancak, karışımların işlenebilirliğindeki zorluklar nedeniyle, yerinde döküm güçlendirme uygulanması sırasında oldukça sıkıntı yaşandığı gözlenmiştir. Bu doğrultuda; Alaei [4] ve Alaei ve Karihaloo [50-53] yaptıkları çalışmalarda, betonarme kirişlere öndöküm kompozit (CARDIFRC) paneller yapıştırarak güçlendirmiş ve kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerinde önemli oranda iyileşme elde etmiştir. İlki ve diğ. [54] yaptıkları çalışmada, düşük dayanımlı kolon elemanların sarılma bölgelerini, öndöküm HPFRCC panellerle sararak eğilmeye karşı güçlendirmiş, dayanım ve özellikle süneklik açısından oldukça iyi bir davranış sağlamıştır.

Bu deneysel çalışmada; yetersiz dayanıma sahip, dikdörtgen enkesitli, beton elemanlar; yan yüzlerine dört taraftan, öndöküm, yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit (HPFRCC) paneller yapıştırılması yoluyla sargılanarak güçlendirilmiş ve monoton ya da tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmiştir. Bu yöntem ile mevcut elemanlar için (benzer yöntemlerde olduğu gibi kesitin eksenel yük kapasitesi arttırılmaksızın) sargılama etkisi sağlanarak davranışın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada incelenen başlıca değişkenler; beton elemanların enkesit türü (derinlik/genişlik oranı), öndöküm HPFRCC panel karışım türü (Karışım I, Karışım II), öndöküm HPFRCC panel kalınlığı (15, 30, 45 mm), yükleme biçimi (monoton ya da tekrarlı) ve elemanlarda çelik köşebent bulunup bulunmamasıdır.

Toplam 21 adet beton eleman, üç farklı türdeki dikdörtgen enkesitlerle (25-25, 15-30, 15-45) üretilmiştir. Bu enkesit türleri, derinlik/genişlik oranlarına göre R-1, R-2,

R-3 olarak isimlendirilmiştir. Enkesit türlerine göre; sırasıyla 7, 7 ve 7 adet olmak üzere dağılan elemanlardan; her enkesit türü için birer adet referans elemanı güçlendirilmeden denenmiştir. Diğer tüm elemanlar; 15, 30 ve 45 mm kalınlıklı öndöküm HPFRCC panellerle sarılıp güçlendirildikten sonra denenmiştir.

Uygulanan güçlendirme yöntemi, beton elemanların davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu iyileşmenin; dayanımda, süneklikte, göçme biçiminde ve gerilme-eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanda gerçekleştiği gözlenmiştir.

Beton elemanların isimlendirilmesinde, her bir elemanın sahip olduğu özelliklerin yansıtılmasına özen gösterilmiştir. Bu amaçla; beton dayanımı, enkesit şekli, HPFRCC panel kalınlığı, yükleme biçimi, öndöküm HPFRCC karışım türü ve eğer varsa ek değişken (çelik köşebent bulunup bulunmaması) eleman isminde kullanılmıştır. Örneğin; LS-R-1-15-M-I elemanında; **LS**, elemanın düşük beton dayanımını (**Low Strength**); **R-1**, dikdörtgen enkesitin derinlik/genişlik oranını (**Rectangular-1**); **15**, HPFRCC panel kalınlığını; **M**, yükleme biçimini (**Monoton**) ve **I**, öndöküm HPFRCC karışım türünü göstermektedir. Diğer elemanların isimlendirilmesinde kullanılan; **C**, deneyin tekrarlı yükler altında gerçekleştirildiğini (**Cyclic**) ve **NSC**, güçlendirme panellerinin köşe birleşimlerine çelik köşebent uygulanmadığını (**No Steel Corners**) göstermektedir.

Enkesit oranlarına göre sınıflandırılmış genel eleman özellikleri, Tablo 1.1, 1.2 ve 1.3'de sunulmuştur. Bu tablolarda; f'_c , b, h, l ve t sırasıyla 28 günlük standart silindir beton basınç dayanımını, dikdörtgen enkesitlerin derinliğini ve genişliğini, eleman yüksekliğini, HPFRCC panel kalınlığını göstermektedir.

Tablo 1.1 R-1 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri

Eleman İsmi	f'_c 28 gün (MPa)	Kesit Boyutları $b \times h \times l$ (mm)	Panel Kalınlığı t (mm)	Yükleme Biçimi	Öndöküm HPRCC Karışım Türü
LS-R-1-0-M	~7	250x250x500	0	Monoton	–
LS-R-1-15-M-I	~7	250x250x500	15	Monoton	Karışım I
LS-R-1-30-M-I	~7	250x250x500	30	Monoton	Karışım I
LS-R-1-15-M-II	~7	250x250x500	15	Monoton	Karışım II
LS-R-1-30-M-II	~7	250x250x500	30	Monoton	Karışım II
LS-R-1-30-C-II	~7	250x250x500	30	Tekrarlı	Karışım II
LS-R-1-15-M-II-NSC	~7	250x250x500	15	Monoton	Karışım II

Tablo 1.2 R-2 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri

Eleman İsmi	f'_c 28 gün (MPa)	Kesit Boyutları $b \times h \times l$ (mm)	Panel Kalınlığı t (mm)	Yükleme Biçimi	Öndöküm HPRCC Karışım Türü
LS-R-2-0-M	~7	150x300x500	0	Monoton	–
LS-R-2-15-M-I	~7	150x300x500	15	Monoton	Karışım I
LS-R-2-30-M-I	~7	150x300x500	30	Monoton	Karışım I
LS-R-2-45-M-I	~7	150x300x500	45	Monoton	Karışım I
LS-R-2-15-M-II	~7	150x300x500	15	Monoton	Karışım II
LS-R-2-30-M-II	~7	150x300x500	30	Monoton	Karışım II
LS-R-2-30-C-II	~7	150x300x500	30	Tekrarlı	Karışım II

Tablo 1.3 R-3 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri

Eleman İsmi	f'_c 28 gün (MPa)	Kesit Boyutları $b \times h \times l$ (mm)	Panel Kalınlığı t (mm)	Yükleme Biçimi	Öndöküm HPFRCC Karışım Türü
LS-R-3-0-M	~7	150x450x500	0	Monoton	–
LS-R-3-15-M-I	~7	150x450x500	15	Monoton	Karışım I
LS-R-3-30-M-I	~7	150x450x500	30	Monoton	Karışım I
LS-R-3-45-M-I	~7	150x450x500	45	Monoton	Karışım I
LS-R-3-15-M-II	~7	150x450x500	15	Monoton	Karışım II
LS-R-3-30-M-II	~7	150x450x500	30	Monoton	Karışım II
LS-R-3-30-C-II	~7	150x450x500	30	Tekrarlı	Karışım II

2. ELEMANLARIN TASARIMI, ÜRETİMİ VE GÜÇLENDİRİLMESİ

2.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında; yan yüzlerine dört taraftan, öndöküm HPFRCC paneller yapıştırılarak dıştan sargılanma yoluyla güçlendirilmiş, 500 mm yüksekliğindeki dikdörtgen enkesitli beton elemanların, monoton artan ya da tekrarlı eksenel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Elemanlar, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında üretilip güçlendirilmiş, deneyler ise Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

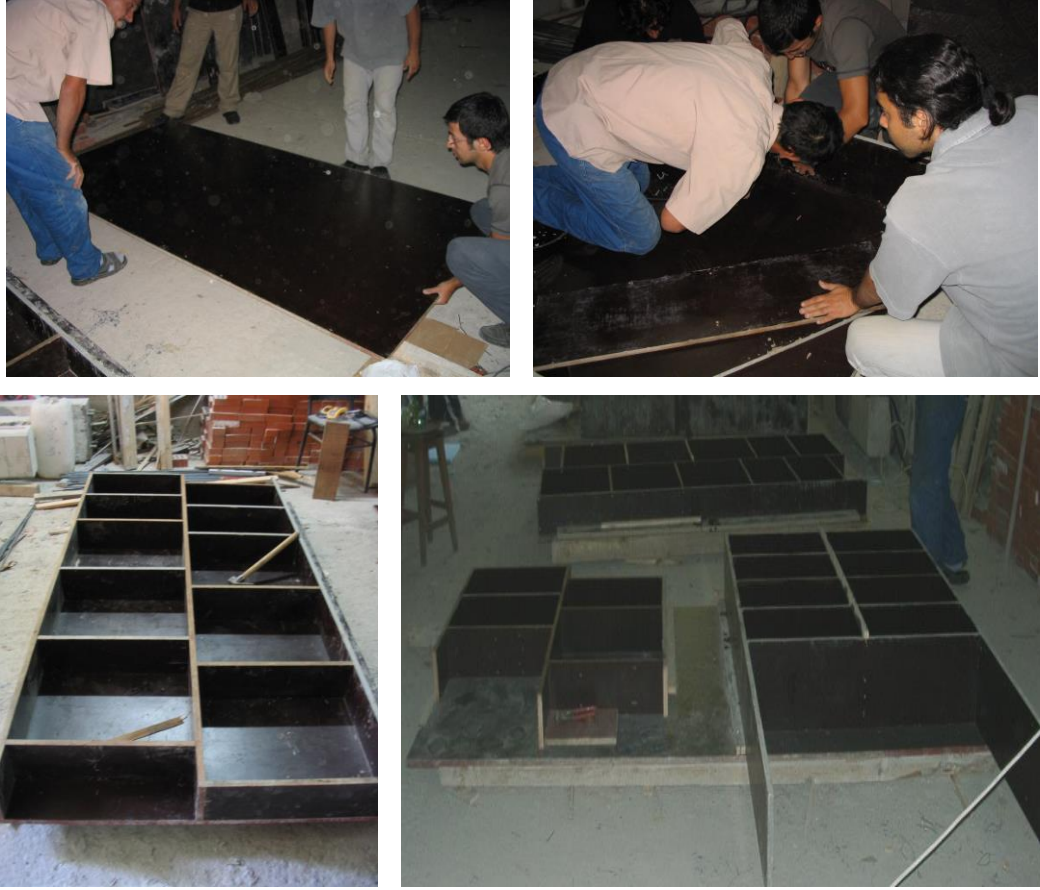
2.2 Elemanların Tasarımı

Ülkemizdeki yapıların genel durumu gözönüne alınarak; düşük beton dayanımını simgelemek üzere; 28 günlük standart silindir basınç dayanımı yaklaşık 7 MPa olan beton kullanılarak, 21 adet eleman üretilmiştir. Elemanların boyutları (genişlik×derinlik×yükseklik); 250×250×500 mm, 150×300×500 mm ve 150×450×500 mm olarak tasarlanmıştır. Boyutların belirlenmesi sırasında İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan yükleme aygıtlarının yük kapasiteleri ve geometrik kısıtları dikkate alınmıştır.

2.3 Elemanların Üretimi

2.3.1 Kalıpların Hazırlanması

Elemanların üretiminde kullanılan kalıpların hazırlanması için, laboratuvarında bulunan malzemelerden yararlanılmıştır. Kullanılan ahşap (plywood) kalıplar, beton dökümü sırasında elemanlar yatay konumda olacak şekilde tasarlanıp birbirine monte edilmiştir. Beton dökümünden önce; tüm yüzeyler, toz ve benzeri yabancı maddelerden temizlenerek, kalıp yağı ile yağlanmıştır. Şekil 2.1.



Şekil 2.1 Kalıpların Hazırlanması

2.3.2 Beton Dökümü

Betonsa tarafından hazırlanan, 28 günlük silindir basınç dayanımı yaklaşık 7 MPa olan hazır beton; tüm elemanlar için aynı gün ve şartlarda kalıplara dökülmüştür. Betonun kalıplara mümkün olduğunca iyi yerleşmesini sağlamak amacıyla, döküm sırasında vibrasyon uygulanmıştır. Farklı yaşlardaki betonun mekanik özelliklerini belirlemek üzere, 14 adet standart silindir (150×300) beton örneği alınmıştır.

Beton dökümünü izleyen 7 gün boyunca, olası büzülme çatlaklarının önüne geçebilmek için, elemanların üzeri amerikan beziyle örtülüp sabah ve akşam birer kez sulanarak kür uygulanmıştır. Beton dökümü ve kür uygulanması Şekil 2.2’de görülmektedir. Kullanılan betonun karışımıyla ve mekanik özellikleriyle ilgili ayrıntılı bilgi Malzeme Özellikleri ve Deneyleri bölümü başlığı altında sunulmuştur.



Şekil 2.2 Beton Dökümü ve Kür

2.4 Öndöküm HPFRCC Panellerin Üretimi

2.4.1 HPFRCC Karışımının Geliştirilmesi

Deneysel çalışma kapsamında; güçlendirilmiş elemanların davranışını daha da iyileştirebilmek amacıyla, öndöküm HPFRCC panel karışımının geliştirilmesine çalışılmıştır. Bu doğrultuda, dört değişik deneme karışımı yapılmış ve farklı kür ortamlarının HPFRCC karışımına etkisi araştırılmıştır. Güçlendirme panellerinin üretiminde kullanılan ilk karışım (Karışım I) için HPFRCC ile ilgili yürütülmüş araştırmalardan (Özyurt [59], Yılmaz [55] ve Alaei [4]) yararlanılmıştır. Tablo 2.1’de sunulan deneme karışımlarında ise yüksek çekme dayanımı ve kolay işlenebilirlik hedeflenmiştir.

Tablo 2.1 HPFRCC Deneme Karışımları

Deneme Karışımları	K-1 (KARIŞIM I)	K-2	K-3	K-3B (KARIŞIM II)
Çelik Lif Oranı (Hacimce)	0.02	0.04	0.04	0.04
Su / Çimento (Ağırlıkça)	0.25	0.25	0.22	0.22
Agrega / Çimento (Ağırlıkça)	0.80	0.80	0.90	0.90
Silis Dum. / Çimento (Ağırlıkça)	0.20	0.15	0.20	0.20
Hiper. Akış. / Çimento (Ağırlıkça)	0.030	0.032	0.030	0.036
İnce Kum	Yok	Yok	Var	Var
Ort. Çekme Day. (fcts,ort) MPa	8.64 (28 Gün)	9.53 (7 Gün)	8.20 (7 Gün) 12.73 (28 Gün)	10.21 (7 Gün) 13.30 (28 Gün)

Güçlendirme panellerinin bir bölümünün üretiminde kullanılmış Karışım I'ın (K-1) çekme dayanımını yükseltmek amacıyla, üretilen deneme karışımı K-2'de çelik lif oranı iki katına çıkarılmıştır. Bu artışın, karışımın işlenebilirliğini azaltmaması için; (K-1'de karışıma birlikte katılan) akışkanlaştırıcı ile su, karışıma ayrı ayrı eklenmiş ve karışımın silis dumanı oranı düşürülmüştür. K-2'nin çekme dayanımındaki artış yeterli düzeyde gerçekleşememiş ve iyi bir kıvam elde edilememiştir. Bunun üzerine; üretilen deneme karışımı K-3'te, daha sıkı bir diziliş elde etmek amacıyla karışıma dere kumu eklenmiş ve farklı bir karıştırma sırası izlenmiştir. Dayanımı yükseltmek için ise su/çimento oranı düşürülmüş ve silis dumanı oranı arttırılmıştır. K-3'te iyi bir kıvam elde edilememiştir. Bu doğrultuda; üretilen deneme karışımı K-3 B'de, akışkanlaştırıcı oranı arttırılarak karışımın işlenebilirliğinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. K-3 B'de iyi bir kıvam elde edilmiş ve istenilen dayanıma ulaşılmıştır. Bunun üzerine, K-3 B deneme karışımı, güçlendirme panellerinin üretiminde kullanılacak Karışım II olarak seçilmiştir.

Farklı kür ortamlarının HPFRCC karışımına etkisini araştırmak amacıyla, üretilen K-3 karışımına, değişik sıcaklıktaki havuzlarda, 5 farklı türde kür uygulanmıştır,

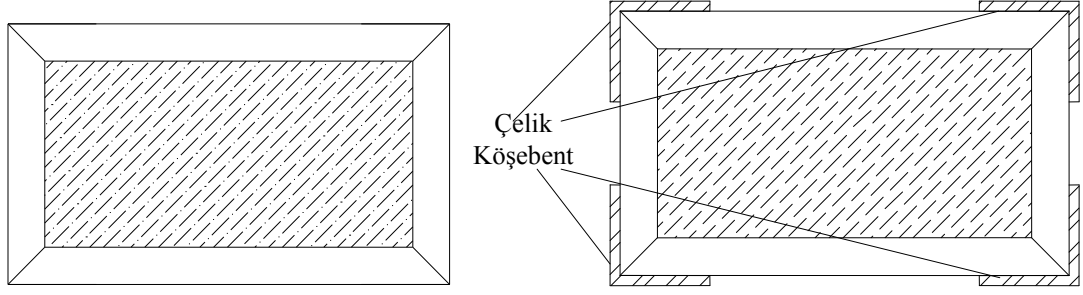
Tablo 2.2. Bu çalışma sonucunda, özellikle sıcak havuz kürünün HPFRCC karışımının çekme dayanımını olumlu etkilediği gözlenmiştir. En iyi dayanımın elde edildiği (7 gün 20°C + 3 gün 90°C + 17 gün 20°C havuzlardaki) kür, Karışım II için de uygulanmıştır.

Tablo 2.2 K-3 Deneme Karışımına Uygulanan Kürler

Kür Türleri	Deney Günü	Yarma Disk Sayısı	Ort. Çekme Dayanımı $f_{cts,ort}$ (MPa)
7 gün 20°C	7	6	8.20
10 gün 20°C	13	3	8.31
7 gün 20°C + 3gün 90°C	13	3	11.14
27 gün 20°C	28	1	10.47
7 gün 20°C + 3 gün 90°C + 17 gün 20°C	28	1	12.73

2.4.2 Güçlendirme Panellerinin Tasarımı

Bu çalışma kapsamında, üç farklı kalınlığa sahip (15, 30 ve 45 mm) öndöküm HPFRCC güçlendirme panelleri üretilmiştir. Karışım I güçlendirme panellerinin yüksekliği (460 mm) ve Karışım II güçlendirme panellerinin yüksekliği (480 mm), panellerin eksenel yük almaması amacıyla; güçlendirilecek beton elemanların yüksekliğinden (500 mm) daha düşük seçilmiştir. Böylece, öndöküm HPFRCC paneller ile dışarıdan sargılanarak uygulanan güçlendirmede, benzer yöntemlerde olduğu gibi kesitin eksenel yük kapasitesinin artırılması yerine sargılama etkisi sağlanarak sünekliğin artırılması hedeflenmiştir. Beton elemanların dört yüzünü saran güçlendirme panellerinin birleştiği köşelerde; paneller arasındaki süreksizliği gidermek, köşelerdeki yapışma alanını arttırmak ve gerilme yığılmalarına karşı daha etkin bir çözüm sağlayabilmek için, panel kenarları 45° eğimle birbiri üzerine binecek şekilde üretilmiştir. Güçlendirme panellerinin epoksi ile yapıştırılmasının ardından, köşe birleşimleri çelik köşebentler ile de desteklenmiştir. Panel birleşim detayı Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3 HPFRCC Panellerin Köşe Birleşim Detayı

2.4.3 Karışım Sırası

Öndöküm HPFRCC panellerin tamamı, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi laboratuvarındaki 0.5 m³ kapasiteli düşey karıştırıcıda üretilmiştir, Şekil 2.4



Şekil 2.4 Düşey Karıştırıcı

HPFRCC Karışım I panellerin üretiminde; ilk önce en ince taneli malzeme ve en iri taneli malzeme, daha sonra bir sonraki ince taneli malzeme ile bir sonraki iri taneli malzeme karıştırılmış ve bu kuru karışıma çelik lif katılmıştır. Çelik liflerin ardından, karışıma su ve hiperakışkanlaştırıcı karışımı dört aşamada (%50, %25, %15, %10) eklenmiştir. Karıştırma işlemine 9~10 dakika daha devam edilmesinin ardından karışım kalıba alınmıştır. Üretiminde aşağıdaki karıştırma sırası izlenmiştir:

- I. Silis Dumanı + Silis Kumu II
- II. Çimento + Silis Kumu I
- III. Çelik Lif
- IV. Su ve Hiperakışkanlaştırıcı karışımı (%50, 25, 15, 10)

HPFRCC Karışım II panellerin üretiminde ise, ilk önce kumlar, daha sonra ise bağlayıcılar karıştırılmıştır. Bu kuru karışıma yavaş yavaş su eklenmesinin ardından, bir süre beklenmiş ve iki aşamada hiperakışkanlaştırıcı katılmıştır. Karışımın kıvama gelmeye başlamasının ardından, karıştırıcı iki kez durdurularak çelik lif, yine iki aşamada olmak üzere, eklenmiştir. Şekil 2.5. Üretimde aşağıdaki karıştırma sırası izlenmiştir:

- I. Silis Kumu I + Silis Kumu II + Kum
- II. Çimento + Silis Dumanı
- III. Su
- IV. Hiperakışkanlaştırıcı (%50 - %50)
- V. Çelik Lif (%50 - %50)



Şekil 2.5 Karışım II için Karıştırma Sırası

Karışım II için, kumların ve bağlayıcıların karıştırıcıya konulmalarının ardından yaklaşık 1'er dakika kuru halde karışmaları sağlanmıştır. Kuru karışıma su eklendikten sonra yaklaşık 3 dakika karıştırılarak, karışımın ıslanması beklenmiştir. Daha sonra hiperakışkanlaştırıcının %50'si karışıma eklenerek yaklaşık iki dakika karıştırılmış ve hemen ardından ikinci %50 eklenmiştir. Kıvamın viskozlaşmaya başlayışının gözlemlendiği yaklaşık 8~10 dakika sonrasına kadar karıştırılma işlemine devam edilmiş, bu dakikadan sonra ise karıştırıcı durdurularak çelik liflerin %50'si karışıma katılmıştır. Liflerle birlikte yaklaşık 2 dakika daha karıştırıldıktan sonra ikinci %50 karışıma eklenmiştir. Son malzemenin de eklenmesinin ardından karışım, hava sıcaklığına ve neme de bağlı olarak, yaklaşık 6~10 dakika daha karıştırılıp; işlenebilirliği giderek artan plastik bir kıvam elde edilmiştir, Şekil 2.6.



Şekil 2.6 Plastik Kıvam Elde Edilmesi

2.4.4 Kalıba Alınma ve Kür

Öndöküm HPFRCC panellerin üretiminde kullanılan kalıpların hazırlanmasında laboratuarda bulunan malzemelerden yararlanılmıştır. Ahşap (plywood) kalıpların üzerine, panel kenarlarının 45° eğimle birbiri üzerine binmesini sağlayacak çıtalar monte edilmiş ve farklı dökümler için kalıplar yeniden kullanılmıştır. Üretimden önce; tüm yüzeyler, toz ve benzeri yabancı maddelerden temizlenerek, kalıp yağı ile yağlanmıştır. Şekil 2.7.



Şekil 2.7 HPFRCC Panellerin Kalıpları

HPFRCC kalıba alınırken, sarsma tablası aracılığıyla, aşamalı olarak iki kez kısa süreli titreşim uygulanmış ve betonun yerleşmesi sağlanmıştır. Panel yüzeylerinin mala ile düzeltilmesinin ardından, kalıpların üzeri ıslak amerikan bezi ile örtülerek 24 saat nemli odada bekletilmiştir. Şekil 2.8. Paneller, üretildikten bir gün sonra kalıptan alınarak, oda sıcaklığındaki ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) havuzlara konulmuştur. Bu aşamada, Karışım I paneller 6 gün 20°C sıcaklıktaki havuzlarda bekletilmelerinin ardından havuzdan alınmıştır. Karışım II panellere ise, üretimlerinden 8 gün geçmesinin ardından sıcak havuz kürü uygulanmıştır. Bu amaçla, Karışım II paneller sıcak havuzlara alınmış ve su sıcaklığı aşamalı olarak 90°C 'ye çıkarılmıştır. 3 gün boyunca bu sıcaklıkta bekletilen paneller, sıcaklığın yine aşamalı olarak 20°C 'ye indirilmesinin ardından; oda sıcaklığındaki ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) havuzlara tekrar konulmuş ve 17 gün daha bekletilmiştir. Toplam kür süresinin 28 güne erişmesiyle birlikte Karışım II paneller havuzdan çıkarılmıştır.

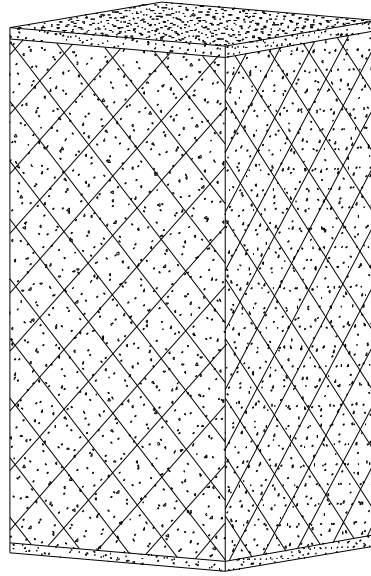


Şekil 2.8 HPFRCC Panellerin Kalıba Alınması ve Kürü

2.5 Güçlendirme Uygulaması

2.5.1 Yüzey Hazırlığı

Öndöküm HPFRCC paneller, güçlendirilecek elemanların yüzeylerine yapıştırılmadan önce; beton yüzeyler her iki doğrultuda 45° eğimli, 40 mm aralıklarla, 3 mm genişliğinde ve yaklaşık 3 mm derinliğinde kesilmiştir. Böylelikle, kayma yüzeylerinin artırılması ve panellerin mevcut beton elemanlara daha iyi yapışmasının sağlanması amaçlanmıştır. Önhasar verilmiş elemanların güçlendirilmesi öncesinde; ayrıca, yüzeydeki ezilmiş beton tabakaları da kaldırılmıştır. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra yüzey fırça ve hava pompası yardımı ile tamamen tozdan arındırılmıştır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10.



Şekil 2.9 Yüzey Hazırlığı Tamamlanmış Bir Elemanın Şematik Gösterimi



Şekil 2.10 Yüzey Hazırlığı

2.5.2 Güçlendirme Panellerinin Yapıştırılması

Öndöküm HPFRCC paneller, üretimlerinden en az 28 gün sonra, güçlendirilecek elemanların yan yüzlerine yapıştırılmıştır Şekil 2.11. Yapıştırma işlemi Degussa Concessive 1406 çift bileşenli epoksi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan epoksinin 7 günlük basınç dayanımı 75 MPa, eğilme dayanımı ise 25 MPa'dır. Hazırlanan epoksi harcı, spatula yardımı ile, tozdan arındırılmış yüzeye uygulanmıştır. Düzgün bir epoksi kalınlığı elde etmek amacıyla 3 mm diş derinliğine sahip tırnaklı mala kullanılmıştır. Önhasar verilmiş elemanlardaki çatlaklar ve (ezilmiş beton tabakalarının kaldırılması sonucu oluşan) oyuklar, spatula kullanılarak epoksi harcıyla doldurulmuştur.



Şekil 2.11 Güçlendirilecek Elemanların Yüzeylerine Epoksi Harcı Uygulanması

Paneller, düşey konumda durmakta olan beton elemanların karşılıklı iki yüzüne yapıştırılarak işkencelerle sabitlenmiştir. İşkencelerin panellere zarar vermesini önlemek için, panel ile işkence arasına ahşap elemanlar yerleştirilmiştir. Panellerin karşılıklı iki yüze yapıştırılmasının bir gün ardından, diğer iki karşılıklı yüze yapıştırma işlemi uygulanmıştır. Şekil 2.12. Böylece, güçlendirme panellerinin

yapıştırılması iki günün sonunda tamamlanmıştır. İşkenceler, yapıştırma işleminden bir gün sonra sökülmüştür. Güçlendirilen elemanların; yapıştırma işleminin ardından, en az, epoksi harcının dayanımını alması için gerekli süre olan, 7 gün boyunca bekletilmeden denenmemelerine dikkat edilmiştir.



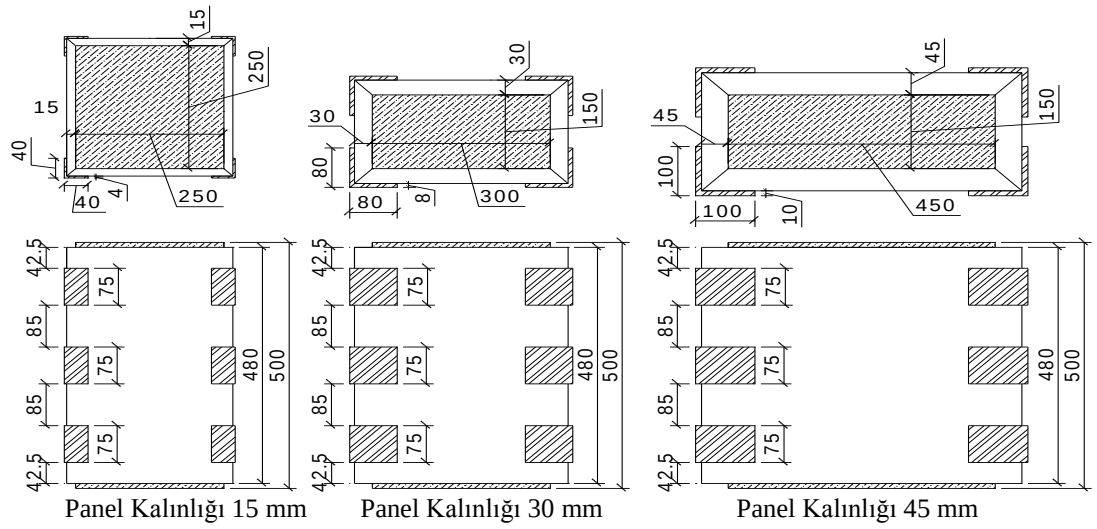
Şekil 2.12 Güçlendirme Panellerinin Yapıştırılması

2.5.3 Çelik Köşebentlerin Yapıştırılması

Güçlendirme panellerinin birleştiği köşelerdeki gerilme yığılmalarına karşı önlem olarak, panel kenarları 45° eğimle birbiri üzerine binecek şekilde üretilmiş ve panellerin köşelerde birbirine epoksi ile yapışmasının ardından, bu köşelere çelik köşebentler yapıştırılmıştır. Çelik köşebentlerin boyutları; 15 mm panel kalınlığı için 40.40.4 mm, 30 mm panel kalınlığı için 80.80.8 mm ve 45 mm panel kalınlığı için 100.100.10 mm olacak biçimde seçilmiştir. Bu seçim yapılırken, birleşimdeki çelik köşebentlerin çekme dayanımının, birleşen güçlendirme panellerinin çekme dayanımının üzerinde olması gerektiği gözönüne alınmıştır. Yapıştırma işlemine geçilmeden önce, çelik köşebentlerin yüzeyleri pasdan ve tozdan arındırılmıştır. Ayrıca, HPFRCC panellerin köşeleri de yuvarlatılarak, çelik köşebentlerin düzgün bir biçimde yerleşebileceği konuma getirilmiştir. Bu hazırlıkların ardından, çelik köşebentler panel köşelerine yapıştırılarak iskencelerle sabitlenmiştir. Çelik köşebentler ile iskencelerin arasına, yine, ahşap elemanlar yerleştirilmiştir. Tüm yapıştırılmalarda Degussa Concompressive 1406 çift bileşenli epoksi kullanılmıştır. İşkenceler, yapıştırma işleminden bir gün sonra sökülmüştür. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14.



Şekil 2.13 Çelik Köşebentlerin Yapıştırılması



Şekil 2.14 Panel Kalınlıklarına Göre Çelik Köşebent Detayları

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ

3.1 Giriş

Elemanların üretiminde, ülkemizdeki mevcut yapıların önemli bir bölümündeki durum göz önüne alınarak, 28 günlük standart silindir dayanımı yaklaşık 7 MPa (deney günlerinde yaklaşık 10 MPa) olan beton kullanılmıştır. Güçlendirme elemanı olarak kullanılan HPFRCC panellerin tasarımında ise, üretimin öndöküm (prefabrik) olarak yapılabilmesinin sağlayacağı yararlar da gözönüne alınarak, olabildiğince ekonomik, yüksek dayanımlı ve işlenebilir bir karışım elde edilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde, beton elemanların ve güçlendirme panellerinin üretimlerinde kullanılan malzemelerin genel özellikleri ile malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

3.2 Elemanların Üretiminde Kullanılan Beton

Betonsa tarafından üretilen, 28 günlük standart silindir dayanımı yaklaşık 7 MPa olan hazır beton; tüm elemanlar için aynı şartlarda, 23.07.2004 tarihinde, kalıplara dökülmüştür. Beton karışımı Tablo 3.1’de verilmiştir. Su/çimento oranı 1.4 olan karışımda, Akçansa PÇ 42.5 portland çimentosu kullanılmıştır. Sinpaş Ocağı’ndan elde edilmiş 1 No’lu kırma taşın maksimum tane çapı 12 mm’dir. Karışımda ayrıca, Akpınar Sülün Ocağı’ndan elde edilen maksimum tane çapı 0.5 mm olan kum kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Beton Karışımı

Malzemeler	Çimento	Kum	Su	Kırma Taş I
Miktar (kg/m ³)	150	923	210	1074

Taze betonda kıvamı belirlemek amacı ile 3 ayrı çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Çökme konisi 3 aşamada doldurulmuş ve her aşamanın ardından uzun demir bir çubukla betonun 25 defa şişlenmesiyle iyi bir yerleşme sağlanmıştır. Tamamı

doldurulan koninin yavaşça çekilmesiyle oluşan çökme, çelik şerit metre yardımıyla ölçülmüştür. Taze betonda yapılan çökme deneyi sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları

Deneme	1	2	3
Çökme (mm)	64	75	66

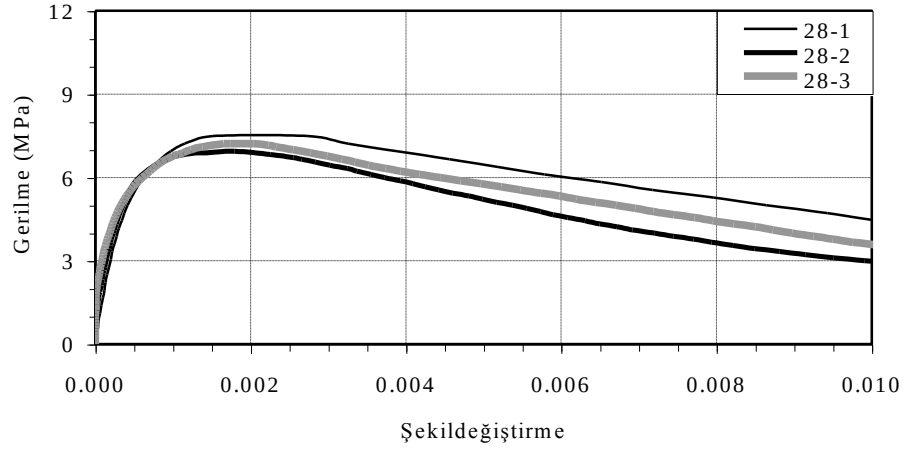
Beton dayanımını belirleyebilmek amacı ile alınan 14 adet standart silindir (150×300 mm) beton örneğine, güçlendirilme çalışması kapsamındaki elemanlarla aynı şartlarda (7 gün, nemli bezle) kür uygulanmıştır. Bu silindirlere, 5000 kN kapasiteli Amsler yükleme aygıtı kullanılarak; 28., 90., 180. ve 360. günlerde, standart silindir basınç deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sırasında gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenebilmesi amacıyla TML CM-15 ölçüm çerçevesi (kompresometre) kullanılmıştır. Standart silindirin ölçüm boyundaki (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) yerdeğiştirmeleri ölçmek üzere, ölçüm çerçevesine bağlı konumdaki iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-5), tüm boydaki (300 mm) yerdeğiştirmeleri ölçmek üzere de iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-25) kullanılmıştır. CDP-25 türündeki yerdeğiştirmeölçerler, standart silindire 100 mm mesafede yerleştirilmişlerdir. Şekil 3.1. Elektronik veri toplayıcı yardımıyla (TML TDS-303) kaydedilen veriler, bilgisayar ortamında değerlendirilmiştir.



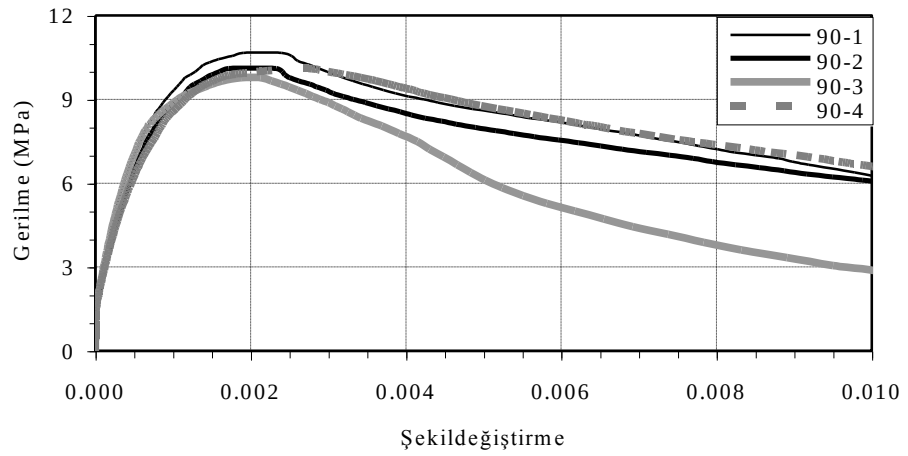
Şekil 3.1 Standart Silindir Basınç Deneyi Düzenegi

28, 90, 180 ve 360 günlük betonun, standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri, sırasıyla; Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de verilmiştir. Grafiklerdeki eksenel şekildeğiştirmelerin hesabı için orta

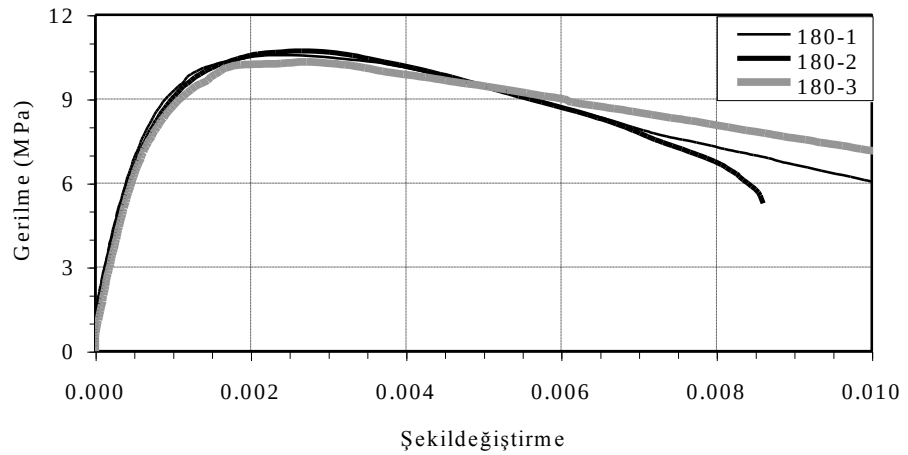
bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



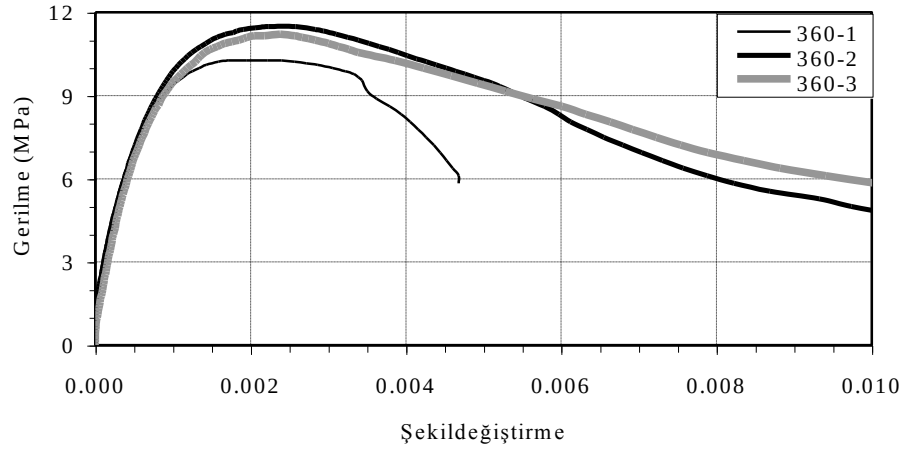
Şekil 3.2 28 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.3 90 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.4 180 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.5 360 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

Standart silindirlerin basınç deneylerinden elde edilen beton mekanik özellikleri Tablo 3.3'de özetlenmiştir.

Tablo 3.3 Standart Silindir Basınç Deneylerinin Sonuçları

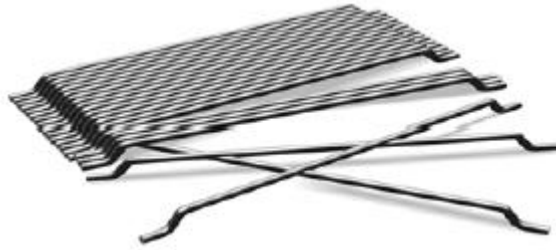
Standart Silindir	Beton Yaşı (Gün)	Basınç Dayanımı f'_c (MPa)	Ort. Basınç Dayanımı $f'_{c,ort}$ (MPa)	Elastisite Modülü E_c (MPa)	Ort. Elastisite Modülü $E_{c,ort}$ (MPa)
28-1	28	7.5	7.2	14034	14029
28-2	28	6.9		14422	
28-3	28	7.2		13632	
90-1	90	10.7	10.2	15130	14089
90-2	90	10.1		13471	
90-3	90	9.8		15025	
90-4	90	10.1		12728	
180-1	180	10.6	10.5	15024	14200
180-2	180	10.7		14062	
180-3	180	10.3		13515	
360-1	360	10.3	11.0	15039	14678
360-2	360	11.5		14334	
360-3	360	11.2		14660	

3.3 Öndöküm HPFRCC Panellerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

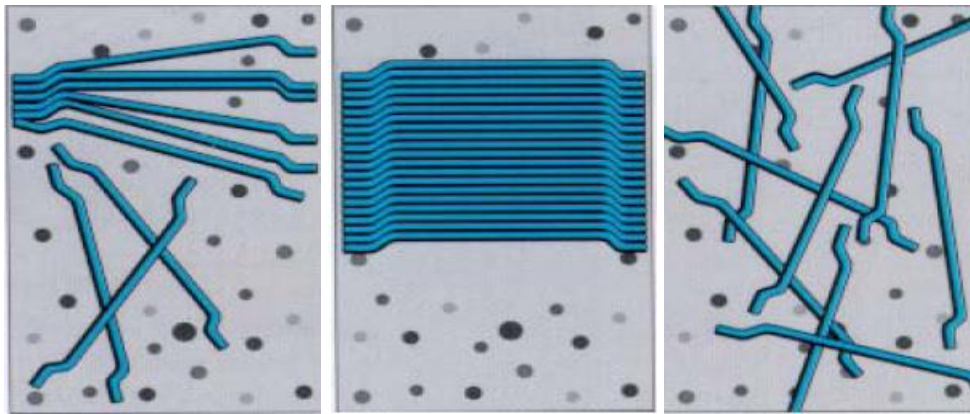
3.3.1 Çelik Lifler

Yüksek dayanımlı betonlar tipik olarak, normal dayanımlı betonlara göre, daha gevrek davranış sergiler. Süneklik ve enerji yutma kapasitesinde artış elde etmek için yüksek dayanımlı betona çelik lif eklenmesi ise giderek daha fazla kabul görmektedir. Bu yöntemle; çelik lifler, taze betonda oluşmaya başlayan mikro çatlaklar arasında köprü teşkil ederek iç gerilmeleri bütün kütle içine yayarlar ve servis yükleri altında çatlakların yayılıp büyümesini önlerler. Deprem gibi ani etkiyen dinamik yüklere karşı da enerji yutma yetenekleri nedeni ile betonun dağılmasını geciktirirler. Ayrıca; dayanımda ve gerek fiziksel, gerekse kimyasal etkilere karşı dayanıklılıkta artış gibi yararlar da sağlayabilmektedirler.

HPFRCC panellerin üretiminde Dramix ZP30/0.55 tipi çelik lifler kullanılmıştır. Şekil 3.6. İki ucu kancalı olan Dramix ZP30/0.55 tipi çelik lifler, su ile karıştırıldığında çözülen özel bir tür tutkal ile birbirlerine yapıştırılmıştır. Böylece, liflerin beton içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır, Şekil 3.7. Kullanılan çelik liflerin mekanik özellikleri Tablo 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.6 Dramix ZP30/0.55 Tipi Çelik Lifler



Şekil 3.7 Tutkalla Birleştirilmiş Çelik Lif Demetlerinin Suyu Değerek Dağılımı

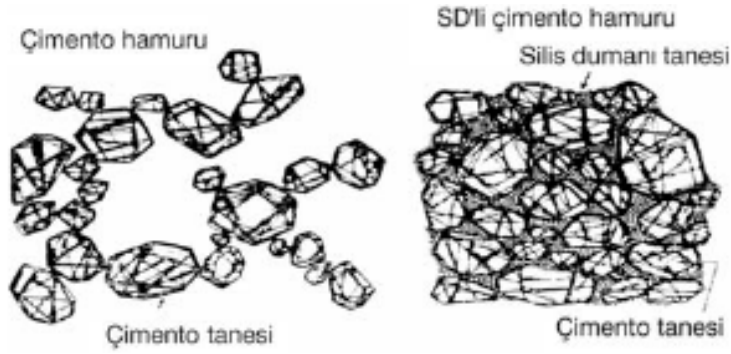
Tablo 3.4 Dramix ZP30/0.55 Çelik Liflerin Mekanik Özellikleri

Teknik Özellikler:

Çapı (mm)	: 0.55
Uzunluğu (mm)	: 30
Narinlik (L/D)	: 55
Yoğunluk (kg/dm ³)	: 7.85
Çekme Dayanım (MPa)	: 1100
Kaplama	: Yok

3.3.2 Silis Dumanı

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşenidir. Kalsiyum hidroksitle girdiği reaksiyon sonucu, betondaki en zayıf bölge olan çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı artırır. Ayrıca; betonun dayanımında, işlenebilirliğinde ve dayanıklılığında önemli artış sağlar. Şekil 3.8.



Şekil 3.8 Silis Dumanı İçeren Bir Çimento Hamurunda Sıkı Bir Diziliş Elde Edilmesi

Bu çalışmada; çimento ile yerdeğıştiren bir malzeme olarak, Elkem tarafından üretilmiş 2.25 kg/dm³ özgül ağırlığa sahip, maksimum tane çapı 500 mikrondan küçük silis dumanı kullanılmıştır.

3.3.3 Hiperakışkanlaştırıcı

Su/çimento oranının yaklaşık 0.20 seviyelerine indirildiği yüksek performanslı betonlarda, işlenebilirlik ve yerleşim gibi sorunların ortaya çıkmaması için, süperakışkanlaştırıcıların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı gibi ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılması, iyi bir dağılım elde edilmesine de yardımcı olur.

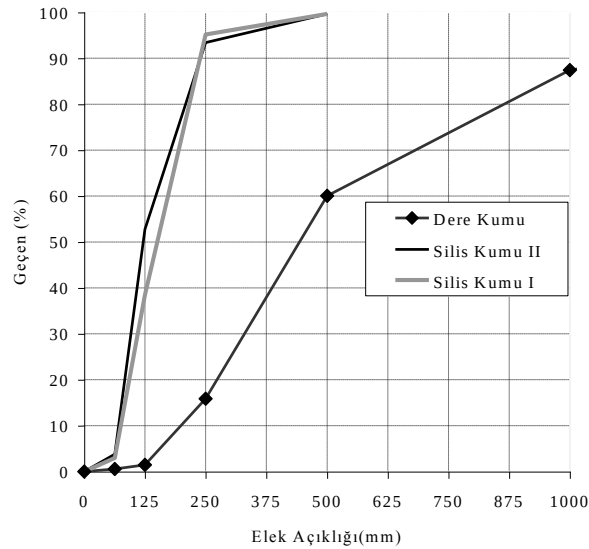
Çalışmada, Degussa Glenium 51 hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Glenium 51; hazır beton ve prekast endüstrisinin, erken yüksek dayanım, düzgün yüzey elde edilmesi ve nihai yüksek performans gibi taleplerine karşılık verebilmek üzere geliştirilmiş, modifiye edilmiş polikarboksilik eter esaslı, klor içermeyen, düşük su/çimento oranında işlenebilirliği oldukça arttırabilen, yeni nesil bir süperakışkanlaştırıcı katkı maddesidir, Tablo 3.5.

Tablo 3.5 Glenium 51 Hiperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri

Yoğunluk(g/cm ³) (20°C)	1.082-1.142
Klor % (EN 480-10)	<0.1
Renk	Amber
Homojenite	Homojen
Kimyasal İçeriği	Polikarboksilik Eter Zincirleri

3.3.4 Kum

Çalışmada Şişecam'dan temin edilen, birbirine çok yakın fiziksel özellikteki, iki ayrı tür silis kumu ve elenmiş dere kumu kullanılmıştır. Silis kumlarının maksimum tane çapı 500 mikrondan küçük olup, özgül ağırlıkları da birbirine eşit ve 2.66 kg/dm³ dür. Dere kumunun maksimum tane çapı ise 1000 mikrondan küçüktür. Şekil 3.9'da kumların elek analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 3.9 Elek Analizi

3.3.5 Çimento

HPFRCC panellerin üretiminde Lafarge PÇ 42.5 normal portland çimentosu kullanılmıştır.

3.4 Panel Üretiminde Kullanılan HPFRCC Karışımlarının Mekanik Özellikleri

3.4.1 HPFRCC Karışımları

Panel üretiminde kullanılan HPFRCC karışımları Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de verilmiştir. Tablodaki ağırlıkça karışım oranları, tüm malzemelerin ağırlıklarının çimento ağırlığına oranlanmasıyla elde edilmiştir. Ağırlıkça karışım miktarları ise 1 m³ HPFRCC üretimi için gereken malzeme miktarlarını göstermektedir.

Tablo 3.6 HPFRCC Karışım I

HPFRCC Karışım I	Ağırlıkça Karışım Oranı	Hacimce Karışım Oranı	Ağırlıkça Karışım Miktarı (kg)
Çimento	1.00	0.315	980.70
Silis Kumu I	0.40	0.148	392.58
Silis Kumu II	0.40	0.148	392.58
Silis Dumanı	0.20	0.087	196.14
Su	0.25	0.245	245.17
Hiper Akış.	0.03	0.027	29.42
Çelik Lif	–	0.020	157.00

Tablo 3.7 HPFRCC Karışım II

HPFRCC Karışım II	Ağırlıkça Karışım Oranı	Hacimce Karışım Oranı	Ağırlıkça Karışım Miktarı (kg)
Çimento	1.00	0.298	927.90
Silis Kumu I	0.30	0.105	278.37
Silis Kumu II	0.30	0.105	278.37
Kum	0.30	0.105	278.37
Silis Dumanı	0.20	0.082	185.58
Su	0.22	0.204	204.14
Hiper Akış.	0.036	0.031	33.40
Çelik Lif	–	0.040	314.00

3.4.2 Basınç ve Çekme Dayanımları

HPFRCC Karışım I'ın, basınç ve çekme dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla, 15 adet standart silindir HPFRCC örneği üretilmiştir. Standart silindirlere, güçlendirme panelleriyle aynı şartlarda (6 gün 20°C sıcaklıktaki havuzda) kür uygulanmıştır. 28., 90., 180. ve 360. günlerde standart silindir basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir, Şekil 3.10. Bu deneyler sırasında, beton standart silindir basınç deneylerindeki ölçüm sistemi ve yükleme aygıtı aynen kullanılmıştır. Yalnızca; gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenebilmesi amacıyla kullanılan ölçüm çerçevesi (kompresometre), elastisite modülünün hesaplanmasının ardından, daha ileri seviyelerdeki şekildeğiştirmelere karşılık gelen yük kapasitesinin de belirlenebilmesi için çıkartılıp, tüm boydan alınan ölçümlerle deneye devam edilmiştir. Üretilen 3 adet standart silindir ise; 150 mm çapında ve yaklaşık 90 mm yüksekliğe sahip, üç parçaya bölünerek yarma çekme deneylerinde kullanılmıştır, Şekil 3.11.

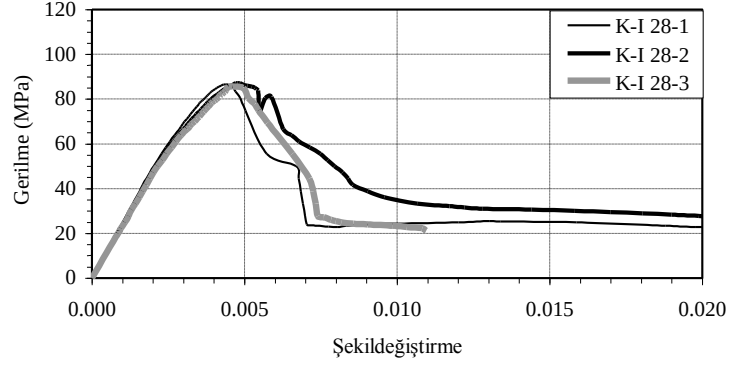


Şekil 3.10 HPFRCC Standart Silindir Basınç Deneyi

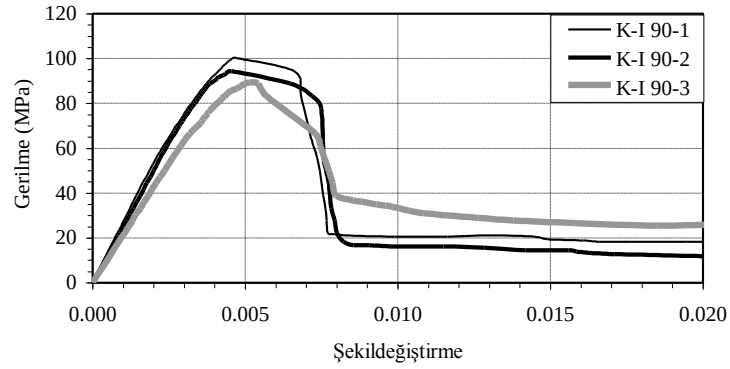


Şekil 3.11 HPFRCC Yarma Çekme Deneyi

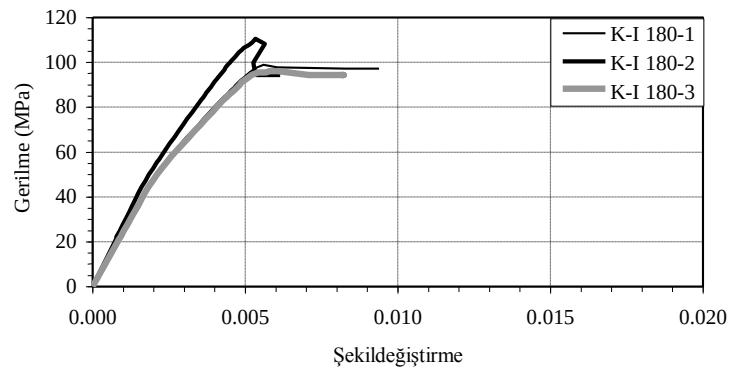
HPFRCC Karışım I'nin 28, 90, 180 ve 360 günlük, standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri, sırasıyla; Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de verilmiştir. Grafiklerde, eksenel şekildeğiştirmelerin hesabı için tüm boydan (300 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



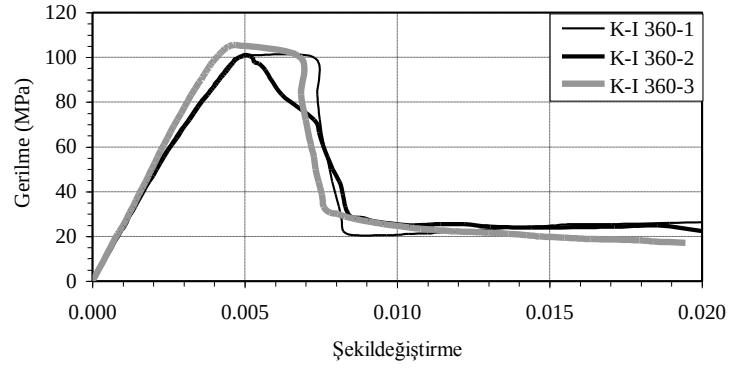
Şekil 3.12 28 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.13 90 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.14 180 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.15 360 Günlük HPFRCC Karışım I için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

HPFRCC standart silindirlerin basınç deneylerinden ve standart yarma disklerinin yarma çekme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar Tablo 3.8’de özetlenmiştir. Elastisite modülü değerlerinin hesabında orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır. Tabloda, $\epsilon_{c,0}$; gerilme – şekildeğiştirme eğrisinde basınç dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme değerini, $\epsilon_{c,0.85}$; eğrinin düşen kolunda basınç dayanımının 0.85’i seviyesine karşılık gelen şekildeğiştirme değerini simgelemektedir. Şekildeğiştirme değerlerinin hesabında tüm boydan (300 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır. Yarma çekme deneylerinde ise; HPFRCC karışımının çekme dayanımı, denklem (3.1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f_{cts} = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (3.1)$$

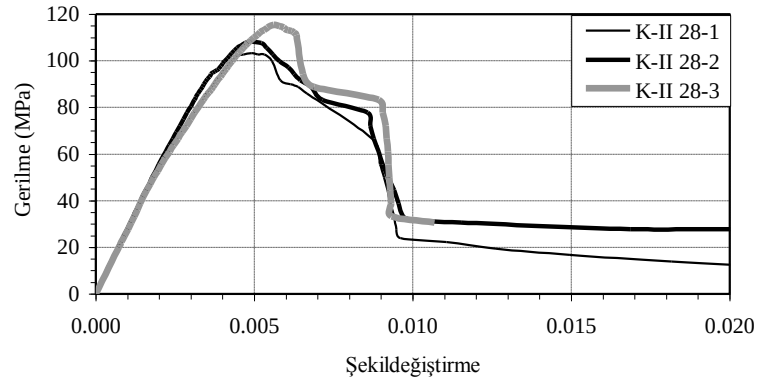
Bu denlemde; f_{cts} HPFRCC’nin yarma çekme dayanımını, P yarma yükünü, d disk çapını (standart yarma diskleri için 150 mm), l ise disk boyunu (standart yarma diskleri için 60 mm) simgelemektedir.

Tablo 3.8 HPFRCC Karışım I Deney Sonuçları

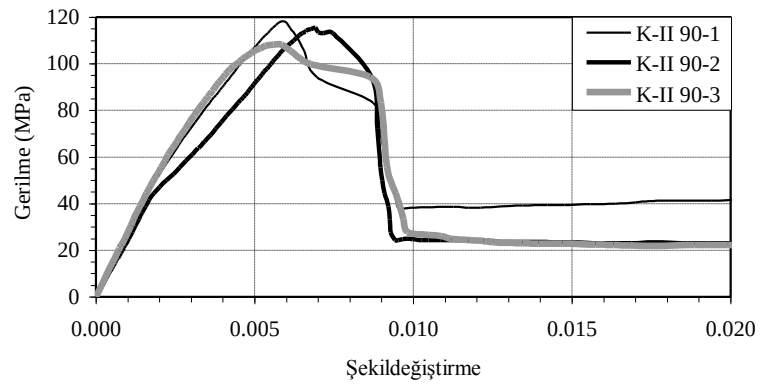
Standart Silindir	HPFRCC Yaşı (Gün)	Basınç Dayanımı f'_c (MPa)	Ort. Basınç Dayanımı $f'_{c,ort}$ (MPa)	Elastisite Modülü E_c (MPa)	Ort. Elastisite Modülü $E_{c,ort}$ (MPa)	Şekil-değiştirme $\epsilon_{c,0}$ (mm/mm)	Şekil-değiştirme $\epsilon_{c,0.85}$ (mm/mm)	Çekme Dayanımı f_{cts} (MPa)	Ort. Çekme Dayanımı $f_{cts,ort}$ (MPa)
28-1	28	86.6	86.4	29094	28143	0.0044	0.0051	8.0	8.6
28-2	28	87.2		29870		0.0048	0.0061	9.1	
28-3	28	85.5		25465		0.0045	0.0056	8.8	
90-1	90	100.5	94.7	31531	30281	0.0046	0.0068	9.2	8.8
90-2	90	94.4		30155		0.0045	0.0074	8.5	
90-3	90	89.4		29158		0.0052	0.0064	8.6	
180-1	180	98.8	101.7	30735	31503	0.0056		7.5	8.2
180-2	180	110.5		33164		0.0053	0.0068	7.4	
180-3	180	96.0		30611		0.0058		9.7	
360-1	360	101.6	102.7	32760	32001	0.0050	0.0074	-	-
360-2	360	101.0		30870		0.0050	0.0061	-	
360-3	360	105.5		32372		0.0046	0.0068	-	

HPFRCC Karışım II'nin, basınç ve çekme dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla, 9 adet standart yarma disk (150×60 mm) ve 9 adet standart silindir (150×300 mm) HPFRCC örneği üretilmiştir. HPFRCC disklerle ve silindirlere, güçlendirme panelleriyle aynı şartlarda (7 gün 20°C + 3 gün 90°C + 17 gün 20°C sıcaklıktaki havuzlarda) kür uygulanmıştır. 28., 90. ve 180. günlerde standart silindir basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında, HPFRCC Karışım I'nin standart silindir basınç deneylerindeki ölçüm sistemi ve yükleme aygıtı aynen kullanılmıştır. Üretilen standart yarma disklerine ise, yine 28., 90., ve 180. günlerde, yarma çekme deneyleri uygulanmıştır.

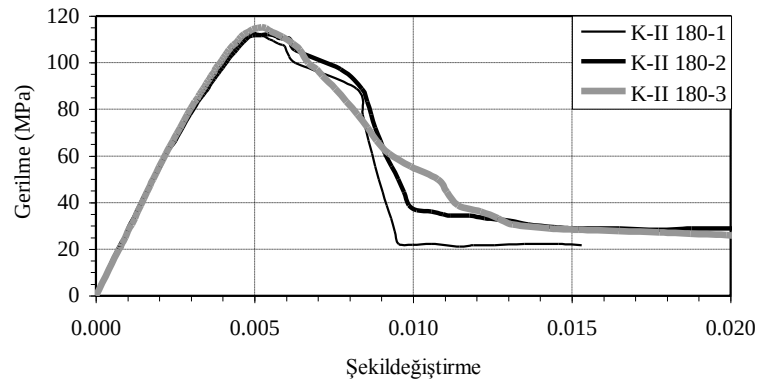
HPFRCC Karışım II'nin 28, 90, ve 180 günlük, standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri, sırasıyla; Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilmiştir. Grafiklerde, şekildeğiştirme değerlerinin hesabında tüm boydan (300 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.16 28 Günlük HPFRCC Karışım II için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.17 90 Günlük HPFRCC Karışım II için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.18 180 Günlük HPFRCC Karışım II için Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

HPFRCC Karışım II'nin, standart silindir basınç deneylerinden ve standart yarma çekme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar Tablo 3.9'da özetlenmiştir.

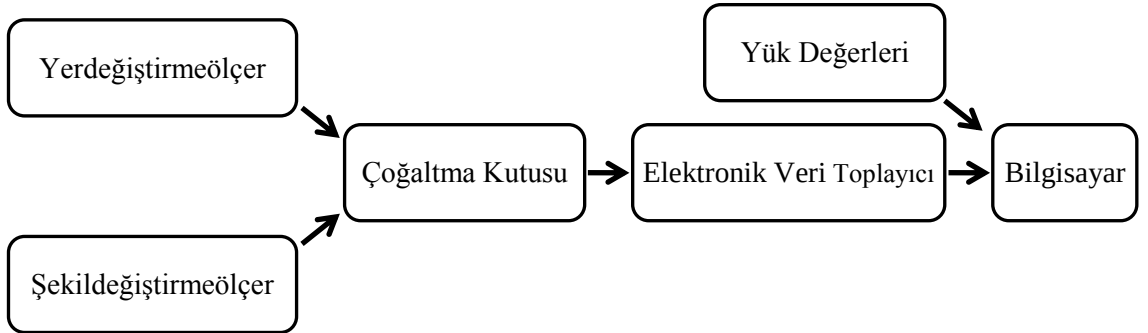
Tablo 3.9 HPFRCC Karışım II Deney Sonuçları

Standart Silindir	HPFRCC Yaşı (Gün)	Basınç Dayanımı f'_c (MPa)	Ort. Basınç Dayanımı $f'_{c,ort}$ (MPa)	Elastisite Modülü E_c (MPa)	Ort. Elastisite Modülü $E_{c,ort}$ (MPa)	Şekil-değiştirme $\epsilon_{c,0}$ (mm/mm)	Şekil-değiştirme $\epsilon_{c,0.85}$ (mm/mm)	Standart Yarma Diski	Çekme Dayanımı f_{cts} (MPa)	Ort. Çekme Dayanımı $f_{cts,ort}$ (MPa)
28-1	28	103.3	109.0	34728	34907	0.0049	0.0065	28-1	13.6	13.3
								28-2	12.9	
28-2	28	108.3		35648		0.0049	0.0064	28-3	11.7	
								28-4	12.9	
28-3	28	115.5		34346		0.0056	0.0065	28-5	13.4	
								28-6	13.2	
90-1	90	118.2	114.0	35310	35475	0.0059	0.0067	90-1	13.9	14.2
90-2	90	115.5		34631		0.0069	0.0084	90-2	14.2	
90-3	90	108.3		36483		0.0056	0.0087	90-3	14.6	
180-1	180	112.7	113.3	35986	34835	0.0050	0.0070	180-1	14.5	12.8
180-2	180	112.1		35217		0.0054	0.0079	180-2	11.7	
180-3	180	115.2		33301		0.0052	0.0069	180-3	12.8	

4. DENEY DÜZENEGİ

4.1 Giriş

Hazırlanan beton elemanların tümü, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan 5000 kN kapasiteli Amsler yükleme aygıtı kullanılarak denenmiştir. Deneylerde kullanılan veri toplama sistemi; yerdeğiştirmeölçer, şekildeğiştirmeölçer, çoğaltma kutusu (TML ASW-50C Switch Box) ve veri toplayıcıdan (TML TDS-303 Data Logger) oluşmaktadır. Şekil 4.1. Deney düzeneği içerisinde, elektronik olarak kaydedilemeyen tek ölçüm olan yük değerlerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesi için; yükleme aralıklarının, analitik olarak belirlenen eleman dayanımlarına olabildiğince uygun seçilmesine özen gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Veri Toplama Sistemi Akış Grafiği

4.2 Referans Elemanları için Deney Düzeneği

Tüm referans elemanları için yüklemeler; analitik olarak belirlenen eleman dayanımlarına uygun seçilen aralıklarda (100, 250 ton), Amsler yükleme aygıtıyla, eksenel doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Aygıtın, düşey yönde hareketli alt tablasının ve deney sırasında küçük yerdeğiştirmelere izin veren mafsalı üst tablasının göreceli hareketini izleyebilmek amacıyla, alt tablanın köşelerine dört adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-50 Displacement Transducer) ve üst tablanın köşelerine iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-10 Displacement Transducer) yerleştirilmiştir. Böylece; referans elemanlarının tüm boyundaki yerdeğiştirme, üst tabladaki

yerdeğiştirmeölçerlerden alınan ortalama verinin, alt tabladan alınan ortalama veriden çıkarılması ile hesaplanmıştır. şekil 4.2. Yükleme aygıtının tablalarının beton elemanlara göre çok yüksek rijitlikte olmasından dolayı, tablalarda oluşan şekildeğiştirmeler ihmal edilmiştir. Referans elemanlarının tüm boyundaki yerdeğiştirmelerle birlikte, orta bölgelerindeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) yerdeğiştirmeler de izlenmiştir. Bunun için, referans elemanlarının dört yüzüne 250 mm aralıkla ikişer adet 10 mm çaplı bulon ankre edilerek CDP-25 tipi yerdeğiştirmeölçerler bu bulonların aralarına yerleştirilmiştir. Böylece, referans elemanlarının orta bölgelerindeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama eksenel yerdeğiştirmeler belirlenmiştir. şekil 4.3. Deney sonuçları değerlendirilirken, bütün yerdeğiştirmeölçerlerden alınan veriler, ölçüm boylarına (250mm, 500mm) bölünüp (boyutsuz) ortalama şekildeğiştirme değerlerine dönüştürülerek kullanılmıştır.



şekil 4.2 Deney Düzeneğinin Genel Görünümü



şekil 4.3 Ölçüm Düzeneği

Deney sırasında, enine doğrultularda oluşan şekildeğişimleri ölçmek için, 60 mm ölçüm boyuna sahip, özel akma-sonrası türündeki şekildeğişimölçerler (PL-60-11-1L) kullanılmıştır. Şekil 4.4. Şekildeğişimölçerler; beton yüzeyler beton yüzeyler düzleştirilip ve temizlenip uygun hale getirildikten sonra, referans elemanlarının komşu iki yüzüne yatay doğrultuda çok amaçlı yapıştırıcı (Pattex Epoxy Mix) kullanılarak yapıştırılmıştır. Şekildeğişimölçerlerin özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Referans Elemanlarının Yüzeyindeki Şekildeğişimölçerler

Tablo 4.1 Şekildeğişimölçer Özellikleri

Şekildeğişimölçer	PL-60-11-1L
Ölçüm Boyu (mm)	60
Ölçüm Katsayısı (%)	2.10 ± 1

4.3 Güçlendirilmiş Elemanlar için Deney Düzenegi

Tüm güçlendirilmiş elemanlar için yüklemeler; analitik olarak belirlenen eleman dayanımlarına uygun seçilen aralıklarda (250, 500 ton), Amsler yükleme aygıtıyla, eksenel doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Deneyler için tasarlanan düzenek aşama aşama geliştirilerek son durumuna ulaşmıştır.

Başlangıç için, Karışım I HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanlar denenmiştir. İlk deneyde, elemanın (LS-R-2-45-M-I) tüm boyundan (500 mm) ölçüm alınmayıp, yalnızca orta bölgesindeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) yerdeğişimlerinin, referans elemanlarında olduğu gibi, belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, elemanın dört yüzüne matkapla delikler açılarak; 250 mm aralıkla ikişer adet bulon,

güçlendirme panellerinin altındaki düşük dayanımlı betona ankre edilmiştir. Deney sırasında elemanın boyuna doğrultuda yapacağı yerdeğiştirmenin, bu bulonların arasına yerleştirilen toplam dört adet CDP-25 türünde yerdeğiştirmeölçerle; enine doğrultuda oluşacak şekildeğiştirmelerin ise komşu iki panel yüzeyine yapıştırılmış toplam iki adet şekildeğiştirmeölçerle (PL-60-11-1L) belirlenmesi tasarlanmıştır, şekil 4.5. Ancak; içteki düşük dayanımlı beton bölümün ve dıştaki güçlendirme panellerinin farklı eksenel şekildeğiştirme yapmaları nedeniyle, içteki betona ankre edilmiş bulonların dönmesi sonucu, tutarlı yerdeğiştirme değerleri okunamamıştır. Buradan yola çıkılarak, aynı gün gerçekteştirilen ikinci deneyde, elemanın (LS-R-1-15-M-I) boyuna doğrultuda yapacağı yerdeğiştirmenin daha sağlıklı belirlenebilmesi için; referans elemanlarında olduğu gibi, orta bölgedeki (yükseklik boyunca oradaki 250 mm) yerdeğiştirmeler ile birlikte, tüm boydaki (500 mm) yerdeğiştirmelerin de ölçülmesi yoluna gidilmiş ve yükleme aygıtının üst ve alt tablalarına yerleştirilen CDP-10 ve CDP-50 türündeki yerdeğiştirmeölçerlerden iyi sonuç alınmıştır, şekil 4.6.

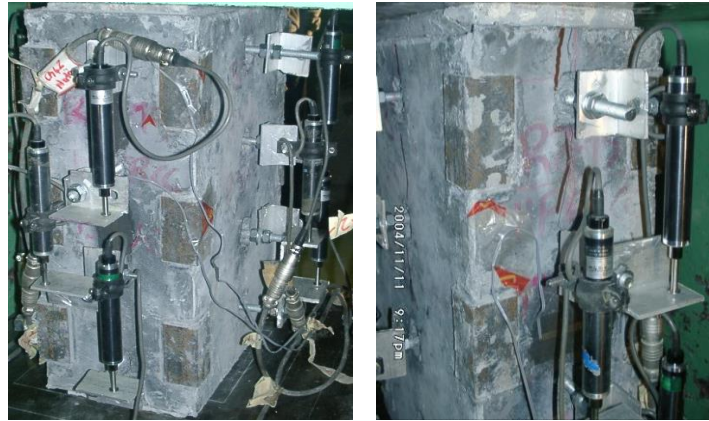


şekil 4.5 LS-R-2-45-M-I Elemanın Ölçüm Düzeneği



şekil 4.6 LS-R-1-15-M-I Elemanın Ölçüm Düzeneği

Orta bölgeye (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerlerden geçerli sonuç alınamamasından dolayı, üçüncü deney için (LS-R-2-15-M-I) düzenekte bazı değişikliklere gidilmiştir. Elemanların yüzlerine bu kez 120 mm aralıklarla dörder bulon sabitlenmiş ve bulonların çevresi matkapla oyularak, panel üzerindeki delikler enine 20'şer mm, boyuna 30'ar mm genişletilmiştir. Bu yolla; içteki düşük dayanımlı beton ile güçlendirme panellerinin farklı kısaltmalarının etkisinin önüne geçilip, daha sağlıklı ölçüm alınması hedeflenmiştir. Her yüzde, bulonlar arasında oluşturulmuş 120 mm'lik üçer adet ölçüm boyunun her biri için birer adet CDP-25 türünde olmak üzere; eleman üzerine toplam on iki adet yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. Böylelikle; elemanın üst, orta ve alt seviyelerindeki kesitlerin şekildeğiştirmeleri arasında önemli bir fark bulunup bulunmadığının da belirlenmesi amaçlanmıştır. Güçlendirme panellerinin enine ve boyuna doğrultudaki şekildeğiştirmelerini izlemek amacıyla ise; iki yüzeye birer adet yatay, diğer bir yüzeye de iki adet düşey olmak üzere toplam dört adet şekildeğiştirmeölçer (PL-60-11-1L) yapıştırılmıştır, Şekil 4.7. Ancak, deney sırasında özellikle orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 120 mm) bulonların; iç kısımdaki düşük dayanımlı beton ile güçlendirme panellerine yapışmış dış kısımdaki düşük dayanımlı betonun farklı eksenel şekildeğiştirme yapması nedeniyle; dönmesine engel olunamamıştır. Yüksek elastisite modülüne sahip HPRCC panelin etkisiyle, panele yapışan (elemanın dış yüzeyine yakın kısımdaki) betonun, iç kısımdaki betona göre daha az şekildeğiştirme yaptığı düşünülmektedir. Bunlara ek olarak, bulon deliklerinin genişletilmesi sonucu, güçlendirme panellerinin kesitleri (beklendiği gibi) zayıflamış ve panellerin etkinliğinde gözle görülür bir azalma oluşmuştur.



Şekil 4.7 LS-R- 2-15-M-I Elemanının Ölçüm Düzeneği

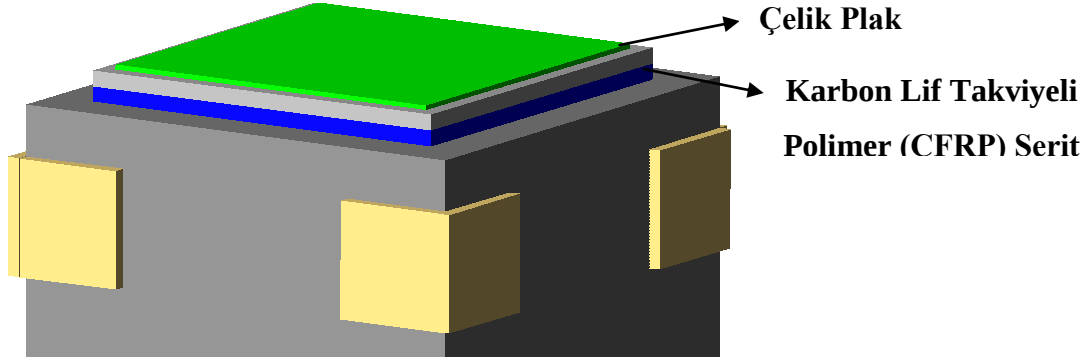
Çoğu deneyde; 460 mm yüksekliğindeki güçlendirme panellerinin üstünde ve altında yer alan 20'şer mm yüksekliğindeki sarılmamış beton bölgerinin, deneyin ileri evrelerinde ezilmesi sonucu; yükleme aygıtının üst ve alt tablalarının, güçlendirme panellerine oturarak, panellerin doğrudan aksenal yük almalarına yol açabildiği gözlenmiştir. Bu durumun önüne geçebilmek için, dördüncü deneyden (LS-R-2-30-M-I) başlanarak; güçlendirme panellerinden itibaren 10'ar mm yüksekliğindeki beton bölgeleri, karbon lif takviyeli polimer (CFRP) şeritlerle sarılmıştır, Şekil 4.8. Uygulanan işlem; sarılan bölgenin, deneyin ileri aşamalarında bile ezilmesini engelleyerek; hedefine ulaşmıştır.



Şekil 4.8 LS-R-2-30-M-I Elemanının Ölçüm Düzeneği ve CFRP Uygulaması

Beşinci deney için (LS-R-1-30-M-I), tutarsız sonuçlar vermeyi sürdüren, orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 120 mm) yerdeğiştirmeölçerlerin kullanımından vazgeçilmiştir. Bunun yerine, elemanların dört yüzüne 360 mm aralıkla ikişer bulon ankre edilmiş ve bu bulonlar arasına toplam dört adet CDP-50 türünde yerdeğiştirmeölçer yerleştirilerek; orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 360 mm) ortalama yerdeğiştirmelerin izlenmesi tasarlanmıştır. Bulon delikleri daha önceki deneylerde olduğu gibi genişletilmiştir. Bir önceki deneyin hazırlığı için uygulanan, CFRP şeritler ile sarma işlemi, bu eleman için de yinelenmiştir. Buna ek olarak, deneyin oldukça ileri düzeydeki şekildeğiştirmelere değin sürdürülebilmesi için; (elemanın alt ve üst uçlarındaki sarılmamış beton bölgelerin aşırı ezilmesiyle oluşabilecek) yükleme aygıtının üst ve alt tablalarının, güçlendirme panellerine doğrudan oturması durumuna engel olunması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu amaçla, yükleme aygıtının üst ve alt tablaları ile beton elemanların üst ve alt yüzleri arasına 3'er mm'lik çelik plaklar yerleştirilerek ek kalınlık sağlanmıştır, Şekil 4.9. Deney sonucunda, orta bölgeden (yükseklik boyunca

ortadaki 360 mm) alınan yerdeğiştirme verilerinin; her ne kadar bulon uçları deneyin ilerleyen aşamalarında yine dönmüş olsa da; ortalama olarak, tüm boydan (500 mm) alınan verilerle tutarlılık gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca; şekildeğiştirmelerin, güçlendirilmiş elemanın üst ve alt seviyelerindeki kesitlerde yoğunlaşmadığı, ölçüm alınan orta bölgenin de önemli oranda şekildeğiştirme yaptığı belirlenmiştir. Buradan hareketle; tüm boydan elde edilen yerdeğiştirme verilerinin geçerli ve tutarlı olduğu sonucuna varılarak, iç kısımdaki güçlendirilmemiş betonun orta bölgesinden alınan ölçümlerden vazgeçilmiştir ve buna bağılı olarak, eleman yüzlerine delikler açılıp genişletilmesine gerek kalmamıştır.



Şekil 4.9 LS-R- 1-30-M-I Elemanının Deney Düzenegi

Bu doğrultuda; sıradaki, (LS-R-3-15-M-I), (LS-R-3-30-M-I) ve (LS-R-3-45-M-I) deneyleri için, elemanların uzun kenarlarından birindeki güçlendirme panelinin üzerine, 360 mm'lik aralıkla iki adet bulon dışarıdan yapıştırılmıştır. Bulonlar arasına yerleştirilen bir adet CDP-50 türü yerdeğiştirmeölçer aracılığıyla, deney sırasında güçlendirme panellerinde oluşan şekildeğiştirmeler izlenmiştir, Şekil 4.10. Sonuç olarak, güçlendirme panellerinin yüzeyinden alınan yerdeğiştirme verilerinin oldukça küçük değerlerde olması dolayısıyla, dışarıdaki güçlendirme panelleri ile

içerideki beton kesitin birbirlerine göre oldukça farklı biçimde şekildeğiştirdikleri kesin olarak anlaşılmıştır.



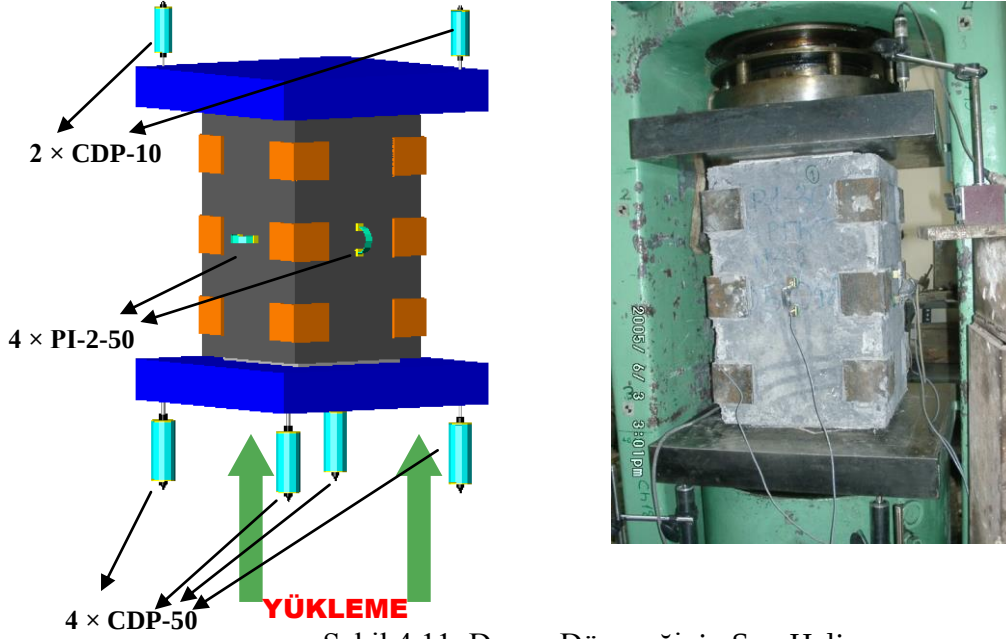
Şekil 4.10 LS-R- 3-30-M-I Elemanının Deney Düzeneği

Buraya kadar gerçekleştirilen deneylerin tamamının değerlendirilmesinin ardından, Karışım II HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanların denenmesine geçilmiştir. Karışım I panellerle güçlendirilmiş elemanların deney sonuçları değerlendirilirken, deney düzeneğinin geliştirilmesi sürecinde ortaya çıkan farklılıklar da dikkate alınmalıdır. Karışım II panellerle güçlendirilmiş tüm elemanların deneylerinde ise aynı düzenek kullanılmıştır.

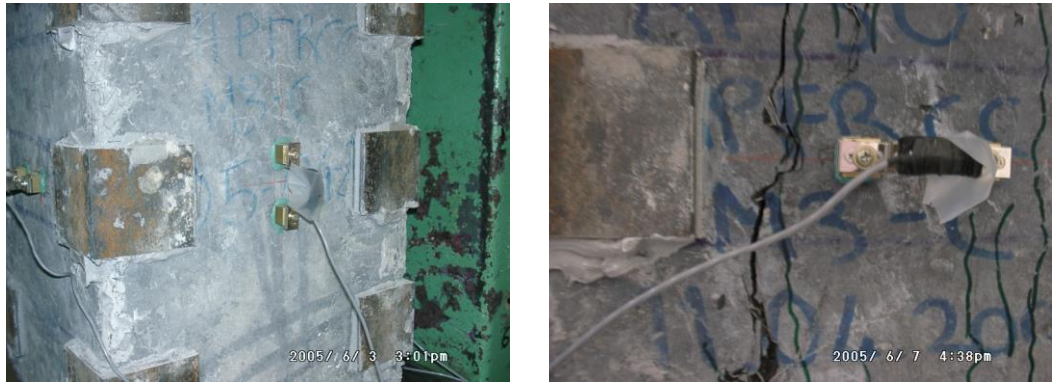
İkinci karışım kümesine ait güçlendirme panellerinin yüksekliğinin 480 mm olarak tasarlanması sonucu, panellerin üstünde ve altında yer alan sarılmamış beton bölgelerinin uzunluğu 10'ar mm'ye düşürülmüş ve CFRP şeritlerle sarma işlemine gerek kalmamıştır. Yükleme aygıtının üst ve alt tablaları ile beton elemanların üst ve alt yüzleri arasına, ek kalınlık sağlamak üzere, 3 mm'lik çelik plaklar yerleştirilmesine ise devam edilmiştir. Deney düzeneğinin son halinde; güçlendirilmiş elemanların yerdeğiştirme değerleri, tüm boydaki (500 mm) yerdeğiştirmeölçerlerden (referans elemanlarının tüm boyundan olduğu gibi) elde edilmiştir. Güçlendirme panellerinin boyuna ve enine doğrultulardaki şekildeğiştirmelerini ölçmek için ise; çatlaklar oluşmaya başladıktan sonra okuma alınamayan ve dolayısıyla ileri seviyelerdeki şekildeğiştirmeleri kaydedemeyen şekildeğiştirmeölçerlerden vazgeçilerek; ± 2 mm düzeyine kadar sağlıklı sonuç verebilen, 50 mm ölçüm boyuna sahip yerdeğiştirmeölçerlerin (TML PI-2-50) kullanılmasına başlanmıştır, Şekil 4.11. Yerdeğiştirmeölçerler, güçlendirilmiş elemanların dört yüzüne birden; komşu iki yüzden birine düşey, diğerine ise yatay

doğrultuda paylaşılacak biçimde; çok amaçlı plastik çelik macun (Sunfix) kullanılarak yapıştırılmıştır, Şekil 4.12.

Deney sonuçları değerlendirilirken, bütün yerdeğiştirmeölçerlerden alınan veriler, ölçüm boylarına (50 mm, 120 mm, 250 mm, 360 mm, 500 mm) bölünüp (boyutsuz) şekildeğiştirme değerlerine dönüştürülerek kullanılmıştır. Tüm deneylerde kullanılan yerdeğiştirmeölçer türlerinin özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Deney Düzenəğinin Son Hali



Şekil 4.12 Güçlendirilmiş Elemanların Yüzeyindeki Yerdeğiştirmeölçerler

Tablo 4.2 Yerdeğiştirmeölçerlerin Özellikleri

Yerdeğiştirmeölçer	CDP-10	CDP-25	CDP-50	PI-2-50
Ölçüm Boyu (mm)	10	25	50	50
Hassasiyet (1/mm)	1000×10^{-6}	500×10^{-6}	200×10^{-6}	2000×10^{-6}

5. DENEY SONUÇLARI

5.1 Giriş

Deneysel çalışma kapsamında; yetersiz dayanıma sahip, dikdörtgen enkesitli, beton elemanlar; yan yüzlerine dört taraftan, öndöküm, yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit (HPFRCC) paneller yapıştırılması yoluyla sargılanarak güçlendirilmiş ve monoton ya da tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmiştir.

Üç farklı türdeki dikdörtgen enkesitlerle (250×250, 150×300, 150×450) üretilen toplam 21 adet beton eleman; derinlik/genişlik oranlarına göre R-1, R-2, R-3 biçiminde isimlendirilmiştir. Her enkesit türü için birer adet referans elemanının güçlendirilmeden denenmesinin ardından, diğer tüm elemanlar; iki farklı karışım türündeki (I ve II), 15, 30 ve 45 mm kalınlıklı öndöküm HPFRCC panellerle sarılıp güçlendirildikten sonra denenmiştir.

Bu bölümde; üç farklı enkesit oranıyla üretilen (h/b ; 1, 2, 3), toplam 21 adet elemanın eksenel yükler altında denenmeleri sonucunda elde edilen bilgiler, her enkesit oranı için ayrı bir başlık altında sunulmuştur.

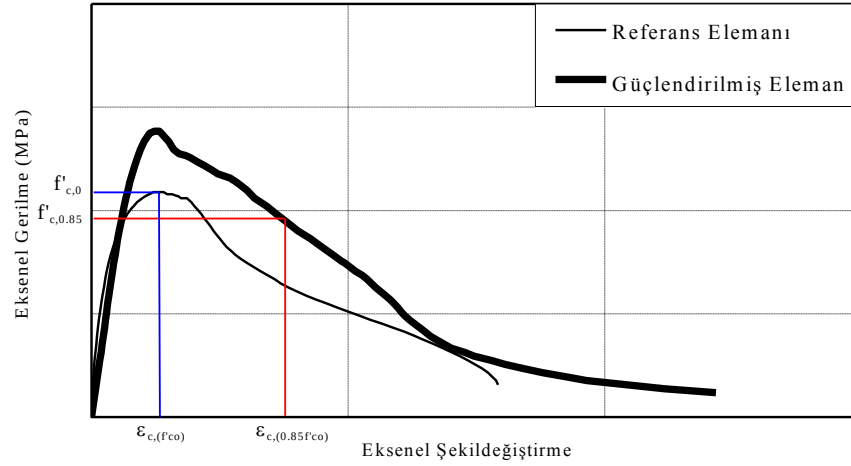
Referans elemanlarının her biri için; tüm boydan (500 mm) alınan ortalama yerdeğiştirme değerleri, orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile karşılaştırılarak grafik halinde verilmiştir. Ayrıca, elemanların beton yüzeylerinden alınan enine şekildeğiştirmeler de birer grafikte verilmiştir.

Öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanların her biri için; tüm boydan (500 mm) alınan ortalama yerdeğiştirme değerleri, güçlendirilmemiş referans elemanlarının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile karşılaştırılarak grafik halinde verilmiştir. Ayrıca; güçlendirilmiş elemanların orta bölgelerinden (deney düzeneği bölümünde anlatıldığı gibi) alınan boyuna şekildeğiştirmeler ile panel yüzeylerinden alınan enine ve boyuna şekildeğiştirmeler de birer grafikte verilmiştir.

Tüm elemanlar için, gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri altında kalan alanlar ile süneklik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buradaki süneklik değerleri denklem (5.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

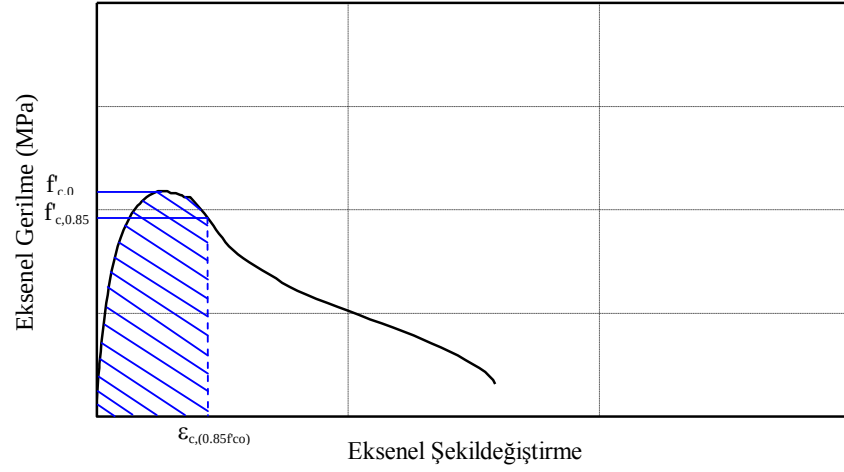
$$\mu = \frac{\varepsilon_{c,(0.85 f'_{co})}}{\varepsilon_{c,(f'_{co})}} \quad (5.1)$$

Denklemde; μ , sünekliği; $\varepsilon_{c,(0.85 f'_{co})}$, (ilgili kesit türüne ait) referans elemanın gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85'i seviyesine karşılık gelen, (ilgili elemanın) eksenel şekildeğiştirme değerini; $\varepsilon_{c,(f'_{co})}$, (ilgili kesit türüne ait) referans elemanın basınç dayanımına karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme değerini simgelemektedir. Şekil 5.1.

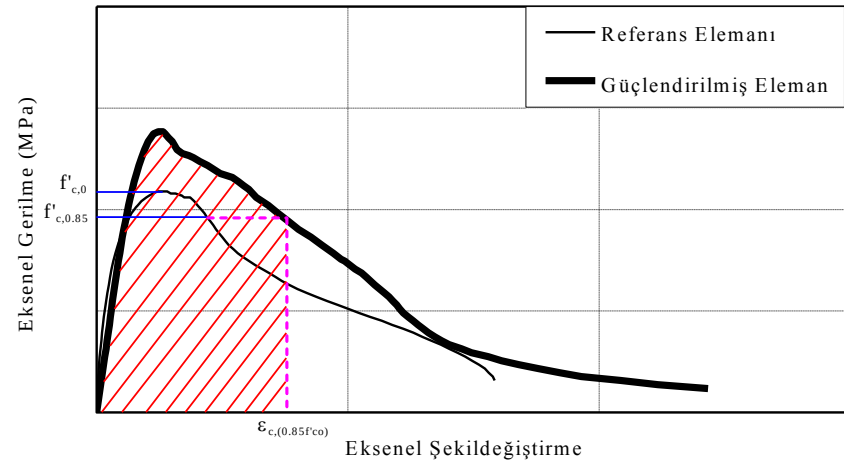


Şekil 5.1 Süneklik Değerlerinin Hesabında Kullanılan Şekildeğiştirmeler

Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri altında kalan alanın hesabında; referans elemanları için, eğrinin düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85'i seviyesine kadar gelen kısmın altında kalan alan dikkate alınmıştır, Şekil 5.2. Güçlendirilmiş elemanlar için ise; güçlendirilmiş eleman eğrisinin, referans elemanı eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85'i hizasındaki kısmın altında kalan alan dikkate alınmıştır, Şekil 5.3.

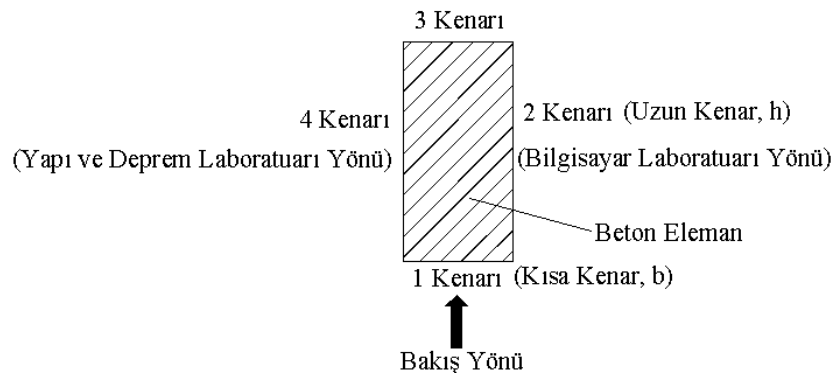


Şekil 5.2 Referans Elemanlarının Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme Eğrileri Altında Kalan Alan



Şekil 5.3 Güçlendirilmiş Elemanların Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme Eğrileri Altında Kalan Alan

Elemanların deney düzeneğine yerleşim planı ve eleman kenarlarının isimlendirilmesi Şekil 5.4’te verilmiştir.

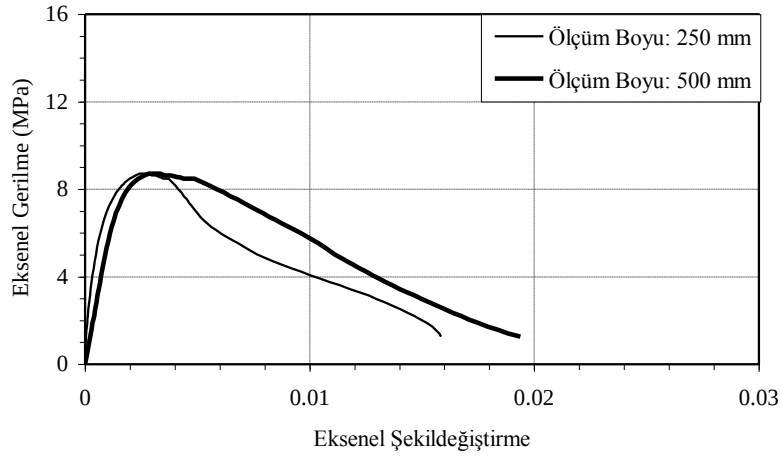


Şekil 5.4 Eleman Yerleşim Planı ve Kenarların İsimlendirilmesi

5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 1; h=250mm; b=250mm)

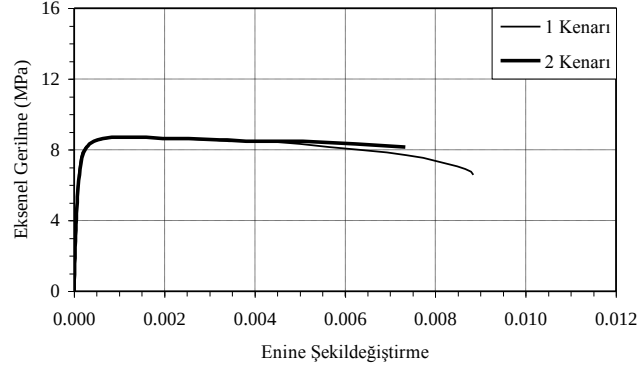
5.2.1 LS-R-1-0-M

28 günlük standart silindir basınç dayanımı 7.2 MPa olan beton ile üretilmiş, 250×250×500 mm boyutlarındaki R-1 elemanlardan biri, referans elemanı olarak; güçlendirilmeden, monoton artan aksenal yükler altında denenmiştir. Referans elemanının gerilme – aksenal şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5 LS-R-1-0-M Gerilme – Aksenal Şekildeğiştirme İlişkisi

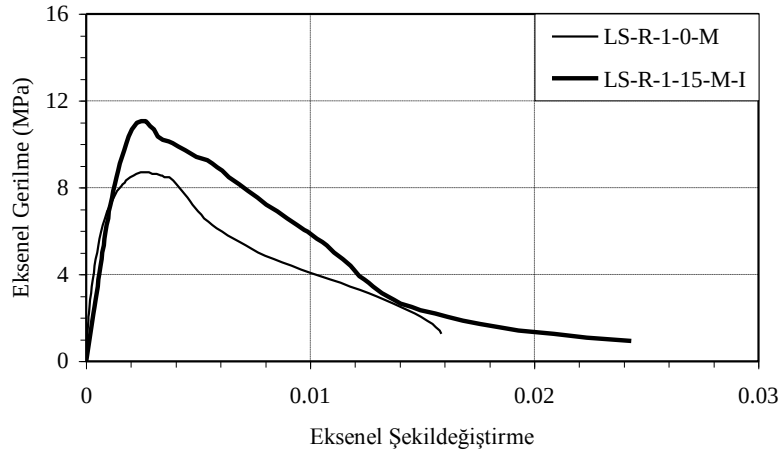
Deney sonuçları değerlendirilirken gözönüne alınan, orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama yerdeğiştirme değerlerinin, özellikle elastik bölge için, tüm boydan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Referans elemanı, 0.0026 aksenal şekildeğiştirme değeri için 8.71 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır ve deney 0.016 aksenal şekildeğiştirme seviyesine kadar devam etmiştir. Gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.03 MPa, süneklik değeri de 1.92 olarak hesaplanmıştır. Beton yüzeyinden şekildeğiştirmeölçerlerle alınan değerlere göre, elemanın 0.0088 seviyesine kadar enine şekildeğiştirme yaptığı belirlenmiştir. Şekil 5.6. Ancak, eleman yüzeyinde çatlak oluşumunun ardından, özellikle (ölçüm alınamayan) çatlayan bölgelerde, çok daha büyük seviyelerde enine şekildeğiştirmelerin gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.6 LS-R-1-0-M Eksenel Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

5.2.2 LS-R-1-15-M-I

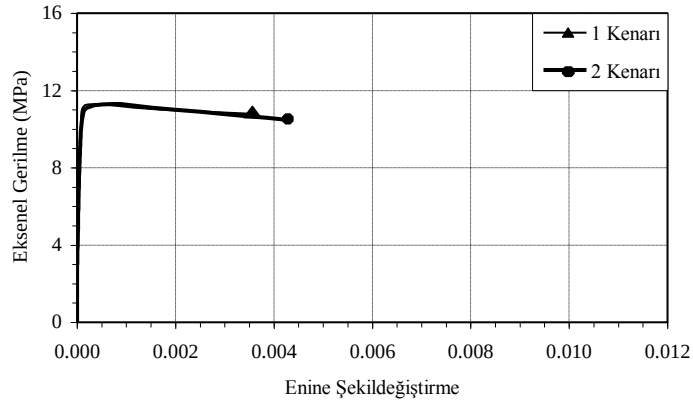
15 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.7’de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.7 LS-R-1-15-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.024 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.07 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.07 MPa; süneklik değeri de 3.15 olarak hesaplanmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinin

yüzeylerinden elde edilen enine şekildeğiştirmelerin aksenal gerilme ile ilişkisi, şekil 5.8’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri şekil 5.9’da verilmiştir.



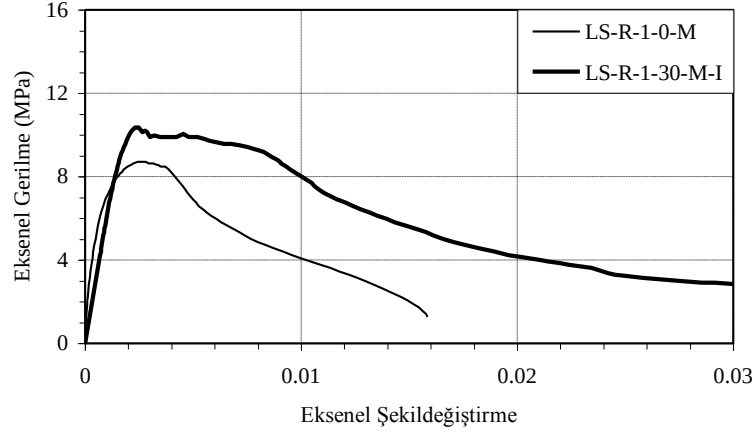
şekil 5.8 LS-R-1-15-M-I Güçlendirme Panellerindeki Aksenal Gerilme – Enine şekildeğiştirme İlişkisi



şekil 5.9 LS-R-1-15-M-I’in Deney Sırasındaki Görünümleri

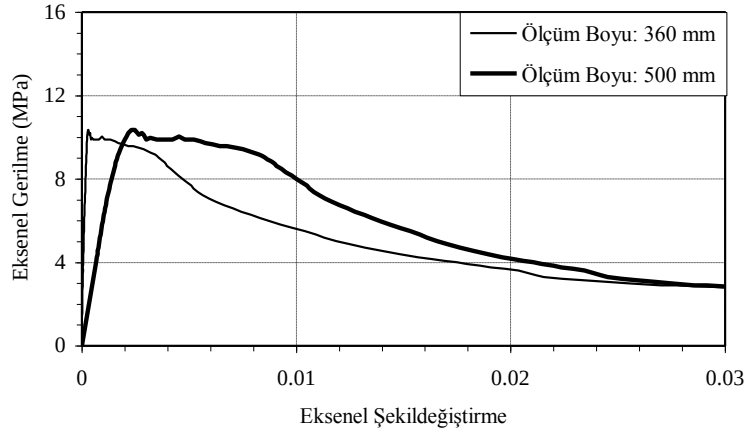
5.2.3 LS-R-1-30-M-I

30 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan aksenal yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – aksenal şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – aksenal şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, şekil 5.10’da verilmiştir. Gerilme – aksenal şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – aksenal şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.

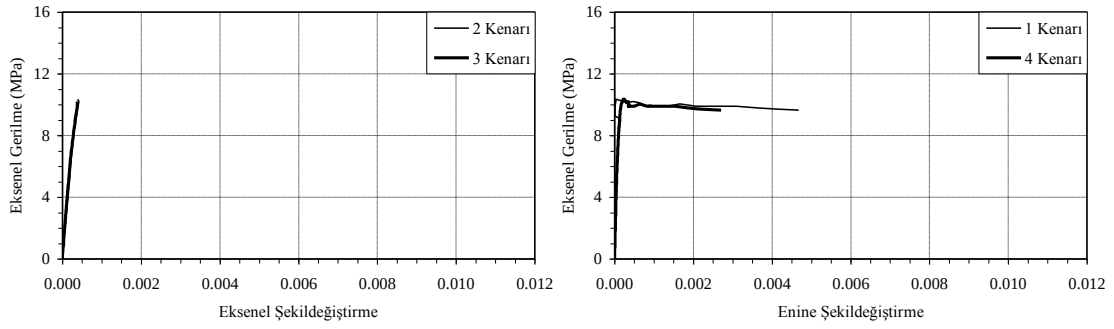


Şekil 5.10 LS-R-1-30-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.030 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 10.36 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın, gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 4.17 olarak hesaplanmıştır. Güçlendirilmiş elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 360 mm) alınan eksenel şekildeğiştirmeler, tüm boydan (500 mm) alınan eksenel şekildeğiştirmelerle birlikte, Şekil 5.11’de verilmiştir. Güçlendirme panellerinin yüzeylerinden şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkisi, Şekil 5.12’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.11 LS-R-1-30-M-I Farklı Ölçüm Boyları İçin Elde Edilen Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkisi



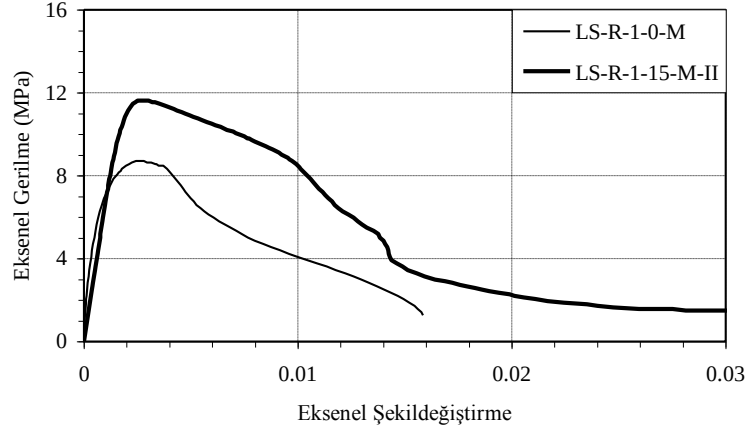
Şekil 5.12 LS-R-1-30-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.13 LS-R-1-30-M-I'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

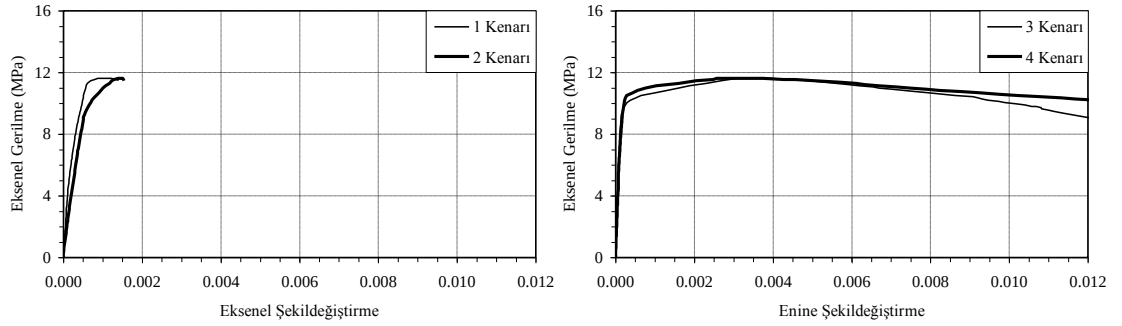
5.2.4 LS-R-1-15-M-II

15 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.14'de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.

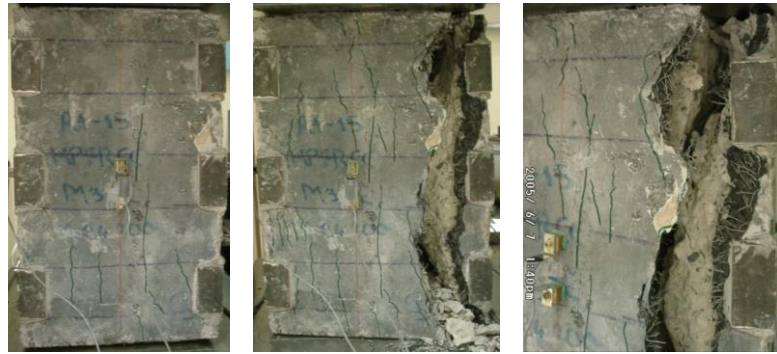


Şekil 5.14 LS-R-1-15-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.030 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.62 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.10 MPa, süneklik değeri de 4.54 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.15'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görüntüleri Şekil 5.16'da verilmiştir.



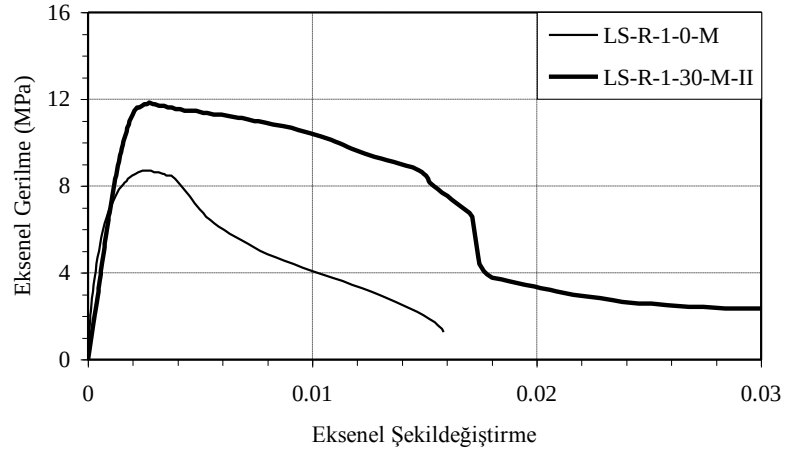
Şekil 5.15 LS-R-1-15-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.16 LS-R-1-15-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

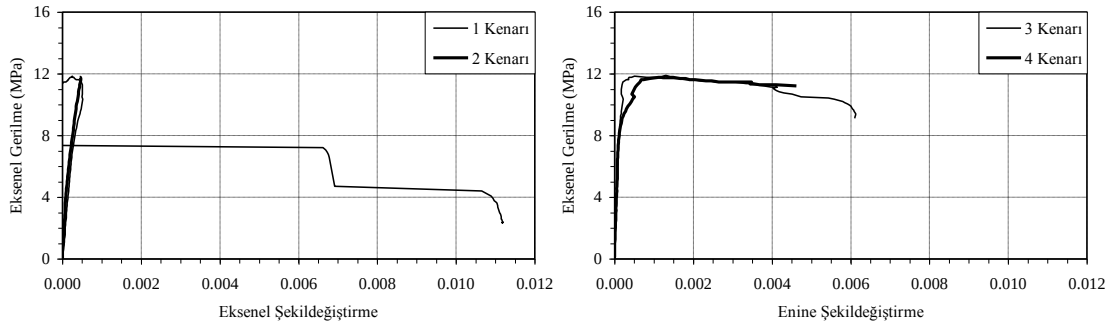
5.2.5 LS-R-1-30-M-II

30 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan aksenal yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – aksenal şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – aksenal şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.17’de verilmiştir. Gerilme – aksenal şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri göz önüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – aksenal şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.17 LS-R-1-30-M-II Gerilme – Aksenal Şekil Değiştirme İlişkisi

0.030 aksenal şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.85 MPa’lık basınç dayanıma ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.16 MPa, süneklik değeri de 6.69 olarak hesaplanmıştır. PI türü yer değiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmelerin, aksenal gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.18’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.19’da verilmiştir.



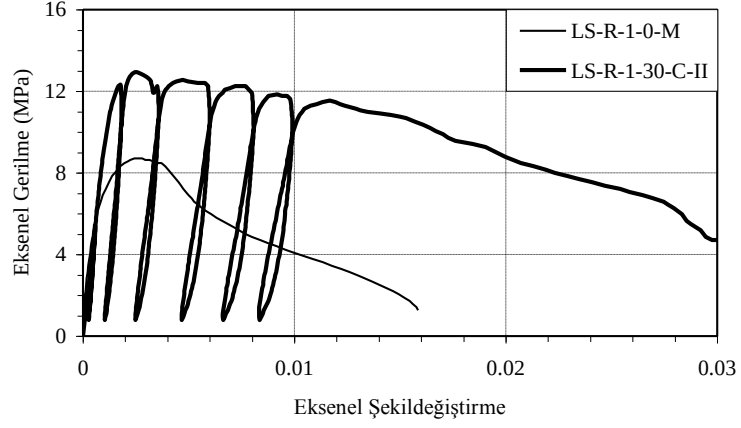
Şekil 5.18 LS-R-1-30-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.19 LS-R-1-30-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

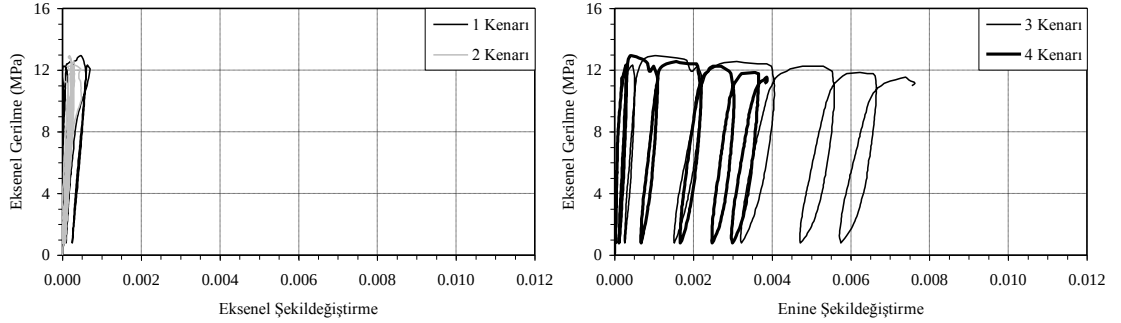
5.2.6 LS-R-1-30-C-II

30 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.20'de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.20 LS-R-1-30-C-II Gerilme – Aksel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.030 aksel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 12.95 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.26 MPa, süneklik değeri de 10.19 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, aksel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.21’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.22’de verilmiştir.



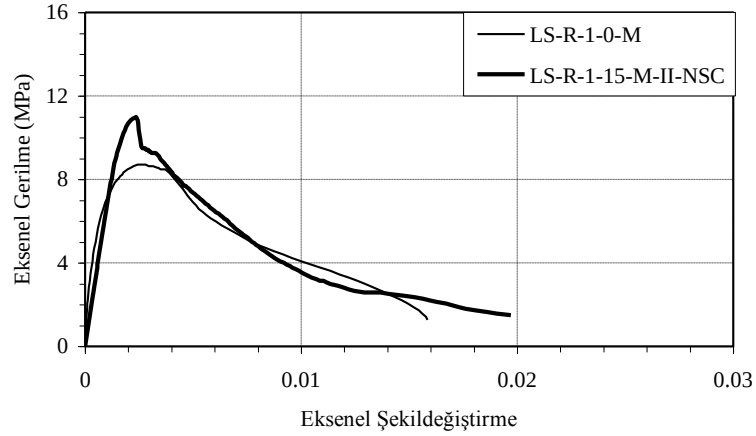
Şekil 5.21 LS-R-1-30-C-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.22 LS-R-1-30-C-II’nin Deney Sırasındaki Görünüşleri

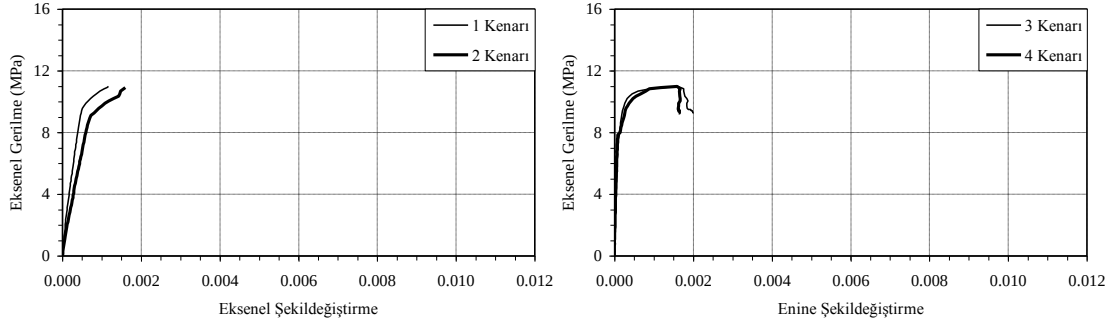
5.2.7 LS-R-1-15-M-II-NSC

15 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş ve panellerin köşe birleşimlerine çelik köşebent uygulanmamış bu elemanın, monoton artan aksenal yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – aksenal şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – aksenal şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.23’de verilmiştir. Gerilme – aksenal şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın dayanımında artış gözlenmiş olmakla birlikte; aynı kalınlıktaki HPFRCC panellerle güçlendirilip köşe birleşimlerine çelik köşebent yapıştırılmış elemana göre, davranıştaki gelişme çok daha sınırlı olmuştur.



Şekil 5.23 LS-R-1-15-M-II-NSC Gerilme – Aksenal Şekil Değiştirme İlişkisi

0.020 aksenal şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 10.99 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.04 MPa, süneklik değeri de 2.06 olarak hesaplanmıştır. PI türü yer değiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmelerin, aksenal gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.24’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.25’de verilmiştir.



Şekil 5.24 LS-R-1-15-M-II-NSC Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.25 LS-R-1-15-M-II-NSC 'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

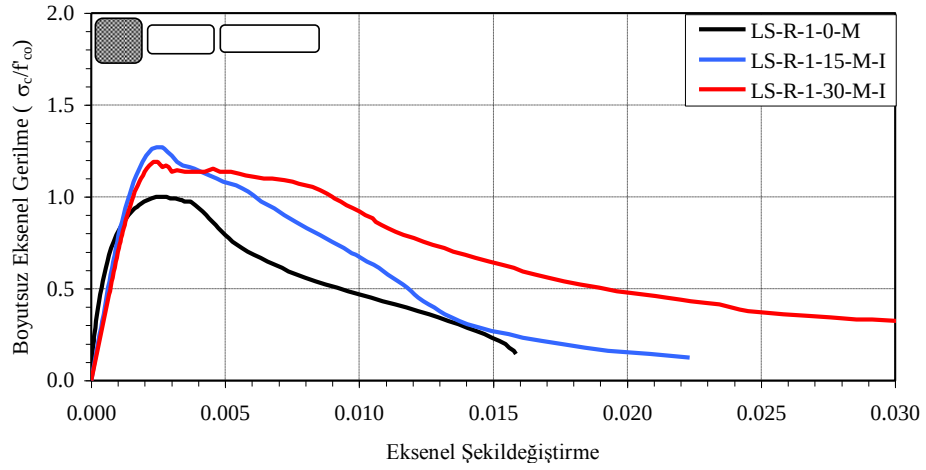
5.2.8 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen elemanlara ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme ile süneklik grafiklerinde, güçlendirilmiş elemanlara ait değerler, referans elemanına oranlanarak verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri altında kalan alanın karşılaştırıldığı grafiklerde ise, tüm elemanlara ait değerler, referans elemanın eğrisinde 0.01 şekildeğiştirme seviyesine kadar gelen kısmın altında kalan alana oranlanarak verilmiştir. R-1 enkesitli elemanlarda incelenen değişkenler:

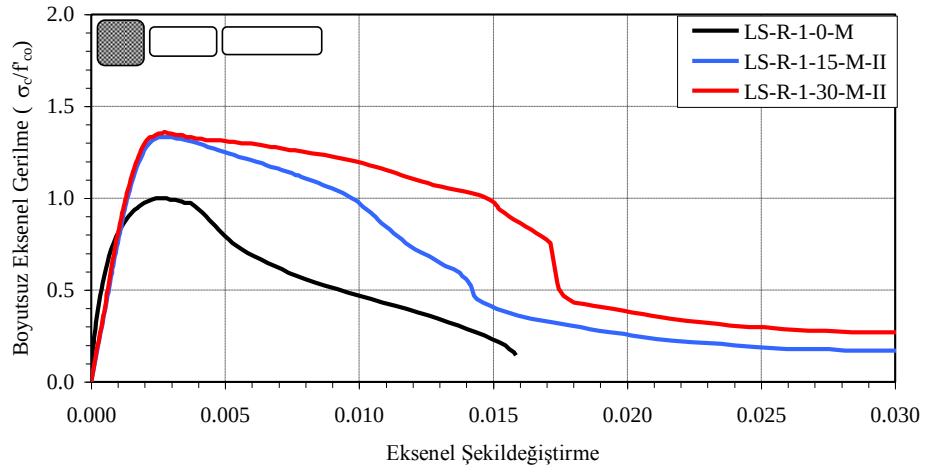
- Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlığı [15 / 30 mm]
- Yükleme Biçimi [Monoton Artan / Tekrarlı]
- HPFRCC Karışım Türü [I / II]
- Çelik Köşebent Uygulanması [Var / Yok]

Öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanlarda; dayanımda, süneklikte ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanda artış elde edilmiştir.

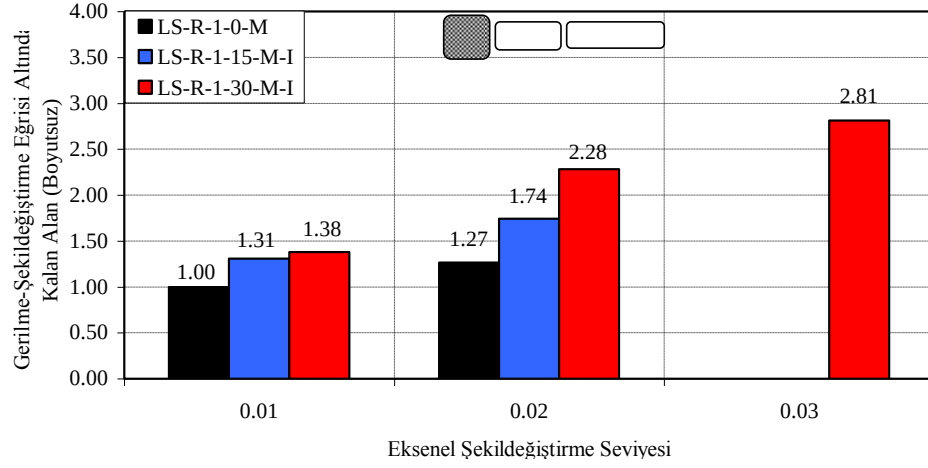
- Güçlendirme panel kalınlıklarındaki artış, dayanım artışı üzerinde belirgin bir etki göstermezken, süneklikte ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış sağlamıştır. Davranıştaki gelişim Karışım II kullanılarak güçlendirilmiş elemanlarda daha belirgindir. Şekil 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31.



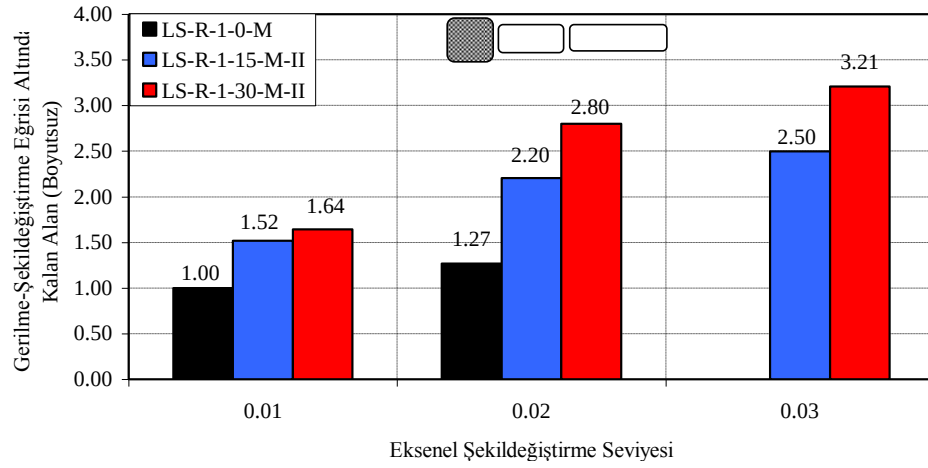
Şekil 5.26 R-1 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranış Etkisi



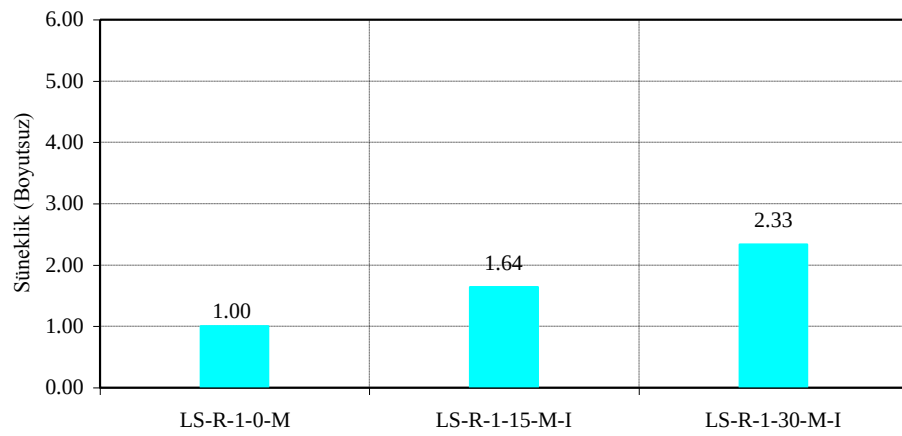
Şekil 5.27 R-1 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranış Etkisi



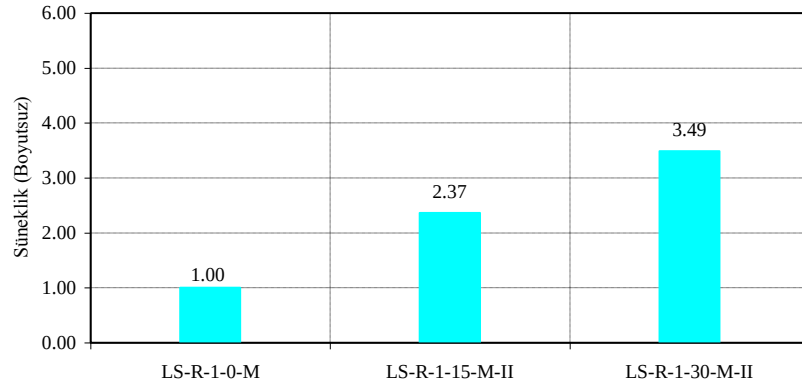
Şekil 5.28 R-1 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.29 R-1 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

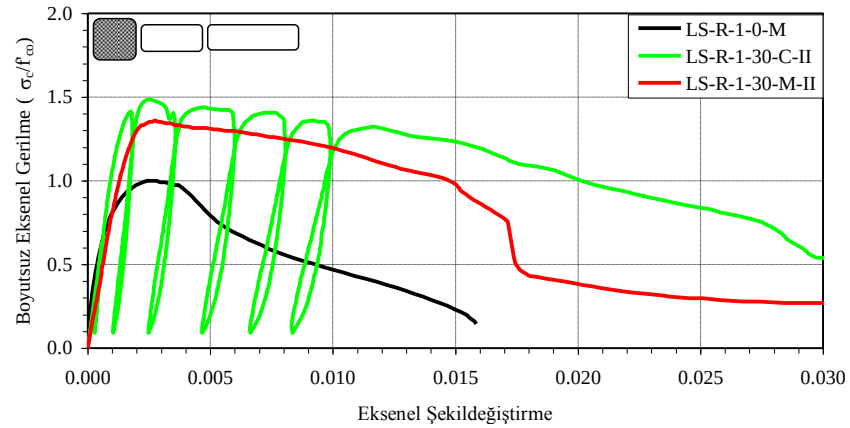


Şekil 5.30 R-1 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi

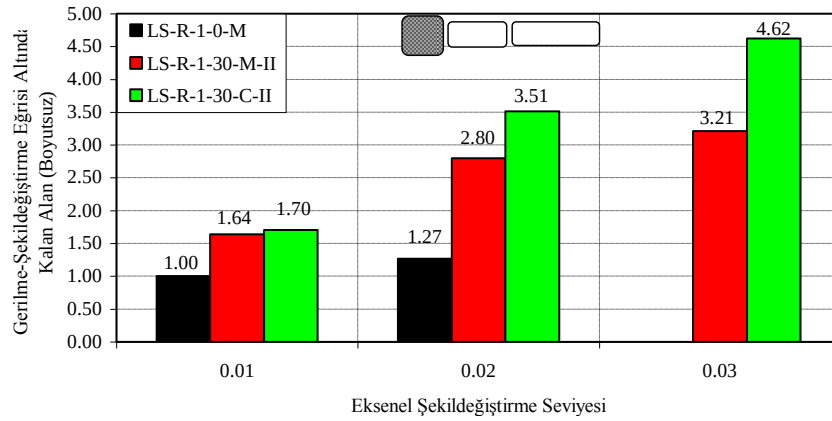


Şekil 5.31 R-1 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi

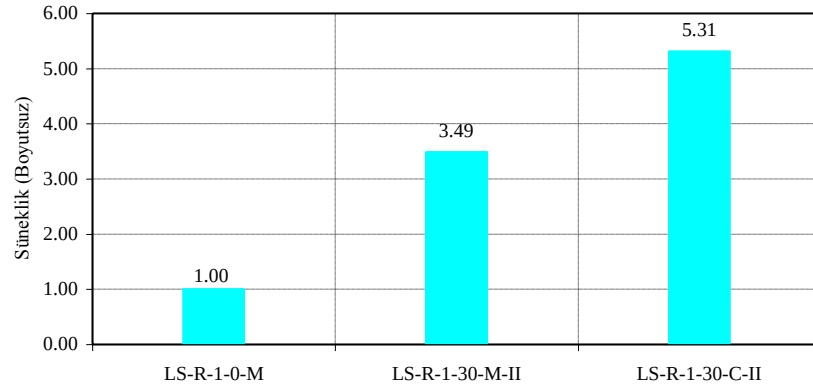
- Tekrarlı artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (LS-R-1-30-C-II); tüm diğer özellikleri aynı olan, ancak monoton artan yükler altında denenen güçlendirilmiş elemana (LS-R-1-30-M-II) yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.32, 5.33, 5.34.



Şekil 5.32 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi

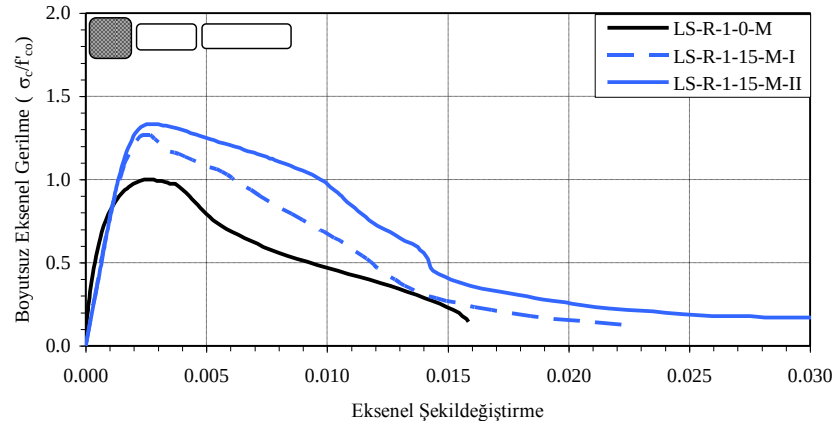


Şekil 5.33 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

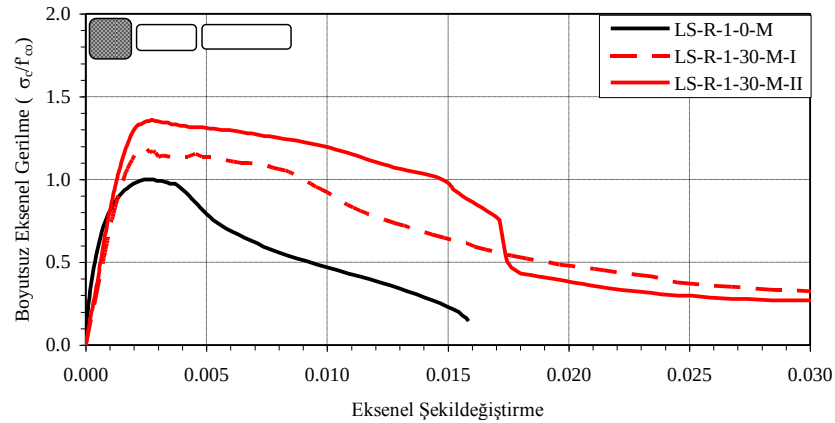


Şekil 5.34 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi

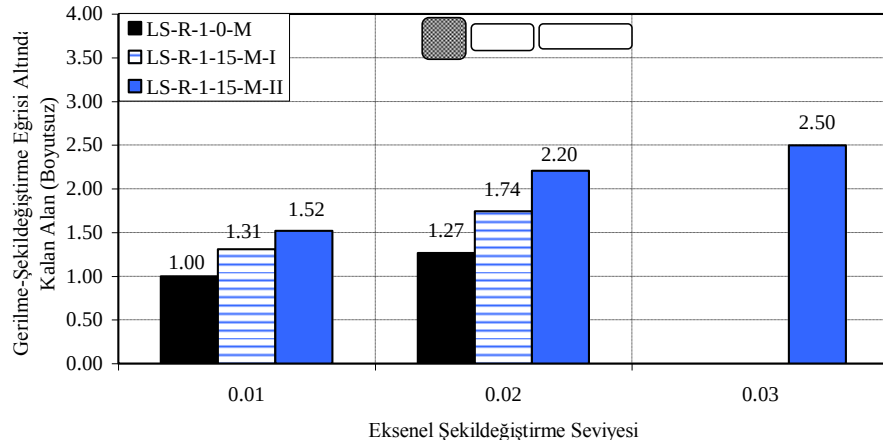
- Öndöküm HPFRCC panel karışımının geliştirilmesi sonucunda; güçlendirilen elemanların dayanımlarında, sünekliklerinde ve gerilme – aksel şekil değiştirme eğrileri altında kalan alanda artış gözlenmiştir. Şekil 5.35, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40.



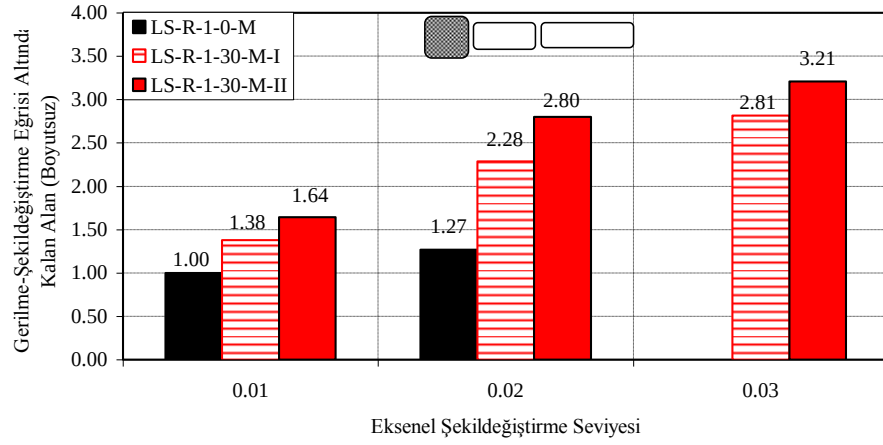
Şekil 5.35 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi



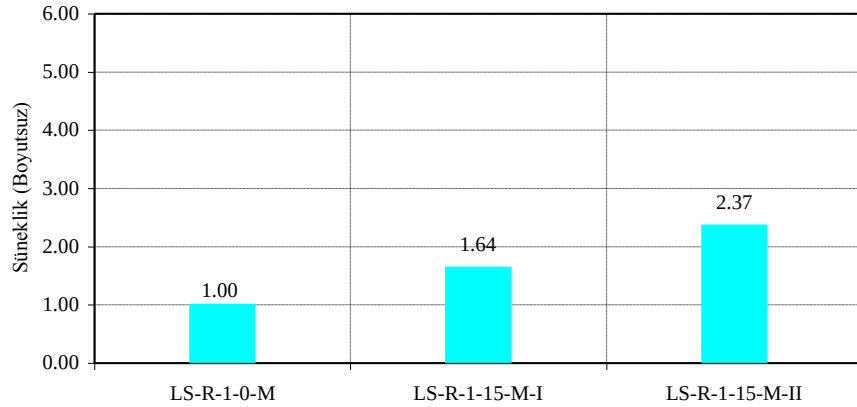
Şekil 5.36 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi



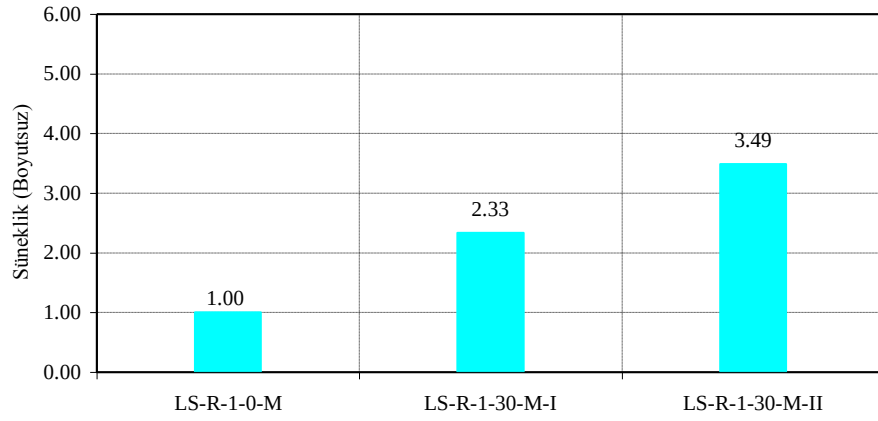
Şekil 5.37 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.38 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

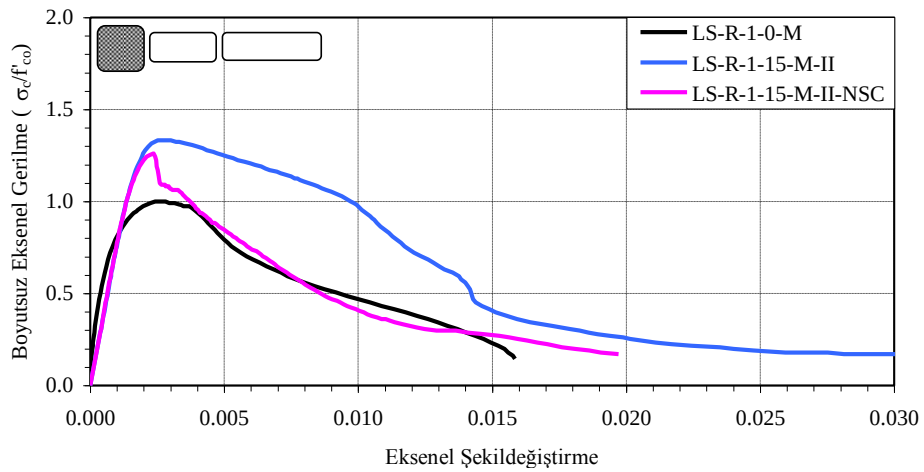


Şekil 5.39 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Süneklığe Etkisi

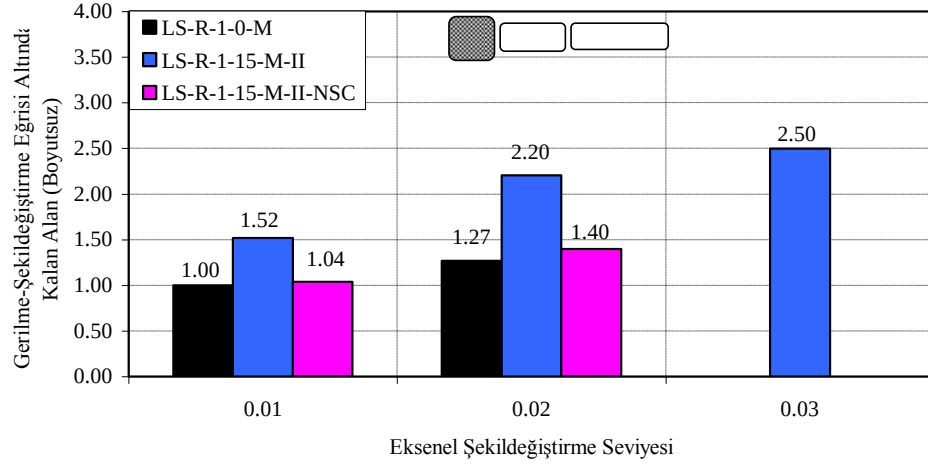


Şekil 5.40 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Süneklığe Etkisi

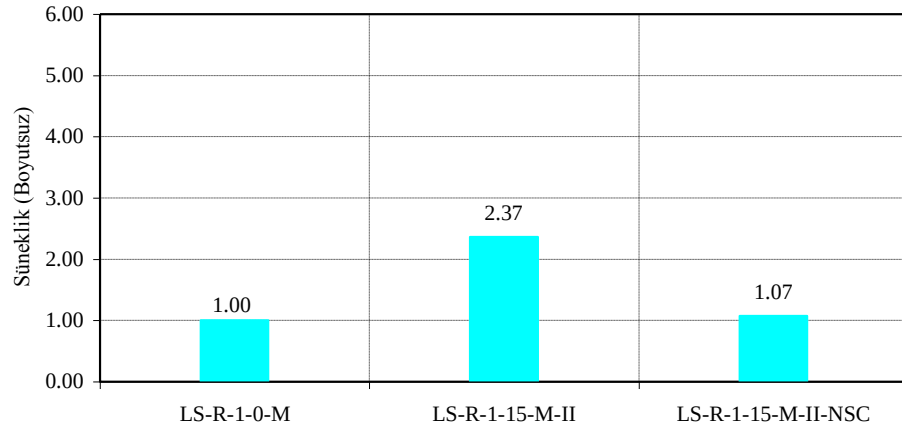
- Güçlendirme panellerinin köşe birleşimlerine çelik köşebent uygulanmamış eleman, diğer tüm özellikleri aynı olan, ancak köşe birleşimlerine çelik köşebent uygulanmış elemana göre oldukça zayıf davranış göstermiştir. Çelik köşebent uygulaması yapılmış elemanda, köşe birleşimlerinde oluşan çatlaklar köşebentlere takılıp ilerleyememiş ve göçme bu yolla ötelenmiştir. Çelik köşebent kullanılmayan elemanda ise panellerin fazla hasar almadan köşe birleşimlerinden ayrılması nedeniyle hem süneklik, hem de gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Şekil 5.41, 5.42, 5.43.



Şekil 5.41 R-1 Enkesitli Elemanlarda Çelik Köşebentlerin Davranışa Etkisi



Şekil 5.42 R-1 Enkesitli Elemanlarda Çelik Köşebentlerin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.43 R-1 Enkesitli Elemanlarda Çelik Köşebentlerin Süneklığe Etkisi

R-1 enkesitli elemanların deney sonuçları özeti, Tablo 5.1’de sunulmuştur. Bu tabloda; j , deney günündeki beton yaşı; f_{cj} , deney gününe ait standart silindir beton basınç dayanımını; $f_{cj(0.85)}$ bu değerin 0.85’ini; $f_{co,j}$, güçlendirilmemiş elemanın basınç dayanımını; f_{cc} , güçlendirilmiş elemanın basınç dayanımını; k , öndöküm HPFRCC panelin deney günündeki yaşı; $f_{HPFRCC,k}$, deney gününe ait standart silindir HPFRCC basınç dayanımını; $f_{t,HPFRCC,k}$, deney gününe ait HPFRCC yarma çekme dayanımını simgelemektedir.

Tablo 5.1 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti

Eleman İsmi	j (Gün)	f' _{c,j} (MPa)	f' _{c,j(0.85)} (MPa)	f' _{co,j} (MPa)	f' _{cc} (MPa)	k (Gün)	f _{HPFRCC,k} (MPa)	f _{t,HPFRCC,k} (MPa)	D.A. %
LS-R-1-0-M	106	10.25	8.72	8.71	-	-	-	-	-
LS-R-1-15-M-I	106	10.25	8.72	-	11.07	29	86.53	8.60	27
LS-R-1-30-M-I	152	10.41	8.85	-	10.36	69	91.89	8.73	19
LS-R-1-15-M-II	319	10.89	9.25	-	11.62	56	111.26	13.71	33
LS-R-1-30-M-II	315	10.88	9.24	-	11.85	58	111.42	13.74	36
LS-R-1-30-C-II	319	10.89	9.25	-	12.95	56	111.26	13.71	49
LS-R-1-15-M-II-NSC	321	10.89	9.26	-	10.99	52	110.94	13.65	26

D.A. : Dayanım artışı (f'_{cc}/ f'_{co,j} %)

R-1 enkesitli elemanların şekildeğiştirme değerleri, Tablo 5.2’de sunulmuştur. Bu tabloda; $\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$, referans elemanın gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85’i seviyesine karşılık gelen, ilgili elemanın eksenel şekildeğiştirme değerini; $\epsilon_{c,(f'_{co})}$, referans elemanın basınç dayanımına karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme değerini; μ , sünekliği ($\epsilon_{c,(0.85f'_{co})} / \epsilon_{c,(f'_{co})}$) simgelemektedir.

Tablo 5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri

Eleman İsmi	$\epsilon_{c,(f'_{co})}$	$\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$	μ	S.A %
LS-R-1-0-M	0.0024	0.0046	1.92	-
LS-R-1-15-M-I	-	0.0076	3.15	64
LS-R-1-30-M-I	-	0.0108	4.47	133
LS-R-1-15-M-II	-	0.0110	4.54	137
LS-R-1-30-M-II	-	0.0162	6.69	249
LS-R-1-30-C-II	-	0.0247	10.19	431
LS-R-1-15-M-II-NSC	-	0.0050	2.06	7

S.A. : Süneklik artışı (%)

R-1 enkesitli elemanların elastisite modülü değerleri, Tablo 5.3’te sunulmuştur. Bu tabloda; $E_{c,250mm}$, elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca 250 mm) elde edilen

şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülünü; $E_{c,500mm}$, elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülünü simgelemektedir.

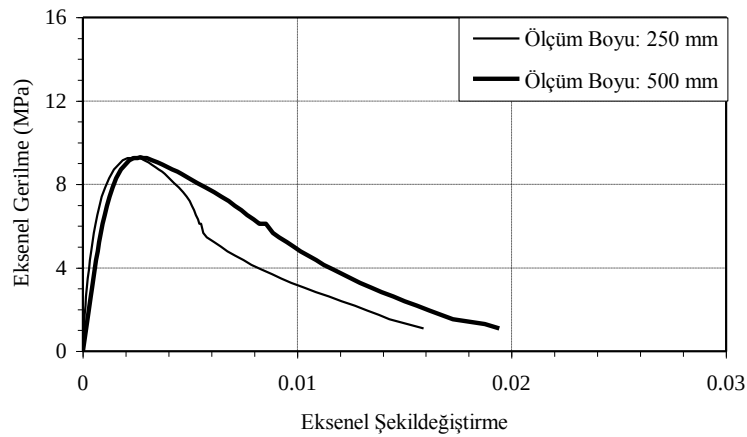
Tablo 5.3 R-1 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri

Eleman İsmi	$E_{c,250mm}$ (MPa)	$E_{c,500mm}$ (MPa)
LS-R-1-0-M	11186	5644
LS-R-1-15-M-I	-	6948
LS-R-1-30-M-I	-	6122
LS-R-1-15-M-II	-	6707
LS-R-1-30-M-II	-	7193
LS-R-1-30-C-II	-	9605
LS-R-1-15-M-II-NSC	-	6906

5.3 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 2; h=300mm; b=150mm)

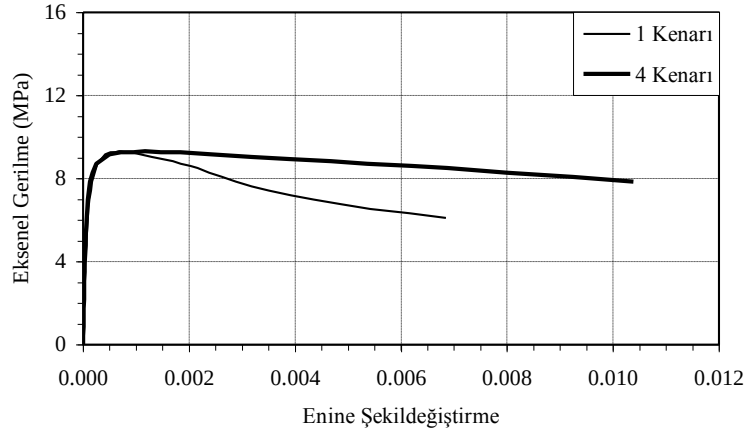
5.3.1 LS-R-2-0-M

28 günlük standart silindir basınç dayanımı 7.2 MPa olan betonla üretilmiş, 150x300x500 mm boyutlarındaki R-2 elemanlardan biri, referans elemanı olarak; güçlendirilmeden, monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Referans elemanının gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5.44’de verilmiştir.



Şekil 5.44 LS-R-2-0-M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

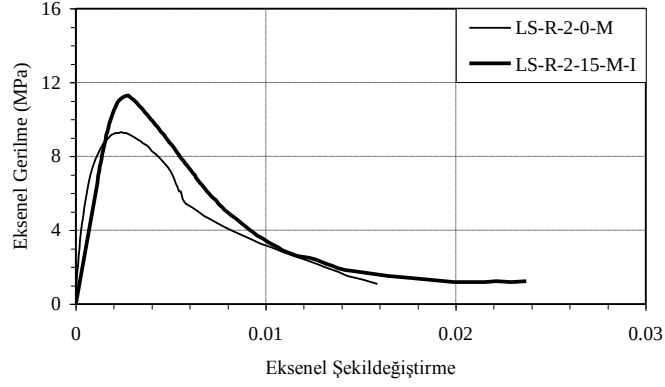
Deney sonuçları değerlendirilirken gözönüne alınan, orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama yerdeğiştirme değerlerinin, özellikle elastik bölge için, tüm boydan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Referans elemanı, 0.0024 eksenel şekildeğiştirme değeri için 9.31 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır ve deney 0.016 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam etmiştir. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.04 MPa, süneklik değeri de 1.88 olarak hesaplanmıştır. Beton yüzeyinden şekildeğiştirmeölçerlerle alınan değerlere göre, elemanın 0.010 seviyesine kadar enine şekildeğiştirme yaptığı gözlenmiştir. Şekil 5.45. Ancak, eleman yüzeyinde çatlak oluşumunun ardından, özellikle (ölçüm alınamayan) çatlayan bölgelerde, çok daha büyük seviyelerde enine şekildeğiştirmelerin gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.45 LS-R-2-0-M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

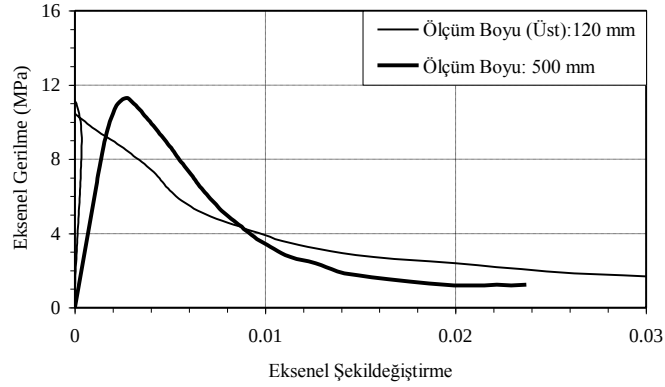
5.3.2 LS-R-2-15-M-I

15 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.46'da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.

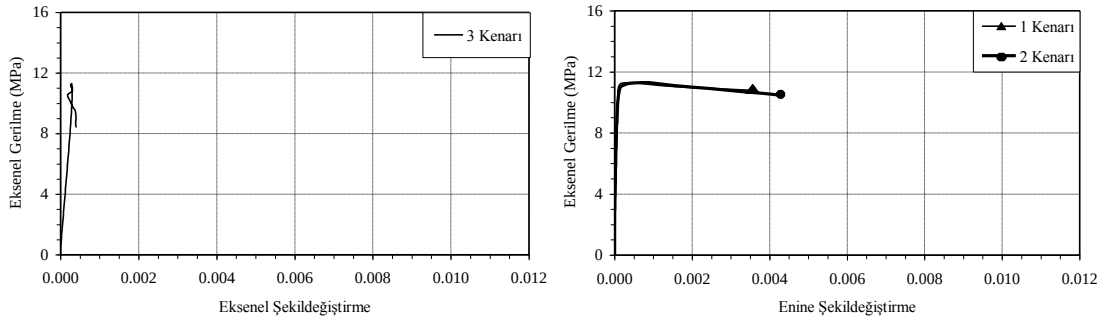


Şekil 5.46 LS-R-2-15-M-I Gerilme – Aksel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.024 aksel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.29 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.05 MPa, süneklik değeri de 2.31 olarak hesaplanmıştır. Orta bölgeden (yükseklik boyunca üstteki 120 mm) alınan boyuna şekildeğiştirmelerin aksel gerilme ile ilişkisi Şekil 5.47’de, güçlendirme panellerinin yüzeylerinden şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin aksel gerilme ile ilişkisi ise Şekil 5.48’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.49’da verilmiştir.



Şekil 5.47 LS-R-2-15-M-I Üst Ölçüm Boyundaki Şekildeğiştirme Değerleri



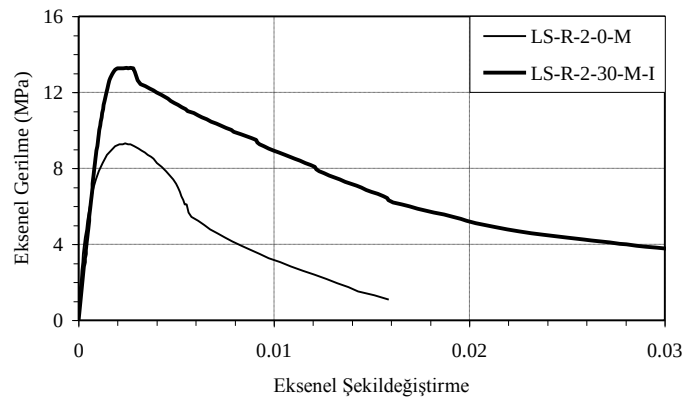
Şekil 5.48 LS-R-2-15-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.49 LS-R-2-15-M-I'in Deney Sırasındaki Görünümleri

5.3.3 LS-R-2-30-M-I

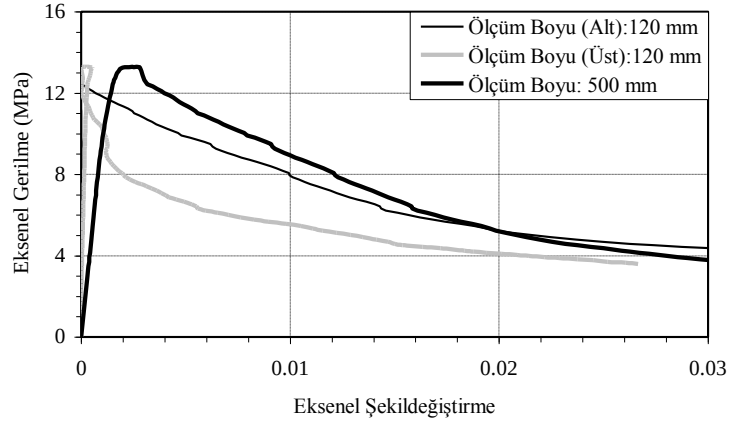
30 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan aksenal yükler altında denenmesiyle elde edilen edilen gerilme – aksenal şekildegıştırme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – aksenal şekildegıştırme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.50'de verilmiştir. Gerilme – aksenal şekildegıştırme eğrileri için, referans elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdegıştırme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – aksenal şekildegıştırme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



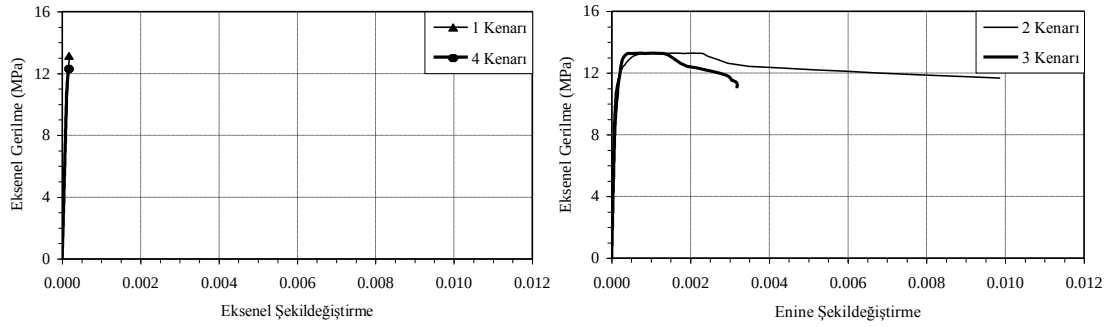
Şekil 5.50 LS-R-2-30-M-I Gerilme – Aksenal Şekildegıştırme İlişkisi

0.030 aksenal şekildegıştırme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 13.3 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildegıştırme eğrisinin altında kalan alan 0.12 MPa, süneklik değeri de 5.11 olarak hesaplanmıştır. Orta bölgeden (yükseklik boyunca üstteki ve alttaki 120 mm) alınan boyuna şekildegıştırmelerin aksenal gerilme ile ilişkisi Şekil 5.51'de, güçlendirme

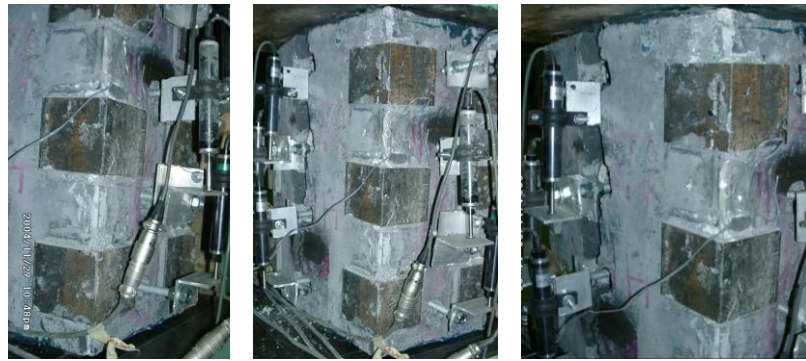
panellerinin yüzeylerinden şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin aksenal gerilme ile ilişkisi ise Şekil 5.52’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümü Şekil 5.53’de verilmiştir.



Şekil 5.51 LS-R-2-30-M-I Üst ve Alt Ölçüm Boylarındaki Şekildeğiştirme Değerleri



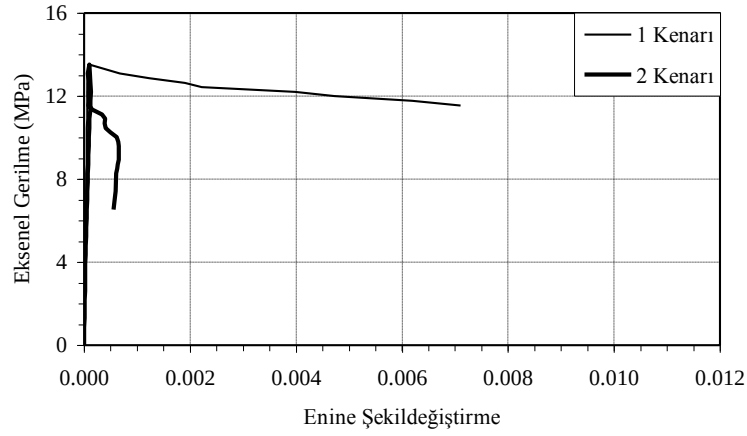
Şekil 5.52 LS-R-2-30-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.53 LS-R-2-30-M-I'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

5.3.4 LS-R-2-45-M-I

45 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın; monoton artan aksenal yükler altında gerçekleşen deneyi sırasında tüm boydan (500 mm) ölçüm alınmamıştır. Orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) elde edilen değerler ise (bulonların, serbest uçlarının sabitlenmiş kısımlarından farklı hareket edip dönmeleri sonucu) tutarsız sonuçlar vermiştir. Güçlendirilmiş elemanın 13.51 MPa'lık basınç dayanımına ulaştığı deney sırasında, şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine şekildeğiştirmelerin aksenal gerilme ile ilişkisi Şekil 5.54'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.55'de verilmiştir.



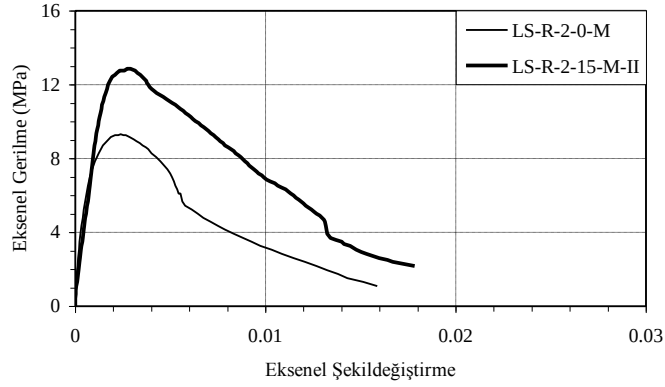
Şekil 5.54 LS-R-2-45-M-I Güçlendirme Panellerindeki Enine Şekildeğiştirme Değerleri



Şekil 5.55 LS-R-2-45-M-I'nin Deney Sırasındaki ve Sonrasındaki Görünüşleri

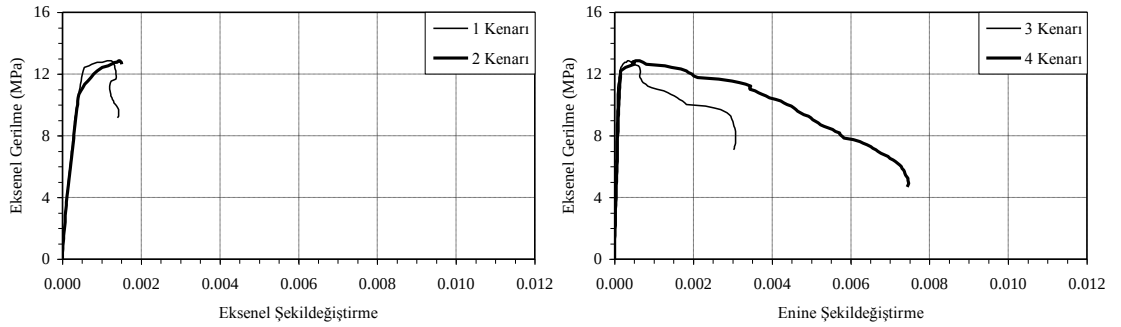
5.3.5 LS-R-2-15-M-II

15 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.56’da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri göz önüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.56 LS-R-2-15-M-II Gerilme – Eksenel Şekil değiştirme ilişkisi

0.018 eksenel şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 12.86 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 3.71 olarak hesaplanmıştır. PI türü yer değiştirme ölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkisi Şekil 5.57’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.58’de verilmiştir.



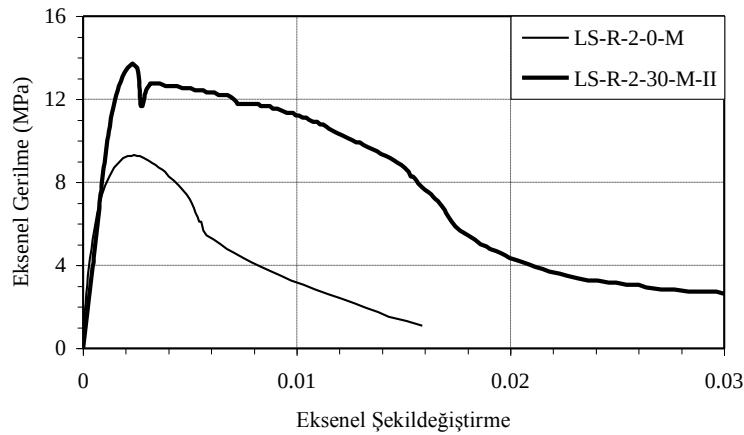
Şekil 5.57 LS-R-2-15-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekil değiştirme ilişkileri



Şekil 5.58 LS-R-2-15-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

5.3.6 LS-R-2-30-M-II

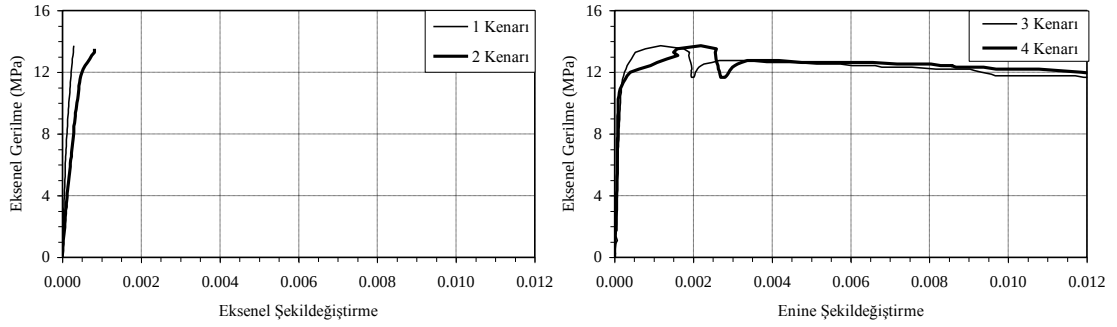
30 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.59'da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.59 LS-R-2-30-M-II Gerilme – Eksenel Şekil değiştirme İlişkisi

0.030 eksenel şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 13.73 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.17 MPa, süneklik değeri de 6.59 olarak hesaplanmıştır. PI türü yer değiştirme ölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkisi Şekil

5.60’da verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümü Şekil 5.61’de verilmiştir.



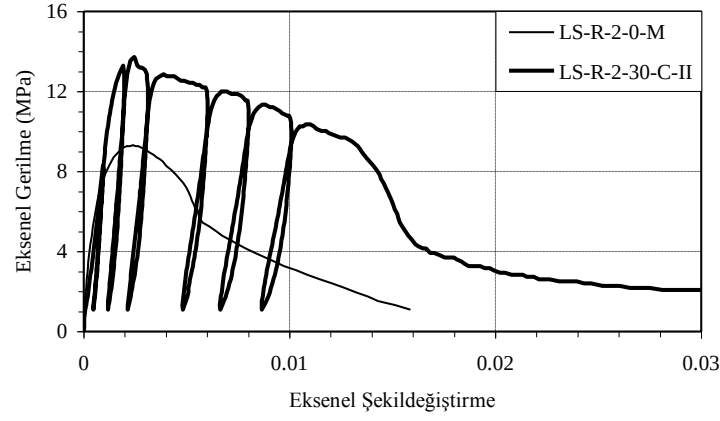
Şekil 5.60 LS-R-2-30-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.61 LS-R-2-30-M-II’nin Deney Sırasındaki Görünümleri

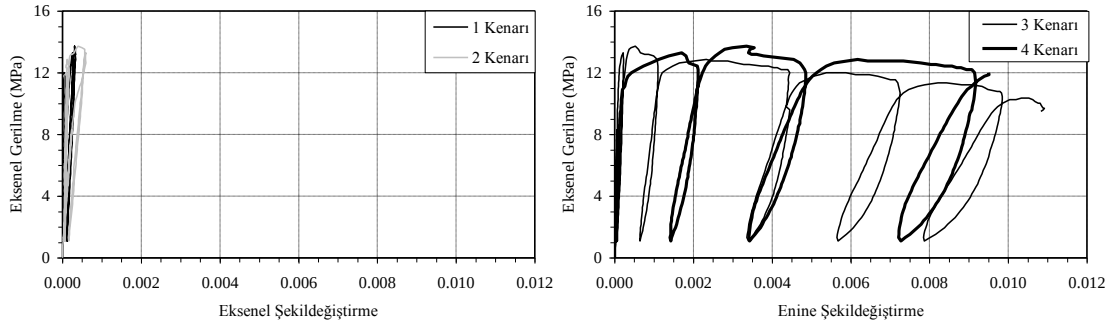
5.3.7 LS-R-2-30-C-II

30 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.62’de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.62 LS-R-2-30-C-II Gerilme – Aksel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.030 aksel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 13.73 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.16 MPa, süneklik değeri de 6.04 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin aksel gerilme ile ilişkisi, Şekil 5.63'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.64'de verilmiştir.



Şekil 5.63 LS-R-2-30-C-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.64 LS-R-2-30-C-II 'nin Deney Sırasındaki Görünüşleri

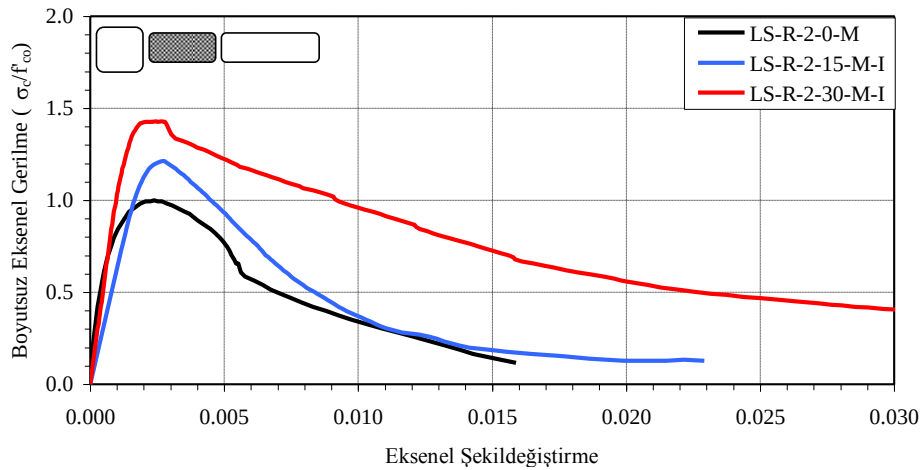
5.3.8 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen elemanlara ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Gerilme – eksenel şekil değiştirme ile süneklik grafiklerinde, güçlendirilmiş elemanlara ait değerler, referans elemanına oranlanarak verilmiştir. Gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrileri altında kalan alanın karşılaştırıldığı grafiklerde ise, tüm elemanlara ait değerler, referans elemanın eğrisinde 0.01 şekil değiştirme seviyesine kadar gelen kısmın altında kalan alana oranlanarak verilmiştir. R-2 enkesitli elemanlarda incelenen değişkenler:

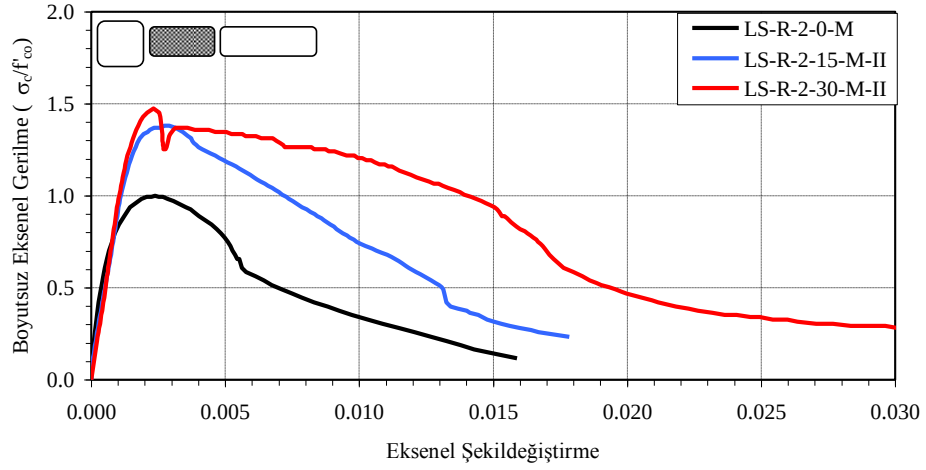
- Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlığı [15 / 30 / 45 mm]
- Yükleme Biçimi [Monoton Artan / Tekrarlı]
- HPFRCC Karışım Türü [I / II]

Öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanlarda; dayanımda, süneklikte ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanda artış elde edilmiştir.

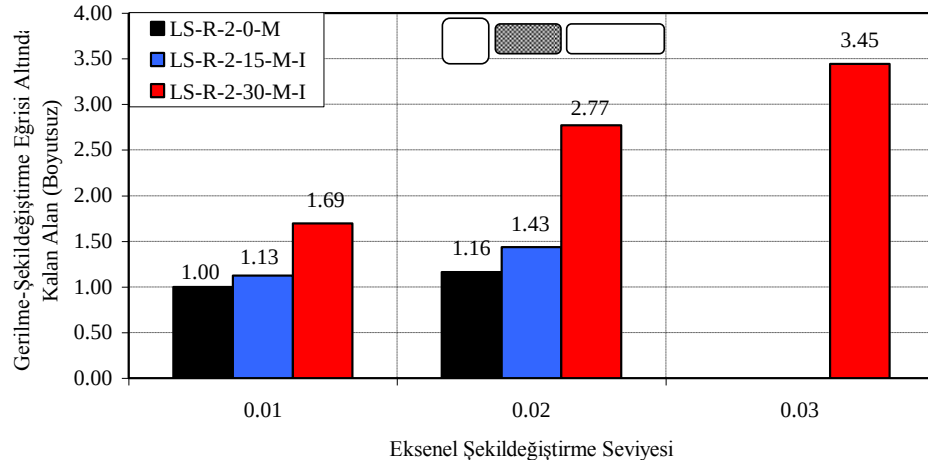
- Güçlendirme panel kalınlıklarındaki artış, denenen elemanların dayanımlarında, sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış sağlamıştır. Şekil 5.65, 5.66, 5.67, 5.68, 5.69, 5.70.



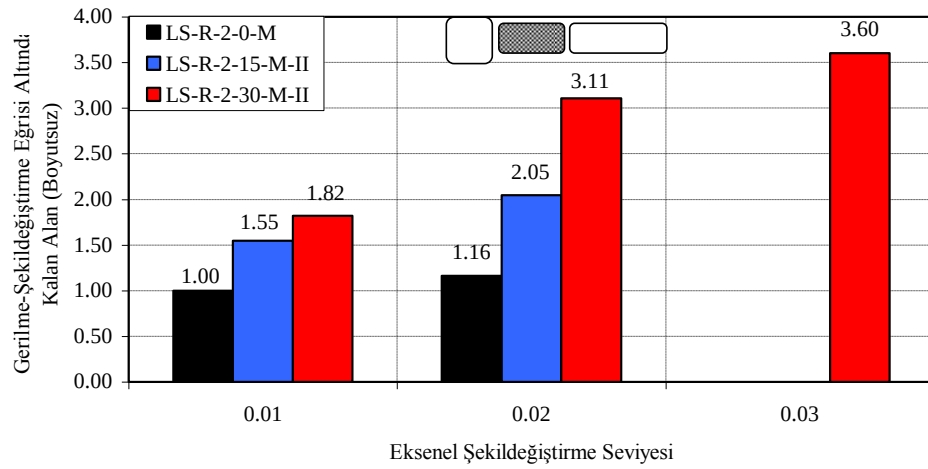
Şekil 5.65 R-2 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi



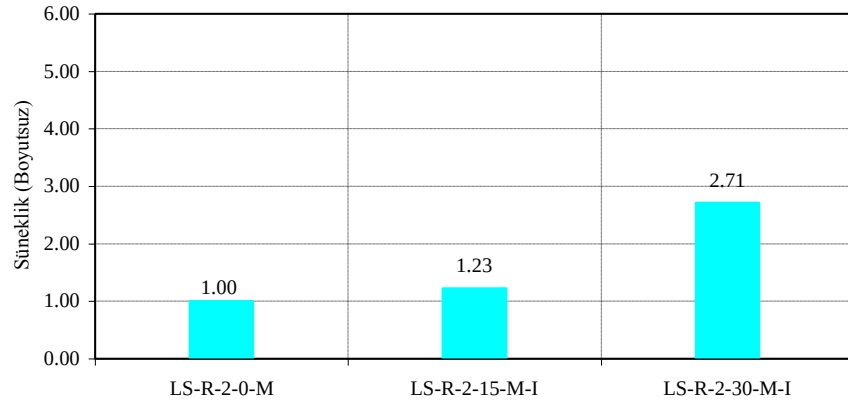
Şekil 5.66 R-2 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi



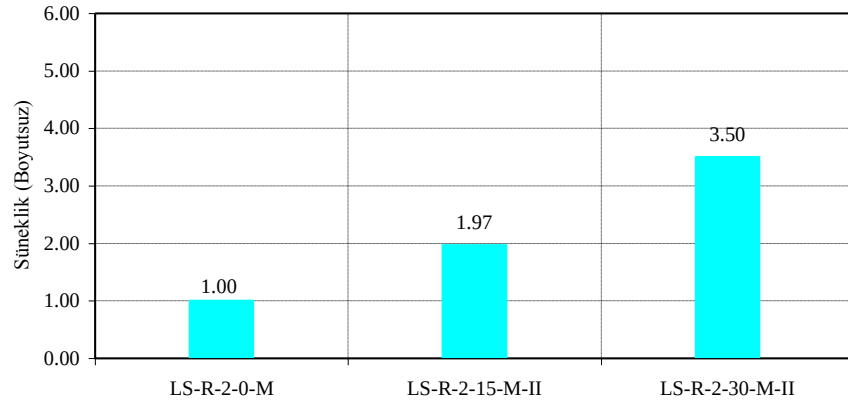
Şekil 5.67 R-2 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.68 R-2 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

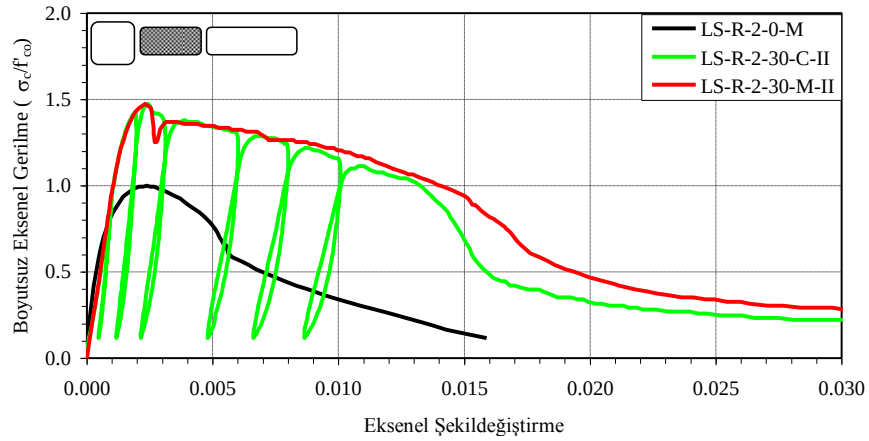


Şekil 5.69 R-2 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi

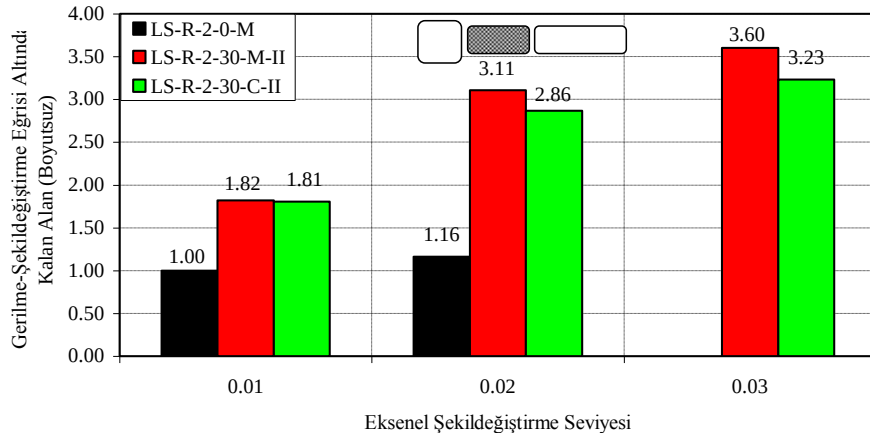


Şekil 5.70 R-2 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi

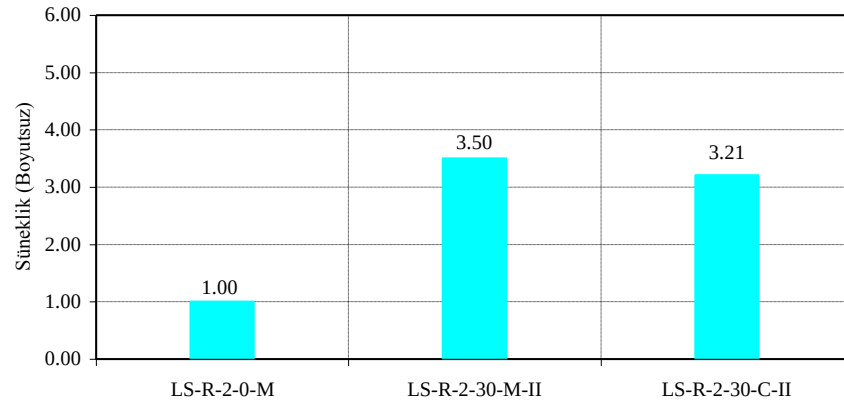
- Tekrarlı artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (LS-R-2-30-C-II); tüm diğer özellikleri aynı olan, ancak monoton artan yükler altında denenen güçlendirilmiş elemana (LS-R-2-30-M-II) oldukça yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.71, 5.72, 5.73.



Şekil 5.71 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi

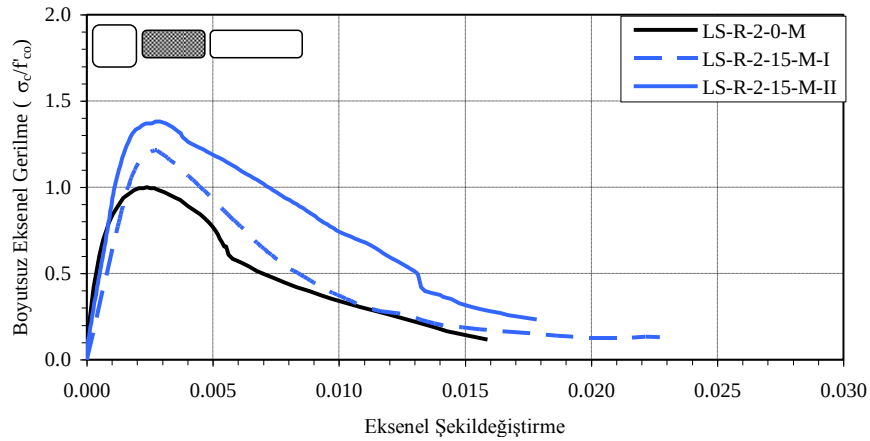


Şekil 5.72 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

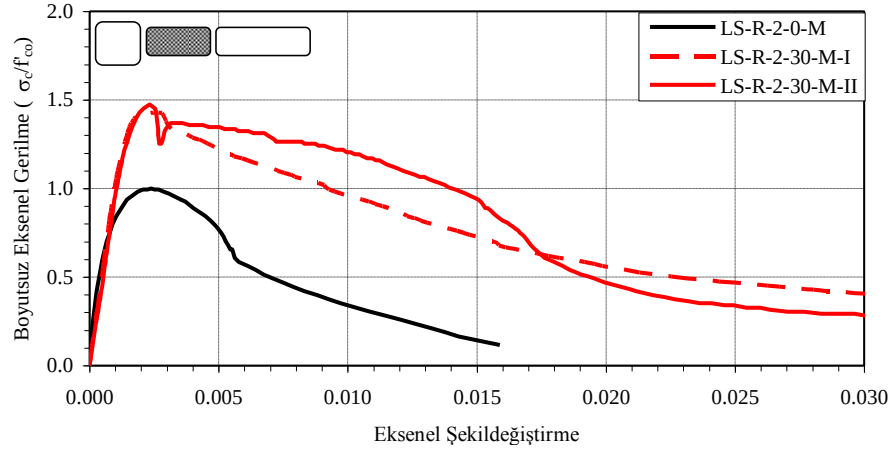


Şekil 5.73 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi

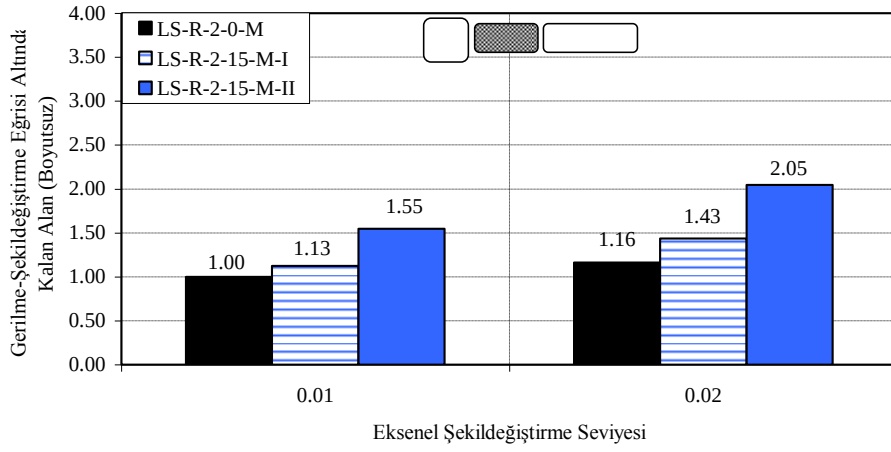
- Öndöküm HPFRCC panel karışımının geliştirilmesi sonucunda; güçlendirilen elemanların dayanımlarında, sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri altında kalan alanda artış gözlenmiştir. Şekil 5.74, 5.75, 5.76, 5.77, 5.78, 5.79.



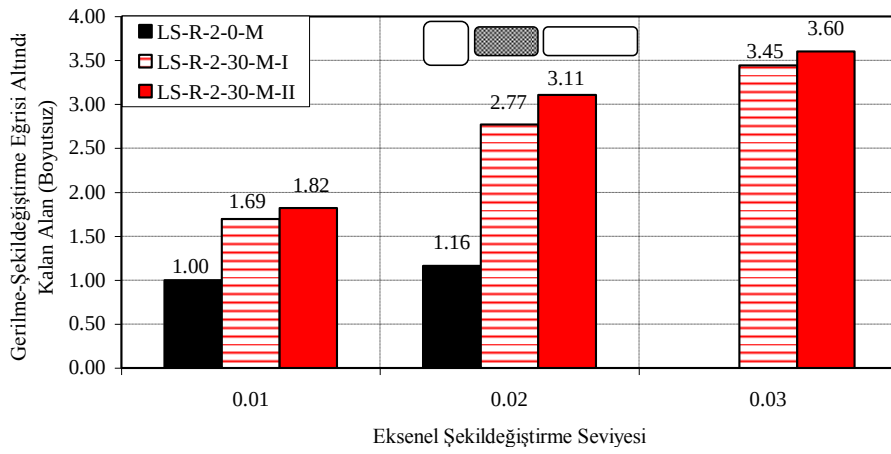
Şekil 5.74 R-2 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi



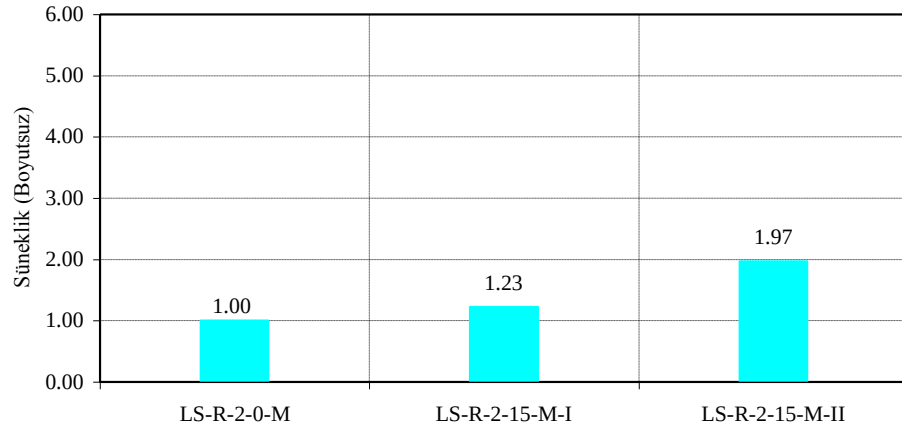
Şekil 5.75 R-2 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi



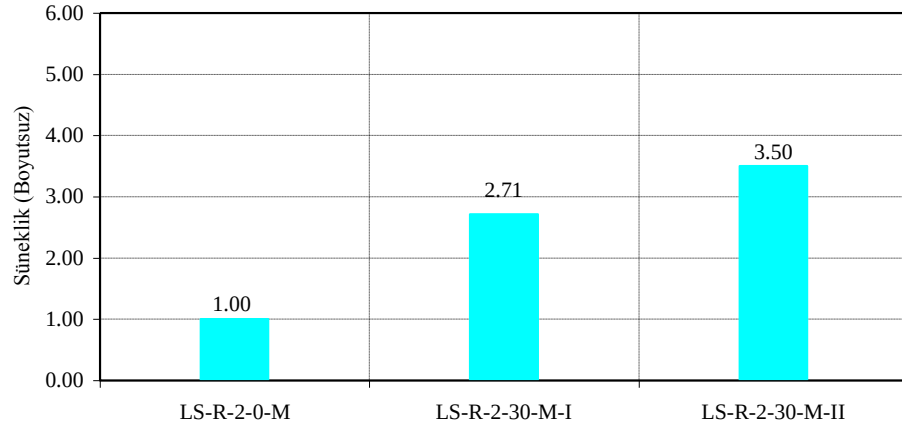
Şekil 5.76 R-2 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.77 R-2 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.78 R-2 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Süneklığe Etkisi



Şekil 5.79 R-2 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Süneklığe Etkisi

R-2 enkesitli elemanların deney sonuçları özeti, Tablo 5.2’de sunulmuştur. Bu tabloda; j , deney günündeki beton yaşı; f'_{cj} , deney gününe ait standart silindir beton basınç dayanımını; $f'_{cj(0.85)}$ bu değerin 0.85’ini; $f'_{co,j}$, güçlendirilmemiş elemanın basınç dayanımını; f'_{cc} , güçlendirilmiş elemanın basınç dayanımını; k , öndöküm HPFRCC panelin deney günündeki yaşı; $f_{HPFRCC,k}$, deney gününe ait standart silindir HPFRCC basınç dayanımını; $f_{t,HPFRCC,k}$, deney gününe ait HPFRCC yarma çekme dayanımını simgelemektedir.

Tablo 5.4 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti

Eleman İsmi	j (Gün)	$f'_{c,j}$ (MPa)	$f'_{c,j(0.85)}$ (MPa)	$f'_{co,j}$ (MPa)	f'_{cc} (MPa)	k (Gün)	$f_{HPFRCC,k}$ (MPa)	$f_{t,HPFRCC,k}$ (MPa)	D.A. %
LS-R-2-0-M	106	10.25	8.72	9.31	-	-	-	-	-
LS-R-2-15-M-I	112	10.27	8.73	-	11.29	29	86.53	8.60	21
LS-R-2-30-M-I	130	10.33	8.78	-	13.30	49	89.21	8.67	43
LS-R-2-45-M-I	106	10.25	8.72	-	13.51	29	86.53	8.60	45
LS-R-2-15-M-II	315	10.88	9.24	-	12.86	58	111.42	13.74	38
LS-R-2-30-M-II	321	10.89	9.26	-	13.73	52	110.94	13.65	47
LS-R-2-30-C-II	325	10.90	9.27	-	13.73	49	110.69	13.60	47

D.A. : Dayanım artışı ($f'_{cc}/f'_{co,j}$ %)

R-2 enkesitli elemanların şekildeğiştirme değerleri, Tablo 5.5’de sunulmuştur. Bu tabloda; $\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$, referans elemanın gerilme – aksel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85’i seviyesine karşılık gelen, ilgili elemanın aksel şekildeğiştirme değerini; $\epsilon_{c,(f'_{co})}$, referans elemanın basınç dayanımına karşılık gelen aksel şekildeğiştirme değerini; μ , sünekliği ($\epsilon_{c,(0.85f'_{co})} / \epsilon_{c,(f'_{co})}$) simgelemektedir.

Tablo 5.5 R-2 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri

Eleman İsmi	$\epsilon_{c,(f'_{co})}$	$\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$	μ	S.A %
LS-R-2-0-M	0.0024	0.0045	1.88	-
LS-R-2-15-M-I	-	0.0055	2.31	23
LS-R-2-30-M-I	-	0.0122	5.11	171
LS-R-2-15-M-II	-	0.0088	3.71	97
LS-R-2-30-M-II	-	0.0157	6.59	250
LS-R-2-30-C-II	-	0.0144	6.04	221

S.A. : Süneklik artışı (%)

R-2 enkesitli elemanların elastisite modülü değerleri, Tablo 5.6’da sunulmuştur. Bu tabloda; $E_{c,250mm}$, elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca 250 mm) elde edilen

şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülünü; $E_{c,500mm}$, elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülünü simgelemektedir.

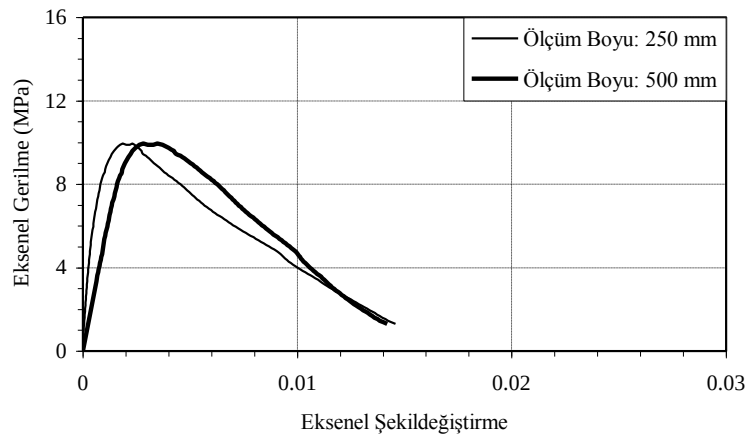
Tablo 5.6 R-2 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri

Eleman İsmi	$E_{c,250mm}$ (MPa)	$E_{c,500mm}$ (MPa)
LS-R-2-0-M	13533	7269
LS-R-2-15-M-I	-	5851
LS-R-2-30-M-I	-	9826
LS-R-2-15-M-II	-	7875
LS-R-2-30-M-II	-	8875
LS-R-2-30-C-II	-	8551

5.4 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 3; h=450mm; b=150mm)

5.4.1 LS-R-3-0-M

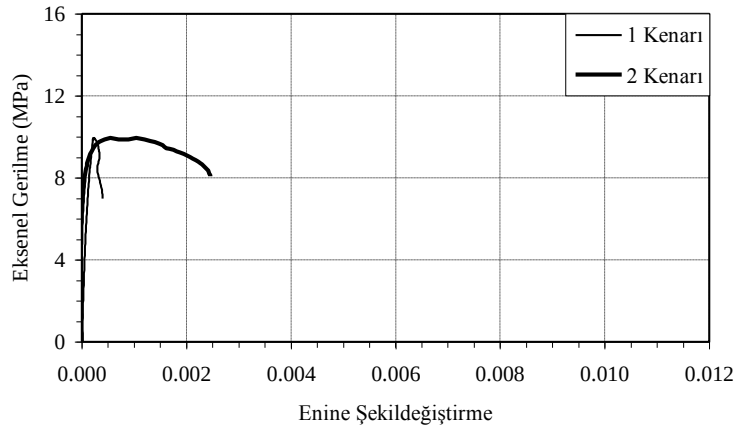
28 günlük standart silindir basınç dayanımı 7.2 MPa olan betonla üretilmiş, 150x450x500 mm boyutlarındaki R-3 elemanlardan biri, referans elemanı olarak; güçlendirilmeden, monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Referans elemanının gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5.80’de verilmiştir.



Şekil 5.80 LS-R-3-0-M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme ilişkisi

Deney sonuçları değerlendirilirken gözönüne alınan, orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama yerdeğiştirme değerlerinin, özellikle elastik

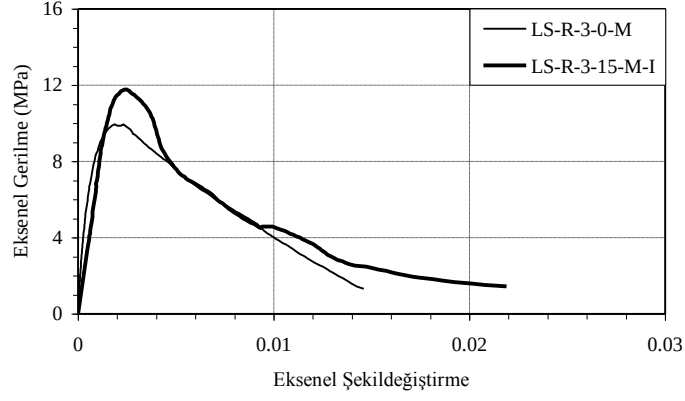
bölge için, tüm boydan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Referans elemanı, 0.0019 eksenel şekil değiştirme değeri için 9.96 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır ve deney 0.015 eksenel şekil değiştirme seviyesine kadar devam etmiştir. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.03 MPa, süneklik değeri de 2.14 olarak hesaplanmıştır. Beton yüzeyinden şekil değiştirme ölçerlerle alınan değerlere göre, elemanın 0.0025 seviyesine kadar enine şekil değiştirme yaptığı gözlenmiştir. Şekil 5.81. Ancak, eleman yüzeyinde çatlak oluşmasının ardından, özellikle (ölçüm alınamayan) çatlayan bölgelerde, çok daha büyük seviyelerde enine şekil değiştirmelerin gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.81 LS-R-3-0-M Gerilme – Enine Şekil Değiştirme İlişkisi

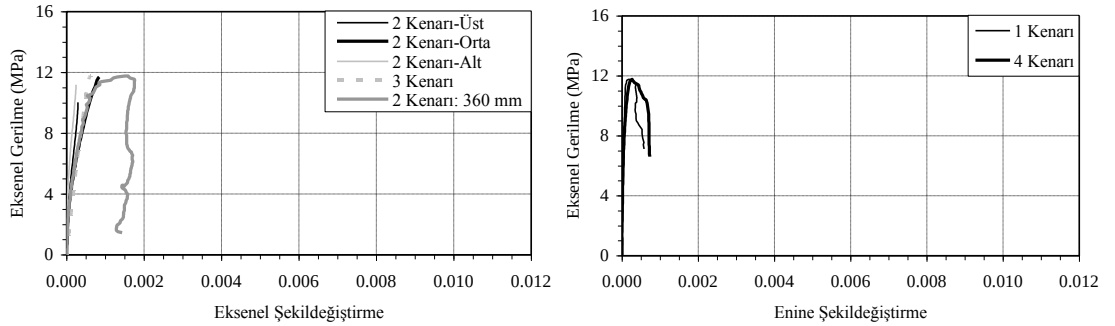
5.4.2 LS-R-3-15-M-I

15 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.82’de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.

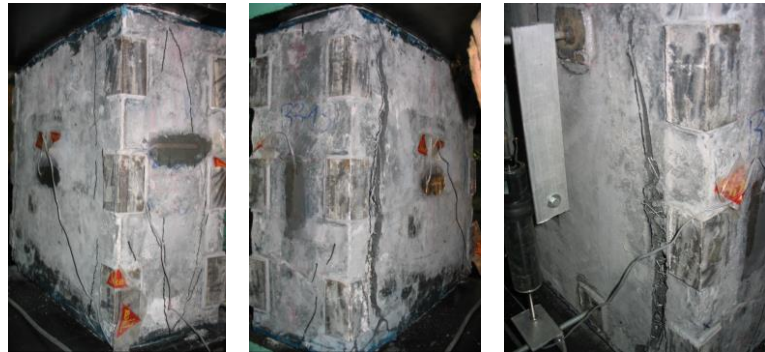


Şekil 5.82 LS-R-3-15-M-I Gerilme – Aksel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.022 aksel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.77 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.04 MPa, süneklik değeri de 2.37 olarak hesaplanmıştır. Güçlendirme panellerinin yüzeylerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmeler ile uzun kenardaki bir panelin orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 360 mm) alınan boyuna şekildeğiştirmelerin, aksel gerilme ile ilişkileri Şekil 5.83’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.84’de verilmiştir.



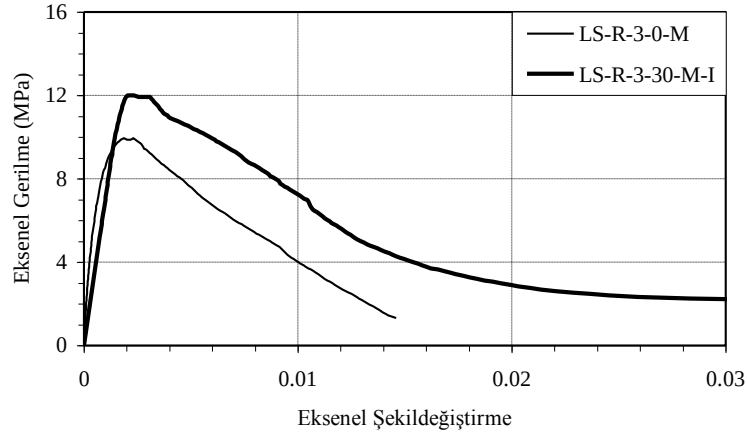
Şekil 5.83 LS-R-3-15-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.84 LS-R-3-15-M-I’in Deney Sırasındaki Görünüşleri

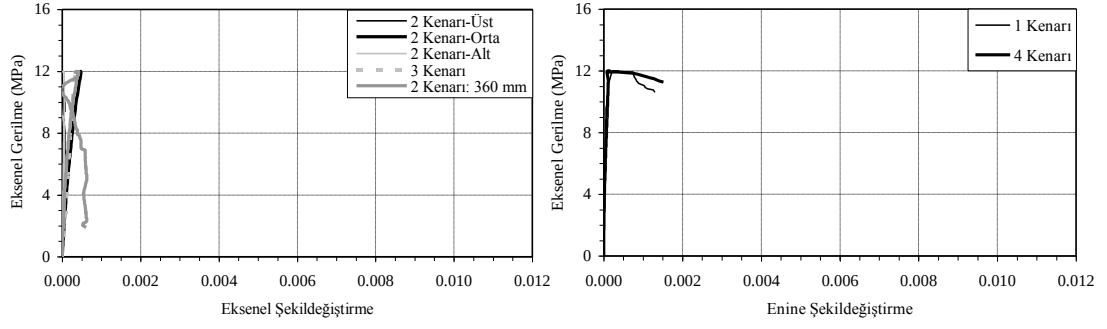
5.4.3 LS-R-3-30-M-I

30 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.85’te verilmiştir. Gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri göz önüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.85 LS-R-3-30-M-I Gerilme – Eksenel Şekil değiştirme İlişkisi

0.030 eksenel şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.99 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.08 MPa, süneklik değeri de 4.47 olarak hesaplanmıştır. Güçlendirme panellerinin yüzeylerindeki şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmeler ile uzun kenardaki bir panelin orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 360 mm) alınan boyuna şekil değiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri Şekil 5.86’da verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.87’de verilmiştir.



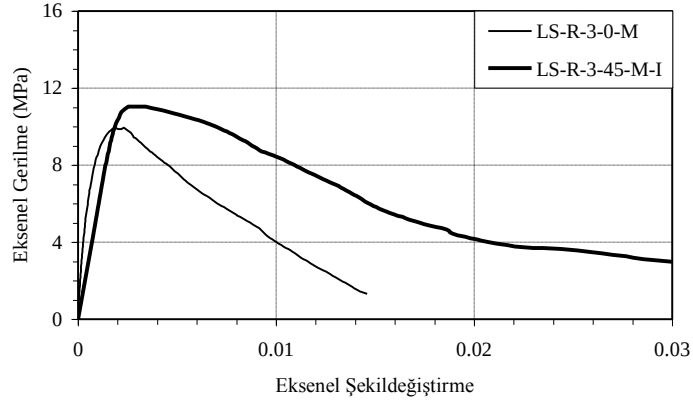
Şekil 5.86 LS-R-3-30-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.87 LS-R-3-30-M-I'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

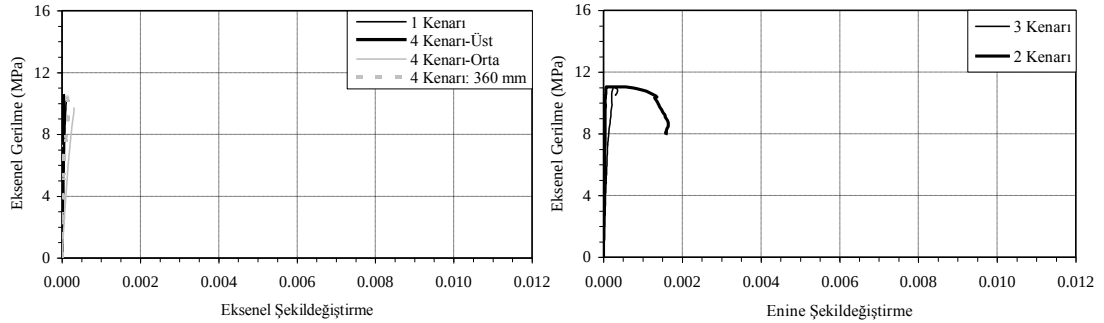
5.4.4 LS-R-3-45-M-I

45 mm kalınlıklı, I. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.88'de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.88 LS-R-3-45-M-I Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.030 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 11.05 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 5.39 olarak hesaplanmıştır. Güçlendirme panellerinin yüzeylerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmeler ile uzun kenardaki bir panelin orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 360 mm) alınan boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri Şekil 5.89’da verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.90’da verilmiştir.



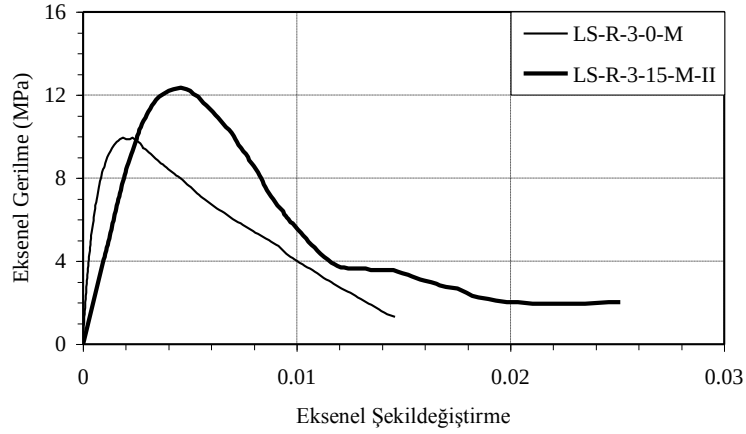
Şekil 5.89 LS-R-3-45-M-I Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.90 LS-R-3-45-M-I’in Deney Sırasındaki Görünüşleri

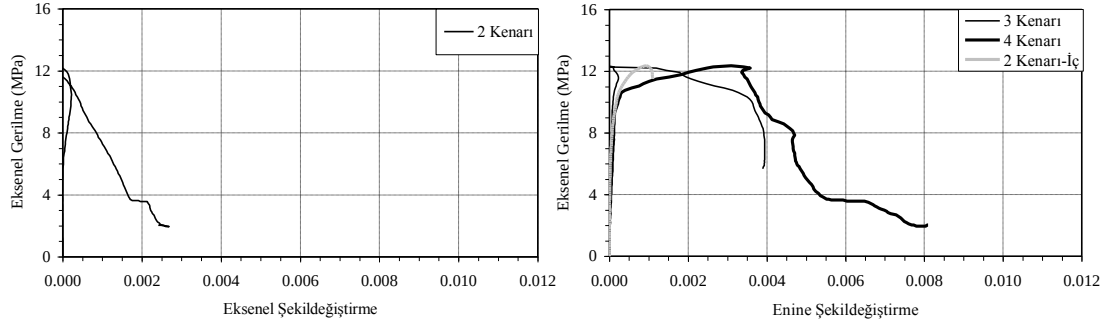
5.4.5 LS-R-3-15-M-II

15 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.91’de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri göz önüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.91 LS-R-3-15-M-II Gerilme – Eksenel Şekil değiştirme İlişkisi

0.025 eksenel şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 12.35 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.07 MPa, süneklik değeri de 4.34 olarak hesaplanmıştır. PI türü yer değiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmeler ile paneller yapıştırılmadan önce elemanın beton yüzeyine yerleştirilen şekil değiştirmeölçerden elde edilen boyuna ve enine şekil değiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.92’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.93’de verilmiştir.



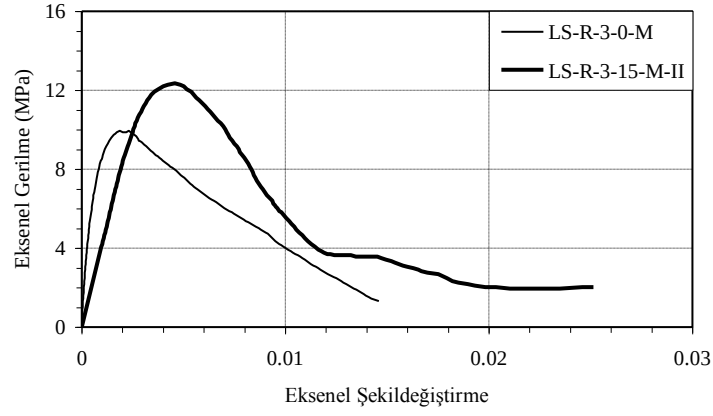
Şekil 5.92 LS-R-3-15-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.93 LS-R-3-15-M-II'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

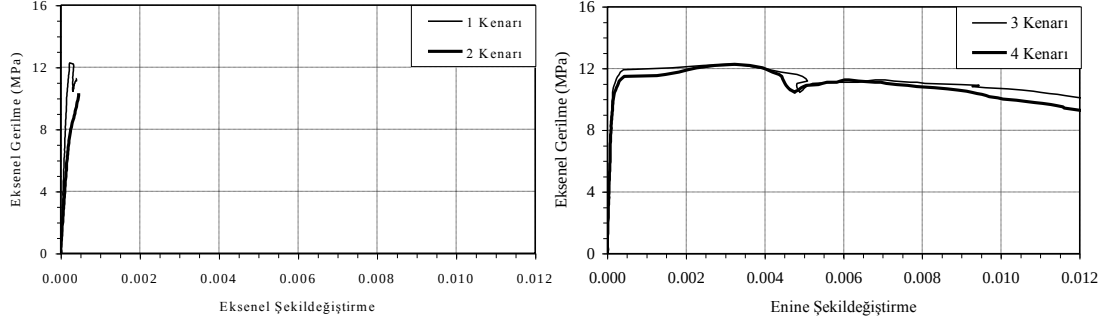
5.4.6 LS-R-3-30-M-II

30 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.94'de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın; dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.94 LS-R-3-30-M-II Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.030 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 12.28 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 4.98 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.95’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.96’de verilmiştir.



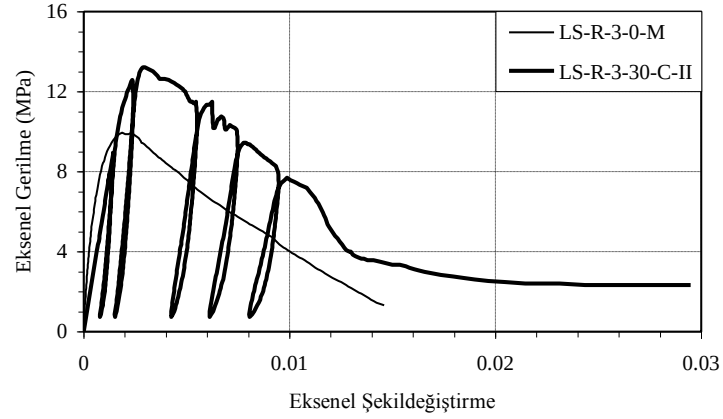
Şekil 5.95 LS-R-3-30-M-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.96 LS-R-3-30-M-II’nin Deney Sırasındaki Görünümleri

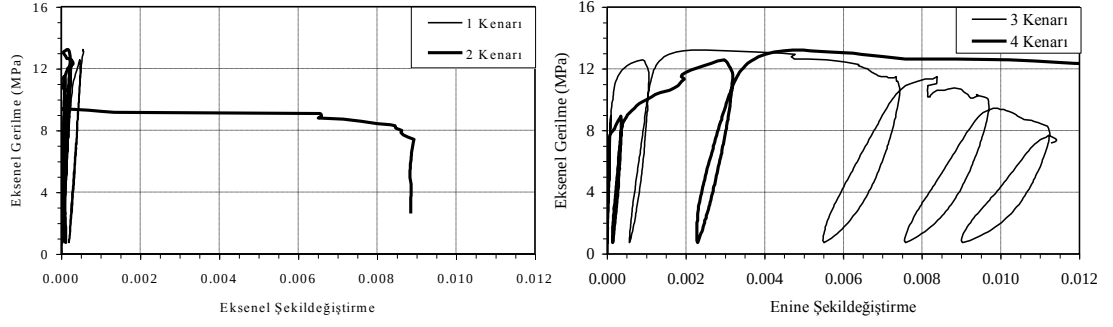
5.4.7 LS-R-3-30-C-II

30 mm kalınlıklı, II. karışım öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın tekrarlı artan aksenal yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – aksenal şekil değiştirme ilişkisi; referans elemanına ait gerilme – aksenal şekil değiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.97’de verilmiştir. Gerilme – aksenal şekil değiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanların tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yer değiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanına göre, güçlendirilmiş elemanın dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – aksenal şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.97 LS-R-3-30-C-II Gerilme – Aksenal Şekil değiştirme İlişkisi

0.029 aksenal şekil değiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 13.23 MPa’lık basınç dayanıma ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 4.92 olarak hesaplanmıştır. PI türü yer değiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekil değiştirmelerin, aksenal gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.98’de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünüşleri Şekil 5.99’da verilmiştir.



Şekil 5.98 LS-R-3-30-C-II Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.99 LS-R-3-30-C-II 'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

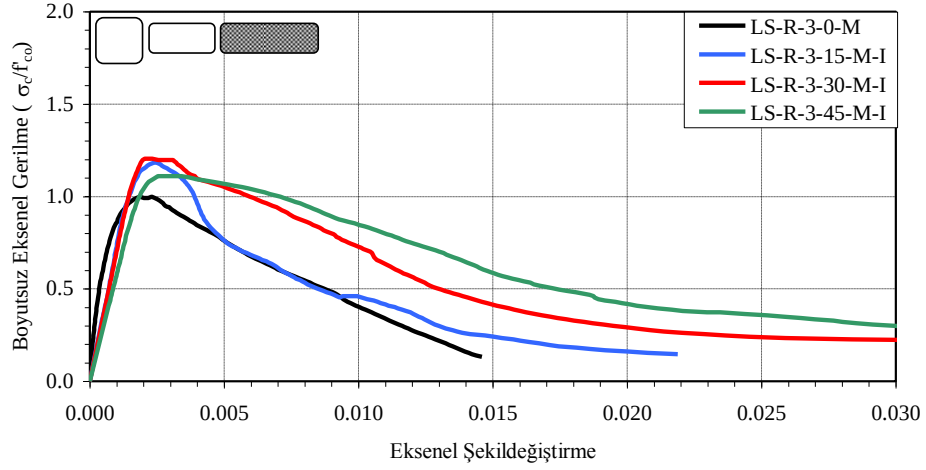
5.4.8 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen elemanlara ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme ile süneklik grafiklerinde, güçlendirilmiş elemanlara ait değerler, referans elemanına oranlanarak verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri altında kalan alanın karşılaştırıldığı grafiklerde ise, tüm elemanlara ait değerler, referans elemanın eğrisinde 0.01 şekildeğiştirme seviyesine kadar gelen kısmın altında kalan alana oranlanarak verilmiştir. R-3 enkesitli elemanlarda incelenen değişkenler:

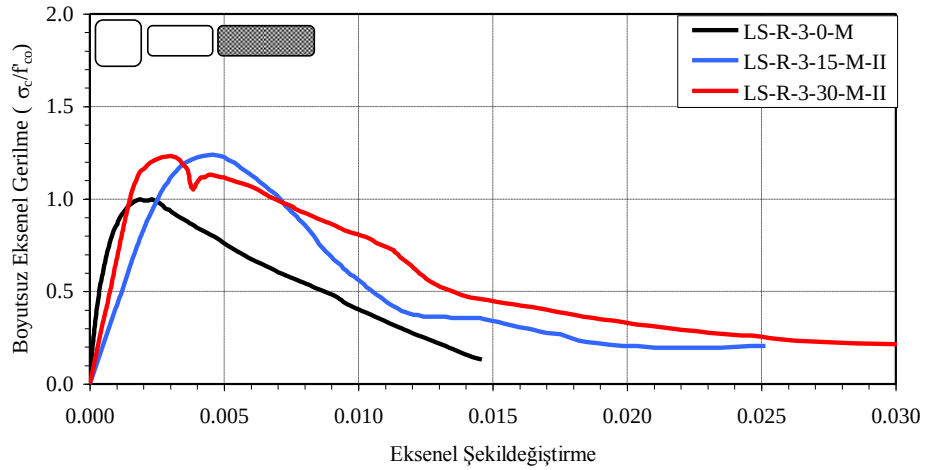
- Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlığı [15 / 30 / 45 mm]
- Yükleme Biçimi [Monoton Artan / Tekrarlı]
- HPFRCC Karışım Türü [I / II]

Öndöküm HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanlarda; dayanımda, süneklikte ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanda artış elde edilmiştir.

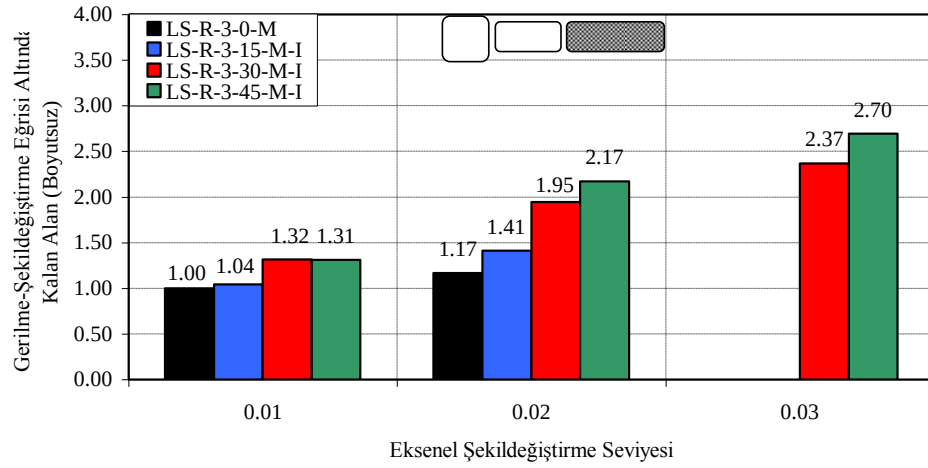
- Güçlendirme panel kalınlıklarındaki artış, dayanım artışı üzerinde belirgin bir etki göstermezken, süneklikte ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış sağlamıştır. Şekil 5.100, 5.101, 5.102, 5.103, 5.104, 5.105.



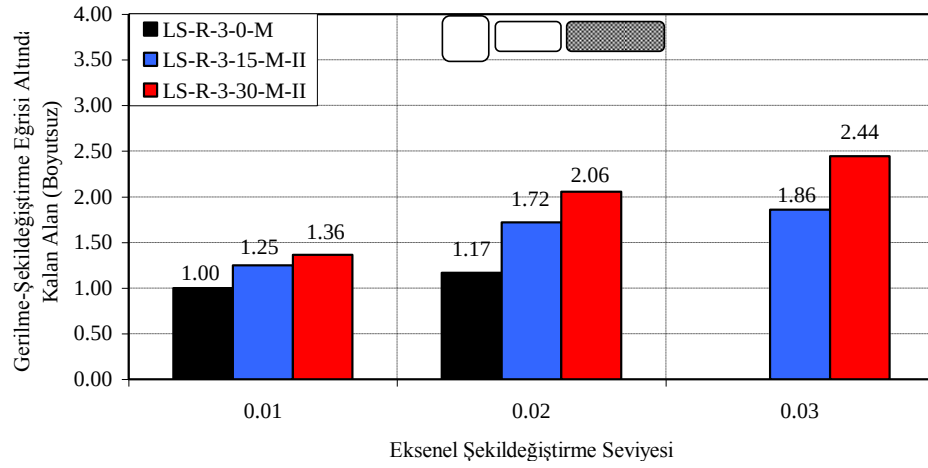
Şekil 5.100 R-3 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi



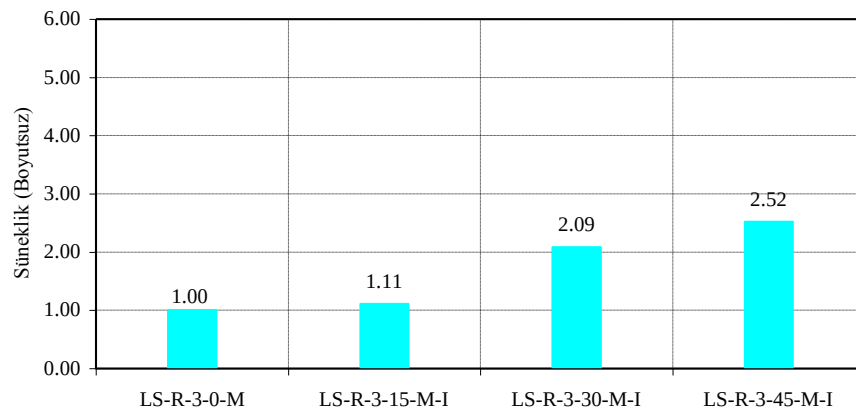
Şekil 5.101 R-3 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi



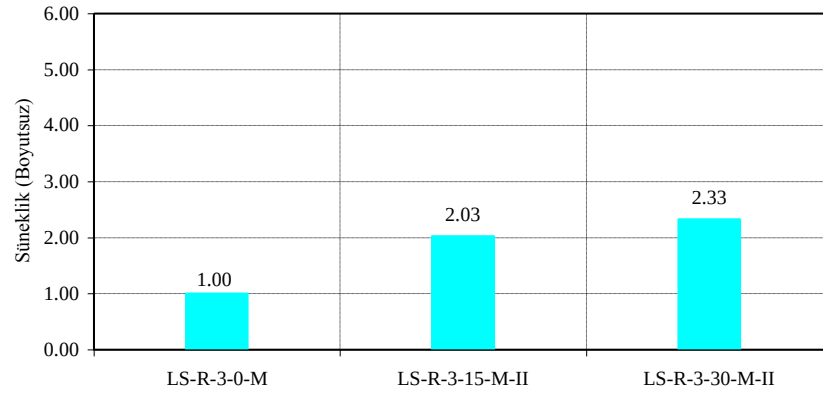
Şekil 5.102 R-3 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.103 R-3 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

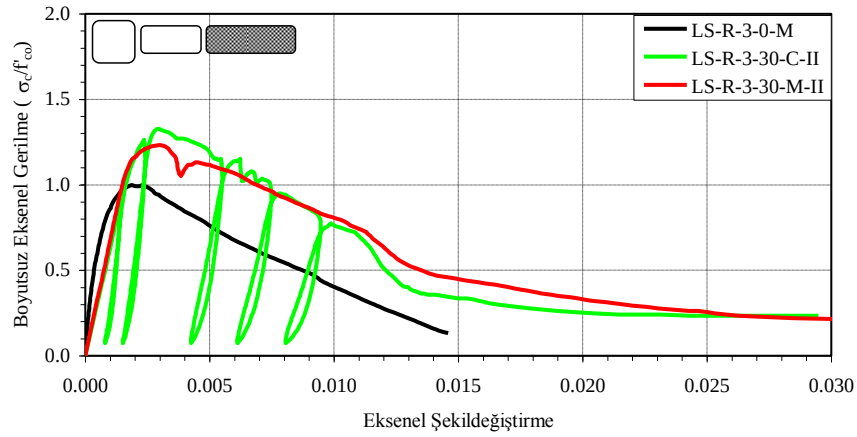


Şekil 5.104 R-3 Enkesitli Elemanlarda I. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi

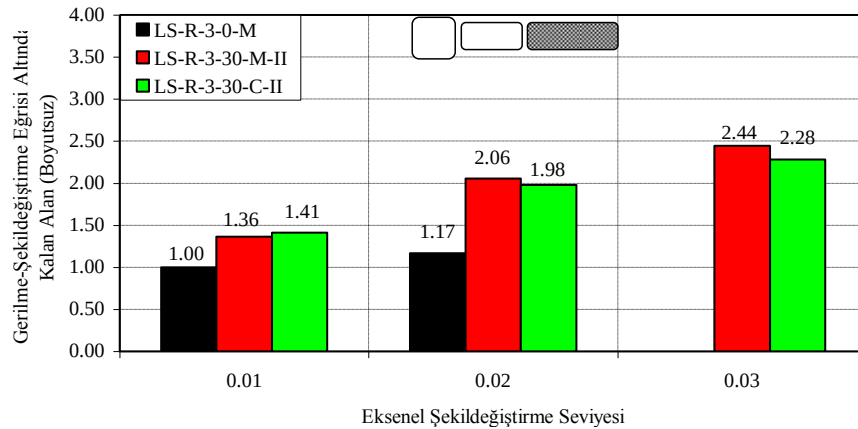


Şekil 5.105 R-3 Enkesitli Elemanlarda II. Karışım Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Süneklığe Etkisi

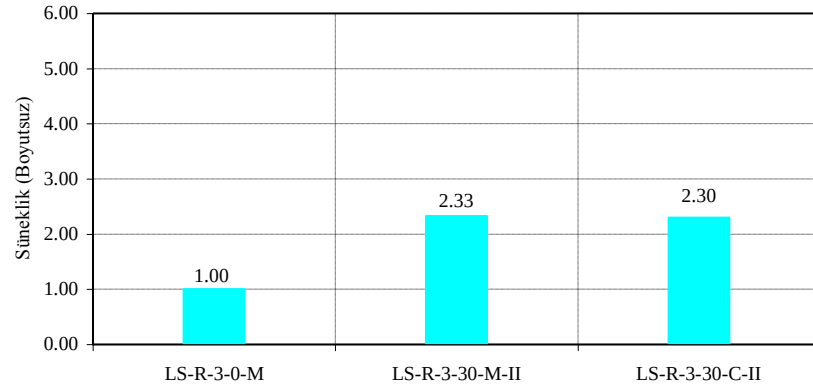
- Tekrarlı artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (LS-R-3-30-C-II); tüm diğer özellikleri aynı olan, ancak monoton artan yükler altında denenen güçlendirilmiş elemana (LS-R-3-30-M-II) oldukça yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.106, 5.107, 5.108.



Şekil 5.106 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi

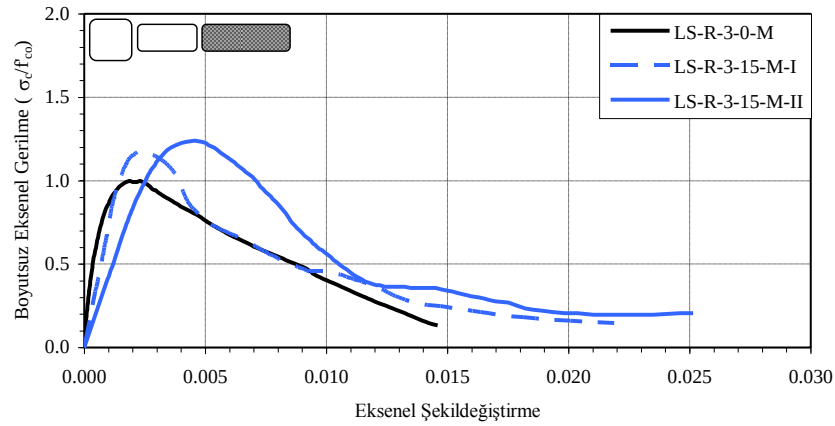


Şekil 5.107 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altındaki Kalan Alana Etkisi

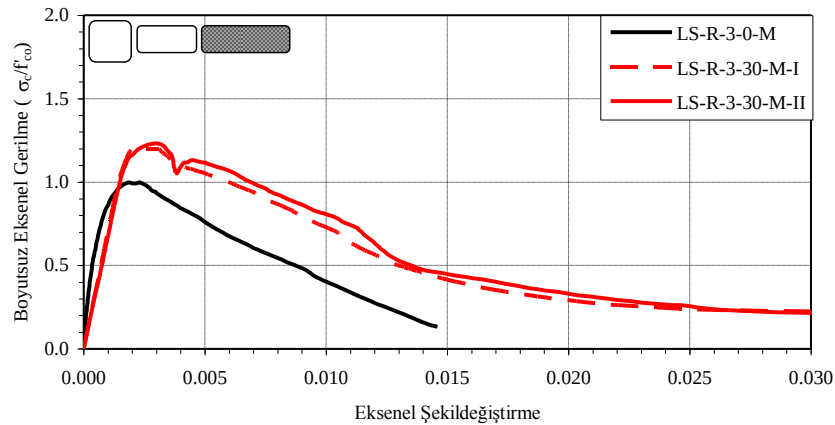


Şekil 5.108 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi

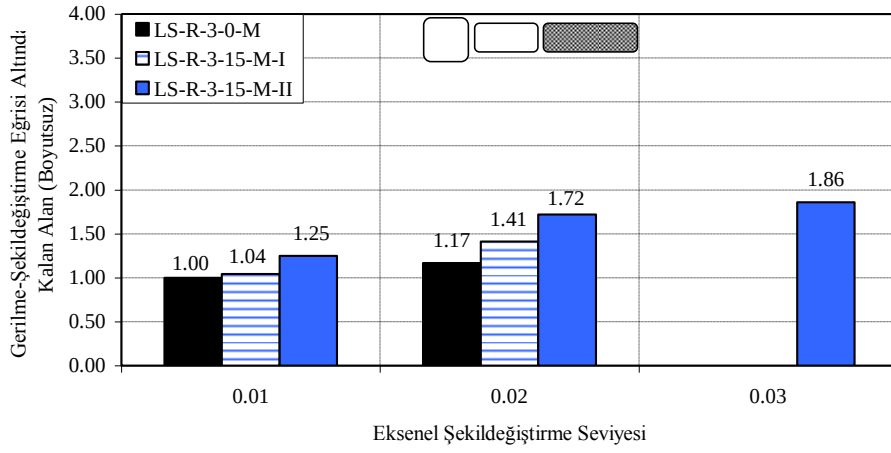
- Öndöküm HPFRCC panel karışımının geliştirilmesi sonucunda; güçlendirilen elemanların dayanımlarında, sünekliklerinde ve gerilme – aksenal şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir. Şekil 5.109, 5.110, 5.111, 5.112, 5.113, 5.114.



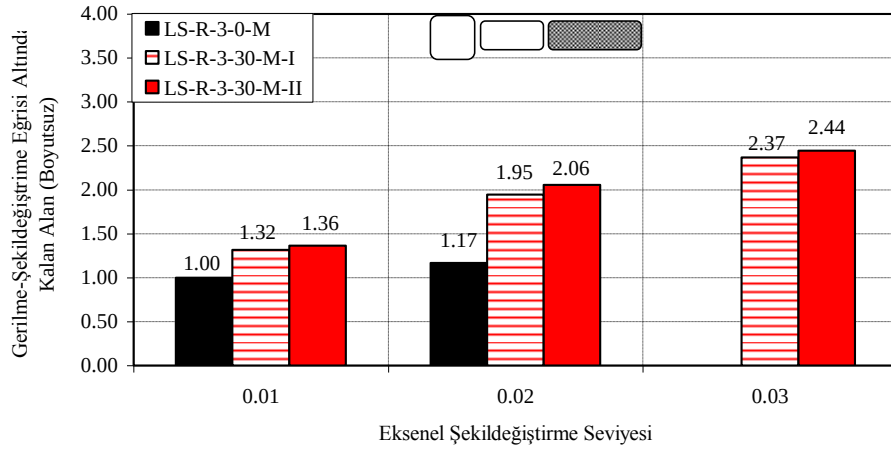
Şekil 5.109 R-3 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi



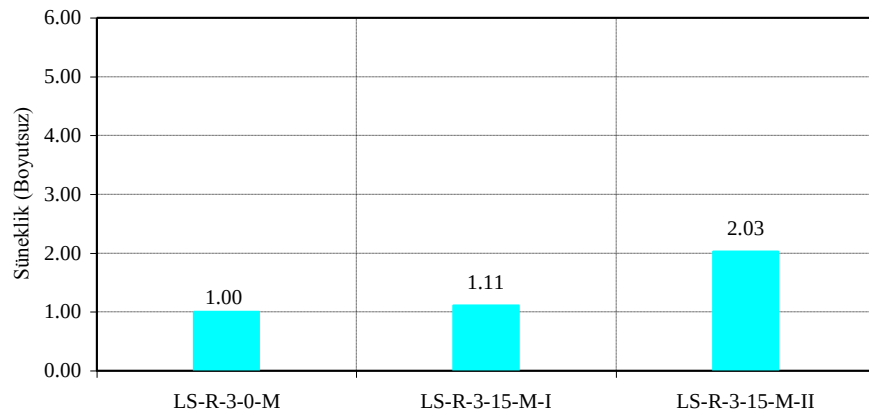
Şekil 5.110 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Davranışa Etkisi



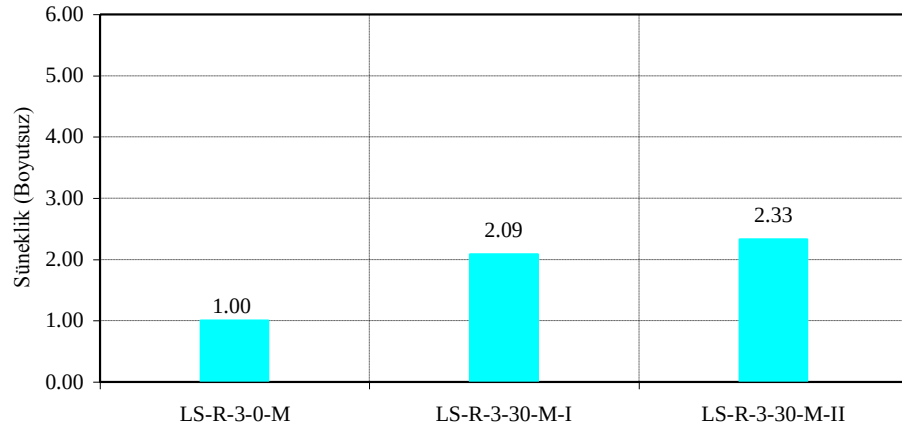
Şekil 5.111 R-3 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.112 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.113 R-3 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Sünekliğe Etkisi



Şekil 5.114 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Karışım Türlerinin Sünekliğe Etkisi

R-3 enkesitli elemanların deney sonuçları özeti, Tablo 5.3’de sunulmuştur. Bu tabloda; j , deney günündeki beton yaşı; $f'_{c,j}$, deney gününe ait standart silindir beton basınç dayanımını; ve $f'_{c,j(0.85)}$ bu değerin 0.85’ini; $f'_{co,j}$, güçlendirilmemiş elemanın basınç dayanımını; f'_{cc} , güçlendirilmiş elemanın basınç dayanımını; k , öndöküm HPFRCC panelin deney günündeki yaşı; $f_{HPFRCC,k}$, deney gününe ait standart silindir HPFRCC basınç dayanımını; $f_{t,HPFRCC,k}$, deney gününe ait HPFRCC yarma çekme dayanımını simgelemektedir.

Tablo 5.7 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti

Eleman İsmi	j (Gün)	$f'_{c,j}$ (MPa)	$f'_{c,j(0.85)}$ (MPa)	$f'_{co,j}$ (MPa)	f'_{cc} (MPa)	k (Gün)	$f_{HPFRCC,k}$ (MPa)	$f_{t,HPFRCC,k}$ (MPa)	D.A. %
LS-R-3-0-M	180	10.50	8.93	9.96	-	-	-	-	-
LS-R-3-15-M-I	164	10.45	8.88	-	11.77	84	93.90	8.78	18
LS-R-3-30-M-I	167	10.46	8.89	-	11.99	85	94.03	8.78	20
LS-R-3-45-M-I	165	10.45	8.88	-	11.05	83	114.05	8.78	11
LS-R-3-15-M-II	327	10.91	9.27	-	12.35	47	110.53	13.58	24
LS-R-3-30-M-II	321	10.89	9.26	-	12.28	57	111.34	13.72	23
LS-R-3-30-C-II	325	10.90	9.27	-	13.23	53	111.02	13.66	33

D.A. : Dayanım artışı ($f'_{cc}/f'_{co,j}$ %)

R-3 enkesitli elemanların şekildeğiştirme değerleri, Tablo 5.8’de sunulmuştur. Bu tabloda; $\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$, referans elemanın gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85’i seviyesine karşılık gelen, ilgili

elemanın aksenal şekildeğiştirme değerini; $\epsilon_{c,(f'_{co})}$, referans elemanın basınç dayanımına karşılık gelen aksenal şekildeğiştirme değerini; μ , sünekliği ($\epsilon_{c,(0.85f'_{co})} / \epsilon_{c,(f'_{co})}$) simgelemektedir.

Tablo 5.8 R-3 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri

Eleman İsmi	$\epsilon_{c,(f'_{co})}$	$\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$	μ	S.A %
LS-R-3-0-M	0.0019	0.0040	2.14	-
LS-R-3-15-M-I	-	0.0044	2.37	11
LS-R-3-30-M-I	-	0.0083	4.47	109
LS-R-3-45-M-I	-	0.0100	5.39	152
LS-R-3-15-M-II	-	0.0081	4.34	103
LS-R-3-30-M-II	-	0.0093	4.98	133
LS-R-3-30-C-II	-	0.0091	4.92	130

S.A. : Süneklik artışı (%)

R-3 enkesitli elemanların elastisite modülü değerleri, Tablo 5.9’da sunulmuştur. Bu tabloda; $E_{c,250mm}$, elemanın orta bölgesinden (yükseklik boyunca 250 mm) elde edilen şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülünü; $E_{c,500mm}$, elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanmış elastisite modülünü simgelemektedir.

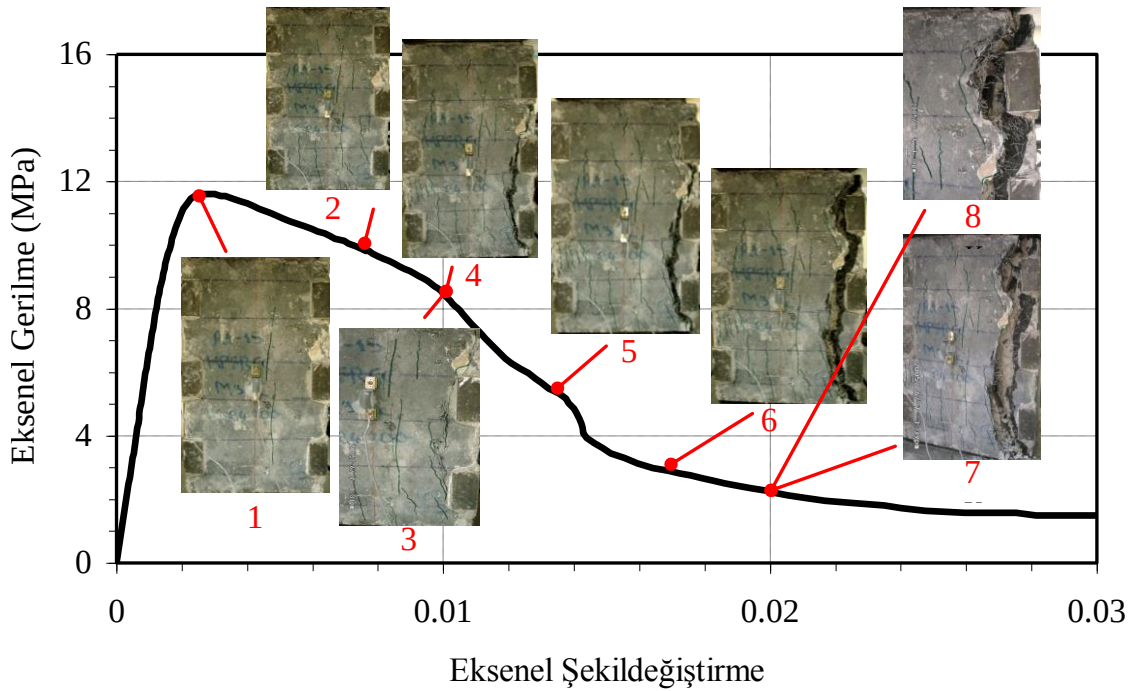
Tablo 5.9 R-3 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri

Eleman İsmi	$E_{c,250mm}$ (MPa)	$E_{c,500mm}$ (MPa)
LS-R-3-0-M	14803	5298
LS-R-3-15-M-I	-	7061
LS-R-3-30-M-I	-	7018
LS-R-3-45-M-I	-	5761
LS-R-3-15-M-II	-	4171
LS-R-3-30-M-II	-	6596
LS-R-3-30-C-II	-	6228

5.5 Hasarların Değerlendirilmesi

Bu bölümde, elemanların hasar durumlarına ve göçme biçimlerine ışık tutması amacıyla, üç adet güçlendirilmiş elemanın deneyleri sonucunda elde edilen gerilme – aksenal şekil değiştirme grafikleri (Şekil 5.115, Şekil 5.116 ve Şekil 5.117), şekil değiştirme seviyelerine bağlı olarak hasarın gelişimini gösteren fotoğraflarla birlikte sunulmuştur.

5.5.1 LS-R-1-15-M-II

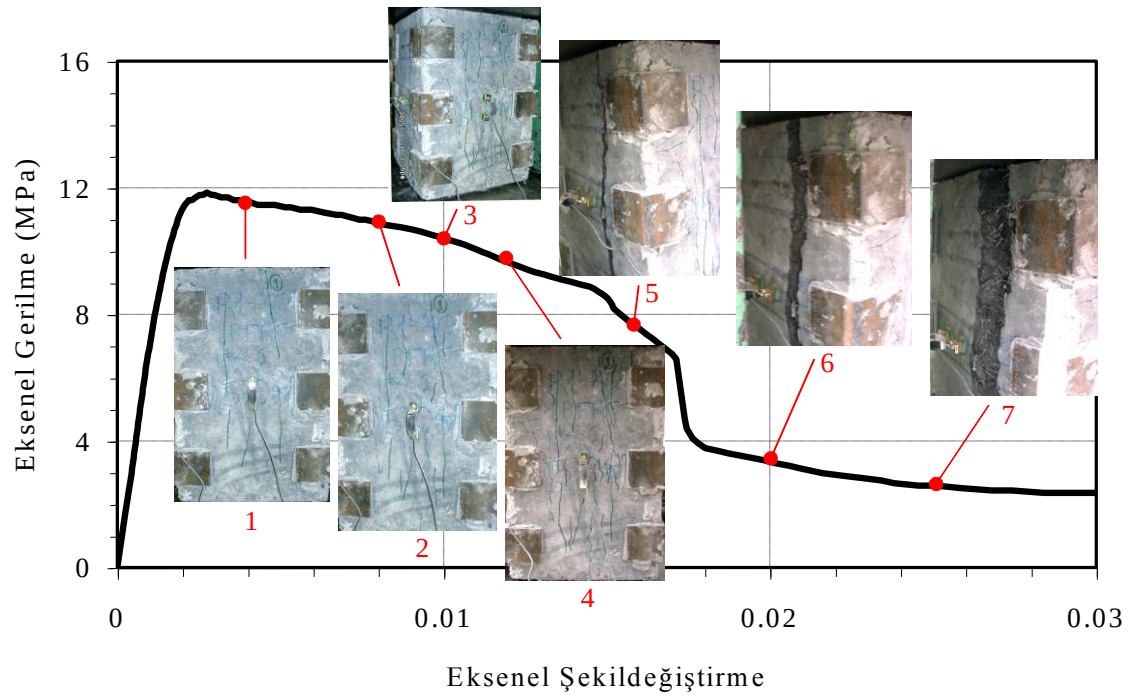


Şekil 5.115 LS-R-1-15-M-II Hasar Gelişimi

- 0.0025 aksenal şekil değiştirme seviyesinde 1 kenarının orta bölgesinde ilk çatlak gözlemlendi. (Şekil 115'deki Fotoğraf 1)
- 0.007 aksenal şekil değiştirme seviyesinde 1 ve 3 kenarlarındaki çatlakların yayıldığı gözlemlendi. (Şekil 115'deki Fotoğraf 2)
- 0.010 aksenal şekil değiştirme seviyesinde, 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlakların belirginleştiği gözlemlendi. (Şekil 115'deki Fotoğraf 3 ve 4)
- 0.014 aksenal şekil değiştirme seviyesinde, 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin arttığı gözlemlendi. (Şekil 115'deki Fotoğraf 5)

- 0.017 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlağın panel boyunca ilerlediği ve genişliğinin arttığı gözlemlendi. (Şekil 115'deki Fotoğraf 6)
- 0.020 ve daha büyük eksenel şekildeğiştirme seviyelerinde, 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlağın giderek açıldığı ve hasarın bu bölgede yoğunlaştığı gözlemlendi. (Şekil 115'deki Fotoğraf 7 ve 8)

5.5.2 LS-R-1-30-M-II

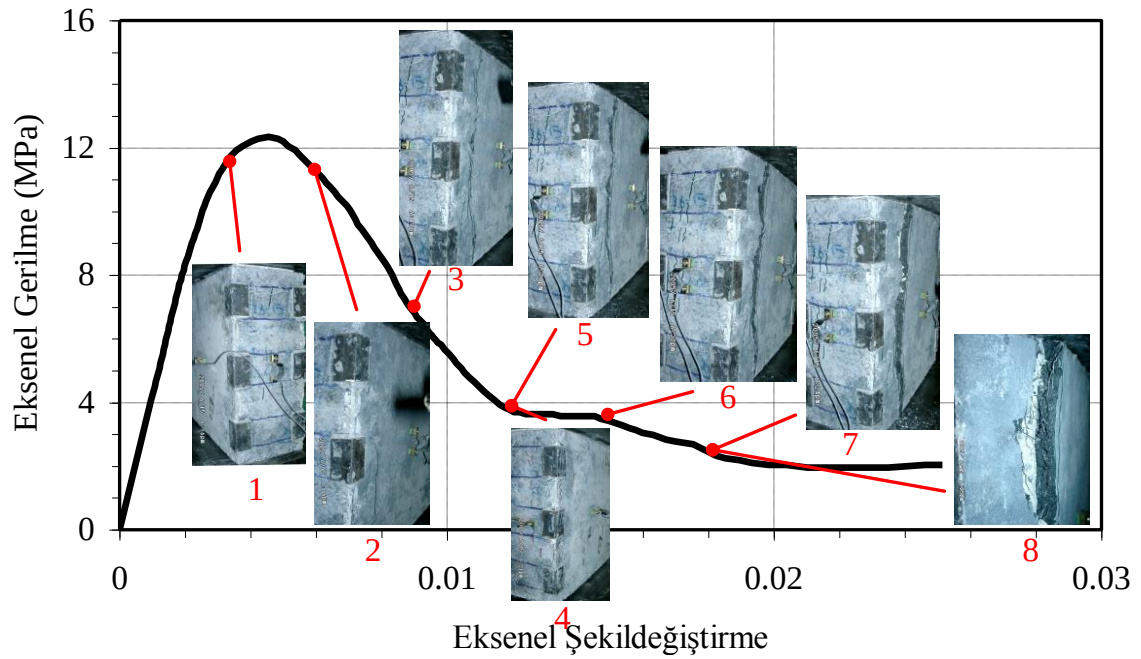


Şekil 5.116 LS-R-1-30-M-II Hasar Gelişimi

- 0.004 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarının orta bölgesinde ilk çatlak gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 1)
- 0.008 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 ve 3 kenarlarında çok sayıda çatlak gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 2)
- 0.010 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 3)
- 0.012 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 ve 3 kenarlarındaki çatlakların giderek yayıldığı gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 4)
- 0.016 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlağın belirginleştiği gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 5)

- 0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin arttığı gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 6)
- 0.025 ve daha büyük eksenel şekildeğiştirme seviyelerinde, 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak giderek açıldığı ve hasarın bu bölgede yoğunlaştığı gözlemlendi. (Şekil 116'daki Fotoğraf 7)

5.5.3 LS-R-3-15-M-II



Şekil 5.117 LS-R-3-15-M-II Hasar Gelişimi

- 0.0034 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 ve 3 kenarlarının orta bölgelerinde ilk çatlaklar gözlemlendi. (Şekil 117'deki Fotoğraf 1)
- 0.006 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 2 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak gözlemlendi. (Şekil 117'deki Fotoğraf 2)
- 0.009 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 2 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak belirginleştiği gözlemlendi. (Şekil 117'deki Fotoğraf 3)
- 0.012 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 2 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin arttığı gözlemlendi. (Şekil 117'deki Fotoğraf 5) Ayrıca, 3-4 köşesinde çatlak gözlemlendi. (Fotoğraf 4)

- 0.015 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 2 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 10 mm'ye ulaştığı gözlemlendi. (Şekil 117'deki Fotoğraf 6)
- 0.018 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 2 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 25 mm'ye ulaştığı ve daha büyük eksenel şekildeğiştirme seviyelerinde çatlağın giderek açılmasıyla hasarın bu bölgede yoğunlaştığı gözlemlendi. (Şekil 117'deki Fotoğraf 7 ve 8)

6. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada; düşük dayanımlı, dikdörtgen enkesitli, beton elemanlar; yan yüzlerine dört taraftan, öndöküm, yüksek performanslı çelik lif takviyeli çimento esaslı kompozit (HPFRCC) paneller yapıştırılması yoluyla dıştan sargılanarak güçlendirilmiş ve monoton ya da tekrarlı eksenel yükler altında denenmiştir. Üç değişik enkesit türünün her biri için (250×250, 150×300, 150×450 mm), birer adet referans elemanı da güçlendirilmeden denenmiştir. Çalışmada incelenen başlıca değişkenler; beton elemanların enkesit türü (derinlik/genişlik oranı), öndöküm HPFRCC panel kalınlığı (15, 30, 45 mm), HPFRCC karışım türü (Karışım I, Karışım II) yükleme biçimi (monoton ya da tekrarlı), elemanlarda güçlendirme panellerinin köşe birleşimlerine çelik köşebent uygulanıp uygulanmamasıdır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen önemli sonuçlar şöyledir:

- Referans elemanlarının ulaştığı dayanımlar ile boyut etkisi göz önüne alınarak hesaplanan deney günlerine ait standart silindir beton basınç dayanımlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, referans elemanları için farklı ölçüm boylarından (60, 250, 500 mm) alınan veriler de birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu durum, kullanılan deney ve yükleme düzenekleri ile sağlıklı veri toplandığını ve elemanların üretiminde gerekli özenin gösterildiğini işaret etmektedir.
- Uygulanan güçlendirme yöntemi, beton elemanların davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu iyileşmenin; dayanımda, süneklikte, göçme biçiminde ve gerilme-eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanda gerçekleştiği gözlenmiştir.
- Denenen enkesit türlerine göre; R-1 enkesitli elemanlar için, dayanımda %19 ile %49 arasında, enerji yutma yeteneğinde 4.62 kata ve süneklikte 5.31 kata varan oranlarda artış elde edilmiştir. R-2 enkesitli elemanlar için bu artış; dayanımda %21 ile %47 arasında, enerji yutma yeteneğinde 3.60 kata ve süneklikte 3.50 kata varan oranlarda gerçekleşmiştir. R-3 enkesitli elemanlar

için ise; dayanımda %11 ile %33 arasında, enerji yutma yeteneğinde 2.70 kata ve süneklikte 2.52 kata varan oranlarda artış elde edilmiştir.

- Öndöküm HPFRCC panel kalınlığının (15, 30, 45 mm) arttırılması, elemanların davranışını iyileştirmiştir. Karışım II türü HPFRCC panellerle güçlendirilmiş R-1 ve R-2 enkesitli elemanlarda panel kalınlıklarının arttırılması sonucu, dayanım, süneklik ve enerji yutma yeteneklerinde artış elde edilmiştir. R-3 enkesitli elemanlarda ise panel kalınlıklarının arttırılması sonucu, süneklik ve enerji yutma yeteneklerinde artış elde edilmiştir. Karışım I türü HPFRCC panellerle güçlendirilmiş R-2 enkesitli elemanlarda panel kalınlıklarının arttırılması sonucu, dayanım, süneklik ve enerji yutma yeteneklerinde artış elde edilmiştir. R-1 ve R-3 enkesitli elemanlarda ise panel kalınlıklarının arttırılması sonucu, süneklik ve enerji yutma yeteneklerinde artış elde edilmiştir. Özellikle Karışım I türüne ait R-1 türü elemanlarda dayanım artışı elde edilememesinde, ölçüm düzeneği için güçlendirme panellerinin yüzeylerine açılan delikler etkili olmuştur.
- HPFRCC karışımındaki değişiklik, elemanların davranışını iyileştirmiştir. Karışım II türü HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanların, kendileri ile aynı panel kalınlığına sahip Karışım I türü HPFRCC panellerle güçlendirilmiş elemanlara göre dayanım, süneklik ve enerji yutma özellikleri bakımından daha iyi davrandığı gözlenmiştir. HPFRCC karışım türünün etkisi, R-1 enkesitli elemanlarda her iki panel kalınlığı (15 mm ve 30 mm) için yakın iken R-2 ve R-3 enkesitli elemanlarda 15 mm kalınlığındaki panellerde daha fazladır.
- Tekrarlı artan eksenel yükler altında denenilen R-2 ve R-3 enkesitli elemanlar, monoton artan biçimde yüklenen elemanlara oldukça yakın davranış sergilemiştir. R-1 enkesitli elemanların ise dayanım, süneklik ve enerji yutma özellikleri gözönüne alındığında; tekrarlı yüklenen elemanın monoton yüklenen elemanlardan biraz daha iyi davrandığı gözlenmiştir. Bu durum; yükleme biçiminin, elemanların davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstergesidir.
- Güçlendirme panellerinin köşe birleşimlerine çelik köşebent uygulanmaması, eleman davranışını olumsuz yönde etkilemiştir. Çelik köşebent uygulaması

yapılan eleman, özellikle süneklik ve enerji yutma özellikleri açısından daha iyi davranmıştır. Çelik köşebent kullanılan elemanda, köşe birleşimlerde oluşan çatlaklar köşebentlere takılıp ilerleyememiş ve göçme bu yolla ötelenmiştir. Çelik köşebent kullanılmayan elemanda ise paneller çok fazla hasar almadan köşe birleşimlerden ayrılmış, bu nedenle göçme daha gevrek gerçekleşmiştir.

- Yapılan hesaplar sonucunda, güçlendirme panellerinin elastisite modülü değerlerinin (~ 35000 MPa), güçlendirilen elemanın betonunun elastisite modülü değerlerinden (~ 14000 MPa) oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Bu durum; güçlendirilmiş elemanların iç kısmındaki beton kesit ile dış yüzeyindeki güçlendirme panellerinin farklı düzeylerde şekildeğiştirme yapmalarına, dolayısıyla birlikte davranmamalarına yol açmıştır. Güçlendirme panellerinin, güçlendirilmiş elemanın rijitliğine katkısının sınırlı seviyede kalması sonucu elastisite modülünde düşük seviyelerde bir artış gözlenmiştir.
- Güçlendirilmiş elemanların göçme biçimlerinde, referans elemanlarına göre, belirgin iyileşme gözlenmiştir. Referans elemanları, en büyük yük değerine ulaştıktan hemen sonra ani ve gevrek bir biçimde kırılırken; güçlendirilmiş elemanlar, en büyük yük değerine ulaşmalarının ardından, panel yüzeyinde belirginleşen ve yayılan çatlakların, yavaş yavaş ilerleyip genişlemesi sonucu, sünek bir biçimde kırılmaktadır.
- Uygulanan güçlendirme yönteminin, elemanların davranışına yaptığı katkılar gözönüne alındığında, yapılan çalışmanın daha da ilerilere taşınması yoluyla; kısa sürede uygulanabilen, eleman boyutlarını önemli ölçüde değiştirmeyen, uygulaması ve kalite kontrolü kolay, ekonomik yeni bir güçlendirme yönteminin önerilebileceği sonucuna varılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [2] **Jones, R., Swamy, R.N. and Charif, A.**, 1988. Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates, *Structural Engineer (London)*, **66**, 5, pp 85-94.
- [3] **Jones, R., Swamy, R.N., Bloxham, J. and Bouderbalah, A.**, 1980. Composite Behavior of Concrete Beams with Epoxy Bonded External Reinforcement, *International Journal Cement Composites and Lightweight Concrete*, **2**, 2, pp 91-107.
- [4] **Alaee, F.J.**, 2002. Retrofitting of Concrete Structures Using High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC), *PhD Thesis*, Cardiff University, UK.
- [5] **Ritchie, P.A., Thomas D.A., Lu, Le-Wu and Connely, G.**, 1991. External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics, *ACI Structural Journal*, **88**, 4, 490-500.
- [6] **Malek, M., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.**, 1998. Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End, *ACI Structural Journal*, **V. 95, No. 1**, 142-152.
- [7] **Can, H.**, 1994. Betonarme Kolonların Komşu İki Yüzünden Manto ile Onarımı ve Güçlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, **Yazı 68**, 903-918.
- [8] **Ersoy, U., Tankut, T. and Suleiman, R.**, 1993. Behavior of Jacketed Columns, *ACI Structural Journal*, **V. 90, No. 3**, 288-293.
- [9] **İlki, A., Akgün, D., Göray, O., Demir, C. and Kumbasar, N.**, 2006. Retrofit of Concrete Members with Externally Bonded Prefabricated SFRCC Jackets, *16th European Conference of Fracture Failure Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures*, MMCP S.P. Shah – Sessions, Alexandroupolis, Greece, July 3-7.

- [10] **Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. and Jin, L.,** 1997. Repair of Earthquake-Damaged RC Columns With FRP Wraps, *ACI Structural Journal*, **91(2)**, 206-215.
- [11] **Seible, F., Priesley, J.N., Hegemier, G.A., and Innamorato, D.,** 1997. Seismic Retrofit of RC Columns With Continuous Carbon Fiber Jackets. *Journal of Composites for Construction*, **1(2)**, 52-62.
- [12] **JCI-DFRCC Committee,** 2003. DFRCC Terminology and Application Concepts, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **Vol. 1, No.3**, pp. 335-340.
- [13] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, N.A., Yerlikaya, M.,** 2004. Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, *Beton 2004 Kongresi*, İstanbul, 10-12 Haziran.
- [14] **Swamy, R.N.,** 1974. The Technology of Steel Fiber Reinforced Concrete for Practical Applications, *Proceedings Institution of Civil Engineers*, pp. 143-159.
- [15] **Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W.,** 1995. Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites-HPFRCC, *Pre-Proceedings: 2nd International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-95)*, **2**, pp. 1-23, Michigan.
- [16] **Eren, Ö. and Çelik, T.,** 1997. Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High Strength Concrete, *Construction and Buildings Materials*, **11**, (7-8), 373-382.
- [17] **Vandewalle, L.,** 1996. Influence of the Yield Strength of Steel Fibres on the Toughness of Fibre Reinforced High Strength Concrete, *Proceedings, the CCMS Symposium, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry*, pp. 496-505, Chicago.
- [18] **Gao, J., Sun, W., Morino, K.,** 1997. Mechanical Properties of Steel Fibre-Reinforced, High-Strength, Light Weight Concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**, pp. 307-313.

- [19] **Barros, J.A.O. and Figueiras, J.A.**, 1999. Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **V. 11, Issue 4**, pp. 331-339.
- [20] **Weiler, B., Groose, C., Reinhardt, H.W.**, 1999. Debonding Behaviour of Steel Fibers with Hooked Ends, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composite (HPFRCC3)*, Reinhardt HW., Naaman A.E. (eds.) *RILEM Publishers*, pp. 423-432.
- [21] **Lange-Kornbak, D., Karihaloo, B.L.**, 1998. Design of Fibre-Reinforced DSP Mixes for Minimum Brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, **V.7**, pp. 89-101.
- [22] **Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F.**, 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ dergisi/d mühendislik*, **Cilt 1, Sayı 2**, s. 125-144.
- [23] **Taşdemir, M.A., İlki, A., Yerlikaya, M.**, 2002. Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures, *Hydro 2002 International Conference on Hydropower and Dams*, pp.159-166, Kiriş-Antalya, November 4-7.
- [24] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., İlki, A. ve Yerlikaya, M.**, 2002. Prefabrike Elemanlar İçin Çelik Tel Donatılı Betonlar, *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, **Sayı 63**, s. 5-12.
- [25] **Bayramov, F.**, 2004. Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Bayramov, F., İlki, A., Taşdemir, C., Tadmir, M.A. and Yerlikaya, M.**, 2004. SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, *9th International Symposium on Concrete Roads*, İstanbul, April 4-7.
- [27] **Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A.**, 2002. Optimum Design of Cement-Based Composite Materials using Statistical Response Surface Method, *Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering*, pp. 725-734, İTÜ, İstanbul.

- [28] **Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A.**, 2004. Optimisation of Steel Fibre Reinforced Concretes by Means of Statistical Response Surface Method, *Cement and Concrete Composites*, pp. 11.
- [29] **Ekincioglu, Ö.**, 2002. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **Güvensoy, G.**, 2004. Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Betonun Mekanik Davranışı ve Kırılma Parametreler, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Şengül, C.**, 2002. Yüksek Oranda Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacının (SIFCON) Mekanik Davranışı, *Bitirme Çalışması*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [32] **Krstulovic-Opara, N., Shannag, M.J.**, 1999. Compressive Behavior of Slurry Infiltrated Mat Concrete, *ACI Materials Journal*, **V. 96, No. 3**, pp. 367-377.
- [33] **Falkner, H., Henke, V.**, 1996. Application of Steel Fibre Concrete for Underwater Concrete Slabs, *Proceedings (32) of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete*, p. 79, June 3–5.
- [34] **Falkner, H., Huang, Z., Teutsch, M.**, 1995. Comparative Study of Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs, *Concrete International*, **V. 17, No. 1**, pp. 45-51.
- [35] **Bayasi, Z., Kaiser, H., Gonzales, M.**, 2001. Composite Slabs with Corrugated SIMCON Deck as Alternative for Corrugated Metal Sheets, *Journal of Structural Engineering*, **V. 127, Issue 10**, pp. 1198-1205.
- [36] **Foster, S.J., Attard, M.M.**, 2001. Strength and Ductility of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, **V. 127, Issue 1**, pp. 28-34.
- [37] **Gençoğlu, M., Eren, İ.**, 2002. An Experimental Study on the Effect of Steel Fiber Reinforced Concrete on the Behavior of the Exterior Beam-

Column Joints Subjected to Reversal Cyclic Loading, *Turk. J. Engin. Environ. Sci.*, **V. 26**, pp. 493-502.

- [38] **Özyurt, N., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A. and Yerlikaya, M.**, 2002. Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, *Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering*, pp. 885-894, İTÜ, İstanbul.
- [39] **Filiatrault, A., Pineau, S. and Houde, J.**, 1995. Seismic Behavior of Steel-Fiber Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints, *ACI Structural Journal*, **92**, 543-551.
- [40] **Ganesan, N. and Murthy, J.V.R.**, 1990. Strength and Behavior of Confined Steel Fiber Reinforced Concrete Columns, *ACI Material Journal*, **87**, 221-227.
- [41] **Gebman, M.**, 2001. Application of Steel Fiber Reinforced Concrete in Seismic Beam-Column Joints, *MSc Thesis*, San Diego State University, San Diego.
- [42] **Kwak, Y.K., Eberhard, M.O. and Kim, J.**, 2002. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *ACI Structural Journal*, **99**, 530-538.
- [43] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar Ş. ve Yerlikaya M.**, 2005. Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, 6. *Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Performanslı Betonlar (Prof. Dr. Yaşar Atan Anısına)*, İTÜ, İstanbul, 16-18 Kasım, s. 33-45.
- [44] **Özyurt, N., Mason, T.O., Shah, S.P.**, 2005. Lif Donatılı Beton Kirişte Lif Yönlenmesinin Tahribatsız Muayenesi için Elektriksel Bir Yöntem: Alternatif Akım - Empedans Spektroskopisi (AS-ES), 6. *Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Performanslı Betonlar (Prof. Dr. Yaşar Atan Anısına)*, İTÜ, İstanbul, 16-18 Kasım, s. 125-137.
- [45] **Ayan, E., Saatçioğlu, Ö., Turanlı, L.**, 2005. Yüksek Dayanımlı Çelik Lifli Betonların Çekme Dayanımı Modelinin Parametre Optimizasyonu, 6.

Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Performanslı Betonlar (Prof. Dr. Yaşar Atan Anısına), İTÜ, İstanbul, 16-18 Kasım, s. 283-295.

- [46] **Shannag, M.J., Barakat, S. and Jaber, F.**, 2001. Structural Repair of Shear-Deficient Reinforced Concrete Beams Using SIFCON, *Magazine of Concrete Research*, **53**, **6**, 391-403.
- [47] **Shannag, M.J., Barakat, S. and Abdul-Kareem, M.**, 2002. Cyclic Behavior of HPFRC-repaired reinforced concrete interior beam-column joints, *Materials and Structures*, **35**, 348-356.
- [48] **Dogan, E., Krstulovic-Opara, N.**, 2003. Seismic Retrofit with Continuous Slurry-Infiltrated Mat Concrete Jackets, *ACI Structural Journal*, **V. 100**, **No. 6**, pp. 713-722.
- [49] **Harajli, M.H., Rteil, A.A.**, 2004. Effect of Confinement Using Fiber-Reinforced Polymer or Fiber-Reinforced Concrete on Seismic Performance of Gravity Load-Designed Columns, *ACI Structural Journal*, **V. 101**, **No. 1**, pp. 47-56.
- [50] **Alaee, F.J., Benson, S.D.P. and Karihaloo, B.L.**, 2002. A New Technique for Retrofitting Concrete Structures, *Proc. ICE, Structures and Buildings*, **152**, pp. 309-318.
- [51] **Alaee, F.J., Benson, S.D.P. and Karihaloo, B.L.**, 2002. High-Performance Cementitious Composites for Retrofitting, *International Journal of Materials and Product Technology*, **17(1/2)**, pp. 17-31.
- [52] **Alaee, F.J. and Karihaloo, B.L.**, 2003. Retrofitting of Reinforced Concrete Beams with CARDIFRC, *ASCE Journal of Composites for Construction*, **7**, 174-186.
- [53] **Alaee, F.J. and Karihaloo, B.L.**, 2003. Fracture Model for Flexural Failure of RC Beams Retrofitted with CARDIFRC, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, **129**, pp.1028-1038.
- [54] **İlki A., Yılmaz E., Demir C. and Kumbasar N.**, 2004. Prefabricated SFRC Jackets for Seismic Retrofit of Non-ductile Rectangular Reinforced Concrete Columns, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.

- [55] **Yılmaz, E.**, 2004. Çelik Lif Takviyeli Öndöküm Beton Paneller ile Kolon Güçlendirmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [56] **Peker, Ö.**, 2005. Düşük Dayanımlı Betonarme Elemanların CFRP ile Güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [57] **İlki, A., Kumbasar, N.**, 2002. Karbon Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzeme İle Hasarlı Betonarme Elemanların Onarım ve Güçlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 2597-2616.
- [58] **İlki, A., Tezcan, A., Koç, V. and Kumbasar, N.**, 2004. Seismic Retrofit of Non-Ductile Rectangular Reinforced Concrete Columns by CFRP Jacketing. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.
- [59] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Doğın Akgün, 1981 yılında İstanbul'da doğmuştur. 1999 yılında Kabataş Erkek Lisesi'nden mezun olduktan sonra aynı yıl İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazanmıştır. 2003 senesinde lisans eğitimini tamamlamış ve İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.