İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PANELLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON ELEMANLARIN EKSENEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Rıza Ozan GÖRAY

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Alper İLKİ

ARALIK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT PANELLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON ELEMANLARIN EKSENEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Rıza Ozan GÖRAY
501031230

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

".....dediler ki; simsiyah o uzun saçların toza tuğlaya karışmış. o bebek yüzün tanınmaz olmuş. yatağından bile kalkamamışsın, uyanamadın mı?.....hani çocukluğunun geçtiği o unutamadığın ev varya yıkılmadı canım. hala sapasağlam seni ve abini bekliyor. sana mezar olan ev varya 3 duvarı varmış. sana güzel haberim yok bebeğim. çeyizlerini hep çaldılar. geri kalanı da enkaza karışıp gitti. adını bir mermer sütunda binlerce insanla kaynaşmış olarak görmek hoşuma gitmiyor. bu sütunlar keşke bir iftihar listesi olsaydı. senin için bol bol dua ediyorum. o sevdiğin kremalı bisküiyi artık yiyemiyorum. seni çok özledim bebeğim. sen okumasanda ben yazmaya devam edeceğim. bu sabah saat 04.30'da sana iki mum gönderdim, karanlıkta kaybolma diye! içim yanıyor bebeğim... annen sümbüle ferah, ablan ceyda bal....."

(m.s. 2000'lerin başı, yalova deprem anıtı anı defteri)

ONLAR için...

ÖNSÖZ

Bu deneysel çalışma boyunca bana her konuda destek olan ve yaşamıma yeni bir bakış açısı kazandıran danışman 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 Doğan Akgün'e, Cem Demir'e, Burcu Akçay'a, Cengiz Şengül'e, İdris Bedirhanoğlu'na, 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 Laboratuarı personeline, Yapı Malzemesi Laboratuarı 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.

Tüm yaşamım boyunca uzun ve dolambaçlı yollarda yürüyebilmem için bana güç veren aileme - her şey için - tüm kalbimle teşekkür ederim.

Aralık 2005 R. Ozan Göray

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ viii
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 Güçlendirme Panellerinin Tasarımı ... 9
2.4.2 Karışım Sırası ... 10
2.4.3 Kalıba Alınma ve Kür ... 12
2.5 Güçlendirme Uygulaması ... 13
2.5.1 Yüzey Hazırlığı ... 13
2.5.2 Güçlendirme Panellerinin Yapıştırılması ... 14
2.5.3 Köşe Birleşimlerin Çelik Köşebentle veya CFRP Şeritle Desteklenmesi 16
4. DENEY DÜZENEĞİ 30
4.1 Giriş ... 30
4.2 Referans Elemanları için Deney Düzeneği ... 30
4.3 Güçlendirilmiş Elemanlar için Deney Düzeneği ... 32
5. DENEY SONUÇLARI 35
5.1 Giriş ... 35
5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 1; h=250mm; b=250mm) .. 38
5.2.1 NS–R–1–0–M ... 38
5.2.2 NS–R–1–15–M ... 39
5.2.3 NS–R–1–30–M ... 40

5.2.4 NS–R–1–45–M 42
5.2.5 NS–R–1–15–C 43
5.2.6 NS–R–1–0–M–PD–15 44
5.2.7 NS–R–1–0–M–PD–30 46
5.2.8 NS–R–1–30–M–WOG 47
5.2.9 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 49
5.3 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 2; h=300mm; b=150mm) 57
5.3.1 NS–R–2–0–M 57
5.3.2 NS–R–2–15–M 58
5.3.3 NS–R–2–30–M 60
5.3.4 NS–R–2–45–M 61
5.3.5 NS–R–2–30–C 63
5.3.6 NS–R–2–15–M–A 64
5.3.7 NS–R–2–30–M–A 66
5.3.8 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 67
5.4 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları (h/b: 3; h=450mm; b=150mm) 74
5.4.1 NS–R–3–0–M 74
5.4.2 NS–R–3–15–M 75
5.4.3 NS–R–3–30–M 76
5.4.4 NS–R–3–30–C 78
5.4.5 NS–R–3–0–M–PD–30 79
5.4.6 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 81
5.5 Hasarların Değerlendirilmesi 85
6. SONUÇLAR **90**
KAYNAKLAR **94**
ÖZGEÇMİŞ **101**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

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 3.1 Beton Karışımı 19
Tablo 3.2 Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları 20
Tablo 3.3 Standart Silindir Basınç Deneylerinin Sonuçları 22
Tablo 3.4 Dramix ZP30/0.55 Çelik Liflerin Mekanik Özellikleri..... 24
Tablo 3.5 Glenium 51 Hiperakışkanlaştırcının Teknik Özellikleri 25
Tablo 3.6 HPFRCC Karışımı 26
Tablo 3.7 HPFRCC Karışımının Deney Sonuçları..... 29
Tablo 4.1 Şekildeğiştirmeölçer Özellikleri..... 32
Tablo 4.2 Yerdeğiştirmeölçerlerin Özellikleri 34
Tablo 5.1 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti..... 56
Tablo 5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri..... 56
Tablo 5.3 R-1 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri..... 57
Tablo 5.4 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçları Özeti..... 72
Tablo 5.5 R-2 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri..... 73
Tablo 5.6 R-2 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri..... 73
Tablo 5.8 R-3 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri..... 85
Tablo 5.9 R-3 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri..... 85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Kalıpların Hazırlanması 8

Şekil 2.2 : Beton Dökümü ve Kür 9

Şekil 2.4 : Düşey Karıştırıcı..... 10

Şekil 2.5 : Karışım Sırası..... 11

Şekil 2.6 : Plastik Kıvam Elde Edilmesi..... 12

Şekil 2.7 : HPFRCC Panellerin Kalıpları 12

Şekil 2.8 : HPFRCC Panellerin Kalıba Alınması ve Kürü 13

Şekil 2.9 : Yüzey Hazırlığı Tamamlanmış Bir Elemanın Şematik Gösterimi..... 14

Şekil 2.10 : Yüzey Hazırlığı 14

Şekil 2.11 : Güçlendirilecek Elemanların Yüzeylerine Epoksi Harcı Uygulanması . 15

Şekil 2.12 : Güçlendirme Panellerinin Yapıştırılması 16

Şekil 2.13 : Çelik Köşebentlerin Yapıştırılması 17

Şekil 2.14 : Panel Kalınlıklarına Göre Çelik Köşebent Detayları 17

Şekil 3.1 : Standart Silindir Basınç Deneyi Düzeneği..... 20

Şekil 3.2 : 28 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları 21

Şekil 3.3 : 90 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları 21

Şekil 3.4 : 180 Günlük BEtonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları..... 21

Şekil 3.5 : 360 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları 22

Şekil 3.6 : Dramix ZP30/0.55 Tipi Çelik Lifler ...**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 3.7 : Tutkalla Birleştirilmiş Çelik Lif Demetlerinin Suya Değerek Dağılması .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 3.8 : Silis Dumanı İçeren Bir Çimento Hamurunda Sıkı Bir Diziliş Elde Edilmesi.....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 3.9 : Elek Analizi.....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 3.10 : HPFRCC Yarma Çekme Deneyi.....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 3.11 : HPFRCC Standart Silindir Basınç Deneyi**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 3.12 : 28 Günlük HPFRCC Karışımının Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları 28

Şekil 3.13 : 90 Günlük HPFRCC Karışımının Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları 28

Şekil 3.14 : 180 Günlük HPFRCC Karışımının Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları 28

Şekil 4.1 : Veri Toplama Sistemi Akış Grafiği ....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 4.2 : Deney Düzeneğinin Genel Görünümü **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 4.3 : Deney Düzeneği .....**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 4.4 : Referans Elemanlarının Yüzeyindeki Şekildeğiştirmeölçerler**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 4.5 : Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi ve Genel Görünümü**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 4.6 : Güçlendirilmiş Elemanların Yüzeyindeki Yerdeğiştirmeölçerler..... 34

Şekil 5.1 : Eleman Yerleşim Planı ve Kenarların İsimlendirilmesi**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 5.2 : NS–R–1–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 38

Şekil 5.3 : NS–R–1–0–M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkileri..... 39

Şekil 5.4 : NS–R–1–15–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 39

Şekil 5.5 : NS–R–1–15–M Güçlendirme Panellerindeki ve Beton Yüzeydeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 40

Şekil 5.6 : NS–R–1–15–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 40

Şekil 5.7 : NS–R–1–30–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 41

Şekil 5.8 : NS–R–1–30–M Güçlendirme Panellerindeki ve Beton Yüzeydeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 41

Şekil 5.9 : NS–R–1–30–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 41

Şekil 5.10 : NS–R–1–45–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 42

Şekil 5.11: NS–R–1–45–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 42

Şekil 5.12 : NS–R–1–45–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 43

Şekil 5.13 : NS–R–1–15–C Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 43

Şekil 5.14 : NS–R–1–15–C Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 44

Şekil 5.15 : NS–R–1–15–C'nin Deney Sırasındaki Görünümleri 44

Şekil 5.16 : NS–R–1–0–M–PD–a ve NS–R–1–0–M–PD–15 Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 45

Şekil 5.17 : NS–R–1–0–M–PD–15 Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 45

Şekil 5.18 : NS–R–1–0–M–PD–15'in Deney Sırasındaki Görünümleri 45

Şekil 5.19 : NS–R–1–0–M–PD–b ve NS–R–1–0–M–PD–30 Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 46

Şekil 5.20 : NS–R–1–0–M–PD–30 Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 47

Şekil 5.21 : NS–R–1–0–M–PD–30'un Deney Sırasındaki Görünümleri 47

Şekil 5.22 : NS–R–1–30–M–WOG Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 48

Şekil 5.23 : NS–R–1–30–M–WOG Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 48

Şekil 5.24 : NS–R–1–30–M–WOG'un Deney Sırasındaki Görünümleri 48

Şekil 5.25 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi 49

Şekil 5.26 : R-1 Enkesitli Ön Hasarlı Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi 50

Şekil 5.27 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 50

Şekil 5.28 : R-1 Enkesitli Ön Hasarlı Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 50

Şekil 5.29 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi 51

Şekil 5.30 : R-1 Enkesitli Ön Hasarlı Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi 51

Şekil 5.31 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi 51

Şekil 5.32 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 52

Şekil 5.33 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi 52

Şekil 5.34 : R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Davranışa Etkisi 52

Şekil 5.35 : R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Davranışa Etkisi 53

Şekil 5.36 : R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 53

Şekil 5.37 : R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 53

Şekil 5.38 : R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Sünekliğe Etkisi 54

Şekil 5.39 : R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Sünekliğe Etkisi 54

Şekil 5.40 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Yüzey Hazırlığının Davranışa Etkisi 54

Şekil 5.41 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Yüzey Hazırlığının Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 55

Şekil 5.42 : R-1 Enkesitli Elemanlarda Yüzey Hazırlığının Sünekliğe Etkisi 55

Şekil 5.43 : NS–R–2–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 58

Şekil 5.44 : NS–R–2–0–M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkileri..... 58

Şekil 5.45 : NS–R–2–15–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 59

Şekil 5.46: NS–R–2–15–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi..... 59

Şekil 5.47 : NS–R–2–15–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 60

Şekil 5.48 : NS–R–2–30–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 60

Şekil 5.49: NS–R–2–30–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi..... 61

Şekil 5.50 : NS–R–2–30–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 61

Şekil 5.51 : NS–R–2–45–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 62

Şekil 5.52: NS–R–2–45–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi..... 62

Şekil 5.53 : NS–R–2–45–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 62

Şekil 5.54 : NS–R–2–30–C Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 63

Şekil 5.55 : NS–R–2–30–C Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 64

Şekil 5.56 : NS–R–2–30–C'nin Deney Sırasındaki Görünümleri 64

Şekil 5.57 : R-2 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi 68

Şekil 5.58 : R-2 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi..... 68

Şekil 5.59 : R-2 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi 68

Şekil 5.60 : R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi 69

Şekil 5.61 : R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 69

Şekil 5.62 : R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi 69

Şekil 5.63 : NS–R–3–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 74

Şekil 5.64 : NS–R–3–0–M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkileri..... 74

Şekil 5.65 : NS–R–3–15–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 75

Şekil 5.66: NS–R–3–15–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 76

Şekil 5.67 : NS–R–3–15–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 76

Şekil 5.68 : NS–R–3–30–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 77

Şekil 5.69: NS–R–3–30–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 77

Şekil 5.70 : NS–R–3–30–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri 77

Şekil 5.71 : NS–R–3–30–C Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 78

Şekil 5.72 : NS–R–3–30–C Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 79

Şekil 5.73 : NS–R–3–30–C'nin Deney Sırasındaki Görünümleri 79

Şekil 5.74 : NS–R–3–0–M–PD ve NS–R–3–0–M–PD–30 Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri 80

Şekil 5.75 : NS–R–3–0–M–PD–30 Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi 80

Şekil 5.76 : NS–R–3–0–M–PD–30'un Deney Sırasındaki Görünümleri 80

Şekil 5.77 : R-3 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi 81

Şekil 5.78 : R-3 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi..... 82

Şekil 5.79 : R-3 Enkesitli Elemanlarda Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi 82

Şekil 5.80 : R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi 82

Şekil 5.81 : R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 83

Şekil 5.82 : R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi 83

Şekil 5.83 : R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Davranışa Etkisi..... 83

Şekil 5.84 : R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Enerji Yutma Yeteneğine Etkisi 84

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 BETON ELEMANLARIN EKSENEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

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 beton elemanların eksenel yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Beton elemanların deney günlerindeki basınç dayanımları yaklaşık 20 MPa, HPFRCC panellerin basınç ve çekme dayanımları ise sırasıyla yaklaşık 100 ve 14 MPa'dır. Enkesit biçimi, HPFRCC panel kalınlığı, yükleme türü, ön hasar ve uygulama detayları çalışmada incelenen başlıca değişkenlerdir.

Yapılan deneyler sonucunda, öndöküm HPFRCC paneller ile güçlendirilen beton elemanların; sünekliğinde, dayanımında ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme 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.

AXIAL BEHAVIOUR OF CONCRETE MEMBERS
RETROFITTED WITH 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 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 20 MPa, while the compressive and tensile strengths of the prefabricated HPFRCC panels were around 110 and 13 MPa, respectively. The main test variables are; shape of cross-section, thickness of HPFRCC panels, loading pattern, presence of pre-damage and application details.

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

Bilindiği gibi, ülkemiz nüfusunun oldukça büyük bir bölümü, depremsel açıdan etkin bölgelerde yaşamaktadır. Yakın geçmişte yaşadığımız acı dolu deneyimler ise olası depremlerin doğuracağı etkilere, ne yazık ki, hazırlıklı olmadığımızı göstermiştir. Deprem etkisinin belki en önemli özelliği, yol açtığı can kayıplarının çoğunluğunun, insanlar tarafından inşa edilen yapıların davranışı ile ilgili olmasıdır, [1]. Bu durum, yapıların davranışlarının iyileştirilmesine yönelik bir çabanın, kayıpları azaltabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Dünyada depreme dayanıklı yapı tasarımı için benimsenen ilkeye göre, yapılar; küçük şiddetteki depremleri hasarsız (elastik sınır içinde), orta şiddetteki depremleri elastik sınırın ötesinde (ancak önemsiz ve kolayca onarılabilecek) hasarlarla, çok şiddetli depremleri ise (yapının can kaybı olmadan göçmeden ayakta kalabildiği) büyük hasarlarla karşılayabilmelidir. Ancak, gelişmekte olan pek çok ülkede, özellikle deprem bölgelerindeki yapılarda; yapı elemanları, deprem anında gerekli sünekliği ve dayanımı sağlayamamaktadır. Bu duruma yol açan başlıca nedenler arasında; yatay yüklerin, projelerde, yürürlükte olan ilgili yönetmelikleri ve standartları sağlayabilecek biçimde gözönüne alınmayışı, enine donatıların yetersizliği, donatı detaylarındaki hatalar ve kalitesiz beton kullanımı gelmektedir. Bunların sonucunda, taşıyıcı elemanlar; deprem sırasında etkiyen ek yatay ve düşey kuvvetlere karşı koyamayarak, yeterli deprem enerjisinin yutularak tüketilemediği gevrek bir davranışla hasar görmekte, ya da tamamen göçmektedir. Tüm bu durumların önüne geçebilmek için; 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 gerçekleşebilmektedir, [2, 3].

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde ise, 1960'lardan 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 oluşturmuştur, [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; Alaee [4] ve Alaee 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 sünekliğe 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 mevut 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 (derinli/genişlik oranı), öndöküm HPFRCC panel kalınlığı (15, 30, 45 mm), yükleme biçimi (monoton ya da tekrarlı), elemanlarda ön hasar bulunup bulunmaması, köşe birleşimleri (çelik köşebent yapıştırılması ya da karbon lifli

polimer kompozit (CFRP) şeritler sarılması) ve elemanlara yüzey hazırlığı uygulanıp uygulanmamasıdır.

Toplam 20 adet beton eleman, üç farklı türdeki dikdörtgen enkesitlerle (250×250, 150×300, 150×450) üretilmiştir. Bu enkesit türleri, derinlik/genişlik oranlarına göre R-1, R-2, R-3 olarak isimlendirilmiştir. Enkesit türlerine göre; sırasıyla 8, 7 ve 5 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. 2 adet R-1 ve 1 adet R-3 eleman ise (NS-R-1-0-M-PD-a, NS-R-1-0-M–PD-b ve NS-R-3-0-M-PD) belli bir seviyeye kadar yüklenerek ön hasar verildikten sonra onarılıp güçlendirilmiştir.

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 ve eğer varsa ek değişken (ön hasar bulunup bulunmaması, yüzey hazırlığı uygulanıp uygulanmaması) eleman isminde kullanılmıştır. Örneğin; NS-R-1-15-M elemanında; **NS**, (normal beton dayanımına sahip mevcut yapı elemanlarındaki durumu simgeleyen) eleman beton dayanımını (**N**ormal **S**trength); **R-1**, dikdörtgen enkesitin derinlik/genişlik oranını (**R**ectangular-**1**); **15**, HPFRCC panel kalınlığını ve **M** yükleme biçimini (**M**onoton) göstermektedir. Diğer elemanların isimlendirilmesinde kullanılan; **C**, deneyin tekrarlı yükler altında gerçekleştirildiğini (**C**yclic); **PD-15**, beton elemanın ön hasar (**P**re-**D**amage) verildikten sonra **15** mm kalınlıklı panellerle güçlendirildiğini; **A**, köşe birleşimlerine çelik köşebent yapıştırılması yerine, alternatif çözüm olarak, elemanın karbon lifli polimer kompozit (CFRP) şeritlerle sarıldığını (**A**lternative) ve **WOG**, elemana yüzey hazırlığı uygulanmadığını (**W**ith**O**ut **G**rids) 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 genişliğini ve derinliğini, 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 × h × l (mm)**	**Panel Kalınlığı t (mm)**	**Yükleme Biçimi**	**Ön Hasar**
NS–R–1–0–M	~20	250x250x500	0	Monoton	–
NS–R–1–15–M	~20	250x250x500	15	Monoton	–
NS–R–1–30–M	~20	250x250x500	30	Monoton	–
NS–R–1–45–M	~20	250x250x500	45	Monoton	–
NS–R–1–15–C	~20	250x250x500	15	Tekrarlı	–
NS–R–1–0–M–PD–15	~20	250x250x500	15	Monoton	Var
NS–R–1–0–M–PD–30	~20	250x250x500	30	Monoton	Var
NS–R–1–30–M–WOG	~20	250x250x500	30	Monoton	–

Tablo 1.2 R-2 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri

Eleman İsmi	**f'_c 28 gün (MPa)**	**Kesit Boyutları b × h × l (mm)**	**Panel Kalınlığı t (mm)**	**Yükleme Biçimi**	**Köşe Birleşimi**
NS–R–2–0–M	~20	150x300x500	0	Monoton	Çelik Köşebent
NS–R–2–15–M	~20	150x300x500	15	Monoton	Çelik Köşebent
NS–R–2–30–M	~20	150x300x500	30	Monoton	Çelik Köşebent
NS–R–2–45–M	~20	150x300x500	45	Monoton	Çelik Köşebent
NS–R–2–30–C	~20	150x300x500	30	Tekrarlı	Çelik Köşebent
NS–R–2–15–M-A	~20	150x300x500	15	Monoton	CFRP Şerit
NS–R–2–30–M-A	~20	150x300x500	30	Monoton	CFRP Şerit

Tablo 1.3 R-3 Enkesitli Elemanların Genel Özellikleri

Eleman İsmi	**f'_c 28 gün (MPa)**	**Kesit Boyutları b × h × l (mm)**	**Panel Kalınlığı t (mm)**	**Yükleme Biçimi**	**Ön Hasar**
NS–R–3–0–M	~20	150x450x500	0	Monoton	–
NS–R–3–15–M	~20	150x450x500	15	Monoton	–
NS–R–3–30–M	~20	150x450x500	30	Monoton	–
NS–R–3–30–C	~20	150x450x500	30	Tekrarlı	–
NS–R–3–0–M–PD–30	~20	150x450x500	30	Monoton	Var

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 Laboratuarında üretilip güçlendirilmiş, deneyler ise Yapı Malzemesi Laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

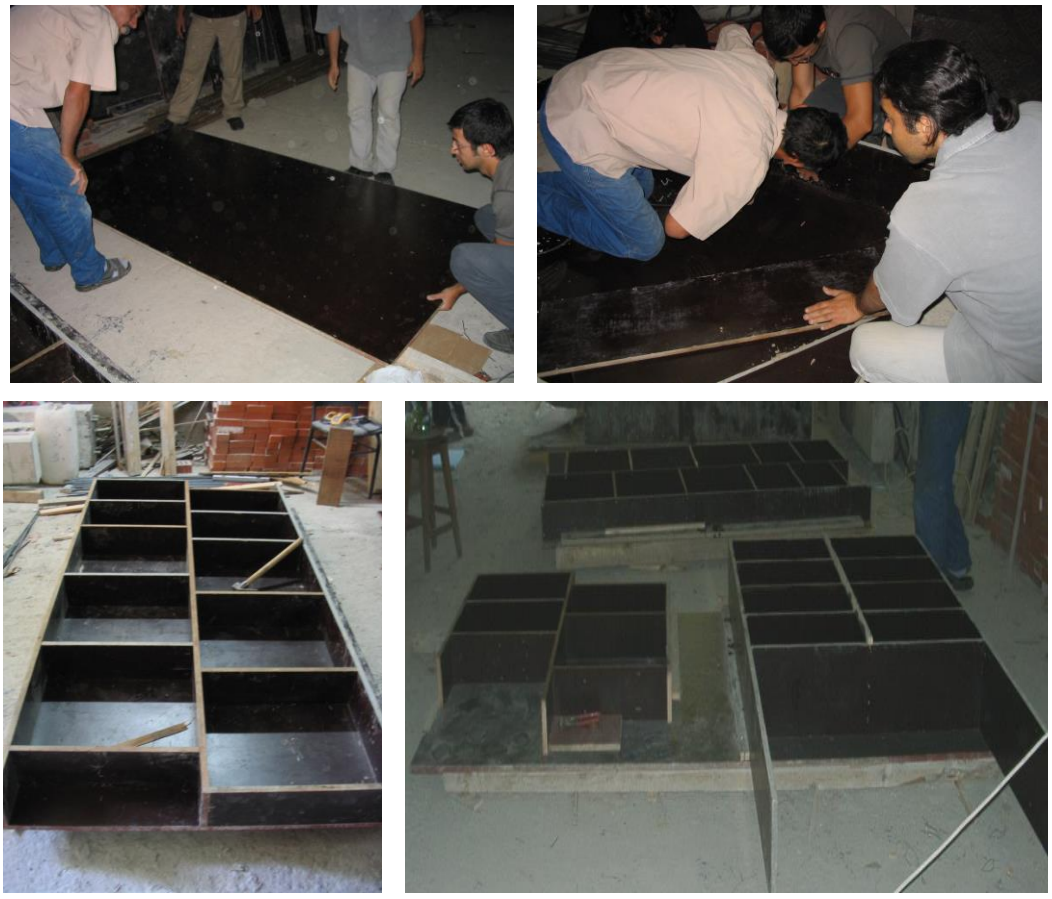
2.2 Elemanların Tasarımı

Normal beton dayanımına sahip mevcut yapı elemanlarındaki durumu simgelemek üzere; 28 günlük standart silindir basınç dayanımı yaklaşık 20 MPa olan beton kullanılarak, 20 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, laboratuvarda 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 20 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.

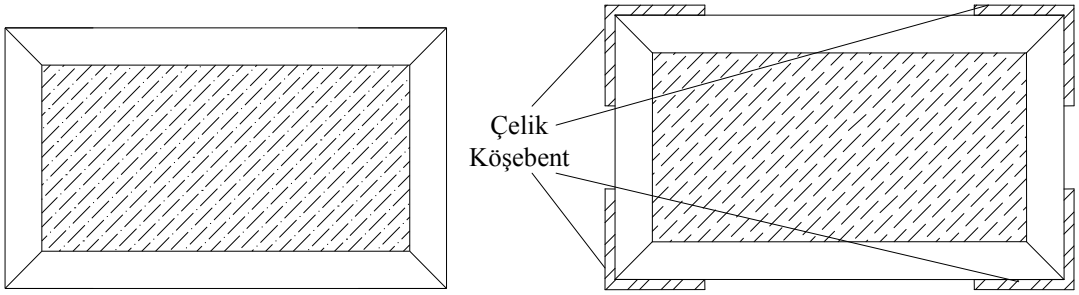
Beton dökümünü izleyen 7 gün boyunca, olası büzülme çatlaklarının önüne geçebilmek için, elemanların üzeri amerikan beziyle örtülüp sabah ve akşam birer kez sulanarak kür uygulanmıştır. Beton dökümü ve kür uygulanması Şekil 2.2'de görülmektedir. Kullanılan betonun karışımıyla ve mekanik özellikleriyle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

Şekil 2.2 Beton Dökümü ve Kür

2.4 Öndöküm HPFRCC Panellerin Üretimi

2.4.1 Güçlendirme Panellerinin Tasarımı

Çalışma kapsamında, üç farklı kalınlığa sahip (15, 30 ve 45 mm), yüksekliği 480 mm olan öndöküm HPFRCC güçlendirme panelleri üretilmiştir. Panellerin yükleme sırasında doğrudan eksenel yük almaması amacıyla; panel yüksekliği (480 mm), 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 arttırılması yerine sargılama etkisi sağlanarak sünekliğin arttırılması 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 yapıştırılarak ya da karbon lifli polimer kompozit (CFRP) şeritlerle sarılarak desteklenmiştir. Panel birleşim detayı Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3 HPFRCC Panellerin Köşe Birleşim Detayı

2.4.2 Karışım Sırası

Öndöküm HPFRCC panellerin tamamı, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi laboratuarındaki 0.5 m^3 kapasiteli düşey karıştırıcıda üretilmiştir, Şekil 2.4.

Şekil 2.4 Düşey Karıştırıcı

HPFRCC panellerin üretiminde 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 Sırası

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 gözlendiği 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

2.4.3 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 (~20°C) havuzlara konulmuştur. Üretimden 8 gün geçmesinin ardından ise panellere ısıl kür uygulanmıştır. Bu amaçla, 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 (~20°C) havuzlara tekrar konulmuş ve 17 gün daha bekletilmiştir. Toplam kür süresinin 28 güne erişmesiyle birlikte paneller havuzdan çıkarılmıştır.

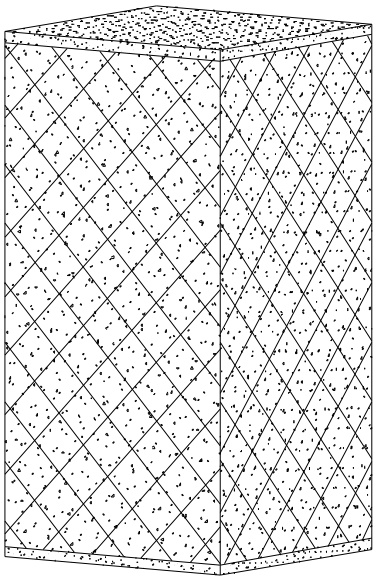
Şekil 2.8 HPFRCC Panellerin Kalıba Alınması ve Kürü

2.5 Güçlendirme Uygulaması

2.5.1 Yüzey Hazırlığı

Öndöküm HPFRCC paneller, güçlendirilecek elemanların yüzeylerine yapıştırılmadan önce; beton yüzeyler her iki doğrultuda 45^{o} eğimli, 40 mm aralıklarla, 3 mm genişliğinde ve yaklaşık 3 mm derinliğinde kesilmiştir. Böylelikle,

kayma yüzeylerinin arttırılması ve panellerin mevut 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 Concressive 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

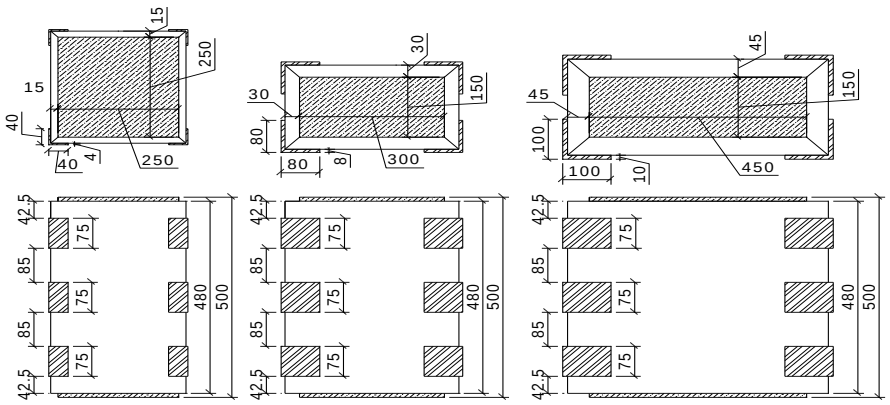
Paneller, düşey konumda durmakta olan beton elemanların karşılıklı iki yüzüne yapıştırılarak işkencelerle sabitlenmiştir. İşkencelerin panellere zarar vermesini önlemek için, panel ile işkence arasına ahşap elemanlar yerleştirilmiştir. Panellerin karşılıklı iki yüze yapıştırılmasının bir gün ardından, 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 Köşe Birleşimlerinin Çelik Köşebentle veya CFRP Şeritle Desteklenmesi

Güçlendirme panellerinin birleştiği köşelerdeki gerilme yığılmalarına karşı önlem olarak, panel kenarları 45° eğimle birbiri üzerine binecek şekilde üretilmiştir. 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 işkencelerle sabitlenmiştir. Çelik köşebentler ile işkencelerin arasına, yine, ahşap elemanlar yerleştirilmiştir. Tüm yapıştırmalarda Degussa Concressive 1406 çift bileşenli epoksi kullanılmıştır. İşkenceler, yapıştırma işleminden bir gün sonra sökülmüştür. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14.

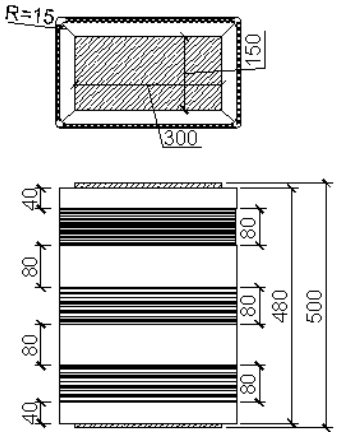
Şekil 2.13 Çelik Köşebentlerin Yapıştırılması



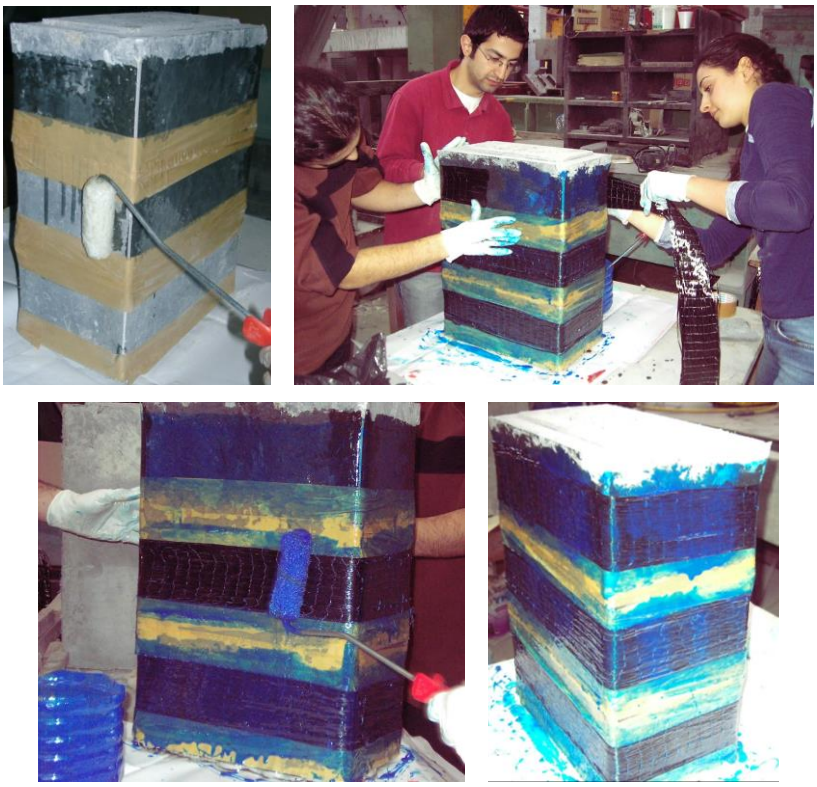
Panel Kalınlığı 15 mm Panel Kalınlığı 30 mm Panel Kalınlığı 45 mm

Şekil 2.14 Panel Kalınlıklarına Göre Çelik Köşebent Detayları

Köşe birleşimlerinin çelik köşebentlerle desteklenmesine alternatif olarak, iki adet güçlendirilmiş elemanın karbon lifli polimer kompozit (CFRP) şeritlerle sarılması yöntemi denenmiştir. Elemanların çevrelerinin birer kat, 80 mm genişliğinde, üç sıra CFRP şeritle sarılması sırasında 200 mm bindirme payı bırakılmıştır. Şekil 2.15. Şeritlerin yapıştırılmasından önce, güçlendirilmiş elemanların panel köşeleri, gerilme yığılmalarını azaltmak amacıyla 15 mm yarıçapında yuvarlatılmıştır. Bu işlemin ardından, panel yüzeyleri toz, kir, yağ ve benzeri maddelerden arındırılmıştır. Temizlenen panel yüzeylerine çift bileşenli epoksi polyamin astar karışımı (Primer) sürülmüştür. Astar karışımı sürülen elemanların yaklaşık 24 saat bekletilmelerinin ardından CFRP şeritlerin yapıştırılmasına başlanmıştır. CFRP şeritlerin panel yüzeyine yapışmasını sağlamak amacıyla epoksi esaslı çift bileşenli yapıştırıcı (Saturant) kullanılmıştır. Panel yüzeyine bir kat epoksi esaslı yapıştırıcı sürülmesinin ardından, yeterli boyda tek parça halinde kesilip hazırlanmış CFRP şeritler sarılarak yapıştırılmıştır. Şekil 2.16.



Şekil 2.15 CFRP Şeritlerin Uygulama Detayları



Şekil 2.16 CFRP Şeritlerin Sarılması

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYLERİ

3.1 Giriş

Elemanların üretiminde, normal beton dayanımına sahip mevcut yapı elemanlarındaki durumu simgelemek üzere; 28 günlük standart silindir basınç dayanımı yaklaşık 20 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 kolay işlenilebilir 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 yaklaşık 20 Mpa dayanım hedeflenerek üretilen hazır beton; tüm elemanlar için aynı şartlarda, 15.10.2004 tarihinde, kalıplara dökülmüştür. Beton karışımı Tablo 3.1'de verilmiştir. Su/çimento oranı 0.73 olan karışımda; Akçansa PÇ 42.5 portland çimentosu, kimyasal katkı malzemesi olarak orta düzey akışkanlaştırıcı Grace WRDA 90 W, mineral katkı olarak da Karabük öğütülmüş demir cürufu kullanılmıştır. Maksimum tane çapı 0.4 mm olan taş tozu Ayazağa Sinpaş Ocağı'ndan elde edilmiştir. Cebeci Dalbay Taşocağı'ndan elde edilmiş 1 No'lu kırma taşın maksimum tane çapı ise 5-13 mm'dir. Karışımda, maksimum tane çapı 0.5 mm olan Trakya doğal kumu da kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Beton Karışımı

Malzemeler	Çimento	Kum	Su	Kırma Taş I	Taş Tozu	Akışkanlaştırıcı	Demir Cürufu
Miktar (kg/m^3)	144	368	105	946	553	2	131

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.

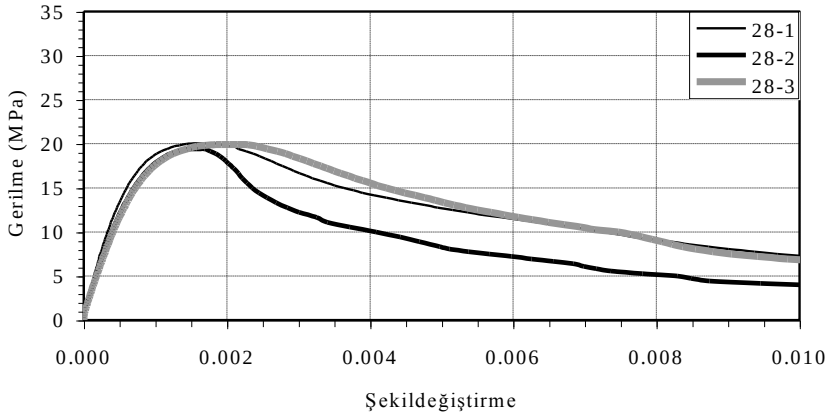
Tablo 3.2 Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları

Deneme	1	2	3
Çökme (mm)	60	85	100

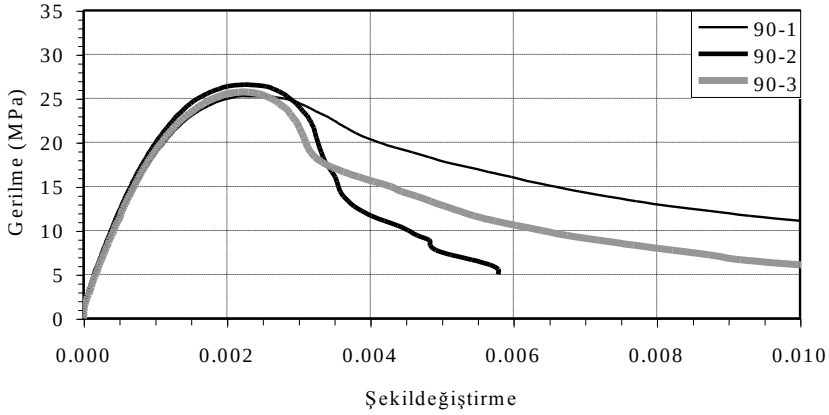
Beton dayanımını belirleyebilmek amacı ile alınan 14 adet standart silindir 150×300 mm) beton örneğine, güçlendirilme çalışması kapsamındaki elemanlarla aynı şartlarda (7 gün, nemli bezle) kür uygulanmıştır. Bu silindirlere, 5000 kN kapasiteli Amsler yükleme aygıtı kullanılarak; 28., 90., 180. ve 360. günlerde, standart silindir basınç deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sırasında gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin 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 Düzeneği

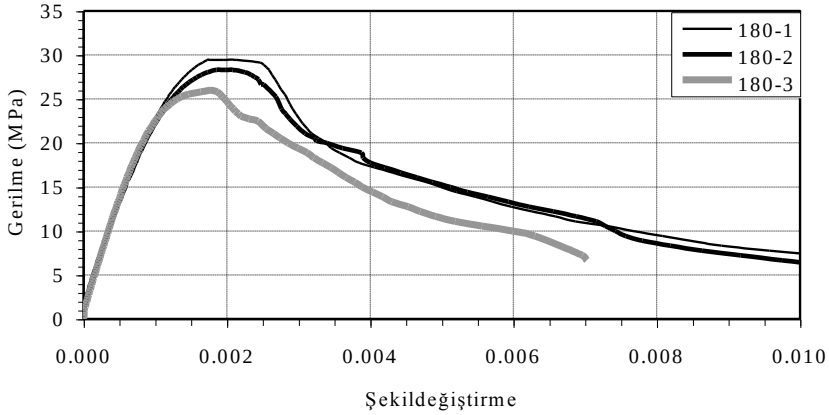
28, 90, 180 ve 360 günlük betonun, standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri, sırasıyla; Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Grafiklerdeki eksenel şekildeğiştirmelerin hesabı için orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



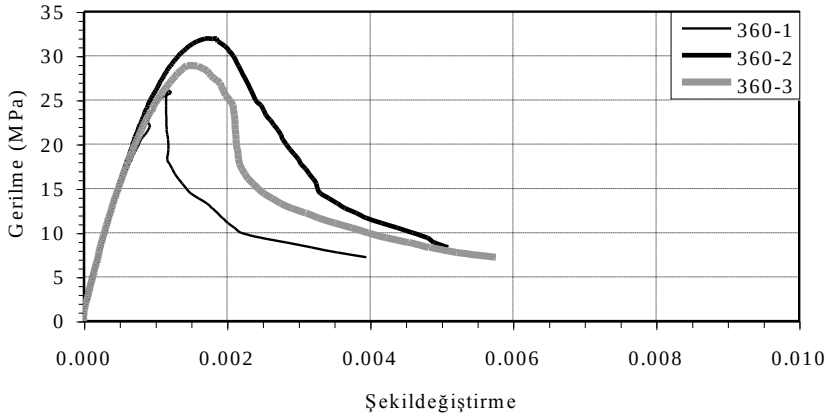
Şekil 3.2 28 Günlük Betonun Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



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 tüm sonuçlar Tablo 3.3′te özetlenmiştir.

Tablo 3.3 Standart Silindir Basınç Deneylerinin Sonuçları

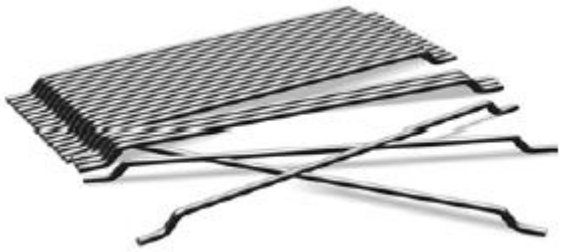
Standart Silindir	**Beton Yaşı (Gün)**	**Basınç Dayanımı f'_c (MPa)**	**Ort. Basınç Dayanımı $f'_{c,ort}$ (MPa)**	**Elastisite Modülü E_c (MPa)**	**Ort. Elastisite Modülü $E_{c,ort}$ (MPa)**
28-1	28	20.0		29472	
28-2	28	19.4	**19.8**	24108	**26000**
28-3	28	19.9		24421	
90-1	90	25.3		21085	
90-2	90	26.6	**25.9**	23927	**22500**
90-3	90	25.7		22473	
180-1	180	29.4		26917	
180-2	180	28.3	**27.9**	26212	**26800**
180-3	180	26.0		27270	
360-1	180	26.1		30829	
360-2	180	31.9	**29.0**	31238	**30900**
360-3	180	28.9		30717	

3.3 Öndöküm HPFRCC Panellerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

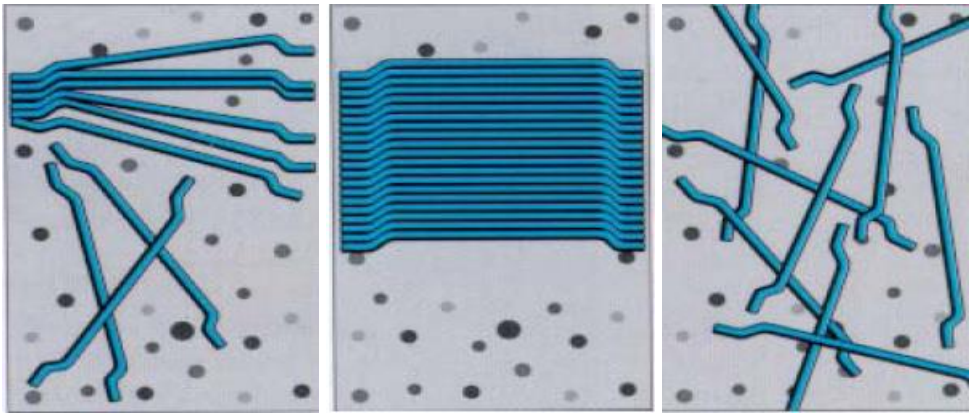
3.3.1 Çelik Lifler

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 Suya Değerek Dağılması

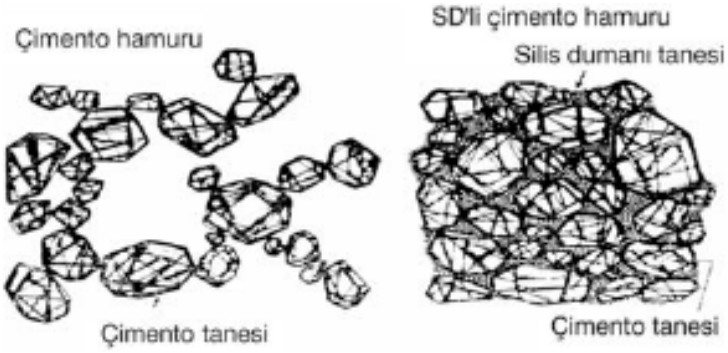
Tablo 3.4 Dramix ZP30/0.55 Çelik Liflerin Mekanik Özellikleri

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 arttırır. 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 yerdeğiştiren bir malzeme olarak, Elkem tarafından üretilmiş 2.25 kg/dm^3 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.

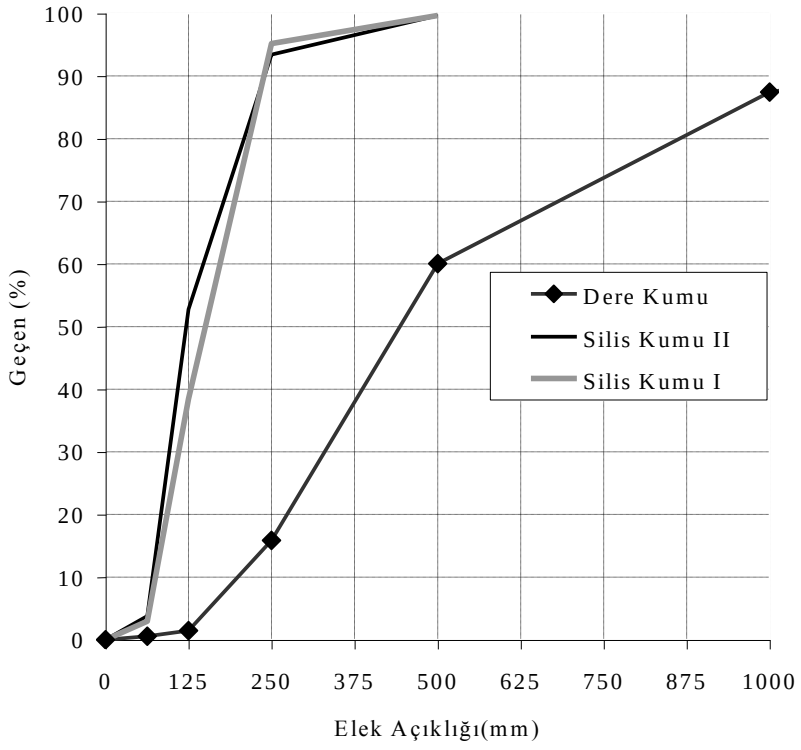
Çalışmada, Degussa Glenium 51 hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Glenium 51; hazır beton ve prekast endüstrisinin, erken yüksek dayanım, düzgün yüzey elde edilmesi ve nihai yüksek performans gibi taleplerine karşılık verebilmek üzere geliştirilmiş, modifiye edilmiş polikarboksilik eter esaslı, klor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

Tablo 3.5 Glenium 51 Hiperakışkanlaştırcının 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/dm^3 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 Karışımının Mekanik Özellikleri

3.4.1 HPFRCC Karışımı

Panel üretiminde kullanılan HPFRCC karışımı Tablo 3.6'da sunulmuştur. Tablodaki ağırlıkça karışım oranları, tüm malzemelerin ağırlıklarının çimento ağırlığına oranlanmasıyla elde edilmiştir. Ağırlıkça karışım miktarları ise 1 m^3 HPFRCC üretimi için gereken malzeme miktarlarını göstermektedir.

Tablo 3.6 HPFRCC Karışımı

HPFRCC Karışımı	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

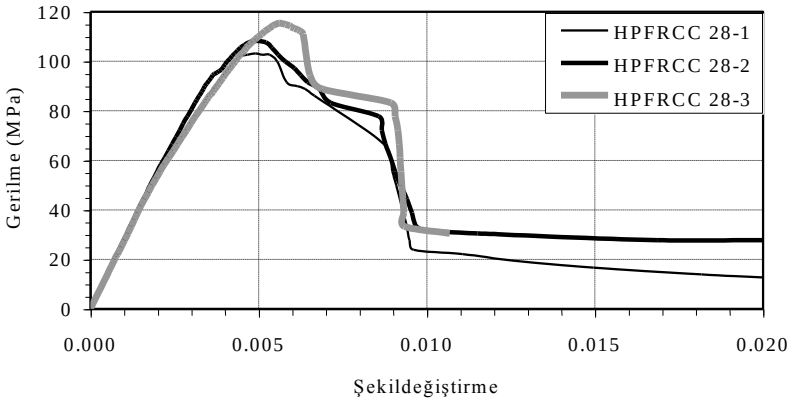
HPFRCC karışımının basınç ve çekme dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla, 9 adet standart yarma disk (150×60 mm) ve 9 adet standart silindir (150×300 mm) HPFRCC örneği üretilmiştir. HPFRCC disklere ve silindirlere, güçlendirme panelleriyle aynı şartlarda (7 gün 20°C + 3 gün 90°C + 17 gün 20°C sıcaklıktaki havuzlarda) kür uygulanmıştır. 28., 90. ve 180. günlerde standart silindir basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir, Şekil 3.10. Bu deneyler sırasında, beton standart silindir basınç deneylerindeki ölçüm sistemi ve yükleme aygıtı aynen kullanılmıştır.

Yalnızca; gerilme-şekildeğiştirme İlişkisinin belirlenebilmesi amacıyla kullanılan ölçüm çerçevesi (kompresometre), elastistisite modülünün hesaplanmasının ardından, daha ileri seviyelerdeki şekildeğiştirmelere karşılık gelen yük kapasitesinin de belirlenebilmesi için çıkartılıp, tüm boydan alınan ölçümlerle deneye devam edilmiştir. Üretilen standart yarma disklerine ise yarma çekme deneyi uygulanmıştır, Şekil 3.11.

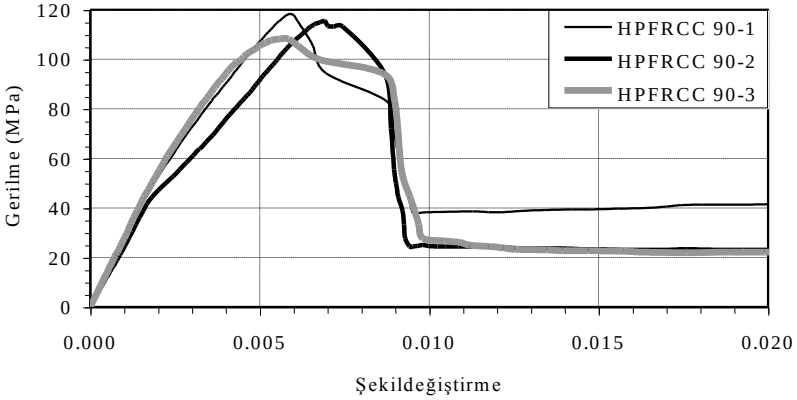
Şekil 3.10 HPFRCC Standart Silindir Basınç Deneyi

Şekil 3.11 HPFRCC Yarma Çekme Deneyi

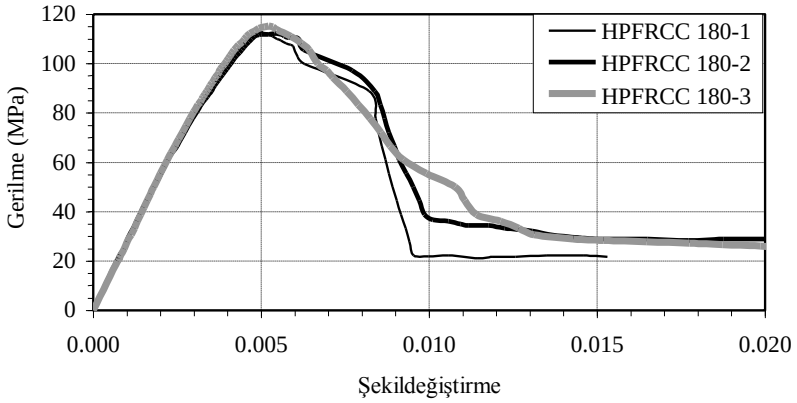
HPFRCC karışımının 28, 90, ve 180 günlük, standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri, sırasıyla; Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de verilmiştir. Grafiklerde, şekildeğiştirme değerlerinin hesabında tüm boydan (300 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.12 28 Günlük HPFRCC Karışımının Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.13 90 Günlük HPFRCC Karışımının Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 3.14 180 Günlük HPFRCC Karışımının Standart Silindir Basınç Deneyi Sonuçları

HPFRCC standart silindirlerin basınç deneylerinden ve standart yarma disklerin yarma çekme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar Tablo 3.7′de özetlenmiştir.

Elastisite modülü değerlerinin hesabında orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır. Tabloda, $\varepsilon_{c,0}$; gerilme – şekildeğiştirme eğrisinde basınç dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme değerini, $\varepsilon_{c,0.85}$; eğrinin düşen kolunda basınç dayanımın 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.

$$f_{cts} = \frac{2P}{\pi.d.l} \tag{3.1}$$

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.

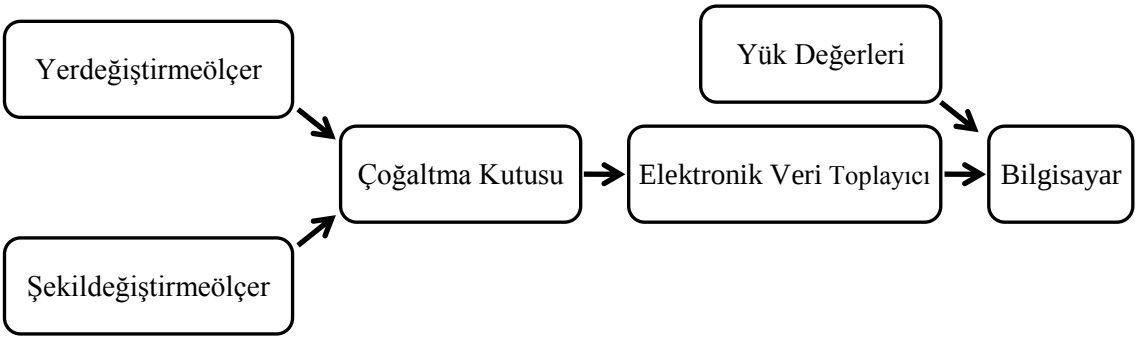
Tablo 3.7 HPFRCC Karışımının Deney Sonuçları

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 $\varepsilon_{c,0}$ (mm/mm)**	**Şekil-değiştirme $\varepsilon_{c,0.85}$ (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 DÜZENEĞİ

4.1 Giriş

Hazırlanan beton elemanların tümü, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuarı'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

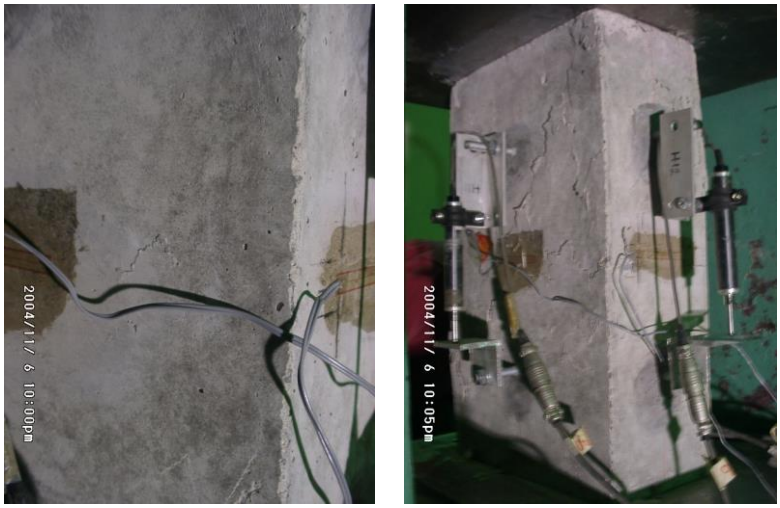
Tüm referans elemanları için yüklemeler; analitik olarak belirlenen eleman dayanımlarına uygun seçilen aralıklarda (100, 250 ton), Amsler yükleme aygıtıyla, eksenel doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Aygıtın, düşey yönde hareketli alt tablasının ve deney sırasında küçük yerdeğiştirmelere izin veren mafsallı üst tablasının göreli 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 şekildeğiştirmeleri ölçmek için, 60 mm ölçüm boyuna sahip, özel akma-sonrası türündeki şekildeğiştirmeölçerler (PL–60–11–1L) kullanılmıştır, Şekil 4.4. Şekildeğiştirmölçerler; beton yüzeyler düzleştirilip ve temizlenip uygun hale getirildikten sonra, referans elemanlarının komşu iki yüzüne yatay doğrultuda, çok amaçlı yapıştırıcı (Pattex Epoxy Mix) kullanılarak yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerlerin özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Referans Elemanlarının Yüzeyindeki Şekildeğiştirmeölçerler

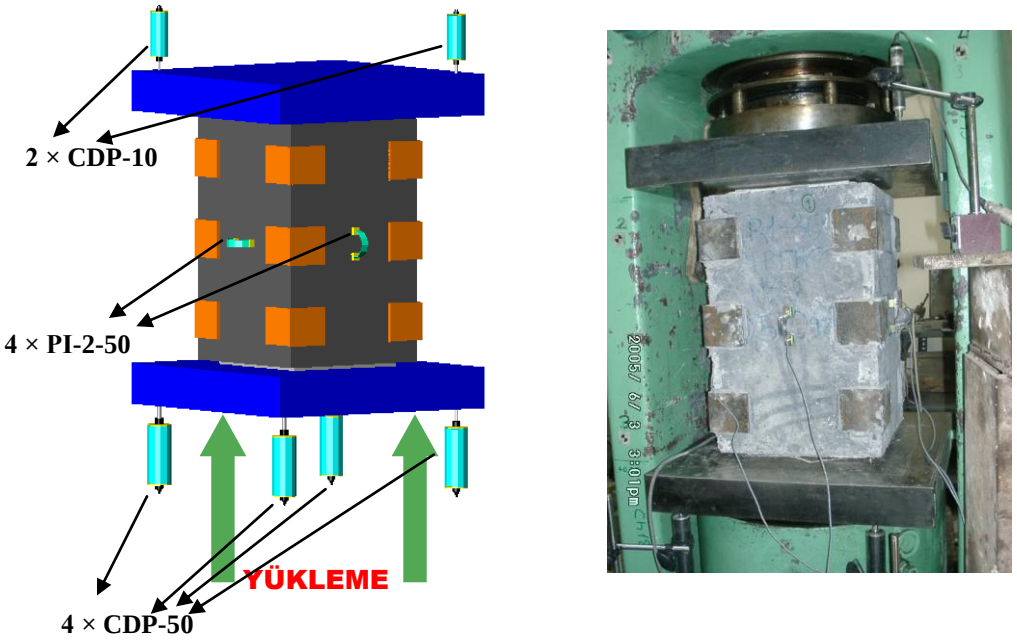
Tablo 4.1 Şekildeğiştirmeölçer Özellikleri

Şekildeğiştirmeölçer	**PL–60–11–1L**
Ölçüm Boyu (mm)	60
Ölçüm Katsayısı (%)	2.10 ± 1

4.3 Güçlendirilmiş Elemanlar için Deney Düzeneği

Tüm güçlendirilmiş elemanlar için yüklemeler; analitik olarak belirlenen eleman dayanımlarına uygun seçilen aralıklarda (250, 500 ton), Amsler yükleme aygıtıyla, eksenel doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5. Güçlendirilmiş elemanların tüm boyundaki (500 mm) yerdeğiştirmeyi elde etmek amacıyla, referans elemanlarının tüm boyundaki yerdeğiştirmenin ölçümü için tasarlanan düzenek aynı biçimde kullanılmıştır. Güçlendirme panellerinin üstünde ve altında yer alan 10'ar mm uzunluğundaki sarılmamış beton bölgelerin, deneyin ileri evrelerinde ezilmesi sonucu; yükleme aygıtının üst ve alt tablalarının, güçlendirme panellerine oturarak,

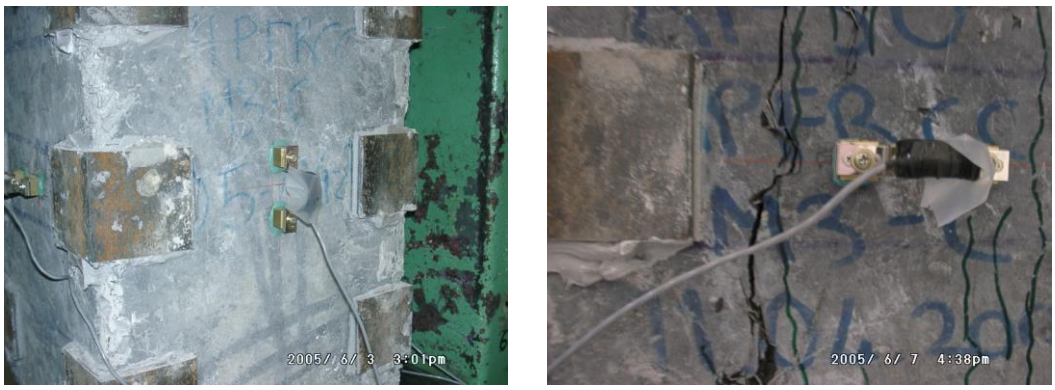
panellerin doğrudan eksenel yük almalarına yol açabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için, yükleme aygıtının üst ve alt tablaları ile beton elemanların üst ve alt yüzleri arasına 3'er mm'lik çelik plaklar yerleştirilerek ek kalınlık sağlanmıştır.



Şekil 4.5 Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi ve Genel Görünümü

Deney sırasında, güçlendirme panellerinin boyuna ve enine doğrultulardaki şekildeğiştirmelerini ölçmek için; ± 2 mm düzeyine kadar sağlıklı sonuç verebilen, 50 mm ölçüm boyuna sahip yerdeğiştirmeölçerler (TML PI–2–50) kullanılmıştır. Buradan elde edilen yerdeğiştirme verileri; ölçüm boyuna bölünüp, (boyutsuz) şekildeğiştirme biçiminde ifade edildikten sonra işlemlere katılmıştır. Yerdeğiştirmeölçerler, güçlendirilmiş elemanların dört yüzüne birden; komşu iki yüzden birine düşey, diğerine ise yatay doğrultuda paylaştırılacak biçimde; çok amaçlı plastik çelik macun (Sunfix) kullanılarak yapıştırılmıştır, Şekil 4.6. Ayrıca, yalnız iki eleman için (NS-R-1-15-M ve NS-R-1-30-M); güçlendirme panellerinin altında kalan beton kesitin hangi seviyede şekildeğiştirdiğine ışık tutması amacıyla, panellerin yapıştırılmasından önce elemanın beton yüzeylerinden biri üzerine bir adet boyuna ve bir adet enine doğrultuda (60 mm ölçüm boyuna sahip, özel akma-sonrası türündeki, PL–60–11–1L) şekildeğiştirmeölçerler yerleştirilmiştir. Şekildeğiştirmölçerler beton yüzeye referans elemanları için açıklanan biçimde yapıştırılmıştır. Güçlendirme uygulaması sırasında zarar görmemeleri amacıyla da, şekildeğiştirmeölçerlerin üstü (yalıtım malzemesi N-1 sürüldükten sonra) koruyucu

bantla sarılarak örtülmüştür. Deneylerde kullanılan tüm yerdeğiştirmeölçer türlerinin özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.6 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 sünekliğe 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 20 adet beton eleman; derinlik/genişlik oranlarına göre R-1, R-2, R-3 biçiminde isimlendirilmiştir. Her enkesit türü için birer adet referans elemanı güçlendirilmeden denenmesinin ardından, diğer tüm elemanlar; 15, 30 ve 45 mm kalınlıklı öndöküm HPFRCC panellerle sarılıp güçlendirildikten sonra denenmiştir. 3 adet eleman ise belli bir seviyeye kadar yüklenerek ön hasar verildikten sonra onarılıp güçlendirilmiştir.

Bu bölümde, üç farklı enkesit oranıyla üretilmiş elemanların eksenel yükler altında denenmeleri sonucunda elde edilen bilgiler, her enkesit oranı için ayrı bir başlık altında sunulmuştur.

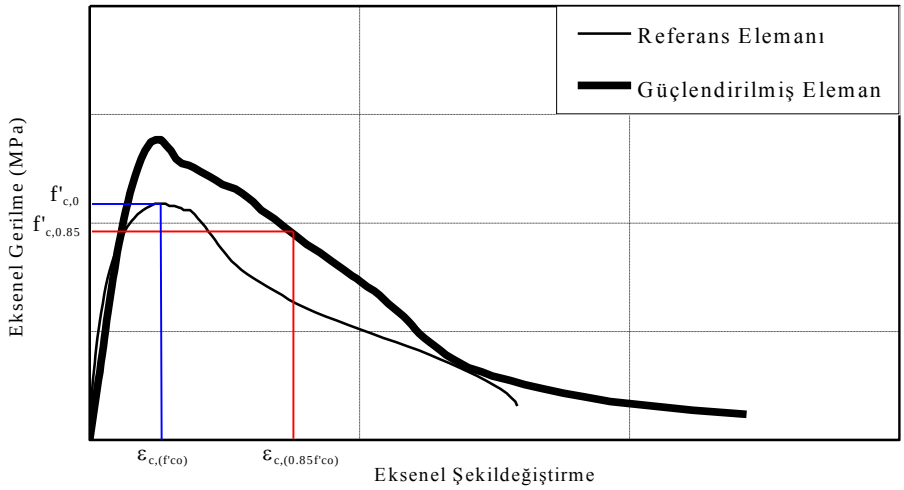
Referans elemanlarının her biri için; tüm boydan (500 mm) alınan ortalama yerdeğiştirme değerleri, orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile karşılaştırılak grafik halinde verilmiştir. Ayrıca, elemanların beton yüzeylerinden alınan enine şekildeğiştirmeler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

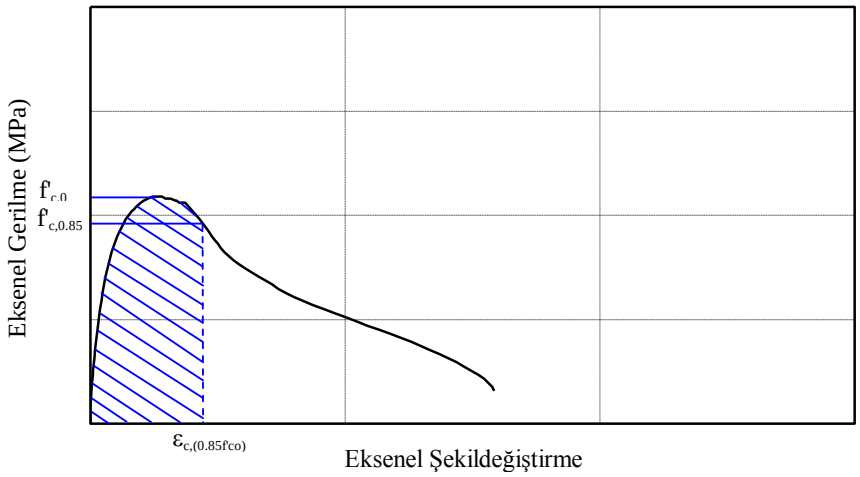
$$\mu = \frac{\varepsilon_{c,(0.85\,f'_{co})}}{\varepsilon_{c,(f'_{co})}} \tag{5.1}$$

Denklemde; μ, sünekliği; $\varepsilon_{c,(0.85f'co)}$, (ilgili kesit türüne ait) referans elemanının 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 elemanının basınç dayanımına karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme değerini simgelemektedir. Şekil 5.1.

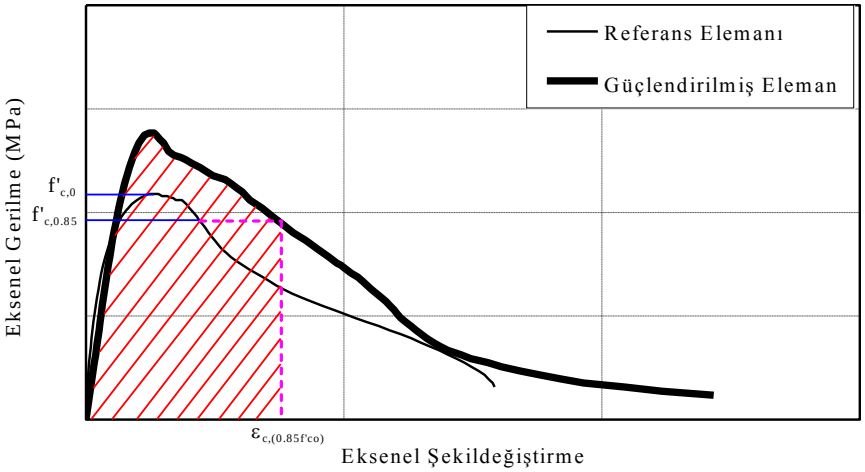


Şekil 5.1 Süneklik Değerlerinin Hesabında Kullanılan Şekildeğiştirmeler

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.

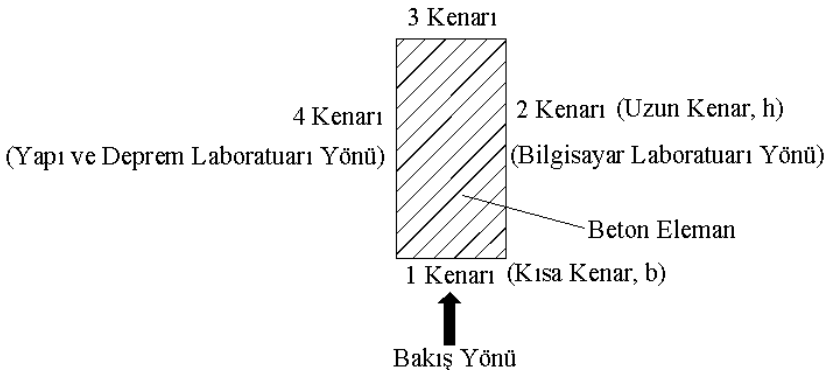


Şekil 5.2 Referans Elemanlarının Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme Eğrileri Altında Kalan Alan



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.

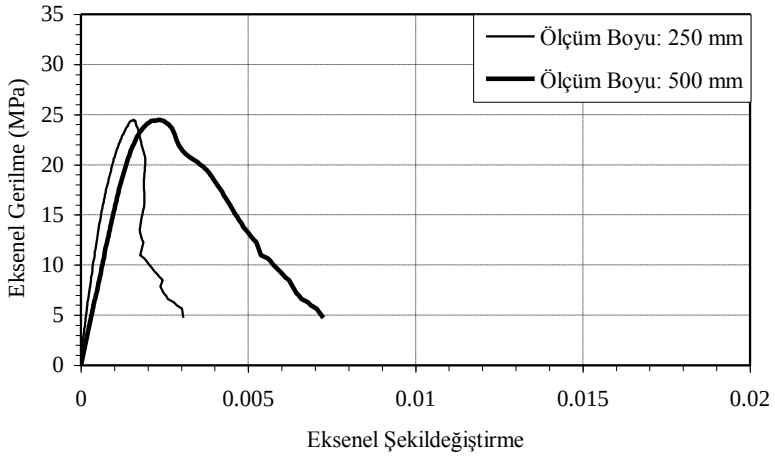


Şekil 5.4 Eleman Yerleşim Planı ve Kenarların İsimlendirilmesi

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

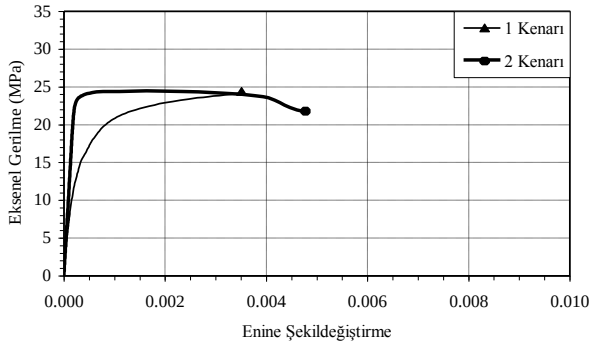
5.2.1 NS–R–1–0–M

28 günlük standart silindir basınç dayanımı 19.8 MPa olan betonla üretilmiş, 250x250x500 mm boyutlarındaki R–1 elemanlardan biri, referans elemanı olarak; güçlendirilmeden, monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Referans elemanının gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 NS–R–1–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

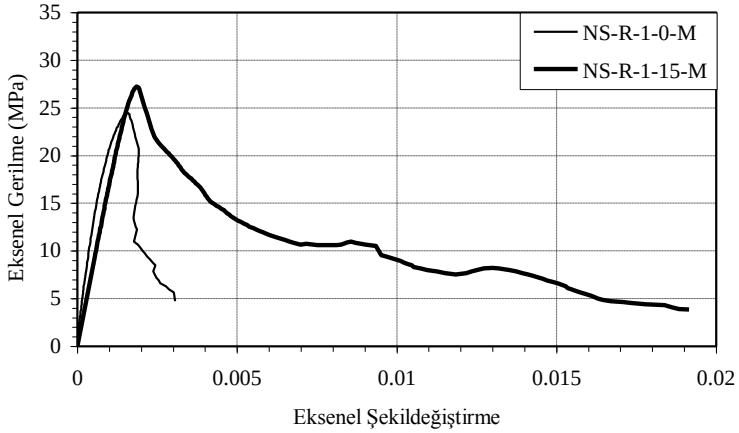
Deney sonuçları değerlendirilirken gözönüne alınan, orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama yerdeğiştirme değerlerinin, özellikle elastik bölge için, tüm boydan elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Referans elemanı, 0.0016 eksenel şekildeğiştirme değeri için 24.5 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır ve deney 0.003 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam etmiştir. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.03 MPa, süneklik değeri de 1.22 olarak hesaplanmıştır. Beton yüzeyinden şekildeğiştirmeölçerlerle alınan değerlere göre, elemanın 0.004 seviyesine kadar enine şekildeğiştirme yaptığı gözlenmiştir. Şekil 5.6. Ancak, eleman yüzeyinde çatlaklar oluştuktan sonra, özellikle (ölçüm alınamayan) çatlayan bölgelerde, çok daha büyük seviyelerde enine şekildeğiştirmelerin gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.6 NS–R–1–0–M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

5.2.2 NS–R–1–15–M

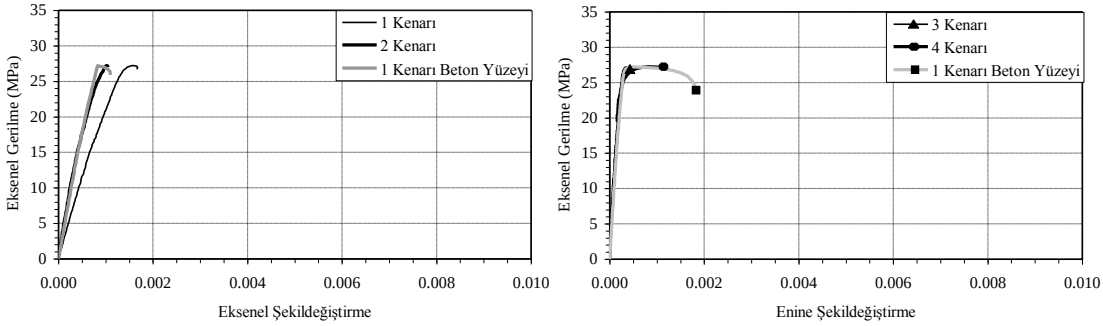
15 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.7′de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 NS–R–1–15–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.019 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 24.5 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.05 MPa, süneklik değeri de 1.73 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmeler ile paneller yapıştırılmadan önce

elemanın beton yüzeyine yerleştirilmiş şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen eksenel ve enine şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.8'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.9'da verilmiştir.

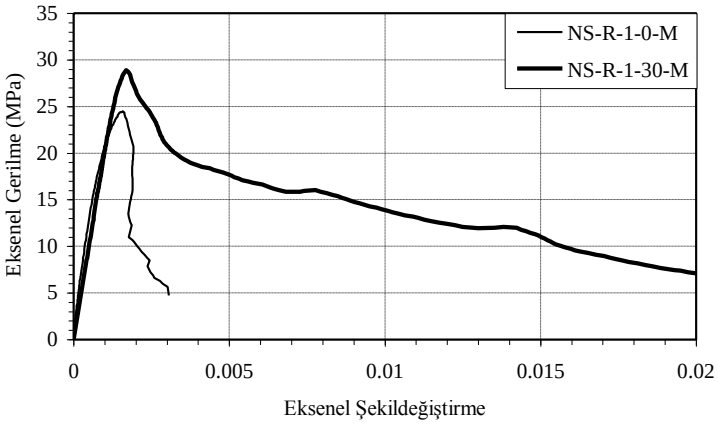


Şekil 5.8 NS–R–1–15–M Güçlendirme Panellerindeki ve Beton Yüzeydeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.9 NS–R–1–15–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

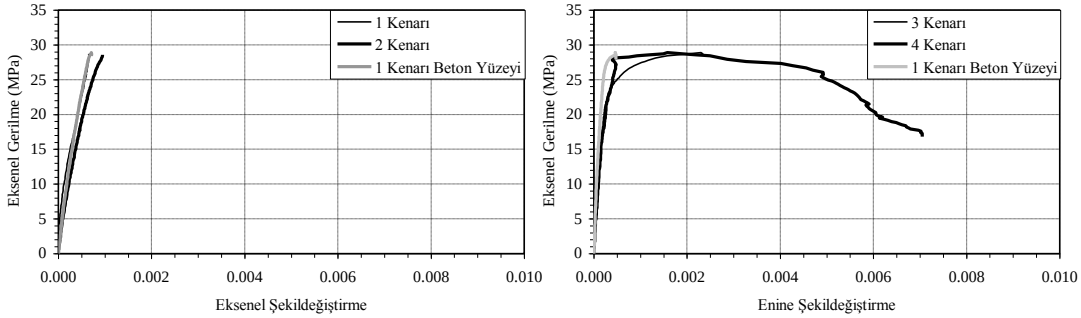
5.2.3 NS–R–1–30–M

30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.10′da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.10 NS–R–1–30–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 28.9 MPa'lık bsaınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.06 MPa, süneklik değeri de 1.9 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmeler ile paneller yapıştırılmadan önce elemanın beton yüzeyine yerleştirilmiş şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen eksenel ve enine şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.11'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.12'de verilmiştir.

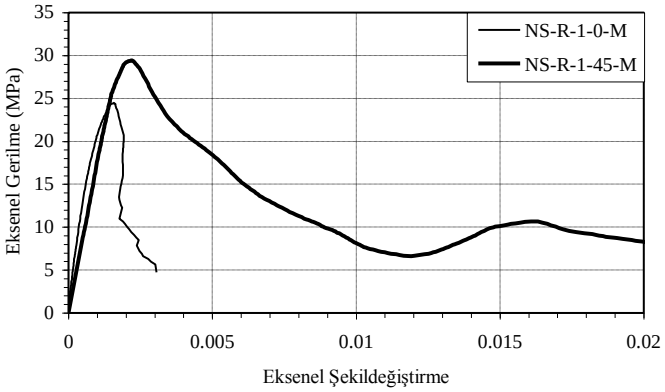


Şekil 5.11 NS–R–1–30–M Güçlendirme Panellerindeki ve Beton Yüzeydeki Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.12 NS–R–1–30–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

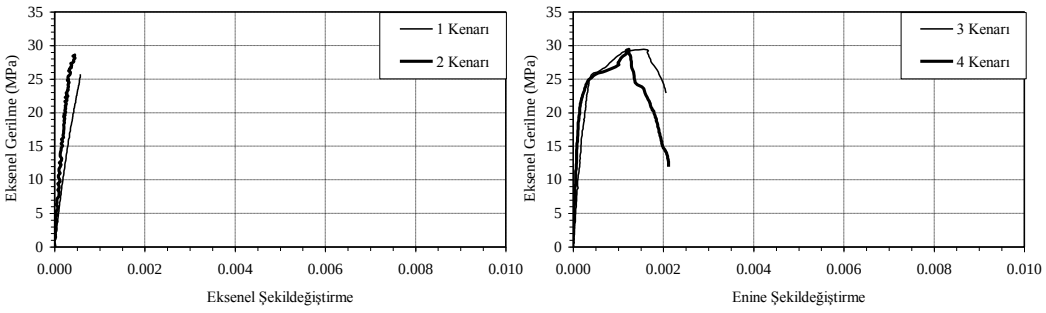
5.2.4 NS–R–1–45–M

45 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.13′te verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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.

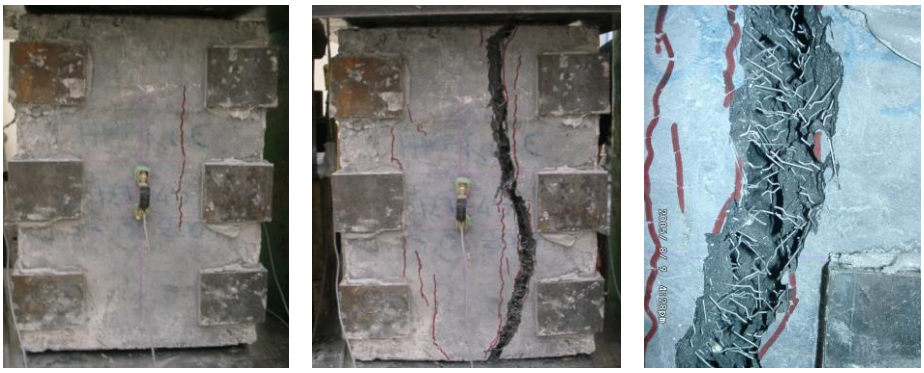


Şekil 5.13 NS–R–1–45–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 29.4 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.08 MPa, süneklik değeri de 2.56 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.14'te; elemanın deney sırasındaki görünümleri ise Şekil 5.15'te verilmiştir.



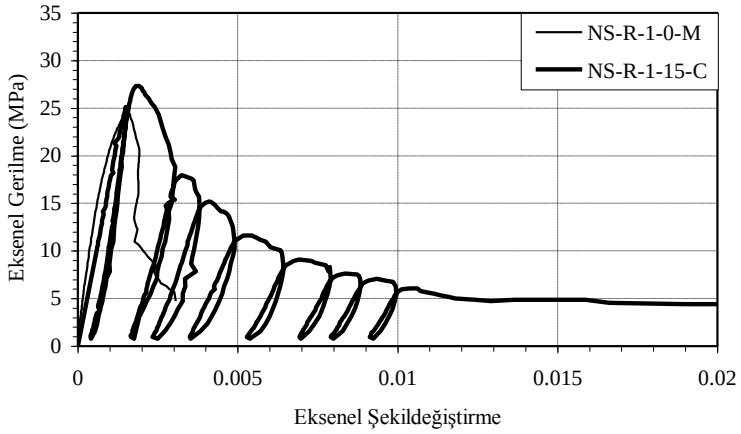
Şekil 5.14 NS–R–1–45–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme – Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.15 NS–R–1–45–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

5.2.5 NS–R–1–15–C

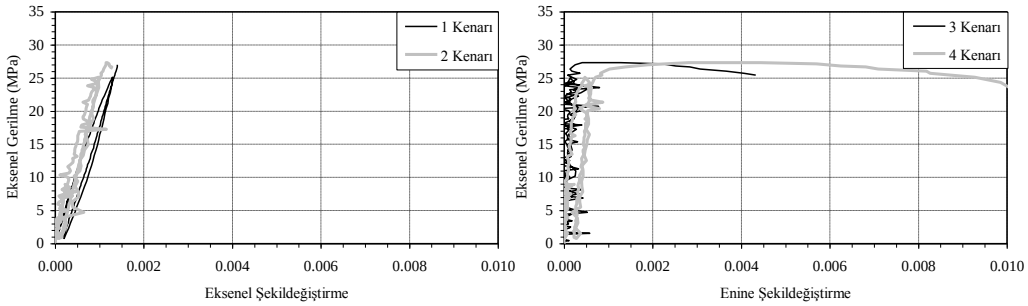
15 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.16′da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.16 NS–R–1–15–C Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 27.3 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.05 MPa, süneklik değeri de 1.84 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden

elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri Şekil 5.17'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.18'de verilmiştir.

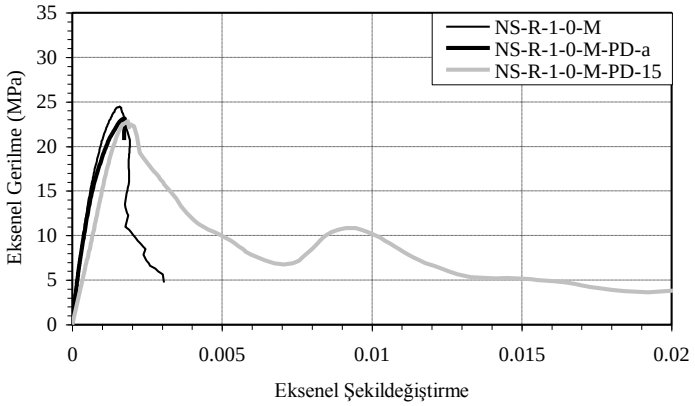


Şekil 5.17 NS–R–1–15–C Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.18 NS–R–1–15–C'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

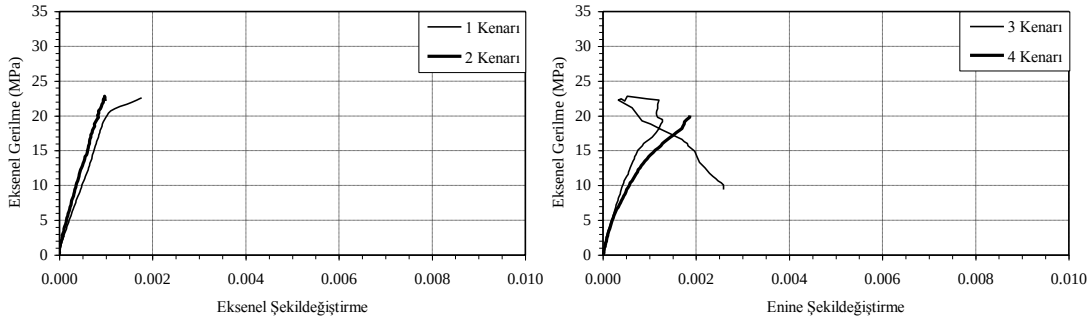
5.2.6 NS–R–1–0–M–PD–15

Güçlendirilmemiş halde, 0.0028 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar yüklenerek (NS-R-1-0-M-PD-a) hasar verilen eleman, yüzeydeki çatlaklar ve (ezilmiş beton tabakalarının kaldırılması sonucu oluşan) oyuklar epoksi harcıyla doldurulduktan sonra, 15 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilerek (NS-R-1-0-M-PD-15), monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkileri, referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.19′da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının ve önhasar verilen elemanın orta bölgelerinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanının ölçüm boyundan alınan değerlere göre, güçlendirilmiş elemanın sünekliğinde artış gözlenmiştir ancak dayanımda artış elde edilememiştir.



Şekil 5.19 NS–R–1–0–M–PD–a ve NS–R–1–0–M–PD–15 Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 22.8 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.03 MPa, süneklik değeri de 1.37 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.20'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.21'de verilmiştir.

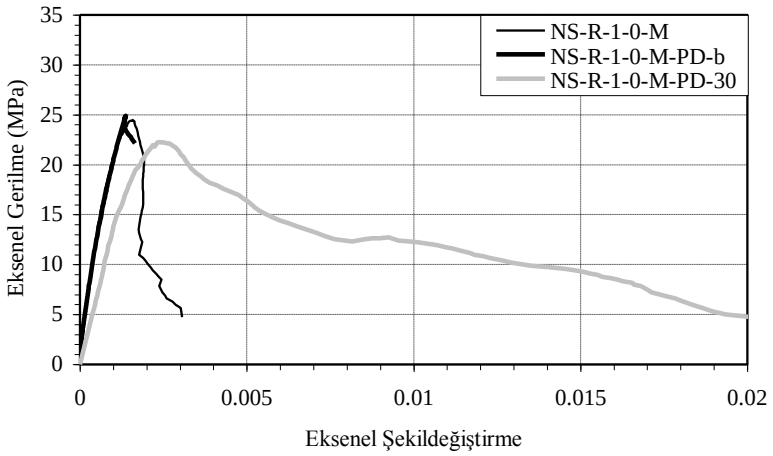


Şekil 5.20 NS–R–1–0–M–PD–15 Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.21 NS–R–1–0–M–PD–15'in Deney Sırasındaki Görünümleri

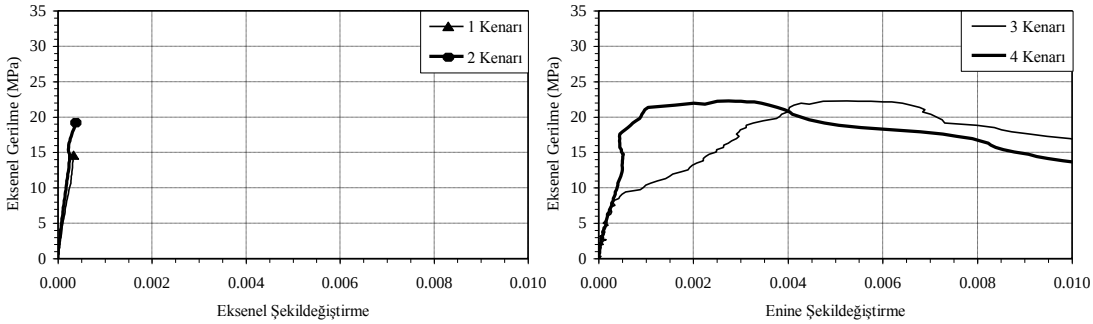
5.2.7 NS–R–1–0–M–PD–30

Güçlendirilmemiş halde, 0.0033 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar yüklenerek (NS-R-1-0-M-PD-b) hasar verilen eleman, yüzeydeki çatlaklar ve (ezilmiş beton tabakalarının kaldırılması sonucu oluşan) oyuklar epoksi harcıyla doldurulduktan sonra, 30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilerek (NS-R-1-0-M-PD-30), monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkileri, referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.22′de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının ve önhasar verilen elemanın orta bölgelerinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanının ölçüm boyundan alınan değerlere göre, güçlendirilmiş elemanın sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir. Dayanımda ise artış elde edilememiştir.



Şekil 5.22 NS–R–1–0–M–PD–b ve NS–R–1–0–M–PD–30 Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 22.3 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.05 MPa, süneklik değeri de 1.98 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.23'te verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.24'te verilmiştir.

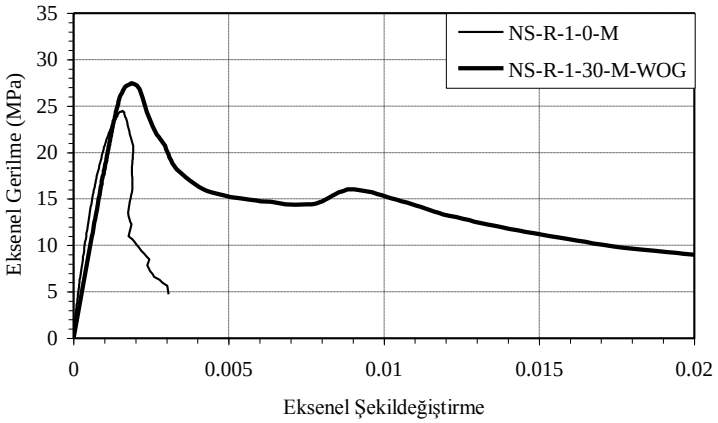


Şekil 5.23 NS–R–1–0–M–PD–30 Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.24 NS–R–1–0–M–PD–30'un Deney Sırasındaki Görünümleri

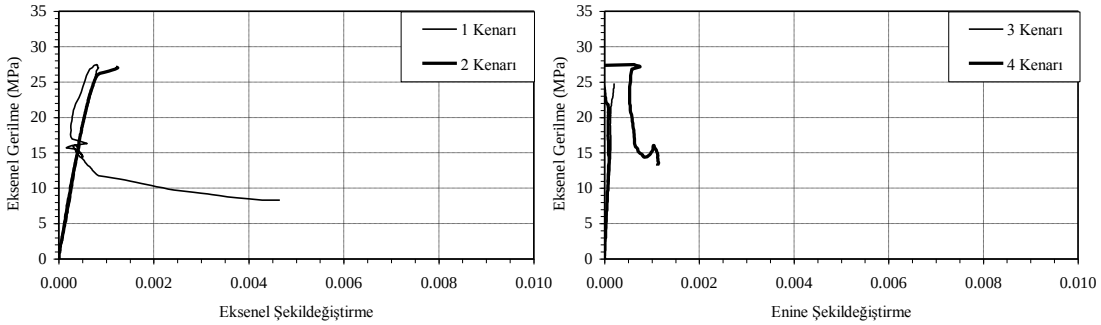
5.2.8 NS–R–1–30–M–WOG

Yüzey hazırlığı uygulanmadan, 30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.25'te verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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.

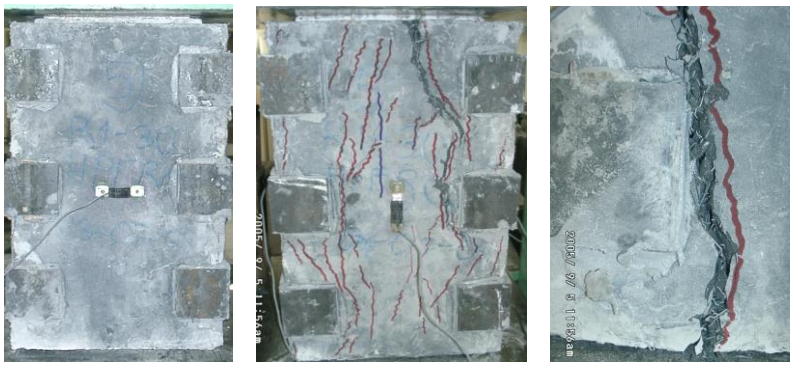


Şekil 5.25 NS–R–1–30–M–WOG Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 27.5 MPa'lık bsaınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.06 MPa, süneklik değeri de 1.87 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.26'da verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.26 NS–R–1–30–M–WOG Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.27 NS–R–1–30–M–WOG'un Deney Sırasındaki Görünümleri

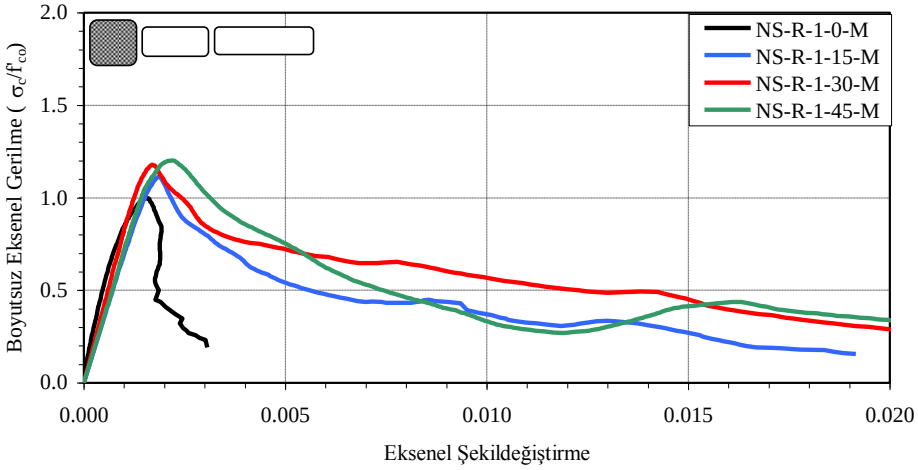
5.2.9 R-1 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

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:

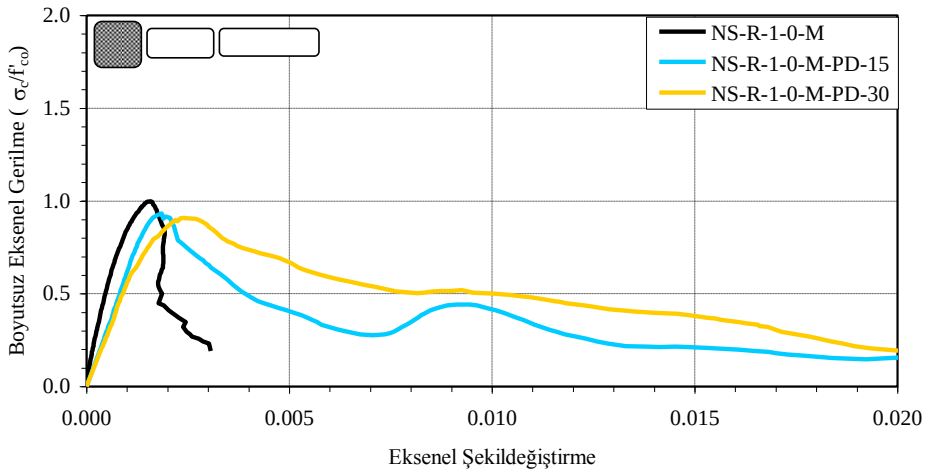
- Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlığı [15 / 30 / 45 mm]
- Yükleme Biçimi [Monoton Artan / Tekrarlı]
- Ön Hasar [Var / Yok]
- Yüzey Hazırlığı [Var / Yok]

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

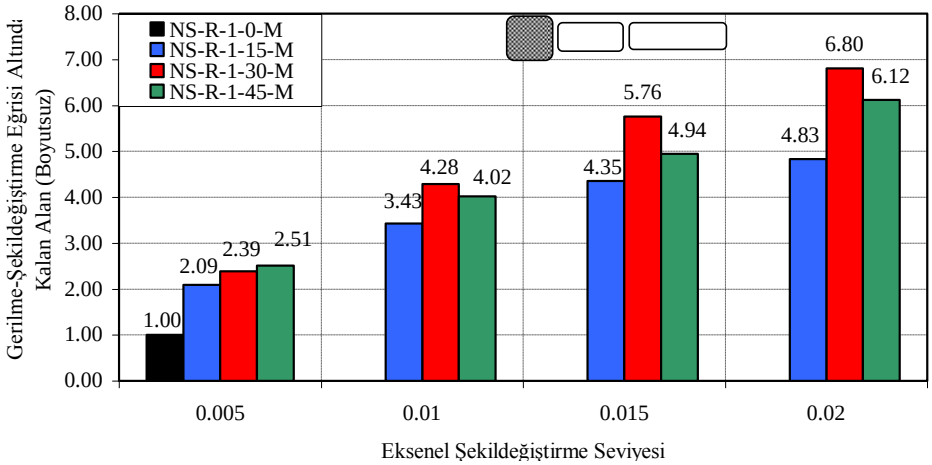
- Öndöküm HPFRCC panel kalınlıklarının artışı; denenen elemanların dayanımlarında (ön hasarlı elemanlar dışında), sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış sağlamıştır. Şekil 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33.



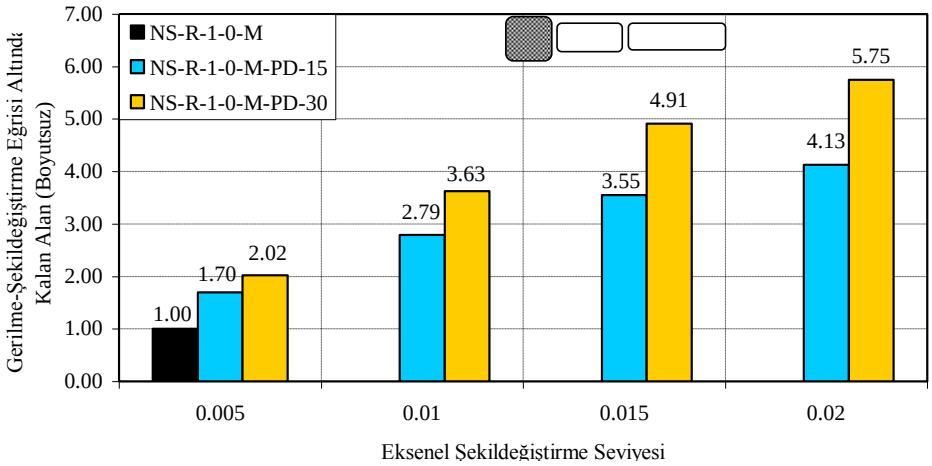
Şekil 5.28 R-1 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi



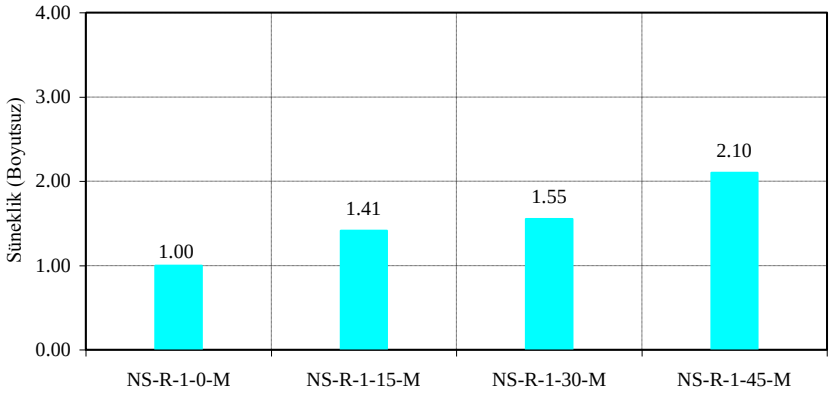
Şekil 5.29 R-1 Enkesitli Ön Hasarlı Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi



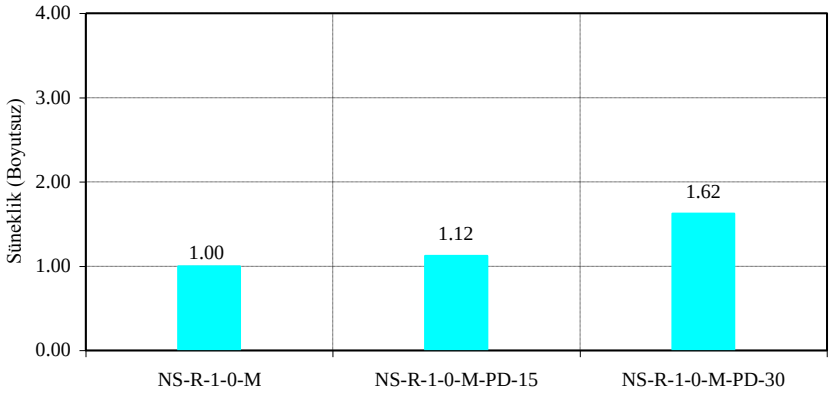
Şekil 5.30 R-1 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.31 R-1 Enkesitli Ön Hasarlı Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

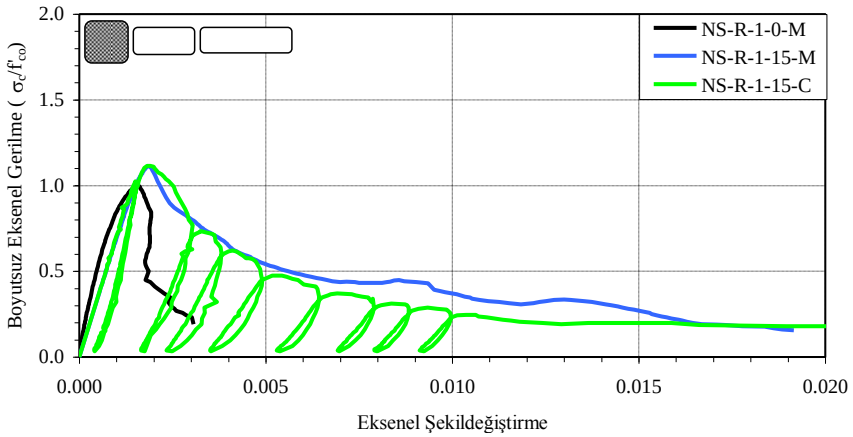


Şekil 5.32 R-1 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi

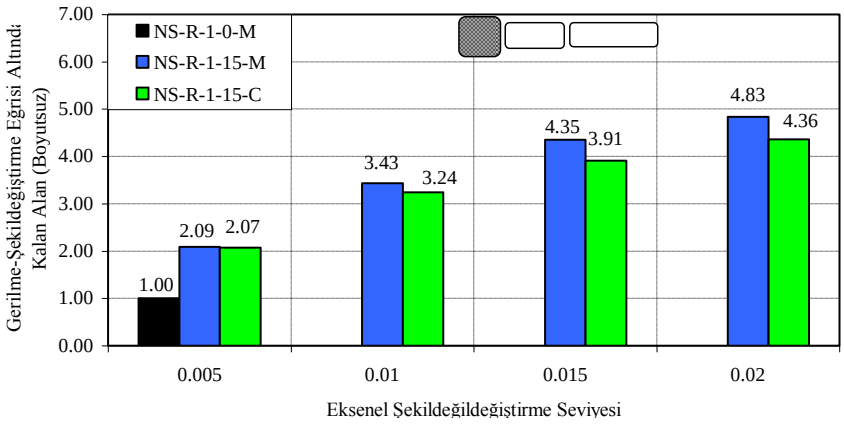


Şekil 5.33 R-1 Enkesitli Ön Hasarlı Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi

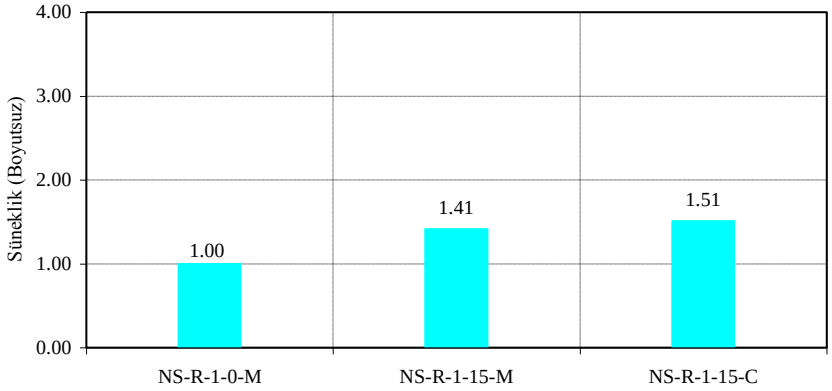
- Tekrarlı artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (NS-R-1-15-C); tüm diğer özellikleri aynı olan, ancak monoton artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman ile (NS-R-1-15-M) oldukça yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.34, 5.35, 5.36.



Şekil 5.34 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi

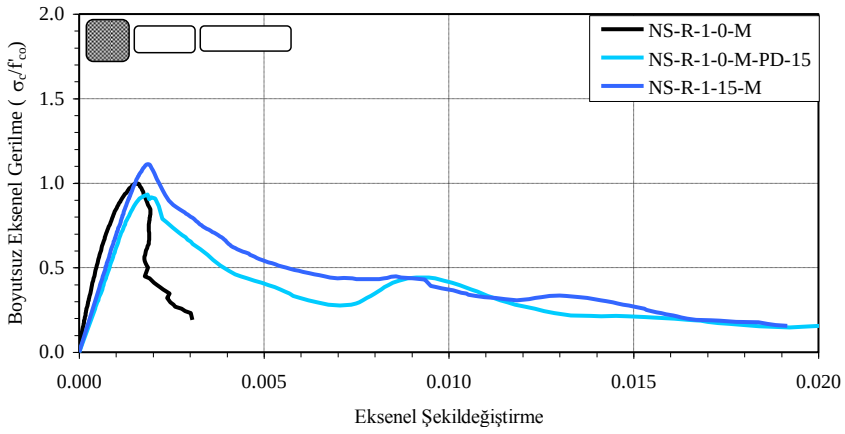


Şekil 5.35 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

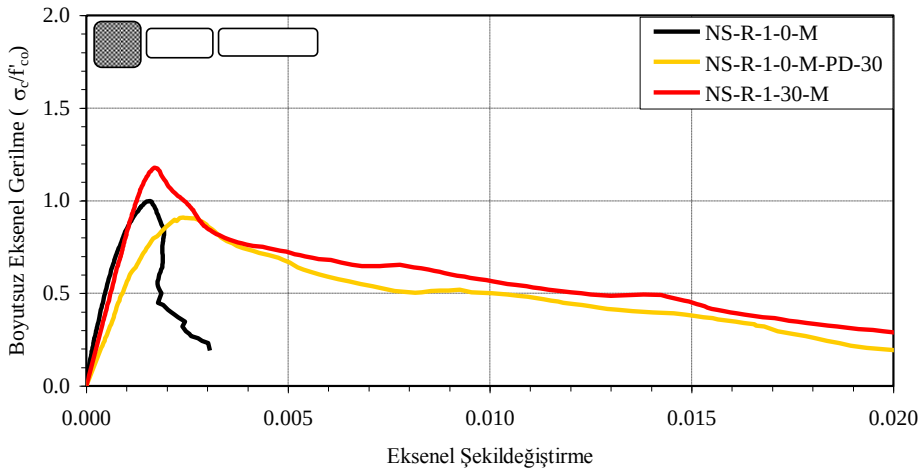


Şekil 5.36 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi

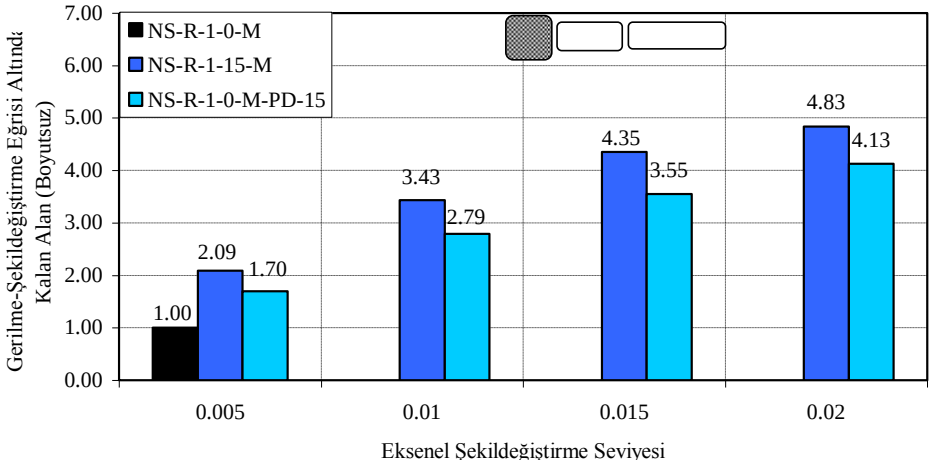
- Ön hasar verildikten sonra güçlendirilen elemanların dayanımlarında artış elde edilememiştir; ancak, sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir. Şekil 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41, 5.42.



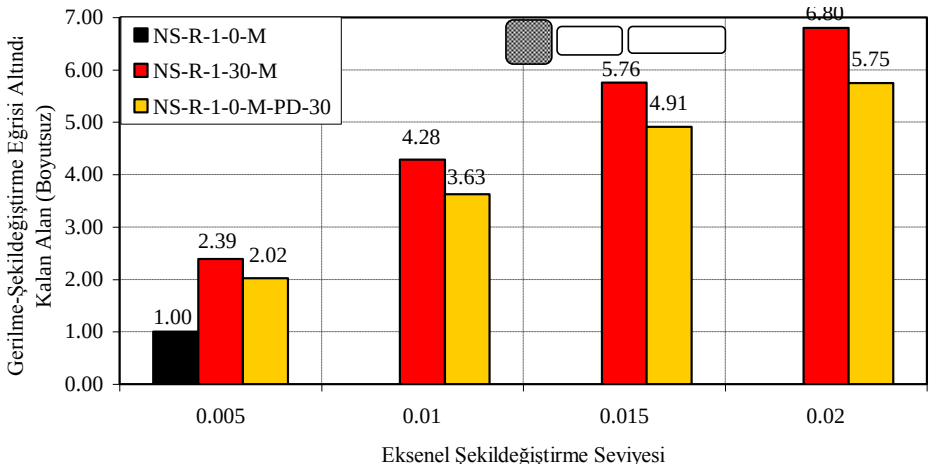
Şekil 5.37 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Davranışa Etkisi



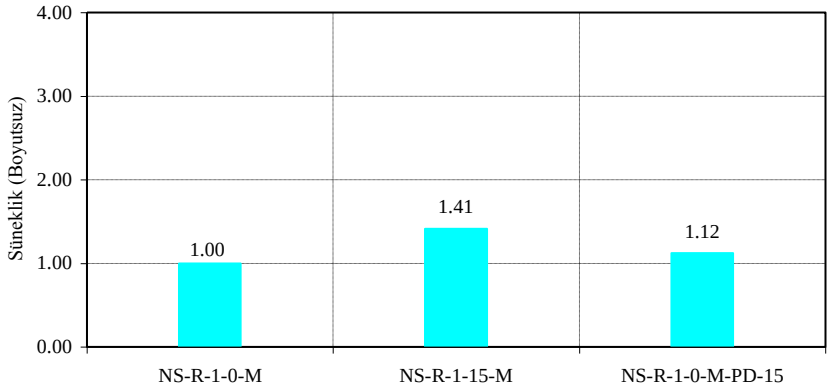
Şekil 5.38 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Davranışa Etkisi



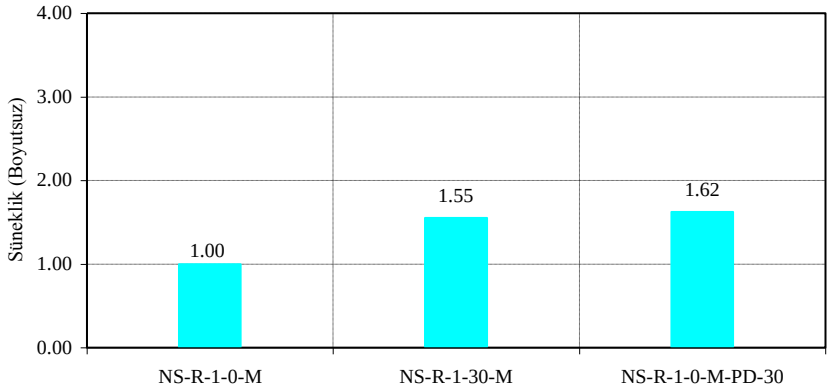
Şekil 5.39 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.40 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

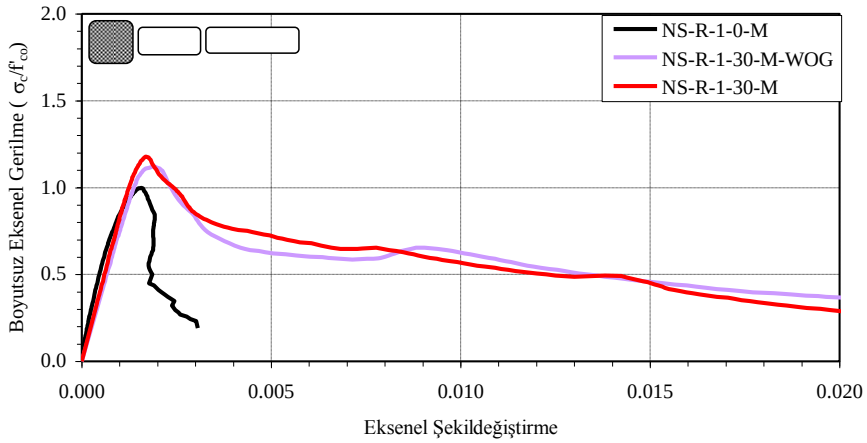


Şekil 5.41 R-1 Enkesitli, 15 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Sünekliğe Etkisi

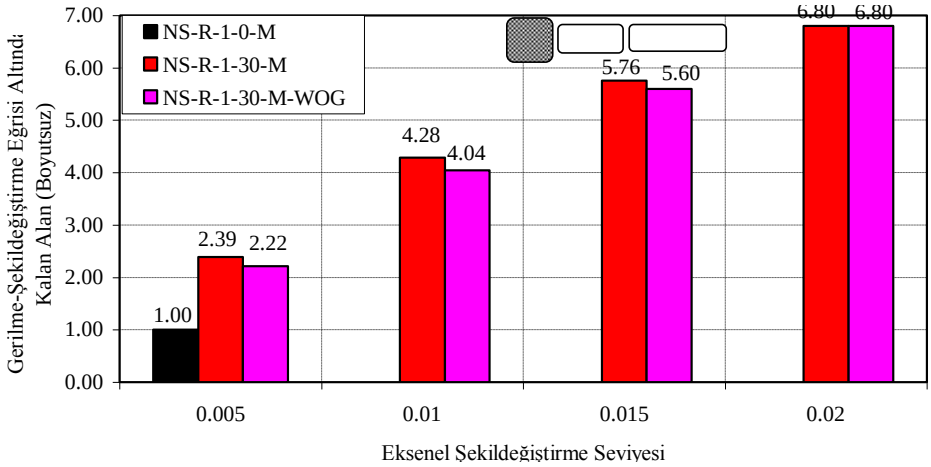


Şekil 5.42 R-1 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Sünekliğe Etkisi

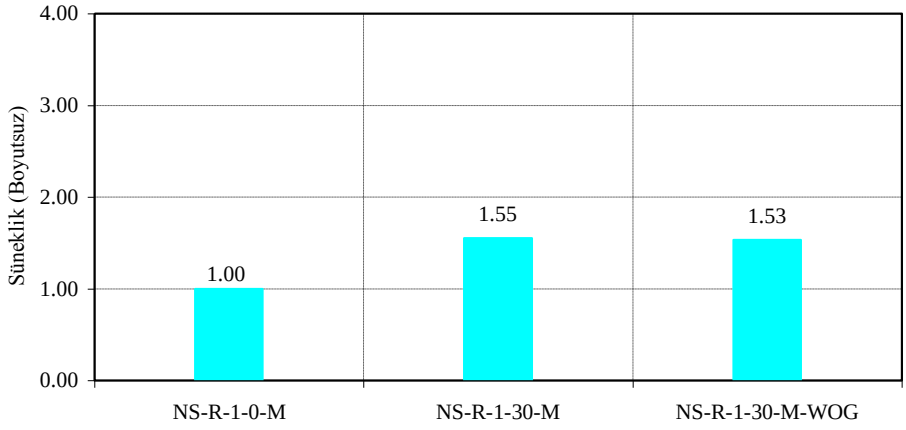
- Yüzey hazırlığı uygulanmadan güçlendirilmiş eleman (NS-R-1-30-M-WOG), diğer tüm özellikleri aynı olan, ancak güçlendirme panellerinin yapıştırılmasından önce yüzey hazırlığı uygulanmış eleman ile (NS-R-1-30-M) oldukça yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.43, 5.44, 5.45.



Şekil 5.43 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yüzey Hazırlığının Davranışa Etkisi



Şekil 5.44 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yüzey Hazırlığının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.45 R-1 Enkesitli Elemanlarda Yüzey Hazırlığının Sünekliğe Etkisi

R-1 enkesitli elemanların deney sonuçları özeti, Tablo 5.1'de sunulmuştur. Bu tabloda; j, deney günündeki beton yaşını; 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 yaşını; $f_{HPFRCC,k}$, 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. %
NS–R–1–0–M	297	28.62	24.32	24.5	–	–	–	–	–
NS–R–1–15–M	326	28.79	24.47	–	27.2	62	111.74	13.79	11
NS–R–1–30–M	322	28.77	24.45	–	28.9	66	112.06	13.85	18
NS–R–1–45–M	298	28.62	24.33	–	29.4	46	110.45	13.56	20
NS–R–1–15–C	398	29.00	24.65	–	27.3	60	111.58	13.76	11
NS–R–1–0–M–PD–15	401	29.00	24.65	–	22.8	60	111.58	13.76	-7
NS–R–1–0–M–PD–30	401	29.00	24.65	–	22.3	56	111.26	13.71	-9
NS–R–1–30–M–WOG	325	28.79	24.47	–	27.5	61	111.66	13.78	12

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

R-1 enkesitli elemanların şekildeğiştirme değerleri, Tablo 5.2'de sunulmuştur. Bu tabloda; $\varepsilon_{c,(0,85f'co)}$, referans elemanının gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85'i seviyesine karşılık gelen, ilgili elemanın eksenel şekildeğiştirme değerini; $\varepsilon_{c,(f'co)}$, referans elemanının basınç dayanımına karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme değerini; μ, sünekliği ($\varepsilon_{c,(0.85f'co)}/\varepsilon_{c,(f'co)}$) simgelemektedir.

Tablo 5.2 R-1 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri

Eleman İsmi	$\varepsilon_c(f'_{co})$	$\varepsilon_c(0.85f'_{co})$	μ	S.A
NS–R–1–0–M	0.0016	0.0019	1.22	-
NS–R–1–15–M	-	0.0027	1.73	41
NS–R–1–30–M	-	0.0030	1.90	55
NS–R–1–45–M	-	0.0040	2.56	110
NS–R–1–15–C	-	0.0029	1.84	51
NS–R–1–0–M–PD–15	-	0.0022	1.37	12
NS–R–1–0–M–PD–30	-	0.0031	1.98	62
NS–R–1–30–M–WOG	-	0.0029	1.87	53

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

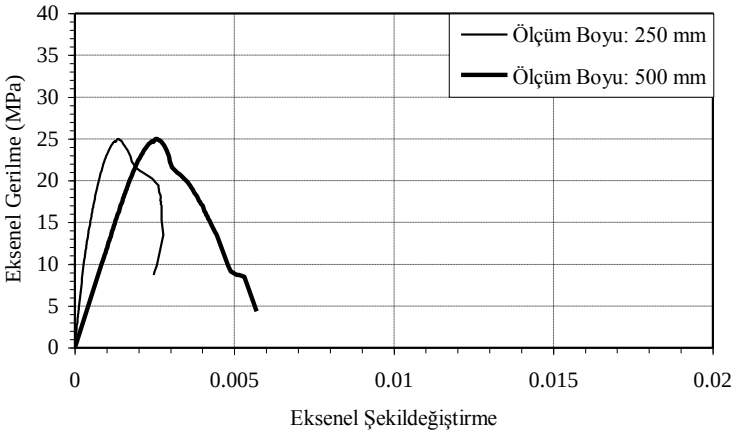
Tablo 5.3 R-1 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri

Eleman İsmi	$E_{c,(250mm)}$ (MPa)	$E_{c,(500mm)}$ (MPa)
NS–R–1–0–M	26006	15354
NS–R–1–15–M	-	17136
NS–R–1–30–M	-	20220
NS–R–1–45–M	-	17316
NS–R–1–15–C	-	17151
NS–R–1–0–M–PD–15	-	14696
NS–R–1–0–M–PD–30	-	13367
NS–R–1–30–M–WOG	-	18493

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

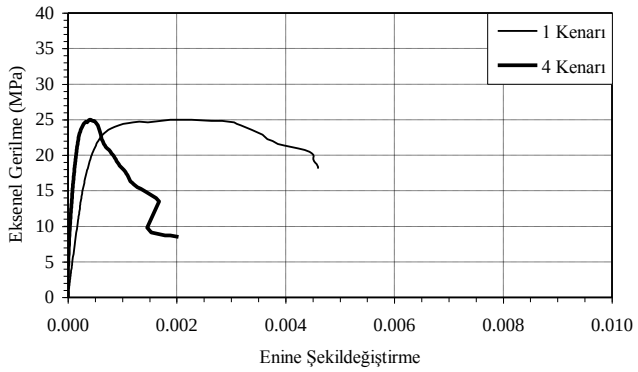
5.3.1 NS–R–2–0–M

28 günlük standart silindir basınç dayanımı 19.8 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 5.46'da verilmiştir.



Şekil 5.46 NS–R–2–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

Deney sonuçları değerlendirilirken orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Referans elemanı, 0.0013 eksenel şekildeğiştirme değeri için 25.0 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır ve deney 0.0028 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam etmiştir. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.04 MPa, süneklik değeri de 1.54 olarak belirlenmiştir. Beton yüzeyinden şekildeğiştirmeölçerlerle alınan değerlere göre, elemanın 0.004 seviyesine kadar enine şekildeğiştirme yaptığı gözlenmiştir. Şekil 5.47. Ancak, eleman yüzeyinde çatlaklar oluştuktan sonra, özellikle (ölçüm alınamayan) çatlayan bölgelerde, çok daha büyük seviyelerde enine şekildeğiştirmelerin gerçekleştiği gözlenmiştir.

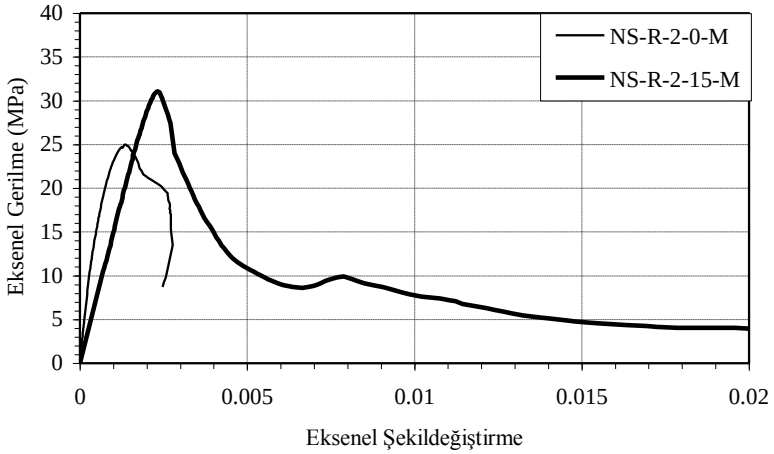


Şekil 5.47 NS–R–2–0–M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkileri

5.3.2 NS–R–2–15–M

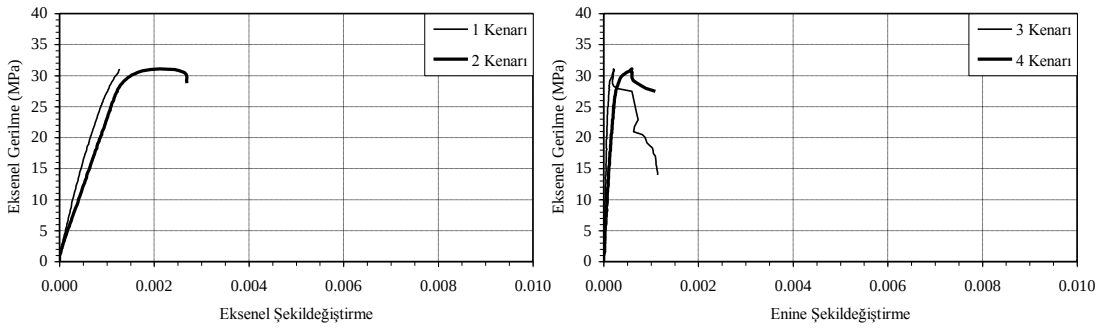
15 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte,

Şekil 5.48′de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.48 NS–R–2–15–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 31.1 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.06 MPa, süneklik değeri de 2.39 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.49'da verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.50'de verilmiştir.

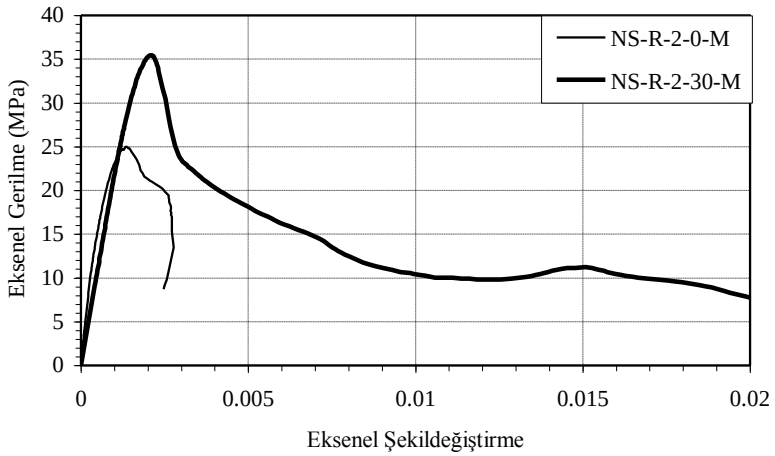


Şekil 5.49 NS–R–2–15–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.50 NS–R–2–15–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

5.3.3 NS–R–2–30–M

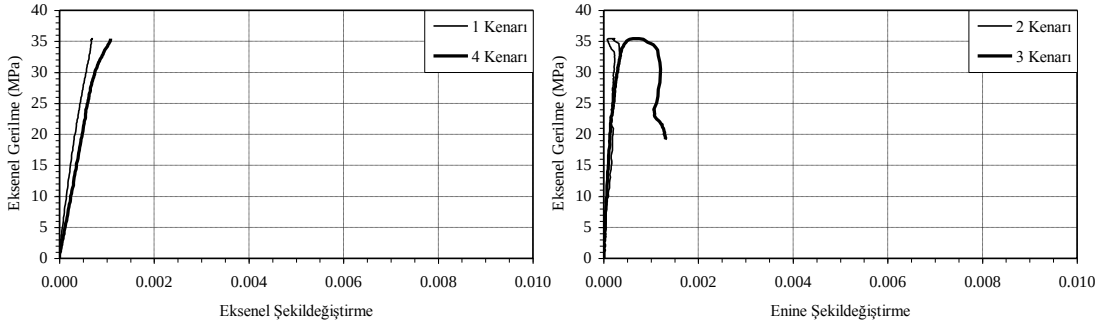
30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.51′de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.51 NS–R–2–30–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 35.4 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 2.77 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden

elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.52'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.53'te verilmiştir.

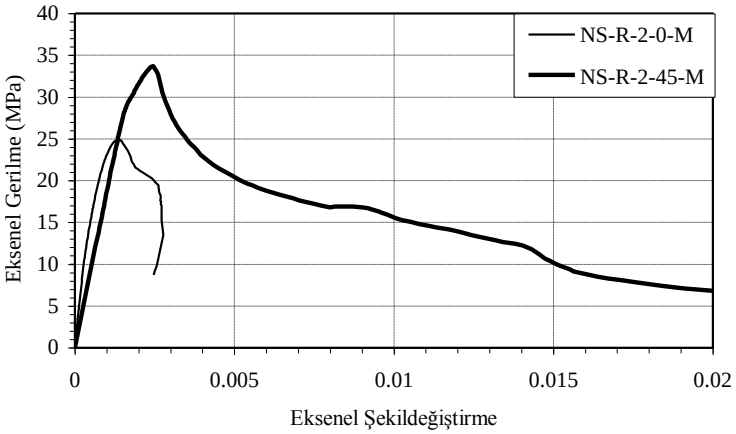


Şekil 5.52 NS–R–2–30–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.53 NS–R–2–30–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

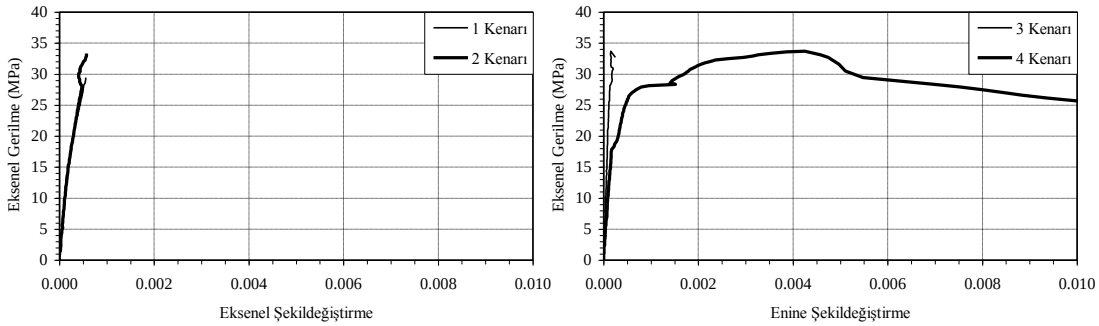
5.3.4 NS–R–2–45–M

45 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.54′te verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.54 NS–R–2–45–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 33.7 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.11 MPa, süneklik değeri de 3.42 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.55'te verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.56'da verilmiştir.

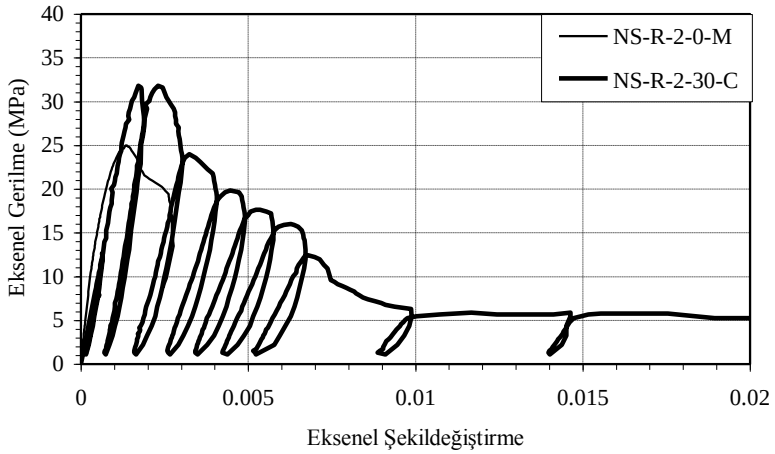


Şekil 5.55 NS–R–2–45–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi

Şekil 5.56 NS–R–2–45–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

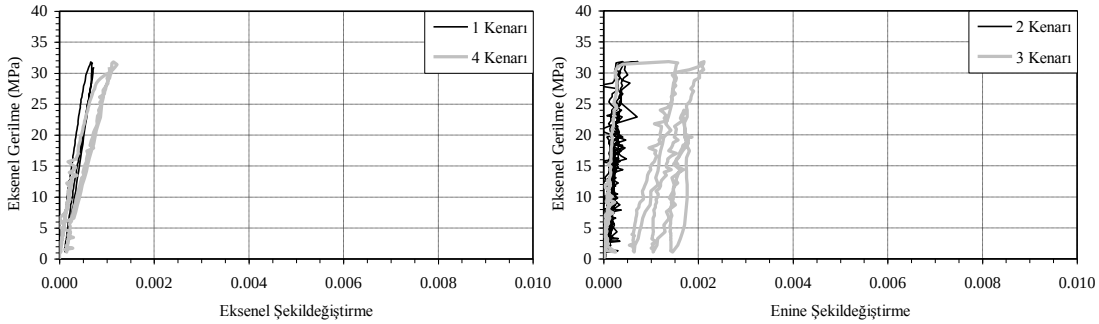
5.3.5 NS–R–2–30–C

30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.57′de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.57 NS–R–2–30–C Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 31.8 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.09 MPa, süneklik değeri de 2.98 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.58'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.59'da verilmiştir.

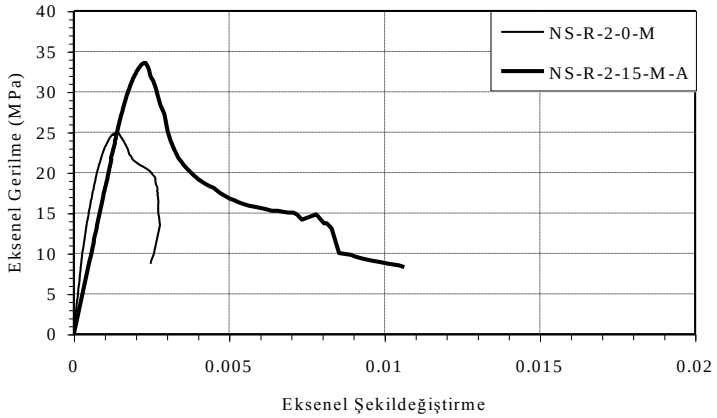


Şekil 5.58 NS–R–2–30–C Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi

Şekil 5.59 NS–R–2–30–C'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

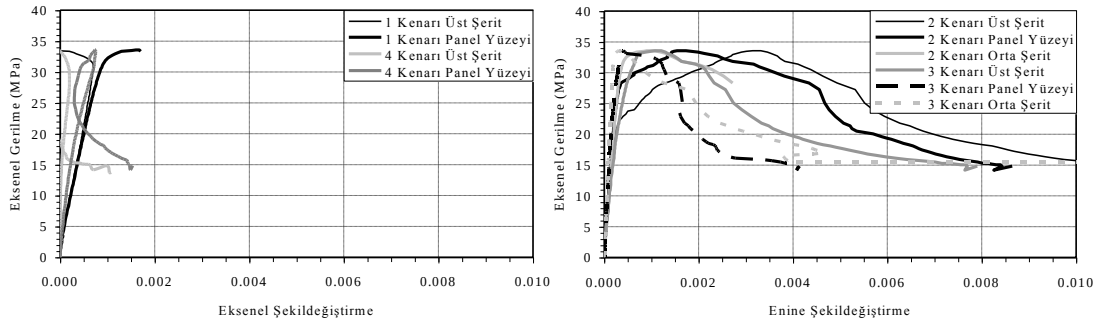
5.3.6 NS–R–2–15–M–A

Köşe birleşimlerine çelik köşebentler yapıştırılması yerine, karbon lifli polimer kompozit şeritlerle sarılan, 15 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.60'da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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.

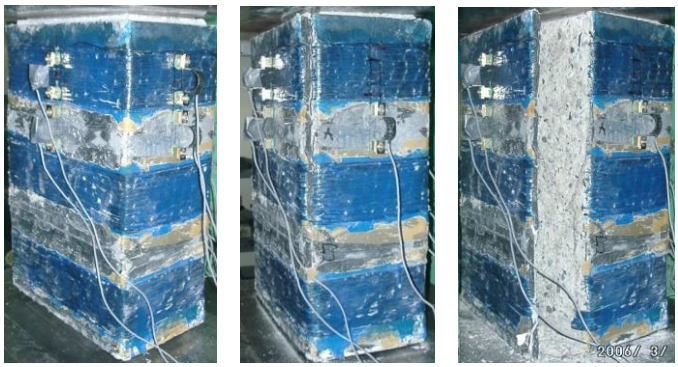


Şekil 5.60 NS–R–2–15–M–A Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.011 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 33.6 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.08 MPa, süneklik değeri de 2.60 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla karbon lifli polimer kompozit şeritlerden ve güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.61'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.62'de verilmiştir.



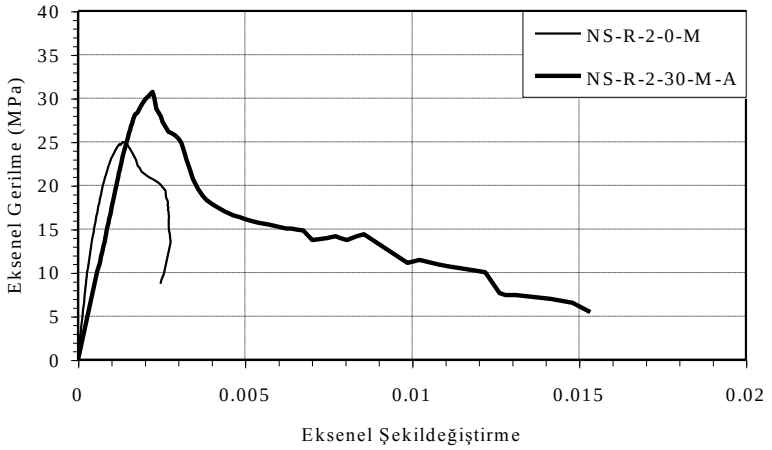
Şekil 5.61 NS–R–2–15–M–A Karbon lifli polimer kompozit Şeritlerdeki ve Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 5.62 NS–R–2–15–M–A'nın Deney Sırasındaki Görünümleri

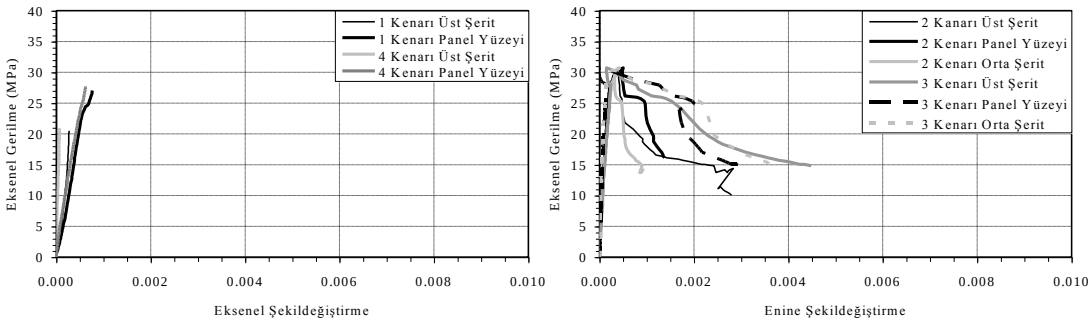
5.3.7 NS–R–2–30–M–A

Köşe birleşimlerine çelik köşebentler yapıştırılması yerine, karbon lifli polimer kompozit şeritlerle sarılan, 30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.63'te verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.63 NS–R–2–30–M–A Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.015 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 30.7 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.07 MPa, süneklik değeri de 2.59 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla karbon lifli polimer kompozit şeritlerden ve güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.64'te verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.65'te verilmiştir.



Şekil 5.64 NS–R–2–30–M–A Karbon lifli polimer kompozit Şeritlerdeki ve Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.65 NS–R–2–30–M–A'nın Deney Sırasındaki Görünümleri

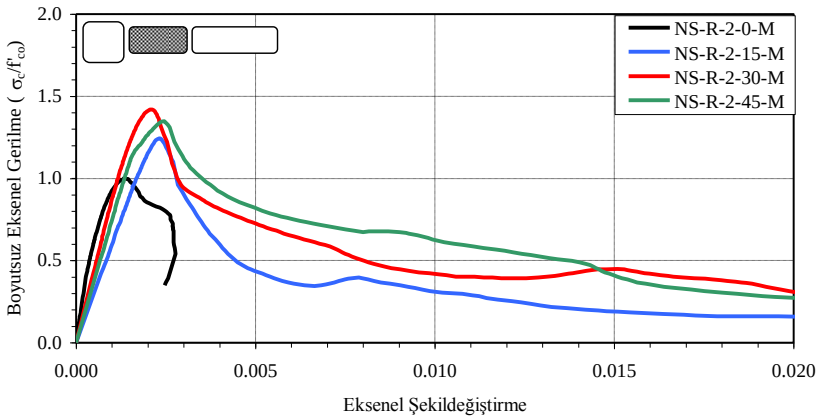
5.3.8 R-2 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında denenen elemanlara ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri sunulmuştur. Gerilme – eksenel 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-2 enkesitli elemanlarda incelenen değişkenler:

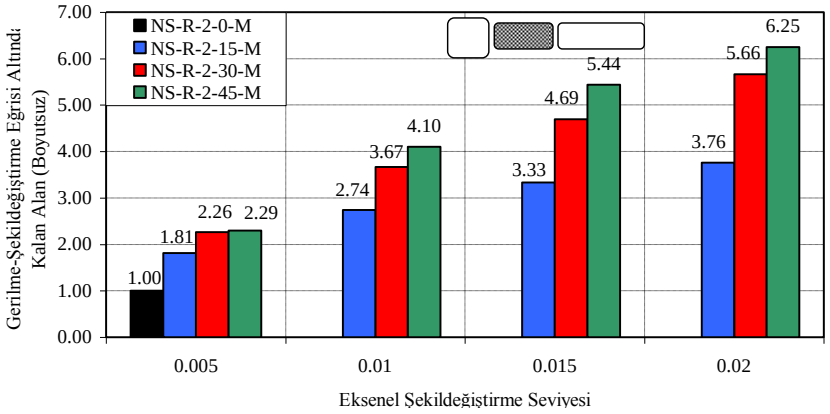
- Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlığı [15 / 30 / 45 mm]
- Yükleme Biçimi [Monoton Artan / Tekrarlı]
- Köşe Birleşimi [Çelik Köşebent / CFRP Şerit]

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

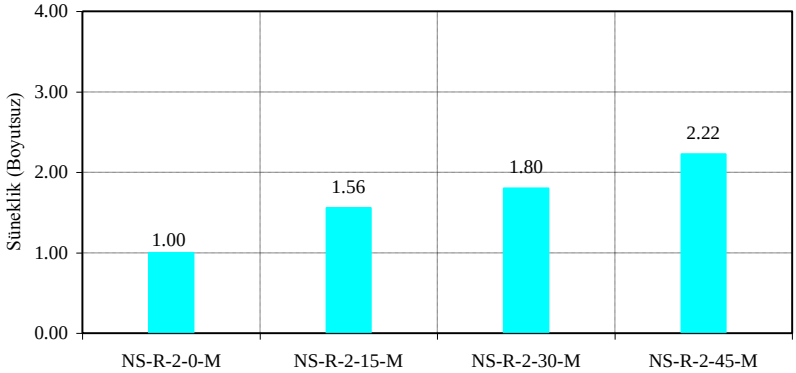
➢ Öndöküm HPFRCC panel kalınlıklarının artışı; denenen elemanların dayanımlarında, sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış sağlamıştır. Şekil 5.66, 5.67, 5.68.



Şekil 5.66 R-2 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi

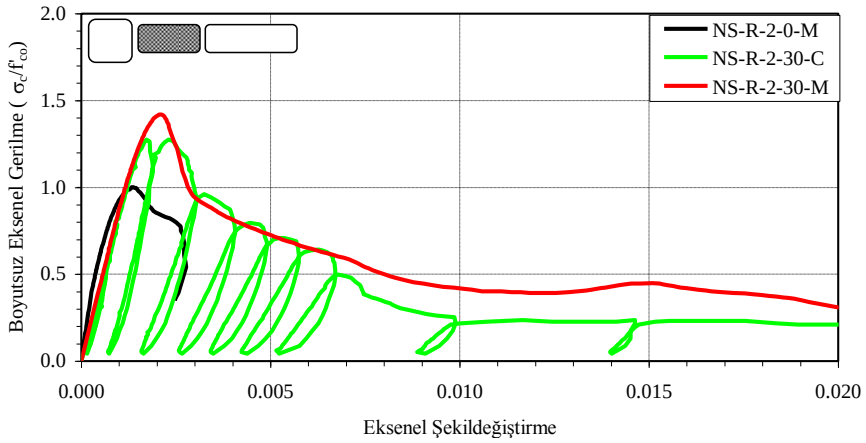


Şekil 5.67 R-2 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

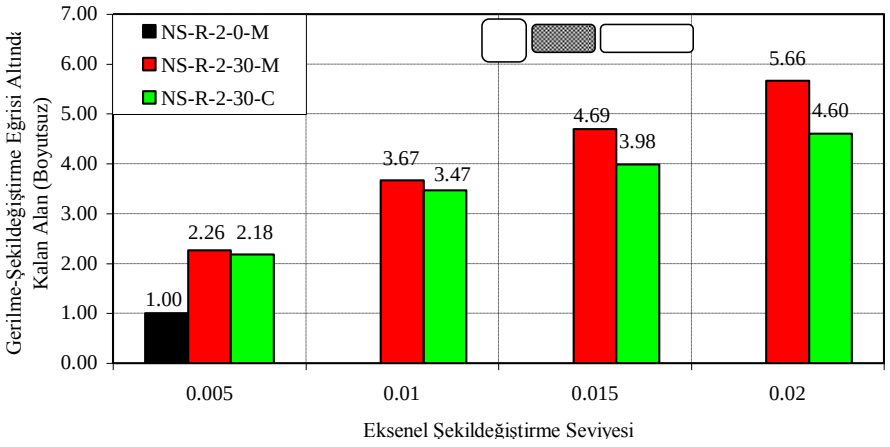


Şekil 5.68 R2 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi

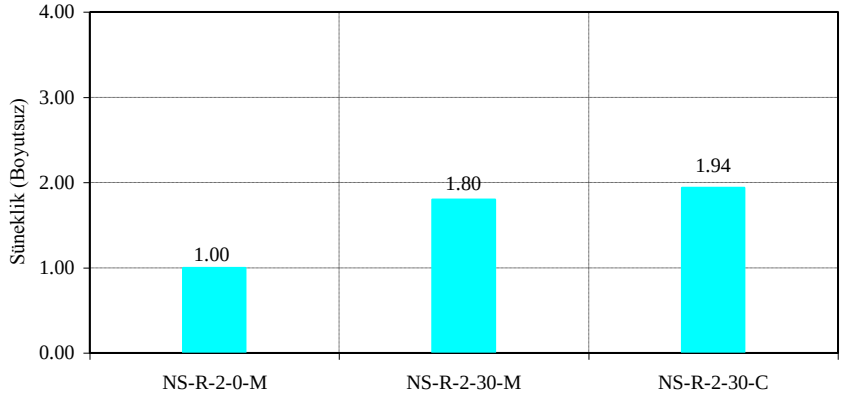
- Tekrarlı artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (NS-R-2-30-C); diğer tüm özellikleri aynı olan, ancak monoton artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (NS-R-2-30-M) ile oldukça yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.69, 5.70, 5.71.



Şekil 5.69 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi

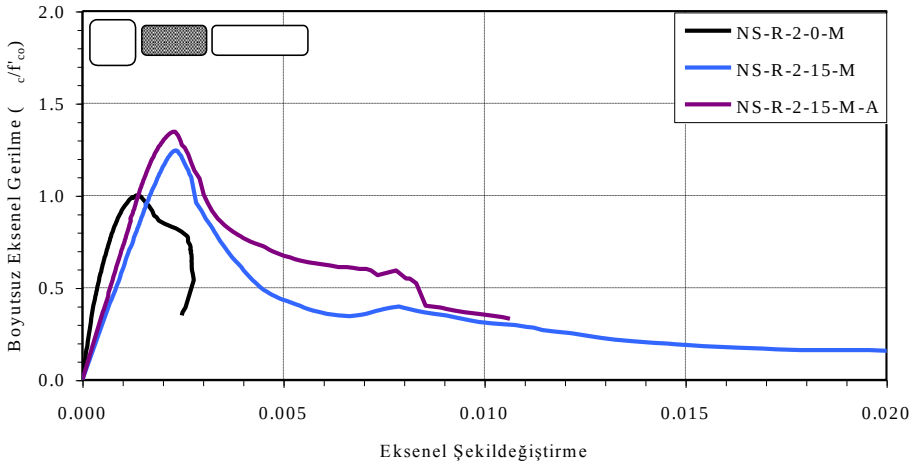


Şekil 5.70 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

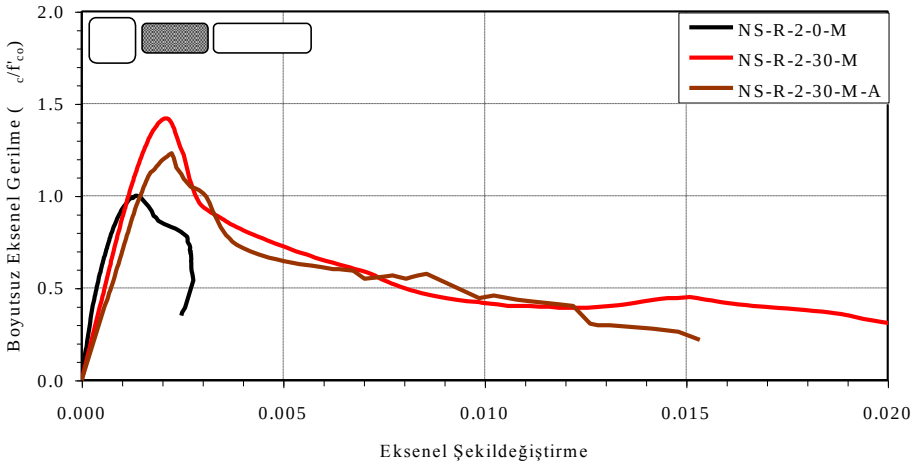


Şekil 5.71 R-2 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi

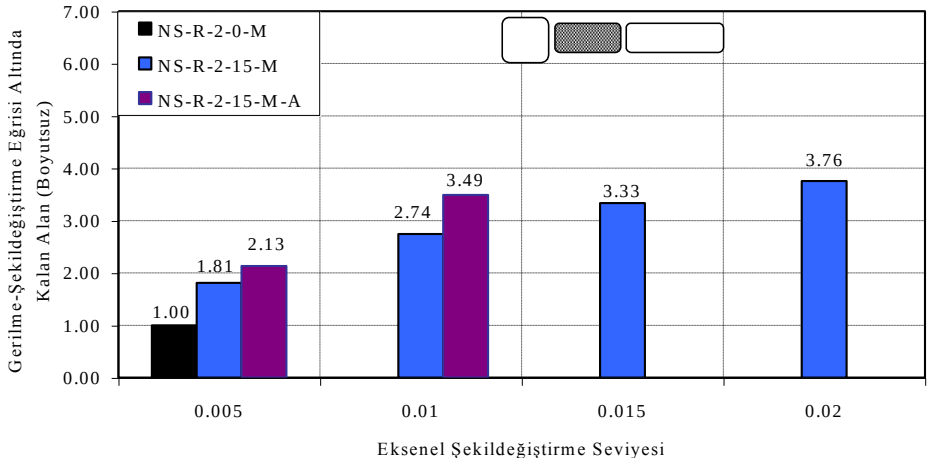
- Köşe birleşimlerine çelik köşebent yapıştırılması yerine, alternatif çözüm olarak, karbon lifli polimer kompozit (CFRP) şeritlerle sarılmış iki adet güçlendirilmiş eleman (NS-R-2-15-M-A ve NS-R-2-30-M-A); çelik köşebent uygulaması yapılmış aynı özellikteki elemanlar ile (NS-R-1-15-M ve NS-R-1-30-M) yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.72, 5.73, 5.74.



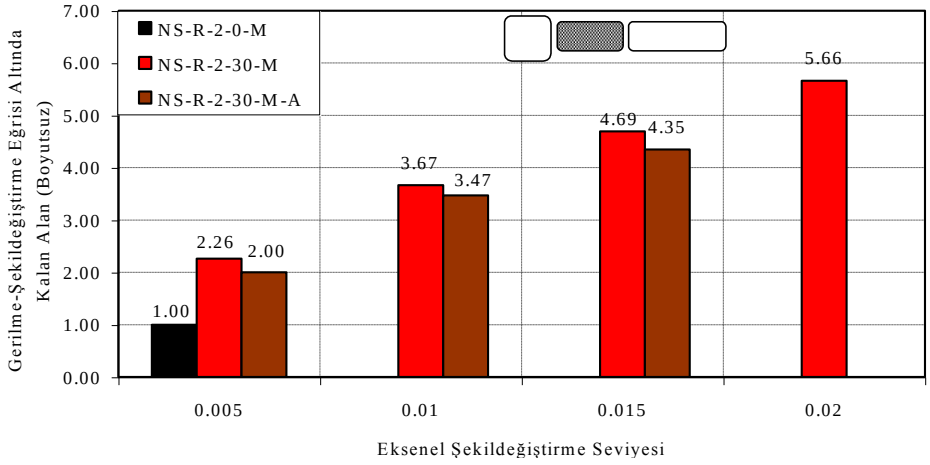
Şekil 5.72 R-2 Enkesitli, 15 mm Panel Kalınlıklı Elemanlarda Köşe Birleşiminin Davranışa Etkisi



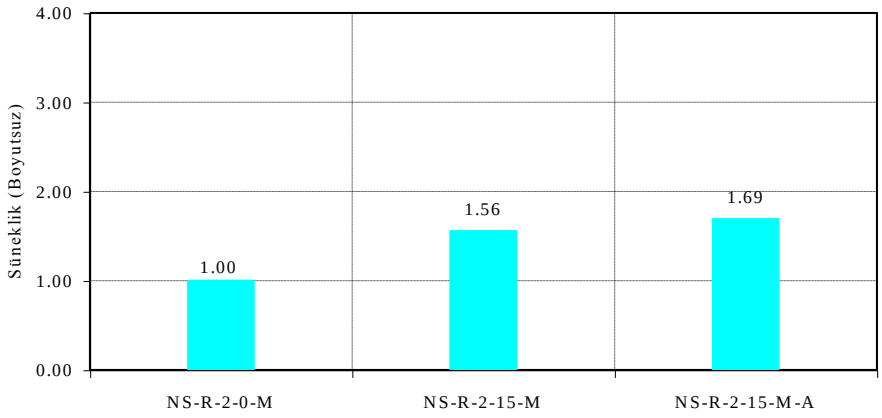
Şekil 5.73 R- Enkesitli, 30 mm Panel Kalınlıklı Elemanlarda Köşe Birleşiminin Davranışa Etkisi



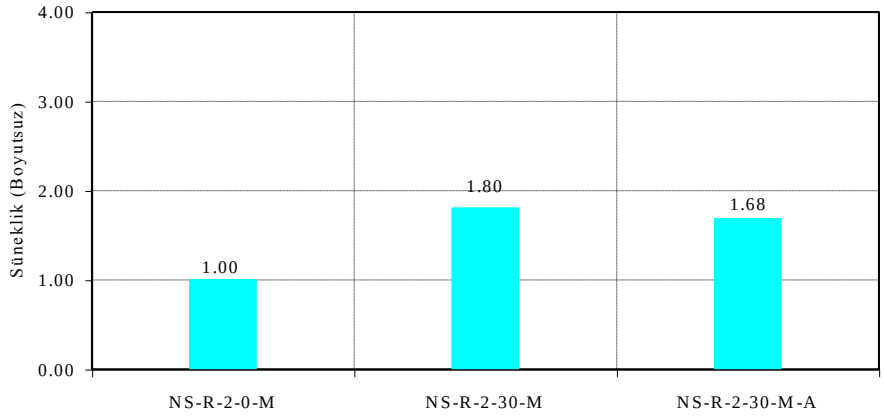
Şekil 5.74 R-2 Enkesitli, 15 mm Panel Kalınlıklı Elemanlarda Köşe Birleşiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.75 R-2 Enkesitli, 30 mm Panel Kalınlıklı Elemanlarda Köşe Birleşiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi



Şekil 5.76 R-2 Enkesitli, 15 mm Panel Kalınlıklı Elemanlarda Köşe Birleşiminin Sünekliğe Etkisi



Şekil 5.77 R-2 Enkesitli, 30 mm Panel Kalınlıklı Elemanlarda Köşe Birleşiminin Sünekliğe Etkisi

R-2 enkesitli elemanların deney sonuçları özeti, Tablo 5.4'te sunulmuştur. Bu tabloda; j, deney günündeki beton yaşını; 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 yaşını; $f_{HPFRCC,k}$, 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. %**
NS–R–2–0–M	297	28.62	24.32	25.0	–	–	–	–	–
NS–R–2–15–M	325	28.79	24.47	–	31.1	69	112.31	13.90	24
NS–R–2–30–M	298	28.62	24.33	–	35.4	49	110.69	13.60	42
NS–R–2–45–M	322	28.77	24.45	–	33.7	63	111.82	13.81	35
NS–R–2–30–C	398	29.00	24.65	–	31.8	60	111.58	13.76	27
NS–R–2–15–M–A	505	29.00	24.65	–	30.7	148	113.55	13.30	23
NS–R–2–30–M–A	505	29.00	24.65	–	31.8	163	113.43	13.06	27

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

R-2 enkesitli elemanların şekildeğiştirme değerleri, Tablo 5.5'te sunulmuştur. Bu tabloda; $\varepsilon_{c,(0,85f'co)}$, referans elemanının gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85'i seviyesine karşılık gelen, ilgili

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

Tablo 5.5 R-2 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri

Eleman İsmi	$\varepsilon_c(f'_{co})$	$\varepsilon_c(0.85f'_{co})$	μ	S.A %
NS–R–2–0–M	0.0013	0.0020	1.54	-
NS–R–2–15–M	-	0.0032	2.39	56
NS–R–2–30–M	-	0.0037	2.77	80
NS–R–2–45–M	-	0.0046	3.42	122
NS–R–2–30–C	-	0.0040	2.98	94
NS–R–2–15–M–A	-	0.0035	2.60	69
NS–R–2–30–M–A	-	0.0034	2.59	68

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

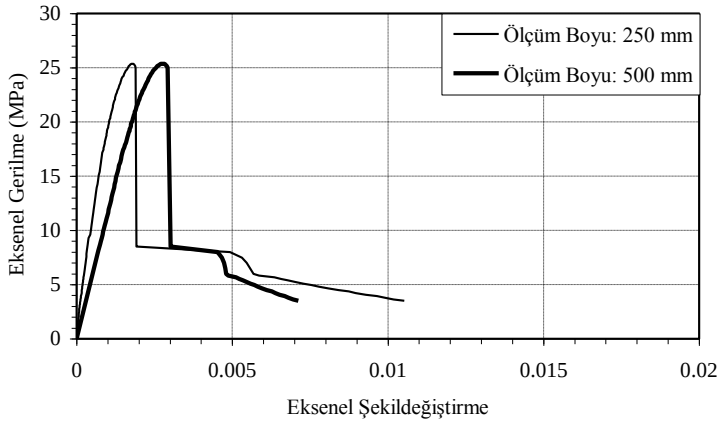
Tablo 5.6 R-2 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri

Eleman İsmi	$E_{c,(250mm)}$ (MPa)	$E_{c,(500mm)}$ (MPa)
NS–R–2–0–M	35096	11901
NS–R–2–15–M	-	14904
NS–R–2–30–M	-	21857
NS–R–2–45–M	-	18550
NS–R–2–30–C	-	19344
NS–R–2–15–M–A	-	18084
NS–R–2–30–M–A	-	17131

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

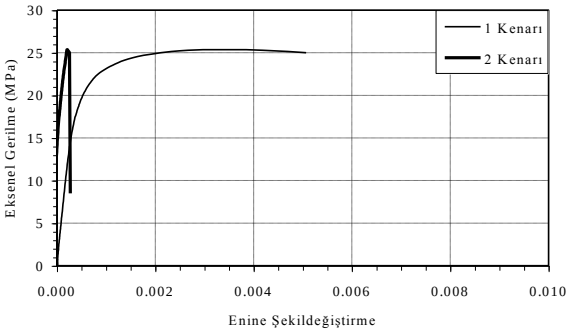
5.4.1 NS–R–3–0–M

28 günlük standart silindir basınç dayanımı 19.8 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 5.78'de verilmiştir.



Şekil 5.78 NS–R–3–0–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

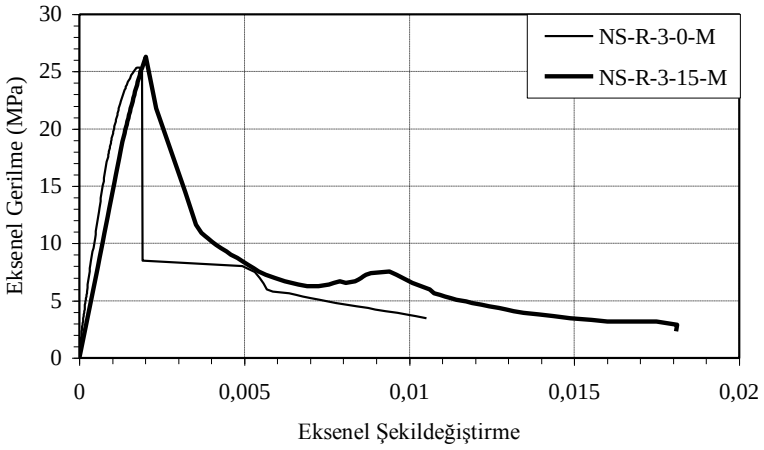
Deney sonuçları değerlendirilirken orta bölgedeki (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır.. Referans elemanı, 0.0018 eksenel şekildeğiştirme değeri için 25.4 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır ve deney 0.011 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam etmiştir. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.03 MPa, süneklik değeri de 1.09 olarak belirlenmiştir. Beton yüzeyinden şekildeğiştirmeölçerlerle alınan değerlere göre, elemanın 0.005 seviyesine kadar enine şekildeğiştirme yaptığı gözlenmiştir. Şekil 5.79. Ancak, eleman yüzeyinde çatlaklar oluştuktan sonra, özellikle (ölçüm alınamayan) çatlayan bölgelerde, çok daha büyük seviyelerde enine şekildeğiştirmelerin gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.79 NS–R–3–0–M Gerilme – Enine Şekildeğiştirme İlişkisi

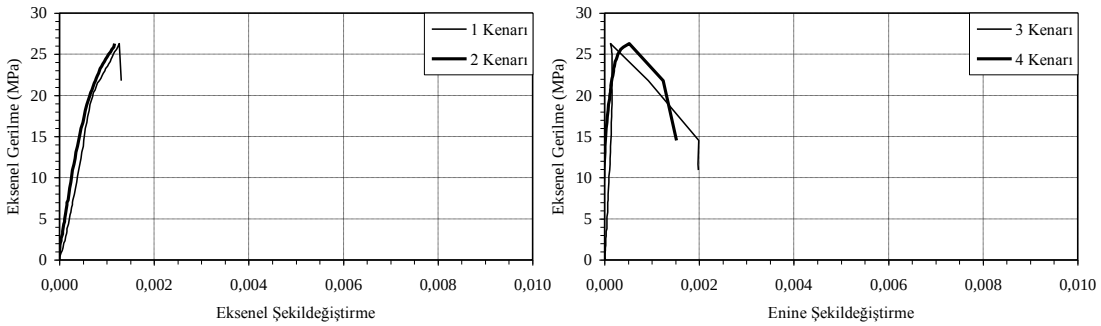
5.4.2 NS–R–3–15–M

15 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.80′de verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.80 NS–R–3–15–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.018 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 26.3 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.04 MPa, süneklik değeri de 1.32 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.81'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.82'de verilmiştir.

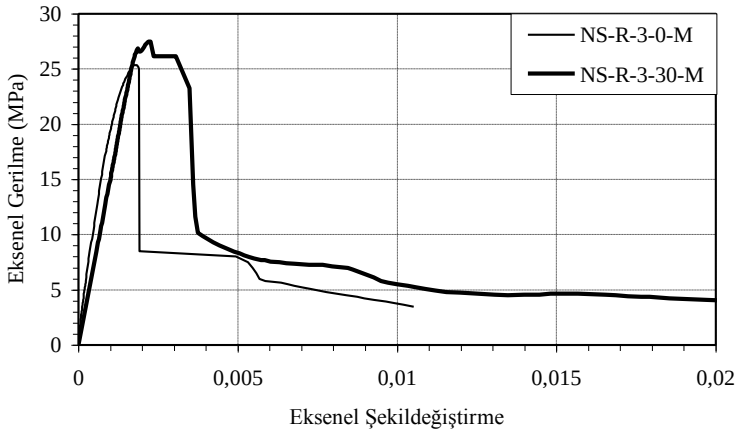


Şekil 5.81 NS–R–3–15–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkisi

Şekil 5.82 NS–R–3–15–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

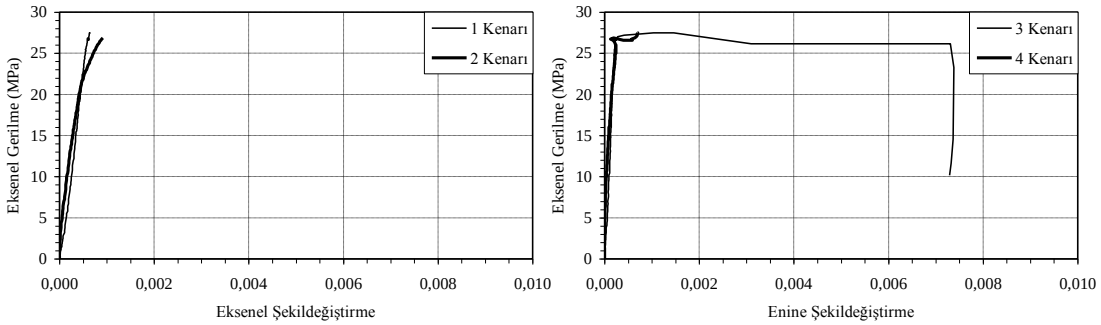
5.4.3 NS–R–3–30–M

30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, monoton artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.83′te verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.83 NS–R–3–30–M Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 27,5 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.07 Mpa, süneklik değeri de 1,98 olarak hesaplanmıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.84'te verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.85'te verilmiştir.

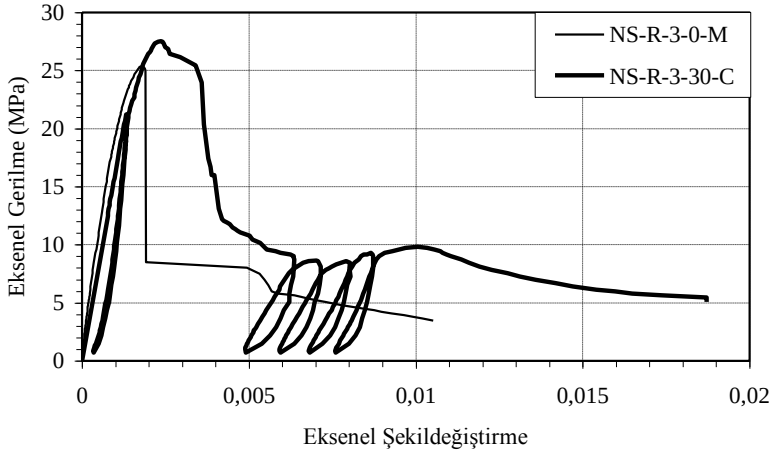


Şekil 5.84 NS–R–3–30–M Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.85 NS–R–3–30–M'in Deney Sırasındaki Görünümleri

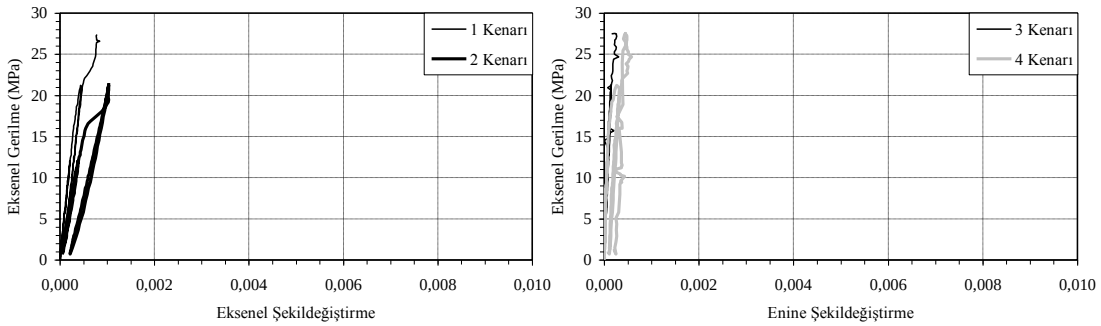
5.4.4 NS–R–3–30–C

30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilmiş bu elemanın, tekrarlı artan eksenel yükler altında denenmesiyle elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisi; referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.86′da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının orta bölgesinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın 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 5.86 NS–R–3–30–C Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkisi

0.019 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 27.5 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Elemanın gerilme - şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alan 0.07 MPa, süneklik değeri de 2.08 olarak belirlenmiştir. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.87'de verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.88'de verilmiştir.

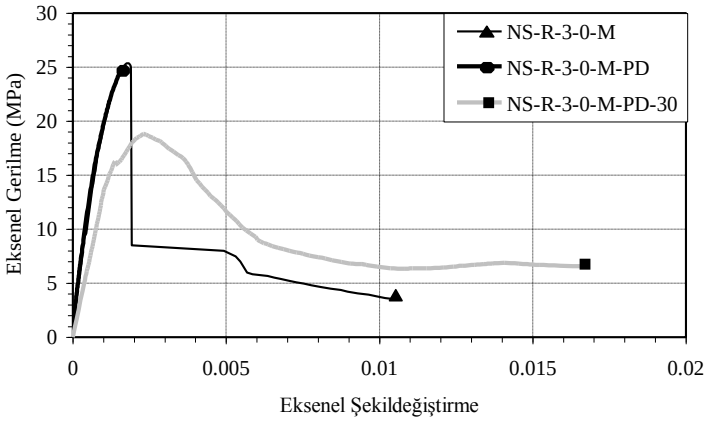


Şekil 5.87 NS–R–3–30–C Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.88 NS–R–3–30–C'nin Deney Sırasındaki Görünümleri

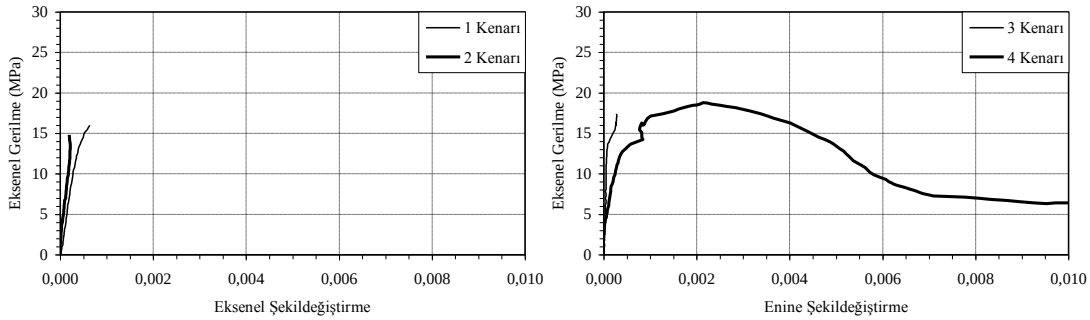
5.4.5 NS–R–3–0–M–PD–30

Güçlendirilmemiş halde, 0.0016 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar yüklenerek (NS-R-3-0-M-PD) hasar verilen eleman, yüzeydeki çatlaklar ve (ezilmiş beton tabakalarının kaldırılması sonucu oluşan) oyuklar epoksi harcıyla doldurulduktan sonra, 30 mm kalınlıklı HPFRCC panellerle güçlendirilerek (NS-R-3-0-M-PD-30), monoton artan eksenel yükler altında denenmiştir. Elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkileri, referans elamanına ait gerilme – eksenel şekildeğiştirme ilişkisiyle birlikte, Şekil 5.89′da verilmiştir. Gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrileri için, referans elemanının ve önhasar verilen elemanın orta bölgelerinden (yükseklik boyunca ortadaki 250 mm) ve güçlendirilmiş elemanın tüm boyundan (500 mm) elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri gözönüne alınmıştır. Güçlendirilmiş elemanın referans elemanına göre daha sünek bir davranış gösterdiği gözlenmiştir, ancak dayanım artışı elde edilememiştir.



Şekil 5.89 NS–R–3–0–M–PD ve NS–R–3–0–M–PD–30 Gerilme – Eksenel Şekildeğiştirme İlişkileri

0.017 eksenel şekildeğiştirme seviyesine kadar devam eden deneyde, güçlendirilmiş eleman 18,8 MPa'lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Basınç dayanımı değeri, referans elemanının basınç dayanımının 0.85'i seviyesinin altında kaldığı için, deney sonuçlarının giriş kısmında tanımlanan sünekliğin ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanın değerleri hesaplanamamıştır. PI türü yerdeğiştirmeölçerler yardımıyla güçlendirme panellerinden elde edilen enine ve boyuna şekildeğiştirmelerin, eksenel gerilme ile ilişkileri, Şekil 5.90'da verilmiştir. Güçlendirilmiş elemanın deney sırasındaki görünümleri Şekil 5.91'de verilmiştir.



Şekil 5.90 NS–R–3–0–M–PD–30 Güçlendirme Panellerindeki Gerilme - Şekildeğiştirme İlişkileri

Şekil 5.91 NS–R–3–0–M–PD–30'un Deney Sırasındaki Görünümleri

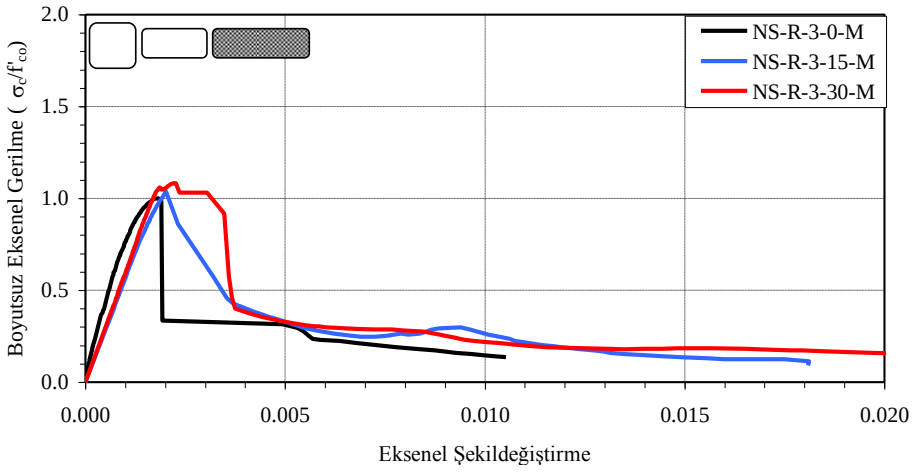
5.4.6 R-3 Enkesitli Elemanların Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

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:

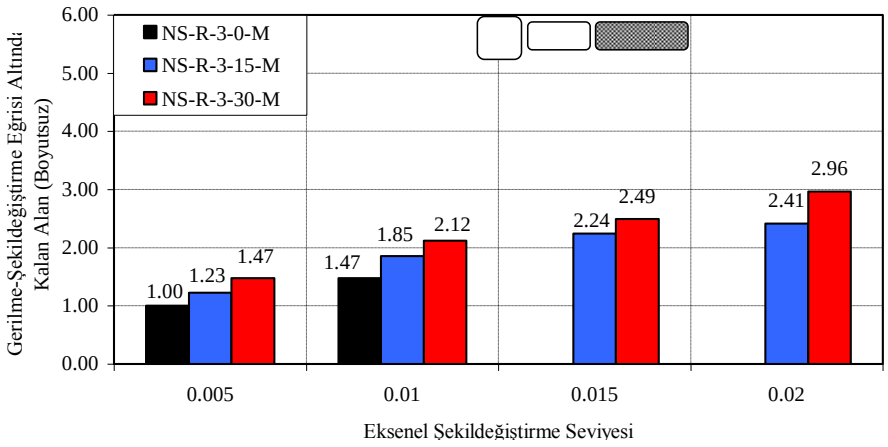
- Öndöküm HPFRCC Panel Kalınlığı [15 / 30 mm]
- Yükleme Biçimi [Monoton Artan / Tekrarlı]
- Ön Hasar [Var / Yok]

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

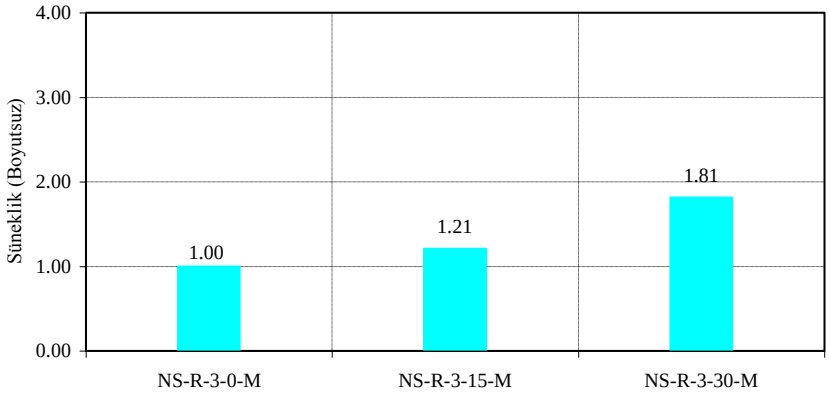
- Öndöküm HPFRCC panel kalınlıklarının artışı; denenen elemanların dayanımlarında, sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış sağlamıştır. Şekil 5.92, 5.93, 5.94.



Şekil 5.92 R-3 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Davranışa Etkisi

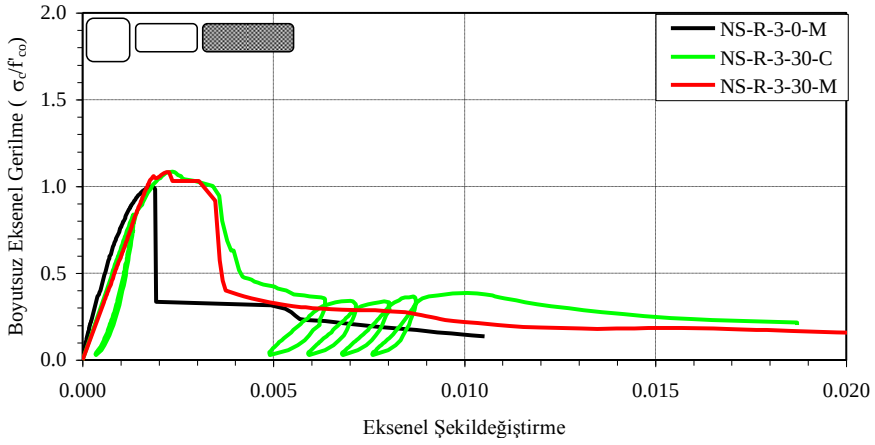


Şekil 5.93 R-3 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

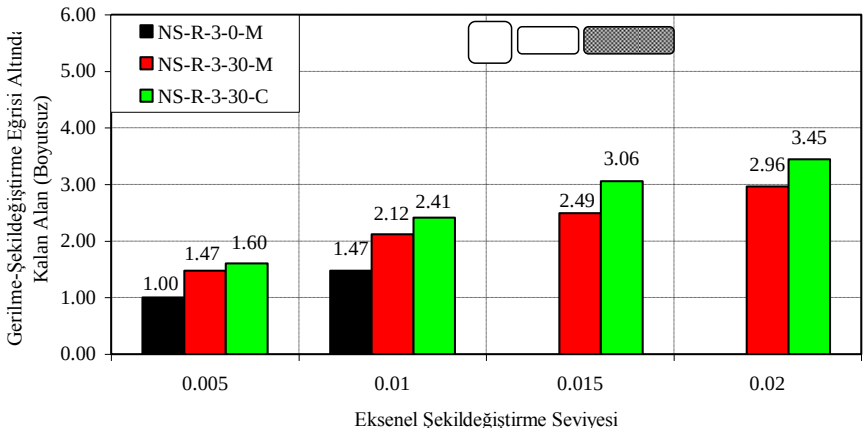


Şekil 5.94 R3 Enkesitli Elemanlarda HPFRCC Panel Kalınlıklarının Sünekliğe Etkisi

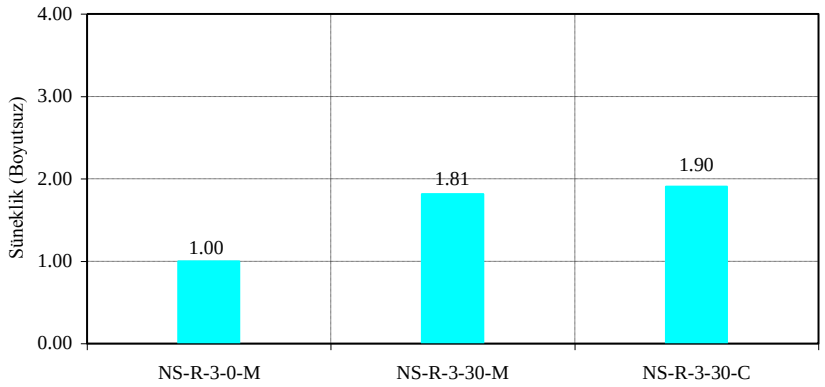
- Tekrarlı artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (NS-R-3-30-C); tüm diğer özellikleri aynı olan, ancak monoton artan yükler altında denenen güçlendirilmiş eleman (NS-R-3-30-M) ile oldukça yakın davranış göstermiştir. Şekil 5.95, 5.96, 5.97.



Şekil 5.95 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Davranışa Etkisi

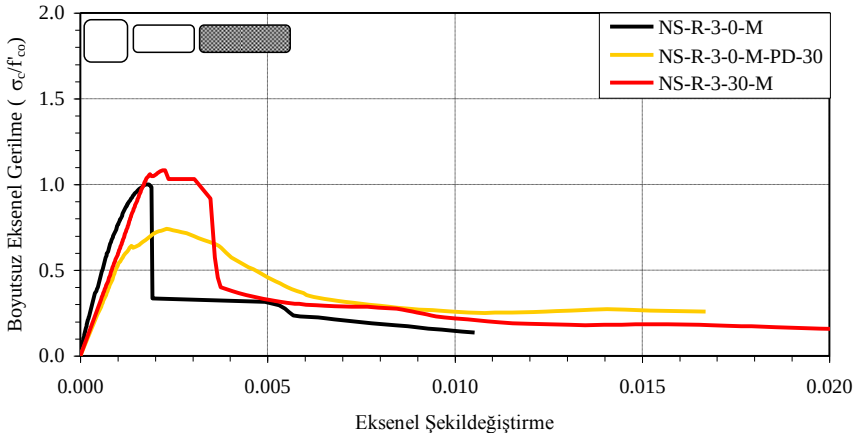


Şekil 5.96 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

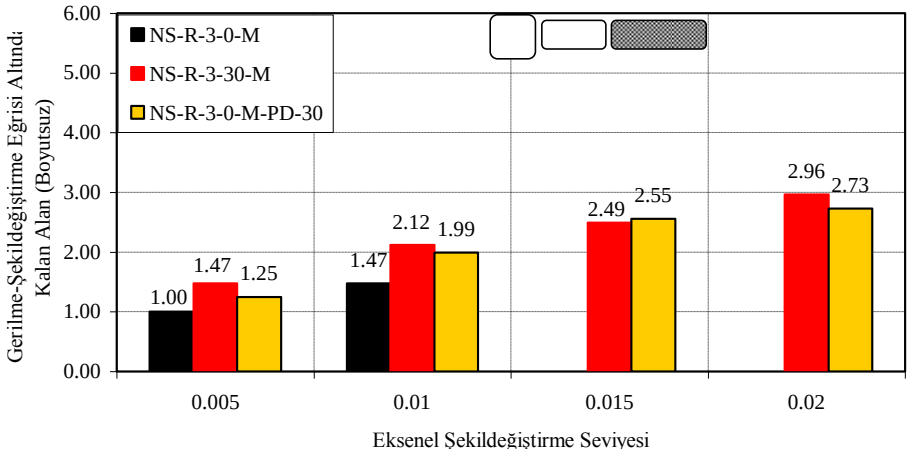


Şekil 5.97 R-3 Enkesitli Elemanlarda Yükleme Biçiminin Sünekliğe Etkisi

- Ön hasar verildikten sonra güçlendirilen elemanların dayanımlarında artış elde edilememiştir; ancak, sünekliklerinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanda artış gözlenmiştir. Şekil 5.98, 5.99.



Şekil 5.98 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Davranışa Etkisi



Şekil 5.99 R-3 Enkesitli, 30 mm Kalınlıklı Panellerle Güçlendirilmiş Elemanlarda Ön Hasarın Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisi Altında Kalan Alana Etkisi

R-3 enkesitli elemanların deney bilgileri özeti, Tablo 5.7'de sunulmuştur. Bu tabloda; j, deney günündeki beton yaşını; 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 yaşını; $f_{HPFRCC,k}$, 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 Bilgileri 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. %**
NS–R–3–0–M	297	28.62	24.32	25.4	–	–	–	–	–
NS–R–3–15–M	297	28.62	24.32	–	26.3	48	110.61	13.59	3.5
NS–R–3–30–M	325	28.79	24.47	–	27.5	59	111.50	13.75	8.3
NS–R–3–30–C	398	29.00	24.65	–	27.5	108	113.86	13.92	8.3
NS–R–3–0–M–PD–30	401	29.00	24.65	–	18.8	78	113.03	14.03	-26

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

R-3 enkesitli elemanların şekildeğiştirme değerleri, Tablo 5.8'de sunulmuştur. Bu tabloda; $\varepsilon_{c,(0,85f'co)}$, referans elemanının gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisindeki düşen kol üzerinde basınç dayanımının 0.85'i seviyesine karşılık gelen, ilgili elemanın eksenel şekildeğiştirme değerini; $\varepsilon_{c,(f'co)}$, referans elemanının basınç

dayanımına karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme değerini; μ, sünekliği ($\varepsilon_{c,(0.85f'co)}/\varepsilon_{c,(f'co)}$) simgelemektedir.

Tablo 5.8 R-3 Enkesitli Elemanların Şekildeğiştirme Değerleri

Eleman İsmi	$\varepsilon_c(f'_{co})$	$\varepsilon_c(0.85f'_{co})$	μ	S.A %
NS–R–3–0–M	0.0018	0.0019	1.09	-
NS–R–3–15–M	-	0.0023	1.32	21
NS–R–3–30–M	-	0.0035	1.98	81
NS–R–3–30–C	-	0.0037	2.08	90

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

Tablo 5.9 R-3 Enkesitli Elemanların Elastisite Modülü Değerleri

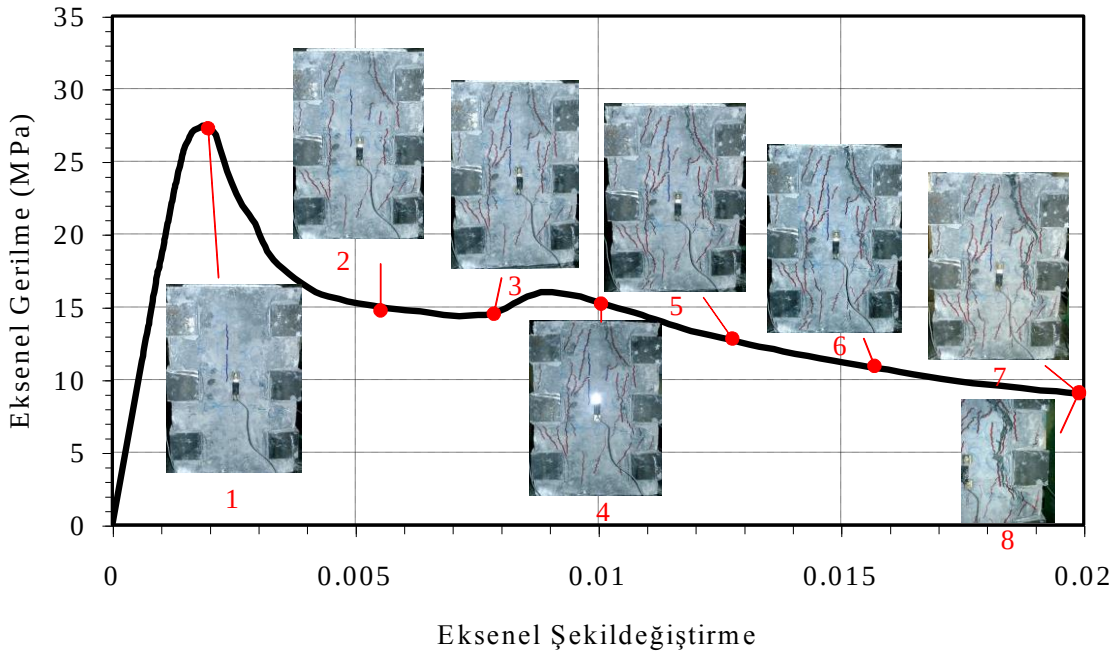
Eleman İsmi	$E_{c,(250mm)}$ (MPa)	$E_{c,(500mm)}$ (MPa)
NS–R–3–0–M	22239	11521
NS–R–3–15–M	-	14387
NS–R–3–30–M	-	15053
NS–R–3–30–C	-	16329
NS–R–3–0–M–PD–30	-	13179

5.5 Hasarların Değerlendirilmesi

Bu bölümde, elemanların hasar durumlarına ve göçme biçimlerine ışık tutması amacıyla, üç adet güçlendirilmiş elemanın deneyleri sonucunda elde edilen gerilme – eksenel şekildeğiştirme grafikleri (Şekil 5.100, Şekil 5.101 ve Şekil 5.102),

şekildeğiştirme seviyelerine bağlı olarak hasarın gelişimini gösteren fotoğraflarla birlikte sunulmuştur.

5.5.1 NS–R–1–30–M-WOG

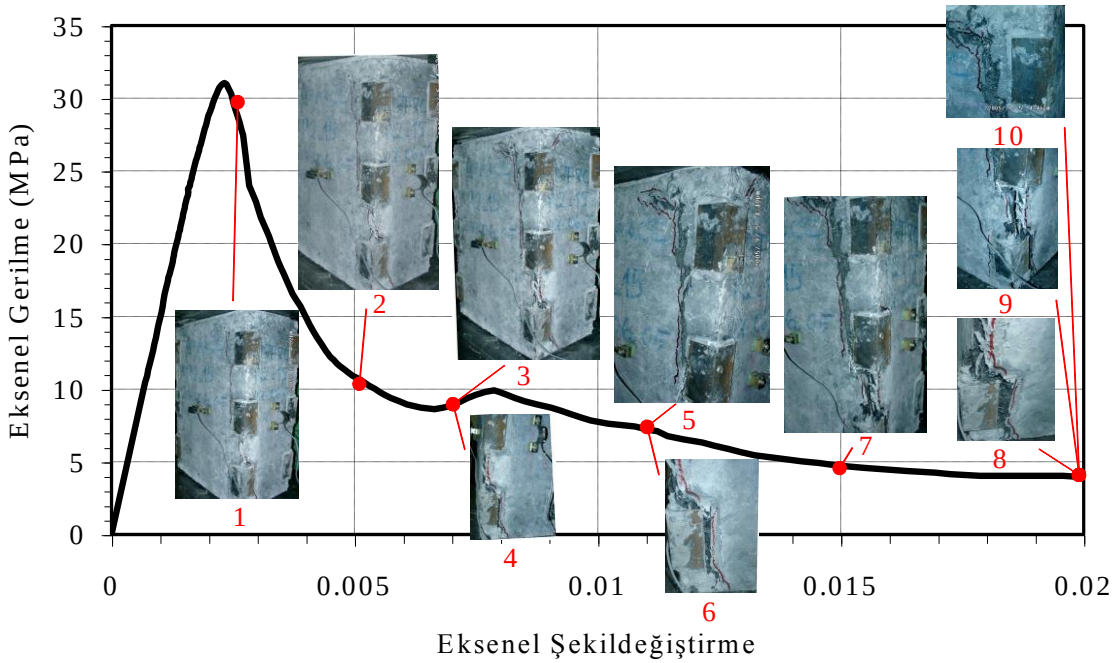


Şekil 5.100 NS-R-1-30-M-WOG Hasar Gelişimi

- 0.002 eksenel eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarının orta bölgesinde ilk çatlak gözlendi. (Şekil 5.100'deki 1. Fotoğraf)
- 0.005 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarının orta bölgesinde çatlakların yayıldığı ve 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 1.3 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.100'deki 2. Fotoğraf)
- 0.008 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 1.5 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.100'deki 3. Fotoğraf)
- 0.010 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 7 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.100'deki 4. Fotoğraf)
- 0.013 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 9 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.100'deki 5. Fotoğraf)

- 0.016 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 10 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.100'deki 6. Fotoğraf)
- 0.020 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 1 kenarında 1-2 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 12 mm'ye ulaştığı ve daha büyük eksenel şekildeğiştirme seviyelerinde çatlağın giderek açılmasıyla hasarın bu bölgede yoğunlaştığı gözlendi. (Şekil 5.100'deki 7.ve 8. Fotoğraflar)

5.5.2 NS–R–2–15–M

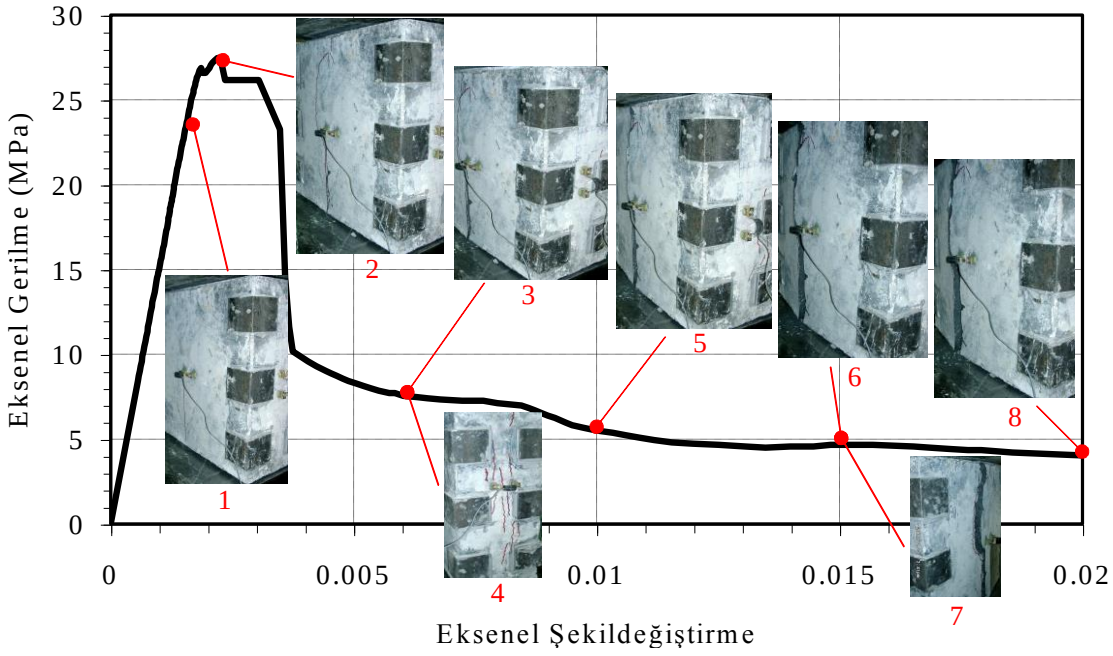


Şekil 5.101 NS-R-2-15-M Hasar Gelişimi

- 0.0025 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde üst bölümde 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebente yakın bölgede başlayıp, alt bölümde 1 kenarında 1-4 köşesindeki köşebente yakın bölgeye ulaşan çatlak gözlendi. (Şekil 5.101'deki 1. Fotoğraf)
- 0.005 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 4 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.101'deki 2. Fotoğraf)
- 0.007 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 6 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.101'deki 3. ve 4. Fotoğraflar)

- 0.011 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 9 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.101'deki 5. ve 6. Fotoğraflar)
- 0.015 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarında 1-4 köşesindeki köşebentlerin bitiminde çatlak genişliğinin 15 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.101'deki 7. Fotoğraf)
- 0.020 ve daha büyük eksenel şekildeğiştirme seviyelerinde çatlağın giderek açılmasıyla hasarın bu bölgede yoğunlaştığı gözlendi. (Şekil 5.101'deki 8., 9. ve 10. Fotoğraflar)

5.5.3 NS–R–3–30–M



Şekil 5.102 NS-R-2-30-M Hasar Gelişimi

- 0.0016 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarının orta bölgesinde ilk çatlak gözlendi. (Şekil 5.102'deki 1. Fotoğraf)
- 0.0022 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 4 kenarının orta bölgesinde çatlağın panel boyunca ilerlediği gözlendi. (Şekil 5.102'deki 2. Fotoğraf)
- 0.006 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarının orta bölgesinde çatlak genişliğinin 11 mm'ye ulaştığı ve 3 kenarında yayılı çatlaklar oluştuğu gözlendi. (Şekil 5.102'deki 3. ve 4. Fotoğraflar)

- 0.010 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde 4 kenarının orta bölgesinde çatlak genişliğinin 17 mm'ye ulaştığı gözlendi. (Şekil 5.102'deki 5. Fotoğraf)
- 0.015 eksenel şekildeğiştirme seviyesinde, 4 kenarının orta bölgesinde çatlak genişliğinin oldukça arttığı gözlendi. (Şekil 5.102'deki 6. ve 7. Fotoğraflar)
- 0.020 ve daha büyük eksenel şekildeğiştirme seviyelerinde çatlağın giderek açılmasıyla hasarın bu bölgede yoğunlaştığı gözlendi. (Şekil 5.102'deki 8. Fotoğraf)

6. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada; yetersiz sünekliğe sahip, 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 artan 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 (derinli/genişlik oranı), öndöküm HPFRCC panel kalınlığı (15, 30, 45 mm), yükleme biçimi (monoton ya da tekrarlı), elemanlarda ön hasar bulunup bulunmaması, köşe birleşimleri (çelik köşebent yapıştırılması ya da elemanın karbon lifli polimer kompozit (CFRP) şeritlerle sarılması) ve elemanlara yüzey hazırlığı uygulanıp uygulanmamasıdır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen önemli sonuçlar şöyledir:

- Referans elemanlarının ulaştığı dayanımlar ile deney günlerine ait (boyut etkisi nedeniyle 0.85 katsayısıyla çarpılarak düzeltilmiş) standart silindir beton basınç dayanımlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, referans elemanları için farklı ölçüm boylarından (500, 250 ve 60 mm) alınan veriler de birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu durum, deney ve yükleme düzeneklerinin sağlıklı veri topladığına ve elemanların üretiminde gerekli özenin gösterildiğine 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 %20'ye, gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda 6.8 kata ve süneklikte 2.1 kata varan oranlarda artış elde edilmiştir. R-2 enkesitli elemanlar için bu artış; dayanımda %42'ye, gerilme – eksenel şekildeğiştirme

eğrisinin altında kalan alanda 6.25 kata ve süneklikte 2.22 kata varan oranlarda gerçekleşmiştir. R-3 enkesitli elemanlar için ise; dayanımda %8.3'e, gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda 3.45 kata ve süneklikte 1.9 kata varan oranlarda artış elde edilmiştir. Deney sonuçlarının ışığında, güçlendirme işleminde en iyi verimin R-2 enkesitli elemanlardan alındığı gözlenmektedir. Bunu, sırasıyla R-1 ve R-3 enkesitli elemanlar izlemektedir.

- Öndöküm HPFRCC panel kalınlığının arttırılması, elemanların davranışını iyileştirmiştir. Kalınlığın 15 mm'den 30 mm'ye çıkarılması sonucu, tüm enkesit türleri için, dayanımda, süneklikte ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanda artış elde edilmiştir. 45 mm'lik panel kalınlığının kullanımı ise; R-1 enkesitli elemanlarda dayanımı ve sünekliği, R-2 enkesitli elemanlarda da gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisi altında kalan alanı ve sünekliği arttırmıştır. Önceden hasar verildikten sonra güçlendirilen R-1 enkesitli elemanlarda, 30 mm'lik kalınlık; gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda ve süneklikte, 15 mm'lik kalınlığa göre daha etkili olmuştur. Tüm artış oranları gözönüne alındığında, 30 mm'lik panel kalınlığının en iyi verimi sağladığı söylenebilir.
- Tekrarlı artan eksenel yükler altında denenen elemanlar, monoton artan biçimde yüklenen elemanlara oldukça yakın davranış sergilemiştir. R-1 ve R-2 enkesitli elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutma özellikleri gözönüne alındığında; monoton yüklenen elemanların tekrarlı yüklenen elemanlardan biraz daha iyi davrandığı ya da her ikisinin de aynı davranışı gösterdiği gözlenmiştir. R-3 enkesitli elemanlarda ise, tekrarlı yüklenen elemanların biraz daha iyi davrandığı ya da her iki yükleme türünün de aynı sonucu verdiği gözlenmiştir. Bu durum; yükleme biçiminin, elemanların davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığının göstergesidir.
- Belli bir seviyeye kadar yüklenerek ön hasar verilen 2 adet R-1 ve 1 adet R-3 enkesitli elemanın güçlendirilmesi sonucu davranışta, genel olarak, iyileşme sağlanmıştır. Güçlendirilmiş ön hasarlı elemanların dayanımı, referans elemanlarının seviyesine çıkamamıştır. Ancak, bu güçlendirme sonucunda elemanın daha sünek davrandığı ve daha sünek bir göçme biçimi elde edildiği gözlenmiştir.

- Güçlendirme panellerinin eleman yüzeylerine daha iyi yapışmasını sağlamak amacıyla; beton yüzeyler her iki doğrultuda 45^o eğimli, 40 mm aralıklarla, 3 mm genişliğinde ve yaklaşık 3 mm derinliğinde kesilerek gerçekleştirilen yüzey hazırlığının; bir adet R-1 enkesitli elemana uygulanmaması sonucu, elemanın dayanımında, sünekliğinde ve gerilme – eksenel şekildeğiştirme eğrisinin altında kalan alanda göze çarpan bir farklılık oluşmamıştır. Bu durumda; yüzey hazırlığının, eksenel yükler etkisi altındaki elemanlarda çok fazla etkili olmadığı yorumu yapılabilir.

- 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.

- Güçlendirilmiş elemanların deneylerinin ileri aşamalarında, çatlakların ilerleyiş yönleri ve göçme biçimleri gözönüne alınarak; güçlendirme panellerinin köşe birleşim detaylarının, eleman davranışında etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle; çelik köşebentlerin kullanılması sonucunda, köşelerde oluşan çatlakların köşebentlere takılıp ilerleyemediği ve göçmenin bu yolla ötelendiği gözlenmiştir.

- Yapılan hesaplar sonucunda, güçlendirme panellerinin elastisite modülü değerlerinin (~35000 MPa), güçlendirilen elemanın betonunun elastisite modulü değerleri (~26000 MPa) ile yakın seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Bu durum; başlangıçtaki elastik bölge için, güçlendirilmiş elemanların iç kısmındaki beton kesit ile dış yüzeyindeki güçlendirme panellerinin aynı düzeylerde şekildeğiştirme yapmalarını, dolayısıyla birlikte davranmalarını sağlamıştır. Güçlendirme panellerinin davranışa katkı yapması sonucu güçlendirilmiş elemanın elastisite modülünün arttığı gözlenmiştir.

- Güçlendirilmiş elemanlarda, köşe birleşimlerini desteklemek için çelik köşebentlerin kullanımına alternatif bir çözüm olarak; iki adet R-2 elemanın çevrelerinin birer kat, üç sıra, 80 mm genişliğinde ve 200 mm bindirme payına sahip karbon lifli polimer kompozit (CFRP) şeritle sarılması

sonucunda; çelik köşebent uygulanmış elemanlar ile yakın bir davranış elde edilmiştir. CFRP şeritlerle sarılmış elemanların, çelik köşebentlerle desteklenmiş elemanlardan daha üstün bir davranış sergileyememelerinde; özellikle gerilmelerin yoğunlaştığı eleman köşelerinde CFRP şeritlerin (geometrik şartlar gereği köşeyi eğrisel bir biçimde sarmaları nedeniyle) gerilmeleri düz bir konumda karşılayamamalarının ve dolayısıyla karakteristik çekme dayanımlarının altında kalmalarının etkili olduğu düşünülmektedir. Elemanın CFRP şeritlerle sarılmasının, çelik köşebent uygulamasına göre daha güç ve daha pahalı bir çözüm olması nedeniyle, elde edilen sonuçlar ışığında bu alternatif yöntemin verimli olmadığı yorumu yapılabilir.

- 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 Seperation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Stengthened 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., Tademir, 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] **Ekincioğlu, 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, J*ournal 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 Spektroskopi (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

Rıza Ozan Göray 1981 yılında İstanbul'da dünyaya geldi. Orta öğrenimini İstanbul'da Adile Mermerci Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra, 1999 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girdi. 2003 yılında bu bölümden mezun olmasının ardından, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başladı.