

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKLEME HIZININ LİFLİ POLİMER SARGILI BETONUN EKSENEL
YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Kayhan KOLCU

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKLEME HIZININ LİFLİ POLİMER SARGILI BETONUN EKSENEL
YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Kayhan KOLCU
501061069**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Temmuz 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Ağustos 2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Alper İLKİ

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Kutlu DARILMAZ (İ.T.Ü.)

Yrd. Doç.Dr. Hilmi LUŞ (B.Ü.)

EYLÜL 2008

ÖNSÖZ

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

Çalışma sürecindeki değerli katkıları için; Araş. Gör. Cem Demir'e, Yük. İnş. Müh. Medine İspir'e, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı personeline teşekkür ederim.

Çalışmayı destekleyen BASF firmasına, teşekkürü bir borç bilirim.

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

Eylül 2008

Kayhan KOLCU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. YÜKLEME ÖZELLİKLERİNİN BETONUN DAVRANIŞINA ETKİSİ	6
2.1. Yükleme Hızının Beton Davranışına Etkisi	6
2.2. Yükleme Hızının Lifli Polimer Malzemenin Davranışına Etkisi	8
2.3. Sabit Gerilme Seviyesinin Beton Davranışına Etkisi	9
2.4. Sabit Gerilme Seviyesinin Sargılı Beton Davranışına Etkisi	12
3. LP SARGILI BETON MODELLERİNİN İNCELENMESİ	13
3.1. Samaan ve diğ. (1998)	15
3.2. Lam ve Teng (2003a, 2003b)	16
3.3. İlki ve diğ. (2004)	18
3.4. İlki ve diğ. (2008)	20
3.5. ACI 440 (2001)	21
3.6. Shao ve diğ. (2006)	22
4. DENEY NUMUNELERİ	27
4.1. Standart Silindirlerin Hazırlanması	27
4.2. Numunelerin Güçlendirilmesi	29
4.2.1. Primer Mazlemesinin Uygulanması	29
4.2.2. Lifli Polimer (LP) Uygulanması	30
5. ÖLÇÜM SİSTEMİ	32
6. DENEY SONUÇLARI	35
6.1. Giriş	35
6.2. M0L2a ve M0L2b	37
6.3. M2L2a, M2L2b ve M2L2c	38
6.4. M2L3a, M2L3b ve M2L3c	42
6.5. M2L1a, M2L1b ve M2L1c	47
6.6. M2L0a, M2L0b ve M2L0c	51
6.7. Monoton Artan Yükleme ile Denenen Numunelerin Karşılaştırılması	55
6.8. S2SR1	65
6.9. S2SR2	69
6.10. S2SR3	73
6.11. S2SR4	77
6.12. Sabit Gerilme Altında Denenen Numunelerin Karşılaştırılması	81
7. DENEY SONUÇLARININ MODELLERLE KARŞILAŞTIRILMASI	87

8. SONUÇLAR	89
KAYNAKLAR	91
EK – A	96
ÖZGEÇMİŞ	97

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Literatürdeki Bazı Çalışmalar	11
Tablo 2.2: Literatürdeki Bazı Çalışmalar	12
Tablo 4.1: Beton Karışım Malzeme Miktarları	28
Tablo 4.2: Lifli Polimer Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	30
Tablo 5.1: Ölçüm Aletlerinin Özellikleri	34
Tablo 6.1: Deney Numunelerine Ait Özet Bilgiler.....	36
Tablo 6.2: M0L2a ve M0L2b Deney Bilgileri	37
Tablo 6.3: M2L2a, M2L2b ve M2L2c Deney Bilgileri	38
Tablo 6.4: L2 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri	41
Tablo 6.5: M2L3a, M2L3b ve M2L3c Deney Bilgileri	43
Tablo 6.6: L3 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri	46
Tablo 6.7: M2L1a, M2L1b ve M2L1c Deney Bilgileri	47
Tablo 6.8: L1 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri	50
Tablo 6.9: M2L0a, M2L0b ve M2L0c Deney Bilgileri	51
Tablo 6.10: L0 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri.....	54
Tablo 6.11: Monoton Artan Yük Altında Denenen Numunelerin Deney Bilgileri ...	55
Tablo 6.12: S2SR1 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi	65
Tablo 6.13: S2SR2 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi	69
Tablo 6.14: S2SR3 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi	73
Tablo 6.15: S2SR4 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi	77
Tablo 6.16: Sabit Gerilme Altında Denenen Numunelerin Deney Bilgileri.....	81
Tablo 6.17: Literatürdeki Bazı Çalışmalar	86
Tablo 7.1: L0 Serisi Numunelere Ait DeneySEL ve Analitik Sonuçlar.....	87
Tablo 7.2: L1 Serisi Numunelere Ait DeneySEL ve Analitik Sonuçlar.....	87
Tablo 7.3: L2 Serisi Numunelere Ait DeneySEL ve Analitik Sonuçlar.....	88
Tablo 7.4: L3 Serisi Numunelere Ait DeneySEL ve Analitik Sonuçlar.....	88

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: 1999 Kocaeli depreminde hasar görmüş bir kolon (İlki 2006)	2
Şekil 2.1: Dayanımın Şekildeğiştirme Hızına Göre Değişimi (Bischoff, 1988).....	6
Şekil 2.2: Karbon LP Dayanımının Yükleme Hızıyla Değişimi (Saiidi ve diğ. 2006)9	
Şekil 2.3: Farklı Gerilme Oranlarına Karşı Gelen Şekildeğiştirmeler (Rusch, 1960)10	
Şekil 2.4: Şekildeğiştirmelerin Yükleme Boyunca Değişimi (Shah ve Chandra, 1970)	10
Şekil 3.1: Betonun Gerilme-Şekildeğiştirme Davranışı	13
Şekil 3.2: Sargılı Kesitin Serbest Cisim Diyagramı	14
Şekil 3.3: Samaan ve diğ. (1998) Tarafından Önerilen Modelin Parametreleri	15
Şekil 3.4: Lam ve Teng (2003) Tarafından Önerilen Modelin Parametreleri	17
Şekil 3.5: İlki ve diğ. (2004) Tarafından Önerilen Modelin Parametreleri	19
Şekil 3.6: Zarf Eğrisi Üzerinden Yük Boşaltma ve Geri Yükleme (Shao 2006).....	23
Şekil 3.7: Herhangi İki Gerilme Değeri Arasında Yük Boşaltma (Shao 2006).....	24
Şekil 3.8: $f_{ro} < f'_{un} < f_{new}$ Durumunda Geri Yükleme	25
Şekil 3.9: $f_{ro} < f_{new} < f'_{un}$ Durumunda Geri Yükleme	25
Şekil 3.10: $f_{new} < f_{ro} < f'_{un}$ Durumunda Geri Yükleme	26
Şekil 3.11: $f_{new} < f_{ro} < f'_{un}$ Durumunda Geri Yükleme ($\epsilon_{ro} < \epsilon_{un}$)	26
Şekil 4.1: Beton Karışım Granülometri Eğrileri	27
Şekil 4.2: Beton Karışımında Kullanılan Malzemeler	28
Şekil 4.3: Beton Karışımının Hazırlanması	28
Şekil 4.4: Hazırlanan Standart Silindirler	29
Şekil 4.5: Numunelerin Temizlenmesi ve Primer Malzemesinin Hazırlanması	29
Şekil 4.6: Numunelerin Primer Malzemesi ile Kaplanması	30
Şekil 4.7: Numunelerin Lifli Polimer ile Sargılanması	31
Şekil 5.1: 500 Ton Kapasiteli Instron Deney Cihazı	32
Şekil 5.2: Numune Üzerine Yerleştirilen Ölçüm Aletleri	33
Şekil 5.3: Deney Numuneleri Üzerinde Şekildeğiştirmeölçerlerin Yerleşimi	33
Şekil 5.4: Deney Ortamı Genel Görünüş	34
Şekil 6.1: M0L2a ve M0L2b Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	37
Şekil 6.2: M0L2a ve M0L2b Numunelerinin Deney Sonrası Görünümleri	38

Şekil 6.3: L2 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	38
Şekil 6.4: L2 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi.....	39
Şekil 6.5: L2 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler.....	39
Şekil 6.6: L2 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri	41
Şekil 6.7: L2 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri	42
Şekil 6.8: L3 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	43
Şekil 6.9: L3 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi.....	44
Şekil 6.10: L3 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler.....	44
Şekil 6.11: L3 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri	45
Şekil 6.12: L3 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	46
Şekil 6.13: L1 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	47
Şekil 6.14: L1 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi.....	48
Şekil 6.15: L1 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler.....	48
Şekil 6.16: L1 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri	49
Şekil 6.17: L1 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	50
Şekil 6.18: L0 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri.....	51
Şekil 6.19: L0 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi.....	52
Şekil 6.20: L0 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler.....	52
Şekil 6.21: L0 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri	53
Şekil 6.22: L0 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri.....	54
Şekil 6.23: Yükleme Hızına Göre Dayanımın Değişimi	56
Şekil 6.24: Yükleme Hızına Göre Boyuna Şekildeğiştirmenin Değişimi (150 mm)	57
Şekil 6.25: Yükleme Hızına Göre Boyuna Şekildeğiştirmenin Değişimi (60 mm)...	57
Şekil 6.26: Yükleme Hızına Göre Enine Şekildeğiştirmenin Değişimi	57
Şekil 6.27: E_c Eğiminin Yükleme Hızıyla Değişimi	58
Şekil 6.28: E_2 Eğiminin Yükleme Hızıyla Değişimi	59
Şekil 6.29: Dönüş Noktasına Karşılık Gelen Gerilme Değerleri	60
Şekil 6.30: Enine Dönüş Noktasına Karşılık Gelen Gerilme Değerleri	60
Şekil 6.31: Sargısız Beton Dayanımının Yükleme Hızıyla Değişimi	61
Şekil 6.32: Dönüş Noktasına Karşılık Gelen Boyuna Şekildeğiştirme Değerleri.....	61
Şekil 6.33: Beton Dayanımına Karşılık Gelen Şekildeğiştirme Değerleri	62
Şekil 6.34: Serilere Ait Ortalama Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri (150 mm).....	62
Şekil 6.35: Serilere Ait Ortalama Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri (60 mm).....	63

Şekil 6.36: Farklı Hızlarda Yükleme Süresince Poisson Oranının Değişimi	63
Şekil 6.37: Serilere Ait Gerilme-Hacimsel Şekildeğiştirme İlişkileri	64
Şekil 6.38: S2SR1 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi	65
Şekil 6.39: S2SR1 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	66
Şekil 6.40: S2SR1 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi	66
Şekil 6.41: S2SR1 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme İlişkisi	67
Şekil 6.42: S2SR1 Numunesinde Alt ve Üst Bölgelerdeki Şekildeğiştirmeler	67
Şekil 6.43: S2SR1 Numunesinin Deney Sonrası Görünümü.....	68
Şekil 6.44: S2SR2 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi	69
Şekil 6.45: S2SR2 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	70
Şekil 6.46: S2SR2 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi	70
Şekil 6.47: S2SR2 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme İlişkisi	71
Şekil 6.48: S2SR2 Numunesinde Bindirme Bölgesindeki Şekildeğiştirmeler	71
Şekil 6.49: S2SR2 Numunesi Deney Sonrası Görünümü.....	72
Şekil 6.50: S2SR3 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi	73
Şekil 6.51: S2SR3 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	74
Şekil 6.52: S2SR3 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi	74
Şekil 6.53: S2SR3 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme İlişkisi	75
Şekil 6.54: S2SR3 Numunesinde Farklı Bölgelerdeki Enine Şekildeğiştirmeler	75
Şekil 6.55: S2SR3 Numunesi Deney Sonrası Görünümü.....	76
Şekil 6.56: S2SR4 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi	77
Şekil 6.57: S2SR4 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	78
Şekil 6.58: S2SR4 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi	78
Şekil 6.59: S2SR4 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme İlişkisi	79
Şekil 6.60: S2SR4 Numunesinde Alt ve Üst Bölgelerdeki Enine Şekildeğiştirmeler.....	79
Şekil 6.61: S2SR4 Numunesi Deney Sonrası Görünümü.....	80
Şekil 6.62: Sabit Gerilme Altında Numunelerin Zamana Bağlı Şekildeğiştirmeleri	82
Şekil 6.63: Numunelerin Tüm Deney Boyunca Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri	82
Şekil 6.64: Birinci Doğrunun Eğiminin Gerilme Seviyesine Göre Değişimi.....	83
Şekil 6.65: İkinci Doğrunun Eğiminin Gerilme Seviyesine Göre Değişimi	83
Şekil 6.66: Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme Davranışları.....	84
Şekil 6.67: Enine Şekildeğiştirmelerin Gerilme Seviyesine Göre Değişimi	84

Şekil 6.68: Numunelerde Sabit Gerilme Altında Poisson Oranının Değişimi.....	85
Şekil 6.69: Numunelerde Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme.....	85

SEMBOL LİSTESİ

A_1, A_2	: Etkili olarak sargılanamamış kesit alanı
D	: Sargılanmış kesit çapı
D_E	: Dinamik elastisite modülü çarpanı (Mander ve diğ. 1988)
D_f	: Dinamik dayanım çarpanı (Mander ve diğ. 1988)
D_e	: Dinamik şekildeğiştirme çarpanı (Mander ve diğ. 1988)
ϵ_c	: Şekildeğiştirme
ϵ_{cc}	: Sargılı betonun en büyük şekildeğiştirme değeri
ϵ_{ch}	: Sargılı betonun en büyük enine şekildeğiştirme değeri
ϵ_{co}	: Sargısız betonun dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirmesi
ϵ_{cod}	: Betonun yüksek hızlarda dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirmesi
ϵ_{FRP}	: LP malzemenin en büyük şekildeğiştirme değeri
$\epsilon_{h,rupt}$	: LP sargının kopmada şekildeğiştirme değeri
ϵ_h	: Sargısız betonun dayanıma karşılık gelen enine şekildeğiştirmesi
ϵ_t	: İkinci doğrunun başladığı noktadaki şekildeğiştirme değeri (Lam ve Teng)
$\dot{\epsilon}$	: Yükleme hızı
E_2	: Gerilme-şekildeğiştirme diyagramında ikinci doğrunun eğimi
E_c	: Sargısız beton elastisite modülü
E'_{cd}	: Sargısız betonun yüksek hızlarda elastisite modülü
E_{FRP}	: LP malzemenin elastisite modülü
E_{seco}	: Sargısız beton sekant modülü
f'_{cc}	: Sargılı beton basınç dayanımı
f'_{co}	: Sargısız beton basınç dayanımı
f'_{cd}	: Sargısız betonun yüksek hızlarda basınç dayanımı
f_{FRP}	: LP sargının beton üzerinde oluşturduğu yanal gerilme
f_j	: Sargı şeridinde oluşan çekme gerilmesi
f_l	: Sargının beton üzerinde oluşturduğu en büyük yanal gerilme
f_o	: İkinci doğrunun gerilme eksenini kestiği gerilme değeri
f_t	: LP şeridi malzeme çekme dayanımı
F_j	: Sargıda oluşan çekme kuvveti
F_l	: Sargının beton yüzeyine uyguladığı yanal kuvvet

σ_c	: Gerilme
k_1	: Sargı etkinliği katsayısı
κ_a	: Kesit geometrisine bağlı etkenlik çarpanı
LTF	: Yükleme tipi çarpanı
n	: Eğri şekil katsayısı
n_f	: Sargı katı sayısı
θ	: Kemerlenme açısı
ρ_f	: Sargı alanının kesit alanına oranı
t	: Şerit kalınlığı

YÜKLEME HIZININ LİFLİ POLİMER SARGILI BETONUN EKSENEL YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞINA ETKİSİ

ÖZET

Büyük bir bölümü deprem riski altında bulunan ülkemizdeki mevcut yapıların büyük çoğunluğu gerek 1975 Deprem Yönetmeliğinin gerekse şu an yürürlükte bulunan 2007 Deprem Yönetmeliği' nin çeşitli koşullarını sağlamamaktadırlar. Bundan dolayı mevcut yapıların birçoğu deprem etkilerine karşı yetersizdir ve güçlendirilme gereksinimi duymaktadırlar.

Ülkemizdeki yapıların ortak kusurlarından ikisi, yetersiz süneklikteki kesitler ve düşük beton dayanımıdır. Çeşitli güçlendirme yöntemleriyle bu eksikliklerin giderilme imkanı vardır. Lifli polimer malzemelerle betonarme elemanların sargılanması son yıllarda geleneksel yöntemlerine bir alternatif olarak, güçlendirme uygulamaları arasında yer edinmeye başlamıştır. Mevcut binaların kolonlarını lifli polimer malzemelerle sargılamak, deprem etkilerine karşı yapı elemanlarının sünekliğini ve basınç dayanımını önemli bir ölçüde artırabilir. Binaları deprem etkilerine karşı güçlendirirken yapı elemanlarının davranışı hakkında gerçekçi öngörülerde bulunmak, güvenli ve ekonomik hesaplar yapmak adına lifli polimerle sargılanmış betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışının incelenmesi gereklidir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda kesit şekli, kenar yarı çapı, lifli polimer sargısının kalınlığı ve beton dayanımı gibi değişkenlerin lifli polimerle sargılanmış betonun davranışına etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Monoton artan yükleme altında davranışı inceleyen yeteri kadar araştırma varken sabit yükler altında davranışı inceleyen araştırmalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada yükleme hızının monoton artan ve sabit tutulan yükleme durumları için karbon lifli polimer sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışına etkisi incelenmiştir. Numunelerde normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, on sekiz adet standart silindir numunesi imal edilerek, bunlardan on altı tanesi iki kat karbon lifli polimer şeritler ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Numuneler farklı yükleme hızları ve gerilme düzeyleri altında denenerek, yükleme hızının ve sabit gerilme oranının gerilme-şekildeğiştirme davranışına etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar LP sargılı beton için önerilen mevcut modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yükleme hızındaki artışın sargılı betonun dayanımında da artışa neden olduğu ve LP sargının betonun sünme etkilerine karşı dayanıklılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışma ile sargılı betonun deprem durumundaki davranışının anlaşılması ve tasarım için yeni modeller geliştirilmesinde yardımcı olacağı düşünülmektedir.

EFFECTS OF LOADING RATE ON AXIAL BEHAVIOR OF CONCRETE CONFINED BY FIBER REINFORCED POLYMER

SUMMARY

A majority of the existing structures in our country do not comply with various provisions of neither the 1975 nor the current 2007 Earthquake Code. Thus, most of these existing structures are vulnerable to earthquake effects and need retrofitting.

Two of the common deficiencies of existing structures are insufficiently ductile sections and concrete of low compressive strength. The deficiencies may be overcome by various retrofitting techniques. As an alternative to conventional retrofitting techniques, confining of reinforced concrete members with fiber reinforced polymer (FRP) materials began to find a place in strengthening applications. Confining the reinforced concrete columns of existing buildings with FRP materials can improve the ductility and compressive strength of structural members significantly, against seismic actions. Behavior of concrete, confined by FRP materials should be analyzed in order to make realistic predictions, safe and economic designs while strengthening against earthquake actions. In studies up to date, effect of various parameters to behavior of FRP confined concrete, such as, cross-section geometry, corner radius, thickness of confinement and concrete compressive strength have been investigated by researchers. Although sufficient researches have investigated the behavior under monotonic loading, limited number of studies has taken sustained loading into consideration. In this study, eighteen standard cylinder specimens were produced and sixteen of them were strengthened by confining with two layers of CFRP sheets. The specimens were produced from normal strength concrete. Effects of loading rate and level of sustained stress-strength ratio on stress-strain relationship of carbon-FRP confined concrete were investigated by testing the specimens under different loading rates and stress-strength ratios. Test results were compared with those, acquired from present models for FRP confined concrete. Test results showed that increase in loading rate caused an increase in confined concrete strength and FRP confinement increases the performance of concrete against creep.

It is aimed, in this study, to have a better understanding of the behavior of confined concrete under earthquake action and to help develop new theoretical models for structural design.

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımının ana ilkesine göre, depremin şiddetine göre can güvenliğinin sağlanması koşuluyla belirli bir düzeyde hasarın oluşması kabul edilebilir bir durumdur. Deprem yönetmeliğinde belirtildiği üzere; yapının ekonomik ömrü içinde oluşabilecek hafif şiddetteki depremlerde yapısal veya yapısal olmayan sistem elemanlarının hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal veya yapısal olmayan elemanlarda oluşacak hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması gerekmektedir. Yapının ekonomik ömrü süresince bir kere meydana gelebilecek şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması koşulu ile taşıyıcı sistemde onarılamayacak derecede hasar meydana gelebilir. Depreme dayanıklı yapı, bu ilkeye göre tasarlanmış ve uygulamaya koyulmuş bir yapı olarak kabul edilebilir. Yapının yönetmelikte belirtilen esaslara göre yapılmaması durumunda ise hafif ve orta şiddetteki depremlerde bile taşıyıcı sistemde onarılamayacak derecede hasarlar oluşabilir. Yurdumuzdaki yapılarda büyük ölçeklerde deprem hasarının oluşmasının ana nedenleri arasında; düşük dayanımlı beton kullanımı, donatı detaylarındaki eksikler ve uygulamaya esnasında yapılan hatalar sayılabilir.

Şiddetli bir depremde yapı elemanlarındaki donatıların bazı kesitlerde akma konumuna ulaşacakları ve bu kesitlerde plastik mafsallara dönüşeceği kabul edilmektedir. Yapının bu koşullar altında ayakta kalması plastik mafsallarda yeteri kadar enerji yutulmasına bağlıdır. Yeteri kadar enerji yutulması büyük ölçüde plastik mafsallarda oluşan kesitlerin sünekliğine ve dayanımına bağlıdır. Bu davranışı sağlamak betonun yeterli dayanıma sahip olması ve donatı yerleşimlerinin yönetmeliklerin öngördüğü şekilde yapılması ile mümkün olmaktadır. Ülkemizdeki yapılar düşünüldüğünde ise gerek yetersiz beton dayanımı gerekse donatı yerleşimlerinde yapılan hatalar nedeniyle yapı elemanları deprem sırasında yeteri kadar sünek davranmamakta ve büyük hasarlar meydana gelmektedir, Şekil 1.1. İstenmeyen bu durumların önüne geçebilmek için yeni yapılar yönetmeliklere uygun şekilde inşa edilmeli, mevcut yapılar ise güçlendirilmeli, gerekirse yıkılarak tekrar inşa edilmelidirler.



Şekil 1.1: 1999 Kocaeli depreminde hasar görmüş bir kolon (İlki 2006)

Yapıların güçlendirilmesi için mevcut birçok teknikten biri de lifli polimer malzemeler ile yapı elemanlarının sargılanmasıdır. Lifli polimer (LP) malzemelerle yapı elemanlarını sargılama, son yıllarda güçlendirme uygulamaları arasında yer edinmeye başlamıştır. Sargılanmış betonun davranışı hakkında daha gerçekçi öngörülerde bulunmak daha sağlıklı güçlendirme projelerine olanak sağlar. Bu sebeple lifli polimerlerle sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin iyi anlaşılması gerekir. Bu güne kadar lifli polimerlerle sargılanmış betonun davranışı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Burada lifli polimerle sargılanmış betonun eksenel yükler altındaki davranışı hakkında yapılan çalışmalara kısaca değinilmiştir.

Mirmiran ve diğ. (1997) standart silindir numuneler üzerinde lifli polimer (LP) sargısının kalınlığının beton dayanımına etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçları, sargılanmış beton için önerilen mevcut modellerin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Samaan ve diğ. (1998) LP sargılı betonun yatay ve düşey yöndeki gerilme-şekildeğiştirme davranışı için bir model önermişlerdir. Toutanji (1999) farklı özellikte LP şeritlerle sargılanmış betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için bir model önermiştir. Saafi ve diğ. (1999) LP tüp ile sargılanmış betonun performansını incelemiş, Toutanji tarafından LP şeritlerle sargılı beton için önerilen modeli LP tüple sargılı beton için uyarlamışlardır. Rochette ve Labossiere (2000) küçük boyutta ve farklı kesitteki numuneler üzerinde LP sargısının etkisini incelemişlerdir. LP katlarının sayısı arttırmanın ani göçme durumuna yol açtığını ve kenar yarı çapının LP sargısının etkinliğine doğrudan etki ettiğini belirtmişlerdir.

Wang ve Restrepo (2001) dikdörtgen ve kare kesitli betonarme elemanlarla yaptıkları deneylerin sonucunda, LP sargısının numunelerin gerilme-şekildeğiştirme davranışlarını iyileştirmesinin yanında boyuna donatının burkulmasını da sınırladığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu tip elemanların boyuna şekildeğiştirmesinin belirlenmesi için bir model önermişlerdir. Karabinis ve Rousakis (2002) plastisite teorisine dayanan, sargılı beton için geliştirilmiş bir modeli LP sargılı betona uyarlamış ve monoton artan yükleme ile denedikleri küçük boyuttaki silindir numunelerin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Lam ve Teng (2003a, 2003b) sadece enine doğrultuda lif içeren LP şeritleriyle sargılanmış beton için bir model önermişlerdir. İlki ve diğ. (2004) düşük dayanımlı ve değişik kesit tiplerine sahip beton numuneler üzerinde yaptıkları deneylerin sonucunda, lifli polimer sargısının düşük dayanımlı betonda daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Lam ve Teng (2004) LP şeritlerindeki çekme gerilmelerinin dağılımını, kopma durumlarını ve sargılı betonun göçme durumunu üç farklı yöntem kullanarak incelemişlerdir. Mandal ve diğ. (2005) basınç dayanımı 31-81 MPa arasında değişen silindir numunler üzerinde yaptıkları deneylerde beton basınç dayanımının LP sargısının katkısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerin sonucunda LP sargısının, düşük ve orta dayanımlı betona, yüksek dayanımlı betona yaptığından daha fazla katkıda bulunduğunu ve mevcut modellerin yüksek dayanımlı betonun şekildeğiştirme değerlerini belirlemede yetersiz kaldıklarını belirtmişlerdir. Au ve Büyüköztürk (2005) silindir numuneler kullanarak, lifli polimer şeritlerinin yönünün, tipinin ve kalınlığının gerilme-şekildeğiştirme davranışı ve göçme durumuna etkisi üzerinde çalışmışlardır. İlki ve diğ. (2006) düşük dayanımlı betonarme numuneler üzerinde LP sargısının etkisini incelemişlerdir. Tastani ve diğ. (2006) hasarlı ve hasarsız betonarme numuneler üzerinde LP malzemesinin tipi ve sargı kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Matthys ve diğ. (2006) LP sargılı, büyük ölçekli dairesel kesitli betonarme kolonların aksenal yük altındaki davranışlarını incelemiş ve çoğu küçük boyuttaki numuneler kullanılarak elde edilen mevcut analitik modellerin sonuçları ile elde ettikleri deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Wang ve Wu (2007) dikdörtgen kesitli numunelerin kenar yarı çapının sargılama üzerindeki etkisini incelemiş ve kenar yarı çapının sargılanmış betonun davranışına doğrudan etki ettiğini gözlemlemişlerdir.

Deprem ve rüzgar gibi etkiler altında yapılarıdaki beton tekrarlı gerilmelere maruzdur. Tekrarlanan yükleme boşaltma durumları altında gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin ve beton rijitliğindeki değişimin incelenmesi gerekir. Monoton artan yüklerle yeterli sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen tekrarlı yükler üzerine çalışmalar sınırlı kalmıştır .

İlki ve Kumbasar (2002, 2003) LP sargılı hasarlı ve hasarsız numunelerin monoton artan ve tekrarlı yükleme durumları altında davranışını incelemiş ve mevcut deney verilerinden yararlanarak, sargılanmış betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için bir model önermişlerdir. Shao ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmalar sonucunda sargılı betonun tekrarlı yükleme durumunda, yükleme ve boşaltma eğrilerinin de elde edilmesini sağlayan bir model geliştirmişlerdir. Tamuzs ve diğ. (2006) farklı sayıda LP katıyla sargılı, basınç dayanımı 20 ile 100 MPa aralığında değişen silindir numunelerin monoton artan ve tekrarlı yüklemeler altındaki performanslarını incelemişlerdir. Lam ve diğ. (2006) yaptıkları deneylerde tek veya çift kat LP şeritlerle sargılanmış silindir numuneler kullanmışlardır. Numuneleri monoton artan yükleme, tekrarlı yükleme ve çevrimli tekrarlı yükleme altında denemişlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarını mevcut modellerle karşılaştırmışlardır. Shan ve diğ. (2006) tekrarlı yatay yükler altında denedikleri LP sargılı numunelerin, uzun süreli, sabit, düşey yükler altındaki kalıcı dayanımlarını ve sünme etkilerini incelemişlerdir. Rousakis ve diğ. (2007) 25-40 MPa arasında basınç dayanımlarına sahip dikdörtgen kesitli numuneler üzerinde çalışmışlardır. Farklı FRP malzemeleri ile güçlendirdikleri numuneleri sabit ve tekrarlı yükleme altında deneyerek gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için bir model önermişlerdir. Ciupala ve diğ. (2007) 100x200 mm boyutlarındaki silindir numunelere LP sargısının kalınlığı, monoton artan ve tekrarlı yüklemelerin etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını önerdikleri analitik modelden elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. İlki ve diğ. (2007) eldeki deney verilerini kullanarak mevcut modelleri inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. İlki ve diğ. (2008) çalışmalarında 250x250x500 mm ve 150x300x500 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli ve 250x500 mm boyutlarında dairesel betonarme numuneler kullanmışlardır. Çalışmada incelenen değişkenler LP sargısının kalınlığı, beton basınç dayanımı, enine donatı oranı, kenar yarıçapı, numune boyutu, donatı dizilimi ve yükleme durumlarıdır. Elde edilen deney sonuçları kendi önerdikleri modelle birlikte, iki farklı modelle daha karşılaştırılmıştır.

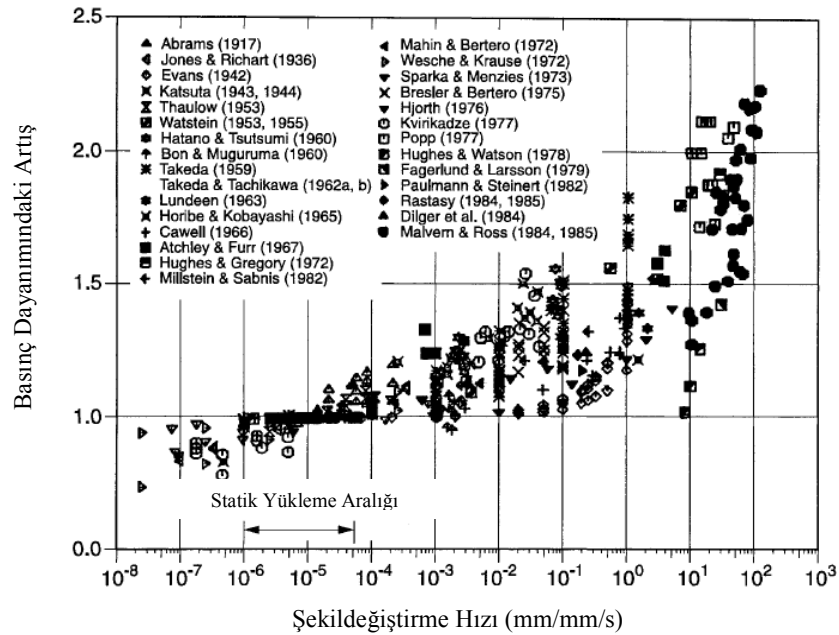
Son yıllarda betonarme yapı elemanlarını lifli polimerle sargılamak güçlendirme projelerinde geniş bir uygulama alanı edinmeye başlamıştır. Bu güne kadar farklı yükleme hızlarının sargısız ve enine donatılarla sargılı betonun davranışı üzerine etkileri araştırmacılar tarafından incelenmiş ve betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini ortaya koyan çeşitli modeller önerilmiştir. Enine etriyelerle sargılanmış beton için önerilen modellerde sabit bir sargılama gerilmesi kabulü yapılmıştır. Bunun sebebi donatının akma durumuna ulaştıktan sonra üzerindeki gerilmenin sabit kaldığı kabulüne dayanmaktadır. Lifli polimer malzemeler ise doğrusal elastik bir davranış sergiledikleri için lifli polimer sargılı betonun davranışı etriyelerle sargılı betonun davranışından farklılık gösterir. Lifli polimer malzemelerin farklı yükleme hızları altındaki davranışı araştırmacılar tarafından ayrı olarak incelense de, bu malzemelerle sargılı betonun davranışı üzerine bilindiği kadarıyla bir çalışma bulunmamaktadır. Betonarme elemanlarda deprem anında 0.015 şekildeğiştirme/saniye seviyesinde şekildeğiştirmeler meydana gelebilmektedir. Lifli polimer sargılı betonun, deprem anındaki performansının etkili bir biçimde öngörülebilmesi için davranışının yüksek hızlardaki şekildeğiştirmeler altında da incelenmesi gereklidir.

Bu çalışma kapsamında sargılanmamış iki ve karbon lifli polimer şeritlerle sargılanmış on altı adet numune farklı yükleme hızları altında monoton artan ve sabit yük durumları altında incelenmiştir. Numunelerin hepsi iki kat sargılanmış ve 15 cm bindirme boyu bırakılmıştır. Araştırmadaki değişkenler yükleme hızı ve gerilme düzeyidir. Bu çalışmayla LP sargılı betonun deprem performansı hakkında daha fazla bilgi edinmek amaçlanmaktadır.

2. YÜKLEME ÖZELLİKLERİNİN BETONUN DAVRANIŞINA ETKİSİ

2.1. Yükleme Hızının Beton Davranışına Etkisi

Beton zamana bağlı olarak deformasyon gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızının dayanıma etkisi çok önemlidir. Yapılan deneylerde yavaş yükleme hızıyla denenen bir numunenin dayanımının yüksek hızda yüklenen bir numunenin dayanımından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Ersoy ve Özcebe, 2004). Yükleme süresi 30-240 dakika arasında olan deneylerde, yükleme hızı 0.2 MPa/sn olan deneylerde elde edilen basınç dayanımlarının ancak %84-88' i kadar dayanım elde edilmiştir. Yükleme hızını 0.7 kPa/sn' den 70 GPa/sn' ye çıkartmak ise basınç dayanımını iki katına kadar çıkartabilir (Neville, 2003). Beton basınç dayanımının şekildeğiştirme hızına göre değişimi Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1: Dayanımın Şekildeğiştirme Hızına Göre Değişimi (Bischoff, 1988)

Betonun başlangıç elastisite modülü, sonraki yük seviyelerindeki tanjant modülüne oranla yükleme hızından daha az etkilenir. Buna göre yükleme hızının etkilerinin malzemedeki hasar oluşumuyla bağlantılı olduğu söylenebilir. Yükleme hızının

etkileri yavaş yükleme hızlarında betonda oluşan mikro çatlakların artışı ve nem oranı gibi etkenlere bağılıken, yüksek yükleme hızlarında iç kuvvetlere bağılıdır (Eibl ve Schmidt-Hurtienne, 1999). Düşük hızlarda betonda sünme etkilerinin ortaya çıkması ve mikro çatlakların önemli oranda artmasıyla dayanımda bir düşüş görülür. Yükleme hızının artmasıyla beton dayanımında görülen artış, betonda çatlakların ilerlemesinin kısıtlanması ile açıklanabilir.

Scott ve diğ. (1982) 450x450x1200 boyutlarında betonarme elemanları farklı yükleme hızları altında incelemişlerdir. Kullandıkları yükleme hızları, en düşük 0.000033 şekildeğiştirme/saniye ve en yüksek 0.0167 şekildeğiştirme/saniye seviyesindedir. Düşük yükleme hızının genelde numunelerin statik dayanımını elde etmede kullanılan seviyede olduğunu belirtirken, yüksek yükleme hızının betonarme elemanların deprem anında maruz kaldıkları şekildeğiştirme hızını yansıttığını belirtmişlerdir. Beton elemanlar üzerinde uyguladıkları deneylerde en yüksek şekildeğiştirme hızının dayanımı %25 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Yükleme hızının davranışa etkisinin yanında, sargılamının da beton dayanımına etki ettiğini belirtmişlerdir. Yüksek hızda betonarme elemanların basıç dayanımı, basınç dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme ve şekildeğiştirme eğrisinin düşen kolunun eğiminin, düşük hızda denenen numunelere oranla 1.25 katsayısıyla artırılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Önceki modellerini, yüksek hız durumu için bu katsayıya göre yenilemişlerdir. Dilger ve diğ. (1984) sargılı ve sargısız elemanlar üzerinde yaptıkları deneylerde 0.2 ve 0.000033 şekildeğiştirme/saniye arasında değişen yükleme hızları kullanmışlardır. En yüksek hızda beton dayanımında %35 artış gözlemlemişlerdir. Dilger ve diğ.' ne göre yüksek yükleme hızı sargısız betonun dayanımını artırmakta fakat dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerinde düşüşe neden olmaktadır. Sargılı beton için şekildeğiştirme hızındaki yükselmenin, dayanımda artışa neden olduğunu fakat şekildeğiştirme eğrisinin şekli üzerinde etkili olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca enine donatının beton dayanımına belirli bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonucunda önerdikleri modelde donatı sargılı ve sargısız beton için aynı basınca dayanımı değeri alınmakta, sadece yükleme hızının etkisi dikkate alınmaktadır. Ahmad ve Shah (1985) farklı özellikteki sargılı ve sargısız, toplam 136 numune üzerinde, eksenel yük altında yaptıkları deneylerde en düşük 0.000032, en yüksek 0.03 şekildeğiştirme/saniye arasında değişen yükleme hızları uygulamışlardır. Yüksek yükleme hızında

denedikleri numuneler, düşük hızdakilere oranla %16 daha fazla dayanım göstermişlerdir. Yüksek şekildeğiştirme hızları altında betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenmesi için bir model önermişlerdir. Soroushian ve diğ. (1986) çok sayıda numune üzerinde farklı yükleme hızlarıyla yapılan deneylerin sonucuna dayanan bir model önermişlerdir. Modelde betonun nem içeriğinin etkisi de göz önüne alınmıştır.

2.2. Yükleme Hızının Lifli Polimer Malzemenin Davranışına Etkisi

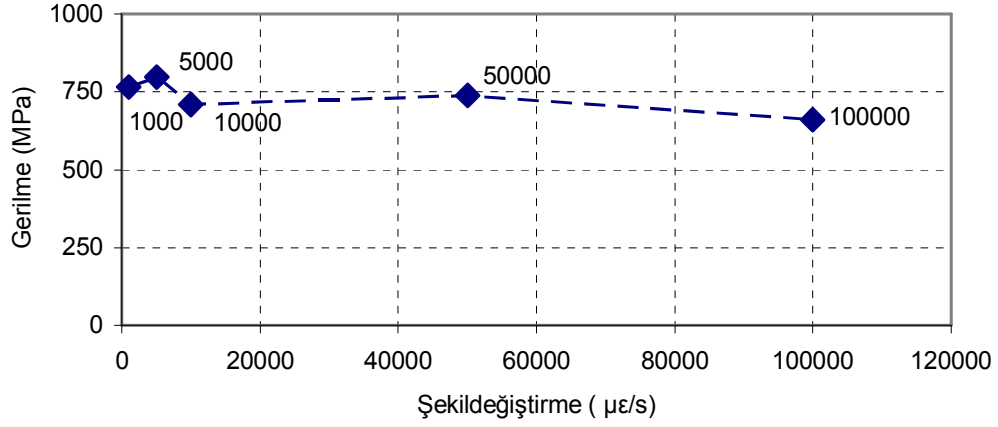
Sargılamadan ayrı olarak lifli polimer malzemelerin farklı yükleme hızları altındaki davranışı araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Okoli ve Abdul-Latif (2002) cam lifli polimer malzeme üzerinde yaptığı çekme deneylerinde yavaş şekildeğiştirme hızı (1.7×10^{-2} mm/saniye) ile yüklenen numunelerde göçmenin liflerin kopması sonucu olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek hızda (10 mm/saniye) yaptığı deneylerde ise liflerin çekme dayanımına ulaşılmadan, göçmenin liflerin bağlayıcı tabakadan sıyrılması ile oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu gözlemlere dayanarak cam lifli polimer için yükleme hızının artırmanın dayanımda ve elastisite modülünde artışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Ray (2006) kompozit malzemenin yükleme hızına karşı duyarlılığının daha çok bağlayıcı reçineye bağlı olduğunu belirtmiştir. Farklı ortam koşulları altında 2 ve 50 mm/dakika yükleme hızları altında, 3-noktalı eğilme deneyi uyguladığı cam lifli polimer malzemelerin davranışını incelemiştir. Yükleme hızındaki artışın kesme kuvvetinde de artışa neden olduğunu belirtmiştir.

Saaidi ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada karbon lifli polimer malzemenin farklı yükleme hızları altında dayanımının belirli bir dağılım göstermediğini gözlemlemiş ve yükleme hızının lifli polimer malzeme dayanımına belirgin bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir, Şekil 2.2.

Das ve diğ. (2007) farklı özellikteki lifli polimer malzemeleri üzerinde, en düşük 2 mm/dakika, en yüksek 500 mm/dakika yükleme hızlarıyla 3-noktalı eğilme deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarında karbon lifli polimerlerin davranışının, cam lifli polimerlere oranla yükleme hızlarından etkilenmediğini belirtmişlerdir.



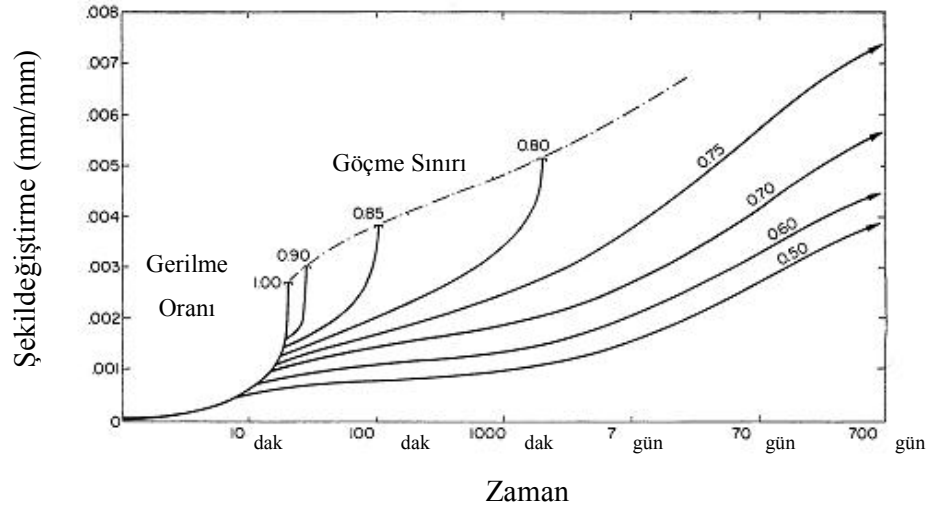
Şekil 2.2: Karbon LP Dayanımının Yükleme Hızıyla Değişimi (Saiidi ve diğ. 2006)

Bu araştırmalarda belirtilen ortak sonuca göre karbon lifli polimer malzemenin dayanımının yükleme hızından bağımsız olduğu söylenebilir. Lifli polimer malzemenin yapısında rastgele dağılmış küçük boyuttaki boşluklar, zayıf bölgeler ya da farklı yönde oluşmuş mikro çatlaklar olabilir. Bu nedenle malzemenin farklı kesitlerindeki yerel dayanımlar farklılıklar gösterebilir; bu sebepler göçme yerinin ve şiddetinin de tahminini zorlaştırmaktadır.

2.3. Sabit Gerilme Seviyesinin Beton Davranışına Etkisi

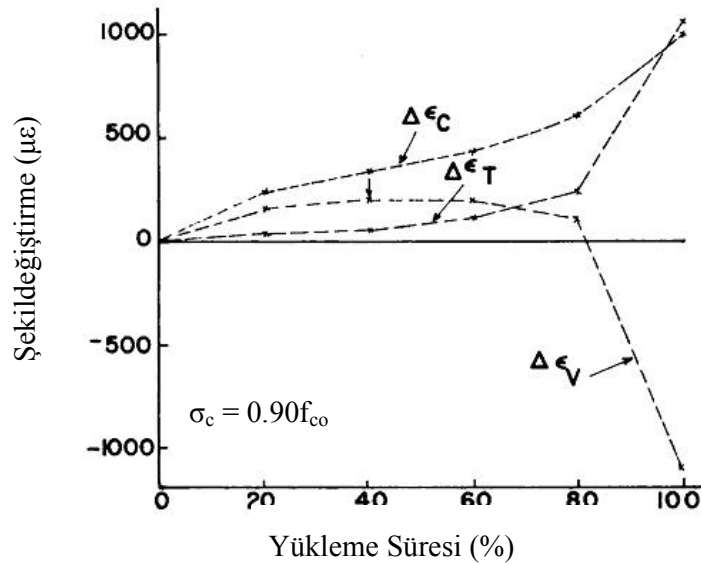
Sabit gerilme altında betonda oluşan şekildeğiştirme artışı sünme olarak tanımlanır. Ortam koşulları, hava sıcaklığı ve sıcaklık sünmeye etki eden bazı değişkenlerdir. Sünmenin etkileri eski betona oranla taze betonda daha fazla görülür. Su/çimento oranının artması sünme etkilerinin de artmasına sebep olur. Nemli ortamda sünme deformasyonları azalırken, sıcaklığın artmasıyla artar.

Sünme davranışına etki eden bir diğer değişken de gerilme-beton dayanımı oranıdır. Sünme ve uygulanan gerilme düzeyi düşük gerilme düzeylerinde doğru orantılıdır. Bu orantılılığın üst sınırına betondaki mikro çatlakların artması ile erişilir. Bu üst sınır normal dayanımlı betonda dayanımın %40-60 arasında değişirken, yüksek dayanımlı beton için dayanımın %75'i civarındadır. Bu sınırın üstündeki gerilme seviyelerinde şekildeğiştirme hızla artar ve betonda bir süre sonra göçme görülür, Şekil 2.3.



Şekil 2.3: Farklı Gerilme Oranlarına Karşı Gelen Şekildeğiştirmeler (Rusch, 1960)

Sabit gerilme altında betonda oluşan göçmenin ana sebebi mikro çatlakların sayısındaki artış olduğu söylenebilir. Monoton artan yükler altında denenen bir numune ile karşılaştırıldığında, sabit gerilme altında göçme süresinin %90' ına ulaşan bir betonda mikro çatlakların sayısı yaklaşık üç kat kadardır. Çatlakların sayısındaki artış yüklemenin başlangıcında süreyle orantılı olarak artış gösterirken göçme süresine yaklaşıldıkça hızla artış gösterir. Çatlakların ilerlemesindeki bu artış şekildeğiştirmelerin yükleme süresince değişiminde görülebilir, Şekil 2.4. Sabit gerilme altında göçme durumunda, monoton artan yük altındaki duruma göre daha fazla hacimsel genişleme oluşur; bu sebeple göçme daha az gevrek gerçekleşir.



Şekil 2.4: Şekildeğiştirmelerin Yükleme Boyunca Değişimi (Shah ve Chandra, 1970)

Düşük seviyelerdeki sabit gerilme altında, betonun Poisson oranı gerilme seviyesinden etkilenmez. Gerilme/dayanım oranı 0.5 değerinin üzerindeyken Poisson oranında artış görülmeye başlar ve 0.8-0.9 f'_{co} düzeyindeki sabit gerilme seviyelerinde Poisson oranı 0.5 değerini aşar ve belli bir zaman sonra betonda göçme görülür. Poisson oranının 0.5'i aştığı gerilme seviyesinde hacimsel şekildeğiştirme davranışı da kısılmadan genişlemeye doğru yön değiştirir, (Neville, 2003).

Shah ve Chandra (1970) betondaki çatlakların gelişiminde iki düzey olduğunu belirtmişlerdir.

Birinci düzey çatlak gelişimi, gerilme düzeyinin beton dayanımının %70' inden düşük olduğu, genelde göçmenin görülmediği durumlarda oluşmaktadır. Bu seviyede çatlakların ilerlemesi oldukça yavaş ve sabit bir hızda gerçekleşmektedir. Hacimsel şekildeğiştirme hızı sabittir. Bu düzeyde çatlak gelişimi sadece uzun süreli yükleme altında gerçekleşir.

İkinci düzey çatlak gelişimi, beton dayanımının %80' i ve daha yüksek gerilme düzeylerinde, betonun göçme durumuna ulaştığı durumlarda oluşmaktadır. Bu seviyede hacimsel şekildeğiştirmeler, monoton artan yük altında göçen betonda olduğu gibi hızlanarak artmaktadır. Çatlakların genişlemesi ani olarak gerçekleşir.

Tablo 2.1'de literatürdeki sünme davranışıyla ilgili bazı çalışmaların özet bilgileri verilmiştir.

Tablo 2.1: Literatürdeki Bazı Çalışmalar

Çalışma	Numune Tipi	Beton Dayanımı (MPa)	Gerilme Düzeyi (σ_c/f'_{co})	Süre	Şekildeğiştirme	Sonuç
Washa ve Fluck	150x300	20-40	0.25	10.5 yıl	~0.00045	Göçme görülmedi
Shah ve Chandra	5x5x15	32.3	0.60-0.70	4 saat	~0.0004	Göçme görülmedi
			0.90	6 dakika	0.0019	Göçme
Irivani ve MacGragor	100x200	65-125	0.85	261 dk	0.0043	Göçme
			0.90	33dk	0.0041	
			0.95	2 dk	0.0030	

2.4. Sabit Gerilme Seviyesinin Sargılı Beton Davranışına Etkisi

Sabit gerilme altında LP sargılı betonda görülen sünme şekildeğiştirmleri betonun mekanik özellikleri ve yaşının yanında, LP malzemedeki liflerde ve bağlayıcı reçinede oluşan sünme etkilerine de bağlıdır.

Naguib ve Mirmiran (2003) yaptıkları çalışmada cam LP sargılı 150x300 mm boyutlarındaki silindir numuneleri beton dayanımının %15 ve %30'u düzeyinde sabit yük altında 95 gün süreyle bekletmişlerdir. %30 gerilme düzeyinde yaklaşık 0.0012, %15 gerilme düzeyinde 0.0006 şekildeğiştirme gözlemlemişlerdir. Sünme deneyi süresince sargı sayesinde Poisson oranının sabit kaldığını belirtmişlerdir. Daha sonra monoton artan yük altında denedikleri numunelerde dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesinde bir düşüş gözlemlemediklerini belirtmişlerdir.

Berthet ve diğ. (2006) farklı kat sayısına sahip karbon lifli polimer sargılı 150x300 mm boyutlarındaki silindir numuneleri farklı gerilme düzeyleri altında bırakmışlardır. Çalışmalarında sünmeyi etkileyen asıl değişkenin, gerilme seviyesinin sargılı beton dayanımına oranı olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 2.2'de literatürdeki sargılı betonun sünme davranışıyla ilgili bazı çalışmaların özet bilgileri verilmiştir.

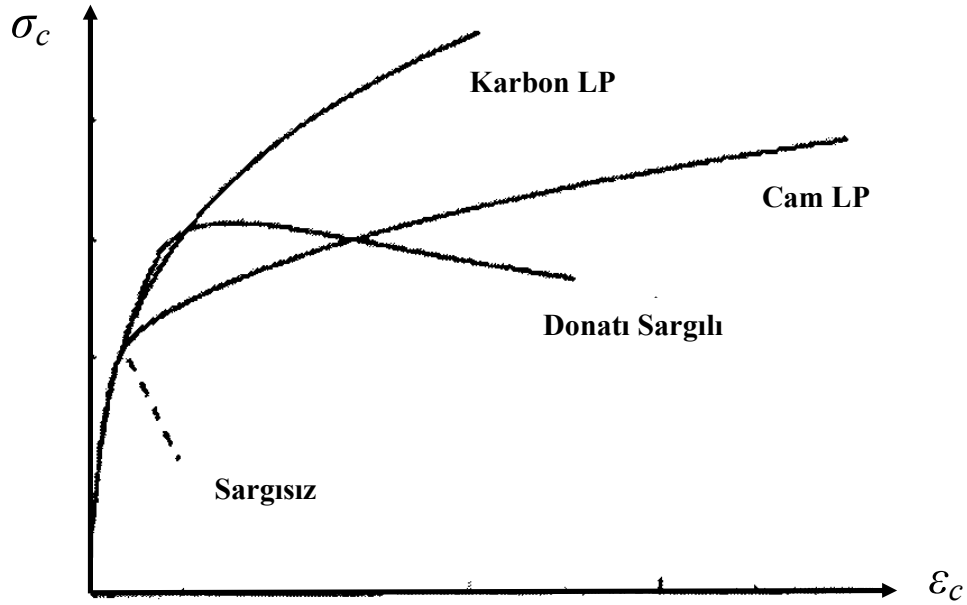
Tablo 2.2: Literatürdeki Bazı Çalışmalar

Çalışma	Numune Tipi	Beton Dayanımı (MPa)	Sargı Katı	Gerilme Düzeyi (σ_c/f_{co})	Süre	Şekildeğiştirme	Sonuç
Naguib ve Mirmiran	150x300	29	-	0.15	100 gün	0.0006	Göçme görülmedi
				0.30		0.0012	
Berthet ve diğ.	150x300	24.5	1	1.2	6 saat	0.013	Göçme
			3	1.7	70 saat	0.034	Göçme görülmedi
			3	1.8		0.032	
Kaul ve diğ.	150x300	42.5	2	0.40	150 gün	-	Göçme görülmedi
		47.5		0.60			

Çalışmalarda görüldüğü üzere LP sargı betonun sünme etkileri altında yapısını büyük oranda korumaktadır.

3. LP SARGILI BETON MODELLERİNİN İNCELENMESİ

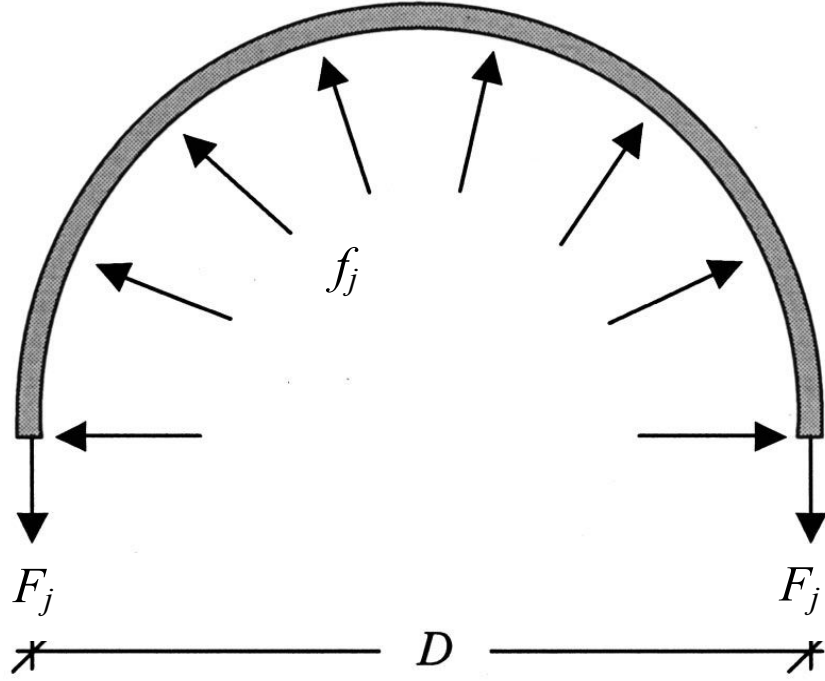
Donatı sargılı betonun davranışından farklı olarak LP sargılı betonda sargı kuvveti sabit değildir. Ayrıca donatı çeliğinin rijitliği LP malzemelere göre daha fazladır. Bu farklılıklar iki sargı tipinin davranışına etki eder. Donatı sargılı beton durumunda, dayanıma ulaşıldıktan sonra bir akma platosu izlenerek yükte düşüş gözlenirken, LP sargılı beton iki doğrusal bir gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi ortaya koyar ve dayanıma ulaştığı yerde en büyük şekildeğiştirmeye ulaşır, Şekil 3.1. Lifli polimer malzemeler beton üzerinde pasif tipte bir sargı kuvveti uygular. Betonun enine şekildeğiştirmesinin artmasıyla lifli polimer sargısında oluşan çekme gerilmeleri, betonun enine şekildeğiştirmesine karşı radyal doğrultuda bir sargı kuvveti oluşturur, Şekil 3.2. LP malzemenin uygulayacağı en büyük sargı kuvveti şekildeğiştirmenin en büyük olduğu anda oluşur (De Lorenzis ve Tepfers, 2003).



Şekil 3.1: Betonun Gerilme-Şekildeğiştirme Davranışı

Sargının beton üzerinde oluşturduğu, f_{FRP} yanal gerilme ve kesit çapı, D değerlerine bağlı olarak beton üzerindeki yanal kuvvet, F_l şu şekilde elde edilebilir;

$$F_l = f_{FRP} D \quad (3.1)$$



Şekil 3.2: Sargılı Kesitin Serbest Cisim Diyagramı

Sargı malzemesinde birim boyda oluşan çekme kuvveti F_j , n_f sargı katı, t bir kat şeridinin kalınlığı, f_j sargı malzemesinde oluşan çekme gerilmesi olmak üzere;

$$F_j = 2n_f t f_j \quad (3.2)$$

Bundan yola çıkarak; sargı malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal sargı gerilmesi, f_l , LP malzeme çekme dayanımı f_t , olmak üzere şu şekilde elde edilebilir

$$f_l = \frac{2n_f t f_t}{D} \quad (3.3)$$

Richart ve diğ. (1929) sargılı beton dayanımı için, çoğu araştırmanın temelini oluşturan, f'_{cc} sargılı betonun dayanımı, f'_{co} sargısız beton dayanımı, k_1 sargı etkinliği katsayısı olmak üzere şu denklemi önermişlerdir;

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (3.4)$$

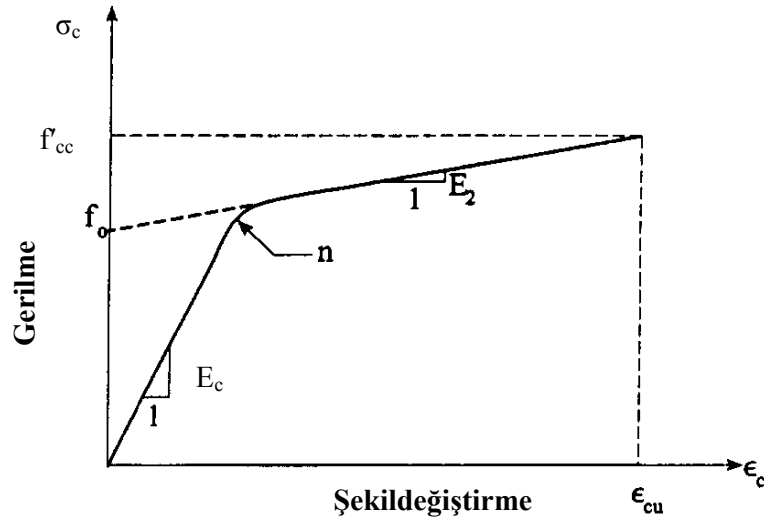
3.1. Samaan ve diğ. (1998)

Samaan ve diğ. (1998), Richard ve Abbott (1975) tarafından önerilen dört parametrelilik denklemi LP sargılı betonun iki doğru davranışını temsil etmek üzere şu şekilde uyarlamışlardır.

$$\sigma_c = \frac{(E_c - E_2)\epsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_c - E_2)\epsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{1/n}} + E_2\epsilon_c \quad (3.5a)$$

$$E_c = 3950\sqrt{f'_{co}} \quad (3.5b)$$

Denklem 3.5'de f_o , LP gerilme-şekildeğiştirme diyagramında ikinci doğrunun eğiminin gerilme eksenini kestiği noktadaki gerilme değeri, E_c betonun elastisite modülü, n geçiş eğrisinin şeklini belirleyen bir katsayıdır, Şekil 3.3.



Şekil 3.3: Samaan ve diğ. (1998) Tarafından Önerilen Modelin Parametreleri

Samaan ve diğ. çalışmalarında sargı etkinliği katsayısı, k_1 için şu değeri önerirler;

$$k_1 = 6.0 f_l^{-0.3} \text{ [MPa]} \quad (3.6)$$

Denklem 3.4 ve Denklem 3.6 ile sargılı beton dayanımı için şu bağıntı elde edilir;

$$f'_{cc} = f'_c + 6.0 f_l^{0.7} \quad (3.7)$$

Samaan ve diğ.' ne göre sargısız beton dayanımına yaklaşıldıkça, sargı göçmeye engel tek etken olarak kalır. Bu nedenle diyagramdaki ikinci doğrunun eğimi, E_2 , sargı malzemesinin elastisite modülü, E_{FRP} , ile ifade edilir. Bu düşünceyle en büyük şekildeğiştirme, ε_{cc} , şu ifadeyle belirlenir.

$$E_2 = 245.61 f_{co}'^{0.2} + 1.3456 \frac{E_{FRP} t}{D} \quad (3.8a)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f_{cc}' - f_o}{E_2} \quad (3.8b)$$

Samaan ve diğ. modellerinde, LP sargısının en büyük uzama değerine ulaşmadan erken göçme durumuna gelmesi olayını göz önüne almamışlardır. Modelin avantajı tek bir denklem ile tüm gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin ifade edilebilmesidir.

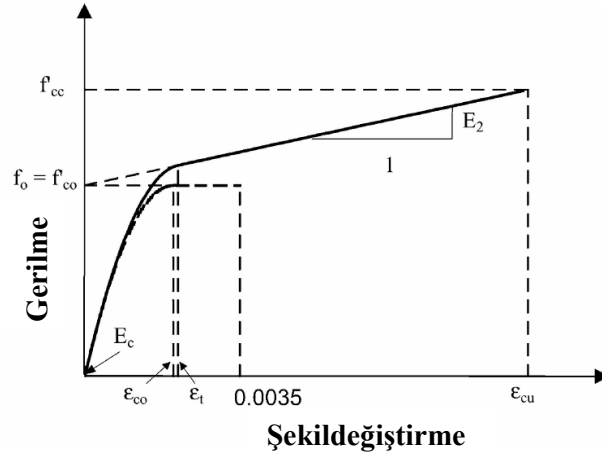
3.2. Lam ve Teng (2003a, 2003b)

Lam ve Teng (2003a) sadece veya ağırlıklı olarak enine doğrultuda lifler içeren polimer malzemelerle sargılı beton için bir model önermişlerdir. Sadece enine doğrultuda liflerin bulunması sargının, boyuna doğrultudaki rijitliğinin ihmal edilerek betonun genişlemesine sadece enine doğrultuda gerilmeler oluşturarak karşı koyan tek yönlü bir malzeme olarak kabul edilebilmesini sağlar. Ayrıca, daha önceki modellerde gördükleri eksiklikler olan, LP şeritlerin malzeme deneylerinden elde edilen çekme gerilmelerine ulaşmadan kopmaları ve sargı rijitliğinin, LP sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine olan etkisini göz önünde bulundurulmama durumlarını, kendi modellerini oluştururken gidermeyi amaçlamışlardır. Modelin uygulanabilmesi için sargı etkinliği, f_l/f_{co} değerinin 0.07'den büyük olması gereklidir. Model gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için LP rijitliğinin de etkisinin dikkate alındığı parabolik bir ilk bölüm ve doğrusal bir ikinci bölüm kabulü yapmaktadır, Şekil 3.4.

Lam ve Teng bu kabullerle LP sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için, E_c sargısız betonun elastisite modülü olmak üzere, şu ifadeleri önermişlerdir.

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f_o} \varepsilon_c^2 \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad (3.9a)$$

$$\sigma_c = f_o + E_2 \varepsilon_c \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \quad (3.9b)$$



Şekil 3.4: Lam ve Teng (2003) Tarafından Önerilen Modelin Parametreleri

Lam ve Teng çalışmalarında diyagramın ikinci bölümünün gerilme eksenini kestiği noktadaki f_o değerinin sargısız beton dayanımına, f'_{co} , eşit kabul edilebileceğini belirtmişlerdir. Diyagramın ilk bölümünün doğrusal ikinci bölüm ile birleştiği noktadaki şekildeğiştirme, ε_t ve ikinci bölümün eğimi, E_2 ; şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_t = \frac{2f_o}{(E_c - E_2)} \quad (3.10)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f_o}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.11)$$

Lam ve Teng, sargı rijitliğinin en büyük şekildeğiştirme üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Bu etki modelde en büyük şekildeğiştirme değeri için verilen ifadede dikkate alınırken, basınç dayanımı belirlenirken ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenmiştir. Sargısız betonun sekant modülü, $E_{seco} = f'_{co} / \varepsilon_{co}$ ve LP şeridin kopma anındaki şekildeğiştirmesi, $\varepsilon_{h,rup}$ olmak üzere LP sargılı betonun en büyük şekildeğiştirme ve basınç dayanımı için şu ifadeleri önermişlerdir.

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45} \quad (3.12a)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.3 f_l \quad (3.12b)$$

Bu ifadelerde geçen f_l yanal gerilmesi hesaplanırken, LP sargısında oluşan şekildeğiştirmelerin malzeme deneylerinden alınan şekildeğiştirme değeri, ε_{FRP} , farkı düşünülerek, bu sonuçlar 0.586 katsayısı ile azaltılarak elde edilen, $\varepsilon_{h,rupt}$ değeri kullanılmıştır. Ayrıca dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme, ε_{co} , 0.002 kabul edilmiştir. Lam ve Teng, bu kabulle karbon lifli polimer ile sargılı betonun şekildeğiştirme ilişkisi için şu ifadeyi önermişlerdir.

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 5.53 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{FRP}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45} \quad (3.13)$$

Lam ve Teng (2003b) daha önce uniform olarak sargılanmış beton için önerdikleri modeli dikdörtgen kesitler için geliştirmişlerdir. Lam ve Teng dikdörtgen kesitlerin bazı bölgelerinin etkili olarak sargılanmadığını belirtmişlerdir. Kesit şeklinin dayanıma ve şekildeğiştirmeye olan etkisi sırasıyla k_{s1} ve k_{s2} katsayıları ile dikkate alınmıştır. Bu katsayılar etkili olarak sargılanmış alanın kesit alanına oranına bağlı olarak elde edilir ve daha önce önerilen model, dikdörtgen kesitler için şu hali alır;

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.3k_{s1}f_l \quad (3.14a)$$

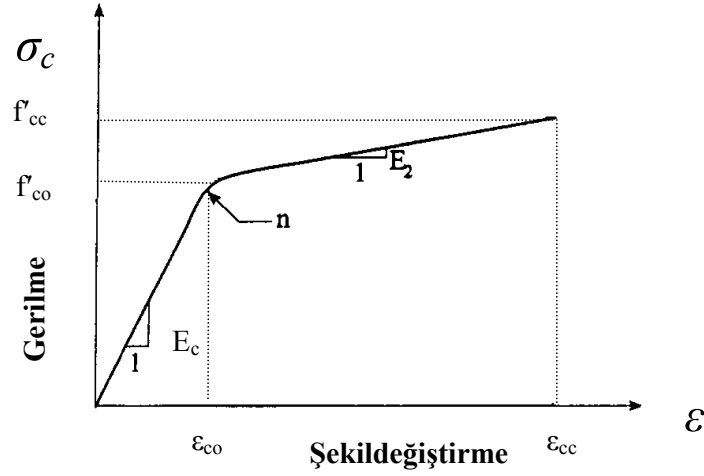
$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12k_{s2} \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45} \quad (3.14b)$$

3.3. İlki ve diğ. (2004)

İlki ve diğ. (2004), Samaan ve diğ. (1998) tarafından önerilen modelin bir benzerini; kesit şeklinin etkisini ve lifli polimer şeritlerin malzeme deneylerinde elde edilen değerlerden daha küçük şekildeğiştirme değerlerinde kopmalarını da dikkate alarak, geliştirmişlerdir. İlki ve diğ. tarafından önerilen modelde LP sargılı betonun iki doğrulu bir davranış sergilediği kabul edilir, Şekil 3.5.

Modelde önerilen davranışta sargısız beton davranışıyla özdeş ilk kısım bir geçiş eğrisiyle LP sargının rijitliğinin etkin olduğu doğrusal ikinci kısma bağlanır. E_c sargısız betonun elastisite modülüne eşit kabul edilirken E_2 şu şekilde elde edilebilir.

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}} \quad (3.15)$$



Şekil 3.5: İlki ve diğ. (2004) Tarafından Önerilen Modelin Parametreleri

Yaptıkları deneysel çalışmanın sonucuna bağlı olarak geçiş eğrisinin şekil çarpanı, n için sabit 20 değerini vermişlerdir. Modelde herhangi bir noktadaki gerilme ve sargılı kesitin dayanımı şu şekilde hesaplanır.

$$\sigma_c = E_2 \varepsilon_c + \frac{(E_c - E_2) \varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_c - E_2) \varepsilon_c}{f_{co}'} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (3.16a)$$

$$f_{cc}' = f_{co}' \left[1 + 2.4 \left(\frac{f_l}{f_{co}'} \right)^{1.2} \right] \quad (3.16b)$$

Sargının uygulayacağı en büyük yanal gerilme, f_l , belirlenirken LP şeritlerin malzeme dayanımlarına ulaşmadan kopmalarının etkisi düşünülerek $\varepsilon_{h,rup}$ değeri malzeme şekildeğiştirme değeri 0.7 katsayısı ile azaltılarak elde edilmiştir. Sargının uygulayacağı en büyük yanal gerilme; ρ_f sargı alanının donatı alanına oranı olmak üzere şu şekilde elde edilir.

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f \varepsilon_{h,rup} E_{FRP}}{2} \quad (3.17a)$$

$$\begin{aligned}\rho_f &= \frac{4n_f t}{D} & (\text{daire kesit}) \\ \rho_f &= \frac{2n_f t(b+h)}{bh} & (\text{dikdörtgen kesit})\end{aligned}\tag{3.17b}$$

Denklem 17’de κ_a kesit geometrisine bağlı etkenlik çarpanı ve ρ_f sargı alanının beton kesit alanına oranıdır. Silindir kesitlerde, κ_a için 1 değeri alınabilir. Boyuna donatı alanının kesit alanına oranı ρ olmak üzere dikdörtgen kesitler için κ_a şu şekilde hesaplanabilir.

$$\kappa_a = 1 - A_1 - A_2 - \rho\tag{3.18a}$$

$$A_1 = \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh} \tan \theta\tag{3.18b}$$

$$A_2 = \frac{4r^2 - \pi r^2}{bh}\tag{3.18c}$$

Denklem 18’de θ , A_1 ve A_2 terimleri sırasıyla, kemerlenme açısı, dikdörtgen kesitin kenarlarında ve köşelerinde etkili olarak sargılanamayan kesit alanlarını ifade eder. Kemerlenme açısı, θ , yapılan çalışmada sabit 45 derece olarak alınmıştır. İlki ve diğ. deney verilerinin istatistiksel sonuçları doğrultusunda LP sargılı, düşük dayanımlı betonun en büyük şekildeğiştirme değerinin bulunması için şu ifadeyi önermişlerdir.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + 20 \left(\frac{h}{b} \right) \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.5} \right)\tag{3.19}$$

İlki ve diğ. mevcut modellerin çoğunun 30 MPa civarında deney numuneleri kullanılarak geliştirildiklerine dikkat çekerek, düşük dayanımlı beton için yeterli yakınlıkta sonuçlar veremediklerini belirtmişlerdir. Önerdikleri model kendi deney sonuçlarıyla yakınlık sağlamıştır. Modelin uygulanabilmesi için sargılama oranının, f_l/f_{co} , 0.3 değerinden büyük olması gerektiği vurgulanmaktadır.

3.4. İlki ve diğ. (2008)

İlki ve diğ. (2008) bu çalışmalarında denedikleri 68 numune ve daha önce İlki ve Kumbasar (2002, 2003) ve İlki ve diğ. (2004) tarafından denenilen numunelerden elde

edilen deney sonuçlarından yola çıkarak LP sargılı betonun dayanımı ve karşı gelen şekildeğiştirme değerinin elde edilmesi için bir model önermişlerdir. Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirmesi ile karbon-LP sargılı, düşük dayanımlı betonun davranışı için şu ifadeler önerilmiştir.

$$[f'_{cc}]_{CFRP} = f'_{co} \left[1 + 2.54 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \right] \quad (3.20)$$

$$[\varepsilon_{cc}]_{CFRP} = \varepsilon_{co} \left[1 + \frac{h}{b} \times (LTF) \times 19.27 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.53} \right] \quad (3.21)$$

Sargının uygulayacağı en büyük yanal gerilme, f_l , belirlenirken $\varepsilon_{h,rupt}$ malzeme deneylerinden elde edilen şekildeğiştirme değeri 0.85 katsayısı ile azaltılarak elde edilmiştir. Sargının uygulayacağı en büyük yanal gerilme şu şekilde elde edilir.

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f \varepsilon_{h,rupt} E_{FRP}}{2} \quad (3.22)$$

İlki ve diğ. yükleme şeklinin (monoton artan veya tekrarlı) basınç dayanımı üzerinde fazla etkisi bulunmadığı belirtilirken, tekrarlı yükleme durumunda şekildğiştirmelerin daha büyük değerler aldığını belirtmişlerdir. Yükleme şeklinin sargılı betonun şekildeğiştirme davranışına etkisi önerilen modelde bir yükleme tipi katsayısı (LTF) ile dikkate alınmıştır. LTF, monoton artan yükleme durumu için 1, tekrarlı yükleme durumu için 2 olarak alınır.

Önerdikleri model kendilerine ve diğer araştırmacılara ait toplamda 400 kadar numuneden elde edilen deneysel sonuçlarla yakınlık sağlamıştır.

3.5. ACI 440 (2001)

ACI 440'da LP sargılı betonun basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi için Mander ve diğ. (1988) tarafından sargılı beton için geliştirilen modelden yola çıkarak şu ifadeler önerilmiştir.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} - 1.25 \right] \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_{co})}{E_c} \quad (3.24)$$

3.6. Shao ve diğ. (2006)

Shao ve diğ. (2006) tekrarlı yükleme durumunu için LP sargılı betonun, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için yükselen ve düşen kolun da elde edilebildiği bilinen tek modeli önermişlerdir. Modelde tekrarlı yükleme durumunda oluşacak gerilme-şekildeğiştirme diyagramının zarf eğrisi daha önce Samaan ve diğ. (1998) tarafından sargılı beton için önerilen model kullanılarak elde edilmektedir.

Shao ve diğ. göre, beton dayanımına ulaşmadan önce zarf eğrisi üzerindeki bir noktadan yük boşaltıldığında gerilme-şekildeğiştirme diyagramında oluşacak düşen kol doğrusaldır ve başlangıç noktasına döner. Beton üzerindeki gerilme arttıkça betonda oluşan kalıcı şekildeğiştirme değeri de büyür ve zarf eğrisi üzerindeki herhangi bir noktadan (ε_{un} , f_{un}) yük boşaltıldığında düşen kol eğriseldir. Bu nedenle düşen kolun denklemi sekant modülüne, E_{secu} , göre belirlenmelidir, Şekil 3.6. Sekant modülünün belirlenebilmesi için şu eşitlikleri önermişlerdir;

$$\frac{E_{secu}}{E_c} = \begin{cases} 1.0 & 0 \leq \frac{f_{un}}{f'_{co}} < 1 \\ -0.44 \times \frac{f_{un}}{f'_{co}} + 1.44, & 1 \leq \frac{f_{un}}{f'_{co}} < 2.5 \\ 0.34 & \frac{f_{un}}{f'_{co}} \geq 2.5 \end{cases} \quad (3.25)$$

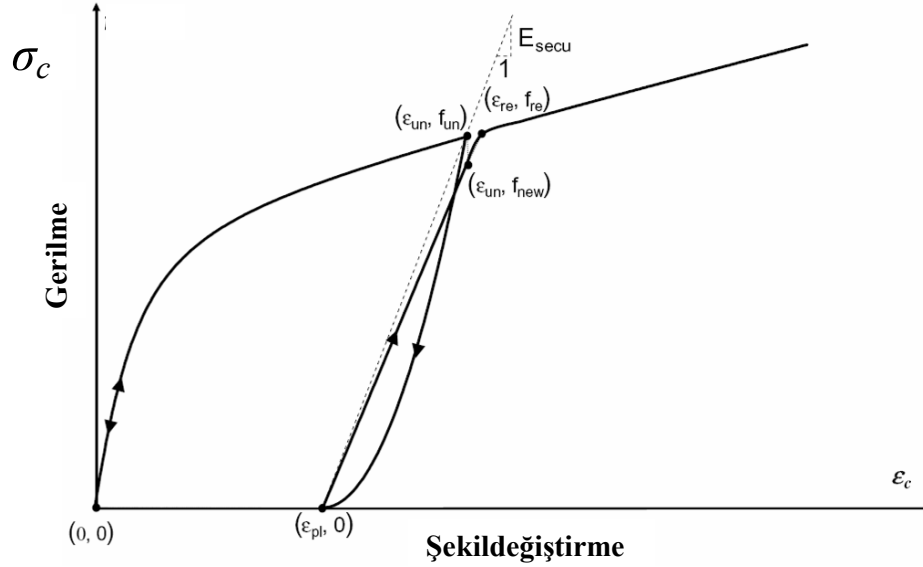
Sekant modülünün belirlenmesiyle her gerilme değerine karşı gelen kalıcı şekildeğiştirme şu şekilde elde edilir.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{un} - \frac{f_{un}}{E_{secu}} \quad (3.26)$$

Shao ve diğ. düşen kolun belirlenmesi için, x normalize edilmiş şekildeğiştirme olmak üzere, şu eşitliği önermişlerdir.

$$f_c = \frac{(1-x)^2}{(1+2x)^2} f_{un} \quad (3.27a)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{un}}{\varepsilon_{pl} - \varepsilon_{un}} \quad (3.27b)$$



Şekil 3.6: Zarf Eğrisi Üzerinden Yük Boşaltma ve Geri Yükleme (Shao 2006)

Shao ve diğ. göre zarf eğrisi üzerindeki, dayanımdan daha büyük bir gerilme değerinde beton üzerindeki gerilme kaldırılıp tekrar yüklendiğinde malzemede oluşacak iç çatlaklar nedeniyle rijitlikte ve dayanımda bir düşüş görülür ve malzeme boşaltma şekildeğiştirme değerine, ε_{un} , boşaltma gerilmesinden, f_{un} , daha küçük bir gerilme değerinde, f_{new} , ulaşır. Kendi deney verilerinden elde ettikleri sonuçlara göre yükteki bu düşüş %10 kadardır.

$$f_{new} = 0.90 \times f_{un} \quad (3.28)$$

Shao ve diğ. zarf eğrisine tekrar yükleme kolunun doğrusal olduğunu belirtirmişlerdir. Kolaylık sağlaması için yükleme kolunun aynı eğimle zarf eğrisini kestiği, $(\varepsilon_{new}, f_{new})$ noktasına kadar devam ettiği kabul edilir, Şekil 3.6.

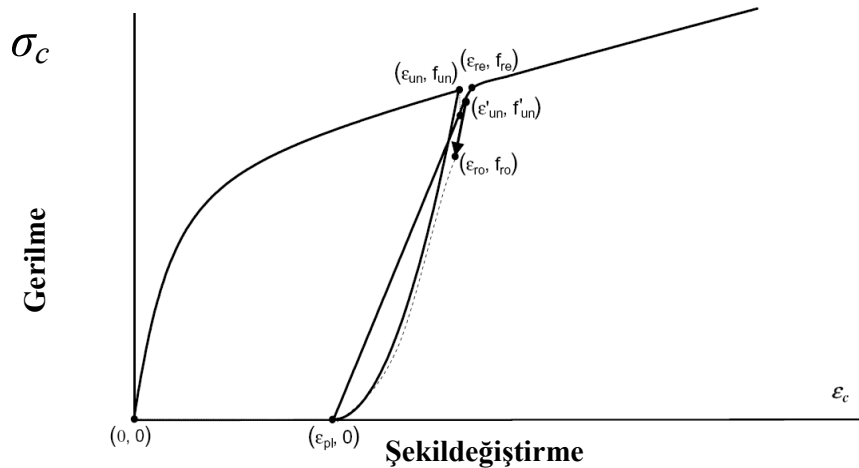
$$\frac{f_{re}}{\varepsilon_{re}} = \frac{f_{new}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}} \quad (3.29)$$

Shao ve diğ. her boşaltma gerilmesine karşılık gelen tek bir kalıcı şekildeğiştirme değeri olduğunu kabul ederek zarf eğrisinden yeni bir düşen yük kolu oluşturulana kadar (ϵ_{un}, f_{un}) , (ϵ_{un}, f_{new}) , $(\epsilon_{pl}, 0)$ noktalarının sabit kaldığını belirtmişlerdir. Lam ve diğ. (2006) herhangi bir gerilme değerinden yapılan yük boşaltma ve geri yükleme çevrimi bir defadan fazla yapıldığı takdirde, yeni çevrimin gerilme-şekildeğiştirme davranışı bir önceki çevrimin davranışıyla çakışmamakta ve sıfır gerilme düzeyine daha büyük kalıcı çekildeğiştirme değerlerinde ulaşılmaktadır. Lam ve diğ. bu sebeple, Shao ve diğ. tarafından yapılan her yük boşaltma gerilmesine karşılık gelen tek bir kalıcı şekildeğiştirme değeri olduğu kabulünün yükleme geçmişinin gerilme-şekildeğiştirme davranışı üzerindeki etkisini belirlemekte yetersiz kaldığını belirtmişlerdir.

Yükün boşaltıldığı f_{un} gerilme değerine karşılık gelen kalıcı şekildeğiştirme, ϵ_{pl} ve sekant modülü, E_{secu} bulunduktan sonra düşen kol üzerindeki herhangi iki gerilme değeri arasında yükün boşaltılmasıyla elde edilecek eğrinin şekli ilk düşen kolun şekline benzer şekilde belirlenebilir, Şekil 3.7. Yükün boşaltıldığı nokta $(\epsilon'_{un}, f'_{un})$ olmak üzere;

$$x = \frac{\epsilon_c - \epsilon'_{un}}{\epsilon_{pl} - \epsilon'_{un}} \quad (3.30a)$$

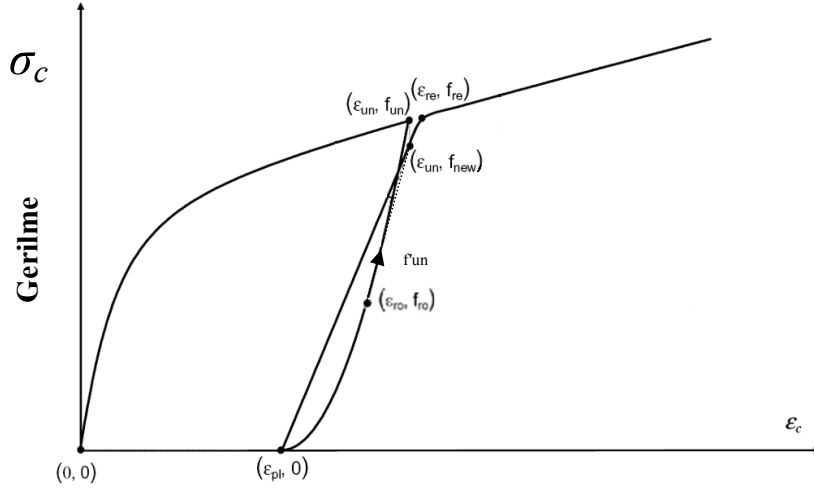
$$f_c = \frac{(1-x)^2}{(1+2x)^2} f'_{un} \quad (3.30b)$$



Şekil 3.7: Herhangi İki Gerilme Değeri Arasında Yük Boşaltma (Shao 2006)

Shao ve diğ. herhangi iki gerilme değeri arasında geri yükleme yapılırken oluşabilecek durumlar için bazı kabuller yapmışlardır.

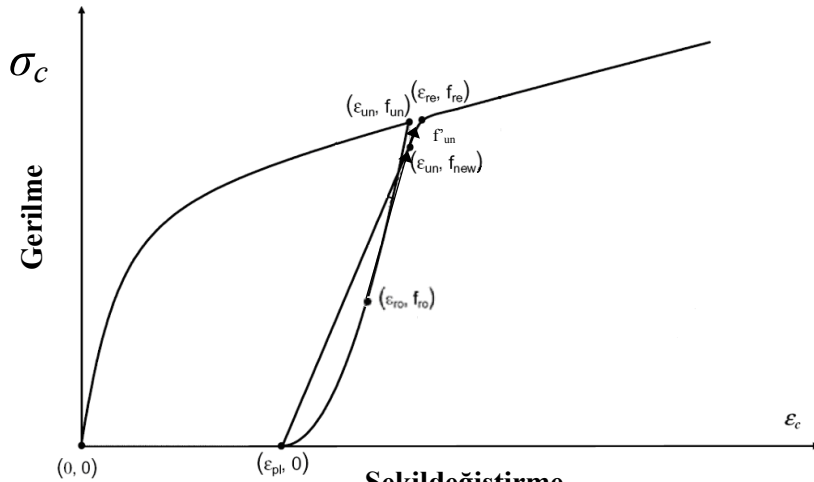
1) Geri yükleme gerilmesi, f_{ro} , ve hedef gerilme, f'_{un} , değerleri f_{new} değerinden küçüklerse, geri yükleme kolu f'_{un} değerine ulaşmaya kadar (ϵ_{un}, f_{new}) noktası doğrultusunda bir doğruyu izler, Şekil 3.8.



Şekildeğiştirme

Şekil 3.8: $f_{ro} < f'_{un} < f_{new}$ Durumunda Geri Yükleme

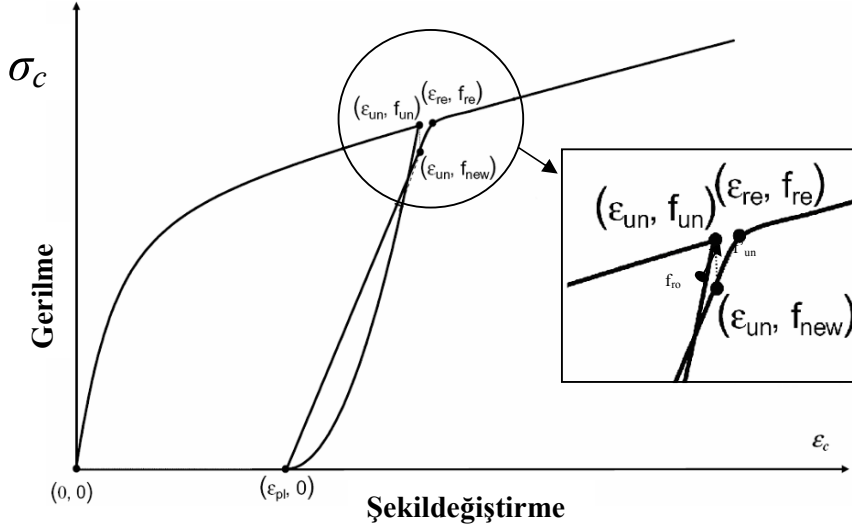
2) Yeni gerilme, f_{new} , değeri, geri yükleme gerilmesi, f_{ro} , değerinden büyük, hedef gerilme, f'_{un} , değerinden küçükse, geri yükleme kolu (ϵ_{un}, f_{new}) noktasına kadar bir doğruyu izler, bu noktadan sonra f'_{un} hedef gerilmesine ulaşmaya kadar $(\epsilon_{pl}, 0)$ noktasından başlayan doğrunun eğimini takip eder, Şekil 3.9.



Şekildeğiştirme

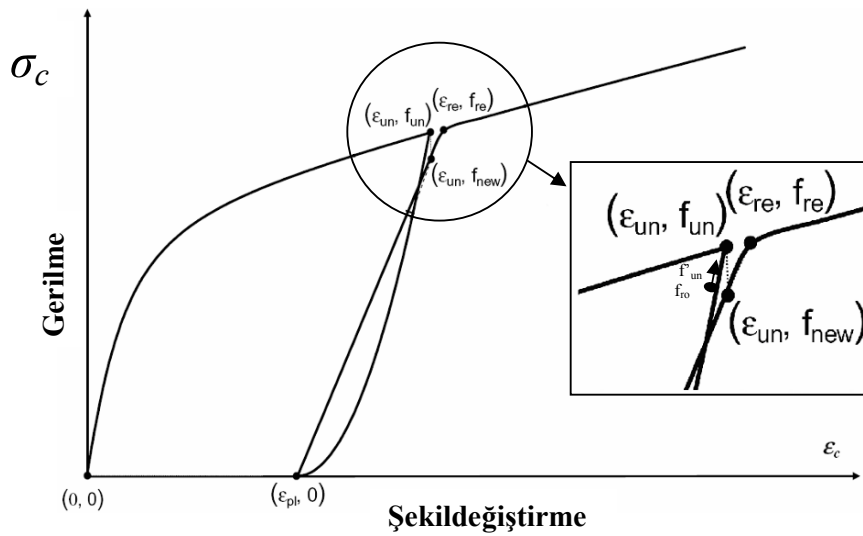
Şekil 3.9: $f_{ro} < f_{new} < f'_{un}$ Durumunda Geri Yükleme

3) Geri yükleme gerilmesi, f_{ro} , ve hedef gerilme, f'_{un} , değerleri f_{new} değerinden büyüklerse, geri yükleme kolu f'_{un} değerine ulaşmaya kadar $(\epsilon_{pl}, 0)$ noktası ile (ϵ_{un}, f_{new}) noktasını birleştiren doğrunun eğimini takip eder, Şekil 3.10. ($f'_{un} \leq f_{re}$)



Şekil 3.10: $f_{new} < f_{ro} < f'_{un}$ Durumunda Geri Yükleme

4) Geri yükleme gerilmesi, f_{ro} , yeni gerilme, f_{new} , değerinden büyük fakat geri yükleme gerilmesine karşılık gelen şekildeğiştirme değeri, ϵ_{ro} , ϵ_{un} değerinden küçükse, geri yükleme kolu, f'_{un} değerine ulaşmaya kadar (ϵ_{un}, f_{un}) noktası doğrultusunda bir doğruyu izler, ($f'_{un} \leq f_{re}$). f_{ro} ve f_{un} değerleri arasındaki fark çok küçük olarak kabul edildiğinden geri yükleme kolu (ϵ_{re}, f_{re}) noktası doğrultusunda yerine (ϵ_{un}, f_{un}) noktası doğrultusunda ilerler.

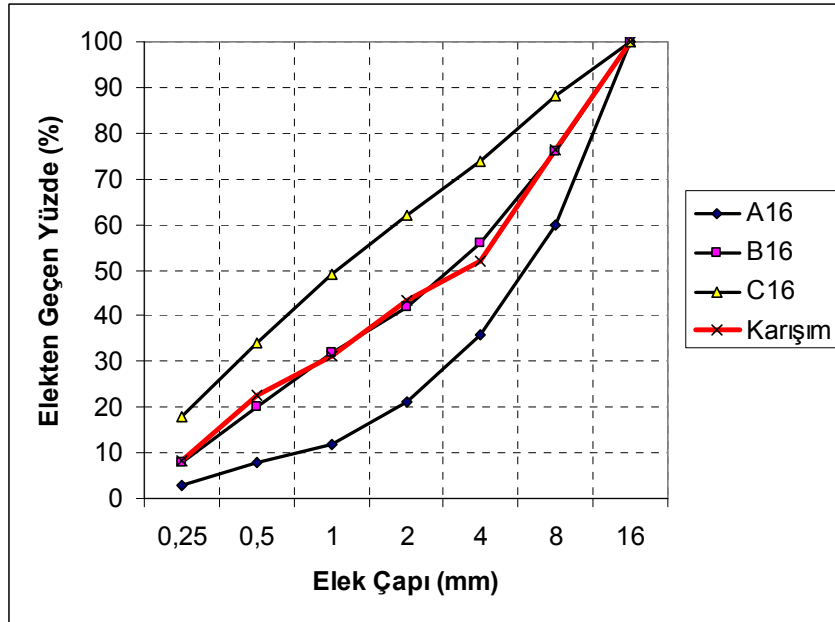


Şekil 3.11: $f_{new} < f_{ro} < f'_{un}$ Durumunda Geri Yükleme ($\epsilon_{ro} < \epsilon_{un}$)

4. DENEY NUMUNELERİ

4.1. Standart Silindirlerin Hazırlanması

Betonun mekanik özellikleri, çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan standart silindir numunelerin aksel basınç altında denenmesi ile elde edilir. Betonun basınç dayanımı, 28 günlük standart silindir numunelerin aksel basınç altındaki dayanımı olarak kabul edilir. Betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışının elde edilmesinde de bu standart silindir numunelerden yararlanılır. Uygulanan yük silindir kesit alanına bölünerek gerilme hesaplanır. Birim kısalma ise silindir üzerinden ölçülen şekildeğiştirmeler silindir yüksekliğine bölünerek hesaplanır. Bu çalışmada gerçekleştirilecek deneylerde de standart silindir numunelerinden yararlanılacaktır. Deneyisel çalışmada kullanılacak numunelerin basınç dayanımları, 30 MPa olarak hedeflenmiştir. Karışımda agrega kırmataş, kırma kum ve kumdan oluşmaktadır. En büyük agrega çapı 15 mm' dir. Hazırlanan beton karışımının granülometri eğrileri aşağıda verilmiştir, Şekil 4.1.



Şekil 4.1: Beton Karışım Granülometri Eğrileri

Numunelerde kullanılan beton, özdeş üç karışımda hazırlanmıştır, Şekil 4.2. Betonlar karışımları hazırlanırken su/çimento oranı 0.75 olarak seçilmiştir. Karışımda kullanılan malzeme miktarları aşağıda verilmiştir, Tablo 4.1.



Şekil 4.2: Beton Karışımında Kullanılan Malzemeler

Tablo 4.1: Beton Karışım Malzeme Miktarları

	1 Numaralı Karışım	2 ve 3 Numaralı Karışımlar
Lafarge Cem I 42.5 R Çimento	10.4 kg	7.8 kg
Su	7.8 kg	5.85 kg
Kırma Taş No1	38.2 kg	28.65 kg
Kırma Kum	26.6 kg	19.95 kg
Kum	11 kg	8.25 kg
Silindir Adedi	7	6 + 5

Karışım hazırlanırken kırmataş, kırma kum ve kum önce iki dakika kuru olarak karıştırılmış, su eklendikten sonra üç dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan beton karışımı daha önceden hazırlanan yağlanmış silindir kalıplarına döküldükten sonra, sarsma tablası üzerinde bir süre bekletilerek betonun kalıp içerisine boşluksuz bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır, Şekil 4.3.



Şekil 4.3: Beton Karışımının Hazırlanması

Üç karışımda toplam on sekiz adet standart silindir hazırlanmıştır, Şekil 4.4. Hazırlanan numuneler bir gün sonra kalıplardan çıkartıldı. Beton karışımının hazırlandığı gün hava sıcaklığı 13 dereceydi. Numunelere yedi gün süreyle kür uygulandı. Bu yedi günlük sürede hava sıcaklığı 12-15 derece arasında değişti.

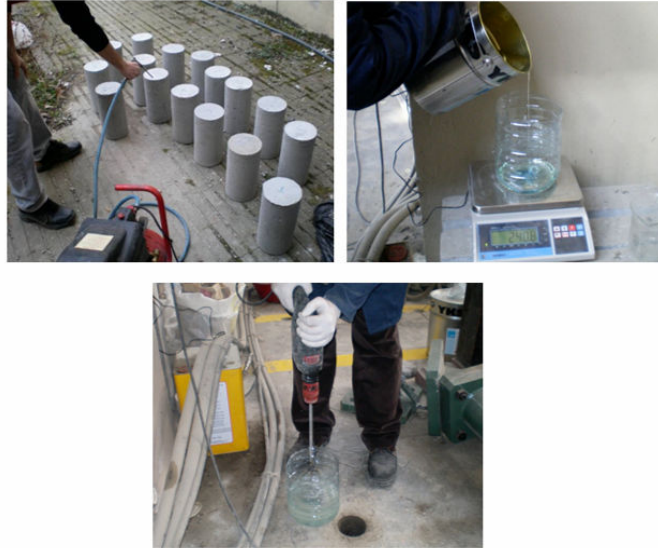


Şekil 4.4: Hazırlanan Standart Silindirler

4.2. Numunelerin Güçlendirilmesi

4.2.1. Primer Mazlemesinin Uygulanması

Silindir numuneler kalıplardan çıkarıldıktan otuz yedi gün sonra yüzeyleri temizlendi ve primer malzemesiyle kaplandı, Şekil 4.5.



Şekil 4.5: Numunelerin Temizlenmesi ve Primer Malzemesinin Hazırlanması

Primer, beton yüzeyindeki boşlukları doldurmak, pürüzsüz bir yüzey oluşturmak ve aderansı arttırmak amacıyla kullanılan bir astar malzemesidir. Reçine ve sertleştirici

olmak üzere iki bileşenden oluşur. Beton yüzeyine 0.2 kg/m^2 gelecek şekilde rulo ile sürülerek uygulanır, Şekil 4.6. Primer uygulandıktan sonra en erken 20 saat, en geç iki gün içerisinde LP kumaş beton yüzeyine yapıştırılmalıdır.



Şekil 4.6: Numunelerin Primer Malzemesi ile Kaplanması

4.2.2. Lifli Polimer (LP) Uygulaması

Numune yüzeyleri primer malzemesiyle kaplandıktan bir gün sonra tek yönlü, karbon lifli polimer (LP) kumaş ile kaplanmıştır, Tablo 4.2.

Tablo 4.2: Lifli Polimer Malzemesinin Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	MBRACE FIBER C1-23
Elastisite Modülü (N/mm^2)	240000
Çekme Dayanımı (N/mm^2)	3800
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0.117
Toplam Ağırlık (kg/m^2)	230
Kopmada Uzama (%)	1.55
Genişlik (mm)	300/600

Numunelere uygulanacak eksenel yükün lifli polimer şeridine etkimemesi amacıyla, şeritler silindirlerin alt ve üst kısımlarından birer santim mesafe kalacak şekilde, 28 santim genişliğinde kesilerek numune yüzeyine uygulandı. Lifli polimerin numune yüzeyine yapıştırılırken iki bileşenli, epoksi esaslı özel bir yapıştırıcı olan saturant malzemesinden yararlanıldı. Uygulama miktarı 1.8 kg/m^2 olmak üzere saturant, astarlı yüzeye yaklaşık 1 mm kalınlık elde edilecek şekilde rulo ile sürüldü. Daha sonra her lifli polimer katının arasında $700\text{-}800 \text{ gr/m}^2$ saturant kullanıldı. Lifli polimer şeritler, beton yüzeyiyle arasında boşluk kalmayacak şekilde gerdirilerek

numune yüzeyine sarıldı. Numune lifli polimer ile sargılandıktan sonra, dış yüzey yeterli miktarda saturant ile kaplandı, Şekil 4.7.



Şekil 4.7: Numunelerin Lifli Polimer ile Sargılanması

Toplamda on altı adet numune, ikişer kat lifli polimer şerit ile sargılanmıştır. Her numunede bindirme boyu 15 cm olarak bırakılmıştır. LP şeridinin toplam uzunluğu 110 cm' dir. İki adet numune, referans numune olarak kullanılmak üzere sargılanmadan bırakılmıştır. Numunelerin güçlendirilmesinde kullanılan malzemeler BASF firması tarafından temin edilmiştir.

5. ÖLÇÜM SİSTEMİ

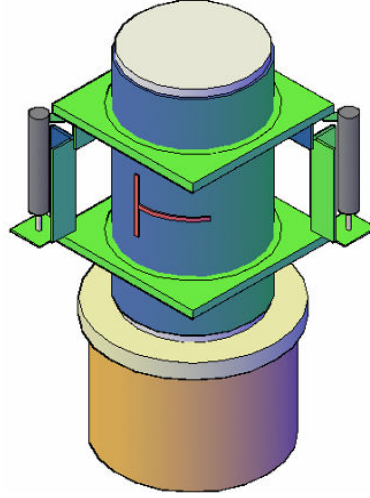
Hazırlanan numuneler üzerindeki deneyler İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan Instron basınç cihazıyla yapılmıştır. Satec 1000RD, yük veya yerdeğiştirme kontrollü olarak, kapalı çevrim yükleme yapabilen 500 ton kapasiteli bir cihazdır, Şekil 5.1. Deneylerde cihazın izleyeceği yükleme adımları ve hızı Instron tarafından sağlanan Bluehill 2 yazılımı ile hazırlandı. Deney numunelerinin başlıklarının ezilmesi veya deney aleti ile numune arasındaki boşluklar sebebiyle cihazın kendi ölçümleri, gerçek değerler ile aralarında oluşabilecek farklar düşünülerek sadece dışarıdan alınan ölçümlerin kontrolü amacıyla değerlendirildi. Deney sonuçlarında dikkate alınan değerler numune üzerinden alınan ölçümlerdir.



Şekil 5.1: 500 Ton Kapasiteli Instron Deney Cihazı

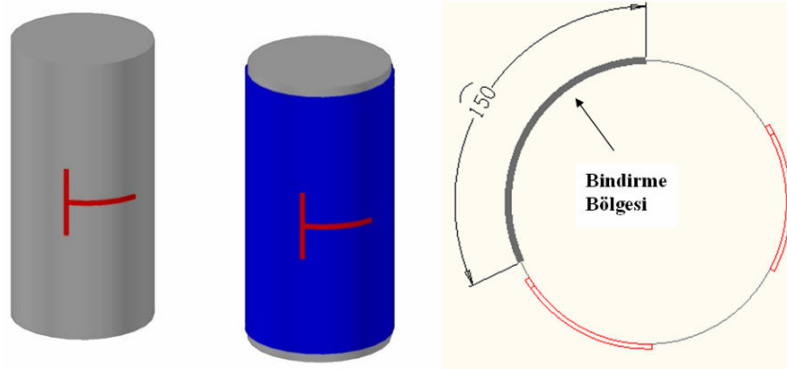
Deneylerde, numune üzerinde yatay ve düşey doğrultularda oluşan şekildeğiştirmeler ve bu değerlere karşılık gelen yük değerleri ölçüldü. Şekildeğiştirme ölçümleri numuneler üzerine 180 derece arayla, düşey ve yatay doğrultularda yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerler ve 150 mm ölçüm boyundan ölçüm alan, numune üzerine tutturulan ölçüm çerçevesine bağlanmış CDP-25 yerdeğiştirmeölçerler ile yapıldı, Şekil 5.2. Yük değerleri numunenin altına yerleştirilen 100 ton kapasiteli CLL-NA yükölçer aracılığıyla ölçüldü. Şekildeğiştirmeölçerlerin ölçüm boyu 60 mm' dir.

Şekildeğiştirmeölçerler, yerdeğiştirmeölçerler ve yükölçerin ölçümleri TDS-303 elektronik veri toplama aleti ile toplandı ve kaydedildi. Deney aletinin ölçümleri sisteme bağlı olan bilgisayar ile dış ölçümler ile karşılaştırma yapabilmek için kaydedilmiştir. Deney verilerinin işlenmesinde yükleme sisteminden alınan değerler kullanılmamıştır.



Şekil 5.2: Numune Üzerine Yerleştirilen Ölçüm Aletleri

Şekildeğiştirmeölçerlerin sağlıklı ölçümler alabilmeleri için düz bir yüzeye yapıştırılmaları gerekmektedir. Bu sebeple şekildeğiştirilme ölçerlerin yapıştırılacakları bölgelerde önceden epoksi esaslı bir yapıştırıcı kullanılarak numune üzerinde düz bir yüzey oluşturulmuştur. Şekildeğiştirmeölçerler deney numuneleri üzerine, numunenin tam ortasına gelecek şekilde yatay ve düşey doğrultularda, toplamda dört adet olmak üzere yapıştırılmışlardır, Şekil 5.3.



Şekil 5.3: Deney Numuneleri Üzerinde Şekildeğiştirmeölçerlerin Yerleşimi

İki numune dışındaki numunelerde lifli polimer sargısının bindirme bölgesinde şekildeğiştirmeölçer yoktur. Numunenin farklı bölgelerindeki şekildeğiştirmeleri de inceleyebilmek üzere iki numunenin bindirme bölgesinde, iki numunenin yüksekliklerinin dörtte birinde yatayda ve düşeyde ek şekildeğiştirmeölçerler yerleştirilmiştir.

Yüksek hızda yükleme yapılan deneylerde sağlıklı ölçüm alabilmek için ölçüm aletleri elektronik veri toplama aletine tepki hızlarına göre sıralanarak bağlanmıştır, Tablo 5.1.

Tablo 5.1: Ölçüm Aletlerinin Özellikleri

Ölçüm Aleti	Tepki Hızı	Ölçüm Boyu/Kapasitesi
PL-60-11-1L	20 Hz	60 mm
CDP-25	8 Hz	25 mm
CLL-1MNA	-	100 ton

Dörtten fazla sayıda şekildeğiştirmeölçerden ölçüm alınan ikinci grup deneylerde veri toplama cihazının kanal sayısı yetersiz kaldığı için bir çoğaltma kutusundan yararlanılmıştır, Şekil 5.4.



Şekil 5.4: Deney Ortamı Genel Görünüş

Numuneler ile deney aleti arasındaki sürtünme kuvvetini azaltmak amacıyla numunenin iki yüzüne de teflon plaka yerleştirilmiştir. Deneylere başlanmadan her numuneye 50 kN ön yük verilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Giriş

Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar her seri için ayrı olarak sunulmuştur. Özdeş numuneler aynı başlık altında incelenmiş, deney sonuçlarından elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, Poisson oranının değişimi ve gerilme-hacimsel şekildeğiştirme ilişkileri verilmiştir. Numunelerin E_c değerleri f'_{co} değerinin %5'i ile %45'i arasında kalan bölümün, E_2 değeri ise f'_{co} değerinin %140'ı ile f'_{cc} değerinin arasında kalan bölümün eğimi olarak belirlenmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerini gösteren grafiklerde enine şekildeğiştirmeler negatif, boyuna şekildeğiştirmeler pozitif ekseninde gösterilmiştir. Karbon LP ile sargılanmış numunelerin referans numunelerle gerilme-şekildeğiştirme davranışları açısından karşılaştırılması numunelerin orta bölgelerine yerleştirilen şekildeğiştirmeölçerlerden alınan verilere göre yapılmıştır. Daha sonra farklı boylardan alınan ölçümler her numune grubu için ayrı bir grafikte verilmiştir. Grafiklerde düşey eksen σ/f'_{co} oranını, yatay eksen mikro şekildeğiştirmeyi göstermektedir. Poisson oranının değişimini gösteren grafiklerde düşey eksen Poisson oranını, yatay eksen boyuna şekildeğiştirmeyi göstermektedir. Poisson oranı ve hacimsel şekildeğiştirme 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlerle belirlenmiştir. Poisson oranı ve hacimsel şekildeğiştirme sırasıyla aşağıdaki ifadelerden elde edilmişlerdir.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{ch}}{\varepsilon_c} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_v = 2 \times \varepsilon_{ch} + \varepsilon_c \quad (6.2)$$

Hazırlanan 18 adet standart silindir numunesinden ikisi referans numune olarak ayrılmış, onikisi dört farklı yükleme hızı altında denenmiş, kalan dört numuneden ise 50 saat sabit yük altında bırakıldıktan sonra denenmişlerdir. Deneylerde etkisi incelenen yükleme hızları yükleme cihazının yapabileceği en hızlı yükleme, ölçüm aletlerden en hızlı şekilde, sağlıklı veri alınabilecek süre ve literatürdeki çalışmalarda

genel olarak kullanılan yükleme hızları incelenerek kararlaştırılmıştır. Bu tip deneyler için literatürdeki çalışmaların genelinde kullanılan hıza göre, orta düzey yükleme hızı için 0.6 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Uygulanan yükleme hızları numunenin yapacağı şekildeğiştirmeye bağlı olarak 0.04 şekildeğiştirme/dakika ve 0.0002 şekildeğiştirme/dakika arasında değişmektedir. Sabit yük altında bırakılan numunelerde ise $0.90 f'_{co}$, $0.65 f'_{cc}$, $0.75 f'_{cc}$ ve $0.85 f'_{cc}$ olmak üzere dört farklı gerilme düzeyi incelenmiştir, Tablo 6.1. Elli saat sabit gerilme altında bırakılan numuneler daha sonra L2 yükleme hızıyla denenmişlerdir.

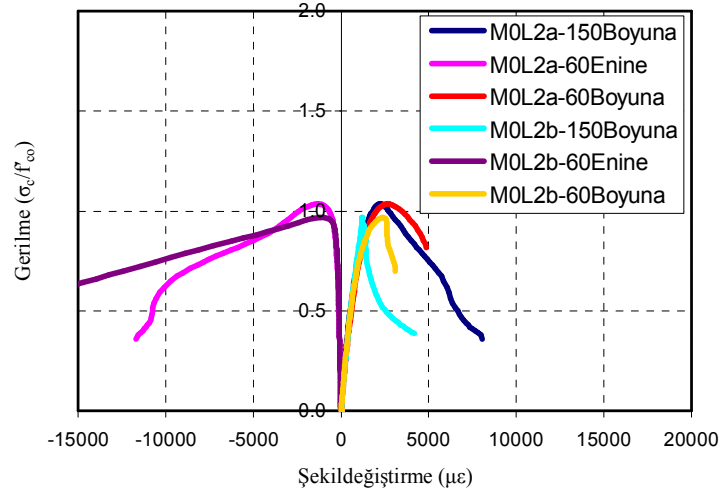
Numuneler, uygulanan yükleme şekilleri ve sargılanma şekillerine göre isimlendirilmişlerdir. İsimlendirme sırasıyla yükleme şeklini (monoton artan için M ve sürekli yükleme için S), lifli polimer katı sayısı (0 veya 2) ve yükleme seviyesini (Lx veya SRx) belirtir, numunenin ait olduğu serideki kaçınıcı deney olduğunu belirtmek için a,b,c gösterimi kullanılmıştır. Örneğin M2L2a, monoton artan gerilme altında denenen , iki kat karbon lifli polimer şeritle sargılanmış, ikinci seviye yükleme hızı uygulanmış numunelerin birincisini ifade etmektedir.

Tablo 6.1: Deney Numunelerine Ait Özet Bilgiler

Numune İsmi	Deney Tarihi	ŞekilDeğ. Hızı/Seviyesi (mm/mm/dak)	Yükleme Hızı (mm/dakika)	LP Kat sayısı
M0L2a	04.06.2008	0.002	0.6	-
M0L2b	04.06.2008	0.002	0.6	-
M2L0a	10.06.2008	0.04	12	2
M2L0b	10.06.2008	0.04	12	2
M2L0c	12.06.2008	0.04	12	2
M2L1a	04.06.2008	0.02	6	2
M2L1b	06.06.2008	0.02	6	2
M2L1c	10.06.2008	0.02	6	2
M2L2a	04.06.2008	0.002	0.6	2
M2L2b	06.06.2008	0.002	0.6	2
M2L2c	12.06.2008	0.002	0.6	2
M2L3a	05.06.2008	0.0002	0.06	2
M2L3b	06.06.2008	0.0002	0.06	2
M2L3c	10.06.2008	0.0002	0.06	2
S2SR1	18-20.06.2008	$0.90 f'_{co}$ ($0.52 f'_{cc}$)		2
S2SR2	07-09.07.2008	$0.65 f'_{cc}$ ($1.12 f'_{co}$)		2
S2SR3	29-31.07.2008	$0.75 f'_{cc}$ ($1.29 f'_{co}$)		2
S2SR4	30-02.07.2008	$0.85 f'_{cc}$ ($1.46 f'_{co}$)		2

6.2. M0L2a ve M0L2b

Bu iki numune çalışmada denenen tüm numuneler için referans teşkil etmektedir. Sargılanmadan bırakılan bu iki numune 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme ile denemişlerdir. Numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, Şekil 6.1, deney sonrası bilgileri, Tablo 6.2, ve görünüşleri aşağıda verilmiştir, Şekil 6.2.



Şekil 6.1: M0L2a ve M0L2b Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

ϵ_{co} ve ϵ_{ch} sırasıyla dayanıma karşılık gelen boyuna ve enine şekildeğiştirme değerleridir. Bu değerler şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilmiştir.

Tablo 6.2: M0L2a ve M0L2b Deney Bilgileri

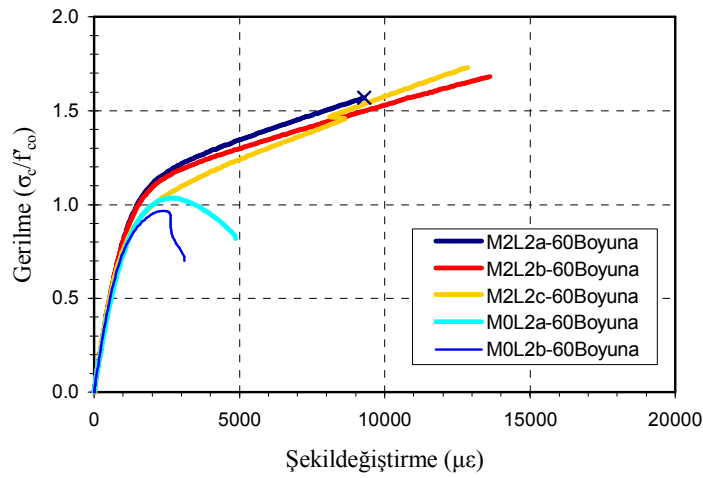
Numune Adı	Beton Yaşı	f'_{co} (MPa)	E_{co} (MPa)	ϵ_{co} (mm/mm)	ϵ_{ch} (mm/mm)
M0L2a	132	32.29	26992	0.0022	0.0013
M0L2b	132	30.13	31006	0.0024	0.0010
Ortalama	132	31.22	29000	0.0023	0.0011



Şekil 6.2: M0L2a ve M0L2b Numunelerinin Deney Sonrası Görünümleri

6.3. M2L2a, M2L2b ve M2L2c

L2 serisi numuneler 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmişlerdir. Bu yükleme hızı genelde bu tip deneylerde kullanılan statik yükleme hızıdır. Bu nedenle diğer numunelerle karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla ilk olarak bu serideki numunelerin davranışları incelenmiştir. Numunelerin 60 mm ölçüm boyundan alınan şekildeğiştirme değerleri Şekil 6.3’de referans numuneleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.3: L2 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

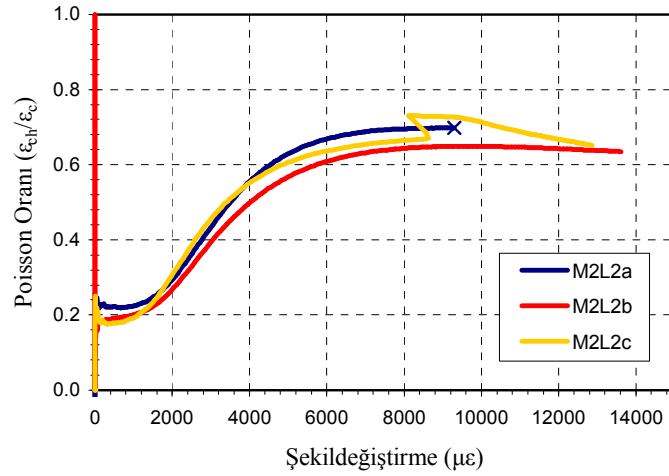
Numunelere ait deney sonuçları, Tablo 6.3’de verilmiştir. Parantez içindeki değerler 150 mm, diğer değerler 60 mm ölçüm boyundan alınmıştır.

Tablo 6.3: M2L2a, M2L2b ve M2L2c Deney Bilgileri

Numune Adı	Beton Yaşı (Gün)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (mm/mm)	ϵ_{ch} (mm/mm)	E_c (MPa)	E_2 (MPa)
M2L2a	132	54.3	- (0.0134)	-	29565 (28788)	1596 (1424)
M2L2b	134	52.5	0.0136 (0.0127)	0.0086	29306 (28567)	1367 (1394)
M2L2c	140	54.0	0.0128 (0.0134)	0.0083	29932 (32917)	1887 (1488)
Ortalama	135	53.6	0.0133 (0.0132)	0.0084	29601 (30424)	1617 (1435)
Standart Sapma		0.96	0.0005 (0.0004)	0.0002	314.54 (2450.19)	260.61 (48.01)

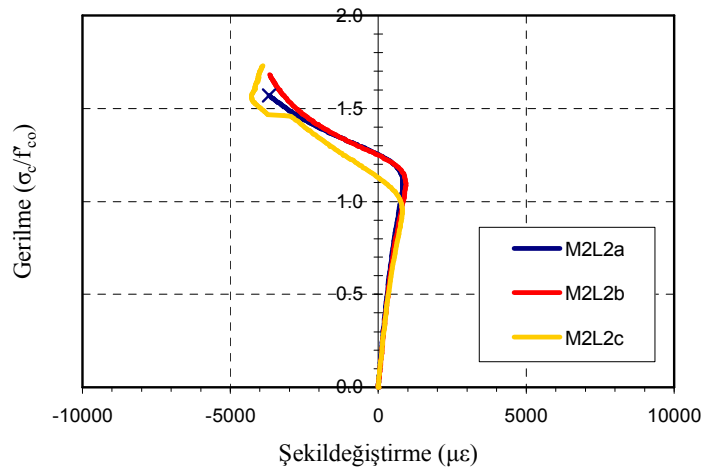
M2L2b ve M2L2c numunelerinde şekildeğiştirmeölçerlerden deneyin sonuna kadar veri alınabildiği halde, M2L2a numunesinin üzerindeki şekildeğiştirmeölçerler, deney bitiminden önce devre dışı kalmışlardır. Bu numuneden alınan şekildeğiştirme değerleri ortalamaya dahil edilmemiştir. Bu numuneye ait diyagramlarda işaretli nokta, şekildeğiştirmeölçerlerin devre dışı kaldığı yeri belirtmektedir.

Poisson oranının yükleme süresince değişimi herhangi bir gerilme değerinde, numune üzerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden alınan enine doğrultudaki ölçümlerin boyuna doğrultudakilere oranı olarak hesaplanmıştır, Şekil 6.4.



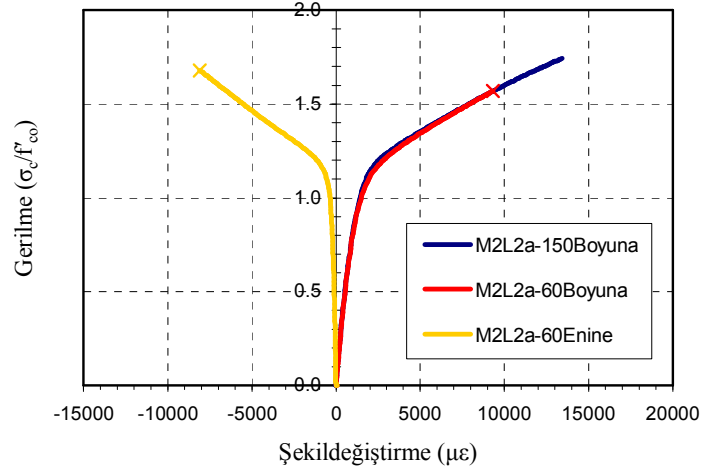
Şekil 6.4: L2 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi

Hacimsel şekildeğiştirmeler numunelerin yanal ve düşey şekildeğiştirmelerinin toplamı ile elde edilmiştir, Şekil 6.5.

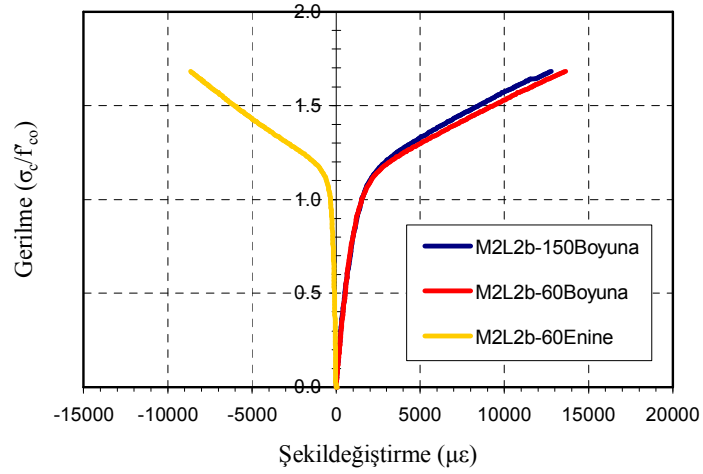


Şekil 6.5: L2 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler

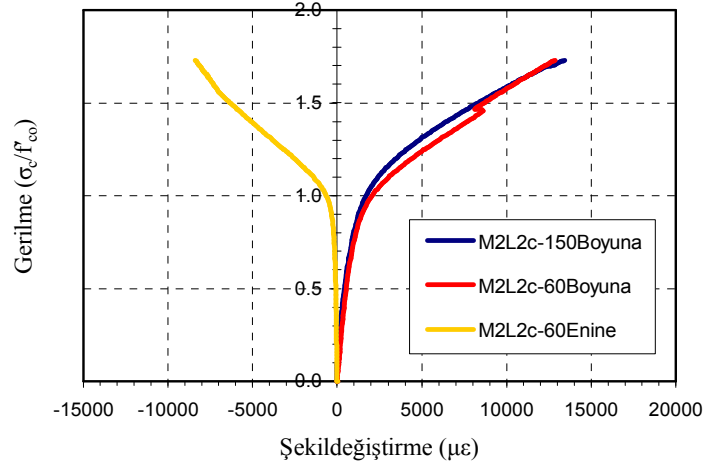
Numunelerde 60 mm ve 150 mm ölçüm boyundan alınan veriler birbirlerine yakın değerler almaktadır; bu da yükleme ve ölçüm sisteminin deney süresince sağlıklı çalıştığını göstermektedir, Şekil 6.6.



(a) M2L2a



(b) M2L2b



(c) M2L2c

Şekil 6.6: L2 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri

L2 serisi numunelerin tümünde herhangi bir lif kopma sesi duyulmadan, göçme ani gerçekleşmiştir, Tablo 6.4. Tüm numunelerin üst kısmında, LP tabakasında numune çevresi boyunca ayrılma gözlenmiştir. Oluşan düşey yırtıklar tam düşey doğrultudadır. Numunelerin deney sonrası görünüşleri Şekil 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.4: L2 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri

Numune Adı	Düşey Yırtık	Yatay yırtık
M2L2a	Numune üstünden 195 mm	Numune üst kısmında 170 mm Numune alt kısmında 360 mm
M2L2b	Numune üstünden 210 mm	Numune üst kısmında 210 mm Numune alt kısmında 350 mm
M2L2c	Numune üstünden 150 mm	Numune üst kısmında 200 mm Numune alt kısmında 325 mm



(a) M2L2a



(b) M2L2b

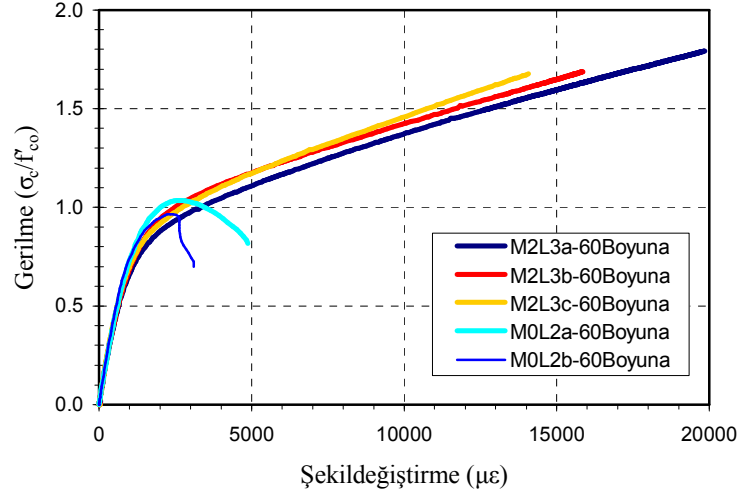


(b) M2L2c

Şekil 6.7: L2 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

6.4. M2L3a, M2L3b ve M2L3c

L3 serisi numuneler 0.0002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmişlerdir. Bu numunelerde referans numunelerine göre dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinde artış gözlenmiştir. Numunelerin 60 mm ölçüm boyundan alınan şekildeğiştirme değerleri Şekil 6.8’de referans numunelerinki ile karşılaştırılmıştır.



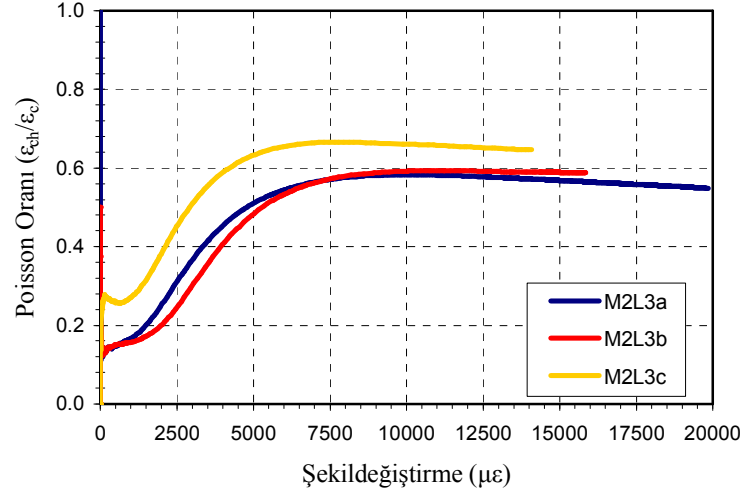
Şekil 6.8: L3 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

M2L3b ve M2L3c numuneleri birbirleriyle yakın davranış gösterirken, M2L3a numunesinde bu numunelere göre daha büyük dayanım elde edilmiştir. Numunelere ait deney sonuçları, Tablo 6.5’de verilmiştir. Parantez içindeki değerler 150 mm ölçüm boyundan diğer değerler 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlerdir.

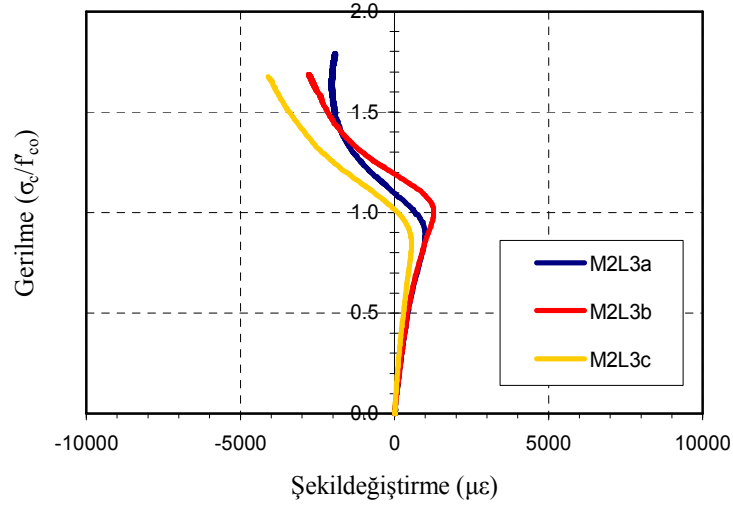
Tablo 6.5: M2L3a, M2L3b ve M2L3c Deney Bilgileri

Numune Adı	Beton Yaşı (Gün)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (mm/mm)	ϵ_{ch} (mm/mm)	E_c (MPa)	E_2 (MPa)
M2L3a	133	55.9	0.0198 (0.0198)	0.0109	25261 (23590)	1292 (1257)
M2L3b	134	52.6	0.0158 (0.0144)	0.0090	25922 (25203)	1397 (1509)
M2L3c	138	52.3	0.0140 (0.0146)	0.0090	27147 (26312)	1673 (1423)
Ortalama	135	53.6	0.0165 (0.0160)	0.0096	26110 (25035)	1454 (1397)
Standart Sapma		1.99	0.0029 (0.0030)	0.0010	956.95 (1368.75)	196.79 (128.09)

Numune üzerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden alınan ölçümlerle hesaplanan Poisson oranının yükleme süresince değişimi Şekil 6.9’da ve numunelerin yaptıkları hacimsel şekildeğiştirmeler Şekil 6.10’da verilmiştir.

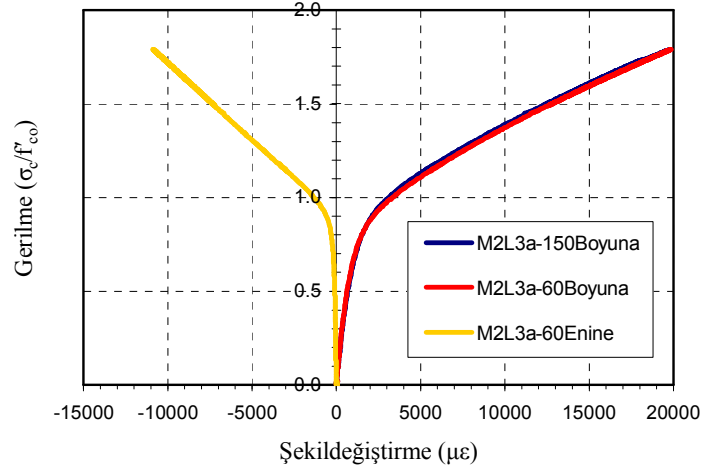


Şekil 6.9: L3 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi

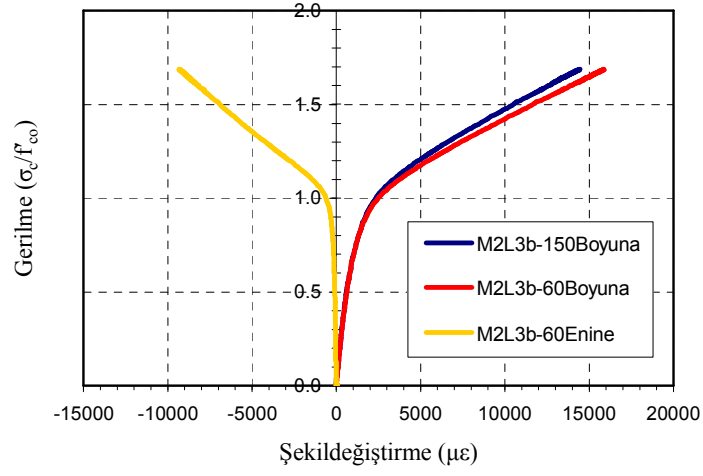


Şekil 6.10: L3 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler

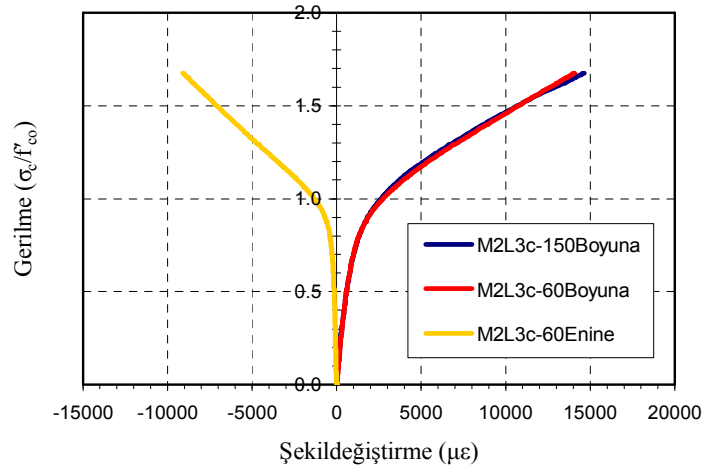
Numunelerde 60 mm ve 150 mm ölçüm boyundan alınan ölçümler birbirleriyle uyum sağlamaktadır, Şekil 6.11. M2L3a numunesinde bu serideki diğer numunelere göre daha büyük enine ve boyuna şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir.



(a) M2L3a



(b) M2L3b



(c) M2L3c

Şekil 6.11: L3 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri

L3 serisi numunelerin tümünde herhangi bir lif kopma sesi duyulmadan, göçme ani gerçekleşmiştir, Tablo 6.6. Tüm numunelerde üst kısımdaki LP tabakası açılmıştır. L2 serisi numunelere göre L3 serisi numunelerin LP sargılarındaki yırtıkların daha yayılı olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin deney sonrası görünüşleri Şekil 6.12’de verilmiştir.

Tablo 6.6: L3 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri

Numune Adı	Düşey Yırtık	Yatay yırtık
M2L3a	Numune Üstünden 250 mm	Numune üst kısmında 200 mm Numune ortasında 160 mm Numune alt kısmında 370 mm
M2L3b	Numune Üstünden 180 mm	Numune üst kısmında 180 mm Numune alt kısmında 430 mm
M2L3c	Numune Üstünden 220 mm	Numune üst kısmında 400 mm Numune alt kısmında 300 mm



(a) M2L3a



(b) M2L3b

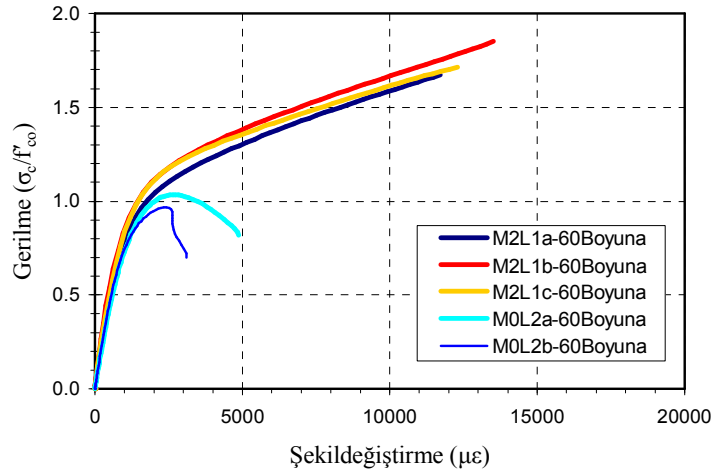


(b) M2L3c

Şekil 6.12: L3 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünüşleri

6.5. M2L1a, M2L1b ve M2L1c

L1 serisi numuneler 0.02 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmişlerdir. Bu numunelerde referans numunelerine göre dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinde artış gözlenmiştir. Numunelerin 60 mm ölçüm boyundan alınan şekildeğiştirme değerleri Şekil 6.13’de referans numunelerinki ile karşılaştırılmıştır.



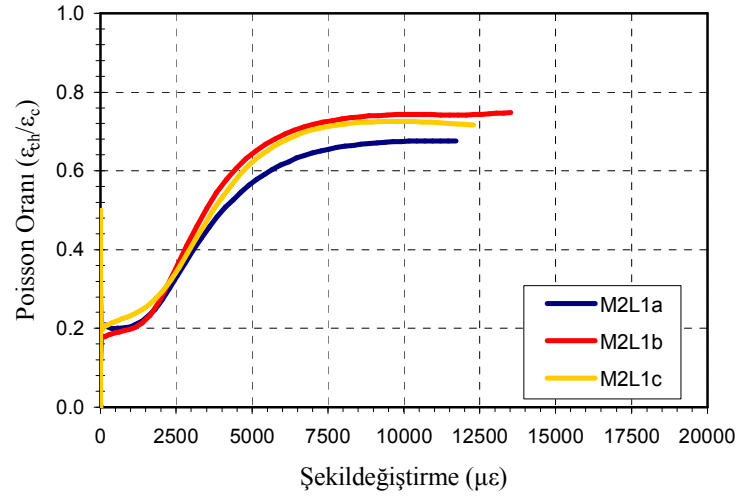
Şekil 6.13: L1 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

M2L1a ve M2L1c numuneleri birbirleriyle yakın davranış gösterirken, M2L1b numunesinde bu numunelere göre davranış olarak farklılıklar gözlemlenmiştir. Numunelere ait deney sonuçları, Tablo 6.7’de verilmiştir. Parantez içindeki değerler 150 mm ölçüm boyundan diğer değerler 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlerdir.

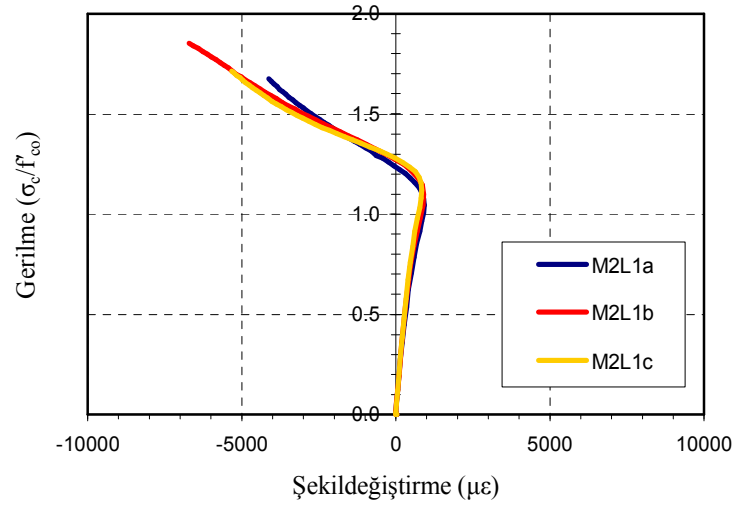
Tablo 6.7: M2L1a, M2L1b ve M2L1c Deney Bilgileri

Numune Adı	Beton Yaşı (Gün)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (mm/mm)	ϵ_{ch} (mm/mm)	E_c (MPa)	E_2 (MPa)
M2L1a	132	52.2	0.0117 (0.0098)	0.0079	29313 (30828)	1637 (1686)
M2L1b	134	57.7	0.0135 (0.0125)	0.0101	34480 (34505)	1664 (1647)
M2L1c	138	53.5	0.0123 (0.0113)	0.0088	30744 (34800)	1507 (1510)
Ortalama	135	54.5	0.0125 (0.0112)	0.0089	31512 (33378)	1603 (1614)
Standart Sapma		2.87	0.0009 (0.0013)	0.0011	2667.81 (2212.99)	83.94 (92.43)

Numune üzerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden alınan ölçümlerle hesaplanan Poisson oranının yükleme süresince değişimi Şekil 6.14’da ve numunelerin yaptıkları hacimsel şekildeğiştirmeler Şekil 6.15’de verilmiştir.

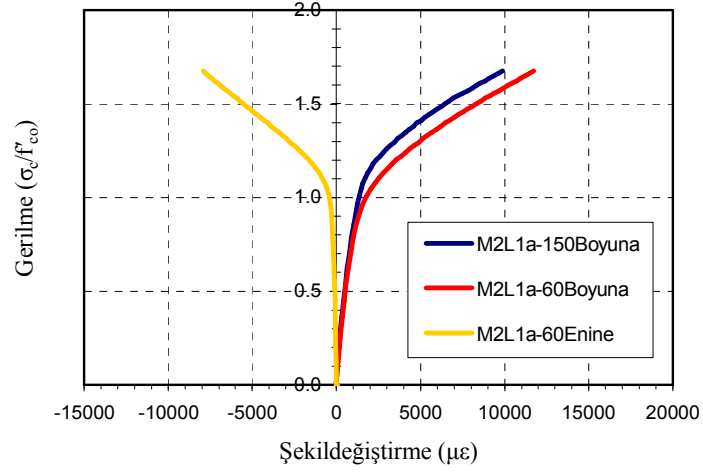


Şekil 6.14: L1 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi

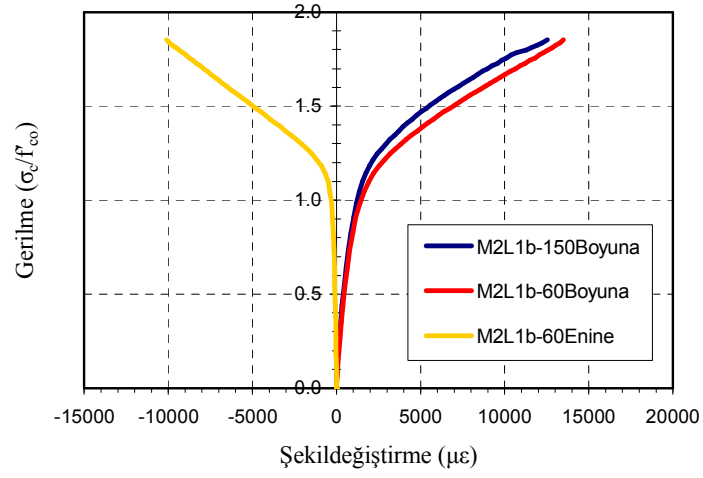


Şekil 6.15: L1 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler

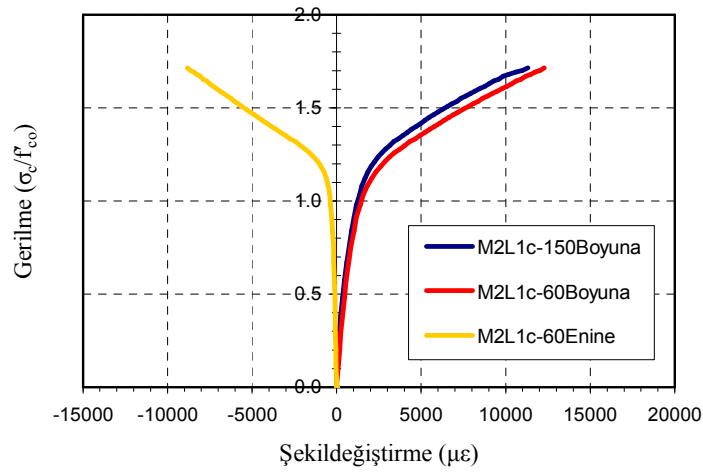
Numunelerde 60 mm ve 150 mm ölçüm boyundan alınan ölçümler arasında veri alma hızından doğabilecek farklılıklar bulunmaktadır, Şekil 6.16. M2L1b numunesinde diğer numunelere göre daha büyük dayanım elde edilmiştir.



(a) M2L1a



(b) M2L1b



(c) M2L1c

Şekil 6.16: L1 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri

L1 serisi numunelerin tümünde herhangi bir lif kopma sesi duyulmadan, göçme ani gerçekleşmiştir, Tablo 6.8. Tüm numunelerin üst kısmındaki LP tabakasında bir ayrılma gözlenmiştir. L2 serisi numunelere göre L1 serisi numunelerin LP sargılarındaki düşey yırtıkların daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin deney sonrası görüntüleri Şekil 6.17’de verilmiştir.

Tablo 6.8: L1 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri

Numune Adı	Düşey Yırtık	Yatay yırtık
M2L1a	Numune üstünden 210 mm	Üst kısımda 100 mm’lik 2 parça Numune alt kısmında 380 mm
M2L1b	Numune üstünden 180 mm	Numune üst kısmında 340 mm Orta bölümde 80 mm’lik 3 yırtık Alt kısımda tüm çevre boyunca
M2L1c	Numune üstünden 190 mm	Numune üst kısmında 250 mm Orta bölümde 110 mm Alt kısımda tüm çevre boyunca



(a) M2L1a



(b) M2L1b

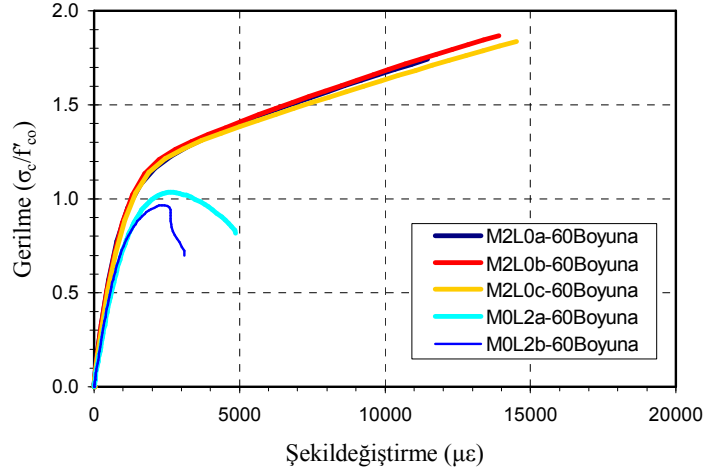


(b) M2L1c

Şekil 6.17: L1 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünümleri

6.6. M2L0a, M2L0b ve M2L0c

L0 serisi numuneler 0.04 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmişlerdir. Bu numunelerde referans numunelerine göre dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinde artış gözlenmiştir. Numunelerin 60 mm ölçüm boyundan alınan şekildeğiştirme değerleri Şekil 6.18’de referans numunelerinki ile karşılaştırılmıştır.



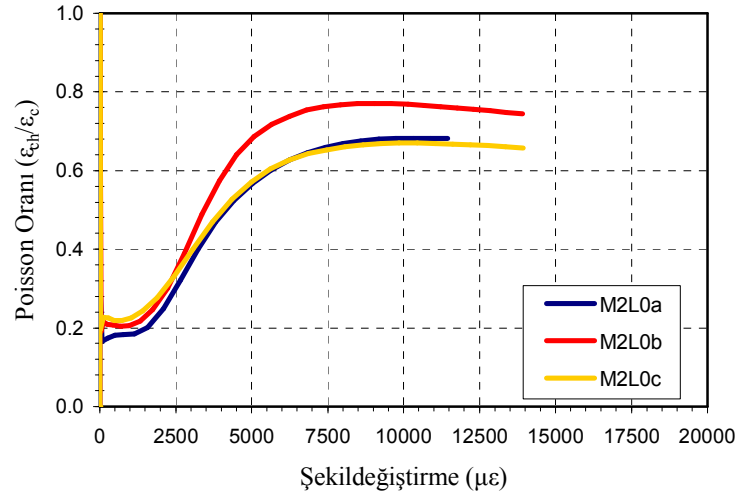
Şekil 6.18: L0 serisi Numunelerin Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

L0 serisi numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri birbirlerine oldukça yakın davranış göstermişlerdir. Numunelere ait deney sonuçları, Tablo 6.9’da verilmiştir. Parantez içindeki değerler 150 mm ölçüm boyundan diğer değerler 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlerdir.

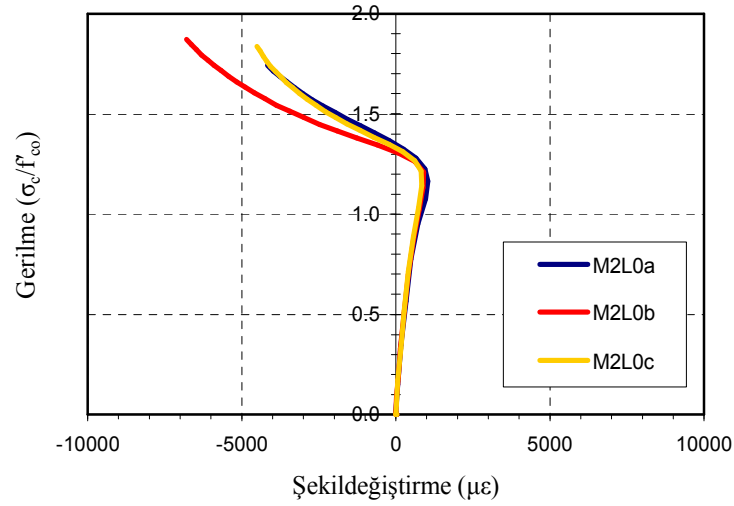
Tablo 6.9: M2L0a, M2L0b ve M2L0c Deney Bilgileri

Numune Adı	Beton Yaşı (Gün)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (mm/mm)	ϵ_{ch} (mm/mm)	E_c (MPa)	E_2 (MPa)
M2L0a	138	54.3	0.0114 (0.0099)	0.0078	31676 (26529)	1635 (1735)
M2L0b	138	58.3	0.0140 (0.0132)	0.0103	33001 (31316)	1607 (1699)
M2L0c	140	57.3	0.0145 (0.0134)	0.0095	31619 (31012)	1474 (1448)
Ortalama	139	56.7	0.0133 (0.0120)	0.0092	32100 (29619)	1585 (1656)
Standart Sapma		2.08	0.0016 (0.0019)	0.0012	781.96 (2680.33)	86.01 (156.35)

Numune üzerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden alınan ölçümlerle hesaplanan Poisson oranının yükleme süresince değişimi Şekil 6.19’de ve numunelerin yaptıkları hacimsel şekildeğiştirmeler Şekil 6.20’de verilmiştir.

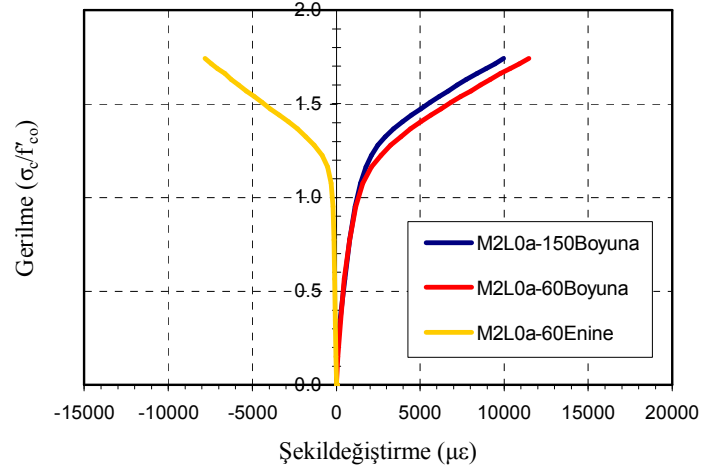


Şekil 6.19: L0 Serisi Numunelerde Poisson Oranının Değişimi

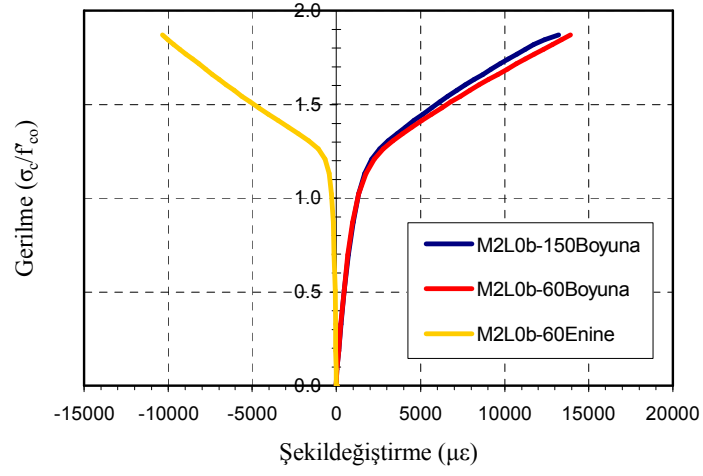


Şekil 6.20: L0 Serisi Numunelerin Yaptıkları Hacimsel Şekildeğiştirmeler

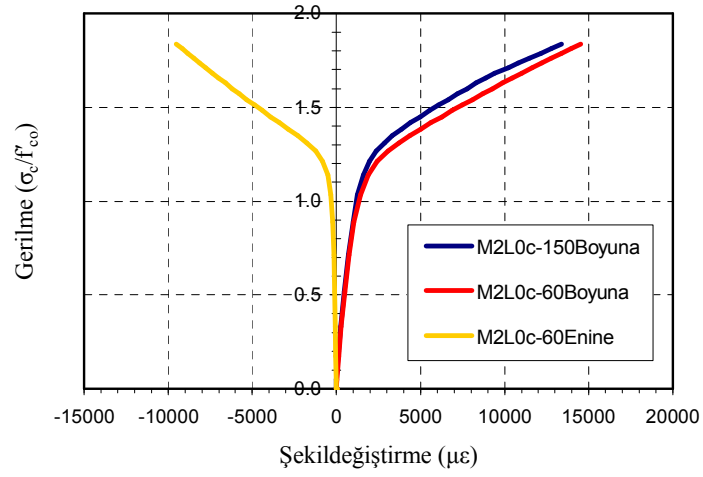
Numunelerde 60 mm ve 150 mm ölçüm boyundan alınan ölçümler arasında veri alma hızından doğabilecek farklılıklar bulunmaktadır, Şekil 6.21. M2L0a numunesinde diğer numunelere göre daha küçük enine ve boyuna şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir.



(a) M2L0a



(b) M2L0b



(c) M2L0c

Şekil 6.21: L0 Serisi Numunelerin Farklı Ölçüm Boylarında Gerilme-Ş.D. İlişkileri

L0 serisi numunelerin tümünde herhangi bir lif kopma sesi duyulmadan, göçme ani gerçekleşmiştir, Tablo 6.10. Tüm numunelerin üst kısmındaki LP tabakasında bir ayrılma gözlenmiştir. Diğer serilerdeki numunelere göre L0 serisi numunelerin LP sargılarındaki yırtıkların daha geniş olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin deney sonrası görünüşleri Şekil 6.22’de verilmiştir.

Tablo 6.10: L0 Serisi Numunelerin Göçme Bilgileri

Numune Adı	Düşey Yırtık	Yatay yırtık
M2L0a	Numune üstünden 170 mm	Numune üstünde 180 mm Orta kısımda 150 mm Alt kısımda 400 mm
M2L0b	Numune üstünden 210 mm	Üstte 240 ve 160 mm’lik 2 parça Alta kısımda tüm çevre boyunca
M2L0c	Numune üstünden 220 mm	Üst kısımda 180 mm Ortada 160 mm Alt kısımda tüm çevre boyunca



(a) M2L0a



(b) M2L0b



(b) M2L0c

Şekil 6.22: L0 Serisi Numunelerin Deney Sonrası Görünüşleri

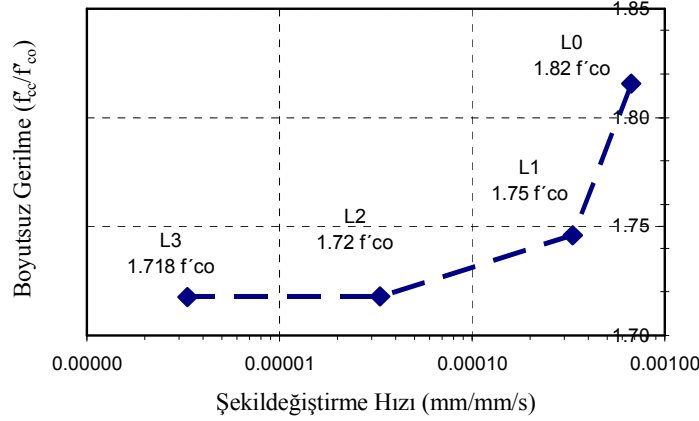
6.7. Monoton Artan Yükleme ile Denenen Numunelerin Karşılaştırılması

Monoton artan yük altında denenen numunelerin deney bilgileri Tablo 6.11’de özet olarak verilmiştir. Parantez içindeki değerler 150 mm ölçüm boyundan, diğer değerler 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlerdir. Ortalama değerlere bakıldığında bu iki ölçüm boyundan alınan verilerin oldukça yakın değerler aldıkları görülmektedir; bu da ölçüm sisteminin deney süresince sağlıklı çalıştığını göstermektedir. Fakat yüksek yüklem hızlarında yerdeğiştirmeölçerlerin tepki hızlarının yetersizliğinden doğabilecek hatalar nedeniyle iki ölçüm boyundan alınan değerler arasında bir miktar fark oluşmuştur.

Tablo 6.11: Monoton Artan Yük Altında Denenen Numunelerin Deney Bilgileri

Numune Adı	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (mm/mm)	ϵ_{ch} (mm/mm)	f'_{cc}/f'_{co}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	E_c (MPa)	E_2 (MPa)	E_c/E_{co}
M2L0a	54.36	0.0115 (0.0099)	0.0080	1.74	4.62	31676 (26529)	1635 (1735)	1.092
M2L0b	58.34	0.0139 (0.1320)	0.0100	1.87	5.58	33001 (31316)	1607 (1699)	1.138
M2L0c	57.32	0.0145 (0.0134)	0.0090	1.83	5.83	31619 (31012)	1474 (1448)	1.090
M2L1a	52.22	0.0117 (0.0099)	0.0080	1.67	4.70	29313 (30828)	1637 (1687)	1.011
M2L1b	57.77	0.0135 (0.0125)	0.0100	1.85	5.43	34480 (34505)	1665 (1647)	1.189
M2L1c	53.52	0.0123 (0.0113)	0.0090	1.71	4.94	30744 (34800)	1507 (1510)	1.060
M2L2a	54.36	- (0.0134)	0.0084	1.74	-	29565 (29788)	1596 (1424)	1.019
M2L2b	52.51	0.0136 (0.0128)	0.0086	1.68	5.47	29306 (28567)	1367 (1394)	1.011
M2L2c	54.01	0.0128 (0.0134)	0.0085	1.73	5.17	29932 (32917)	1887 (1488)	0.987
M2L3a	55.92	0.0198 (0.0198)	0.0190	1.79	7.97	25261 (23590)	1292 (1257)	0.871
M2L3b	52.63	0.0158 (0.0144)	0.0090	1.68	6.36	25921 (25203)	1397 (1510)	0.894
M2L3c	52.29	0.0140 (0.0146)	0.0090	1.67	5.65	27147 (26312)	1673 (1424)	0.936

Monoton artan yük altında denenen numuneler genel olarak referans numuneler ile karşılaştırıldıklarında dayanımda ortalama olarak %75 ve karşı gelen boyuna şekil değiştirme değerlerinde 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlere göre %560 artış elde edilmiştir. Şekil 6.23’da yükleme hızlarına göre numunelerin dayanımındaki değişim verilmiştir. Düşey eksen, sargılanmış dayanımın sargılanmamış beton dayanımına oranıdır; logaritmik olarak ölçeklendirilmiş yatay eksen şekil değiştirme hızını göstermektedir.

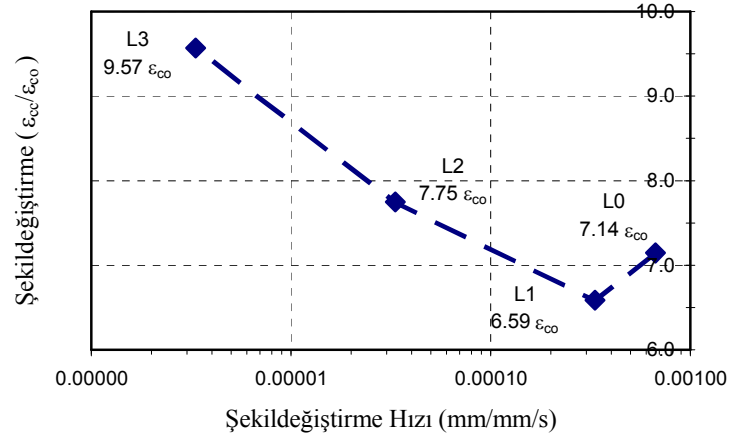


Şekil 6.23: Yükleme Hızına Göre Dayanımın Değişimi

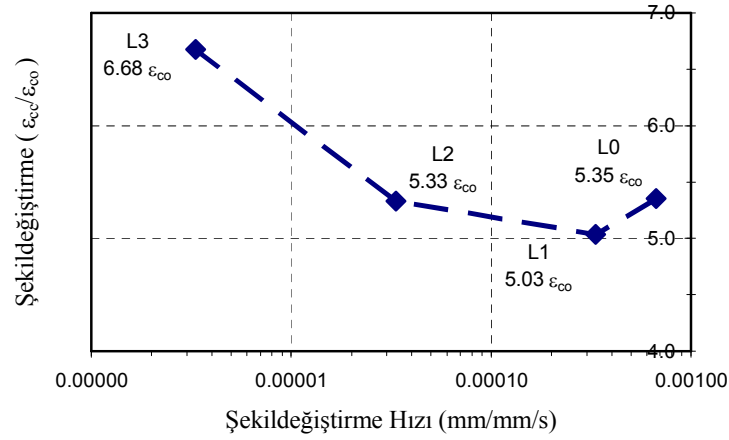
Yükleme hızındaki artış dayanımda da artışa neden olmuştur. L3 serisi numuneler ve L2 serisi numunelerde yakın dayanımlar elde edilmiştir. L2 serisine göre sırasıyla 10 ve 20 kat daha hızlı yüklenen L1 ve L0 serisi numunelerde daha belirgin bir dayanım artışı gözlemlenmiştir.

Yükleme hızının artmasıyla boyuna şekil değiştirme kapasitesinde bir azalma eğilimi vardır. L3 serisi numunelerde ortalama olarak, 60 mm ölçüm boyuna göre %668 artış elde edilirken yükleme hızının artmasıyla L1 serisi numunelerde bu değer %503’e gerilemiştir. L0 serisi numuneler L1 serisi numunelere göre iki kat daha hızlı yüklenmelerine karşın bir miktar daha fazla şekil değiştirme yapmışlardır. Bunun sebebinin, LP şeritlerinin kopma şekil değiştirmelerinin genelde üreticinin verdiği değerlerin %75’i ile %101’i arasında değişen değerler alması ile aynı tip numunelerin farklı şekil değiştirmeler yapabilmesi ve bu iki seri arasında davranışa etki edebilecek kadar büyük bir hız farkının bulunmaması ile bu serilere ait numunelerin yakın davranışlar göstermeleri olarak söylenebilir. Numunelerin 150 mm ve 60 mm ölçüm boylarından alınan şekil değiştirme değerlerinin değişimi sırasıyla, Şekil 6.24 ve

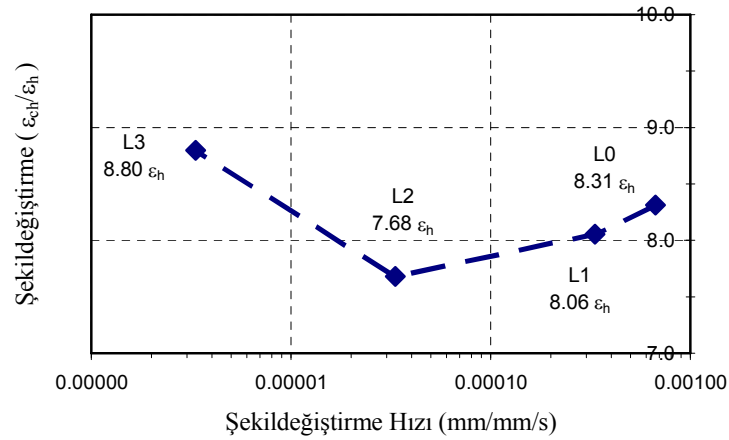
Şekil 6.25’de verilmiştir. Tüm serilerin ortalama enine şekildeğiştirme değerlerinin yükleme hızına göre değişimi Şekil 6.26’de verilmiştir.



Şekil 6.24: Yükleme Hızına Göre Boyuna Şekildeğiştirmenin Değişimi (150 mm)



Şekil 6.25: Yükleme Hızına Göre Boyuna Şekildeğiştirmenin Değişimi (60 mm)

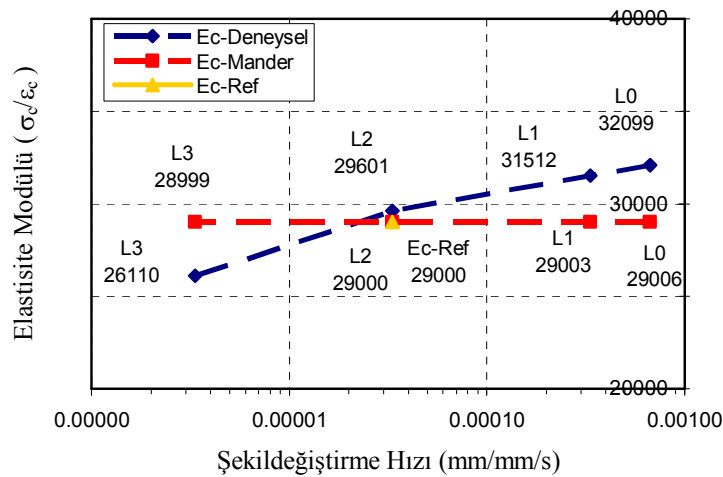


Şekil 6.26: Yükleme Hızına Göre Enine Şekildeğiştirmenin Değişimi

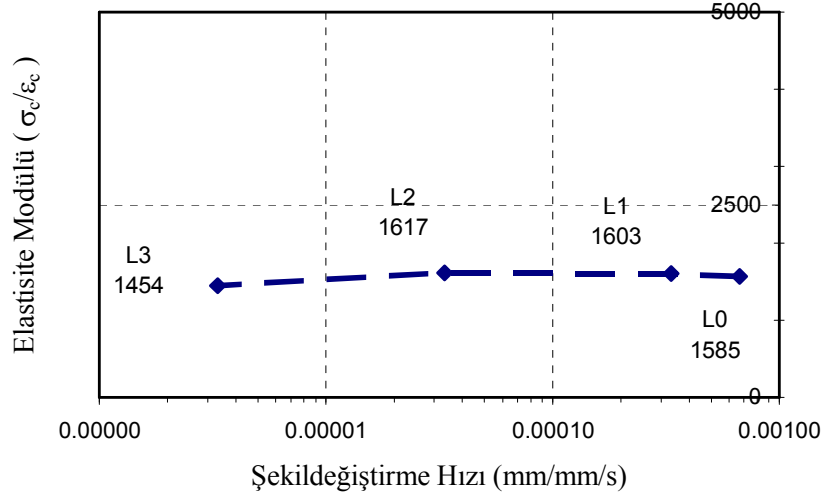
Yükleme hızının LP sargılı betonun enine şekildeğiştirme kapasitesi üzerinde belirli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu davranış, yüklem hızının LP malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi üzerinde bir etkisinin olmamasıyla açıklanabilir.

Sargılanmış beton gerilme-şekildeğiştirme ilişkisindeki doğruların E_c ve E_2 eğimlerinin farklı yüklem hızları için değişimleri sırasıyla Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de verilmiştir. Şeklinde beton davranışının etkili olduğu ilk doğrunun E_c eğimi yüklem hızındaki artışla büyüme göstermiştir. E_c ve E_2 eğimleri numune üzerindeki şekildeğiştirmeölçerlerden okunan değerler ile hesaplanmışlardır. E_c değeri, gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde dayanımın %5 ile %45’i arasında kalan doğrunun eğimi olarak; E_2 değeri ise, dayanımın %140’ı ile sargılı beton dayanımı arasında kalan doğrunun eğimi hesaplanarak elde edilmişlerdir. Şekilde verilen değerler her serideki üçer numuneden elde edilen ortalama değerlerdir. L2 serisi numuneleri ile sargılanmamış referans numunelerinin E_c eğimleri birbirlerine çok yakın değerler almışlardır.

Mander ve diğ. (1988) tarafından sargısız beton için önerilen modele göre, elastisite modülünün yüklem hızıyla değişimi incelendiğinde, bu çalışmada kullanılan yüklem hızları elastisite modülünde çok ufak değişikliklere neden olmaktadır. Sargısız beton için önerilen bu modelden alınan değerler bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçları çok iyi yansıtmamaktadır; buna göre sargılı betonun gerilme şekildeğiştirme davranışının ilk bölümünün şeklinde tamamen betonun etkin olmadığı, bu davranışın bir miktar da sargının uyguladığı yanal kuvvetten etkilendiği söylenebilir.



Şekil 6.27: E_c Eğiminin Yüklem Hızıyla Değişimi



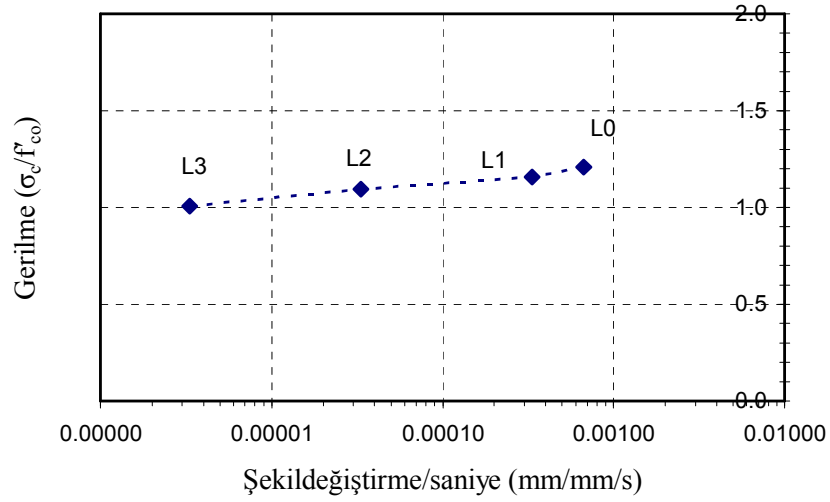
Şekil 6.28: E_2 Eğiminin Yükleme Hızıyla Değişimi

LP sargının etkili olduğu ikinci doğrunun E_2 eğiminin ise yükleme hızının değişimininden bağımsız olduğu söylenebilir. Tüm serilerin ortalama E_2 eğimi birbirlerine yakın değerler almışlardır.

E_c ve E_2 değerlerinin yükleme hızına göre değişimlerine bakılarak, yükleme hızının daha çok beton davranışının baskın olduğu ilk bölüm üzerinde etkili olduğu ve yükleme hızındaki değişimle LP sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde gözlemlenen değişimin, bu bölümde oluşan farklılıktan kaynaklandığı söylenebilir.

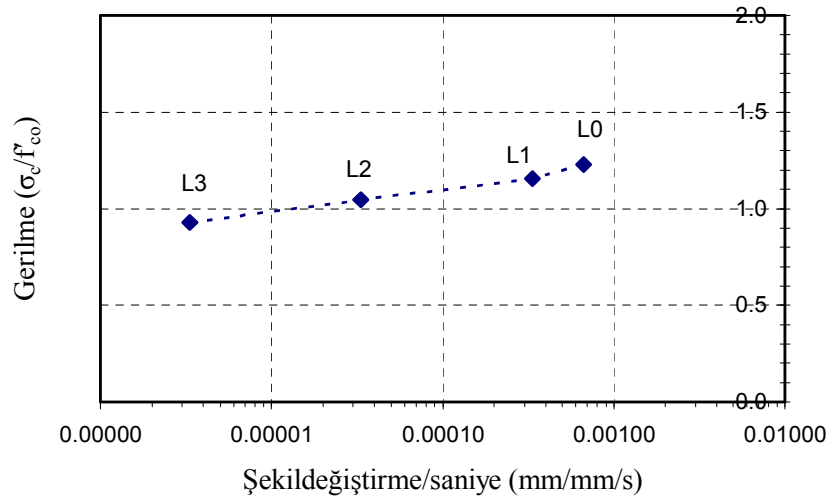
Monoton artan yükleme altında LP sargılı beton iki doğrulu bir davranış gösterdiği söylenebilir; belli bir gerilme seviyesine kadar sargısız betona benzer bir davranış göstermekte, bu gerilme aşıldıktan sonra ise bir geçiş bölgesinden sonra lifli polimer sargı devreye girmektedir. Lifli polimer sargının devreye girip davranışa hakim olmaya başladığı geçiş bölgesinde sargısız beton dayanımına ulaşıldığı kabul edilebilir. Farklı yükleme hızlarının sargısız betonun dayanımında değişime neden olduğu bilindiğinden, yükleme hızındaki değişimin sargılı betondaki geçiş bölgesinin yerinde de farklılık yaratabileceği düşünülebilir.

Geçiş bölgesini yeri birinci doğru ile ikinci doğrunun kesiştiği yerdeki dönüş noktası ile ifade edilebilir. Farklı yükleme hızları için dönüş noktasının yeri Şekil 6.29'da verilmiştir. Bu değerler, her numuneye ait dönüş noktasındaki gerilme değerlerinin kendi serileri içindeki ortalamaları alınarak elde edilmiştir.



Şekil 6.29: Dönüş Noktasına Karşılık Gelen Gerilme Değerleri

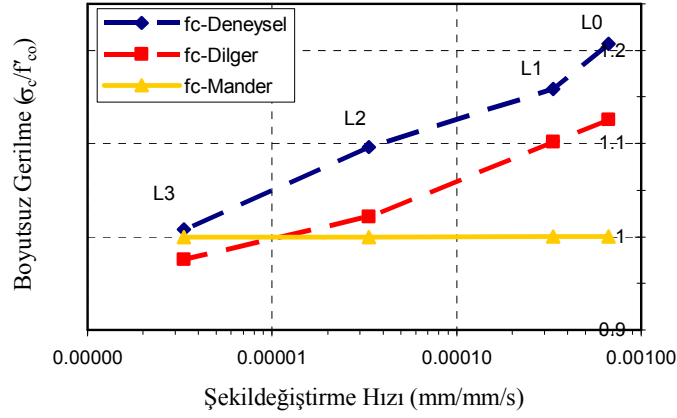
Yükleme hızının artmasıyla beton davranışının hakim olduğu birinci bölümden, LP sargının davranışta hakim olduğu ikinci doğruya bağlandığı dönüş noktası daha yüksek gerilme seviyelerinde değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Bunun da, sargısız betonun dayanıma ulaştığı noktanın yüklem hızının artmasıyla değişimine benzer bir davranış olduğu söylenebilir. Aynı davranış enine şekildeğiştirme eğrisinde de görülebilir, Şekil 6.30.



Şekil 6.30: Enine Dönüş Noktasına Karşılık Gelen Gerilme Değerleri

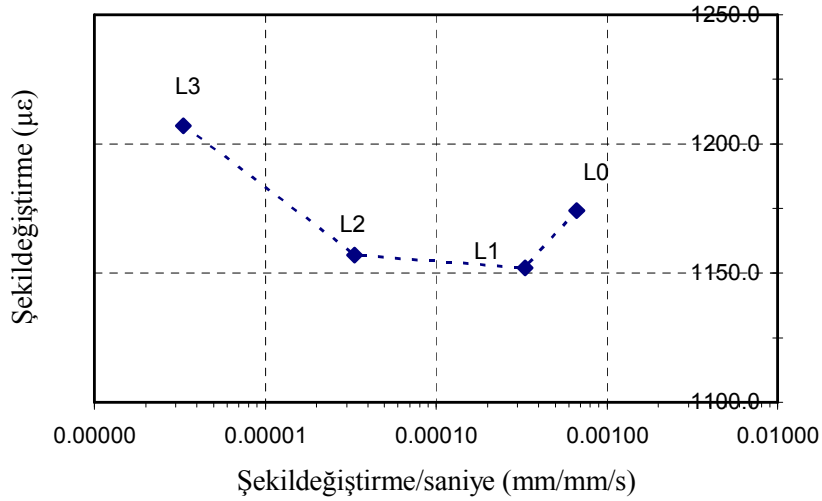
Şekil 6.31'de dönüş noktasında oluşan gerilme değerlerinin yüklem hızıyla değişimi, Dilger ve diğ. (1984) ve Mander ve diğ. (1988) tarafından, sargısız beton dayanımının yüklem hızıyla değişimi için önerilen modellerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen eğrilere bakılarak Dilger ve diğ. tarafından önerilen

modelin, bu çalışmada kullanılan hız seviyelerinin etkisini daha iyi ortaya koyduğu görülmektedir.



Şekil 6.31: Sargısız Beton Dayanımının Yükleme Hızıyla Değişimi

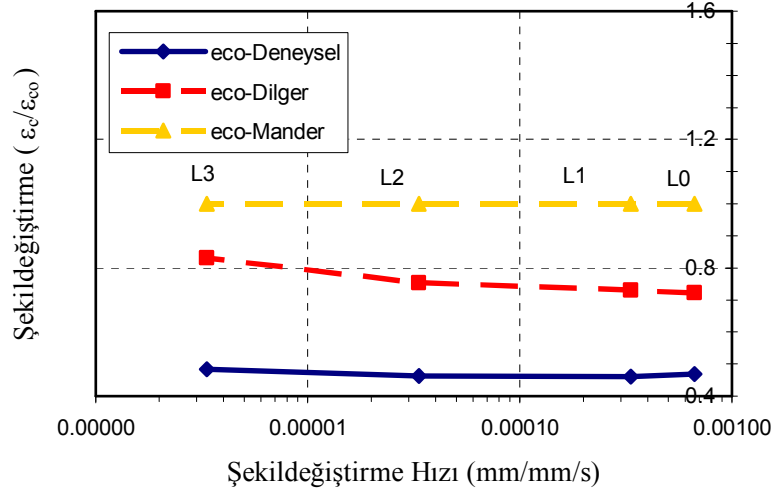
Dönüş noktası L0, L1 ve L2 serilerinde yaklaşık şekil değiştirme değerlerinde ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi hızı on ve yirmi kat kadar arttırmanın şekil değiştirme değerlerini çok fazla değiştirebilecek bir etki yaratamaması olarak açıklanabilir. Yükleme hızının düşmesiyle ise dönüş noktasının daha büyük şekil değiştirme değerlerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir, Şekil 6.32.



Şekil 6.32: Dönüş Noktasına Karşılık Gelen Boyuna Şekil Değiştirme Değerleri

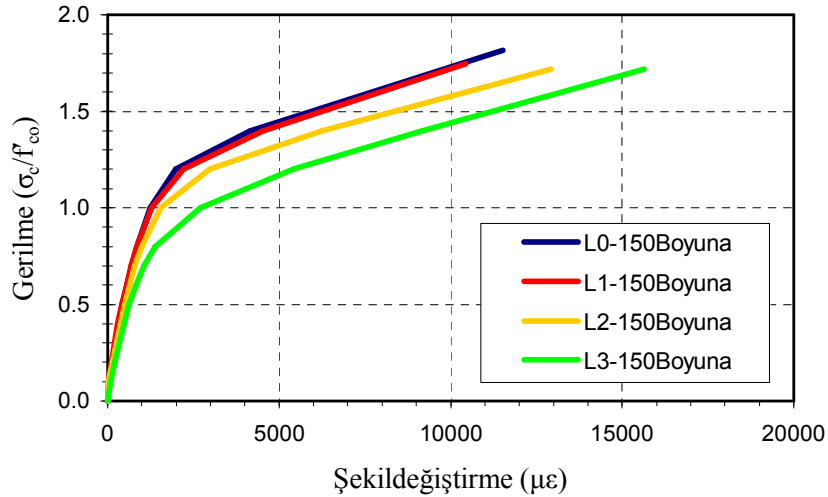
Şekil 6.33'de dönüş noktasında oluşan şekil değiştirme değerlerinin yükleme hızıyla değişimi, Dilger ve diğ. (1984) ve Mander ve diğ. (1988) tarafından, sargısız beton dayanımına karşılık gelen şekil değiştirmenin yükleme hızıyla değişimi için önerilen modellerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen eğrilere bakılarak, bu

çalışmada kullanılan yükleme hızlarının şekildeğiştirme değerlerine çok fazla etki etmediği görülmekle birlikte, Dilger ve diğ. tarafından önerilen modelin, elde edilen deneysel şekildeğiştirme değerlerini daha iyi yansıttığı görülmektedir.

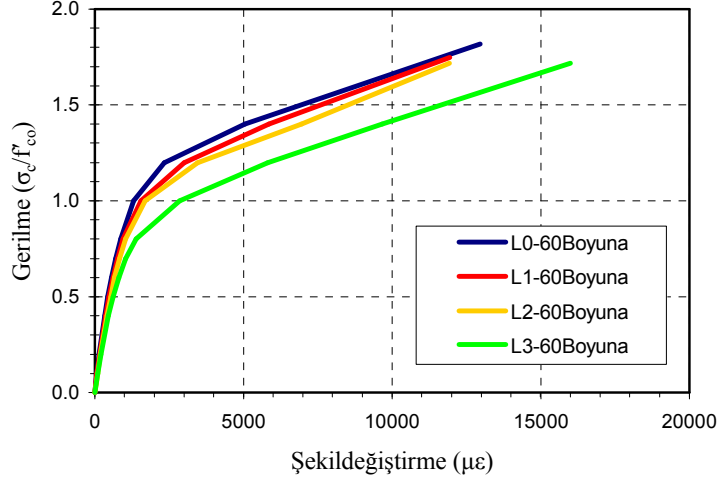


Şekil 6.33: Beton Dayanımına Karşılık Gelen Şekildeğiştirme Değerleri

Tüm serilerin gerilme-boyuna şekildeğiştirme diyagramları, 150 mm ve 60 mm ölçüm boyları için sırasıyla Şekil 6.34 ve Şekil 6.35’de verilmiştir. Bu diyagramlar her serideki üç numuneye ait ortalama değerlerdir. Bu değerler, üç numunede belirli gerilme seviyelerine karşılık gelen şekildeğiştirmelerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.



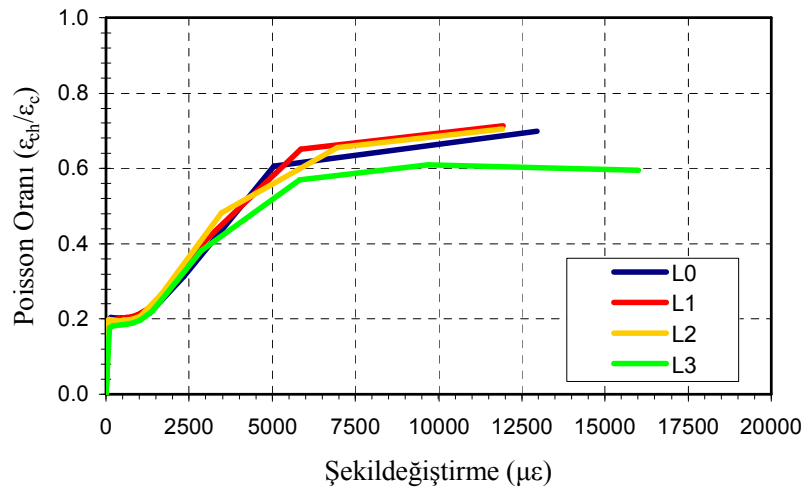
Şekil 6.34: Serilere Ait Ortalama Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri (150 mm)



Şekil 6.35: Serilere Ait Ortalama Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri (60 mm)

Yükleme hızının artmasıyla, ortalama yüklem hızı seviyesi L2' ye göre gerilme-şekildeğiştirme diyagramının sola doğru, yüklem hızının azaltılmasıyla sağa doğru ötelendiği görülmektedir. İkinci doğruların davranışları birbirlerine benzerdir. Numunelerin elde ettikleri dayanım ve şekildeğiştirmeler büyük oranda LP sargının devreye girdiği dönüş noktasının yerine bağlıdır.

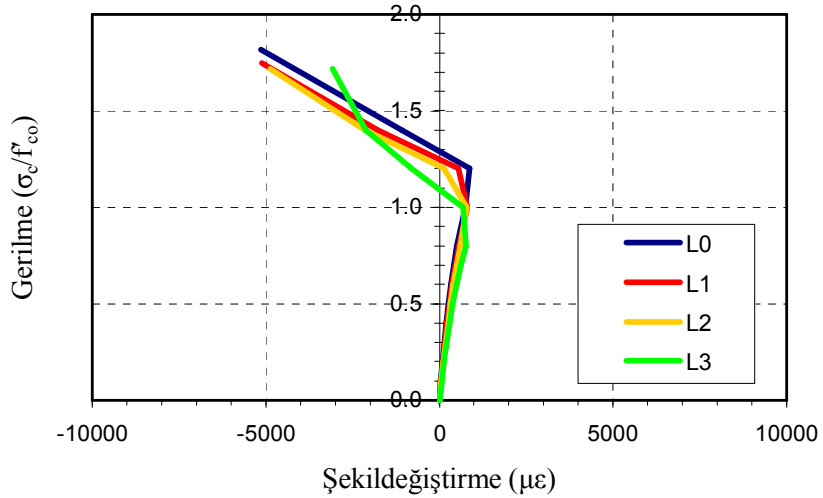
Her seriye ait numunelerin, yüklem süresince Poisson oranının değişimi Şekil 6.36'da verilmiştir. Düşey eksen Poisson oranını, yatay eksen boyuna şekildeğiştirme değerini göstermektedir. Bu değerler her seri içindeki üçer numunenin, belirli gerilme seviyelerindeki enine şekildeğiştirmelerin ortalamalarının boyuna şekildeğiştirmelerin ortalamasına oranı alınarak serinin ortalama Poisson oranı değişimi elde edilmiştir.



Şekil 6.36: Farklı Hızlarda Yüklem Süresince Poisson Oranının Değişimi

Betonda Poisson oranı, belli bir gerilme değerine kadar 0.15 ile 0.22 arasında değişen değerler alır. Bu gerilme değeri aşıldıktan sonra Poisson oranı hızla artmaya başlar ve 0.5 değerini aşar. Bunun sebebi betonda oluşan düşey çatlakların artmasıdır. Sargılı beton durumunda da belli bir noktaya kadar benzer bir davranış gözlemlenmiştir. Sarılmamış beton dayanımına karşılık gelen yaklaşık 0.002 şekil değiştirme değerine yaklaşıldıkça Poisson oranı hızla artmaya başlamıştır. Sarılmamış betonda Poisson oranı 0.5 değerine ulaştığında betonun göçtüğü kabul edilebilir; fakat sargılı beton durumunda LP sargının etkisiyle enine şekil değiştirmelerin değişimi hızla artmaya devam etmiş ve bu deney grubundaki numunelerde 0.6 ile 0.75 arasında değişen oranlar gözlemlenmiştir.

Poisson oranının hızla değişmeye başladığı noktada hacimsel şekil değiştirme eğrisinin eğiminin işareti de değişir. Serilere ait gerilme-hacimsel şekil değiştirme ilişkileri Şekil 6.37’de verilmiştir. Bu eğrilerdeki değerler belirli gerilme seviyelerinde hesaplanan hacimsel şekil değiştirmelerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

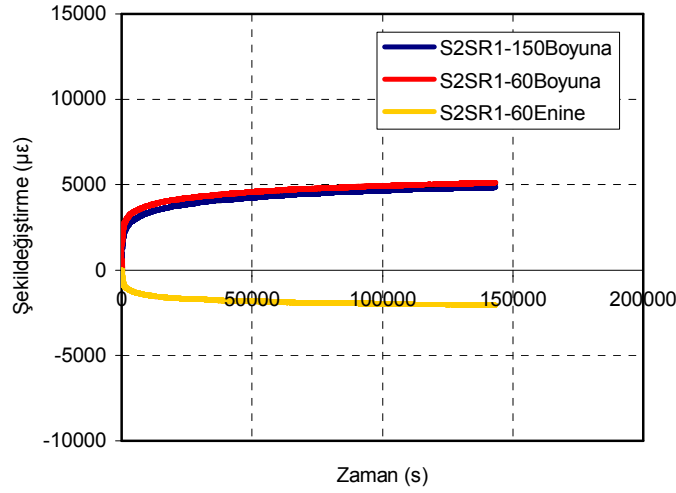


Şekil 6.37: Serilere Ait Gerilme-Hacimsel Şekil Değiştirme İlişkileri

Tüm serilerde, belli bir gerilme değerine kadar numunelerde sıkışma gözlenmiş daha sonra bu değer aşılmaya başlanırsa enine şekil değiştirmeler hızlanarak artmış ve numunelerde şekil değiştirme, göçme anına kadar genişleme olarak devam etmiştir. Tüm serilere ait hacimsel şekil değiştirme eğrilerinde görüldüğü gibi yükleme hızının artmasıyla hacimsel şekil değiştirme eğrisinin eğiminin işaret değiştirdiği gerilme seviyesi yükleme hızının artışıyla artmıştır.

6.8. S2SR1

S2SR1 numunesi $0.90 f'_{co}$ düzeyinde gerilme altında 40 saat bekletilerek, sonrasında 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmiştir. Numunenin diğer numunelerden daha kısa süre sabit gerilme altında tutulmasının sebebi, yükleme aletinin bağlı olduğu bilgisayarda çıkan sorundur. Zamana bağlı olarak numunede oluşan şekildeğiştirmelerin farklı ölçüm boylarından alınan değerleri Şekil 6.38'de verilmiştir. Boyuna şekildeğiştirmeler pozitif, enine şekildeğiştirmeler negatif işaretlidir.



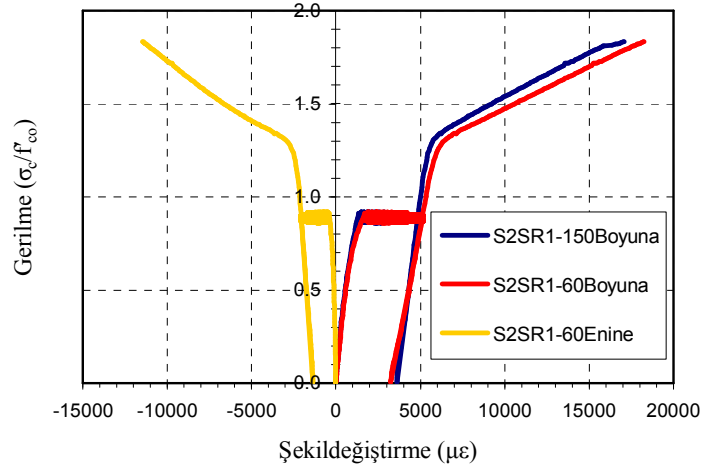
Şekil 6.38: S2SR1 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi

Şekildeğiştirme değerleri yüklemenin yaklaşık, ilk altı saati boyunca hızla artmış, daha sonra çok düşük bir hızda ilerlemeye devam etmişlerdir. Eğrilerinden geçirilen fonksiyonlara göre, şekildeğiştirmelerin pratik süreler içerisinde kritik sınırlara ulaşmadığı görülmüştür, Tablo 6.12.

Tablo 6.12: S2SR1 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi

Yıl	Gün	Boyuna Ş.D. (150 mm)	Boyuna Ş.D. (60 mm)	Enine Ş.D. (60 mm)
		$y = 0.0009x^{0.1448}$	$y = 0.0013x^{0.1188}$	$y = -0.0005x^{0.1195}$
1	365	0.0109	0.0101	0.0039
50	18250	0.0193	0.0161	0.0062
100	36500	0.0213	0.0174	0.0068
500	182500	0.0269	0.0211	0.0082

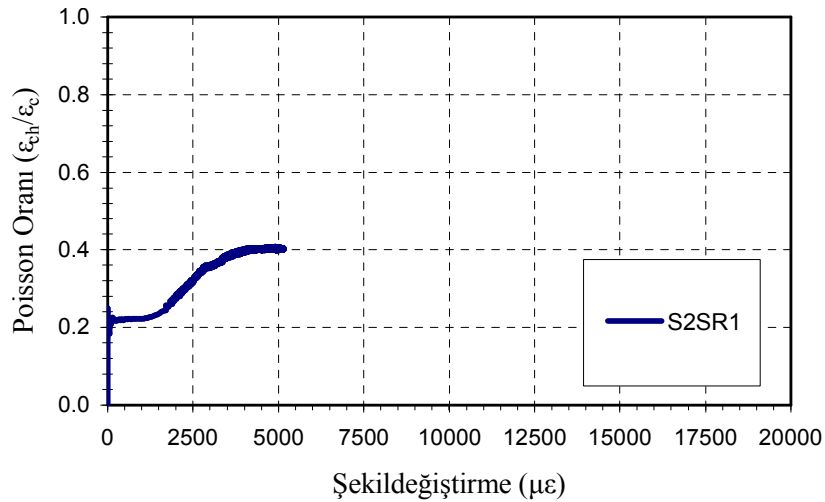
Numunenin sabit gerilme altında kaldığı kırk saatlik süre sonrası, üzerindeki yük boşaltılmış ve göçene kadar tekrar yüklenmiştir. Numunenin yüklemenin başından itibaren gösterdiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.39’da verilmiştir.



Şekil 6.39: S2SR1 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

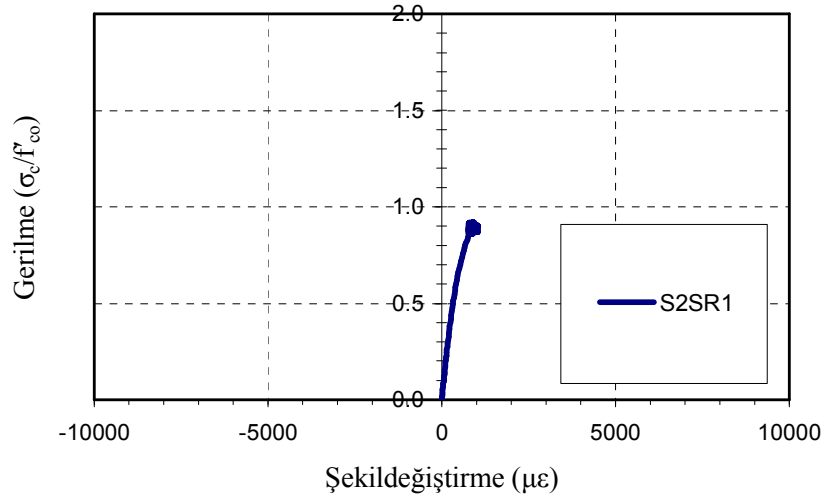
S2SR1 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrilerine bakıldığında numunenin 40 saatlik sabit gerilme altında bekletilmesine rağmen, sonrasında artan yük altında kırıldığında ulaştığı dayanım ve karşı gelen şekildeğiştirme değerlerinde monoton yük altında denenilen numuneler ile karşılaştırıldığında bir kayıp olmadığı gözlemlenmiştir.

Numunenin sabit gerilme altındaki, Poisson oranının değişimi Şekil 6.40’da verilmiştir.



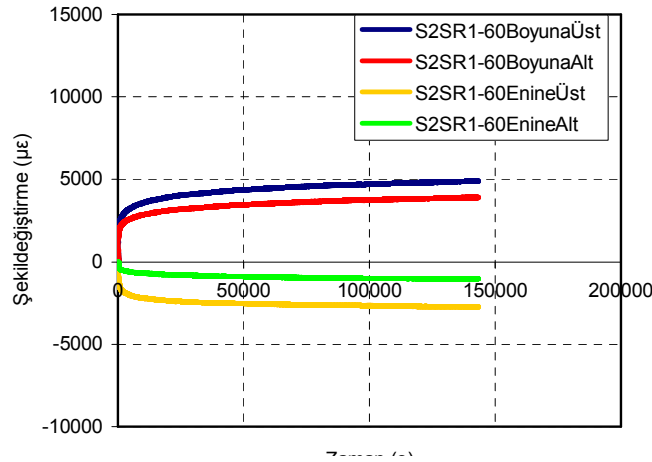
Şekil 6.40: S2SR1 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi

Poisson oranı yüklemenin başlangıcından 0.90 f'_{co} sabit gerilme düzeyine ulaşıncaya kadar yaklaşık 0.22 değerini alırken, sabit gerilme süresinin yaklaşık ilk iki saatinde hızla artmış daha sonra 0.4 değerinde sabitlenmiştir. Numune sabit gerilme seviyesine ulaşıncaya kadar kısalma yönünde bir hacimsel şekil değiştirme davranışı göstermiş; bu noktaya ulaşıldıktan sonra yük kaldırılana kadar hacimsel şekil değiştirme değeri belirli bir aralık arasında kalmıştır, Şekil 6.41.



Şekil 6.41: S2SR1 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekil Değiştirme İlişkisi

Bu numunede farklı bölgelerdeki şekil değiştirmeleri izleyebilmek için, numune yüksekliğinin dörtte birinde üst ve alt bölgede enine ve boyuna doğrultularda ek şekil değiştirmeölçerler yerleştirilmiştir. Bu bölgelerdeki şekil değiştirmelerin zamana bağlı değişimleri Şekil 6.42’de verilmiştir.



Şekil 6.42: S2SR1 Numunesinde Alt ve Üst Bölgelerdeki Şekil Değiştirmeler

Sabit gerilme altında numunenin üst kısmında, enine ve boyuna doğrultulardaki şekildeğiştirmeler numunenin orta bölgesindekilere yakın değerler almışlardır. Alt bölgede ise numunenin çok daha az şekildeğiştirme değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

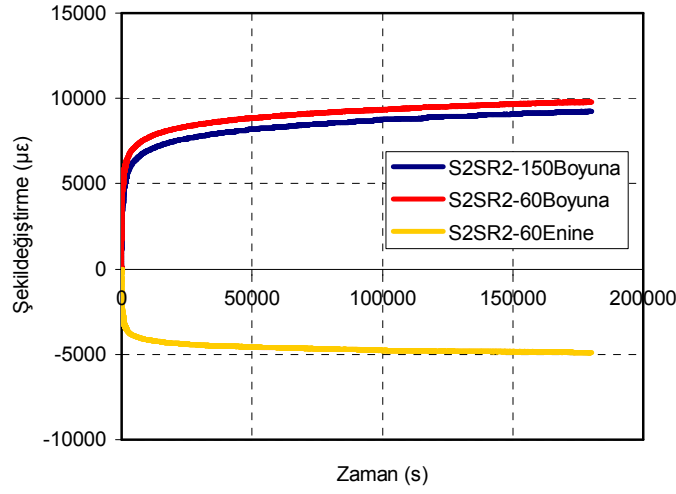
Numune, artan yük altında denendikten sonraki görünümü şekil 6.43’de verilmiştir.



şekil 6.43: S2SR1 Numunesinin Deney Sonrası Görünümü

6.9. S2SR2

S2SR2 numunesi $0.65 f'_{cc}$ ($1.12 f'_{co}$) düzeyinde gerilme altında 50 saat bekletilerek, sonrasında 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmiştir. Buradaki f'_{cc} değeri L2 yükleme seviyesiyle denenene numunelerin elde ettikleri dayanımın ortalamasıdır. Zamana bağlı olarak numunede oluşan şekildeğiştirmelerin farklı ölçüm boylarından alınan değerleri Şekil 6.44'de verilmiştir. Boyuna şekildeğiştirmeler pozitif, enine şekildeğiştirmeler negatif işaretlidir.



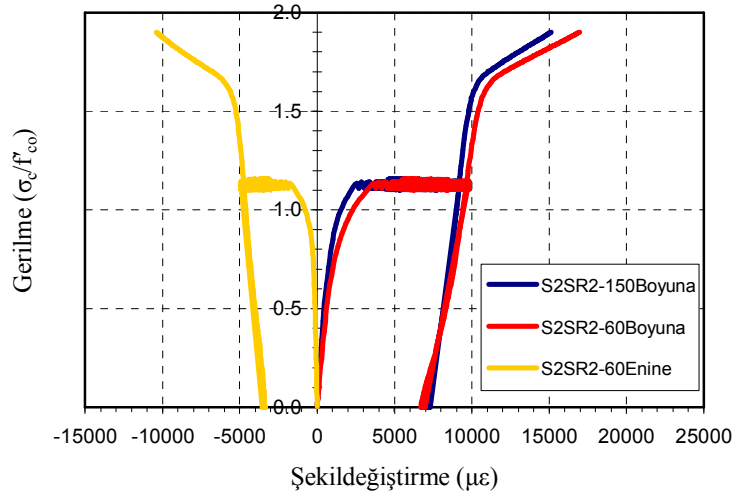
Şekil 6.44: S2SR2 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi

Şekildeğiştirme değerleri yüklemenin yaklaşık, ilk altı saati boyunca hızla artmış, daha sonra çok düşük bir hızda ilerlemeye devam etmişlerdir. Eğrilerinden geçirilen fonksiyonlara göre, şekildeğiştirmelerin pratik süreler içerisinde kritik sınırlara ulaşmadığı görülmüştür, Tablo 6.13.

Tablo 6.13: S2SR2 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi

Yıl	Gün	Boyuna Ş.D (150 mm)	Boyuna Ş.D (60 mm)	Enine Ş.D. (60 mm)
		$y = 0.0028x^{0.0989}$	$y = 0.0036x^{0.0837}$	$y = -0.0025x^{0.0570}$
1	365	0.0154	0.0152	0.0067
50	18250	0.0227	0.0211	0.0083
100	36500	0.0243	0.0224	0.0087
150	54750	0.0253	0.0232	0.0089

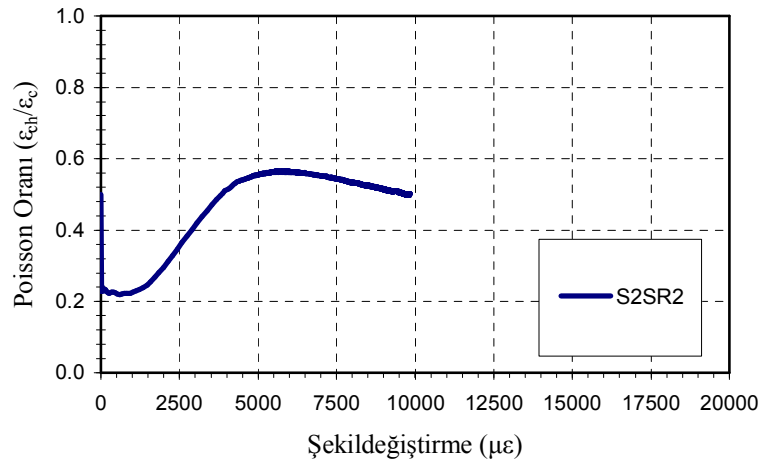
Numunenin sabit gerilme altında kaldığı elli saatlik süre sonrası, üzerindeki yük boşaltılmış ve göçene kadar tekrar yüklenmiştir. Numunenin yüklemenin başından itibaren gösterdiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.45’de verilmiştir.



Şekil 6.45: S2SR2 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

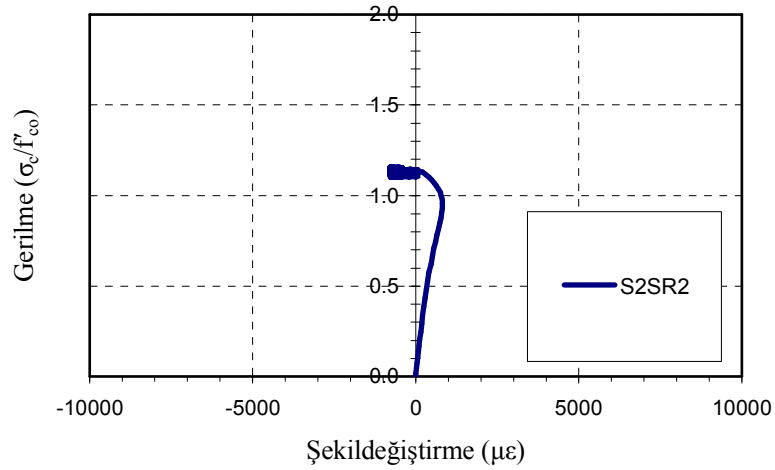
S2SR2 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrilerine bakıldığında numune, 50 saatlik sabit gerilme altında bekletilmesine rağmen, sonrasında artan yük altında kırıldığında ulaştığı dayanım ve karşı gelen şekildeğiştirme değerlerinde monoton yük altında denenilen numuneler ile karşılaştırıldığında bir kayıp olmadığı gözlemlenmiştir.

Numunenin sabit gerilme altındaki, Poisson oranının değişimi Şekil 6.46’da verilmiştir.



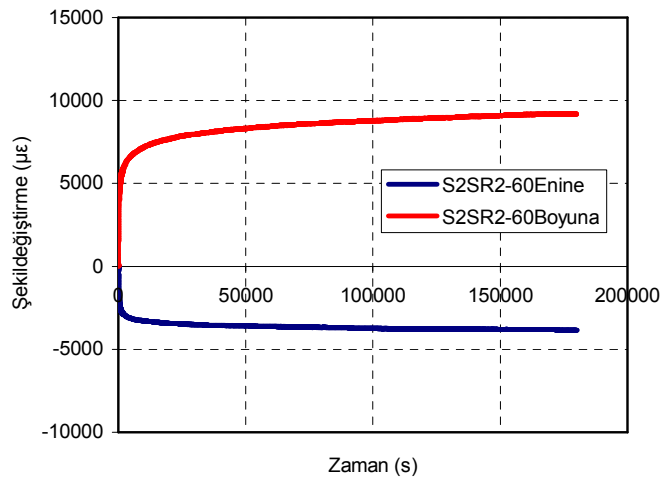
Şekil 6.46: S2SR2 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi

Poisson oranı yüklemenin başlangıcından belli bir gerilme düzeyine ulaşıncaya kadar yaklaşık 0.22 değerini alırken, bu değer aşıldıktan sonra hızla artmaya başlamıştır. Belirlenen sabit gerilme düzeyine ulaşıldıktan yük kaldırılana kadar Poisson oranı 0.50-0.55 arasında değişen değerler almıştır. Numune sarılmamış beton dayanımı seviyesine ulaşıncaya kadar kısılma şeklinde, daha sonra sabit gerilme noktasına kadar genişleme şeklinde bir hacimsel şekil değiştirme davranışı göstermiştir. Bu noktaya ulaşıldıktan sonra yük kaldırılana kadar hacimsel şekil değiştirme değeri belirli bir aralık arasında kalmıştır, Şekil 6.47.



Şekil 6.47: S2SR2 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekil Değiştirme İlişkisi

Bu numunede farklı bölgelerdeki şekil değiştirmeleri izleyebilmek için, numunenin bindirme bölgesinde enine ve boyuna doğrultularda şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir, Şekil 6.48.



Şekil 6.48: S2SR2 Numunesinde Bindirme Bölgesindeki Şekil Değiştirmeler

Bindirme bölgesindeki enine ve boyuna doğrultulardaki şekildeğişiklikler diğer bölgedeki şekildeğişikliklerin altında kalmakla birlikte, aralarında fazla fark olmadığı gözlemlenmiştir.

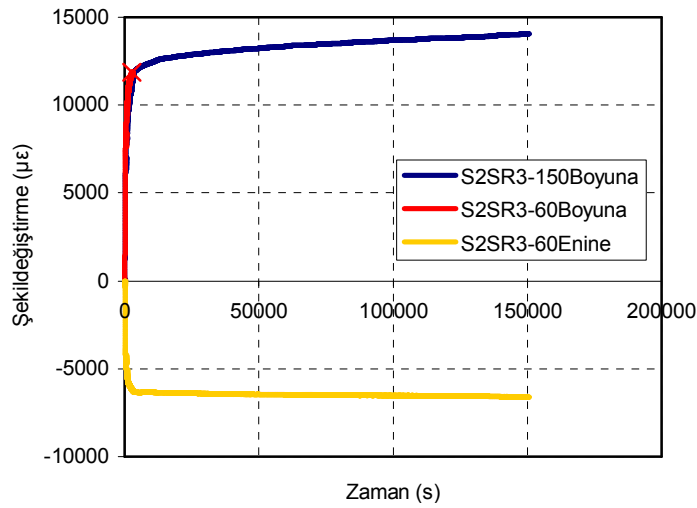
Numune, artan yük altında denendikten sonraki görünümü Şekil 6.49’da verilmiştir.



Şekil 6.49: S2SR2 Numunesi Deney Sonrası Görünümü

6.10. S2SR3

S2SR3 numunesi $0.75 f'_{cc}$ ($1.29 f'_{co}$) düzeyinde gerilme altında 50 saat bekletilerek, sonrasında 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmiştir. Buradaki f'_{cc} değeri L2 yükleme seviyesiyle denenene numunelerin elde ettikleri dayanımın ortalamasıdır. Zamana bağlı olarak numunede oluşan şekildeğiştirmelerin farklı ölçüm boylarından alınan değerleri Şekil 6.50'de verilmiştir. Boyuna şekildeğiştirmeler pozitif, enine şekildeğiştirmeler negatif işaretlidir. Yüklemenin başlamasından yaklaşık beş saat sonra, yüksek gerilme seviyesi sebebiyle boyuna doğrultuda yerleştirilen şekildeğiştirmeölçerler devre dışı kalmışlardır. Diğer kanallardan deney sonuna kadar sağlıklı ölçüm alınabilmektedir.



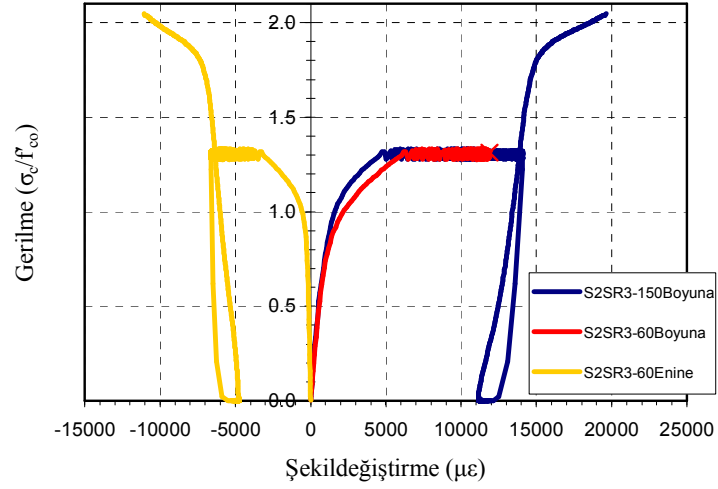
Şekil 6.50: S2SR3 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi

Şekildeğiştirme değerleri yükleminin yaklaşık, ilk altı saati boyunca hızla artmış, daha sonra çok düşük bir hızda ilerlemeye devam etmişlerdir. Eğrilerinden geçirilen fonksiyonlara göre, şekildeğiştirmelerin pratik süreler içerisinde kritik sınırlara ulaşmadığı görülmüştür, Tablo 6.14.

Tablo 6.14: S2SR3 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi

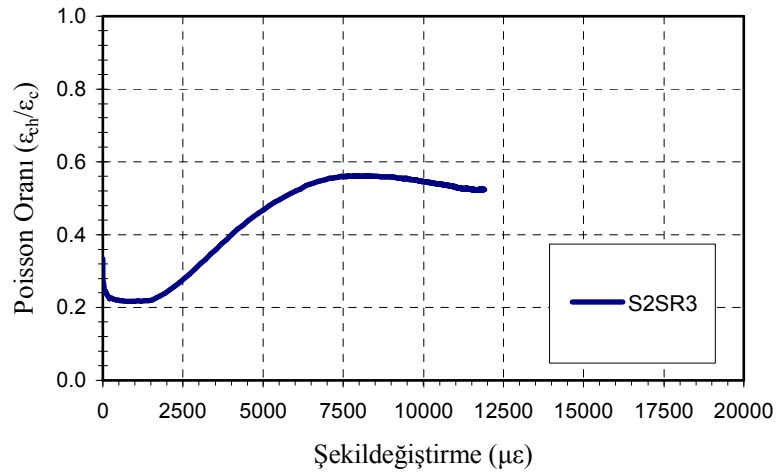
Yıl	Gün	Boyuna Ş.D (150 mm)	Enine Ş.D. (60 mm)
		$y = 0.0084x^{0.0427}$	$y = -0.0056x^{0.0134}$
1	365	0.0139	0.0065
1000	365000	0.0235	0.0076

Numunenin sabit gerilme altında kaldığı elli saatlik süre sonrası, üzerindeki yük boşaltılmış ve göçene kadar tekrar yüklenmiştir. Numunenin yüklemenin başından itibaren gösterdiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.51’de verilmiştir.



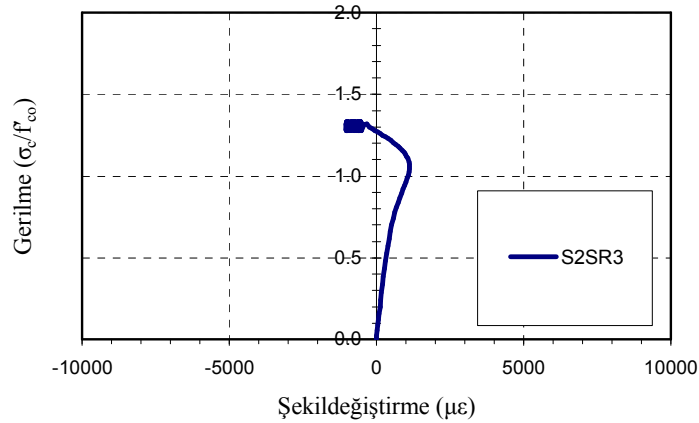
Şekil 6.51: S2SR3 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

S2SR3 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrilerine bakıldığında numune, 50 saatlik sabit gerilme altında bekletilmesine rağmen, sonrasında artan yük altında denendiğinde ulaştığı dayanımda monoton yük altında denenen numuneler ile karşılaştırıldığında bir kayıp olmadığı gözlemlenmiştir. Yükleme süresinin artmasıyla monoton artan yüklemelere göre, şekildeğiştirme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Numunenin, düşey şekildeğiştirmeölçerler devre dışı kalana kadar sabit gerilme altındaki, Poisson oranının değişimi Şekil 6.52’de verilmiştir.



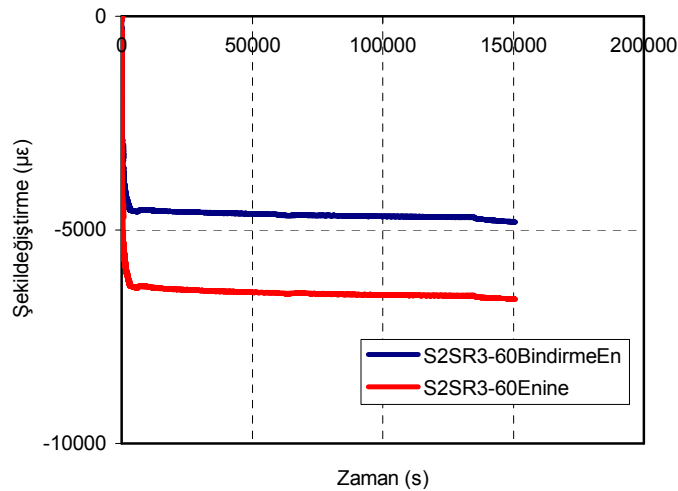
Şekil 6.52: S2SR3 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi

Poisson oranı yüklemenin başlangıcından belli bir gerilme düzeyine ulaşıncaya kadar yaklaşık 0.22 değerini alırken, bu değer aşıldıktan sonra hızla artmaya başlamıştır. Belirlenen sabit gerilme düzeyine ulaşıldıktan yük kaldırılana kadar Poisson oranı 0.50-0.55 arasında değişen değerler almıştır. Numune sarılmamış beton dayanımı seviyesine ulaşıncaya kadar kısılma şeklinde, daha sonra sabit gerilme noktasına kadar genişleme şeklinde bir hacimsel şekil değiştirme davranışı göstermiştir. Bu noktaya ulaşıldıktan sonra yük kaldırılana kadar hacimsel şekil değiştirme değeri belirli bir aralık arasında kalmıştır, Şekil 6.53.



Şekil 6.53: S2SR3 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekil Değiştirme İlişkisi

Bu numunede farklı bölgelerdeki şekil değiştirmeleri izleyebilmek için, numunenin bindirme bölgesinde enine ve boyuna doğrultularda şekil değiştirmeölçerler yerleştirilmiştir. Boyuna şekil değiştirmeölçerler deney sırasında devre dışı kalsalar da enine şekil değiştirmeölçerlerden sağlıklı veri alınabilmıştır, Şekil 6.54.



Şekil 6.54: S2SR3 Numunesinde Farklı Bölgelerdeki Enine Şekil Değiştirmeler

Bindirme bölgesindeki enine şekildeğişiklikler diğer bölgedeki şekildeğişikliklerin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

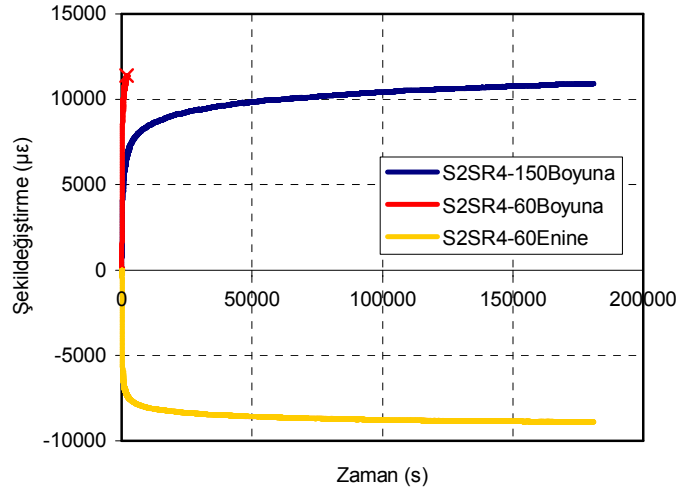
Numune, artan yük altında denendikten sonraki görünümü Şekil 6.55Şekil 6.49’de verilmiştir.



Şekil 6.55: S2SR3 Numunesi Deney Sonrası Görünümü

6.11. S2SR4

S2SR4 numunesi $0.85 f'_{cc}$ ($1.46 f'_{co}$) düzeyinde gerilme altında 50 saat bekletilerek, sonrasında 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmiştir. Buradaki f'_{cc} değeri L2 yükleme seviyesiyle denenene numunelerin elde ettikleri dayanımın ortalamasıdır. Zamana bağlı olarak numunede oluşan şekildeğiştirmelerin 150 mm boyuna ve 60 mm enine ölçüm boylarından alınan değerleri Şekil 6.56'da verilmiştir. Yüklemenin başlamasından yaklaşık üç saat sonra, yüksek gerilme seviyesi sebebiyle boyuna doğrultuda yerleştirilen şekildeğiştirmeölçerler devre dışı kalmışlardır.



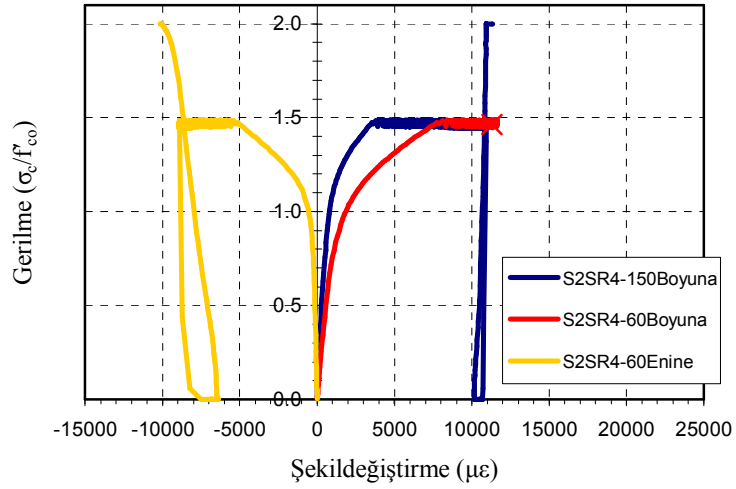
Şekil 6.56: S2SR4 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamana Bağlı Değişimi

Şekildeğiştirme değerleri yüklemenin yaklaşık, ilk altı saati boyunca hızla artmış, daha sonra çok düşük bir hızda ilerlemeye devam etmişlerdir. Eğrilerinden geçirilen fonksiyonlara göre, şekildeğiştirmelerin yaklaşık yirmi gün içerisinde kritik sınırlara ulaşabileceği görülmüştür, Tablo 6.15.

Tablo 6.15: S2SR4 Numunesinde Şekildeğiştirmelerin Zamanla Değişimi

Gün	Boyuna Ş.D. (150 mm)	Enine Ş.D. (60 mm)
	$y = 0.0032x^{0.1039}$	$y = -0.0054x^{0.0414}$
10	0.0132	0.0095
20	0.0142	0.0097
365	0.0192	0.0110

Numunenin yüklemenin başından itibaren gösterdiği gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 6.57’de verilmiştir.

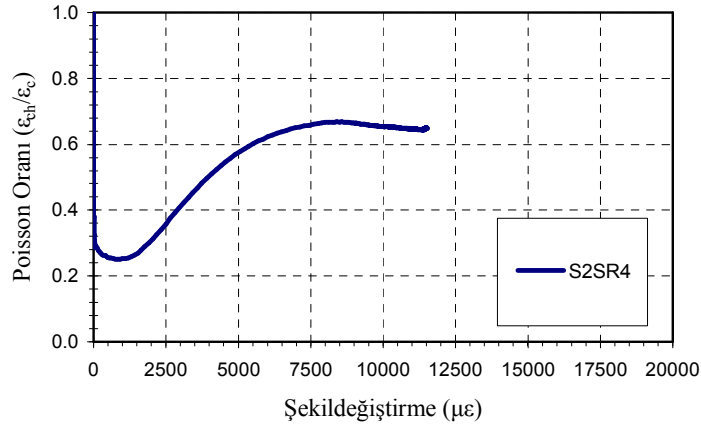


Şekil 6.57: S2SR4 Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

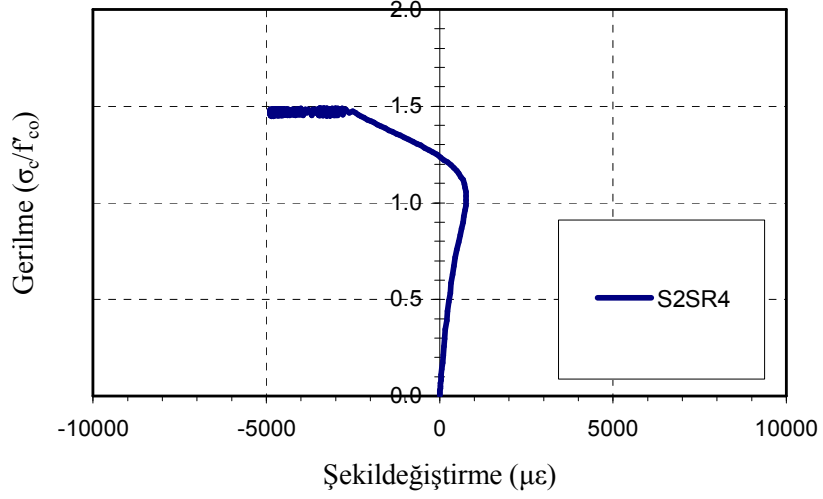
Ölçüm çerçevesinin deney esnasında dönmesi sebebiyle, yerdeğiştirmeölçerlerden sağlıklı veri toplanamamıştır.

S2SR4 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrilerine bakıldığında numunenin elli saatlik sabit gerilme altında bekletilmesine rağmen, sonrasında ulaştığı dayanım değeri monoton artan yük altında denenen numuneler ile karşılaştırıldığında bir kayıp olmadığı gözlemlenmiştir.

Sabit gerilme altında Poisson oranı, Şekil 6.58, ve hacimsel şekildeğiştirme, Şekil 6.59, değerinin değişimleri boyuna şekildeğiştirmeölçerlerin devre dışı kaldıkları süreye kadar hesaplanmıştır.

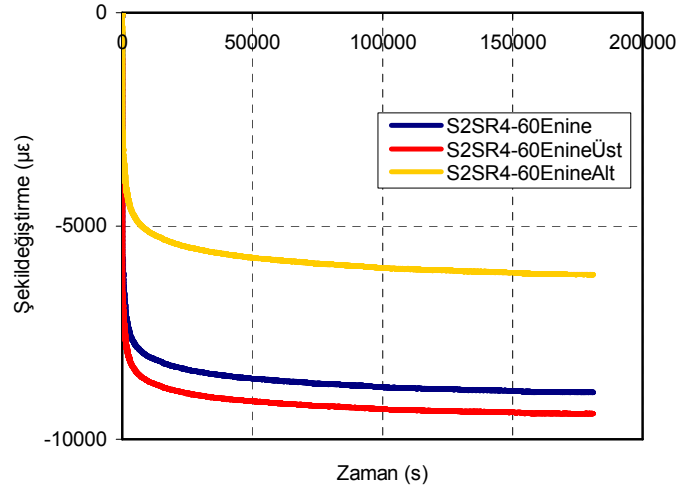


Şekil 6.58: S2SR4 Numunesinin Poisson Oranının Sabit Gerilme Altında Değişimi



Şekil 6.59: S2SR4 Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme İlişkisi

Bu numunede farklı bölgelerdeki şekildeğiştirmeleri izleyebilmek için, numune yüksekliğinin dörtte birinde üst ve alt bölgede enine ve boyuna doğrultularda ek şekildeğiştirmeölçerler yerleştirilmiştir. Bu bölgelerdeki şekildeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri Şekil 6.60’da verilmiştir.



Şekil 6.60: S2SR4 Numunesinde Alt ve Üst Bölgelerdeki Enine Şekildeğiştirmeler

Sabit gerilme altında numunenin üst kısmında, enine doğrultudaki şekildeğiştirmeler numunenin orta bölgesindekilere yakın değerler almışlardır. Alt bölgede ise numunenin çok daha az şekildeğiştirme değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Numune, artan yük altında denendikten sonraki görünümü Şekil 6.61’de verilmiştir.



Şekil 6.61: S2SR4 Numunesi Deney Sonrası Görünümü

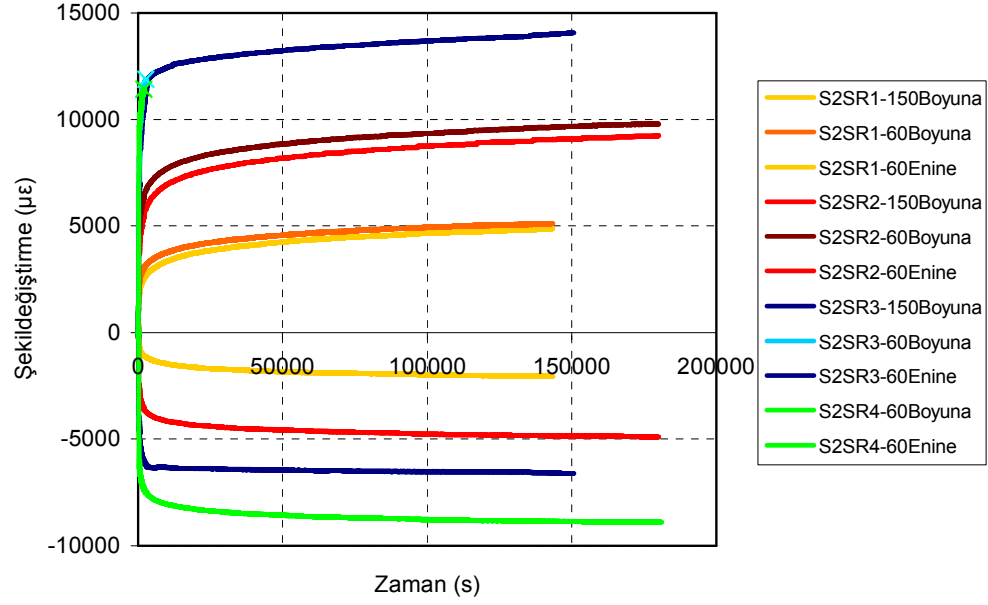
6.12. Sabit Gerilme Altında Denenen Numunelerin Karşılaştırılması

Sabit gerilme altında denenen numunelerin deney bilgileri Tablo 6.16’da özet olarak verilmiştir. Numunelerin elde ettikleri dayanım ve karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri, monoton artan yük altında denenen numuneler ile karşılaştırıldığında herhangi bir kayıp olmadığı görülmektedir. Sünme şekildeğiştirme değerleri, numunelerin 0.002 şekildeğiştirme/dakika ile yüklenerken hedeflenen gerilme düzeyine ulaşmaya kadar oluşan başlangıç şekildeğiştirme toplam şekildeğiştirmeden çıkarılarak elde edilmiştir. Parantez içindeki değerler 150 mm, diğer değerler 60 mm ölçüm boyundan alınan değerlerdir.

Tablo 6.16: Sabit Gerilme Altında Denenen Numunelerin Deney Bilgileri

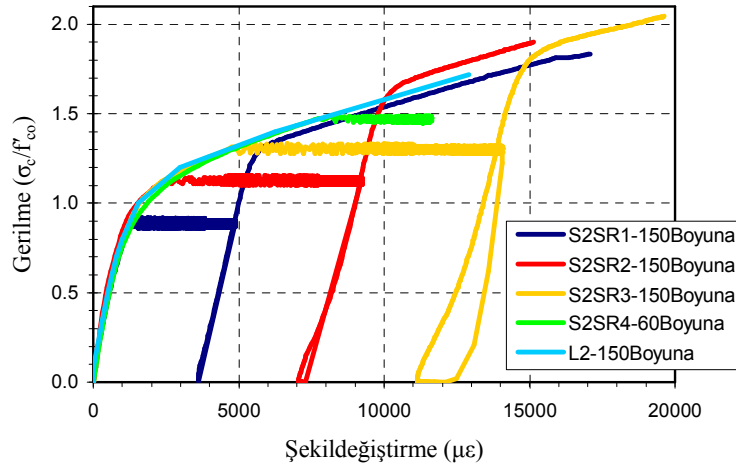
Numune Adı	Numune Yaşı	Gerilme Düzeyi	Başlangıç Şekildeğiştirme (mm/mm)	Sünme Şekildeğiştirme (mm/mm)	ϵ_{cc} ($\mu\epsilon$)	f'_{cc} (MPa)
S2SR1	146	0.90 f'_{co}	0.0016 (0.0013)	0.0035 (0.0035)	0.0182 (0.0170)	57.26
S2SR2	165	0.65 f'_{cc}	0.0039 (0.0028)	0.0059 (0.0064)	0.0169 (0.0151)	59.31
S2SR3	186	0.75 f'_{cc}	0.0056 (0.0043)	- (0.0140)	- (0.0207)	63.92
S2SR4	158	0.85 f'_{cc}	0.0074 (-)	- (-)	- (-)	62.43

150 mm ve 60 mm ölçüm boylarından alınan boyuna şekildeğiştirme değerlerinde tüm numunelerde bir miktar fark olduğu görülmektedir; buna göre sabit gerilme altında numunedeki şekildeğiştirmelerin daha çok şekildeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği orta kısımda meydana geldiği söylenebilir. Numunelerin farklı ölçüm boylarından alınan şekildeğiştirmelerin zamana bağlı değişimi Şekil 6.62’de verilmiştir. S2SR3 ve S2SR4 numunelerinde boyuna şekildeğiştirmeölçerler, yüksek gerilme düzeyi nedeniyle yapıştırıcının numune yüzeyinden ayrılmasıyla deney başladıktan yaklaşık üç saat sonra devre dışı kalmışlardır.



Şekil 6.62: Sabit Gerilme Altında Numunelerin Zamana Bağlı Şekildeğiştirmeleri

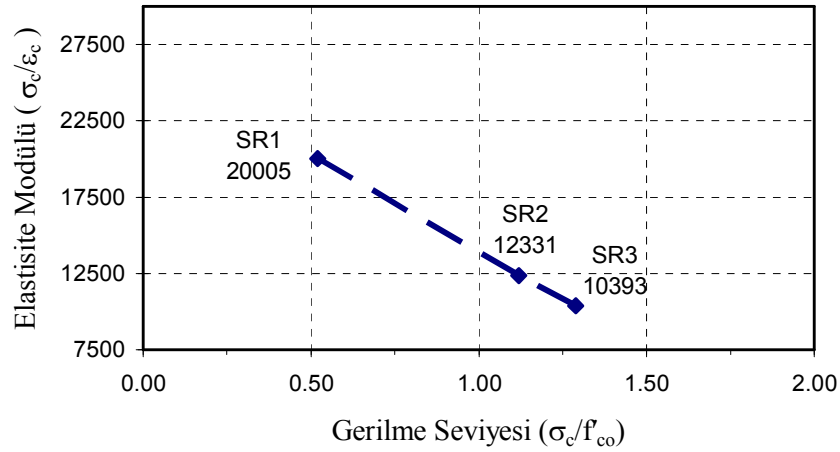
Numuneler üzerindeki yük boşaltıldıktan sonra 0.002 şekildeğiştirme/dakika yükleme hızıyla denenmişlerdir. Numunelerin tüm deney boyunca gösterdikleri gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin değişimi 150 mm ölçüm boyundan alınan değerlere göre Şekil 6.63’de verilmiştir. S2SR4 numunesinde yerdeğiştirmeölçerlerden sağlıklı bir şekilde veri alınamadığı için, bu numunede şekildeğiştirmeölçerlerinden alınan verilerden yararlanılmıştır.



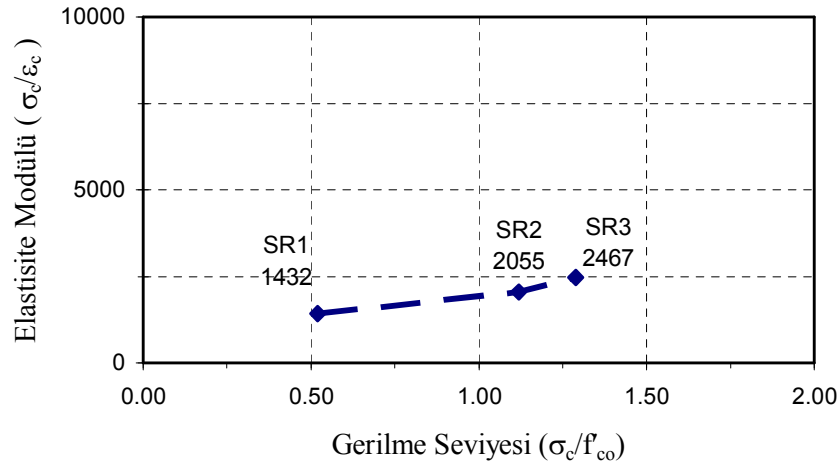
Şekil 6.63: Numunelerin Tüm Deney Boyunca Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

Numunelerin ortaya koydukları şekildeğiştirme davranışlarına bakıldığında, monoton artan yük altında denenен numunelere göre sabit gerilme altında bekletilen

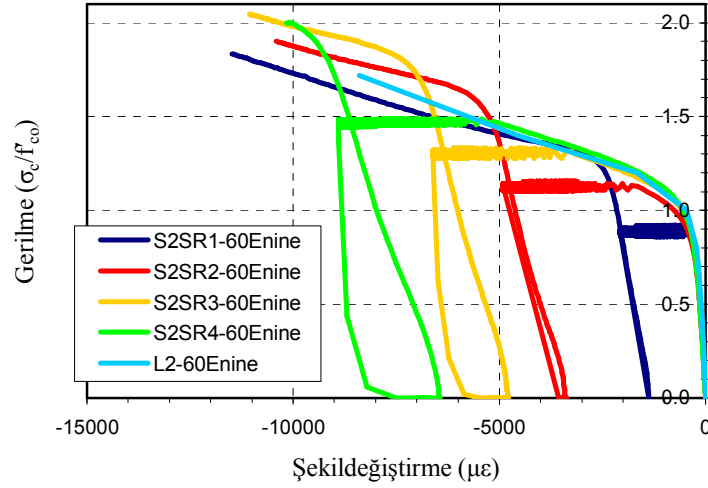
numunelerin daha büyük şekildeğiştirme değerlerine ulaştıkları görülmektedir; buna göre yükleme süresinin uzamasıyla sargılı betonun şekildeğiştirme kapasitesini arttığı söylenebilir. Numuneler üzerindeki yük boşaltıldıktan sonra göçene kadar tekrar yüklendiklerinde, monoton artan yük altında denenen numunelerde olduğu gibi iki doğrulu bir davranış göstermişlerdir; bu da sargının bu gerilme düzeylerinde betonun yapısının tamamen bozulmasına engel olduğunu göstermektedir. Birinci doğrunun eğiminin gerilme düzeyi arttıkça bir miktar azaldığı görülmektedir, Şekil 6.64. İkinci doğrunun eğiminin monoton artan yük altında denenen numunelerin ortalama değerine yakın olması, sünme etkisinin sargının üzerinde belirli bir etkisi olmadığını göstermektedir, Şekil 6.65. Numunelerin enine şekildeğiştirme davranışları da benzer bir şekilde oluşmuştur, Şekil 6.66.



Şekil 6.64: Birinci Doğrunun Eğiminin Gerilme Seviyesine Göre Değişimi

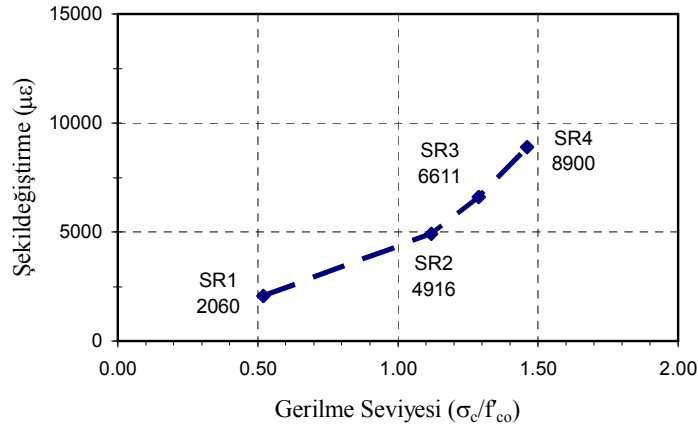


Şekil 6.65: İkinci Doğrunun Eğiminin Gerilme Seviyesine Göre Değişimi



Şekil 6.66: Numunelerin Gerilme-Enine Şekildeğiştirme Davranışları

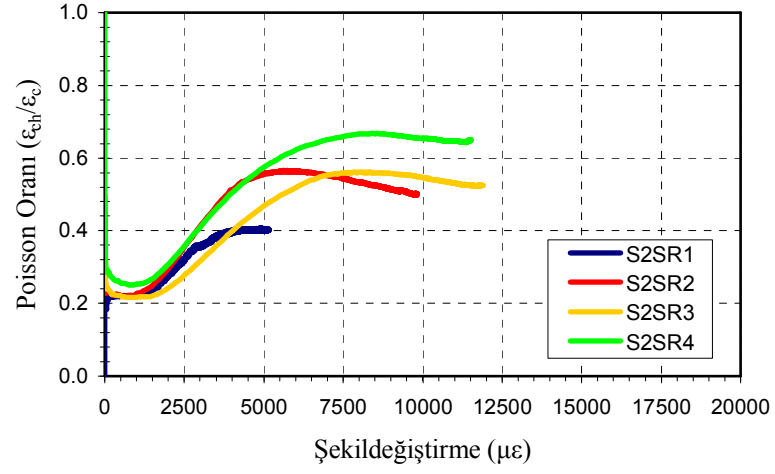
Numunelerin ortaya koydukları gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerine bakarak, $0.52 f_{cc}$, $0.65 f_{cc}$ ve $0.75 f_{cc}$ sabit gerilme seviyelerinde lifli polimer sargının betonu sünme etkilerine karşı koruyabildiği söylenebilir. $0.85 f_{cc}$ gerilme düzeyinde ise sargılı beton 50 saatlik süre sonunda kritik denebilecek şekildeğiştirme seviyelerine ulaşmıştır, Şekil 6.67.



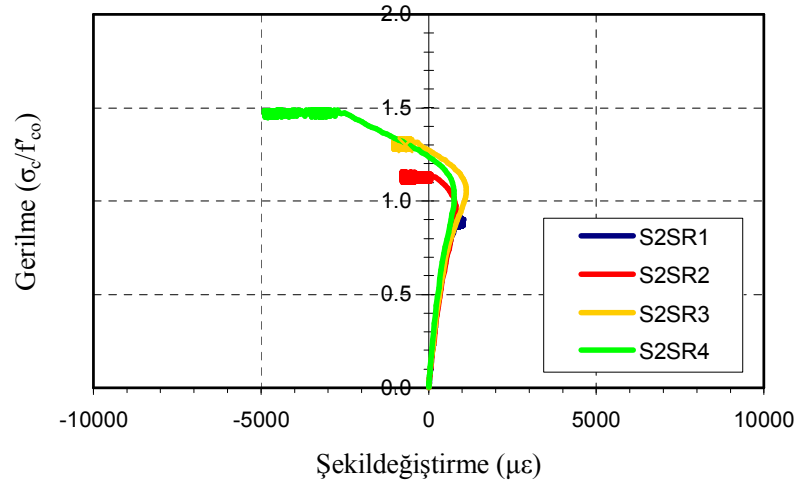
Şekil 6.67: Enine Şekildeğiştirmelerin Gerilme Seviyesine Göre Değişimi

Numunelerin sabit gerilme altındaki, Poisson oranının ve hacimsel şekildeğiştirmelerinin değişimlerine bakılarak lifli polimer sargının betonun yapısını koruduğu anlaşılabılır. Sargısız betonda dayanımın %80'i üzerindeki sabit gerilmeler altında Poisson oranı bir süre sonra 0.5 değerini aşar ve betonda göçme oluşur. Deneylerde kullanılan tüm gerilme seviyeleri $0.8 f_{cc}$ değerinden büyüktür. LP sargı betondaki hasarı kısıtlamış ve Poisson oranı ve hacimsel şekildeğiştirme değerlerinin

belli bir aralık arasında değişen değerler almalarına sebep olmuştur, Şekil 6.68, Şekil 6.69.



Şekil 6.68: Numunelerde Sabit Gerilme Altında Poisson Oranının Değişimi



Şekil 6.69: Numunelerde Sabit Gerilme Altında Hacimsel Şekildeğiştirme

Tablo 6.17: Literatürdeki Bazı Çalışmalar

Çalışma	Numune Tipi	Beton Dayanımı (MPa)	Sargı Katı	Gerilme Düzeyi (σ_c/f_{co})	Süre	Şekildeğiştirme	Sonuç
Naguib ve Mirmiran (2003)	150x300	29	2	0.15	100 gün	0.0006	Göçme Görülmedi
				0.30		0.0012	
Berthet ve diğ. (2006)	150x300	24.5	1	1.2	6 saat	0.013	Göçme
			2	1.7	70 saat	0.034	Göçme Görülmedi
			3	1.8		0.032	
Kaul ve diğ. (2006)	150x300	42.5	2	0.40	150 gün	-	Göçme Görülmedi
		47.5		0.60			

Tablo 6.17’de özet bilgileri verilen çalışmalarda da görüldüğü gibi lifli polimer kompozit malzeme ile betonun sargılanması beton dayanımının altındaki değerlerde şekildeğiştirmeyi oldukça kısıtlarken; beton dayanımının çok üstündeki değerlerde, beton büyük eksenel şekildeğiştirme değerlerine ulaşmasına rağmen göçmeyi önlemektedir. Ayrıca Berthet ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına bakılarak daha fazla sargı katına sahip numunelerin sünmeye karşı daha büyük direnç gösterdikleri söylenebilir.

7. DENEY SONUÇLARININ MODELLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde daha önce üçüncü bölümde bahsedilen, lifli polimer sargılı betonun dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinin bulunması için araştırmacılar tarafından önerilen analitik modeller ile çalışmada monoton artan yük altında denenen numunelerden elde edilen deneysel sonuçların karşılaştırılmasına her seri için ayrı olarak yer verilmiştir. Analitik modellerin sonuçları serideki üç numunenin dayanım ve şekildeğiştirmelerinin ortalaması ile karşılaştırılmıştır.

L0 serisi numunelerin deneysel ve analitik sonuçları Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1: L0 Serisi Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune Adı	Deneysel		Samaan		İlki-2004		Lam ve Teng		İlki-2008	
	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}
M2L0a	54.36	0.0115	71.48	0.0277	51.76	0.0253	60.76	0.0170	63.97	0.0261
M2L0b	58.34	0.0139								
M2L0c	57.32	0.0145								
Deneysel/Model			0.792	0.480	1.095	0.5256	0.932	0.782	0.885	0.509

L1 serisi numunelerin deneysel ve analitik sonuçları Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2: L1 Serisi Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune Adı	Deneysel		Samaan		İlki-2004		Lam ve Teng		İlki-2008	
	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}	f_{cc}	ϵ_{cc}
M2L1a	52.22	0.0117	71.48	0.0277	51.76	0.0253	60.76	0.0170	63.97	0.0261
M2L1b	57.77	0.0135								
M2L1c	53.52	0.0123								
Deneysel/Model			0.7625	0.4512	1.053	0.4940	0.897	0.735	0.852	0.479

L2 serisi numunelerin deneysel ve analitik sonuçları Tablo 7.3’de verilmiştir.

Tablo 7.3: L2 Serisi Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune Adı	Deneysel		Samaan		İlki-2004		Lam ve Teng		İlki-2008	
	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}
M2L2a	54.36	-	71.48	0.0277	51.76	0.0253	60.76	0.0170	63.97	0.0261
M2L2b	52.51	0.0136								
M2L2c	54.01	0.0128								
Deneysel/Model			0.750	0.476	1.036	0.521	0.882	0.776	0.838	0.505

L3 serisi numunelerin deneysel ve analitik sonuçları Tablo 7.4’de verilmiştir.

Tablo 7.4: L3 Serisi Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune Adı	Deneysel		Samaan		İlki-2004		Lam ve Teng		İlki-2008	
	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}	f'_{cc}	ϵ_{cc}
M2L3a	55.92	0.0198	71.48	0.0277	51.76	0.0253	60.76	0.0170	63.97	0.0261
M2L3b	52.63	0.0158								
M2L3c	52.29	0.140								
Deneysel/Model			0.750	0.596	1.035	0.653	0.882	0.972	0.838	0.633

Bu karşılaştırmalardan görüldüğü gibi model sonuçları sargılı beton dayanımı ve karşı gelen şekildeğiştirmeyi deneysel sonuçlardan daha büyük olarak göstermektedir. Sadece İlki ve diğ. (2004) tarafından önerilen model dayanım açısından güvenli tarafta kalmaktadır. Yükleme hızının artmasıyla sargılı beton dayanımında oluşan artışla deneysel sonuçlar ve model sonuçları birbirine yaklaşmaktadır. Lam ve Teng (2003) tarafından önerilen hariç, modeller şekildeğiştirme değerlerini belirleme konusunda zayıf kalmışlardır.

8. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada 150x300 mm boyutlarındaki silindirik beton elemanlar, iki kat karbon lifli polimer ile güçlendirilerek, monoton artan veya sabit gerilme altında denenmişlerdir. Çalışmada incelenen değişkenler; yükleme hızı ve gerilme seviyesidir. Deneyler sırasında farklı ölçüm boylarından veriler toplanarak, gerçeğe olabildiğince yakın değerler elde edinilmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen önemli sonuçlar şöyledir:

LP sargılı betonun dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesini büyük oranda artırmaktadır.

Yükleme hızının artmasıyla sargılı beton dayanımında da artış gözlemlenmiştir. En hızlı yüklenen numunelerde orta hızda yüklenen numunelere göre %6 daha fazla dayanım elde edilmiştir.

LP sargılı beton iki doğrulu bir davranış göstermektedir. İlk bölümde beton davranışa hakimken, ikinci bölümde LP sargı devreye girer. Liflerde, enine şekildeğiştirme kapasitesine ulaşıldığında göçme oluşur. Davranışın ilk bölümü yükleme hızındaki değişimle farklılık gösterirken, ikinci bölümün davranışının yükleme hızından bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Yükleme hızındaki artışla ilk doğrunun eğiminde logaritmik bir artış gözlemlenirken, ikinci doğrunun eğimi çalışmada denen tüm hızlarda yakın değerler almıştır.

LP sargılı beton davranışının ilk bölümü, sargısız betona benzer bir davranış göstermiştir.

Farklı yükleme hızlarında dayanımda oluşan farklar, büyük oranda LP sargılı beton davranışının ilk doğrusunun, ikinci doğruya bağlandığı dönüş noktasının yükleme hızının değişimiyle farklı gerilme seviyelerinde oluşmasından kaynaklanmaktadır. Yükleme hızındaki artışla, bu dönüş noktası daha yüksek gerilme seviyelerinde oluşmaktadır.

Lifli polimer sargı, M2L3a numunesi hariç üreticinin verdiği şekildeğiştirme değerine erişmeden kopmuştur. Tüm numuneler ortalama %9.7 enine

şekildeğiştirme değerlerine ulaşmıştır. Bu değer üreticinin verdiği değerin %36 altındadır.

Farklı yükleme hızları altında denenen tüm serilerde elde edilen ortalama enine şekildeğiştirmeler yakın değerlerdedir; enine şekildeğiştirmenin yükleme hızından bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Bu da karbon LP malzemenin yükleme hızından bağımsız davranış göstermesiyle açıklanabilir.

Sargısız betonda Poisson oranı 0.5 değerini aştıktan sonra betonda göçme olduğu kabul edilir. Lifli polimer sargının etkisiyle bu Poisson oranı 0.6 ile 0.75 arasında değişen değerler almıştır.

Yükleme hızının artmasıyla hacimsel şekildeğiştirme davranışının eğiminin değiştiği nokta daha yüksek gerilme seviyelerinde oluşmuştur; yükleme hızının artmasıyla numunelerin kısalmadan, genişleme davranışına geçmeleri daha büyük gerilmelerde ortaya çıkmıştır.

Sargılı beton için, bu çalışmada incelenen modellerin, dayanımı deneysel sonuçlara göre fazla tahmin ettikleri görülmüştür; sadeceİlki ve diğ. tarafından önerilen model güvenli tarafta kalmıştır. Modeller genel olarak şekildeğiştirme değerlerini belirlemede zayıf kalmışlardır.

LP sargı sünme etkilerine karşı betonun yapısını koruyabildiği gözlemlenmiştir. Sargısız betonda dayanımın %80'inden büyük sabit gerilme seviyelerinde bir süre sonra göçme gerçekleşirken sargılı beton durumunda bu çalışmada kullanılan $0.90 f'_{co}$, $1.12 f'_{co}$ ($0.65f'_{cc}$), $1.29 f'_{co}$ ($0.75f'_{cc}$), ve $1.46 f'_{co}$ ($0.85f'_{cc}$) gerilme düzeylerinde sargılı betonda göçme gerçekleşmemiştir. $0.90 f'_{co}$, $1.12 f'_{co}$, $1.29 f'_{co}$ gerilme düzeylerinde numunedeki enine şekildeğiştirme değerlerinin kritik sınırlara ulaşmayacağı belirlenmiştir. $1.46 f'_{co}$ ($0.85f'_{cc}$) gerilme düzeyinde ise lifli polimer şeritlerde kopmaya neden olabilecek enine şekildeğiştirme değerlerine ulaşılmıştır.

Sabit yük altında bekletilen numuneler daha sonra göçme oluşana kadar yüklenerek denendiklerinde dayanım olarak monoton artan yükle denenen numunelere göre bir kayıp olmadığı gözlemlenmiştir. Bu numuneler monoton artan yükle denenen numunelere göre daha büyük şekildeğiştirme değerlerine ulaşmışlardır; bu da yükleme süresinin artışıyla numunelerin daha büyük şekildeğiştirmelere ulaşabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- ACI 440**, (2001). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" ACI Committee 440
- Ahmad, S.H. and Shah, S.P.** (1985). "Behavior of hoop confined concrete under high strain rates", *ACI Journal*, Vol. 82, No. 5, pp. 634-647
- Au, C. and Buyukozturk, O.** (2005). "Effect of fiber orientation and ply mix on fiber reinforced polymer-confined concrete", *J. Compos. Const.*, Vol. 9, No. 5, pp. 397-407.
- Berthet, J.F., Ferrier, E., Hamelin, P., Al Chami, G., Theriault, M., Neale, K.W.** (2006). "Modelling of the creep behavior of FRP-confined short concrete columns under compressive loading", *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 53-62
- Ciupala, M.A., Pilakoutas, K. and Mortazavi, A.A.** (2007). "Effectiveness of FRP composites in confined concrete", *Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-8*, Patras, Greece, July, pp. 252-253.
- Das, B., Sahu, S.K. and Ray, B.C.** (2007). "Effects of loading speed on the failure behaviour of FRP composites", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, Vol. 79, No. 1, pp. 45-52
- De Lorenzis, L. and Tepfers, R.** (2003). "Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with fiber reinforced polymer composites", *J. Compos. Const.*, Vol. 7, No. 3, pp. 219-237.
- Dilger, W.H., Koch, R. And Kowalczyk, R.** (1984). "Ductility of plain and confined concrete under different strain rates", *ACI Journal*, Vol. 81, No. 1, pp. 73-81
- Eibl, J. and Schmidt-Hurtienne, B.** (1999). "Strain rate constitutive law for concrete", *Jour. Eng. Mech.*, Vol. 125, No. 12, pp. 1411-1420.

- Ersoy, U. ve Özcebe, G.** (2004). "Betonarme", Evrim Yayınları, İstanbul.
- Ilki, A. and Kumbasar, N.** (2002). "Behavior of damaged and undamaged concrete strengthened by carbon fiber composite sheets", *Struct. Eng. and Mech.*, Vol. 13, No. 1, pp. 75-90.
- Ilki, A. and Kumbasar, N.** (2003). "Compressive behaviour of carbon fibre composite jacketed concrete with circular and non-circular cross-sections", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 381-406.
- Ilki, A., Kumbasar, N. and Koc, V.** (2004). "Low strength concrete members externally confined with FRP sheets", *Struct. Eng. and Mech.*, Vol. 18, No. 2, pp. 167-194.
- Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C. and Kumbasar, N.** (2006). "Axial behavior of RC columns retrofitted with FRP composites", *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, Vol. 66, pp. 301-316.
- Ilki, A., Demir, C. and Kumbasar, N.** (2007). "Effects of pre-damage and cyclic compression on axial behavior of FRP jacketed concrete", *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*, 2007.
- Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C. and Kumbasar, N.** (2008). "FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns", *ASCE Jour. of Mat. in Civ. Eng.*, Vol. 20, No. 2, pp. 169-188.
- Iravani, S., MacGregor, J.G.** (1998). "Sustained load strength and short-term strain behavior of high-strength concrete", *ACI Mat. Jour.*, Vol. 95, No. 5, pp. 636-647.
- Karabinis, A.I. and Rousakis, T.C.** (2002). "Concrete confined by FRP material: a plasticity approach", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 923-932.
- Kaul, R., Ravindrarajah, R.S., and Smith, S.T.** (2006). "Deformational behavior of FRP confined concrete under sustained compression", *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Miami, Florida, December, pp. 207-210.

- Lam, L. and Teng, J.G.** (2003a). “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 471-489.
- Lam, L. and Teng, J.G.** (2003b). “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns”, *J. Reinf. Plast. Comps.*, Vol. 22, No. 13, pp.1149-1186
- Lam, L. and Teng, J.G.** (2004). “Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete”, *J. Comp. Const.*, Vol. 8, No. 6, pp. 539-548.
- Lam, L., Teng, J.G., Cheung, C.H. and Xiao, Y.** (2006). “FRP-confined concrete under axial cyclic compression”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 949-958.
- Mandal, S., Hoskin, A. and Fam, A.** (2005). “Influence of concrete strength on confinement effectiveness of fiber-reinforced polymer circular jackets”, *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 3, pp. 383-392.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.** (1988). “Theoretical stress-strain behavior of concrete”, *ASCE Jour. of Struct. Eng.*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- Matthys, S., Toutanji, H. and Taerwe, L.** (2006). “Stress-strain behavior of large-scale columns confined with FRP composites”, *ASCE Jour. of Struct. Eng.*, Vol. 132, No. 1, pp. 123-133.
- Mirmiran, A. and Shahawy, M.** (1997). “Behaviour of concrete columns confined by fiber composites”, *J. Struct.Eng.*, Vol. 123, No. 5, pp. 583-590.
- Naguib, W. and Mirmiran, A.** (2003). “Creep analysis of axially loaded fiber reinforced polymer-confined concrete columns”, *Jour. Eng. Mech.*, Vol. 129, No. 11, pp. 1308-1319.
- Neville, A.M.** (2003). “Properties of Concrete”, Pearson Education Limited, Essex
- Okoli, O.I. and Abdul-Latif, A.** (2002). “Failure in composite laminates: overview of an attempt at prediction”, *Composites: Part A*, Vol. 33, pp. 315-321.

- Ray, B.C.** (2006). "Effects of changing environment and loading speed on mechanical behavior of FRP Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, No. 12/2006, pp. 1227-1240.
- Rochette, P. and Labossiere, P.** (2000). "Axial testing of rectangular column models confined with composites", *ASCE Jour. of Comp. for Cons.*, Vol. 4, No. 3, pp. 129-136.
- Rousakis, T.C., Karabinis, A.I. and Kiouisis, P.D.** (2007). "FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modeling", *Engineering Structures*, Vol. 29, pp. 1343-1353.
- Rusch, H.** (1960). "Research toward a general flexural theory for structural concrete", *ACI Journal*, Vol. 57, No. 7, pp. 1-28.
- Saafi, M., Toutanji, H. and Li, Z.** (1999). "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes", *ACI Mat. Journal*, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.
- Saiidi, M.S., Johnson, R. and Maragakis, E.Z.** (2006). "Strain Rate Effects on Strength of Unidirectional FRP Fabrics and Bond to Concrete", *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 2006.
- Samaan, M., Mirmiran, A. and Shahawy, M.** (1998). "Model of concrete confined by fiber composites", *ASCE Jour. of Struct. Eng.*, Vol. 124, No. 9, pp. 1025-1031.
- Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N.** (1982). "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates", *ACI Journal*, Vol. 79, No. 1, pp. 13-27.
- Shah, S.P., and Chandra, S.** (1970). "Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading", *ACI Journal*, Vol. 67, No. 42, pp. 816-824.
- Shan, B., Xiao, Y. and Guo, Y.** (2006). "Residual performance of FRP retrofitted RC columns after being subjected to cyclic loading damage", *ASCE Jour. of Comp. for Cons.*, Vol. 10, No. 4, pp. 304-312.
- Shao, Y., Zhu, Z. and Mirmiran, A.** (2006). "Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 959-968.

- Soroushian, P., Choi, K.B. and Alhamad, A.** (1986). “Dynamic constitutive behavior of concrete”, *ACI Journal*, Vol. 83, No. 2, pp. 251-259.
- Tamuzs, V., Tepfers, R., You, C-S., Rousakis, T., Repelis, I., Skruls, V. and Vilks, U.** (2006). “Behavior of concrete cylinders confined by carbon-composite tapes and prestressed yarns-1. Experimental data”, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 42, No. 1, pp. 13-32.
- Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J., Zdoumba, D., Plakantaras, V. and Akritidis, E.** (2006). “Limitations of FRP jacketing in confining old-type reinforced concrete members in axial compression”, *J. Comp. Const.*, 10(1), 13-25.
- Toutanji, H.A.** (1999), “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets”, *ACI Mat. Jour.*, Vol. 96, No. 3, pp. 397-404.
- Wang, Y.C. and Restrepo, J.I.** (2001). “Investigation of concentrically loaded reinforced concrete columns confined with glass fiber-reinforced polymer jackets”, *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp. 377-385.
- Wang, L.M. and Wu, Y.F.** (2007). “Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test”, *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 493-505.
- Washa, G. and Fluck, P.G.** (1950). “Effect of sustained loading on compressive strength and modulus of elasticity of concrete”, *ACI Journal*, Vol. 46, No. 50, pp. 693-700

EK – A

Dilger ve diğ. (1984) Tarafından Önerilen Model

Sargısız beton durumu için dayanım ve karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri;

$$\begin{aligned} f'_{cd} &= f'_{co} (1.14 + 0.03 \log \dot{\epsilon}) & \dot{\epsilon} < 1.6 \times 10^{-5} \\ f'_{cd} &= f'_{co} (1.38 + 0.08 \log \dot{\epsilon}) & \dot{\epsilon} > 1.6 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{cod} &= (0.5 - 0.23 \log \dot{\epsilon} + 0.07 f'_{co} \log \dot{\epsilon}) \times 10^{-3} & \dot{\epsilon} < 1.6 \times 10^{-5} \\ \epsilon_{cod} &= (1.3 - 0.06 \log \dot{\epsilon} + 0.07 f'_{co} \log \dot{\epsilon}) \times 10^{-3} & \dot{\epsilon} > 1.6 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

Mander ve diğ. (1988) Tarafından Önerilen Model

Sargısız beton durumu için elastisite modülü, dayanım ve karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri;

$$\begin{aligned} E'_{cd} &= D_E E_c \\ f'_{cd} &= D_f f'_{co} \\ \epsilon_{cod} &= D_\epsilon \epsilon_{co} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_E &= \frac{1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}}{0.035 (f'_{co})^3} \right]^{1/6}}{1 + \left[\frac{0.00001}{0.035 (f'_{co})^3} \right]^{1/6}} \\ D_f &= \frac{1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}}{0.035 (f'_{co})^2} \right]^{1/6}}{1 + \left[\frac{0.00001}{0.035 (f'_{co})^2} \right]^{1/6}} \\ D_\epsilon &= \frac{1}{3D_f} \left(1 + \sqrt{\frac{1 + D_f^2}{D_E}} \right) \end{aligned}$$

ÖZGEÇMİŞ

Kayhan Kolcu, 1983 yılında Kadıköy’de doğmuştur. 2002 yılında Kadıköy Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazanmış 2006 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği programında yüksek lisansa başlamıştır.