YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Frp Uyg. Eks. Yüklü Bet. Kol. Davranışı

Doktora Tezi

TAHSİN TURCAY

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC) : R 150/623

Kayıt No : 3739

Geldiği Yer : Fen Bilimler Ens.

Tarih : 27.12.2007

Fiyat : 8,85

Fatura No :

Ayniyat No : 23

Ek :

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Demirbaş No:.....

2550702039999318070000 1

FRP UYGULANMIŞ EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN DAVRANIŞI

623

İnşaat Yük. Müh. Tahsin TURGAY

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi	:	29 Haziran 2007
Tez Danışmanı	:	Prof. Zekeriya POLAT (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı	:	Doç. Dr. H. Orhun KÖKSAL (YTÜ)
Jüri Üyeleri	:	Prof. İbrahim EKİZ (YTÜ)
	:	Prof. Dr. Cengiz KARAKOÇ (BÜ)
	:	Prof. Dr. Muzaffer ELMAS (SAÜ)
	:	Doç. Dr. Alper İLKİ (İTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ....i
KISALTMA LİSTESİ....iv
ŞEKİL LİSTESİ....v
ÇİZELGE LİSTESİ....xiii
ÖNSÖZ....xiv
ÖZET....xv
ABSTRACT....xvi
1. GİRİŞ....1
1.1 Genel Bilgiler....1
1.2 Önceki Çalışmalar....3
1.3 Çalışmanın Amacı....7
2. KOMPOZİT MALZEMELER....8
2.1 Lifli Polimerler (LP)....9
2.1.1 Lifler....9
2.1.2 Liflerin Özellikleri....9
2.1.3 Liflerin Fiziksel Özellikleri....10
2.1.3.1 Kimyasal Direnç....10
2.1.3.2 Ultraviole ışınıma karşı direnç....10
2.1.3.3 Elektrik iletkenliği....10
2.1.3.4 Basınç Mukavemeti....10
2.1.3.5Rijitlik....10
2.1.3.6.Yangın....10
2.1.4 Liflerin Mühendislik Özellikleri....11
2.1.4.1 Dokumalar(Wraps)....11
2.1.4.2 Levhalar....11
2.1.4.3 Lif Seçimi....11
2.1.4.4 Yapıştırıcılar....12
2.2 FRP Kompozitlerin Yapısı....12
2.3 FRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri....13
2.4 Eksenel ve Eksantrik Yüklü Kolonların Güçlendirilmesi....14
2.4.1 FRP Kompozit Malzemesi ile Güçlendirme Yöntemleri....16
2.4.1.1 Sargılama....17
2.4.1.2 Lif Doğrultusunda Sargılama....17

2.4.1.3 Prefabrike Manto Kullanılması (Prefabricated Shell Jacketing)....18
2.4.2 Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması....18
2.4.2.1 Uygulama Yönünden....18
2.4.3 Kesit Şeklinde İyileştirme....20
2.5 Sargılı Betonarme Kolonun Tipik Davranışı ve Göçme Modu....21
2.5.1 Dairesel Betonarme Kolon....21
2.5.2 Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolon....22
2.5.3 FRP Sargılı Betonun Basınç Dayanımı....23
3. DENEYSEL ÇALIŞMA....24
3.1 FRP Kompozit Malzemesi ile Kolonların Sarılması....24
3.2 Deney Programı....24
3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler....25
3.3.1 Beton Özellikleri....25
3.3.2 Çelik Özellikleri....26
3.3.3 FRP Kompozit Malzemesi Özellikleri....26
3.3.4 Karbon Lifli Kompozitlerin Sarılması....26
3.3.5 Deney Platformu....27
3.3.6 Ölçüm Düzeni....27
3.4 Diğer Araştırmacılara Ait Yapılmış Deneysel Çalışmalar: 34
3.5 Deneylerde Kullanılacak Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özellikleri....38
3.6 C1 Serisi Kolon Deneyleri 38
3.6.1 C1L4S8 Kolonu....38
3.6.2 C1L4S12 Serisi Kolonu....41
3.6.3 C1L8S8 Kolonu....43
3.6.4 C1L8S12 Kolonu....44
3.7 C2 Serisi Kolon Deneyleri 52
3.7.1 C2L4S8 Kolonu....53
3.7.2 C2L4S12 Kolonu....54
3.7.3 C2L8S8 Kolonu....57
3.7.4 C2L8S12 Kolonu....58
3.8 C3 Serisi Kolon Deneyleri....61
3.8.1 C3L4S8 Kolonu....61
3.8.2 C3L4S12 Kolonu....63
3.8.3 C3L8S8 Kolonu....64

3.8.4 C3L8S12 Kolonu....65
3.9 C4 Serisi Kolon Deneyleri....68
3.9.1 C4L4S8 Kolonu....68
3.9.2 C4L4S12 Kolonu....70
3.9.3 C4L8S8 Kolonu....73
3.9.4 C4L8S12 Kolonu....74
3.10 C5 Serisi Kolon Deneyleri....82
3.10.1 C5L4S8 Kolonu....82
3.10.2 C5L4S12 Kolonu....85
3.10.3 C5L8S8 Kolonu....88
3.10.4 C5L8S12 Kolonu....90
3.11 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi....97
4 . BETONARME KOLONLARDA SARGILANMIŞ(KUŞATILMIŞ) BETON İÇİN BÜNYESEL MODELLER....101
4.1 Giriş....101
4.2 Çelik Sargılı Kolonlar....101
4.2.1 Richart, Brandtzaeg and Brown (1929)....101
4.2.2 Mander Beton Modeli (1988)....102
4.2.2.1 Etkili Sargı Basıncı ve Sargı Etkinlik Katsayısı....109
4.2.2.2 Sipiral ya da Halka Enine Donatıyla Sargılanmış Kesitlerde Sargı Etkinlik Katsayısı....110
4.2.2.3 Dikdörtgen Sargılı Kolonlar için Sargı Etkinlik Katsayısı....111
4.2.2.4 Sargılanmış Beton Taşıma Gücü....113
4.2.2.5 Betondaki En Büyük Birim Kısalma....114
4.2.3 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre Sargılı Beton Modeli(2006)....115
4.3 LP Sargılanmış Kolonlar....117
4.3.1 Saadatmanesh, Ehsani ve Li Sargı Modeli (1994)....117
4.3.2 Samaan, Mirmiran ve Shahawy Sargı Modeli (1998)....119
4.3.3 Saafi, Toutanji ve Li Sargı Modeli (1999)....122
4.3.4 Yung C. Wang ve Jose I. Restrepo Sargı Modeli, (2001)....124
4.3.5 Lam ve Teng Sargı Modeli (2003)....126
4.3.6 Xiao ve Wu Sargı Modeli (2000)....129

4.3.7 Köksal Modeli (2006) ve Köksal Modelinin LP Sargılı Betonarme Kolonlara Uygulanması.....130
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....167
KAYNAKLAR.....171
ÖZGEÇMİŞ.....178

SİMGE LİSTESİ

A	Etkinsiz kuşatılmış beton kesit alanı
A_{co}	Beton çekirdek alanı
A'_{co}	Net beton çekirdek alanı
A_{et}	Etkin kuşatılmış beton kesit alanı
A_{sh}	Sargı (kuşatma) donatısı toplam alanı
A_{shx}	x doğrultusundaki sargı donatısı toplam alanı
A_{shy}	y doğrultusundaki sargı donatısı toplam alanı
A_{si}	i. donatı sırasındaki toplam boyuna donatı alanı
A_{sp}	Spiral veya halka sargı donatısı kesit alanı
a_0	Malzeme sabiti
a_1	Malzeme sabiti
a_2	Malzeme sabiti
b	Kesit genişliği
b_0	Malzeme sabiti
b_1	Malzeme sabiti
b_2	Malzeme sabiti
b_{co}	Kesit genişliği doğrultusunda en dış sargı donatısı merkezleri arasındaki mesafe
b'_{co}	Kesit genişliği doğrultusunda en dış sargı donatısı dıştan dışa mesafe
c	Kohezyon açısı
d	Sargı donatısının çapı
d_i	i. donatı sırasının beton kesitin üst kenarına olan mesafe
d_s	Spiral veya halka sargı donatısının merkezleri arasındaki mesafe
E	Elastisite Modülü
E_c	Betonun elastisite modülü
E_s	Çeliğin elastisite modülü
E_{FRP}	Lifli polimerin elastisite modülü
E_{sec}	Sekant elastisite modülü
f_{cc}	Betonun çok eksenli yük altında taşıma gücü
f'_c	Sargısız beton basınç dayanımı
f_s	Çelikteki basınç veya çekme gerilmesi
f_{sh}	Sargı donatısındaki gerilme
f_{si}	i. donatı sırasındaki gerilme
f_{su}	Çeliğin kopma gerilmesi
f_{t1}	Sıvı kuşatma basıncı
f_{t2}	Elastik ve izotropik malzeme kuşatma etkisi altındaki eksenel yük dayanımı
f_{u2}	Elastik ve izotropik malzeme eksenel yük dayanımı
f_y	Çeliği akma gerilmesi
f_{yh}	Sargı donatı çeliğinin akma dayanımı
h	Kesit yüksekliği
h_{co}	Kesit yüksekliği doğrultusunda en dış sargı donatısı merkezleri arasındaki mesafe
h'_{co}	Kesit yüksekliği doğrultusunda en dış sargı donatısı dıştan dışa mesafe
I_1	Gerilme tansörünün birinci invaryantı
I_2	Gerilme tansörünün ikinci invaryantı
J_2	Deviatörik gerilme tansörünün ikinci invaryantı
K	Düzeltme katsayısı
k	Malzeme sabiti
k_e	Sargılama etkinlik katsayısı
kd	Tarafsız eksen derinliği

k_1	Poisson oranına bağlı kuşatma gerilmesi katsayısı
k'_1	Poisson oranına bağlı bir fonksiyon
k_2	Azaltma katsayısı
k_{2x}	x doğrultusundaki azaltma katsayısı
k_{2y}	y doğrultusundaki azaltma katsayısı
M	Moment
M_y	Akma momenti
m	Çeliğin malzeme özelliklerine bağlı bir katsayı
n	LP sargı sayısı
P	Eksenel kuvvet
P_d	Betonarme kesit eksenel yük dayanımı
R	Eğrilik yarıçapı
r	Betonun elastisite ve sekant elastisite modüllerine bağlı bir fonksiyon
r_1	Çeliğin kopma ve pekleşme birim şekildeğiştirmeleri arasındaki fark
s	Kuşatma donatısı adım veya konma mesafesi
s'	Kuşatma donatıları arasındaki temiz mesafe
S_i	i. donatı sırasındaki toplam çekme veya basınç kuvveti
s_l	Komşu iki boyuna donatı merkezleri arasındaki en büyük mesafe
s_{lx}	x doğrultusunda komşu iki boyuna donatı merkezleri arasındaki en büyük mesafe
s_{ly}	y doğrultusunda komşu iki boyuna donatı merkezleri arasındaki en büyük mesafe
t	LP sargı kalınlığı
w'	Komşu iki boyuna donatı arasındaki temiz mesafe
x	Beton birim şekil değiştirmesine bağlı bir fonksiyon
y_m	Etkili sargılanmış alanı veren eğrinin en büyük değeri
α	Toplam gerilme çarpanı
α_1	Sargı donatısının doğrultusu ile kesitin kenar doğrultusu arasındaki açı
α_2	Malzeme sabiti
α_3	Etkili sargılanmış alanı veren eğrinin şeklinin kabulüne göre değişen bir katsayı
ε_c	Betondaki birim şekildeğiştirme
ε'_c	Betondaki en büyük gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme
ε_{cm}	Betonarme enkesit en üst basınç lifindeki birim şekil değiştirme
ε_{cu}	Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme
ε_{cy}	Çekme donatısının akma anına karşılık gelen betonarme enkesit en üst basınç lifindeki birim şekil değiştirme
ε_{rup}	LP sargıdaki en büyük birim şekildeğiştirme
ε_s	Donatıdaki birim şekildeğiştirme
ε_{sf}	Donatı kopma gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme
ε_{sh}	Çeliğin pekleşme başlangıç birim şekildeğiştirmesi
ε_{si}	i. donatı sırasındaki birim şekildeğiştirme
ε_{sp}	Kaplama betonunun dökülme anındaki birim şekildeğiştirme
ε_{sy}	Çeliğin akma birim şekildeğiştirmesi
ε_l	Sargılanmış beton en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme
ϕ	Donatı çapı
ϕ_1	Betonun içsel sürtünme açısı
γ	Ağırlık merkezi çarpanı
φ	Elemanın birim uzunluğundaki dönme (eğrilik)
φ_y	Akma eğriliği
λ	Etkili sargılanmış beton alanının çekirdek alanına oranı

μ	Poisson oranı
θ	Etkili sargılanmış beton alanını tanımlayan eğrinin başlangıç eğiminin açısı
ρ_c	Deviatorik gerilme (θ=90°)
ρ_{co}	Toplam boyuna donatı alanının beton çekirdek alanına oranı
ρ_s	Kuşatma donatısının hacimsel oranı
ρ_t	Deviatorik gerilme (θ=0°)
ρ_{sx}	x doğrultusundaki sargı donatısının hacimsel oranı
ρ_{sy}	y doğrultusundaki sargı donatısının hacimsel oranı
σ_l	Sargı gerilmelerinin küçük olanı
σ_m	Ortalama gerilme
σ_1	Sargılanmış beton basınç dayanımı
σ_2	2 doğrultusundaki sargı basıncı
σ_3	3 doğrultusundaki sargı basıncı
σ'_3	Etkili sargılama basıncı
σ_{3e}	Eşdeğer sargılama basıncı
σ_{3ex}	x doğrultusundaki eşdeğer sargı basıncı
σ_{3ey}	y doğrultusundaki eşdeğer sargı basıncı
σ_{3x}	x doğrultusundaki sargı basıncı
σ'_{3x}	x doğrultusundaki etkili sargı basıncı
σ_{3y}	y doğrultusundaki sargı basıncı
σ'_{3y}	y doğrultusundaki etkili sargı basıncı

KISALTMA LİSTESİ

DP	Drucker Prager
FRP	Fiber donatılı polimer (Fiber Reinforcement Polymer)
KLP	Karbon lifli polimer
LP	Lifli polimer
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 FRP ve yumuşak çeliğin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....13
Şekil 2.2 FRP ile sarılmış beton için gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi, (Purba ve Mufti, 1999).....16
Şekil 2.3 Betonarme kolonlar için tipik sargılama yöntemleri a) FRP tabakası ile tamamen sarma, b) FRP tabakası ile sürekli kısmî spiral sargı, c) FRP tabakası ile kısmî sargılama.....17
Şekil 2.4 Lif doğrultusunda sargı makinesiyle sargılanma.....18
Şekil2.5 Dikdörgen kolonda şekil iyileştirme ve FRP sargı ile güçlendirme (a) köşe yuvarlatmasız, (b) köşe yuvarlatmalı.....19
Şekil 2.6 Prefabrik FRP kabuklar: (a) solda Mander tipi, sağda kabuk tipi, (b) kabuğun montaj için açılması (Teng vd., 2002).....20
Şekil 2.7 FRP kompozitte yanal kuşatma(sargı) basıncı.....21
Şekil 2.8 FRP ile sargılanmış betonarme enkesitinde, etkili sargı çekirdeği.....22
Şekil 2.9 FRP sargılı kare betonarme numunenin göçme modu (YTÜ deneyleri, 2006) 22
Şekil 3.1 Numune köşelerinin çeyrek daire kesitinde yuvarlatılması.....27
Şekil 3.2 YTÜ deneylerinde deney düzeneği ve kolon donatı detayı.....28
Şekil 3.3 Numune üzerinde LVDT'lerin montajı.....29
Şekil 3.4 Betonarme kolonların sonlu elemanlar ile modellenerek doğrusal olmayan analizi sonucunda eksenel kısalmaların kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).....30
Şekil 3.5 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda, kırılmaya neden olacak çekme gerilmelerinin kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).....31
Şekil 3.6 Eksenel yük etkisinde C1L4S8 BA kolonun yük altındaki dörtte birine ait yanal şekil değiştirme dağılımı.....33
Şekil 3.7 Basınç kırılmasında, boyut etkisi (Kim ve Tae Yi, 2002).....36
Şekil 3.8 Boyut etkisinden dolayı basınç altında kırılma şekilleri (Kim ve Tae Yi, 2002).....36
Şekil 3.9 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda, kırılmaya neden olacak maksimum çekme gerilmeleri dağılımı.....37
Şekil 3.10 Beton kolonlarda sonlu elemanlar analizi ile boyut etkisinin incelenmesi (Michele Broccal and Zdenek P. Bazant, 2001).....37
Şekil 3.11 C1L4S8 kolonu ve beton dökülmeden önce hazırlanmış donatı kafesi.....39
Şekil 3.12 C1L4S8 kolonu üst kısmında deney esnasında oluşan çatlaklar.....39
Şekil 3.13 C1L4S8 kolonu alt kısmında oluşan çatlaklar.....40
Şekil 3.14 C1L4S8 kolonu deney sonrasında üst kısımda oluşmuş çatlaklar.....40
Şekil 3.15 C1L4S12 kolonu.....41
Şekil 3.16 C1L4S12 kolonu (yükleme esnasında ilk çatlakların oluştuğu kısım).....41
Şekil 3.17 C1L4S12 kolonu, artan yükle beraber açılan çatlak.....42
Şekil 3.18 C1L4S12 kolonu (üst başlığında görülen ezilme).....42
Şekil 3.19 C1L8S8 kolonu.....43
Şekil 3.20 C1L8S8 kolonu (yüklemeyle beraber ilk görülen çatlak).....43
Şekil 3.21 C1L8S8 kolonu (alt uç kısmında oluşan çatlak).....44
Şekil 3.22 C1L8S12 serisi kolonu.....44
Şekil 3.23 C1L8S12 kolonu (üst uç bölgesi).....45
Şekil 3.24 C1L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....46
Şekil 3.25 C1L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....46
Şekil 3.26 C1L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....47
Şekil 3.27 C1L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....47

Şekil 3.28 Betonarme kolonun sonlu elemanlar programında hatalı ve hatasız olarak sonlu elemanlara ayrılması (Köksal vd., 2006).....48
Şekil 3.29 Deney sonuçlarından elde edilen üç LVDT'nin ortalama okumaları ile geometrik hatalar etkisinde modellenen kolonların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre eksenel yük-eksenel kısalma eğrilerinin karşılaştırılması (Köksal vd., 2006).....49
Şekil 3.30 İdeal kolondaki sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ağır hasar görmüş bölgeye yerleştirilen kritik LVDT okumalarının karşılaştırılması (Köksal vd., 2006).....50
Şekil 3.31 C2L8S12 kolonuna ait: (a) Şiddetli oturmuş kenar (b) Komşu kenardaki makro çatlaklar (Köksal vd., 2006).....51
Şekil 3.32 C2L4S12 kolonu.....53
Şekil 3.33 C2L4S8 kolonu (deney sonrası alt uç bölgesi).....54
Şekil 3.34 C2L4S12 serisi kolonu.....54
Şekil 3.35 C2L4S12 serisi kolonu.....55
Şekil 3.36 C2L4S12 kolonu (deney sonrası göçme bölgesinin görünümü).....56
Şekil 3.37 C2L8S8 kolonu.....57
Şekil 3.38 C2L8S8 kolonu (deney sonrası kolon alt uç bölgesi).....57
Şekil 3.39 C2L4S12 kolonu.....58
Şekil 3.40 C2L8S12 kolonunda oluşan hasarın yakın plan hasar görünümü.....58
Şekil 3.41 C2L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....59
Şekil 3.42 C2L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....59
Şekil 3.43 C2L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....60
Şekil 3.44 C2L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....60
Şekil 3.45 C3 kolon deneylerine ait düzenek.....61
Şekil 3.46 C3L4S8 kolonu.....62
Şekil 3.47 C3L4S8 kolonu (deney sonrası alt kısımda LP sargının kopması sonrasında görülen beton ezilmeleri).....62
Şekil 3.48 C3L4S12 kolonu.....63
Şekil 3.49 C3L4S12 kolonu (göçme yüküne ulaşmasıyla beraber LP sargı ve etriyenin kopmuş olduğu görülmüştür).....63
Şekil 3.50 C3L8S8 serisi kolonu.....64
Şekil 3.51 C3L8S8 kolonu, deney sonrası 64
Şekil 3.52 C3L8S12 kolonu.....65
Şekil 3.53 C3L8S12 kolonu, deney sonrası.....65
Şekil 3.54 C3L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....66
Şekil 3.55 C3L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....66
Şekil 3.56 C3L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....67
Şekil 3.57 C3L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....67
Şekil 3.58 C4L4S8 kolonu.....68
Şekil 3.59 C4L4S8 kolonu göçme yüküne ulaşması sonucu LP sargının kopması.....69
Şekil 3.60 C4L4S8 kolonu kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı.....69
Şekil 3.61 C4L4S8 kolonu, kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı (başka bir açıdan görünümü).....70
Şekil 3.62 C4L4S12 kolonu.....71
Şekil 3.63 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar).....71
Şekil 3.64 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar).....72
Şekil 3.65 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar ve orta gövdeye doğru ilerleyen çatlaklar).....72
Şekil 3.66 C4L8S8 kolonu.....73
Şekil 3.67 C4L8S8 kolonu, deney sonrasında kopan LP sargının el ile sıyrılması ile

görülebilen betondaki hasar.....74
Şekil 3.68 C4L8S12 kolonu.....75
Şekil 3.69 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar.....75
Şekil 3.70 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar.....76
Şekil 3.71 C4L8S12 kolonu deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar.....76
Şekil 3.72 C4L8S12 kolonu, deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar.....77
Şekil 3.73 C4L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....78
Şekil 3.74 C4L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....78
Şekil 3.75 C4L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....79
Şekil 3.76 C4L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....79
Şekil 3.77 C1,C2,C4 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....80
Şekil 3.78 C1,C2,C4 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....80
Şekil 3.79 C1,C2,C4 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....81
Şekil 3.80 C1,C2,C4 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....81
Şekil 3.81 C5L4S8 kolonu.....82
Şekil 3.82 C5L4S8 kolonu, deney esnasında kolon orta bölgesinde LP sargı kopma.....83
Şekil 3.83 C5L4S8 kolonu, deney sonrasında kolon üst başlık kısmından kopan LP sargının daha sonra el ile açılmasıyla ortaya çıkan betondaki hasar.....83
Şekil 3.84 C5L4S8 kolonunda deney sonrası oluşan hasarın değişik açılardan görünüşü(Göçme yüküne yakın LP sargı yüzeyinde buruşmalar oluşmuştur).....84
Şekil 3.85 C5L4S12 kolonu.....85
Şekil 3.86 C5L4S12 kolonu, deney sonrası oluşan hasar.....86
Şekil 3.87 C5L4S12 kolonu, deney sonrası alt kısımda LP sargının açılmasıyla görülebilen betondaki hasar.....87
Şekil 3.88 C5L4S12 kolonu, deney sonrası LP sargının el ile sıyrıldıktan sonra beton ile temas eden yüzeyin görünüşü.....87
Şekil 3.89 C5L8S8 kolonu.....88
Şekil 3.90 C5L8S8 kolonu, deney sonunda LP sargının koptuktan sonra el ile sıyrıldığında betonda görülen hasar.....89
Şekil 3.91 C5L8S12 kolonu.....90
Şekil 3.92 C5L8S12 kolonu, deney sonrası kolon orta kısmı üzerinde oluşan hasar.....91
Şekil 3.93 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar.....91
Şekil 3.94 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar 92
Şekil 3.95 C5L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....93
Şekil 3.96 C5L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....93
Şekil 3.97 C5L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....94
Şekil 3.98 C5L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....94
Şekil 3.99 C1,C3,C5 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....95
Şekil 3.100 C1,C3,C5 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....95
Şekil 3.101 C1,C3,C5 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....96
Şekil 3.102 C1,C3,C5 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....96
Şekil 3.103 Farklı sargı biçimlerine göre deney kolonlarının taşıma kapasitesi.....99
Şekil 3.104 Benzer kolonların farklı sargı biçimleriyle kıyaslanması.....100
Şekil 4.1 Silindir beton numuneler için üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Whittaker A., 2000).....103
Şekil 4.2 Çok eksenli gerilme altında gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Chen ve Han, 1988).....104

Şekil 4.3 Mander beton modeli (1988).....105
Şekil 4.4 Yanal sargı basıncı (Whittaker A., 2000).....106
Şekil 4.5 Mander beton modelinde kuşatılmamış beton alanının elde edilişi için yapılan kabul.....106
Şekil 4.6 Sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış çekirdek inkiest alanı (Mander vd., 1988).....108
Şekil 4.7 Etriyeli/sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış beton çekirdek enkesit alanı (Mander vd, 1988).....108
Şekil 4.8 Dikdörtgen kesitler için yanal sargı basınçları ile kuşatılmış beton dayanım hesabı (Mander vd., 1988).....114
Şekil 4.9 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2006)' a göre sargılı ve sargısız beton için gerilme şekildeğiştirme eğrileri.....116
Şekil 4.10 Kolon kesitlerinin köşelerde yapılan yuvarlatmalar (A.B.Y.Y.H.Y., 2006).....117
Şekil 4.11 Samaan, Mirmiran ve Shahawy sargı modeli, (1998).....120
Şekil 4.12 FRP sargılı beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....123
Şekil 4.13 Dörtgen kolonda FRP sargı ve enine donatı ile çift sargı etkisi.....125
Şekil 4.14 FRP sargılı betonda Lam ve Teng Modeli.....127
Şekil 4.15 FRP Sargılı dikdörtgen kesit için etkin sargılı beton alanı.....128
Şekil 4.16 Haigh-Westergaard asal gerilme uzayı.....132
Şekil 4.17 Deviatorik düzlemde basınç durumu akma kriterleri.....133
Şekil 4.18 Asal gerilmeler uzayında basınç durumu için akma kriterleri.....133
Şekil 4.19 Drucker-Prager kriteri (a) Meridyenler (θ=0°), (b) π düzlemi (Chen ve Han, 1988).....134
Şekil 4.20 (a) Haigh-Westergaard gerilme uzayı, (b) gerilme durum noktasının deviatorik düzlemde izdüşümü (Chen ve Han 1988).....134
Şekil 4.21 Üç eksenli testler için eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Köksal, 2006).....135
Şekil 4.22 Üç eksenli basınç gerilmesine maruz beton silindir.....136
Şekil 4.23 Beton kırılma kriterinin gerilme uzayındaki geometrik temsili (Köksal, 2006)...137
Şekil 4.24 Sargılı beton için gerilme şekildeğiştirme ilişkisi (Saenz, 1964).....137
Şekil 4.25 LP kompozit sargıda gerilme.....139
Şekil 4.26 C1L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....143
Şekil 4.27 C1L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....143
Şekil 4.28 C1L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....144
Şekil 4.29 C1L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....144
Şekil 4.30 C3L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....145
Şekil 4.31 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....145
Şekil 4.32 C3L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....146
Şekil 4.33 C3L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....146
Şekil 4.34 C3L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....147
Şekil 4.35 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....147
Şekil 4.36 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....148
Şekil 4.37 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....148
Şekil 4.38 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....149
Şekil 4.39 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....149
Şekil 4.40 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....150
Şekil 4.41 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....150

Şekil 4.42 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....151
Şekil 4.43 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....151
Şekil 4.44 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....152
Şekil 4.45 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....152
Şekil 4.46 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....153
Şekil 4.47 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....153
Şekil 4.48 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....154
Şekil 4.49 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....154
Şekil 4.50 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....155
Şekil 4.51 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....155
Şekil 4.52 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....156
Şekil 4.53 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....156
Şekil 4.54 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....157
Şekil 4.55 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....157
Şekil 4.56 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....158
Şekil 4.57 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....158
Şekil 4.58 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....159
Şekil 4.59 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....159
Şekil 4.60 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....160
Şekil 4.61 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....160
Şekil 4.62 Berthet (2005) deneyleri eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....161

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 GFRP, CFRP ve AFRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Head,1996).....14
Çizelge 2.2 E-Cam, HT-Karbon ve Aramid lifler arasında, karşılaştırma (Meier ve Winistorfer, 1995).....15
Çizelge 2.3 Kolon güçlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılması (Teng. vd., 2002).....19
Çizelge 3.1 Deney kolonlarının taşıma gücü ve şekildeğiştirme artış oranları.....97
Çizelge 4.1 Yapılmış LP sargılı kolon deneyleri ve uygulanan analitik modelin karşılaştırılması (Deney/Analitik Model).....162
Çizelge 4.2 128 Adet CFRP sargılı beton numunesi için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model).....164
Çizelge 4.3 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (Deney/Analitik model).....165
Çizelge 4.4 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model).....165
Çizelge 4.5 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (*Etriye katkısı ihmal edildiğinde*) (Deney/Analitik model).....165
Çizelge 4.6 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistisel karşılaştırılması (*Etriye katkısı ihmal edildiğinde*)(Deney/Analitik model).....165

ÖNSÖZ

Depremler her yıl Dünya da binlerce kişinin hayatını kaybetmesine ve büyük maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu global olgu, giderek daha iyi anlaşılmaya ve mevcut yapıların depreme karşı performansları sorgulanmaya ve araştırılmaya başlanmıştır. Deprem bölgelerindeki yapıları uygun bir şekilde güçlendirmek ve onarmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Betonarme yapı kolonlarının en etkili ve hızlı güçlendirme ve onarım tekniklerden biride FRP tabakası ile dıştan sargılamadır. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, sargılı beton davranış modelleri incelenerek, Köksal (2006) tarafından, Drucker-Prager akma/kırılma kriterinin sargılanmış (kuşatılmış) beton davranışını içine alacak şekilde değiştirilmesi ile önerilen tek parametreli kırılma kriteri kullanılarak elde edilen model LP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

Doktora çalışmamın en başından beri, beni yönlendiren, çalışmamın şekillenmesi ve ortaya çıkmasında büyük teşvik ve yardımlarını gördüğüm ve bu doktora çalışması süresince benden hiçbir şekilde ilgi ve desteğini esirgemeyen daima destekleyip cesaretlendiren çok değerli hocam Sayın Prof. Zekeriya POLAT'a, her türlü yardım, yönlendirme ve önerilerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hasan Orhun KÖKSAL'a içtenlikle teşekkür ederim.

Deneysel çalışmada fikir veren, yol gösteren, önerileriyle katkı sağlayan değerli hocalarım Sayın Prof. İbrahim EKİZ'e, Sayın Prof. Dr. Muzaffer ELMAS'a, Sayın Prof. Dr. Cengiz KARAKOÇ'a, ve Sayın Doç. Dr. Alper İLKİ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında emeği geçen Teknisyen Şemsettin Tonkuş'a, LP sargı malzemesinin temininde yardımcı olan BASF, Degussa Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş. ye teşekkür ederim.

Şu ana kadar yaptığım çalışmalarımda her türlü olanak ve imkanları sağlayan, çok değerli babam Âkil TURGAY'ı saygıyla anarken, her zaman yanımda olan annem Gündüz TURGAY ve kardeşim Safiye TURGAY'a çok teşekkür ediyor sevgilerimi sunuyorum.

Tahsin TURGAY

Ocak 2007

ÖZET

Günümüzde pekçok yapı güçlendirme teknikleri mevcuttur ve bunlar yapıların değişik özelliklerine göre çeşitlilik gösterir; yapıların taşıyıcı sistem özellikleri, mevcut durumu, yapısal ve yapısal olmayan malzeme özellikleri, kullanım amacı, değişik mimari ve komşu binalarla ilgili kısıtlamalar vb. etkenler, güçlendirme tekniğinin seçiminde rol oynar. Çoğu güçlendirme tekniklerinin zahmetli, uygulamasında mekânın kullanımını uzun süreli engellemesi, geniş uygulama yer ve şantiye alanına ihtiyaç göstermesi, yapının mimari ve işlevsel özelliklerini değiştirmeye zorlayan teknik gereklilikler, imalat sürecinin uzun ve genelde yapının tamamen boşaltılması gerektirmesi gibi pek çok nedenle; geleneksel güçlendirme teknikleri yerini yeni tekniklere bırakmaya zorlanmaktadır. Lifli polimer (FRP/LP) sargı tekniği yeni tekniklerdendir. LP kompozit sargılar; betonarme kolonlarda yaygın ve başarı ile kullanılmakta ve mevcut kolonların eksenel taşıma gücünü, kesme mukavemetini ve şekildeğiştirme kapasitesini yükseltmektedir.

Literatürde LP sargılı beton elemanlarla ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışma bulunmasına rağmen, bunların önemli bir kısmının sargılı standart silindir deneylerine dayanmasından dolayı, betonarme yapı elemanlarına doğrudan uygulanmaları tartışmaya açıktır. Bu bağlamda, yeni bir güçlendirme yöntemi olan LP sargılı kare kesitli betonarme kolon davranışını yansıtan model oluşturabilmek amacıyla; bu tez kapsamında YTÜ Yapı Laboratuarında 20 adet büyük ölçekli betonarme kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Betonarme kolonların düğüm noktaları bölgesindeki ve eksenel basınç dayanım, sünek davranış kapasitesi, kesme-kayma mukavemetindeki zafiyetleri giderme amacıyla sargı tekniklerine başvurulması ihtiyacı göz önünde tutularak; kurgulanan ve gerçekleştirilen deneylerde, LP sargının kolon numunelerinin uç bölgelerinde bir ve iki kat, tamamında bir ve iki kat kullanılmasının, eksenel yükler altında kolon davranışını nasıl etkilediği incelenmiş ve analitik modellemeleri yapılmıştır.

LP sargılı kolonlar için; Samaan vd., Saafi vd., Saadatmanesh vd., Xao ve Wu, Lam ve Teng, vd. bünyesel beton modelleri irdelenerek, Köksal (2006) tarafından, Drucker-Prager akma/kırılma kriterinin sargılanmış beton davranışını içine alacak şekilde değiştirilmesi ile önerilen ve silindirik basınç dayanımını değişken olarak kullanan bünyesel beton modeli, LP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler dâhil, literatürde yer alan 136 adet deney sonucu değişik modeler için karşılaştırıldığında; önerilen amaca uygun geliştirilmiş Köksal modelinin en yakın tahminlerde bulunabildiği görülmüş ve gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sargı, Sargı Etkisi, LP/FRP Sargı Etkisi Analitik Modelleri

ABSTRACT

Although there are different techniques for retrofitting of existing structures, a unique retrofitting technique may not be valid for every structures due to the structural and non-structural material characteristics, function of structure, architectural plan, several restrictions coming the using architectural issues and the neighboring structure interactions. Since there are difficulties in retrofitting structures such as improper architectural requirements like the need of a large construction area, long term retrofitting work and out of service of the building. There is an increasing need for the new retrofitting ways to win such problems. FRP composite wrapping is a new technique that improves confinement so increase the axial load capacity and the ductility of the member.

Although there is a large variety of theoretical and experimental investigations on confinement of concrete cylinders with FRP, experimental investigations on large scale reinforced columns confined with FRP are not so much in literature, so it is difficult to evaluate the actual behavior to take into account by such cylindrical experiment samples tested under axial loading. So the direct applications of the results to the RC structures are still open to discuss. In this study twenty 1/1 large scale square RC column specimens are tested at the YTU Structural Laboratory. In order to rehabilitate the structural joint and to improve axial compressive strength, ductility and shear capacity, these reinforced concrete members strengthened by FRP composite wrapping in four different forms; by partial wrapping at the top and the bottom ends, complete wrapping in one and two layers. Test results indicate that a slight increase on the axial compressive strengths and the significant improvement on ductility by FRP composite externally applied to the specimens in transverse direction are occurred.

The existing analytical models for the FRP confined concrete are also presented and compared point out that same results; the data of 136 experiments are compared with analytical models of Samaan etc., Saafi etc., Saadatmanesh etc., Xao and Wu, Lam and Teng Models; are also studied in comparisons. As a new approach adopting Köksal model introducing a new failure criterion of concrete under triaxial compression, the stress-strain relations of twenty of the experimentally tested RC columns confined with FRP jackets are successfully predicted. The model had been previously developed for RC columns confined with conventional reinforcement of steel (Köksal, 2006).

Proposed model gives more reasonable predictions than most of the existing model's and the comparisons made between the predicted results and experimental data indicate that the accuracy of stress-strain curves of confined concrete with FRP composite are quite enough.

Key words: Confinement, FRP, Analytical Model for Confinement

1.GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Betonarme elamanlar, ekonomik ömürleri süresince; yangın, korozyon, deprem gibi dış, veya aşırı yükleme, kullanım amacının değişmesi gibi olumsuz yönde etkiler altında, hasara uğrayabilir. Türkiye, Dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin (Alp-Himalaya) üzerinde bulunmaktadır. Deprem Bölgeleri Haritası'na (1996) göre Ülkemizin %92'si deprem bölgelerinde yer almakta, nüfusumuzun %70'i I. ve II. derece deprem bölgelerinde yaşamaktadır. Ayrıca; son elli yıl içinde nüfus artışına ve iç göçlere bağlı olarak ortaya çıkan kaçak ve plansız yapılaşma sonucu, önemli oranda depreme dayanıksız, denetim dışı oluşmuş bir yapı stoğu ile karşı karşıya kalınmış durumdadır. Mevcut yapı stoğunun 2006 Deprem Yönetmeliğine uygun olacak şekilde hızla iyileştirilmesi gerekmektedir. İyileştirme araçlarından biri de, ekonomik olması durumunda onarım ve güçlendirmedir. Bu amaçla hazırlanan 2006 Deprem Yönetmeliğine (DBYBHY-2006) göre yapıların onarım ve/veya güçlendirilmesine karar verilmesinde, Deprem Yönetmeliğindeki olası şiddetli bir deprem altında binanın davranışının ne olacağının tahmin edilmesi ve kapasite tasarım yaklaşımına göre yapının istenilen davranışa uymaya zorlanması gerekmektedir (Celep, 2000). Yapıldığı yıllarda geçerli olan deprem yönetmeliğine göre boyutlandırılmış olan bir bina, değişik gelişmeler nedeniyle analiz ve tasarım parametreleri değiştirilmiş yeni deprem yönetmeliğine göre yetersiz durumda kalmış olabilir. Örneğin 1998 ve 2006 Yönetmelikleri kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerini daha küçük öngörmüş ve bu nedenle 1975 yönetmeliğine uygun olarak yapılan çok sayıdaki kullanımda bulunan bina kolonları eksenel yük açısından güvensiz sayılabilecek bir duruma düşmüş olabilir:

$N_{d\max} \leq 0.5 fck.A_c$ (ABYYHY,1998 ve 2006)

$N_{d\max} \leq 0.6 fck.A_c$ (ABYYHY,1975)

Betonarme yapı elemanları için günümüzde çok değişik güçlendirme malzemeleri ve teknikleri mevcuttur. Modern ve kaliteli malzemeler genelde pahallı olup uygulaması daha çok özen ister. Dikkatsiz ve rastgele yapılacak uygulamada malzemeden beklenen verimin alınması mümkün değildir. Bu nedenle, onarım ve güçlendirme için malzeme seçimine özen gösterilmelidir. Şantiye koşullarında; uygulanabilirlik, onarım süresi, maliyet analizi, estetik, istenilen amaca uygunluk, yapının olası kullanım şekillerinin ve mimarisinin etkileri, onarım

sırasında yapının kullanımına getirilen kısıtlamalar malzeme seçiminde göz önünde tutulabilir.

Bu çalışmada kolonların eksenel yük taşıma kapasiteleri ile sünekliklerini artırmada son derece etkili olan lifli polimer (LP) malzemesinin kullanımı ve davranış üzerine etkileri incelenmektedir.

Uzun yıllar uçak ve otomobil üretiminde kullanılan lif takviyeli polimerlerin (Fiber Reinforced Polimer, FRP) yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılışı, Fardis ve Khalli'nin (1981) betonarme elemanlara cam lifi takviyeli polimer (CLP) sararak, sargı etkisini incelemesiyle başlamıştır.

Lif Takviyeli Polimer (LP) kompozit malzemelerin kullanımı; betonarme yapıların güçlendirilmesinde bilinen yöntemler olan çelik lamalarla sarma, kesit büyültme ve dıştan sonradan germe (post-tension) yöntemlerine göre, uygulanması daha kolay ve hızlı bir seçenektir. LP güçlendirme sistemlerinde, LP kompozit malzemeler betonarmeyi dıştan sararak kullanılır. LP sistemleri geleneksel güçlendirme tekniklerine göre birçok avantaj sağlar; hafiftirler, diğerlerine nazaran uygulanması kolaydır ve korozyona uğramazlar. Bu üstünlükleri nedeniyle, ülkemizde hızla yaygınlaşan bir onarım, güçlendirme (O/G) tekniği durumuna gelmiştir. LP ile güçlendirilmiş elemanların davranışı hakkında araştırmacılar tarafından çok sayıda bünyesel modeler ve çözümlemeler önerilmeye başlanmıştır.

Deprem etkileri karşısında, sistem iyileştirmenin önemli bir yolu da sünekliği artırmaktır (ACI Committee 440,2001). Yüksek şekil değiştirme kabiliyetli ve şekil değiştirirken taşıma gücünde önemli bir kayıp oluşturmadan deprem enerjisini dönüştürerek yeniden dağılıma izin veren elemanlara süneklik düzeyi yüksek elemanlar denir. Süneklik düzeyi yüksek yapı elemanları, dolayısıyla bu elemanları içeren yapı sistemleri göçmeden önce büyük plastik/kalıcı şekil değiştirmeler yapabilmekte ve bu suretle yapı tepkisini küçülterek can güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

FRP, hafif, korozyona dayanıklı, yüksek çekme dayanımına sahip bir malzemedir. Bu malzemelere istenilen biçim verilebilir, LP sistemlerinde lif ve reçine kullanımı, diğer geleneksel güçlendirme sistemleriyle kıyaslandığında; pahallı olmasına karşın uygulama kolaylığı, yer kaybı olmaması gibi üstünlükleri ile tercih edilebilen seçenekler oluşturabilmektedir. ACI Committee 440 Yönetmeliğinde (Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yapı elemanın dıştan LP sistemleriyle sargılama için tasarım

yönetmeliği) verilen bilgilere göre; LP, genelde betonarme yapıların dayanımını artırmak, mevcut kolon ve kirişlerde ise, dayanım ve sünekliği artırmak için kullanılabilir.

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarında; bu tez çalışması kapsamında, enine donatılı betonarme kolonların LP kompozit malzemesi ile sarıldığında oluşacak eksenel yük dayanım kapasitesi artış oranlarını incelenmek üzere bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

1.2 Önceki Çalışmalar

1990'lı yılların başlangıcında kolonları güçlendirmek için; ek donatılar kullanarak kolonları mantolamak veya çelik manto sarıp içersine çimento şerbeti enjekte etmek şeklinde başlıca iki yöntem kullanılmıştır. Çelik manto sarmak betonarme mantolamaktan daima daha etkili olmuştur. Ancak, her iki yöntemde de uygulama güçlüğü bulunmaktadır. Ayrıca, bu çeşit uygulama ile yapıda ağırlık artmakta ve çelik mantolar sert iklim koşullarında yeterli dayanım gösterememektedir (Ballinger, 1993). Son yıllarda, LP kompozitlerin kullanımının hızla yaygınlaşmasıyla betonarme kolonların güçlendirilmesinde çelikle kuşatarak güçlendirmenin yerini LP sargıların aldığı görülmektedir. LP ile kolon güçlendirmenin en genel şekli dıştan LP tabakası ile sarma şeklinde olur. Betonarme kolonları çelik veya LP mantolama ile güçlendirme yöntemi, sağladığı yanal sargı etkisinden ötürü eksenel basınç dayanımını ve sünekliği oldukça artırmaktadır. Karbon lifli polimer (KLP) kompozit malzemesi ile sargı yöntemi yeni bir teknik olmasına rağmen betonarme elemanlara sarılmasıyla ortaya çıkan basınç dayanım kapasitesini ve eksenel gerilme-şekildeğiştirme davranışını açıklamak için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Mirmiran ve Shahawy (1997), FRP kompozit malzemeleri kullanarak ürettikleri tüp elemanlarla daire enkesitli beton elemanları sararak, bu tür bir sargılamanın elemanların eksenel basınç altındaki davranışına etkisini araştırmış ve bu yöntemin elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir.

Saadatmanesh ve diğ. (1997), mevcut yapılarda bulunan kusurları inceleyen bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış, yetersiz bindirme boyu ve enine donatı eksikliği bulunan köprü kolonları incelenmiştir. 1/5 ölçekli 2 adet daire, 2 adet dikdörtgen enkesitli sağlam temellere mesnetlenmiş kolon numunesi üretmişlerdir. Her iki en kesit türü için bir numunenin boyuna donatılarını sürekli, diğer numunenin boyuna donatılarını ise bindirmeli ekli olarak tasarlamışlardır. Bu kolonlara önceden hasar verilmiş ve sonrasında LP kompozit ile enine doğrultuda sarılarak

güçlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, güçlendirme işlemlerinin daire enkesitli kolonlarda etkili olduğu gibi dikdörtgen enkesitli kolonlarda da etkili olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş bütün kolonlarda eksenel yük taşıma ve süneklik kapasitelerinde artış kaydedilmiştir.

Seible ve diğ. (1997), deprem yönetmeliğine uygun olarak tasarlanmamış köprü kolonları ve bunların FRP kompozitle güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadan önce teorik bir çalışma yürüterek güçlendirme için gerekli kompozit kalınlığı üzerine bağıntılar geliştirmişlerdir. Farklı göçme şekilleri (kesme, eğilme, aderans kaybı) oluşacak kolonlarda yapılacak güçlendirme işlemi için farklı kalınlıkta kompozite ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Her iki durum için de uygulanacak kompozit kalınlığı kolon boyunca değişiklik göstermektedir. Geliştirilen kriterlere göre güçlendirilen kolonların performansı önemli oranda artmıştır. Deneylerde teorik olarak hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesinin üzerine çıkılmış, yerdeğiştirme sünekliği büyük ölçüde artmış ve aderans çözülmesi önlenmiştir.

Spoelstra ve Monti (1999), Mimiran ve Shahawy'nin yapmış oldukları testleri kullanarak, FRP sargılı dairesel kolonlar için, ampirik bir bağıntı sunmuşlardır; bu amaçla maksimum dayanım, maksimum şekil değiştirme, Sekant rijitliği, yanal yerdeğiştirme parametrelerini kullanmışlardır. Öne sürdükleri model, sadece FRP sargılı dairesel kolonlar ile sınırlı kalmıştır.

Yung, Wang ve Restrepo (2001), yaptıkları çalışmada; FRP sargılı dikdörtgen ve kare betonarme basınç elemanlarını eksenel yükler altında incelemişlerdir. Deneylerde kare kolon kullanmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçlardan FRP sargısının boyuna donatıda burkulmayı önlediğini görmüşlerdir. Bu deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre çift sargı etkisini (dual confinement effect); LP sargı ve çelik sargı etkisini birlikte dikkate alan bir matematik model önermişlerdir.

Xiao ve Wu (2000), maksimum dayanım kapasitesini; sargılı betonda sargı basıncı, sargı oranı, beton ve kompozit malzeme özelliklerine bağlı parametreler cinsinden, lineer teori ve deneysel verilere dayanarak bir bağıntıyı önermiştir.

M. Shahawy, A. Mirmiran ve T. Beitelman (2000), yaptıkları deneysel çalışmada, 152,5mm çapında ve 305mm yüksekliğinde 45 adet numuneyi, sargı etkisini görebilmek için, beş adet farklı sargı kombinasyonu kullanarak test etmişlerdir. Aynı zamanda kullandıkları test

numunelerini, Drucker Prager plastisite modelini sonlu elemanlara (ANSYS) uygulayarak test numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarını temel alarak LP sargılı betonun doğrusal olmayan davranışı için 4 parametreli bir bağıntı önermişlerdir.

Saatcioğlu ve Elnabelsy (2001), deprem tasarımı bugünkü koşullarla göre yapılmayan 1970 öncesi inşa edilen köprü kolonlarının FRP ile güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Mevcut köprü kolonlarının önemli bölümünü temsil eden, yetersiz enine donatısı ve bindirme boyu olan daire ve kare enkesitli konsol kolon numuneleri üretmişlerdir. Numuneler FRP ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmişlerdir. Deneyler sonucunda, referans numunesi olan daire ve kare enkesitli kolonlarda erken safhalarda aderans çözülmesi ile başlayan dayanım kaybı görülmüştür. Dairesel enkesitli kolonlarda yapılan güçlendirme, deprem performansını önemli ölçüde artırmıştır; İleri düzeyde yerdeğiştirmelere gidildiği halde aderans kaybı oluşmamıştır. Kare enkesitli kolonlarda uygulanan güçlendirme işlemi, aderans kaybının önlenmesi anlamında fazla başarılı olmamıştır. Bu kolonlarda sınırlı iyileşme elde edilmiştir.

Assa, Nishiyama ve Watanabe (2001a, 2001b), deneylerinde; 24 adet sargılı kolon, 34 adet normal dayanımlı beton, 31 adet yüksek dayanımlı betonarme kolon kullanmışlardır. Sargılı ve sargısız kolonlarda şekil-değiştirmeleri incelemişler ve bunlara dair gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini çizmişlerdir. Ancak geliştirdikleri model, sargı aralığı parametresini kapsamamaktadır, sadece düzenli sargı aralığını haiz dairesel kolonlar için uygundur. Bölgesel farklı sargı konfigürasyonuna sahip kolonlar için uygun değildir. Hesapta sadece çekirdek alan dikkate alınmış, örtü betonu gözardı edilmiştir

Toutanji (1999), yaptığı deneysel ve analitik çalışmasında, daire enkesitli beton elemanları farklı türden lif (cam ve karbon lif) sargıları ile güçlendirdikleri elemanların eksenel yükler altındaki davranışını incelemiş, deneyler sonucunda güçlendirilmiş elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesi gibi özelliklerinin büyük ölçüde geliştiğini göstermiştir. Sonuçta LP sargılı beton davranışının belirlenebilmesi için yeni bir analitik model sunmuştur.

İlki ve Kumbasar (2002) tarafından yapılan çalışmada 20 adet daire enkesitli, hasarlı ve hasarsız numuneler CFRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan ve tekrarlı yükler altında test edilmişlerdir. Bu çalışma sonucunda CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş elemanların dayanım ve şekil değiştirmesinin CFRP tabaka kalınlığı ile orantılı

olarak önemli ölçüde arttığı gösterilmiş olup önerdikleri analitik modeli, literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Marques, Silva ve Cavalcante (2004) yaptıkları çalışmada, LP ile sargılı dairesel ve karesel kısa kolonlarda eksenel yük davranışını matematik olarak modellemişlerdir. Bu modellemede, daha önce yayınlanmış Restrepo (2001)'un deney sonuçları kullanılmıştır. Sunulan modelin geçerliliği bu deney sonuçlarına göre test edilmiş ve kolonlarda gerilme şekildeğiştirme davranışı bakımından tatminkâr sonuçlar elde etmişlerdir.

Michel Samaan, Amir Mirmiran, Mohsen Shahawy (1998), 152.5X305mm boyutlarında silindirik 30 adet numune üzerinde deney yaparak, LP sargılı beton silindirleri çelik sargılı beton silindirler ile karşılaştırmıştır. Varolan sargı modellerini kullanmışlardır: Mander vd. (1988), Fardis ve Khalili (1982), Ahmad ve Shah (1982), Monti ve Spoelstra (1997). Bu modeller içersinde, FRP sargı modeline göre uyarlandığında en iyi sonucu Ahmad ve Shah (1982), Monti ve Spoelstra (1997)'nın sundukları model vermiştir. Hiçbir model, FRP sargılı betonda, maksimum dayanım kapasitesini yeterli yaklaşıklıkla tahmin edememiştir. Bu nedenle yazarlar, göçme yükünün belirlenmesi amacıyla yeni bir model sunmuşlardır. FRP sargılı betonda bilineer davranış için, Richard ve Abbott (1975)'nun 4 parametreli modelini yeniden düzenleyerek yeni bir bağıntı elde etmişlerdir.

Sheikh ve Yau (2002), sağlam temellere mesnetlenmiş konsol kolon numunelerinin güçlendirilmesini konu alan deneysel bir çalışma yapmışlardır. Dairesel enkesitli, enine donatı oranları ve aralıkları farklı 12 adet numune üretmişlerdir. Deneylerde eksenel yük seviyesi, FRP kompozitin türü ve kalınlığı değişken olarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda eksenel yük seviyesinin artırılmasının süneklik ve şekildeğiştirme kapasitesini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Eksenel yük oranı yüksek olan numuneler için FRP kompozitin sarım sayısının artırılması gerektiği belirtilmiştir. Enine donatı oranının artırılması ve aralığının düşürülmesi sonucu boyuna donatıların stabilesi artmış, daha sünek bir davranış elde edilmiş ve enerji yutma kapasitesinde önemli gelişme sağlanmıştır. Eksenel yük oranının yüksek olduğu numunelerde tek kat GFRP kompozitin, CFRP kompozitin yanında etkili performans gösteremediği görülmüştür. Genel olarak FRP kompozit ile güçlendirme işlemi kolonların dayanım, enerji yutma ve süneklik kapasitelerini geliştirmiştir. ACI 318-99'e uygun enine donatıya sahip numuneler, güçlendirilmiş numuneler eşit veya daha iyi performans sergilemiş olduğunu belirtmektedirler.

1.3 Çalışmanın Amacı

Betonarme yapıların sismik kuvvetlere karşı tasarımında; yapı elemanlarının göçme olmaksızın gerçekleşecek elastik ötesi şekildeğiştirmeler yapmasına izin verilir. Plastik şekildeğiştirmeler sayesinde ortaya çıkan enerjinin yutulması, yapının dinamik tepkisini azaltmaktadır. Betonarme elemanların sünek bir davranış sergileyerek göçmeden ortaya çıkan enerjiyi yutabilmesi için yeterli enine donatı ile sarılması gerekmektedir. Sargılı betonun davranışı, sargısız betona göre oldukça farklıdır. Sargı donatısının davranış üzerindeki en önemli etkisi; basınç dayanımını ve sünekliği artırmasıdır. Betonarme yapıların depremler karşısında gösterecekleri elastik ötesi davranışın doğru olarak belirlenmesi, sargılı betona etkiyen parametrelerin gerçekçi olarak tahmin edilebilmesine bağlıdır.

Sargılı betonun davranışı; enine donatı hacimsel oranı, aralık, çap ve dayanımı, boyuna donatının kesit içinde dağılımı, beton basınç dayanımı, yükleme hızı ve biçimi gibi parametrelere bağlıdır. Amaç bu parametrelerle, betonarme elemanın davranışlarının gerçeğe daha yakın sonuç veren davranış modelini geliştirmektir. Günümüze değin, sargılı beton için birçok gerilme-şekildeğiştirme modeli ve bağıntıları ortaya konulmuştur. Bunlardan en yaygın kabul görenleri; Richart vd. (1928), Priestley vd. (1981), Sheikh ve Uzumueri (1982), Mander vd. (1988), Saatçioğlu vd. (1995) olmuştur.

Bu çalışmanın amacı; öncelikle sargılı betonarme kolonların FRP kompozit malzemesiyle mesnet bölgelerinden ve tamamen sarılmış FRP sargılı betonarme kolonların davranışını incelemektir.

Daha önce yapılmış olan sargılı beton modeli önerileri dikkate alınarak (Köksal, 2006), öncelikle enine donatılı betonarme kolonların deneyleri gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Sonrasında uç bölgeler tek ve çift kat CFRP kompozit malzemesi ile sarılı eş donatı konfigürasyonuna sahip kolonların deneyleri yapılmış ve en sonunda ise tek ve çift kat tamamen sargılanmış betonarme kolonların deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylerden ve literatürdeki çalışmalardan elde edilen davranış hakkındaki bilgiler, daha önceki çalışmalarda önerilen modellerin kıyaslanmasında kullanılmış ve son olarak, betonarme kolonlar için önerilen kuşatılmış üç eksenli basınç etkisindeki model (Köksal, 2006), FRP kompozit malzemesi ile sargılanmış betonarme kolonlar içinde uygulanır hale getirilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Tarihsel gelişim içersinde insanın malzeme kullanımı incelendiğinde; genelde üç ana evre göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki, insanların doğada buldukları malzemeyi amaçlarına uygun biçimde kullanmaya çalıştıkları evredir. Malzeme kullanımı açısından önemli bir farklılığı içeren evre, doğadan sağlanan malzemenin biçimlendirilerek kullanılmaya başlandığı ve bunun sürdüğü dönemdir. Bu devrede, doğadan elde edilen malzeme bir hammadde gibi değerlendirilmiş, gitgide değişen ve gelişen tekniklerle kullanıcının amacına uygun şekilde biçimlendirilerek kullanılmıştır.

Belirli bilimsel gelişmeler ve buna bağlı olarak meydana gelen teknolojik ilerlemeler sonucunda, insanın doğadan sağladığı bu hammaddelere kendi bilgi ve deneyimini katarak sahip olduğu teknik olanaklarla yepyeni malzemeler ürettiği üçüncü bir aşamaya geçilmiştir. Bir tarih vermek gerekirse; sembolik olarak "Sanayi Devrimi" ile birlikte başladığı kabul edilen bu evrede, doğadan elde edilen hammadeler belirli işlemlerden geçirilerek, yeni, kullanım amacına uygun mamul veya yarı mamul malzemeler haline getirilmeye başlanmıştır.

Birden çok malzemenin bir araya getirilmesiyle üretilen malzemeye genelde "Kompozit Malzeme" adı verilir. Birden çok malzemenin biraraya getirilmesi, doğal olarak tek tek bileşenlerinde bulunmayan özellikte bir malzemeyi üretebilme amacına yöneliktir. Genel olarak kompozit malzeme, mevcut ve/veya ayrı iki veya daha çok malzemeyi fiziksel olarak karıştırmak yoluyla elde edilen ve kendisini oluşturan malzemenin her birinden farklı özelliklere sahip olan çok bileşenli malzeme olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeleri dört alt grupta toplamak mümkündür: i) Daneciklerle güçlendirilmiş kompozit malzeme, ii) Danelerle donatılı kompozit malzeme, iii) Liflerle donatılı kompozit malzeme, iv) Tabakalı kompozit malzeme.

Liflerle donatılı kompozit malzeme; genellikle yeterli basınç dayanımına mukabil, çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılgan malzemelerin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi; kırılganlığının giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla, bu özellikleri iyileştirecek nitelikte liflerle donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir.

2.1 Lifli Polimerler (LP)

Lifli polimerler/LP (literatürde bilinen adıyla FRP'ler), bir polimer reçinesinin içine gömülmüş yüksek mukavemetli liflerden oluşan kompozit elemanlardır. Yüksek korozyon dayanımının yanında göçmeye ulaşıncaya kadar doğrusal bir gerilme şekildeğiştirme ilişkisi gösteren LP, lif yönünde geniş bir rijitlik ve mukavemet yeteneğine sahiptirler. LP kompozitlerin içindeki lifler, asıl yük taşıyan elemanlardır. Reçineler ise, lifleri bir arada tutmak, hasardan korumak, sıralı düzenlerini sürdürmek ve yükün aralarında dağıtımını sağlamak üzere lifleri çevrelerler. En yaygın polimerik reçine tipleri; polyester, vinilester ve epoksilerdir.

LP kompozitler, çeliğin çekme ve yorulma dayanımları ile karşılaştırıldığında oldukça önemli mekanik ve fiziksel özellikler taşımaktadırlar. Çeliğin taşıma ve montaj sırasındaki ağırlığı, korozyon riskinin yüksekliği gibi sakıncalarını ortadan kaldıran LP mühendislere; düşük ağırlık, korozyona dayanıklılık, yüksek rijitlik ve dayanım gibi önemli avantajlar sağlar.

2.1.1 Lifler

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan en uygun lifler; karbon, aramid ve cam liflerdir.

2.1.2 Liflerin Özellikleri;

Yapılacak uygulamalar göre kullanılacak liflerin seçiminde çeşitli faktörler rol oynar. Bunların başlıcaları; yapının tipi, beklenen yükleme ve çevre koşulları olarak özetlenebilir. Kısaca açıklamak gerekirse;

Cam lifleri çok kullanılan güçlendirme lifleridir. Diğer liflere göre ucuz olmasının yanında işlenme karakteristikleri de çok iyidir.

Karbon lifleri yüksek mukavemet ve yüksek rijitlik elde edebilmek için en çok kullanılan takviye malzemesidir.

Aramid lifleri çok sıkı organik sentetik liflerdir.

Karbon ve aramid lifleri birçok kimyasal etkiye karşı direnç gösterirlerken, cam lifleri alkalilerden etkilenirler.

Karbon ve cam liflerinin basınç mukavemeti, çekme mukavemetlerine yakındır. Aramid'in basınç mukavemeti ise çekme mukavemetinden oldukça düşüktür.

Karbon, aramid ve cam lifleri toksik etkisi olmayan ve kirlilik açısından tehlikeli sayılmayan malzemelerdir.

2.1.3 Liflerin Fiziksel Özellikleri

2.1.3.1 Kimyasal Direnç

Karbon ve aramid lifleri kimyasal etkinin bir çok şekline karşı direnç gösterir. Cam lifinin bir çok türü ise alkaliler (pH'ı yaklaşık 11'den büyük olan) tarafından etkilenmekle beraber asitlerden etkilenmezler. Aramidler, cam ve karbon liflerine nazaran daha çok su absorbe ederler. Bu da reçine/lif arayüzünde problemlere neden olur.

2.1.3.2 Ultraviole ışınıma karşı direnç

Karbon ve cam lifleri ultraviole ışınımdan etkilenmezler. Aramid lifleri ise ultraviole etkisiyle renk değişimine uğrarlar ve dayanımında azalma görülür.

2.1.3.3 Elektrik iletkenliği

Aramid ve cam lifler iletken değildirler, bu yüzden enerji hatlarının ve demiryollarının yakınında, komünikasyon araçlarında kullanımına uygundur. Karbon lifleri elektriği iletirler. Bu özelliklerinden dolayı elektrikli ekipmanların yakınında karbon lifli polimer (KLP)'lerin kesimi yada işlenmesi sırasında çok dikkat edilmelidir.

2.1.3.4 Basınç Mukavemeti

Karbon ve cam liflerinin basınç mukavemeti, çekme mukavemetine yakındır. Aramid'in basınç mukavemeti ise çekme mukavemetinden oldukça düşüktür.

2.1.3.5 Rijitlik

Karbon liflerinin elastisite modülü çeliğin elastisite modülüyle benzerlik gösterir. Aramid'in rijitliği daha düşük, cam lifinin rijitliği ise en düşüktür.

2.1.3.6 Yangın

Cam lifleri, erime noktasına kadar (1000oC üzerinde) dayanım gösterirken karbon lifleri 650oC üzerindeki bir ortamda okside olurlar. Aramid lifleri ise genellikle 200 oC üzerindeki ortamlarda kullanılmazlar. Bu üç liften hiçbiri yanmayı, tutuşmayı tahrik etmezler. Kompozitlerde reçine baskın bir rol oynar, çoğu toksik duman meydana getirir.

2.1.4 Liflerin Mühendislik Özellikleri

Kompozit sistemlerin bütün mekanik ve mühendislik özelliklerini lifler etkiler. Tasarım için lifin çekme dayanımı ve çekme modülü dikkate alınır. Bu değerler de FRP örneklerinin çekme deneyi ile tespit edilir. Lif takviyeli polimerlerin gerilme şekildeğiştirme eğrisi nihaî gerilmesine ulaşıncaya kadar yaklaşık doğrusaldır, sonra da gevrek bir şekilde kopa gösterir.

2.1.4.1 Dokumalar (Wraps)

Tekstil malzemelerinin özellikleri, kullanılan lif miktarına ve cinsine bağlıdır. Diğer bir özellik ise liflerin dizilimidir. Örtülmüş dokumanın iki yönde davranış özellikleri varken, paralel lif dizilimi dokumaya tek yönde davranış özelliği kazandırır. Örülmüş dokumalarda, liflerin %70'i boyuna %30'u enine yönde teşkil edilir. Göz önünde bulundurulması gereken bir nokta; dokuma malzemesindeki lif ipliklerinin birbirlerine dolanmasının mukavemeti düşüreceğidir. Malzemenin kalınlığı 0,1mm mertebesinde incedir, 500mm veya daha fazla genişlikte imal edilebilmektedir.

2.1.4.2 Levhalar

Tek yönlü levhalar, genelde lifin sürekli olarak bir makine ile örgü şeklinde sarılmasıyla (pultration) oluşturulurlar. Devam eden iplikler şeklindeki lifler, emdirilmiş lif demeti halinde dikkatlice kontrol edilerek reçine banyosu içersinden çekilirler ve gerekli şekli alırlar. Kalıp, reçine kürü oluşumu için ısıtılır. Boyuna yönde yüksek mukavemet ve sertlik istenen ölçüde sağlanır (%65). Enine levhalar 1-2 mm kalınlığında ve genelde (değişken olmak üzere) 50-100mm genişliktedir.

2.1.4.3 Lif Seçimi

Lif tipi seçilirken göz önünde bulundurulması gereken faktörler; yüklemenin tipi, çevre koşulları ve proje maliyetidir. Karbon lifleri, yüksek mukavemet ve yüksek dayanıma sahiptirler ve çevre koşullarında etkilenmezler. Karbon liflerinin sürekli gerilmelere dayanımları nispeten iyidir.

E-cam lifleri malzeme maliyetini düşürür, ancak karbon liflerinden daha az dayanım ve şekil-değiştirme modülene sahiptir. Ayrıca karbon liflerinin uzun dönem davranışlarındaki üstün niteliğini de gösteremezler. Genelde E-cam lifleri neme ve diğer çevre koşullarına maruz kaldıklarında ömürleri azalır. E-cam lifleri nihaî mukavemetlerinin %30'undan daha yüksek devamlı gerilmelerde sünme etkisiyle koparlar.

Farklı özelliklerde olan birkaç çeşit karbon lifi mevcuttur. Beton elemanın davranışı (ilâve yük taşıma kapasitesinin arttırılması, kayma dayanımı arttırılması, vb.) geliştirilmek istendiğinde daha yüksek dayanımlı ve kırılmadaki uzaması daha yüksek olan karbon lifi seçilmelidir. Kullanılabilirliğin (sehim, emniyet gerilmeleri vb.) önemli olduğu uygulamalarda ise daha yüksek elastisite modülüne sahip karbon lifi seçimi doğru olur.

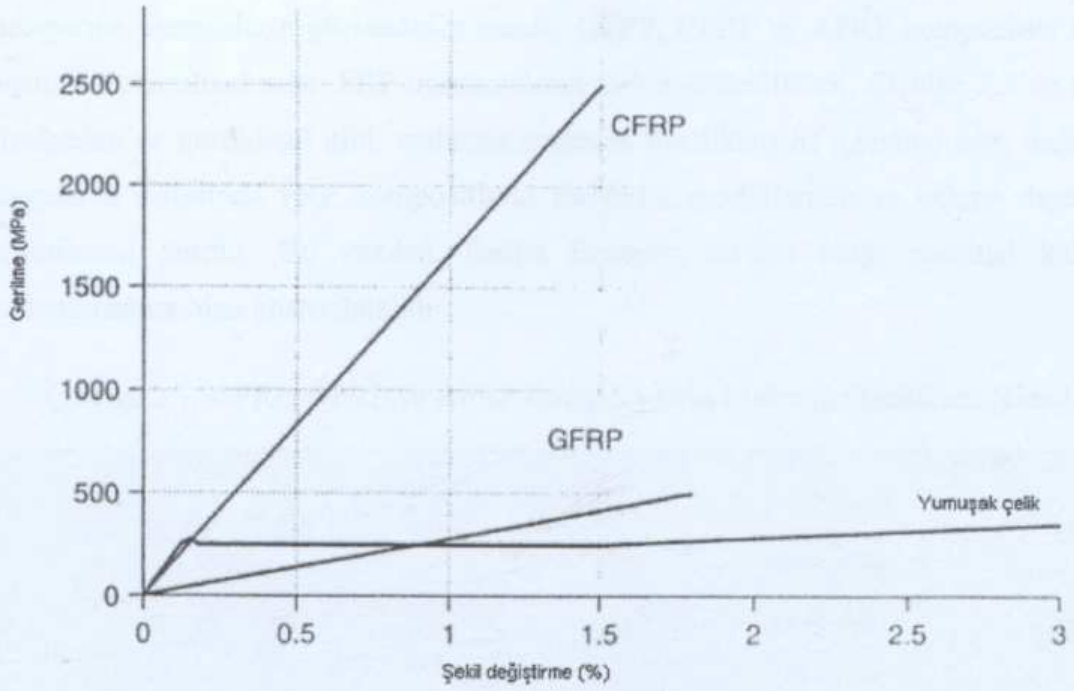
2.1.4.4 Yapıştırıcılar

Yapıştırıcı malzemeler yüzey ekleriyle beraber tutma yeteneğine sahip malzemelerdir. Temel olarak yapıştırıcının amacı; yapışkan katmanın kalınlığı boyunca kayma gerilmelerini aktarabilme kabiliyetleri ile kompozit davranışı sağlayarak FRP ve beton arasındaki aderansın devamlılığını gerçekleştirebilmektir.

2.2 FRP Kompozitlerin Yapısı

FRP kompozitler; sürekli liflerin reçine matris içinde birbirlerine sarılmasıyla oluşturulur. En çok bilinen lifler; karbon lifler, cam lifler ve aramid liflerdir. Reçineler ise; epoksi reçinesi, polyester reçinesi ve vinylester reçinesi olarak sınıflandırılabilir. Liflerin kullanımlarına göre, FRP kompozitler, üç sınıfa ayrılır:

- Cam lifi donatılı polimer (Glass Fibre Reinforced Polymer, GFRP), CLP
- Karbon lifi donatılı polimer (Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP), KLP
- Aramid lifi donatılı polimer (Aramid Fibre Reinforced Polymer, AFRP), ALP



Şekil 2.1 FRP ve yumuşak çeliğin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Sayılan üç çeşit FRP malzemesi; gerilme şekildeğiştirme bakımından benzer davranış gösterirler; doğrusal elastik artış ve sonunda gevrek kopma gerçekleşir. FRP kompozit malzeme kullanımında bu önemli bir özelliktir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere: FRP malzemeler için yüksek mukavemet ve gevrek davranış, çelik için sünek davranış sözkonusudur. Bir başka anlatımla; FRP malzemeler çeliğin sahip olduğu sünekliğe sahip değildirler. Bununla beraber, bu malzemelerin gevreklik özelliği, betonarme elemanın gevrek davranışından dolayı sınırlı kalmaktadır. Betonarme elemanda sargı etkisini sağlamak için kullanıldığında, bu malzemeler, kolonların sünekliliğini ve dayanımlarını çok yüksek ölçüde artırır. İkinci olarak: FRP kompozitindeki gevrek davranış(süneklik özelliğine sahip olmama) dayanımdaki yeniden dağılım kabiliyetini sınırlar. FRP kompozit malzeme, yeterli eğilme rijitliğine sahip betonarme yapılarda uygulandığında tatminkâr sonuç verir.

2.3 FRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

FRP kompozitlerinin uçak endüstrisinde uzun yıllardan beri kullanıldığı bilinmektedir. Bu nedenle günümüzde bu malzemelerin özellikleri çok iyi bilinmektedir. Bu malzemelerin inşaat mühendisliğinde uygulamaları, ilk başlarda yüksek maliyetten dolayı sınırlı kalmıştır. Ancak inşaat mühendisliğinde geniş uygulamalara yer verilmesiyle birlikte maliyet de hızla düşmüştür.

Betonarme elemanların güçlendirilmesinde; GFRP, CFRP ve AFRP kompozitler başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. FRP malzemelerin mekanik özellikleri, Çizelge 2.1'de verilmiştir; çizelgeden de görüldüğü gibi, malzeme mekanik özellikleri lif içeriğine göre değişmektedir. Uygulama esnasında FRP kompozitlerin elastiklik modüllerinin ve çekme dayanımlarının kestirilmesi zordur. Bu yüzden, üretici firmanın tavsiye ettiği nominal kalınlıkta lif kullanılmasına itina gösterilmelidir.

Çizelge 2.1 GFRP, CFRP ve AFRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Head,1996)

Tek yönlü dokunmuş kompozit malzeme	Lif İçeriği (% ağırlık oranına göre)	Yoğunluk (kN/m3)	Boyuna çekme Modülü (GPA)	Çekme Dayanımı (MPa)
Cam lifi donatılı polyester tabaka (GFRP)	50-80	16-20	20-55	400-1800
Karbon lifi donatılı epoksili tabaka (CFRP)	65-75	16-19	120-250	1200-2250
Aramid donatılı epoksili tabaka (AFRP)	60-70	10.50-12.50	40-125	1000-1800

Betonarme elemanların FRP kompozit malzemesi ile güçlendirilmesi örnekleri, birçok bakımdan iyi sonuçlar vermiştir. Bu yeni teknolojide son yıllarda hızlı bir gelişme sağlanmıştır. Literatürde konuyla ilgili çok sayıda makale bulunmaktadır. Bununla beraber, çoğu tasarım tavsiyeleri yazarların kendileri tarafından geliştirilmiştir. Bir başka anlatımla bu bağlamda yeterince kabul görmüş tasarım yönetmelikleri bulunmamaktadır (Teng, 2000).

2.4 Eksenel ve Eksantrik Yüklü Kolonların Güçlendirilmesi

1990'ların ilk yıllarında kolonları güçlendirmek için başlıca iki yol izlenmiştir:

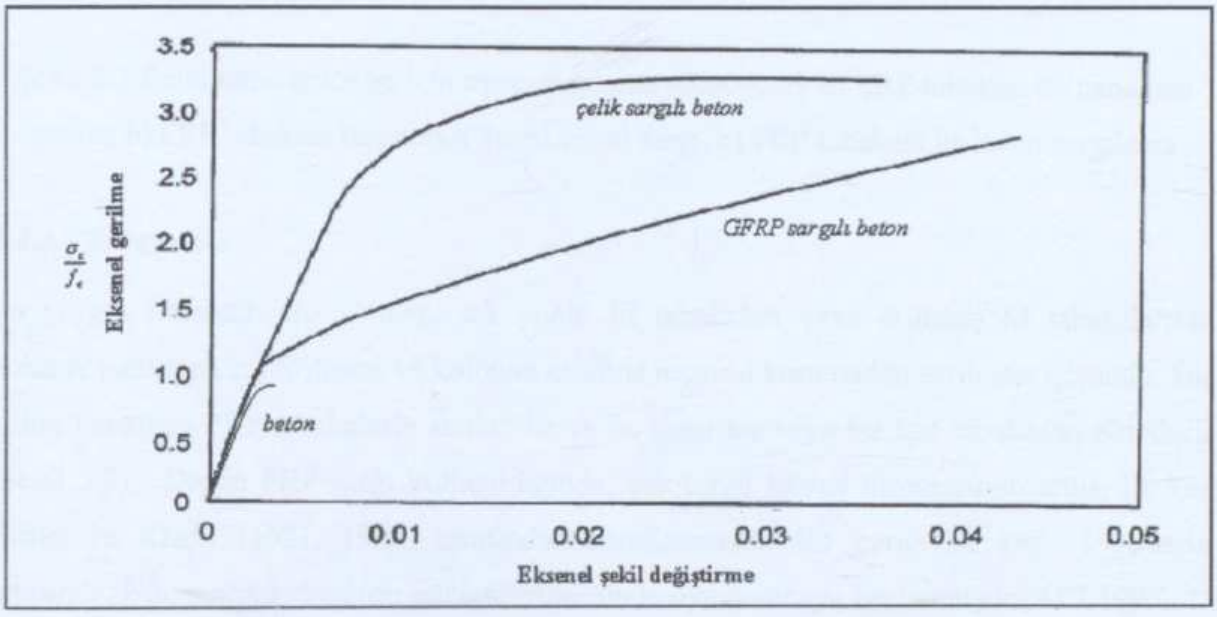
- Kolonlara mantolama yapmak ve ilave donatı eklemek, veya çelik manto sarıp içersine çimento şerbeti enjekte etmek (Ballinger, 1993),
- Çelik manto sarmak,

Çizelge 2.2 E-Cam, HT-Karbon ve Aramid lifler arasında, karşılaştırma (Meier ve Winistorfer, 1995)

Özellik	Lifli kompozit tabakalar		
	E-Cam lifli (E-Glass Fiber)	HT-Karbon Lifli (Carbon Fiber)	Aramid Lifli (Aramid Fiber)
Çekme Dayanımı	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Basınç Dayanımı	İyi	Çok iyi	Yeterli değil
Young Modülü	Yeterli	Çok iyi	İyi
Uzun Süreli Davranış	Yeterli	Çok iyi	İyi
Yorulma Davranışı	Yeterli	Mükemmel	İyi
Yoğunluk	Yeterli	İyi	Mükemmel
Alkaline Dayanımı	Yeterli değil	Çok iyi	İyi
Maliyet	Çok iyi	Yeterli	Yeterli

Çelik manto sararak güçlendirme ve betonarme mantolama ile güçlendirmenin uygulama güçlüğü bulunmaktadır. Bu çeşit uygulamalarda yapıda ağırlık artmakta ve çelik mantolar sert iklim koşullarında yeterli dayanım gösterememektedir (Ballinger, 1993). Son yıllarda, FRP kompozitlerin yaygınlaşmasıyla, betonarme kolonların güçlendirilmesinde çelikle kuşatarak güçlendirmenin yerini FRP sargıların aldığı görülmektedir. FRP ile kolon güçlendirmenin en genel şekli; dıştan FRP tabakası ile sarma şeklinde olur. Var olan betonarme kolonları çelik

veya FRP mantolama ile güçlendirme yöntemi, sağladığı yanal sargı etkisiyle eksenel basınç dayanımını ve sünekliği oldukça artırmaktadır (Mander, 1988). FRP nin betonarme elemana sarılmasıyla, basınç dayanımı ve eksenel basınç-şekil değiştirme davranışına dair çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Fardis ve Khalili 1981, Ahmad vd. 1991, Harmon ve Slattery 1992, Demers ve Neale 1994, Howie ve Karbhari, 1994, Nanni ve Bradford, 1995, Karbhari ve Gao 1997, Mirmiran ve diğerleri 1998a, Demers ve Neale 1999, Miyauchi vd. 1999, Purpa ve Mufti 1999, Saafi vd. 1999, Toutanji 1999, Rochette ve Labossiere 2000, Xiao ve Wu 2000, Zhang vd. 2000).



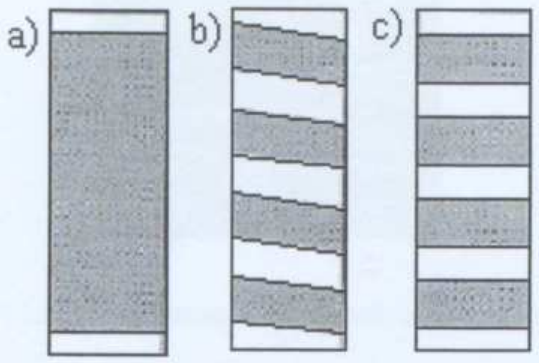
Şekil 2.2 FRP ile sarılmış beton için gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi

(Purba ve Mufti, 1999)

Her iki çeşit sargıda da benzer özellikler görülse de, çelik ile sargılamadaki, tasarım yöntemleri, FRP, sargılamada doğrudan uygulanamayacağı literatürde bulunan çalışmalarda gösterilmiştir (Mirmiran, Shahawy 1997, Somaa 1998, Saafi 1999, Spoelstra ve Monti 1999).

2.4.1 FRP Kompozit ile Güçlendirme Yöntemleri

Mevcut kolonları FRP kompozit kullanarak güçlendirmek için çok sayıda farklı teknikler geliştirilmiştir. FRP kompozit malzemeyle uyarlanmış güçlendirme yöntemleri üç sınıfa ayrılabilir: (a) Sargılama, (b) Lif doğrultusunda sarma, (c) Önceden hazırlanmış kabukla mantolama.



Şekil 2.3 Betonarme kolonlar için tipik sargılama yöntemleri: a) FRP tabakası ile tamamen sarma, b) FRP tabakası ile sürekli kısmî spiral sargı, c) FRP tabakası ile kısmî sargılama

2.4.1.1 Sargılama

En yaygın tekniktir. Bu yöntem, tek yönlü lif tabakaları veya örülmüş lif tabakalarının polimer reçineleri emdirilmesi ve kolonun etrafına reçinesi kurumadan sarılması işlemidir. Bir kolon tamamen FRP tabakalarla sarılabilir ve bu sargı bir veya bir kaç tabakadan oluşabilir (Şekil 5.3). Dıştan FRP sargı kullanıldığında, betondaki basınç dayanımının artışı, ilk kez Fardis ve Khalli (1981, 1982) tarafından kanıtlanmıştır. Bu görüş ilk kez 1980'lerin ortasında, betonarme kolonların güçlendirilmesinde uygulanmaya başlanmıştır (ACI 1996). O tarihten bu yana köprülerin ve bina kolonlarının güçlendirilmesinde bu tekniğin uygulanmasına ait birçok rapor mevcuttur (Neale ve Labossiere 1997, Teng 1997).

2.4.1.2 Lif Doğrultusunda Sargılama

Lif doğrultusunda sargılama, temelde 2.4.1.1'deki sargılama yöntemiyle aynıdır. Ancak, bu yöntemde bilgisayar kontrollü sargı makinesi kullanılmaktadır. FRP sargının kontrollü kalınlıkta kullanılması ve liflerinin uygun doğrultularda sarılması ile kullanılan sargı miktarında hacimsal tasarruf sağlanabilir. Kolonları güçlendirmek için ilk sargı makinesi, 1980lerin ortasında Japonlar tarafından geliştirilmiştir (ACI, 1996).

Şekil 2.4 Lif doğrultusunda sargı makinesiyle sargılanma

2.4.1.3 Prefabrike Manto Kullanılması (Prefabricated Shell Jacketing)

Mevcut betonarme kolonlar, prefabrike manto kullanılarak güçlendirilebilirler. Uygulanacak alan dikkate alınarak prefabrike mantolar, tabaka halinde veya iplikçik lifleri halinde önceden hazırlanır. Bunlar, yarım çember veya L, U şekillerinde parçalardır (Nanni ve Norris 1995, Ohno vd. 1997) ve açılıp kolonun etrafına yerleştirilebilmesi için, uzunluğuna kesilmiş, yarılmış silindir prizma yüzeyi şeklindedirler (Xiao ve Ma 1997). FRP sargının etkili olabilmesi için, kolon ile FRP tabaka arasında yüzey boyunca tam bir temas sağlanması gerekir. Hazır kabuğun kesitle bütünleştirilmesi; kabukla kolon arasında yapıştırıcı madde kullanarak veya çimento harçı veya şerbeti enjekte edilerek sağlanır (Nanni ve Norris 1995, Ohno vd. 1997).

2.4.2 Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Her üç yöntemin de avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar Çizelge 2.3'de özetlenmiştir. Dıştan sargılama yöntemi; esneklik ve kolay uygulama avantajları yönüyle en uygun yöntem olarak gözükmektedir. Lif doğrultusunda makineyle sargı yöntemi de dıştan sargılama ile aynı avantajları taşır.

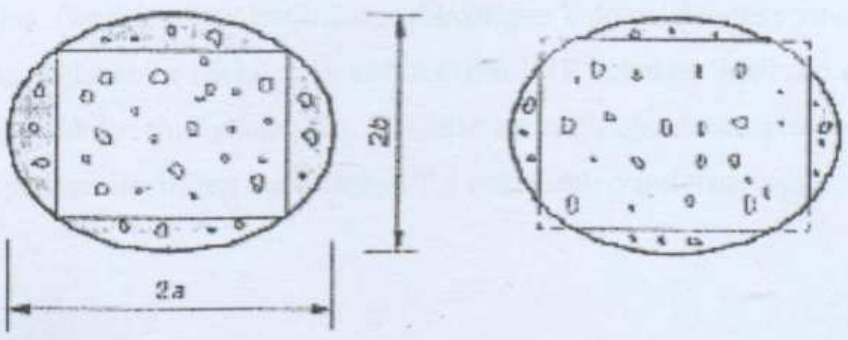
2.4.2.1 Uygulama Yönünden

Her üç teknikte de, FRP uygulaması yapılmadan önce ön hazırlık uygulamaları yapılmalıdır. Güçlendirilecek kolonun yüzeyi kuru, sert ve temiz olmalıdır. Kolonun hasar görmüş kısımları ve çatlaklar, önce iyi bir beton tamir harcı ile onarılmalıdır. Onarılmış yüzey tamir harcı ile sıvanmalıdır.

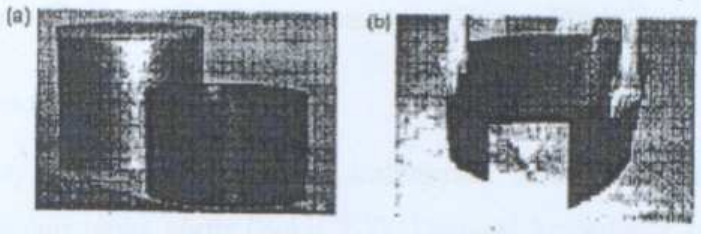
Çizelge 2.3 Kolon güçlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılması (Teng. vd., 2002)

YÖNTEM	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Sargılama (Wrapping)	Değişik kesitlere uygulama yeteneği	Kalitede kontrol güçlüğü
	İşçiliğin özel araçlar gerektirmemesi	Yoğun işçilik gerektirmesi
Lif doğrultusunda sargılama (Filament winding)	Gelişmiş-güvenilir kalite kontrol	Değişik kesitlere uygulanma yeteneği zayıf
	Sahada işçiliğ az	Uygulama esnasında özel araçlar gerektirmesi
Prefabrike manto (Prefabricated shells)	En iyi kalite kontrolü	Değişik kolon kesitlerine uygulama yeteneği sınırlı
	Saha uygulamasında işçilik çok az	Prefabrikasyon maliyeti

FRP sargısından etkili bir çekme dayanımı sağlanması için, dikdörtgen kolonların sargılanması esnasında köşeler yuvarlatılmalıdır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Dikdörgen kolonda şekil iyileştirme ve FRP sargı ile güçlendirme (a) köşe yuvarlatmasız, (b) köşe yuvarlatmalı



Şekil 2.6 Prefabrik FRP kabuklar: (a) solda Mander tipi, sağda kabuk tipi, (b) kabuğun montaj için açılması. (Teng vd., 2002)

2.4.3 Kesit Şeklinde İyileştirme

FRP ile sargılama dikdörtgen kolonlara göre dairesel kolonlarda çok daha etkindir. Bu nedenle, FRP ile sargıda etkinliği araştırmak için kolonların dikdörtgen ve kare kesitleri, olabildiğince eliptik ve/veya dairesel şekle getirilebilir.

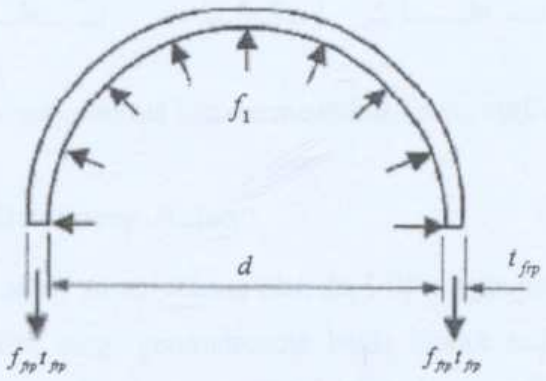
Sargı etkisini araştırmak için kolon kesitini değiştirme (section modification) fikri, ilk kez Priestley ve Seible (1995) tarafından ortaya atılmıştır. Yazarların yaklaşımlarına göre; FRP tabakalar ile güçlendirilecek dikdörtgen kolonlar sarılmadan önce kesitleri beton dolgu yastıkları ile dairesel veya eliptik şekle getirilmeleri uygun olur. Sargılama öncesi şekil iyileştirme hızlı sertleşen harç ile yapılabilir (Saadatmanesh vd. 1997). Dikdörtgen kolonlar için gereksiz kesit büyütülmesine neden olunmaması amacıyla dairesel yerine eliptik kesit tercih edilebilir. Kare kolonlarda değiştirilen kesitin doğal olarak dairesel kesit olması gerekir. Bununla beraber; kesit iyileştirmede daha birçok geometrik şekil seçenekleri bulunabilir.

Dikdörtgen kolonların güçlendirilmesinde; prefabrik dairesel veya eliptik FRP kabuklar da kullanılabilir (Teng ve Lam 2001). Bunun için eliptik şekildeki FRP kabuk, kolon etrafına bir çeşit kalıp gibi yerleştirilir; FRP kabukla kolon arasında kalan boşluk ise, daha sonra betonla doldurulur. Gerekirse, güçlendirilecek dikdörtgen kolonun köşeleri yuvarlatılarak da boyutta küçültme sağlanabilir (Şekil 5.5). Fabrikasyon FRP kabukta, Şekil 5.6 de görüldüğü gibi bir yarık bırakılabilir. Bu tip kabuklar, inceliklerine bağlı olarak kolayca açılabilirler ve kolonun etrafına yerleştirilebilirler; bunu düşey FRP ankrajının yapılması/yapıştırılması izler.

2.5 Sargılı Betonarme Kolonun Tipik Davranışı ve Göçme Modu

2.5.1 Dairesel Betonarme Kolon

FRP sargılı bir kolon eksenel basınca maruz kaldığında, beton yanal olarak genişler ve bu genişleme, FRP sargıdan tepki görür (Şekil 2.7). Dairesel kolonlarda sargıya gelen kuvvet merkezden dışarıya doğru düzgün yayılıdır.



Şekil 2.7 FRP kompozitte yanal kuşatma(sargı) basıncı

Sargının sağladığı basınç;

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp} f_{frp}}{2} \tag{5.1}$$

dır. Burada;

f_l, yanal sargının sağladığı basınç (sargının tepkisi),

f_{frp}, çember yönünde FRPnin çekme dayanımı,

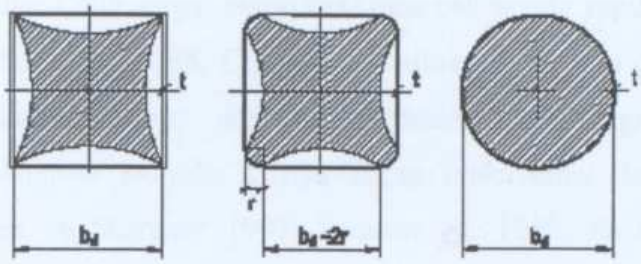
t_{frp}, FRP sargısının toplam kalınlığı,

d, Sargılanmış betonarme kolonun çapı,

ρ_{frp}, FRP sargısının hacimsel oranıdır; bu oran aşağıdaki denklemle bulunabilir:

$$\rho_{frp} = \frac{\pi d t_{frp}}{\pi d^2/4} = \frac{4 t_{frp}}{d} \tag{5.2}$$

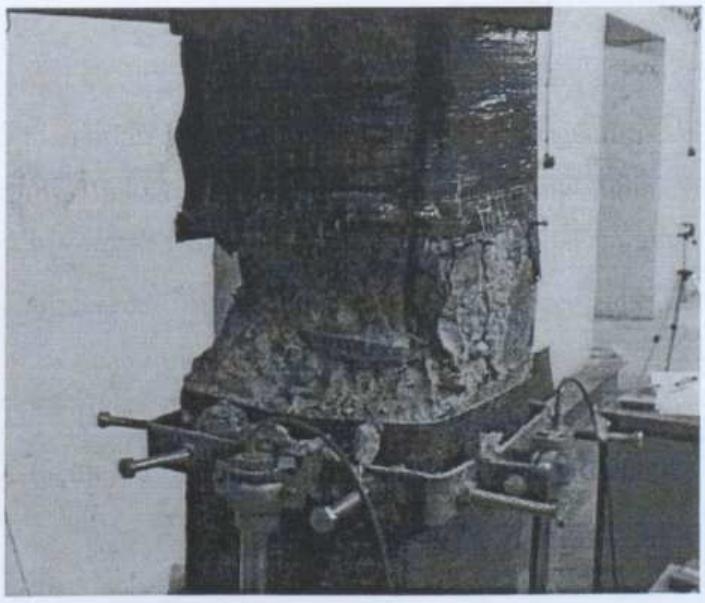
Literatürde dairesel kesitli betonarme kolon numunelerine dair bir çok çalışma vardır (Lam ve Teng 2001a, Demers ve Neale 1994, Nanni ve Bradford 1995).



Şekil 2.8 FRP ile sargılanmış betonarme enkesitinde, etkili sargı çekirdeği

2.5.2 Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolon

Dikdörtgen kolonların kenarları yuvarlatılmış olsa da, FRP sargısının etkinliği dairesel kolona göre daha az olacaktır. Bu, sargı geometresine bağlı olarak radial basınç gerilmelerinin düzgün yayılı olamamasından kaynaklanır. Şekil 2.9' da görüldüğü üzere; göçme modu genelde, FRP sargısının çekme kırılmasından dolayı köşelerde olur. Bu yüzden FRP sargısı, kolonun eksenel basınç dayanımında beklendiğinden az artış sağlar; artış oranı dairesel kesit kolonlara göre düşüktür. Bununla beraber; FRP ile sargılanmış dikdörtgen kolonda dayanım artışı, yine de makul ölçülerde olabilir (Mirmiran vd. 1998a, Rochette ve Labossiere 2000, Xia ve Wu 2000).



Şekil 2.9 FRP sargılı kare betonarme numunenin göçme modu (YTÜ deneyleri, 2006)

2.5.3 FRP Sargılı Betonun Basınç Dayanımı

Kolonların güçlendirilme tasarımında; FRP sargısından ileri gelen beton dayanımı artımını hesaplamak mümkündür. Çelik sargılı beton hakkında çok sayıda yapılmış çalışma mevcuttur (Richart vd. 1928, Mander vd. 1988, Cusson ve Paultre 1995). Son çalışmalar, çelik sargılı betonarme kolon eksenel basınç dayanım modelinin LP sargılı betonarme kolona değiştirilmeden uygulanması halinde, aşırıya kaçan mukavemet dayanım elde edildiğini göstermiştir (Mirmiran ve Shahawy 1997, Samaan vd. 1988, Saafi vd. 1999). Bununla beraber; çelik sargılı kolon hesap modellerinin bazı düzeltmelerle, LP sargılı kolonlar için de uygulanabileceğini gösteren çalışmalar da mevcuttur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 FRP Kompozit ile Kolonların Sarılması

Yapı elemanlarının onarım ve güçlendirme metotlarından biri olan FRP kompozit ile sargılama yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. FRP kompozit sarılarak yapılan güçlendirme çalışmalarının etkinliği ile eleman davranış ve dayanımı üzerine etkileri, çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. Literatürdeki deneysel çalışmaların çoğu küçük ölçekli test numuneleri ile yapılmış olup, çoğu yazar tarafından da bire bir ölçekte test numuneleriyle yapılan deneylerin yetersiz sayıda olduğu vurgulanmıştır. Deney numunelerinin tasarımı ve üretiminde bu hususlar göz önüne alınmıştır.

Bu amaçla düzenlenen deney programında 200x200mm enkesitinde 1030mm boyunda, beton kalitesi yönünden özdeş betonarme basınç elemanları kullanılmıştır. Basınç elemanları, farklı enine ve boyuna donatı konfigürasyonuna sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Hasarsız kolon numuneleri daha sonra FRP kompozit ile sarılarak, yapılan güçlendirme işleminin kolonlara katkısı incelenmiştir.

Deneysel çalışmada aşağıdaki maddelerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır;

a) Farklı enine ve boyuna donatı konfigürasyonunda üretilen betonarme kolonların eksenel basınç altında sargı (kuşatma) etkisi davranışının incelenmesi,

b) FRP kompozit ile sargılı betonarme kolonların eksenel basınç altında kuşatma etkisi davranışının incelenmesi.

3.2 Deney Programı

Deneysel çalışmada; malzeme bakımından özdeş, farklı donatı konfigürasyonuna sahip dört çeşit betonarme kolonlar üretilmiştir. Hazırlanan deney numuneleri, 200x200mm enkesitinde 1030mm boyunda;

I. $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı,
II. $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı,
III. $8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı,
IV. $8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı

konfigürasyonuna sahip olan betonarme elemanlardır. Bu kolonlar 5 seri halinde (C1, C2, C3, C4 ve C5) sargısız eksenel mukavemetlerini, FRP kompozit ile sarılı iken eksenel mukavemetleri ve iki kat FRP kompozit malzemesi ile sarılı iken eksenel mukavemetlerini belirlemek üzere eksenel yüke maruz bırakılmışlardır.

Kolonlar bir döküm üretilmiş ve 2X3 adet 15/30 standart silindir numune alınarak 28. ve 60. günlerde basınç dayanımları belirlenmiş ve ayrıca bir kolondan 3 adet karot numunesi alınmıştır. Beton kalitesi, genelde mevcut yapıları temsil edebilmesi için düşük kalitede tutulmuştur. Bunda mevcut deney düzeneğinin yükleme kapasitesinin de rolü olmuştur.

3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Hazırlanan numunelerde; 28 günlük ortalama beton silindir dayanımı 18.08 MPa, 60 günlük ortalama beton silindir dayanımı 19,36 MPa olan hazır beton, BÇ-III donatı ve FRP kompozit, Degussa Firması tarafından üretilen MBrace Fibre ve bu malzemeyi sarma işleminde ise MBT-MBrace epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır.

3.3.1 Beton Özellikleri

Deney elemanlarının beton karışımlarında farklılığın olmaması için tüm deney elemanları bir döküm hazır betonla üretilmiştir. $1m^3$ beton karışımındaki malzeme miktarları şöyle alınmıştır:

Çimento (PC 42.5), 230 kg,

Su, 186 kg,

Doğal kum(0.3mm), 361 kg,

Taş kumu(0.5mm), 410 kg,

No 1 mıcır, (5-12mm), 511 kg

No 2 mıcır, (12-22mm), 669 kg,

Kimyasal katkı, normal seviyeli akışkanlaştırıcı, 1.15 kg.

Sertleşmiş beton birim hacim ağırlığı, 2.368 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Kalıba döküm esnasında yapılan slump deneyinde slump 16cm ölçülmüştür.

Kolonların bulunduğu ortamın 28 günlük ortalama ısısı 16^0C derece olarak ölçülmüştür. 28 gün boyunca beton her gün düzenli olarak sulanmıştır. Kolon üretiminde kullanılan betondan 2X3 adet 15x30 boyutlarında silindir numune alınmıştır. Bu numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp kirece doygun suda, laboratuar ortamında bekletilmiştir. 28 gün yaştaki deneylerde, 19.30 MPa, 16.42 MPa, 18.54 MPa'lık dayanımlar elde edilmiş ve bunların ortalaması f_{c28}, 18.08MPa olarak hesaplanmıştır. Kolon deneyi yaşını yansıtan, 60. günde, alınan 3 adet numune teste tabi tutulmuştur. Testlerin sonucunda, 19.24 MPa, 19,21MPa, 19,63MPa'lık dayanımlar elde edilmiş, bunların ortalaması dayanımı f_{c60}, 19,36MPa olarak hesaplanmıştır.

3.3.2 Çelik Özellikleri

Betonarme yapı elamanlarında donatı olarak TS708 standartlarına uygun S420 nervürlü betonarme çeliği kullanılmıştır. Yapılan donatı çekme deneyinde, üç numune ortalaması akma dayanımı f_{yk}, 422 (N/mm^2) bulunmuştur.

3.3.3 FRP Kompozit Malzemesi Özellikleri

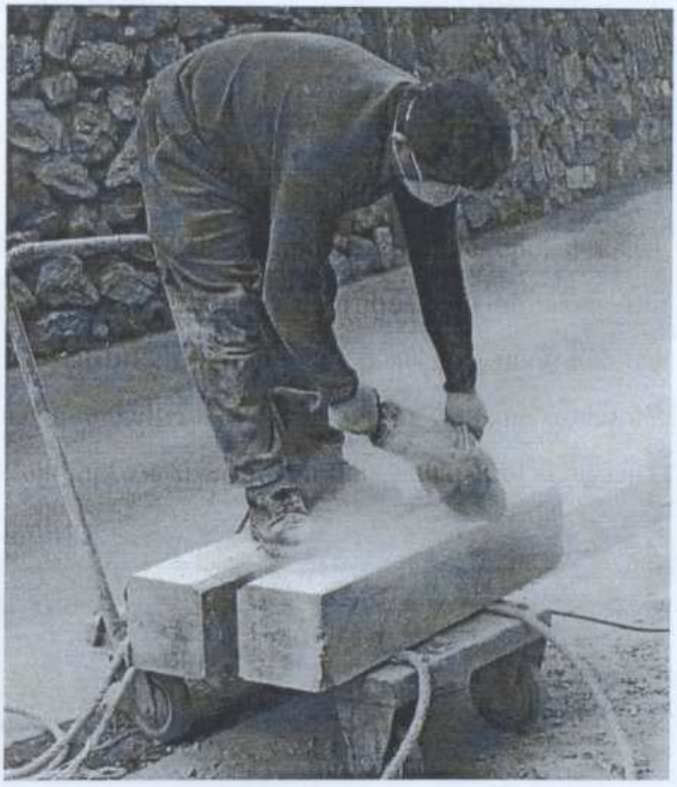
FRP kompozit malzemesi olarak, Degussa Firmasına ait bir ürün olan MBrace Fibre, Mbrace FRP 300 mm genişliğinde, 165 mikron kalınlığındaki tek yönlü fiber donatısı kullanılmıştır. MBrace Fibre elastisite modülü 230000 MPa, birim kopma uzaması (ε_u) ise % 1.5'dur.

3.3.4 Karbon Lifli Kompozitlerin Sarılması

Sargı işlemine başlamadan önce; hazırlanan kare kesitli numuneleri, eksenel yük altında gerilme yığılmasını en aza indirmek üzere, köşeleri 20 mm yarıçapında çeyrek daire kesitinde yuvarlatılmıştır (Şekil 3.1). Yuvarlatma işleminden sonra güçlendirme malzemesinin yüzeye tam yapışabilmesi sağlamak için, numune yüzeyleri fırça kullanılarak toz ve kirden arındırılmıştır.

Temizlenen yüzey önce epoksi polyamin astar malzemesi sürülerek bir gün beklenmiştir (Mbrace primer, karışım oranı 0.77:A ve 0.23:B). Daha sonra FRP kompozit malzemesinin yüzeye yapışmasını sağlayan iki bileşenli epoksi esaslı yapıştırıcı malzemesi (Mbrace saturant, karışım oranı 0.76:A ve 0.24:B) rulo ile numune yüzeyine sürülmüştür. Önceden

gerekli boyda kesilip hazırlanan FRP kompozit, rulo ile epoksi esaslı yapıştırıcı sürülen yüzeye sarılmaya başlanmıştır. Sargının lif doğrultusunda olmasına dikkat edilmiştir. FRP kompozit malzemesi el ile sarılırken, ikinci kişi LP sargının üzerinden rulo ile geçerek içerde hava boşluklarının kalmasını engellemiş ve daha iyi bir yapışma sağlamıştır. Bindirme payı da sarıldıktan sonra CFRP kompozit üzerine bir kat daha epoksi esaslı yapıştırıcı sürülerek gerekli kür süresi beklenmiştir.



Şekil 3.1 Numune köşelerinin çeyrek daire kesitinde yuvarlatılması

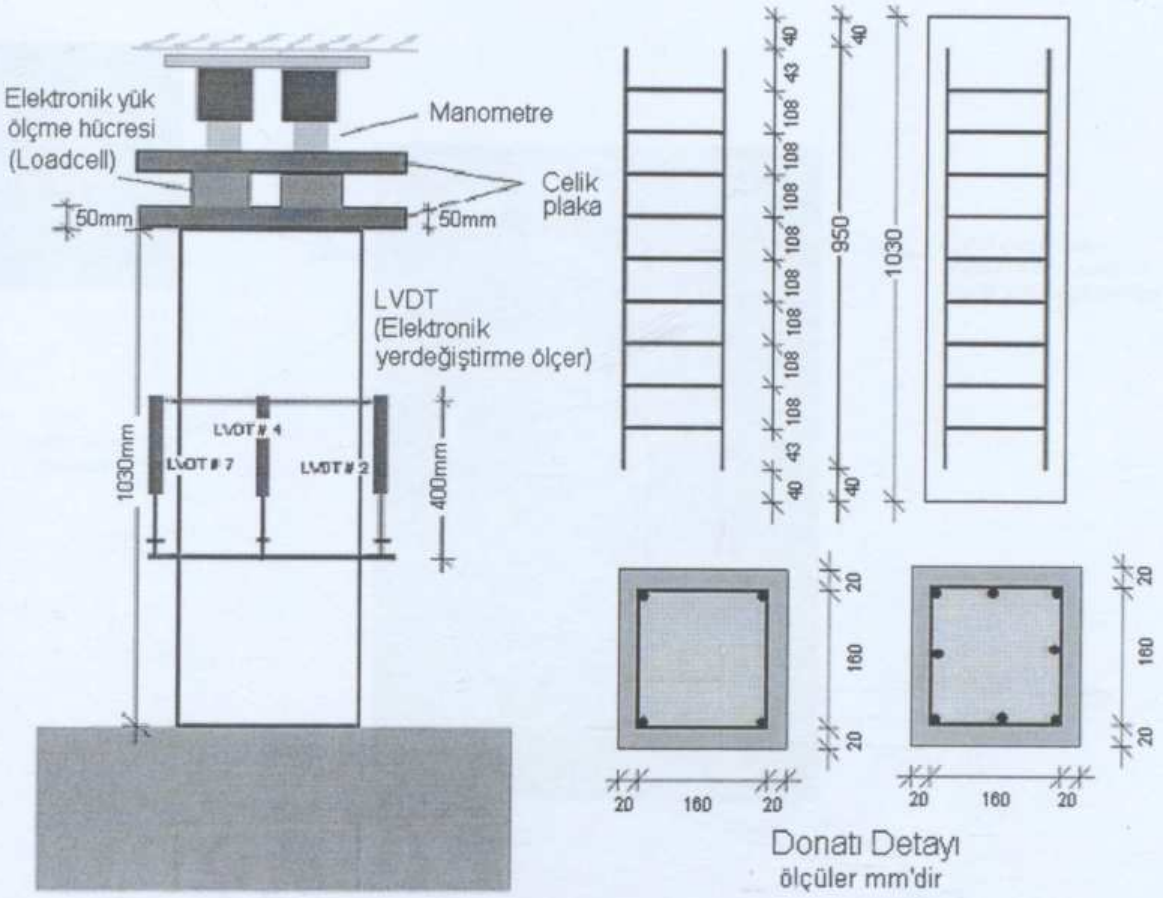
3.3.5 Deney Platformu

Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarı'nda kolon deneylerine uygun olan deney tüpünün bodrum katında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan düzenek, 2000 kN eksenel yük uygulanabilme kapasitesine sahiptir.

3.3.6 Ölçüm Düzeni

Deney öncesinde; LVDT (elektronik deplasman ölçer) ve LOADCELL (elektronik yük ölçme hücresi) ölçüm cihazlarının kalibrasyonları yaptırılmıştır. Manometre için ölçme belirsizliği %0.8 olarak verilirken maksimum sapma %1.7 ve maksimum histerisis ise %0.6 olarak bulunmuştur. LVDT ile 0.0001 cm hassasiyetle saniyede bir okuma alınmıştır. LOADCELL ve LVDT'ler tek bir kartla eş zamanlı olarak her saniyede bir okuma alır hale getirilmiş ve bu

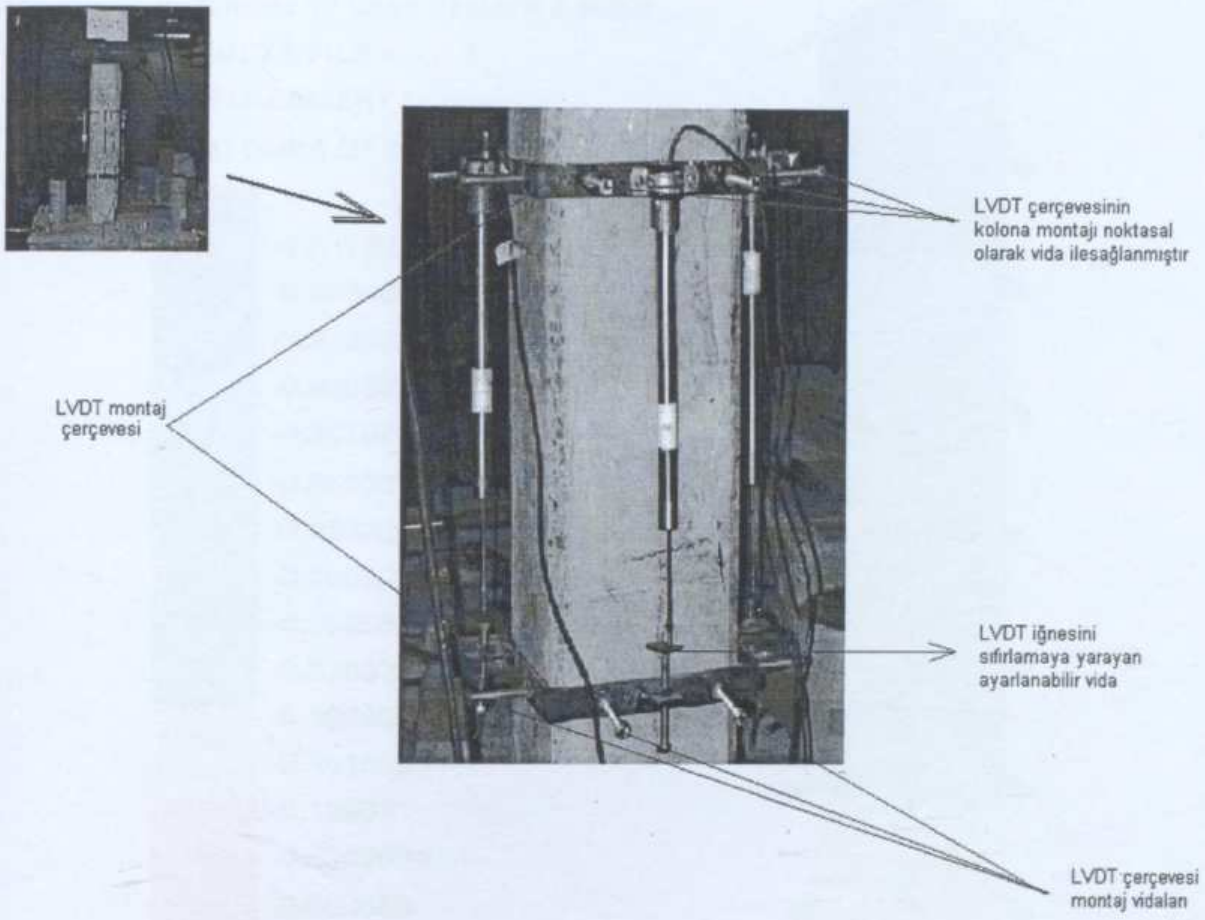
şekilde tüm deney dataları bilgisayar ortamında toplanmıştır. Deney sırasında her saniyede LVDT'lerden ve LOADCELL'den alınan okumalar, excel yazılım programında grafik haline dönüştürülmüştür.



Şekil 3.2 YTÜ deneylerinde deney düzeneği ve kolon donatı detayı

LVDT'ler ile kolonun orta kısmında 400 mm uzunluktaki bir bölgede okumalar alınmıştır. Bunun için kolonun dört kenarına birer LVDT yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). LVDT'lerin kolona montajı kesitte sargı etkisi oluşturmayacak özel bir düzenekle sağlanmıştır (Şekil 3.2 ve 3.3). LVDT'lerin yerleştirilmesi için kolon ebadından 10 mm daha geniş 210x210mm boyutlarında bir çelik çerçeve imal edilmiş ve bu çerçeve üzerindeki vidaların 4 yönden noktasal olarak kolon yüzüne dik sıkıştırılması suretiyle LVDT'ler kolona tutturulmuştur. Bu şekilde çerçevenin kolonda ilave bir kuşatma etkisi oluşturmasından kaçınılmıştır. Alt kısımdaki çerçevede, LVDT uçlarının bastığı yer, vida yardımı ile aşağı yukarı ayarlanılabilir olup, bu şekilde ilk okuma değeri için ayarlama yapılabilmiştir. Şekildeğiştirme değerlerinin okunması için toplam kolon uzunluğunun %40'ına karşılık gelen kolon orta bölgesinin seçilmesinin nedeni, bu bölgede hem gerilme, hem de şekil değiştirmeler için ortalama

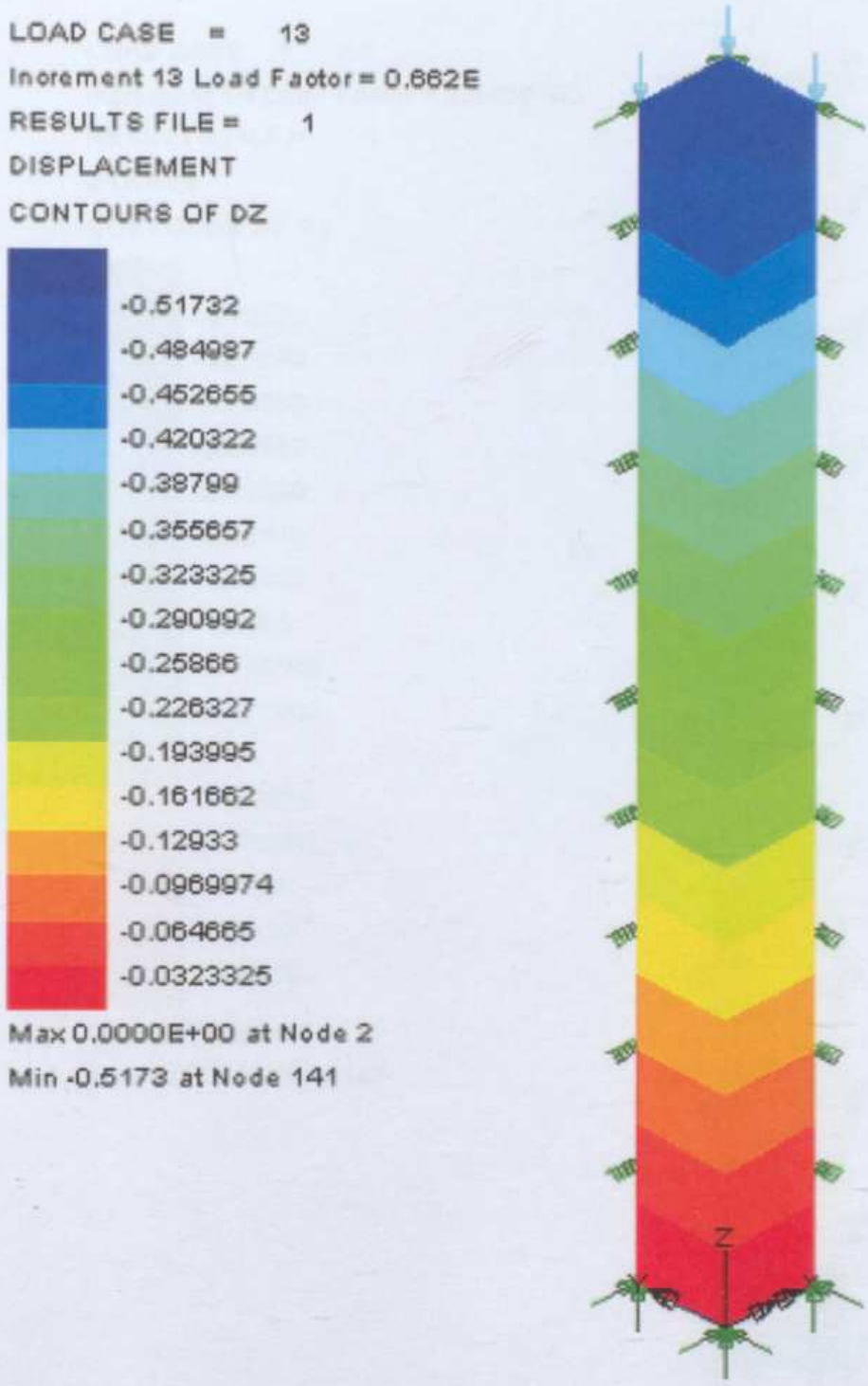
değerlerin oluşması beklentisidir. Böylelikle tek boyutlu bir elemanda kullanılacak değerler elde edilmiş sayılabilir.



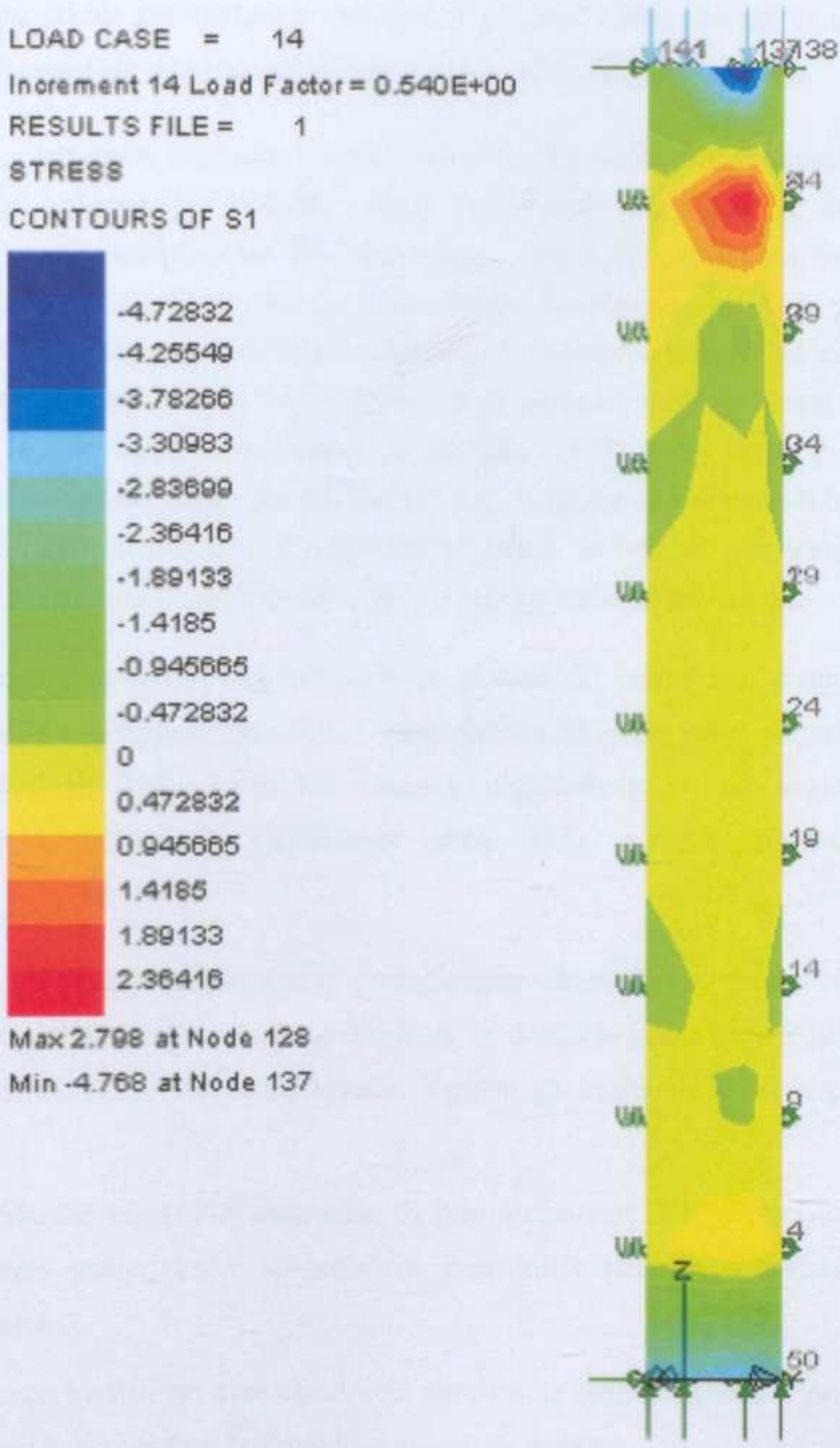
Şekil 3.3 Numune üzerinde LVDT'lerin montajı

Mimiran ve Shahawy (1997), LVDT'lerden ölçülen değerlerin ortalama birim şekildeğiştirme değerleri olarak kullanabileceğini ve strain-gauge ölçümleri kadar hassas değerler elde edileceğini belirtmişlerdir (İlki vd., 2003). Kolon yüzeyinin üzerindeki kusurlardan dolayı Strain-gauge ile alınan ölçümlerde LVDT'ye göre daha olumsuz sonuç elde edilebilmektedir. İlki ve Kumbasar (2003) deneysel çalışmalarında, eksenel birim şekildeğiştirme için, LVDT ölçümleri kullanmıştır.

Eksenel basınç deneylerinde yerdeğiştirmenin belirlenebilmesi için, ölçüm boyunun belirlenmesi hususunda: (Koç, 2004) 500 mm'lik eksenel yük uygulanan numuneler için iki ayrı ölçüm boyu kullanmıştır. LVDT ölçüm boyu 250 mm ve 500 mm olarak alınmıştır. Deneyler esnasında veri toplamada kullanılan şekil değiştirme ölçer ve yerdeğiştirme ölçerlerin benzer sonuçlar verdiğini belirtmiştir.



Şekil 3.4 Betonarme kolonların sonlu elemanlar ile modellenerek doğrusal olmayan analizinde eksenel kısalmaların kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).



Şekil 3.5 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda, kırılmaya neden olacak çekme gerilmelerinin kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).

Betonarme kolonların sonlu elemanlar ile modellenerek doğrusal olmayan analizinde ortalama şekil değiştirmelere en yakın şekil değiştirmelerin kolon boyunun orta kısmında oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.4). Doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde ise; kırılmaya neden olacak maksimum çekme gerilmelerinin yaklaşık olarak kolon boyunca üst ve alt uçlarda yaklaşık 1/4 lük *h* mesafede oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.5) (Köksal vd., 2006).

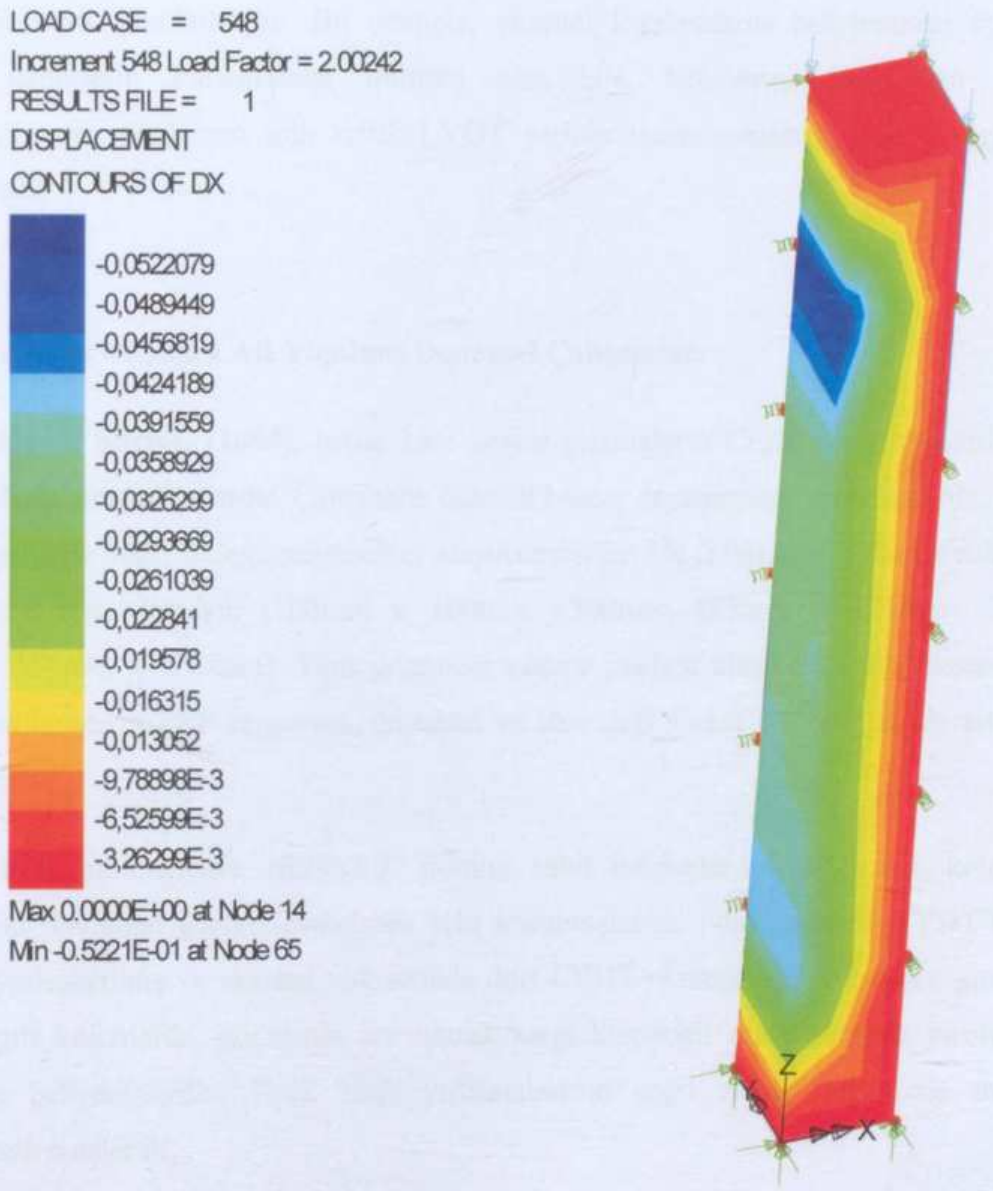
Söylemez (2006), çalışması kapsamında gerçekleştirilen BA kolonların doğrusal olmayan analizi sonucunda, kolonun dış yüzünde oluşan yanal şekil değiştirme ile kolonun iç yüzündeki yanal şekil değiştirmeler arasında büyük farklılıklar olduğunu belirtmiştir. Kolonun orta bölgesine yapıştırılacak bir strain-gauge okumasının ortalama bir değer vereceğinin ayrıca bir kanıtlanmış şekli mevcut değildir. LP yüzeyine yapıştırılan stain-gauge, yüzeydeki kusurlar, kolonda ezilme kırılmasıyla içinde bulunan yanal ve enine donatının itmesi ile farklı değerler okunmasına neden olduğundan LVTD kadar ortalama değerleri yansıtan sonuçları vermemektedirler. Bu etkiler, LP sargı üzerinde de çok eksenli bir gerilme durumu yaratarak kupon testinden elde edilen ve malzeme ile beraber sunulmuş olan LP değerlerinin sargı dayanım değerlerini de olumsuz bir şekilde etkileyebilmektedir.

Yüklemenin eksenel (concentric) oluşmasına özen gösterilmiş; bunun için analitik taşıma gücünün 1/4'ü kadar yük altında tüm LVDT okumalarının birbirine yakın değerler alması sağlanarak, gerektiğinde kolonun planda konumu değiştirilmiş ve en uygun konum bulunmaya özen gösterilmiştir. Yüklemenin sabit hızla gerçekleştirilmesine özen gösterilmiştir.

Deney esnasında kolonun dört yüzündeki yerdeğiştirme okumalarının teorik olarak eşit olmaları gerekirken ancak yerel çatlakların oluşması ve özellikle kalıcı şekildeğiştirmelerin başlaması ile farklı okumalar elde edilmektedir. Yapılan gözlemler de bunu doğrulamıştır (Köksal, 2006).

Benzer yaklaşım Mander vd., (1988) tarafından da benimsenmiştir. Dört potansiyometredeki ortalama okumaların yerine, hasar bölgesindeki bazı kritik potansiyometrelerdeki ölçü uzunluğu ele alınmıştır.

Kolondaki maksimum kısalmaları elde etmek için sınırlanmış hasar bölgesine konulan kritik LVDT'nin kesin yeri hakkında bazı belirsizlikler olduğu da açıktır.



Şekil 3.6 Eksenel yük etkisinde C1L4S8 BA kolonun yük altındaki dörtte birine ait yanal şekil değiştirme dağılımı

Bu amaçla, göçme yüküne yakın olan LVDT okumalarının ortalamaları kullanılırken, göçme yükünün yaklaşık olarak %75 değerini aldığı, kararsız çatlağın yayılmaya başlamasından sonra kolonun şiddetli oturmuş kenarındaki hasarın yığılmasını gösteren kritik LVDT okumaları tercih edilmiştir.

Diğer taraftan göçme bölgesindeki kritik LVDT'nin kesin olarak yerinin belirlenmesinde bazı belirsizlikler vardır. Kolonun hasarlı bölgesindeki LVDT için alternatif yerler, kolondaki oturma ölçülerek planlanabilir. Bu sonuçla, eksenel kısalmaların belirlenmesi için bazı ortalama değerlerin kullanılması ihtimali olsa bile, betonarme kolonların eksenel şekildeğiştirmenin ölçülmesi için kritik LVDT yerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

3.4 Diğer Araştırmacılara Ait Yapılmış Deneysel Çalışmalar:

Masia, Gale ve Shrive, (2004), beton kare kesitli prizmaların CFRP ile güçlendirilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada eksenel basınç dayanımının ve sünekliğin, eleman enkesit boyutuyla değişip değişmeyeceğini araştırmışlardır. Üç farklı kare enkesite sahip otuz adet numune test edilmiştir (100mm × 100mm ×300mm, 125mm × 125mm 375mm, 150mm × 150mm × 450mm). Tüm prizmalar göçme yüküne ulaşıncaya dek eksenel yüke maruz bırakılmıştır. CFRP sargısının, dayanım ve sünekliği dikkat çeken düzeyde artırdığını belirtmişlerdir.

Yazarlar, tüm numunelerde, *(h/b):(3/1)* oranını sabit tutmuşlardır. Bu oranı, kolon orta bölgesindeki davranışı gözlemleyebilmek için korumuşlardır. Numunelerde LVDT'ler orta bölgelere yerleştirilmiş ve eksenel yük altında dört LVDT okumasının ortalaması alınmıştır. CFRP sargılı kolonlarda, göçmenin ani olarak sargı kompozit malzemesinin yırtılmasıyla oluştuğunu belirtmişlerdir. Tipik sargı yırtılmalarının çoğu zaman köşelerde meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Mirmiran, Shahawy, Samaan, El Echary, Mastrapa ve Pico, (1998), CFRP kompozit malzemesinin, beton kolonlarda, sargı etkisi oluşturabilmesi için belli parametrelerin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda inceledikleri parametrelerden biri de narinliktir (eleman enkesitinin boya olan oranı). Uzunluk, 5:1 oranından sonra etkileten bir parametre olup, ACI ya göre bu narinlikteki kolonlarda %10 eksantrisite ve %20 dayanım azalması görülebilir.

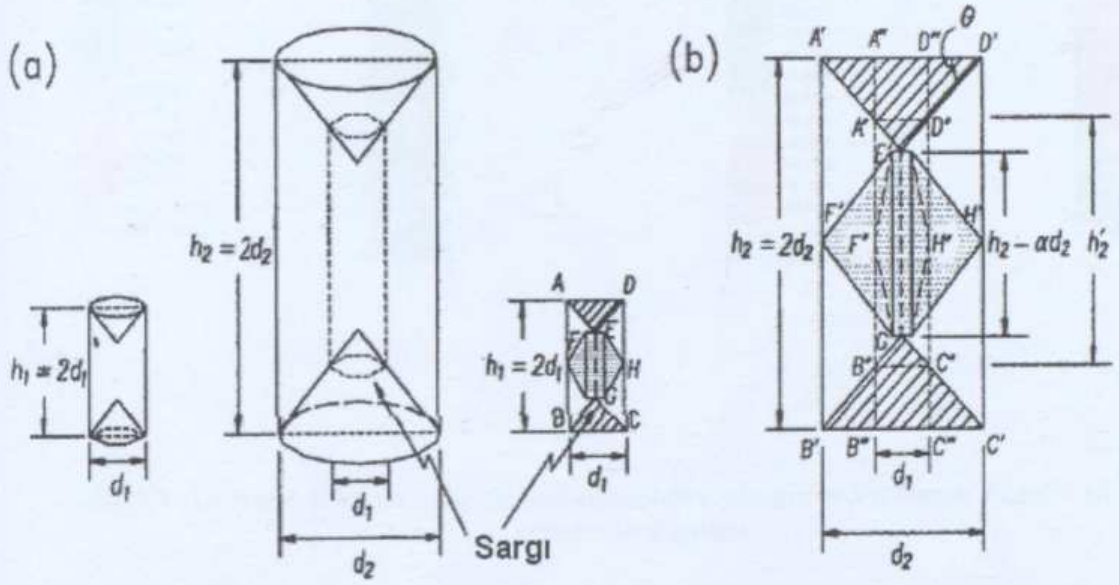
Yazarlar, deney numunelerinin orta kısımlarından LVDT ile okuma yapmışlardır. 2:1 oranın daki numuneler, ortadan çatlayarak göçme yüküne ulaşmıştır. 3:1 oranındaki numuneler üst veya alt kısım çeyreğinden, dörtte birlik kısmından çatlayarak göçme yüküne ulaşmıştır. 4:1 lik numuneler ise orta kısmın uzağında bir bölgede kırılarak göçme yüküne ulaşmıştır. 5:1 oranındaki numunelerin ise hiç biri göçme yüküne ulaşırken orta bölgede kırılmamıştır.

Matthys, Toutanji ve Taerwe, (2006), çoğu gerilme şekildeğiştirme davranışının küçük ölçekli, silindirik numuneler ile araştırıldığını, var olan modellerin ise bu numuneler ile karşılaştırıldığını belirtmişlerdir. Bu bağlamda, daha gerçeğe yakın davranış modelleyebilmek için büyük ölçekte FRP sargılı kolonlar incelenmiştir. Yazarlar, şu ana dek yapılan çalışmaların çok sayıda FRP sargılı küçük boyutta test numunelerinin artan iteratif yaklaşımla (Design-orientation) tasarıma dayalı model veya hesaba dayalı (Analysis Orientation) model sunulduğunu belirtmiş, kendilerinin 400 mm çapında 2000 mm yüksekliğinde hazırladıkları numune ile büyük ölçekli kolonu analiz eden ilk kişiler olduğunu belirtmişlerdir. Altı adet betonarme kolon imal edilmiştir. Yazarlar kolon göçme yüküne ulaşırken ki davranışı şu şekilde belirtmişlerdir: Enine sargılı kolonlar homojen bir yapıda değildirler. Dolayısı ile kolonda göçme yükünün neden olduğu lokal çatlağın yerinin belirlenmesi zordur. Ancak FRP kompozit malzemesinin yırtılması, öncelikle betonarme kolon içersindeki enine donatının kopmasıyla, o bölgede zayıflığa neden olması böylelikle homojen olmayan malzemede gerilme yoğunluğu ve FRP kompozit malzemenin kopmasını tetiklemektedir.

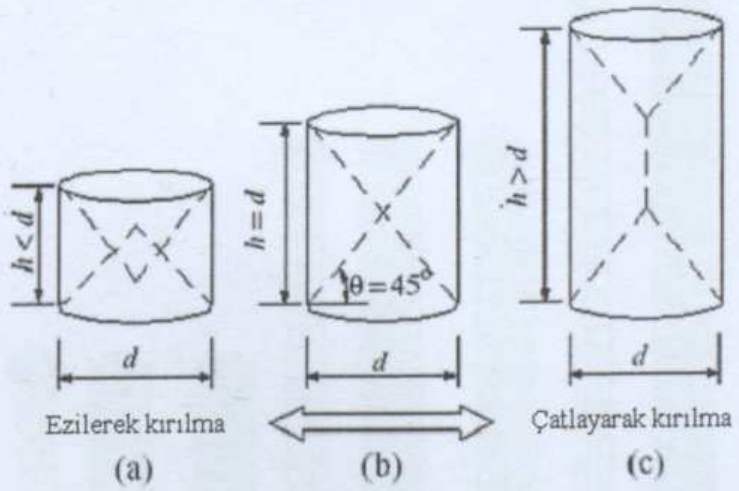
Yazarlar, sargılı beton davranışlarının çoğunun çelik sargılı betonarme kolonlar için yapıldığını ve artan yük karşısında betonun genişleyeceği ve enine donatıyı zorlamak isteyeceği, bu durumda da çeliğin akma dayanımının etkin bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşın, FRP kompozit malzemesinin ise göçme yüküne kadar lineer elastik olarak davranış gösterdiğini, bu durumda da modellemelerde bu durumun dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kim, Tae Yi , (2002), Eksenel basınç altındaki beton elemanlarda boyut etkisini incelemişlerdir. Yazarlar öncelikle, basınç gerilmesinin, çekme gerilmesine göre daha çok karmaşık yapıya sahip olduğunu, bununda çekmede gerilmenin belli noktalarda yoğunlaştığı, basınç gerilmesinin ise tüm bünyeye yayıldığını belirtmişlerdir. Yazarlar öncelikle numunelerde boyut etkisini, numunede kullanılan agrega boyutunun etki ettiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda Bazant (1984) boyutsal analizlerde dikkate aldığı boyut etki kanununu (*size effect law)* açıklamışlardır. İçsel kırıkların boyutlarının, kullanılan maksimum

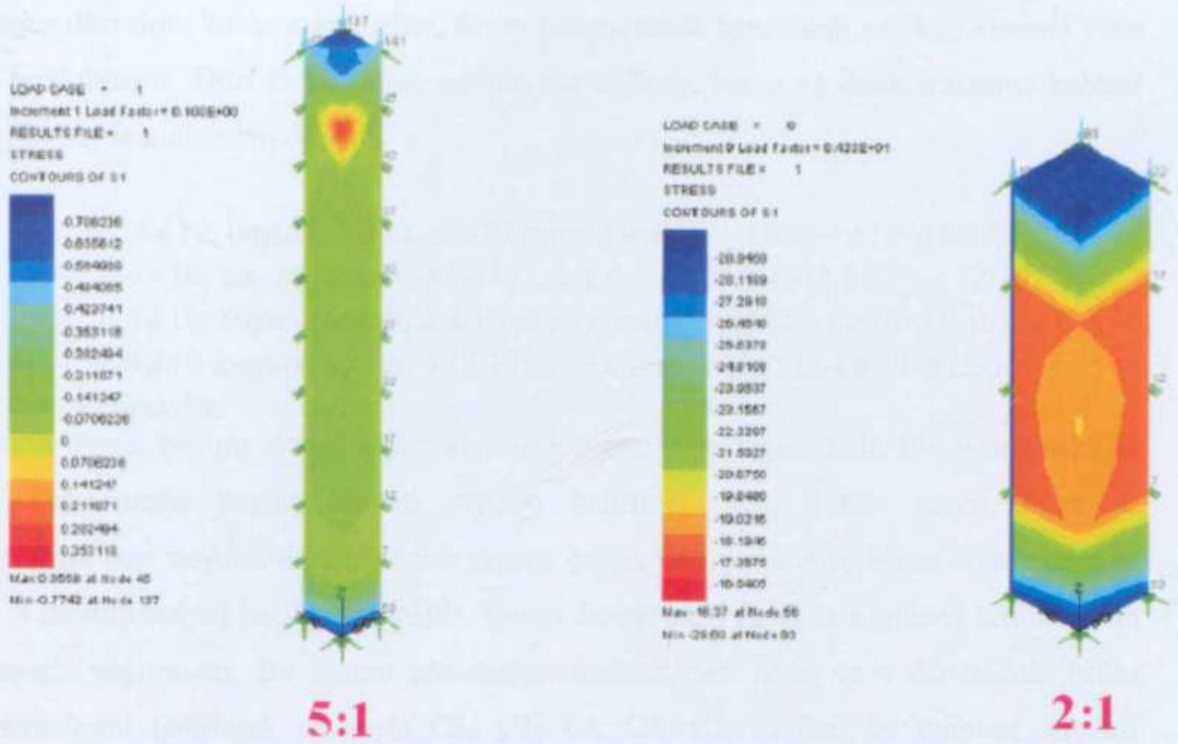
agrega boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak aynı agrega yapısına sahip, farklı büyüklükteki numunelerinde farklı kırılma davranışında bulunacaklarını belirtmişlerdir. Aynı boyutta olmayan silindir numuneler için boyut etki katsayısı sunmuşlardır: silindirik bir beton numuneye basınç yükü uygulandığında, yanal yönde genişleme eğilimine gidecektir. Bu durumda beraberinde numunede sürtünme kuvvetleri doğurur. Böylece kırılma konisi oluşur. Yanal zorlanmalardan kurtulunduğunda yanal basınç kuvveti de kaybolmuş olur ve yarılma şeklinde kırılmalar oluşur. Bu kırılma oluşumunun yeri ise numune boyutunun (boy/enkesit) oranına bağlıdır.



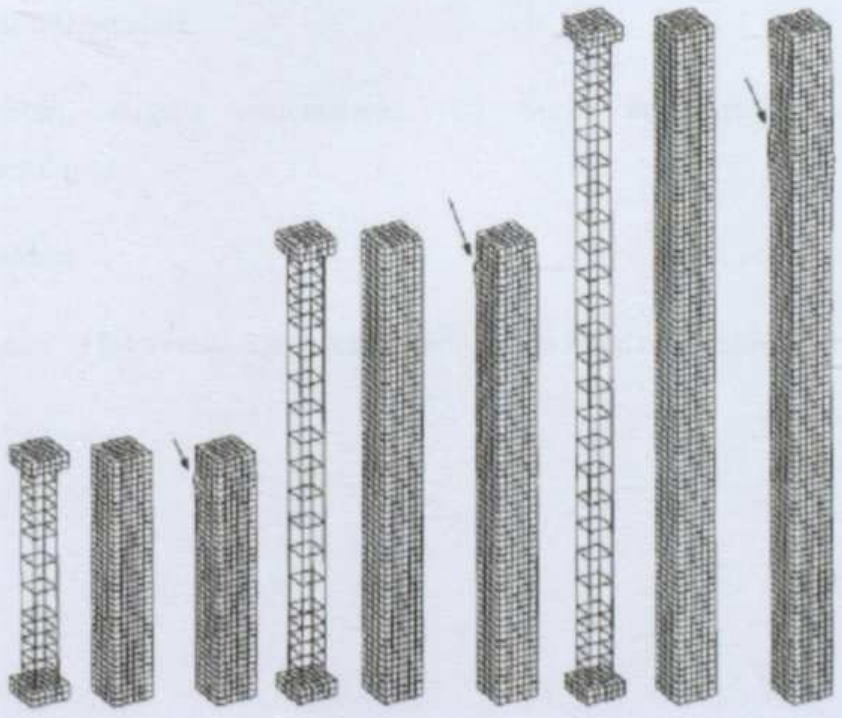
Şekil 3.7 Basınç kırılmasında, boyut etkisi (Kim ve Tae Yi, 2002)



Şekil 3.8 Boyut etkisinden dolayı basınç altında kırılma şekilleri (Kim ve Tae Yi, 2002)



Şekil 3.9 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde kırılmaya neden olacak maksimum çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 3.10 Beton kolonlarda sonlu elemanlar analizi ile boyut etkisinin incelenmesi (Michele Broccal and Zdenek P. Bazant, 2001)

3.5 Deneylerde Kullanılacak Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özellikleri

Hazırlanan dört tipte kolon numuneleri, deney programında belirtildiği şekilde, eksenel yüke maruz bırakılmıştır. Dört farklı deney setinin her birinde, beton ve çelik malzeme kalitesi sabittir. Deneyde kullanılan donatı;

1. 4ϕ10, boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı (L4S8-4ϕ10-ϕ8/10)
2. 4ϕ10, boyuna donatı, ϕ12/10 enine donatı (L4S12-8ϕ10-ϕ12/10)
3. 8ϕ10, boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı (L8S8-8ϕ10-ϕ8/10)
4. 8ϕ10 ,boyuna donatı, ϕ12/10 enine donatı (L8S12-8ϕ10-ϕ12/10)

,şeklindedir.

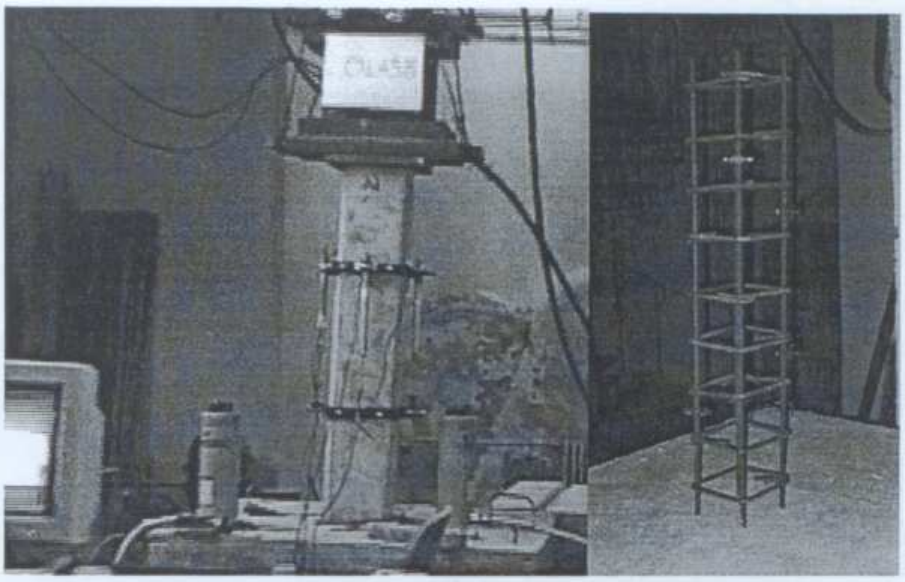
Görüldüğü üzere; boyuna donatı sayısı ve enine donatı çapı değişkendir. Bu durum dikkate alınarak gösterimde boyuna donatı sayısını belirtmek için, donatı sayısı önüne **L** (Longitudinal bar/ boyuna donatı), enine donatı çapını belirtmek için, enine donatı çapının önüne **S** (stirrup/etriye) harfi getirilmiştir. Kolon deneyleri, 5 farklı seri halinde farklı zaman aralıklarında yapılmıştır. Bu durum göz önüne alınarak, seri adını ve o dönemdeki beton mukavemetlerini belirtmek amacıyla C1, C2, C3, C4, C5, harfleri ile numune isimleri başlatılmıştır. Daha sonra ise boyuna donatı sayısı ve enine donatı çapını belirten L ve S harfleri kullanılmıştır; örnekse: 1. seri, **4**ϕ10, boyuna donatı, ϕ**8**/10 enine donatı, **C1L4S8** gibi.

3.6 C1 Serisi Kolon Deneyleri

C1 serisi kolonları, sargısız numunelerdir. C1 Serisi kolonları 4 farklı donatı konfigürasyonuna sahiptir.

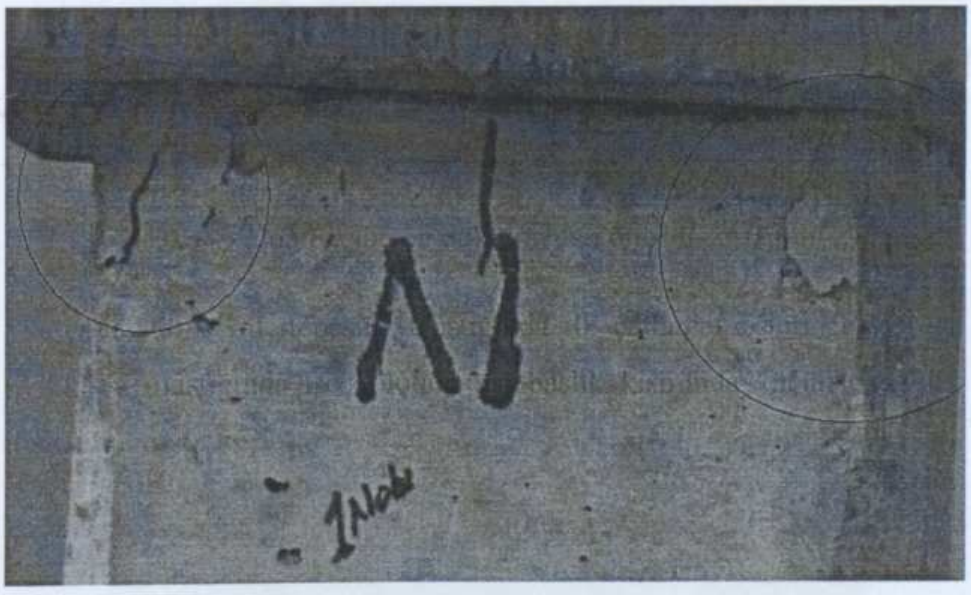
3.6.1 C1L4S8 Kolonu

4ϕ10, boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur.



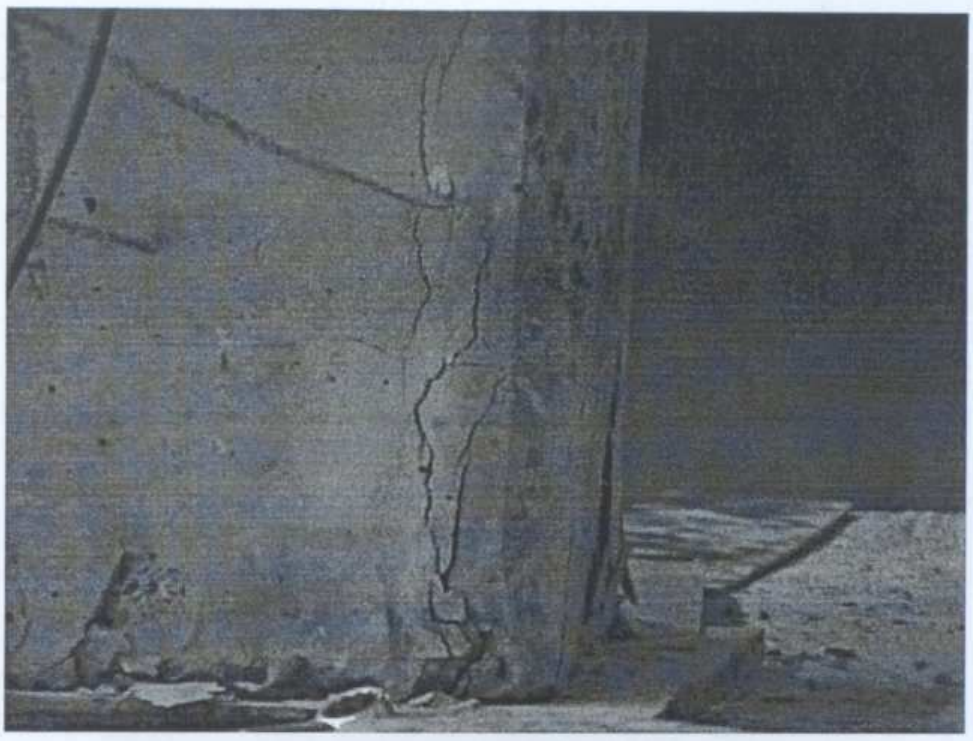
Şekil 3.11 C1L4S8 kolonu ve beton dökülmeden önce hazırlanmış donatı kafesi

Kolonda, yükleme 200kN mertebesine ulaştığında ilk çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Yükleme, 340kN'a ulaştığında ise kolonun üst başlık kısmında küçük çatlaklar oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir.



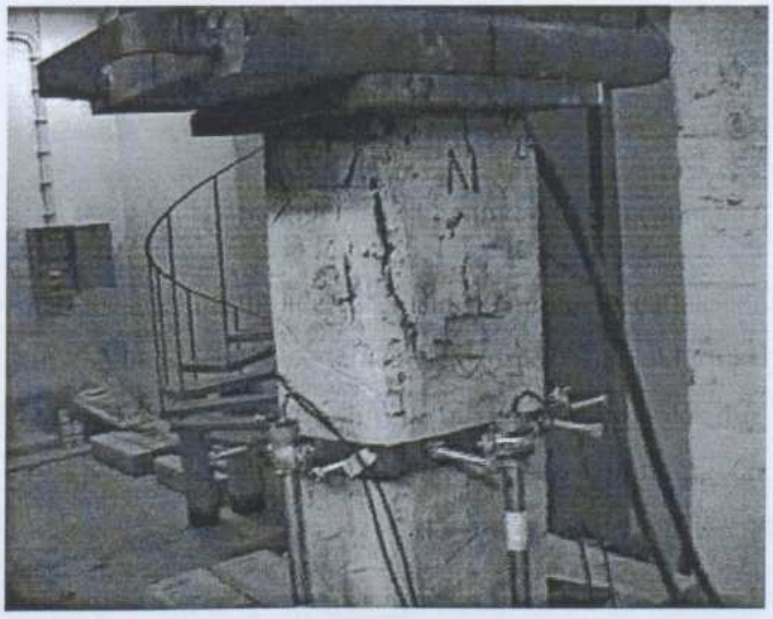
Şekil 3.12 C1L4S8 kolonu üst kısmında deney esnasında oluşan çatlaklar

Yükleme 540kN mertebesine ulaştığında ise, alt başlık kısmında çatlaklar saptanmıştır.



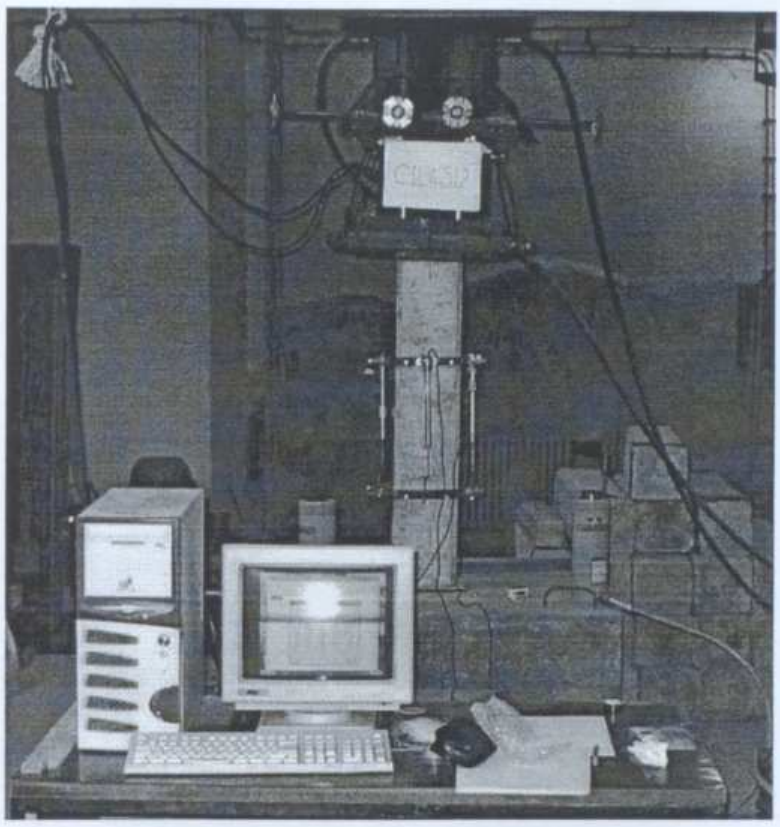
Şekil 3.13 C1L4S8 kolonu alt kısmında oluşan çatlaklar

Yükleme 600 kN mertebesine ulaştığında üst başlık kısmındaki çatlak açılmıştır ve belirgin çatlaklar oluşmuştur. Yüklemenin ilerlemesiyle, mikro çatlakların makro çatlaklara dönüştüğü, kısmi olarak kabuk betonun belirgin bir şekilde çekirdek betonundan ayrıldığı gözlemlenmiştir. 949 kN yük mertebesine gelindiğinde ise, kolonun göçme yüküne ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3.14 C1L4S8 kolonu deney sonrasında üst kısımda oluşmuş çatlaklar

3.6.2 C1L4S12 Kolonu

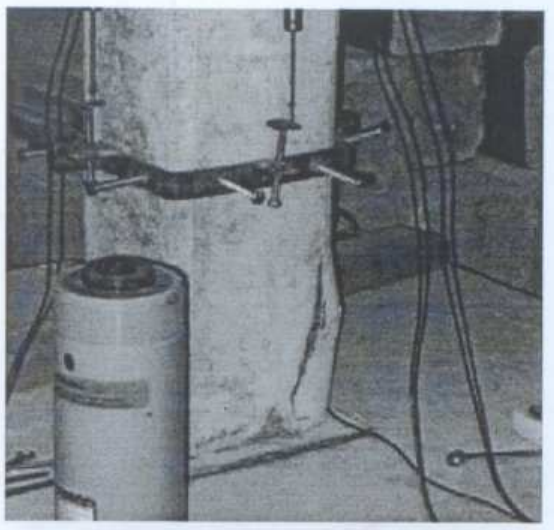


Şekil 3.15 C1L4S12 kolonu

$4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip bir kolondur. 263 kN yük mertebesinde ilk çatlak sesleri duyulmaya başlamıştır. Yük seviyesi 460 kN'a ulaştığında ise, kolonda çatlak sesleri artmıştır.

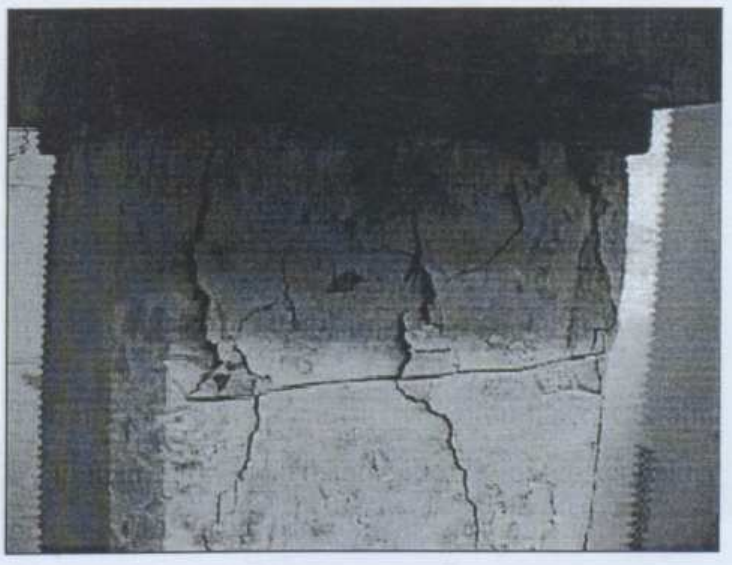
Şekil 3.16 C1L4S12 kolonu (yükleme esnasında ilk çatlakların oluştuğu kısım)

675 kN yük seviyesine ulaşıldığında, alt başlıkta başlayan kılcal çatlaklar giderek açılmaya başlamıştır.



Şekil 3.17 C1L4S12 kolonu, artan yükle beraber açılan çatlak

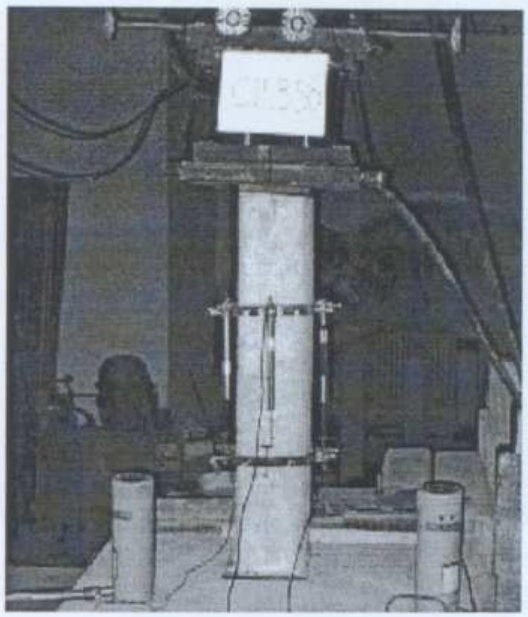
Yükleme esnasında kolon kabuk betonu atmıştır ve kolon halen yük almaya devam etmiştir. Bu durum, kolonda bulunan sargı donatısının etkinliğini göstermektedir. Göçme yüküne ulaşıldığında ise kolon üst başlık kısmında ezilmeler görülmüştür.



Şekil 3.18 C1L4S12 kolonu (üst başlığında görülen ezilme)

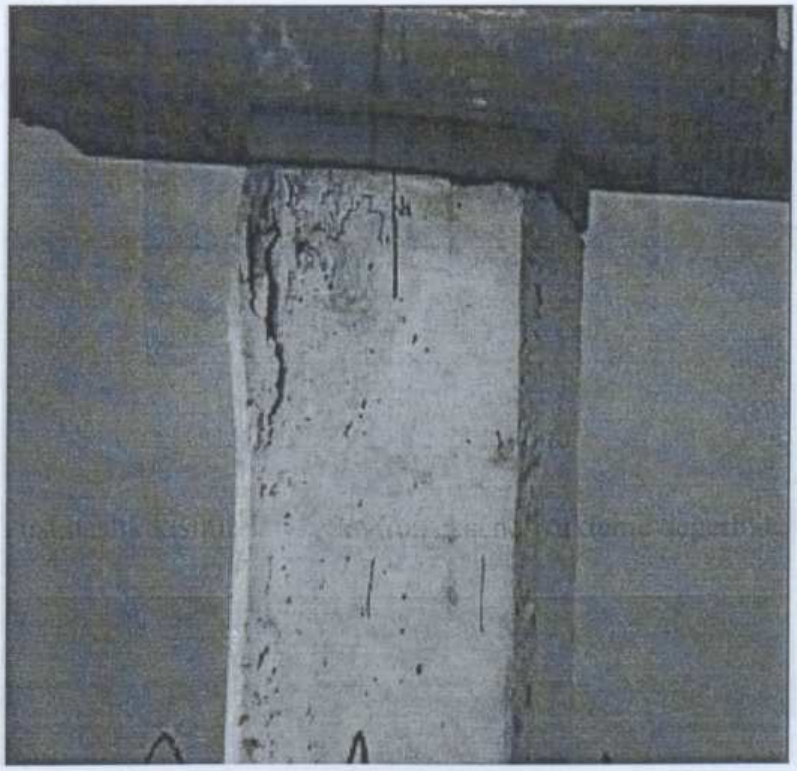
3.6.3 C1L8S8 Kolonu

$8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip bir kolondur.



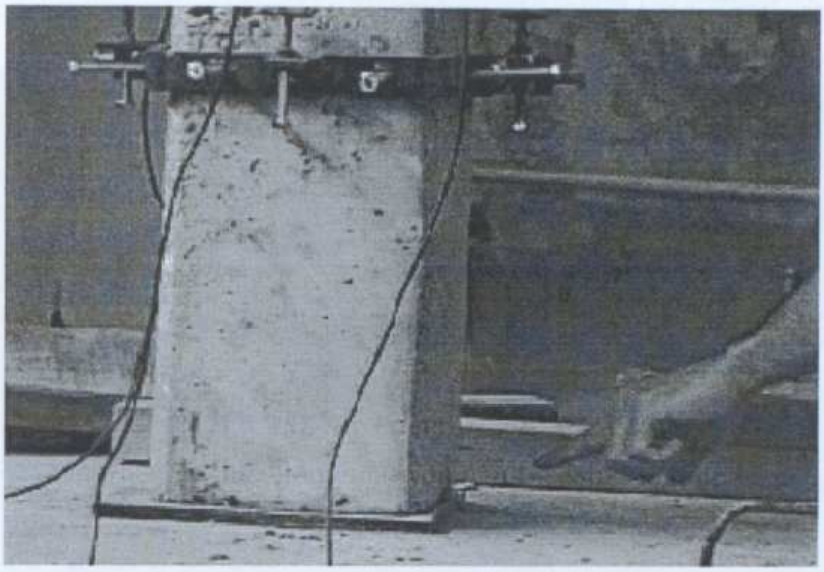
Şekil 3.19 C1L8S8 kolonu

İlk çatlama kolon üst başlık kısmında 375 kN'luk eksenel yükleme değerinde oluşmuştur.



Şekil 3.20 C1L8S8 kolonu (yüklemeyle beraber ilk görülen çatlak)

525 kN yükleme mertebesine ulaşıldığında kolon alt başlık kısmında çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

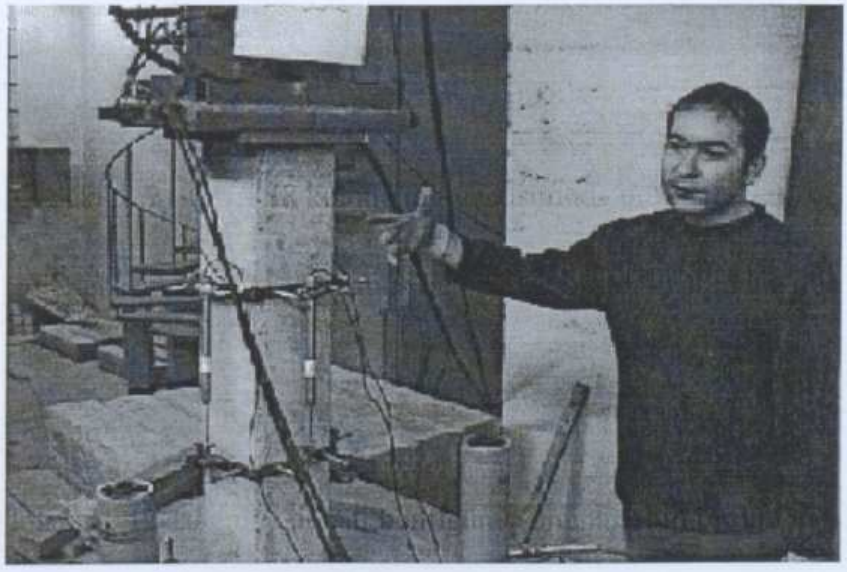


Şekil 3.21 C1L8S8 kolonu (alt uç kısmında oluşan çatlak)

808kN yükleme mertebesinde ise kolon kabuk betonu üst başlık kısmından dökülerek göçme oluşmuştur.

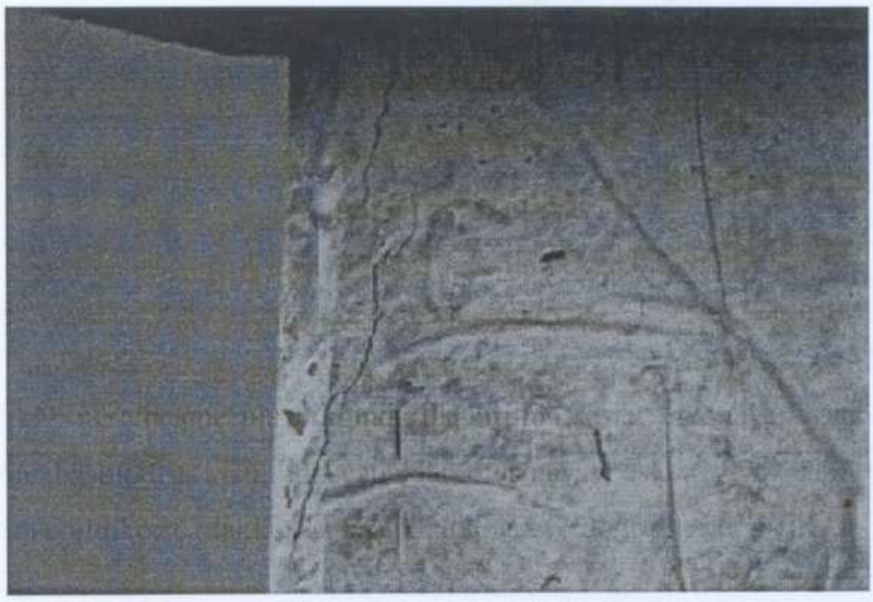
3.6.4 C1L8S12 Kolonu

$8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip bir kolondur.

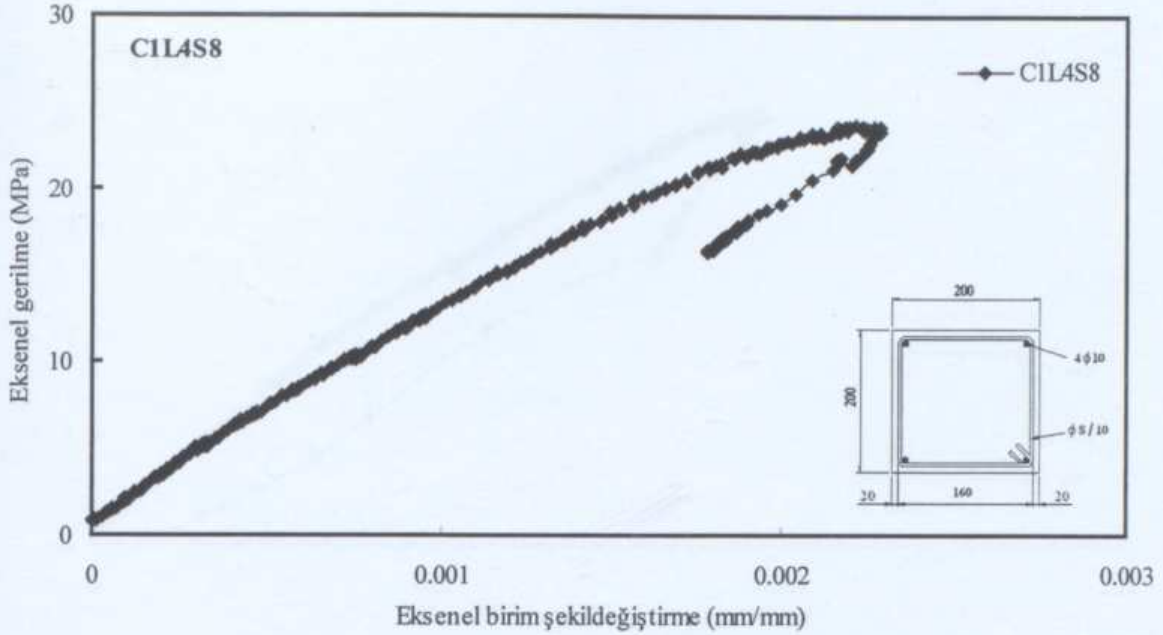


Şekil 3.22 C1L8S12 serisi kolonu

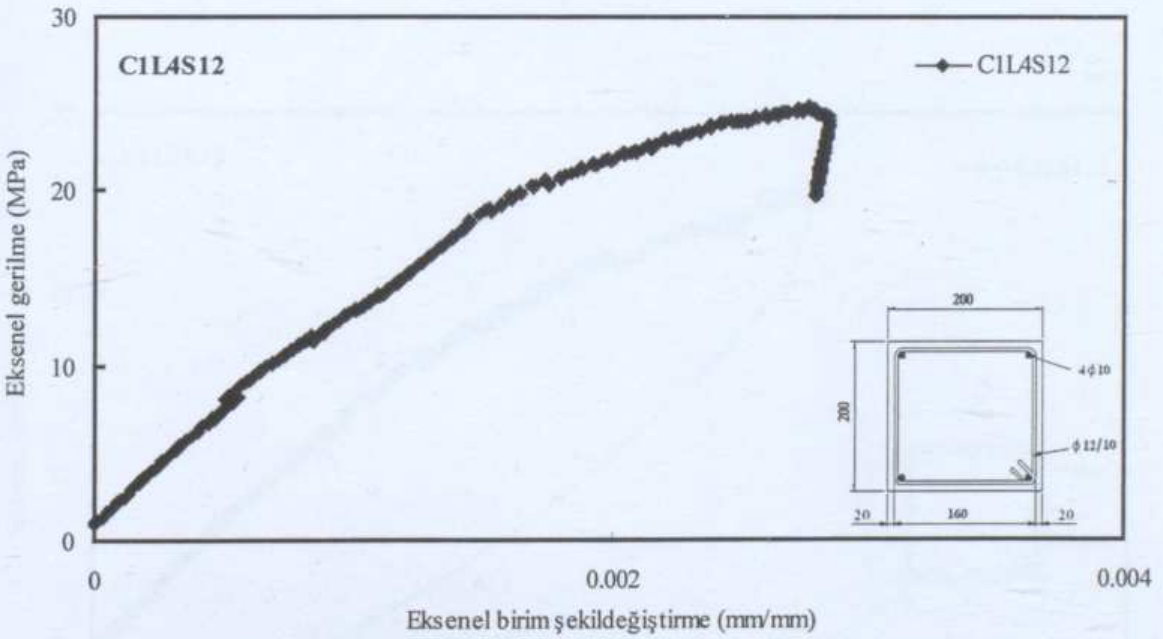
Yükleme 650 kN mertebesine ulaşıldığında ilk kırılma sesleri gelmeye başlamıştır. 770 kN yük seviyesinde başlık üst kısmında çatlaklar oluşmaya başlamış ve ezilme görülmüştür. Yükleme devam edildikçe çatlaklar üst başlıktan gövdeye doğru ilerlemiştir.



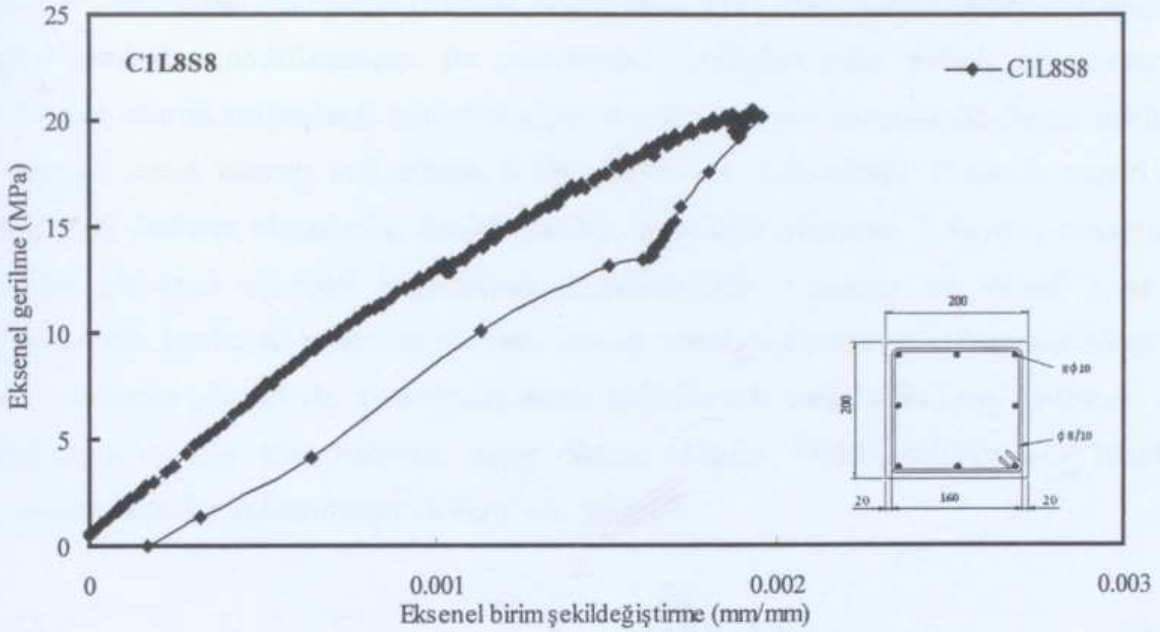
Şekil 3.23 C1L8S12 kolonu (üst uç bölgesi)



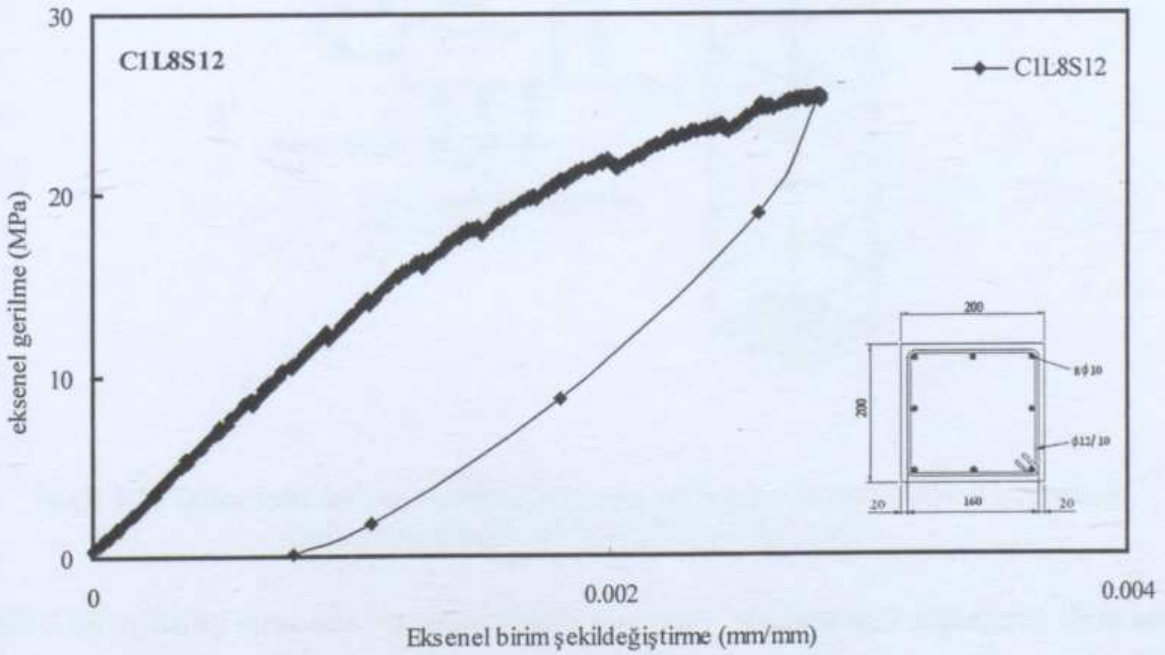
Şekil 3.24 C1L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.25 C1L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

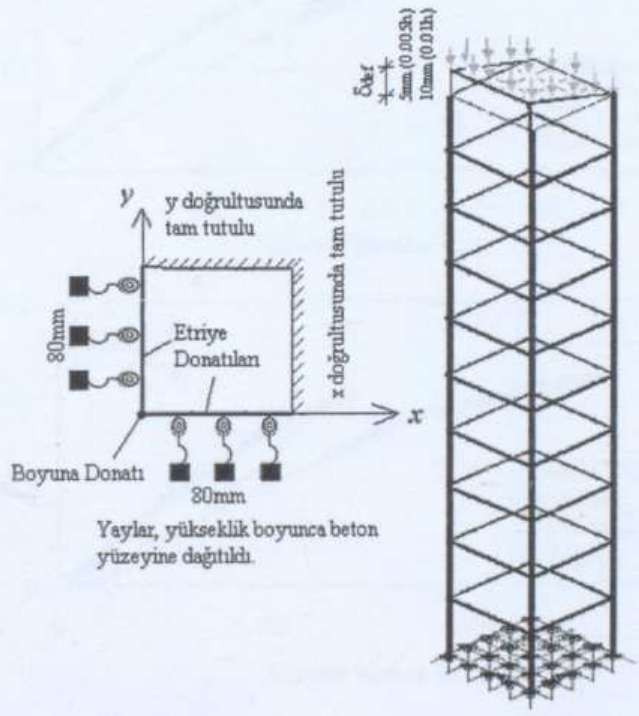


Şekil 3.26 C1L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.27 C1L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

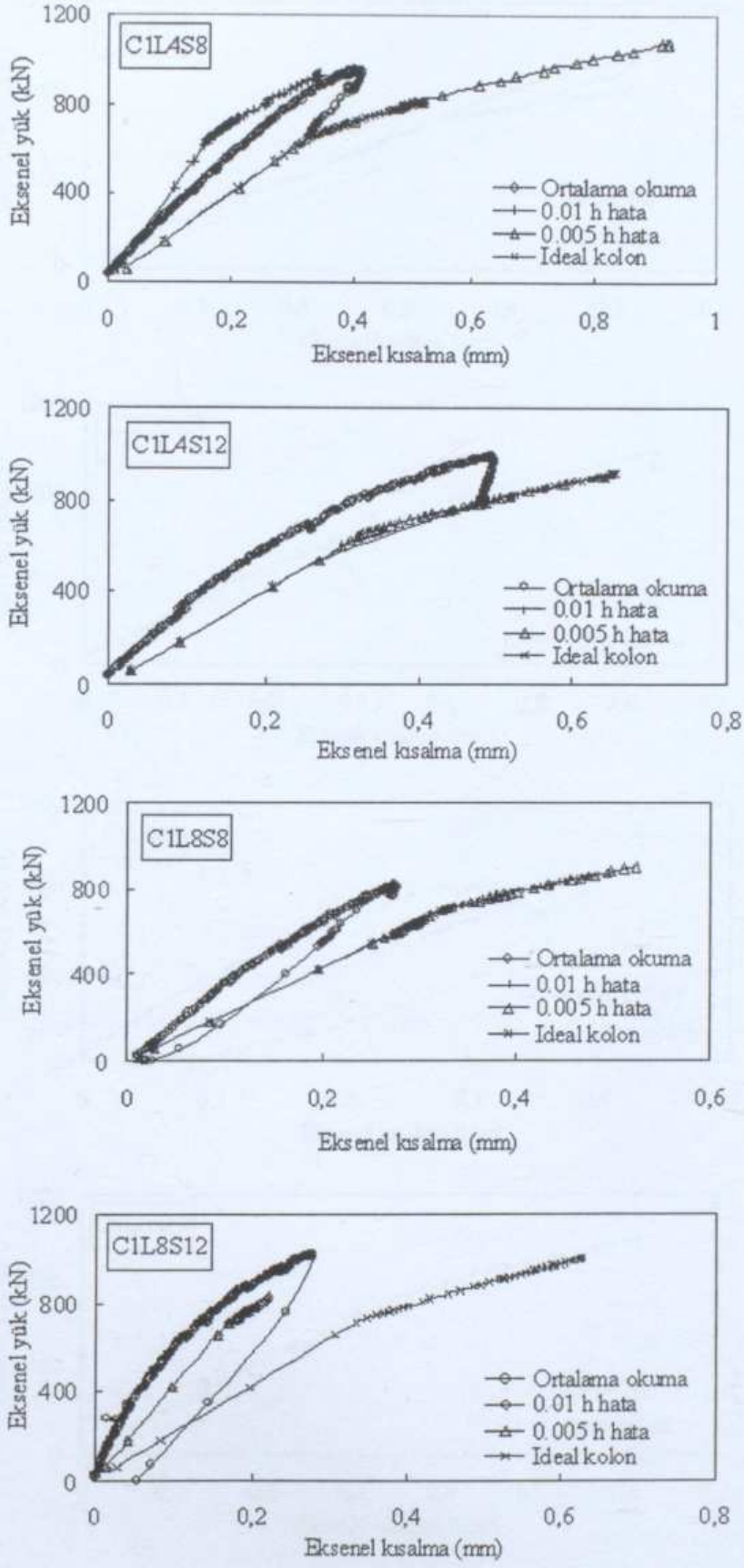
Deneysel çalışmadaki betonarme kolonlar, doğrusal olmayan sonlu eleman modeliyle Akgün, (2006) tarafından modellenmiştir. Bu modellemede kolonlar; sekiz noktalı, eşparametrik, sürekli katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Boyuna ve yanal donatılar iki düğüm noktalı, üç boyutlu çubuk eleman kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür. Sistemin simetri ve yüklemenin üniform olmasından faydalanılarak, eşmerkezli yüklenen 3 boyutlu betonarme kolonlar 1/4 kesit simetrisi kullanılarak modellenmiştir. Kolonun üst yüzeyi x ve y doğrultusunda tutulu, alt yüzey ise ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen deney kolonlarında sargı etkisi, yay katsayıları ile tanımlanmıştır. Yay katsayılarında değer olarak, Akgün, (2006) çalışmasında sunulan parametrik değerler kullanılmıştır (Köksal vd., 2006).



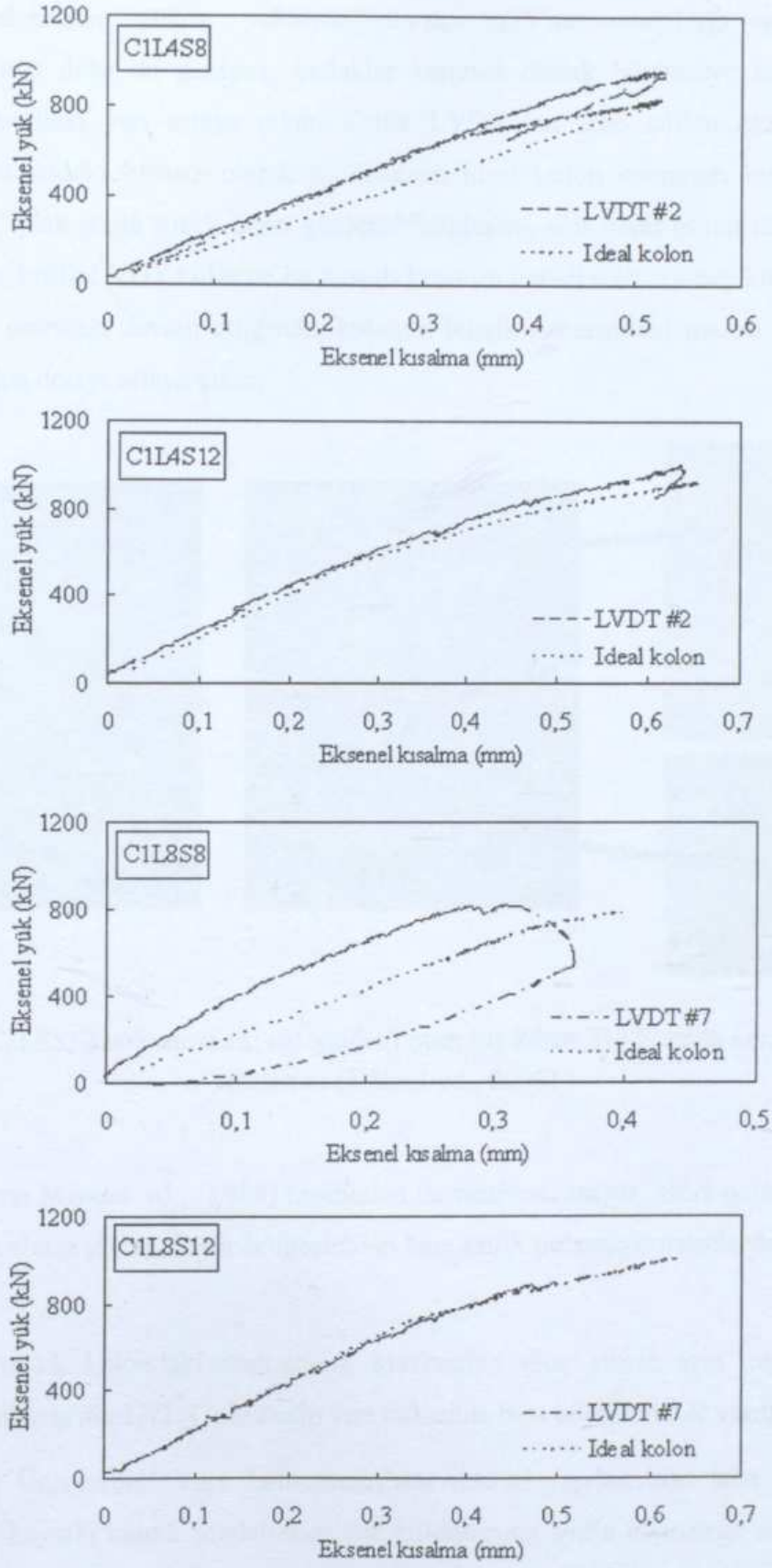
Şekil 3.28 Betonarme kolonun sonlu elemanlar programında hatalı ve hatasız olarak sonlu elemanlara ayrılması (Köksal vd., 2006)

Şekil 3.29'de deney sırasında okumaları yapan üç LVDT'nin ortalama değerlerini ifade eden eğriler ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen %1 ve %0,5 hata oranı içeren kolonların eksenel yük altındaki kısalma eğrileri görülmektedir.

%1 ve %0,5 hata oranı içeren kolonların eksenel yük-eksenel kısalma eğrileri ile deney sonuçlarından elde edilen, ortalama okumalar yapan LVDT sonuçlarına çok yakındır (Şekil 3.30).

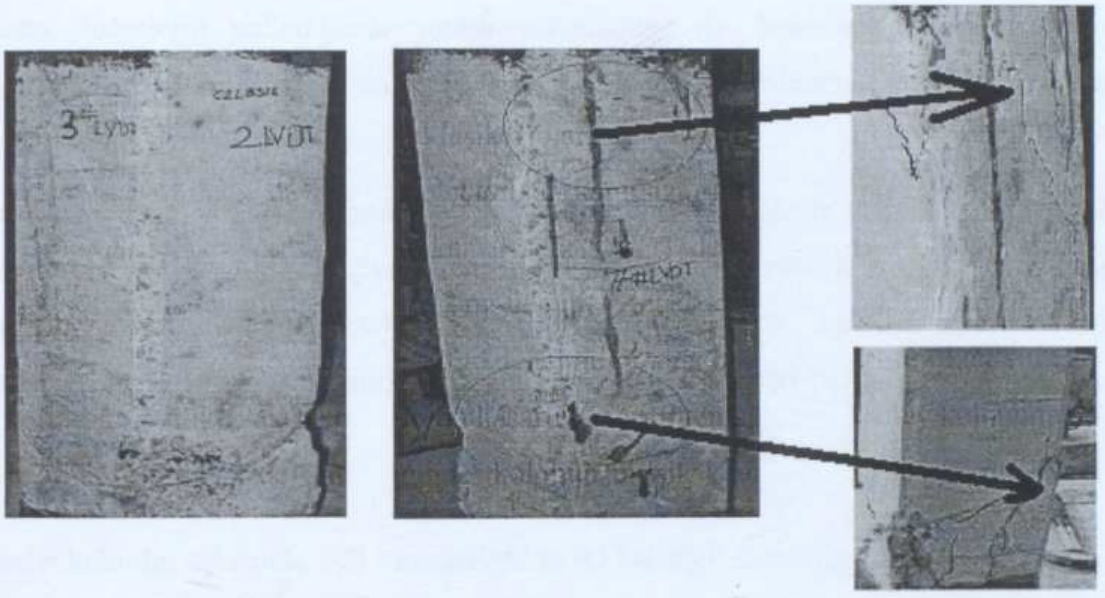


Şekil 3.29 Deney sonuçlarından elde edilen üç LVDT'nin ortalama okumaları ile geometrik hatalar etkisinde modellenen kolonların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre eksenel yük-eksenel kısalma eğrilerinin karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)



Şekil 3.30 İdeal kolondaki sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ağır hasar görmüş bölgeye yerleştirilen kritik LVDT okumalarının karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)

Özellikle maksimum yükün yaklaşık olarak %75'ine ulaşıldığı zaman, plastik şekildeğiştirmeler daha da genişler, çatlaklar kararsız olarak büyümeye başlar ve makro çatlakların hasardaki yeri ortaya çıkar. Kritik LVDT'den elde edilen okumalarla, sonlu elemanlar analizindeki hatasız olarak modellenen ideal kolon sonuçları birbirine yakındır (Şekil 3.29). Çıplak gözle sınırlı hasar gözlenebildiğinden, ağır hasar gören kenarın yerleşimi farklı olsa bile, kritik LVDT kolonun bu hasarlı kenarını temsil eder. Deney kolonunun göçme yüküne yakın oturması devam ettiğinde, kolonun bitişik kenarındaki makro çatlaklar hacim genişlemesinden dolayı ortaya çıkar.



Şekil 3.31 C2L8S12 kolonuna ait: (a) Şiddetli oturmuş kenar (b) Komşu kenardaki makro çatlaklar (Köksal vd., 2006)

Benzer yaklaşım Mander vd., (1988) tarafından da benimsenmiştir. Dört potansiyometredeki ortalama okumaların yerine, hasar bölgesindeki bazı kritik potansiyometrelerdeki ölçü dikkate alınmıştır.

Ancak açıktır ki; kolondaki maksimum kısalmaları elde etmek için sınırlanmış hasar bölgesine konulan kritik LVDT'nin kesin yeri hakkında bazı belirsizlikler vardır.

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarı'nda testleri yapılan dört adet kolonun deney dataları ile üç boyutlu olarak modellenen test kolonlarının sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, eksenel şekildeğiştirmenin ölçülmesindeki bazı belirsizlikler araştırılmıştır.

Bu amaçla; göçme yüküne yakın olan LVDT okumalarının ortalamaları kullanılırken, göçme yükünün yaklaşık olarak %75 değerini aldığı, kararsız çatlağın yayılmaya başlamasından sonra kolonun şiddetli oturmuş kenarındaki hasar yığılmasını gösteren kritik LVDT okumaları tercih edilmiştir.

Bu durumda sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel veriler iyi uyum sağlamaktadır.

Diğer taraftan göçme bölgesindeki kritik LVDT'nin kesin olarak yerinin belirlenmesinde bazı belirsizlikler vardır. Kolonun hasarlı bölgesindeki LVDT için alternatif yerler, kolondaki oturma ölçülerek planlanabilir. Bu sonuçla, eksenel kısalmaların belirlenmesi için bazı ortalama değerlerin kullanılması yeterli sayılabilirse de, betonarme kolonların eksenel şekildeğiştirmenin ölçülmesi için kritik LVDT yerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulduğu görünmektedir.

Kolonların üst yüzeyindeki karşılıklı iki kenarın arasında çok küçük yükseklik farkını dikkate alan sonlu eleman analizi sonuçları ile LVDT ortalamalarının birbirine yakın çıkması dikkate değerdir. Kolon numunelerindeki bu tür hataların hazırlık aşaması sırasında olması mümkündür ve kolonlar hazırlanırken dikkatle kontrol edilmelidir (Köksal vd., 2006).

3.7 C2 Serisi Kolon Deneyleri

C2 serisi kolonlar uçlarında 100 mm derinlikte iki kat FRP sargılıdır. Bunun için kolon sargı köşeleri 20 mm çapında yuvarlatılarak pahlanmış ve FRP sarılacak bölgeye astar solventi sürülmüştür. FRP sargı-kolon ve sargı-sargı arasında boşluk bırakılmamasına özen gösterilmiştir. Bunun için gerekli görüldüğünde FRP kompozit malzemesi uygulanacak yüzey epoksi harcı ile pürüzsüz bir hale getirilmiş ve bundan sonra FRP kompozit malzemesinin sargı işlemine başlanmıştır. FRP kompozit malzemesi sarılırken üzerinden rulo ile geçilmiş, bu sayede olabilecek hava boşlukları en aza indirilmiştir. LP sargı aderans boyu için, ACI Committee 440' belirtildiği üzere:

$$L_e = \frac{23300}{\left(nt_{frp}E_{frp}\right)^{0.58}} \tag{3.1}$$

bağıntısı göz önüne alınmıştır. Bu bağıntıya göre, aktif sargı aderans boyu, 51.5 mm olması gerekirken, 150-200 mm alınarak uygulamada olabilecek yetersiz ankraj ihtimali bertaraf edilmiştir.

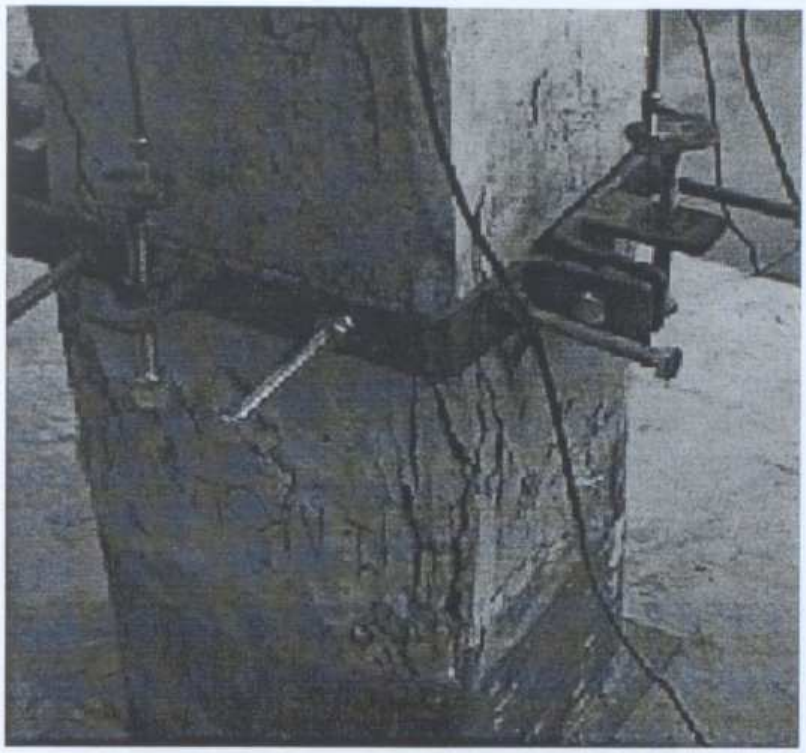
C2 serisi, iki kat kısmi FRP sargılı kolon deneylerinde, FRP malzemesi sargısının son bulduğu noktada, ilk çatlakların başlayıp, bu bölgede yoğunlaşarak orta bölgeye doğru ilerlediği, tüm C2 serisi deneyler için ortak bir gözlemdir ve FRP kompozit malzemesinin etkinliğine işaret etmektedir

3.7.1 C2L4S8 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 10 cm derinliğinde 2 kat FRP kompozit tabakası ile sarılmış, $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur.

Şekil 3.32 C2L4S8 kolonu

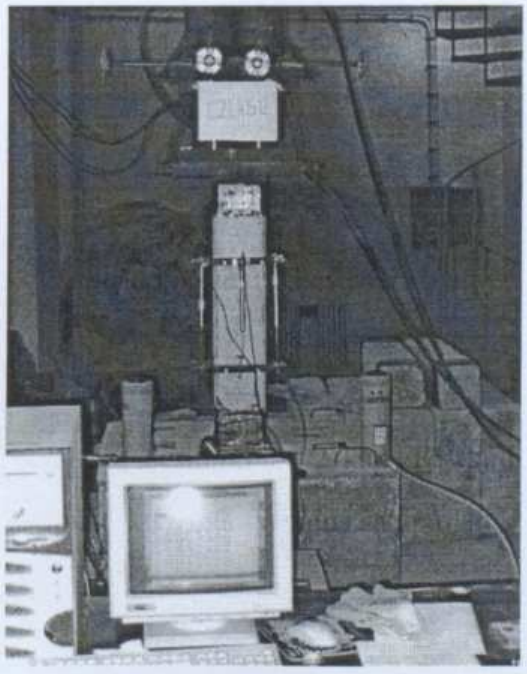
Yükleme 440 kN mertebesine ulaştığında çatlama sesleri başlamıştır. 975 kN yük mertebesinde ise kolonda, FRP kompozit sargının bittiği yerde çatlaklar görülmeye başlamış ve kolon bu bölgede dağılarak taşıma gücüne ulaşmıştır.



Şekil 3.33 C2L4S8 kolonu (deney sonrası alt uç bölgesi)

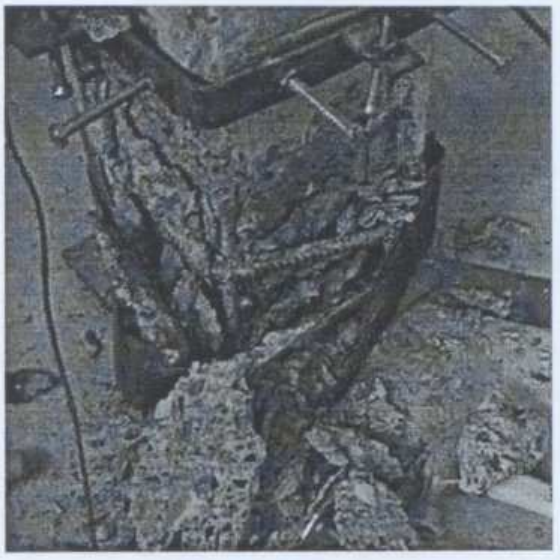
3.7.2 C2L4S12 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 10 cm derinliğinde 2 kat FRP kompozit ile sarılmış, $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur

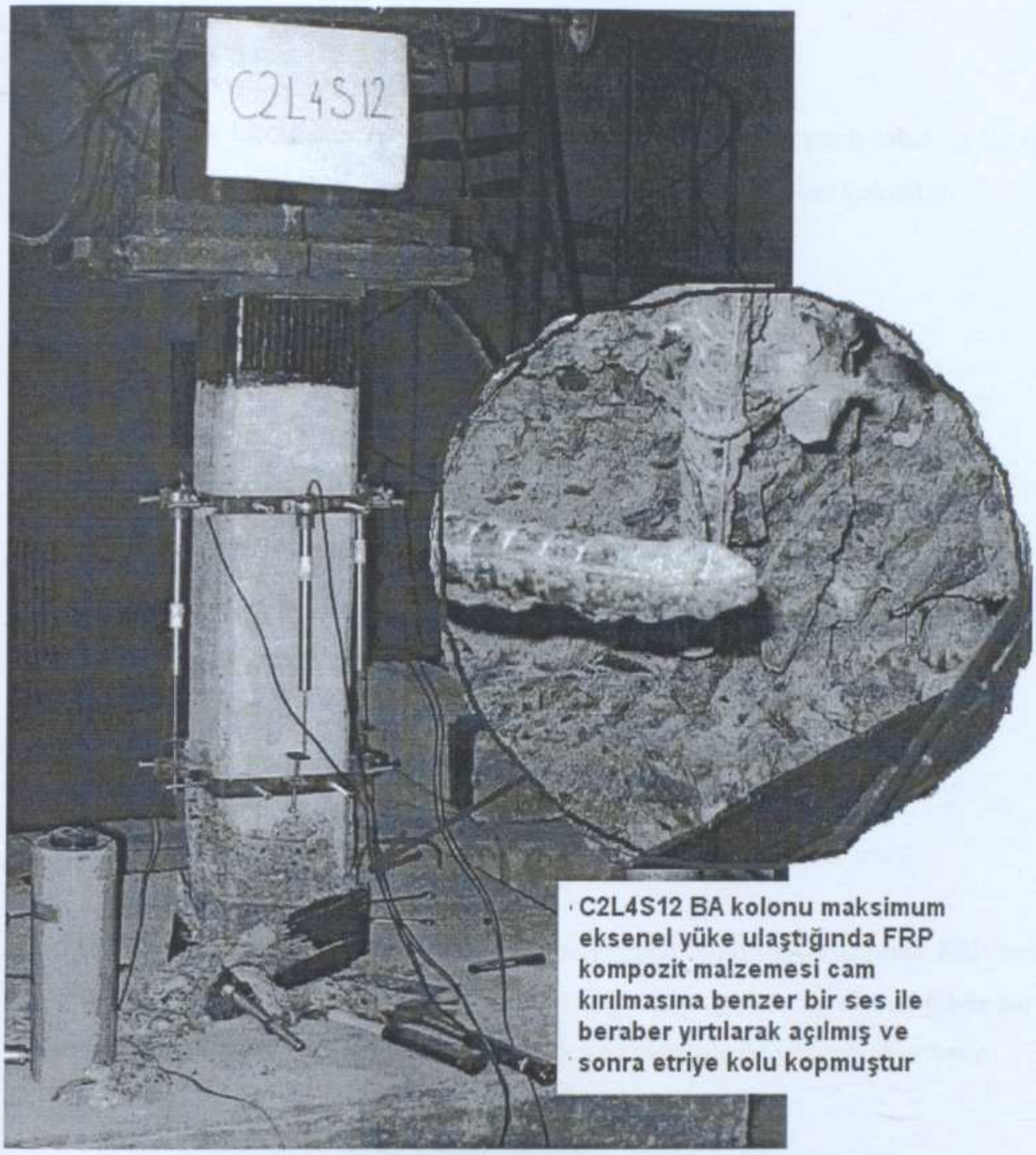


Şekil 3.34 C2L4S12 serisi kolonu

Bu kolonda 420 kN'da ilk çatlak oluşmaya başlamıştır ve 1142 kN yük mertebesinde ise alt başlıktaki FRP kompozit malzemesi yırtılarak aniden açılma yapmış, bu bölgedeki betonun dağıldığı görülmüştür.



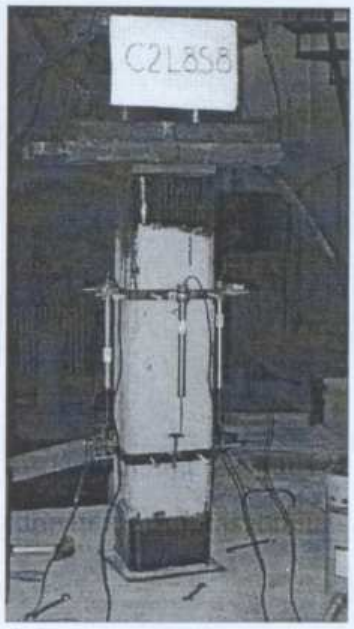
Şekil 3.35 C2L4S12 serisi kolonu



Şekil 3.36 C2L4S12 kolonu (deney sonrası göçme bölgesinin görünümü)

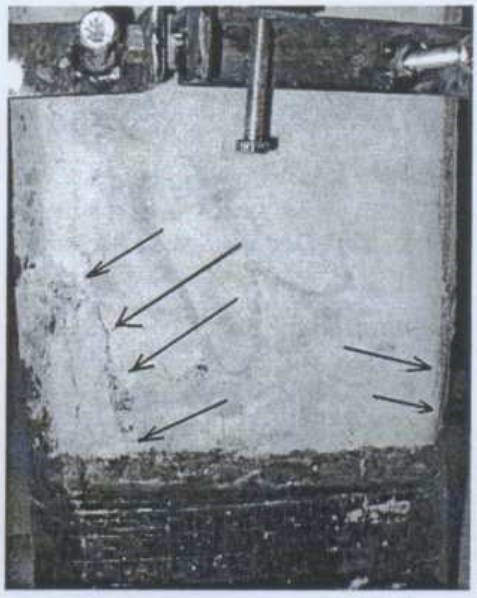
3.7.3 C2L8S8 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 10 cm uzunluğunda, 2 kat FRP kompozit tabakası ile sarılmış, 8ϕ10 boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur.



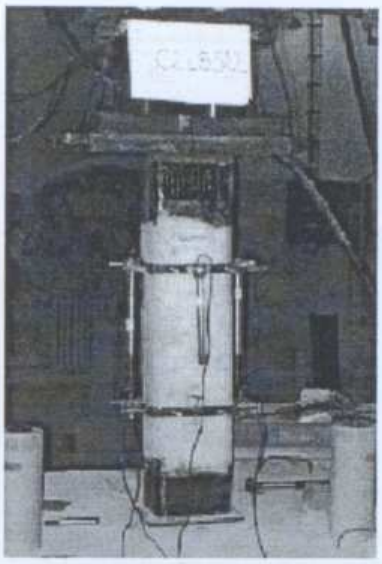
Şekil 3.37 C2L8S8 kolonu

C2L8S8 kolonunda ilk çatlak 525 kN yük seviyesinde, kolon alt kısmında FRP kompozit sargının bittiği noktadan oluşmaya başlamıştır. 1213 kN mertebesine ulaşıldığında ise mikro çatlakların büyük çatlaklara dönüştüğü görülmüş ve kolon göçme yüküne ulaşmıştır.



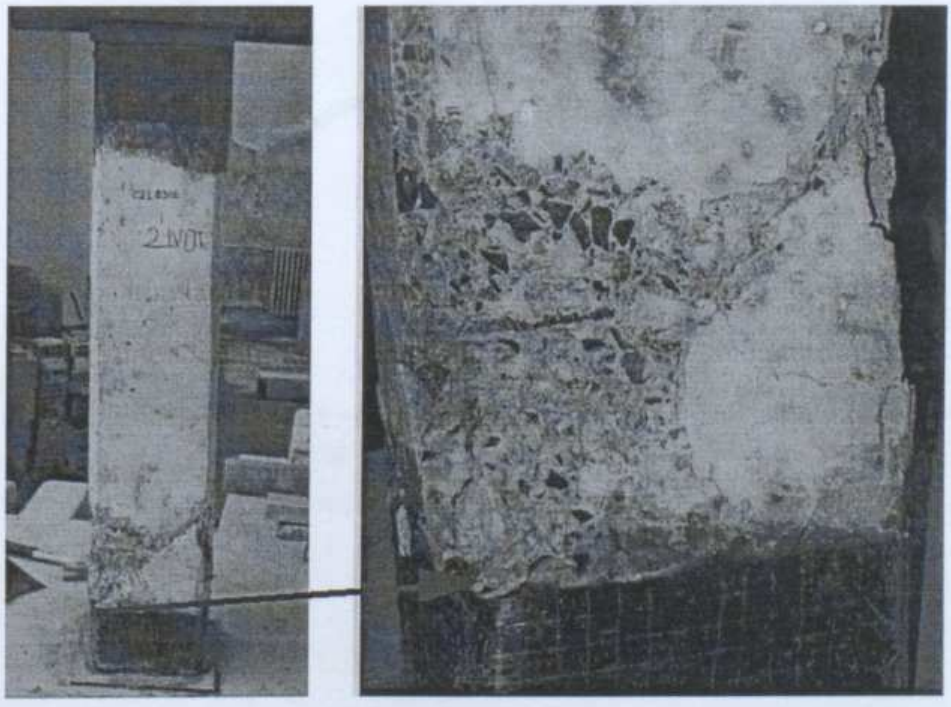
Şekil 3.38 C2L8S8 kolonu (deney sonrası kolon alt uç bölgesi)

3.7.4 C2L8S12 Kolonu

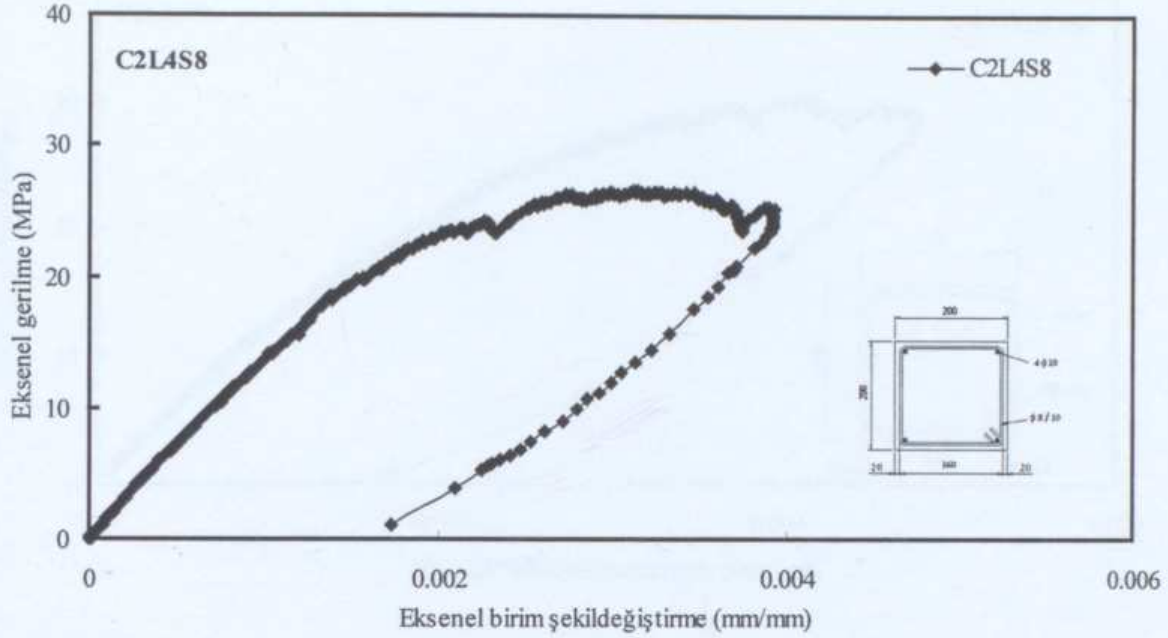


Şekil 3.39 C2L4S12 kolonu

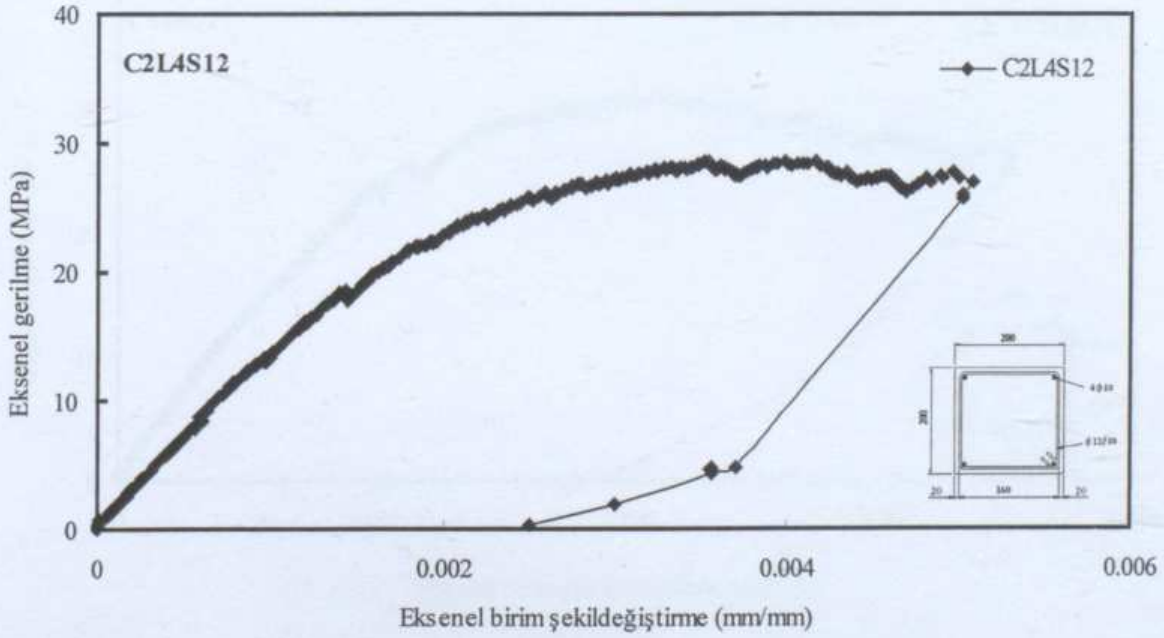
Alt ve üst başlık kısmından 10 cm derinliğinde 2 kat FRP kompozit ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip olan kolondur. Yükleme 350 kN mertebesine geldiğinde FRP kompozit malzemesinden camsı çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Çatlak, önceki kolonlarda olduğu gibi, FRP kompozit sargının bittiği yerden oluşmaya başlayarak gövde ortasına doğru ilerlemiş ve kırılma gerçekleşmiştir.



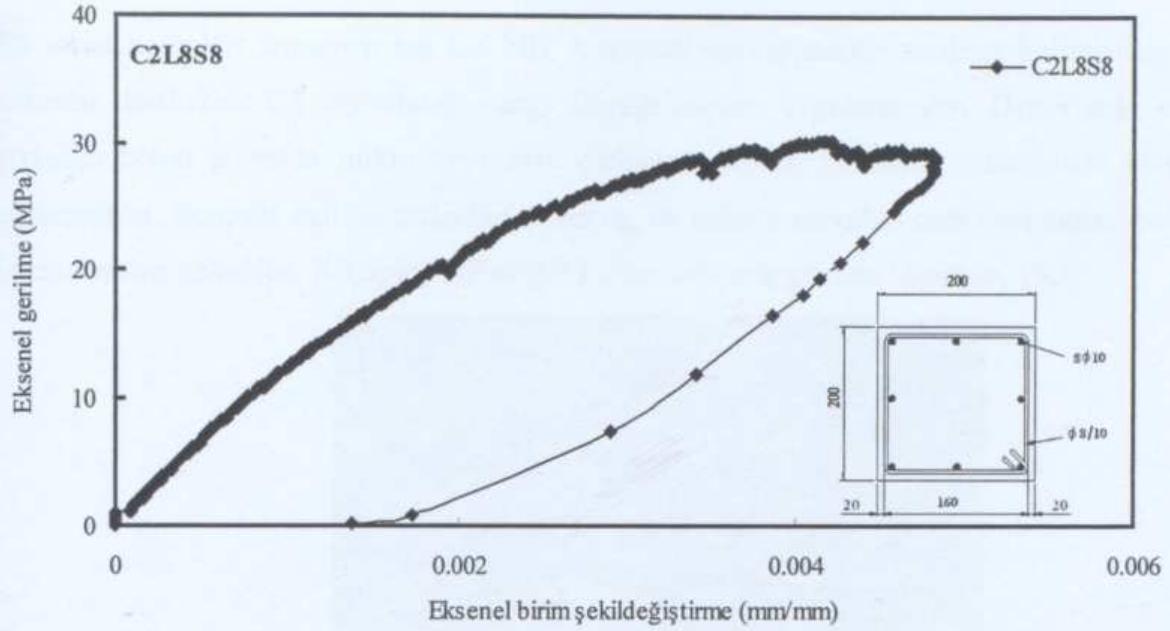
Şekil 3.40 C2L8S12 kolonunda oluşan hasarın yakın plan görünümü



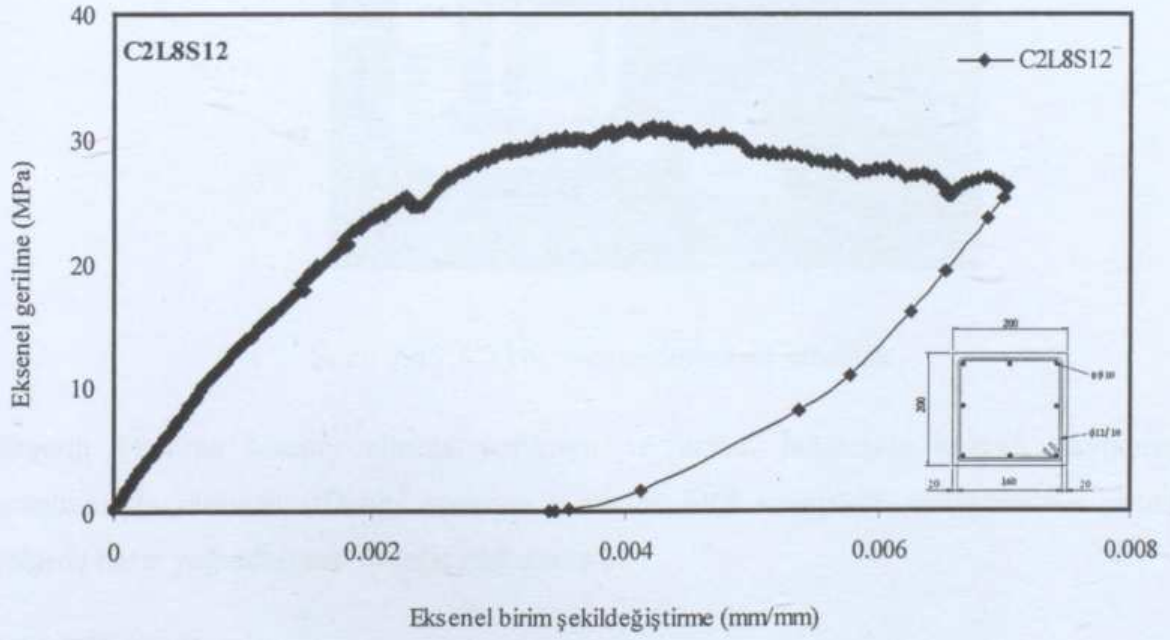
Şekil 3.41 C2L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.42 C2L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



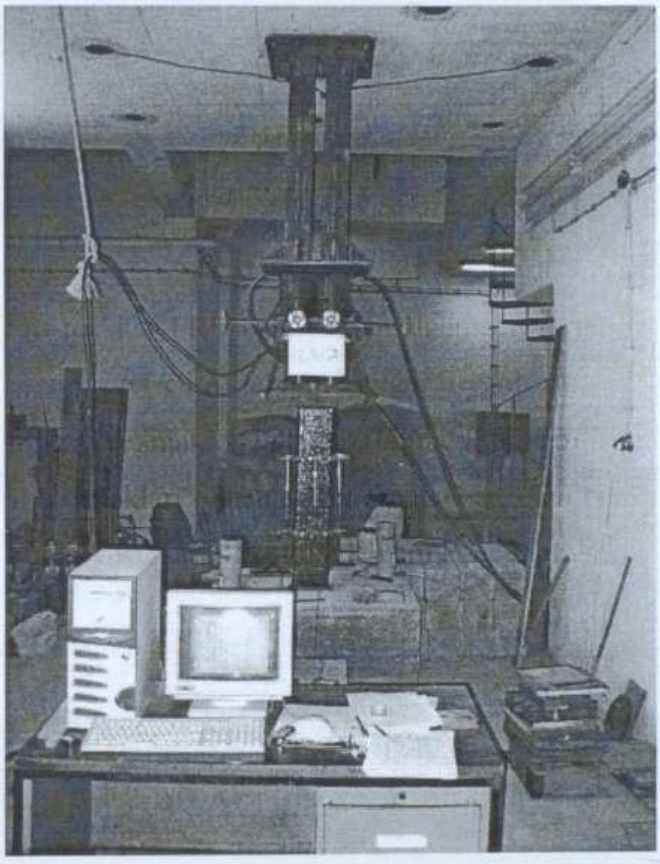
Şekil 3.43 C2L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.44 C2L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

3.8 C3 Serisi Kolon Deneyleri

C3 serisi kolonlar; tamamen tek kat FRP kompozit malzemesiyle sarılmış kolonlardır. Bu kolonlar sarılırken C2 serisindeki sargı tekniği aynen uygulanmıştır. Deneylerde sargı etkisinin beton gövdede mikro ve makro çatlaklar takiben hissedilir mertebelere ulaştığı gözlenmiştir. Betonda ezilme çatlakları oluşmuş, bu esnada sargıdan cam kırılmasına benzer kopma sesleri gelmiştir. Komple FRP sargılı kolonun taşıma gücüne ulaşması, FRP

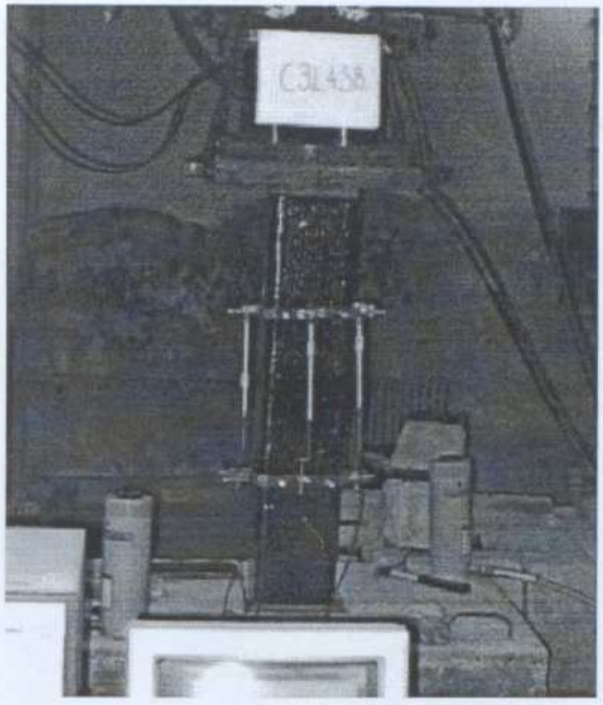


Şekil 3.45 C3 kolon deneylerine ait düzenek

sargının kuşatma basıncı altında yırtılması ve kabuk betonuyla birleşik davranışının bozulmasıyla olmuştur. Deney sonunda, kolonda FRP kompozit malzemesinin yırtıldığı bölgede hasar yoğunlaşması olduğu gözlenmiştir.

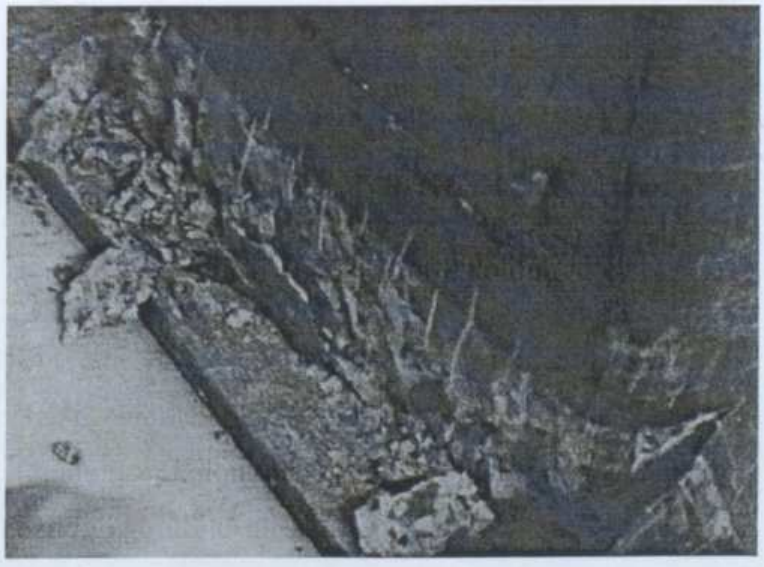
3.8.1 C3L4S8 Kolonu

Tamamen tek kat halinde FRP kompozit ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna donatılı, $\phi 8/10$ enine donatılı konfigürasyonına sahip olan kolondur.



Şekil 3.46 C3L4S8 kolonu

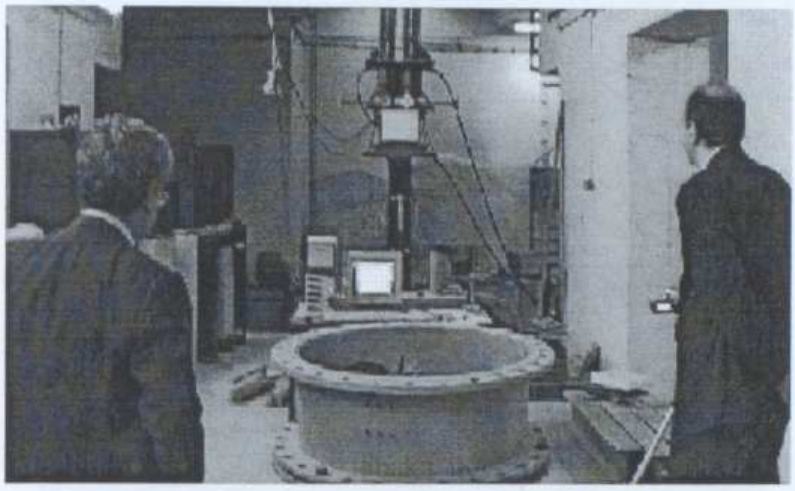
Yükleme 1100 kN mertebelerindeyken, kolon üst kısmından ses gelmiş olup, bu bölgedeki FRP kompozit malzemesinde buruşma olduğu görülmüştür. Yükleme sona erip numune yakından incelendiğinde ise kolon alt kısmında FRP kompozit sargının açıldığı ve bu bölgedeki betonun ezildiği görülmüştür.



Şekil 3.47 C3L4S8 kolonu (deney sonrası alt kısımda LP sargının kopması sonrasında görülen beton ezilmeleri)

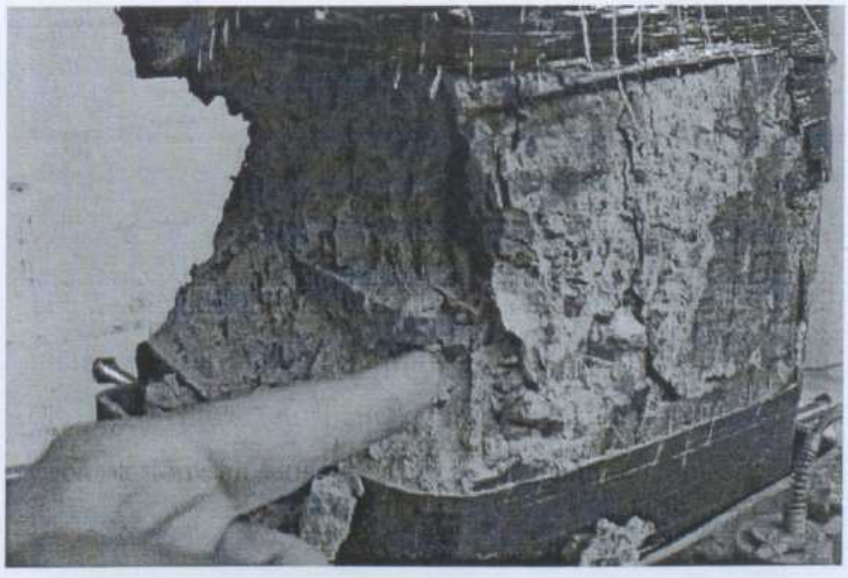
3.8.2 C3L4S12 Kolonu

Tamamen tek kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna donatılı, $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur.



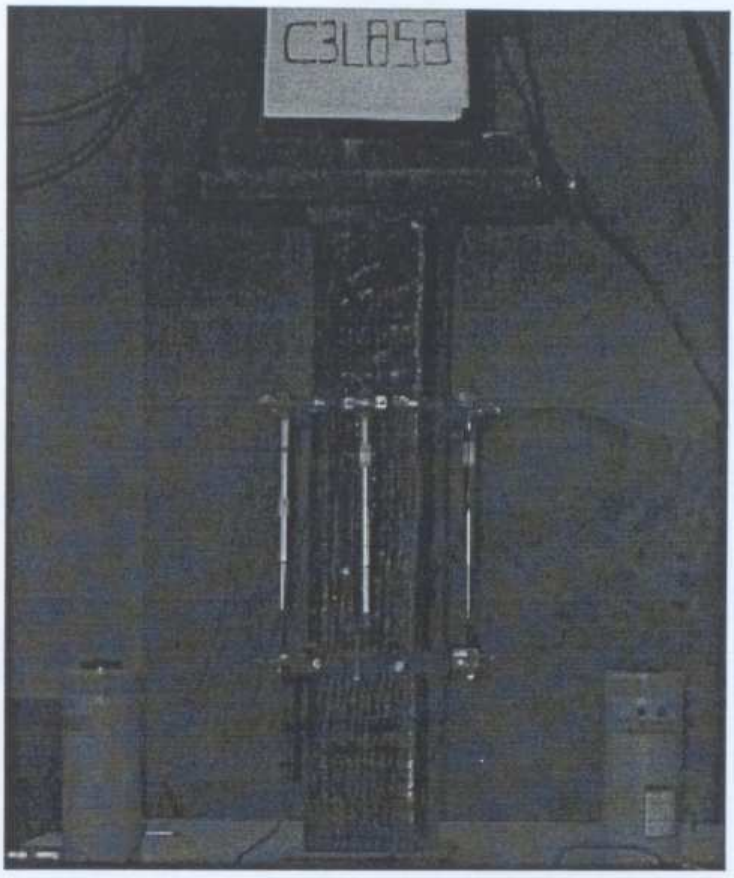
Şekil 3.48 C3L4S12 kolonu

Bu kolon 1165 kN'a geldiğinde ani olarak üst kısma yakın bir bölgede FRP kompozit sargının yırtılmasıyla taşıma gücü dayanımını yitirmiştir. FRP kompozit sargının açıldığı bölge incelendiğinde; betonun ezilmiş, etriyenin kopmuş ve boyuna donatının burkulma yaptığı görülmüştür. Ayrıca kolon alt kısmında FRP sargının açılması ve betonda ezilme görülmüştür.



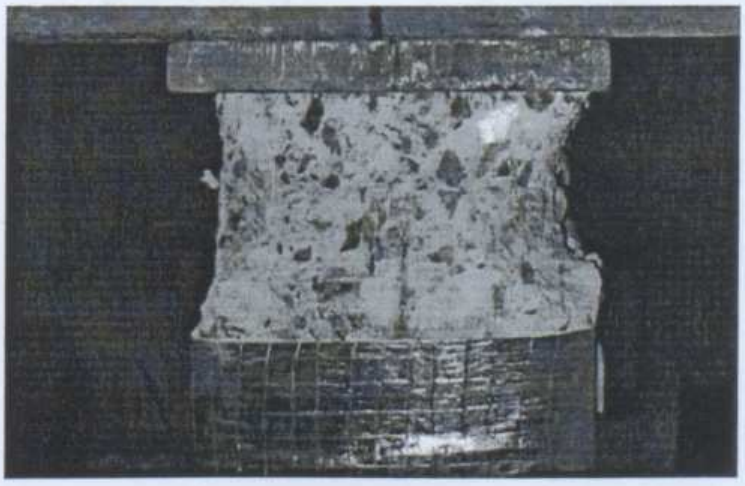
Şekil 3.49 C3L4S12 kolonu (göçme yüküne ulaşmasıyla beraber LP sargı ve etriyenin kopmuş olduğu görülmüştür)

3.8.3 C3L8S8 Kolonu



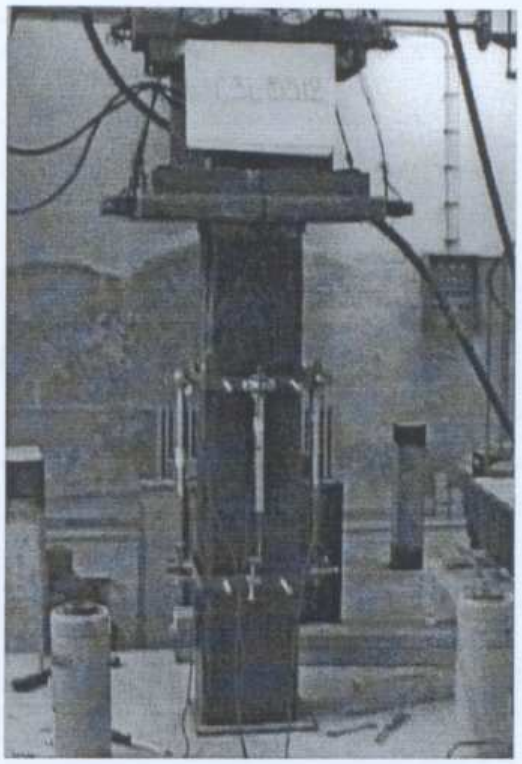
Şekil 3.50 C3L8S8 serisi kolonu

Tamamen tek kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna donatılı, $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. Bu kolon da diğerleri gibi başlık kısmından ani olarak FRP kompozit malzemesinin yırtılmasıyla göçme yüküne ulaşmıştır.



Şekil 3.51 C3L8S8 kolonu, deney sonrası

3.8.4 C3L8S12 Kolonu

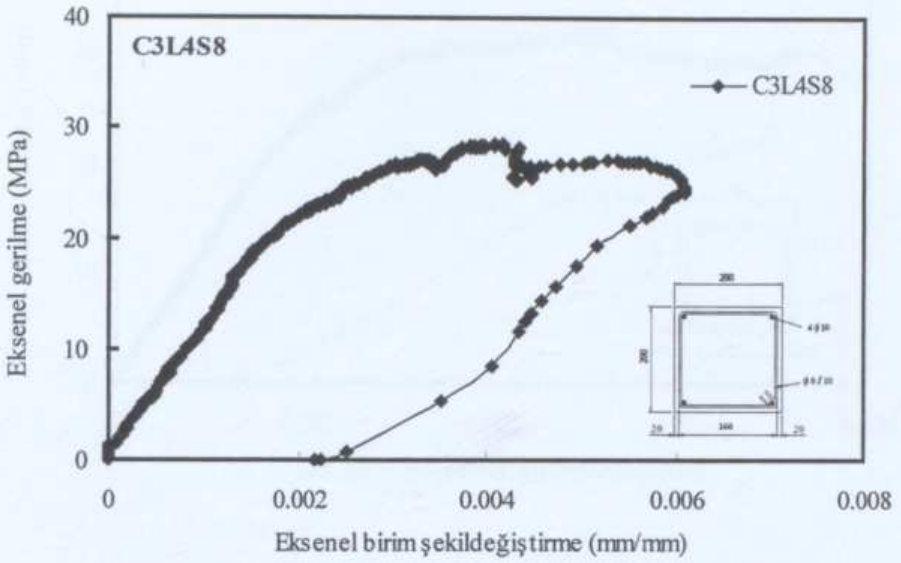


Şekil 3.52 C3L8S12 kolonu

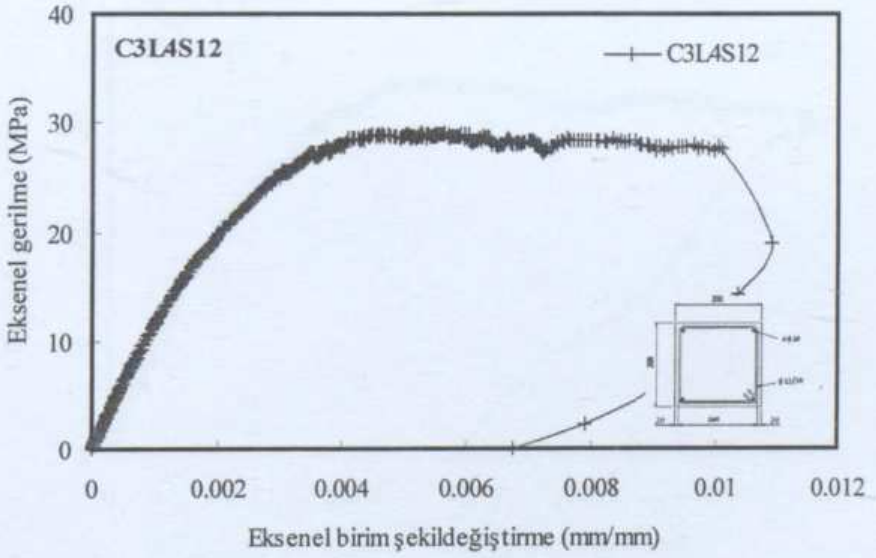
Tamamen tek kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna donatı ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. Bu kolonda diğerleri gibi başlık kısmından ani olarak FRP kompozit sargının yırtılmasıyla göçmüştür.

Şekil 3.53 C3L8S12 kolonu, deney sonrası

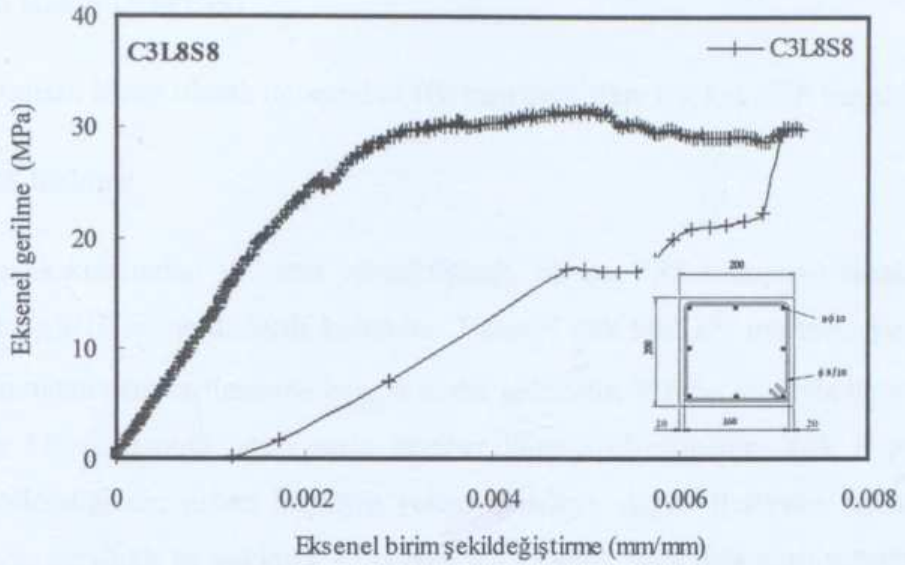
Bu seri kolonlarda FRP sargısının etkisi ile kırılma bölgesinin giderek kolon orta bölgesine yöneldiği görülmüştür.



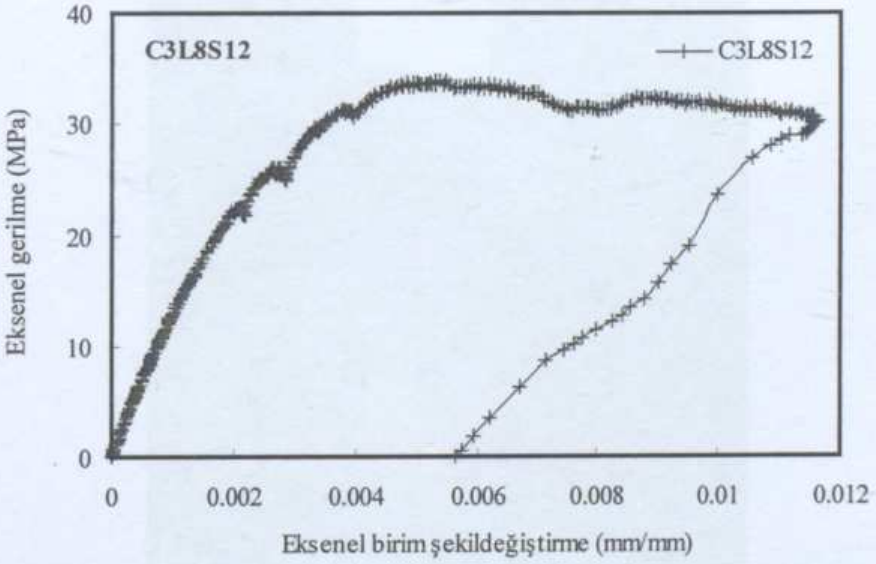
Şekil 3.54 C3L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.55 C3L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.56 C3L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



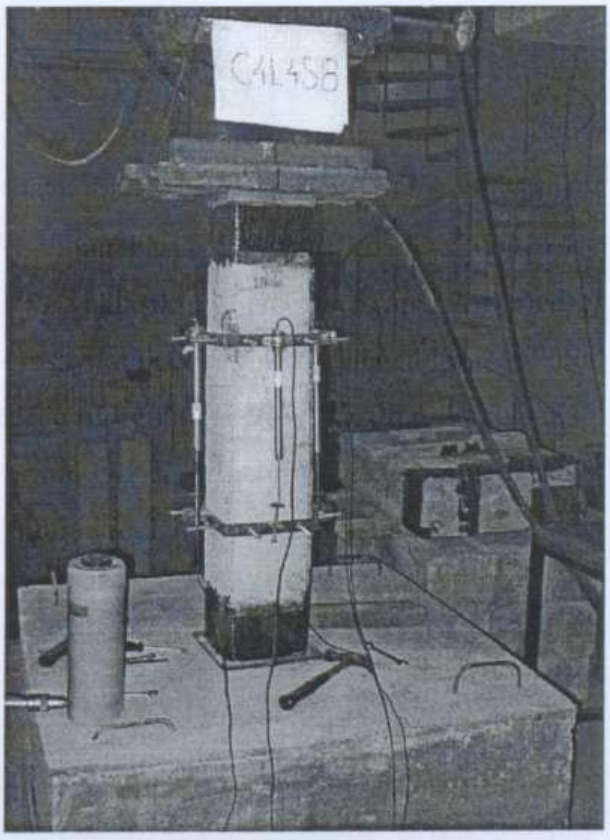
Şekil 3.57 C3L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

3.9 C4 Serisi Kolon Deneyleri

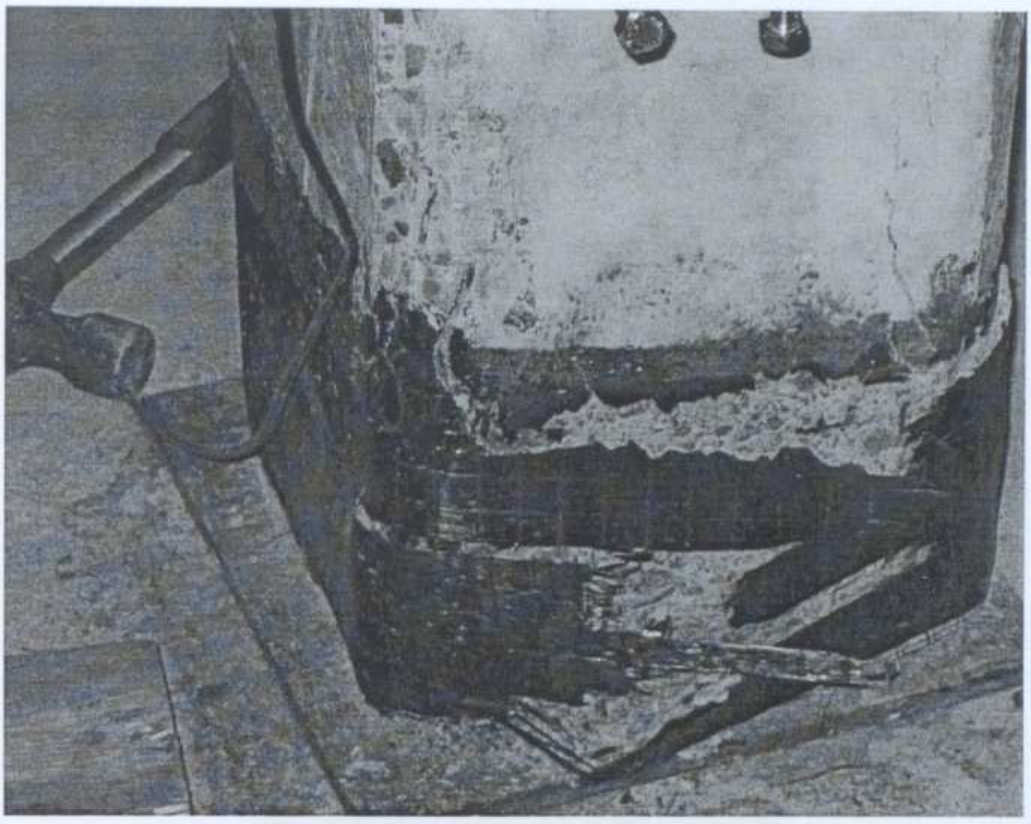
C4 serisi kolonları; kısmi olarak uçlarından 100 mm derinlikte tek kat FRP sargılıdır.

3.9.1 C4L4S8 Kolonu

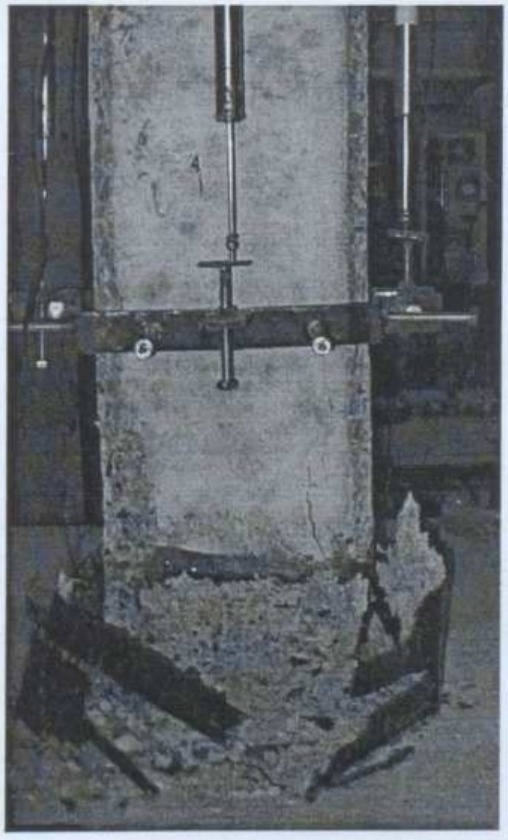
Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde, bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 980 kN mertebesine ulaştığında, kolon alt kısmından cam kırılmasına benzer sesler gelmiştir. Yükün artışıyla beraber 1015 kN mertebesinde LP sargısında artan sesle beraber kopma oluşmuştur. Yük boşaltılıp kolon yakından incelendiğinde; alttan başlayıp yukarı gövdeye doğru ilerleyen kılcal çatlakların kolon boyunca, karşılıklı ve yaklaşık 45°derece açı yaparak ilerlediği görülmüştür. Bu durum tam eksenel (concentric) sayılabilecek yük uygulanabilmiş olduğunu gösterir. Kopan LP sargısı, daha sonra el ile sıyrıldığında; betonda ezilme, kabuk betonunda ayrılma ve kolon enine ve boyuna donatılarının gözle görülebilirlik gözlenmiştir. LP sargısının beton yüzey ile olan birleşimi bu deneyde bir kere daha izlenebilmiştir.



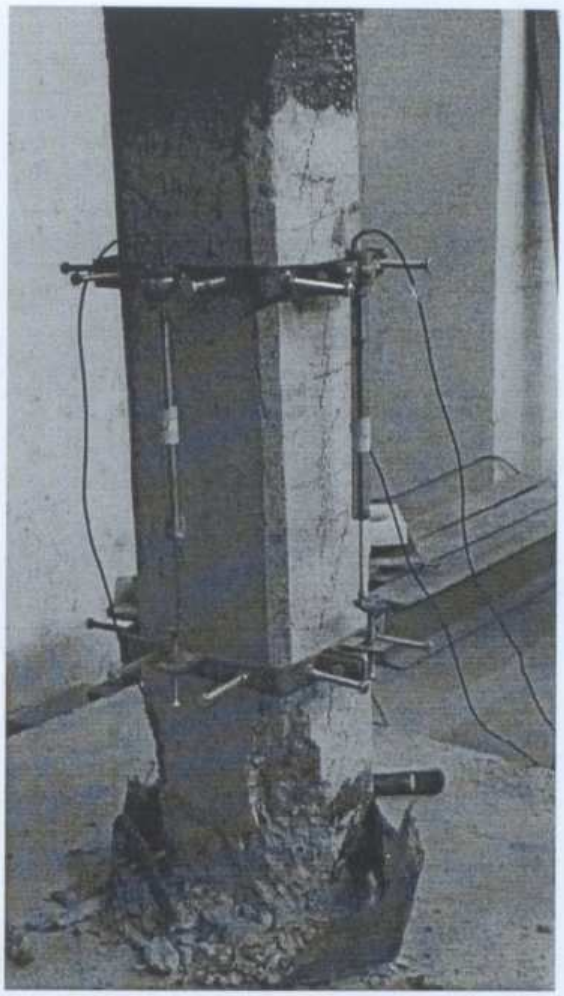
Şekil 3.58 C4L4S8 kolonu



Şekil 3.59 C4L4S8 kolonu göçme yüküne ulaşması sonucu LP sargının kopması



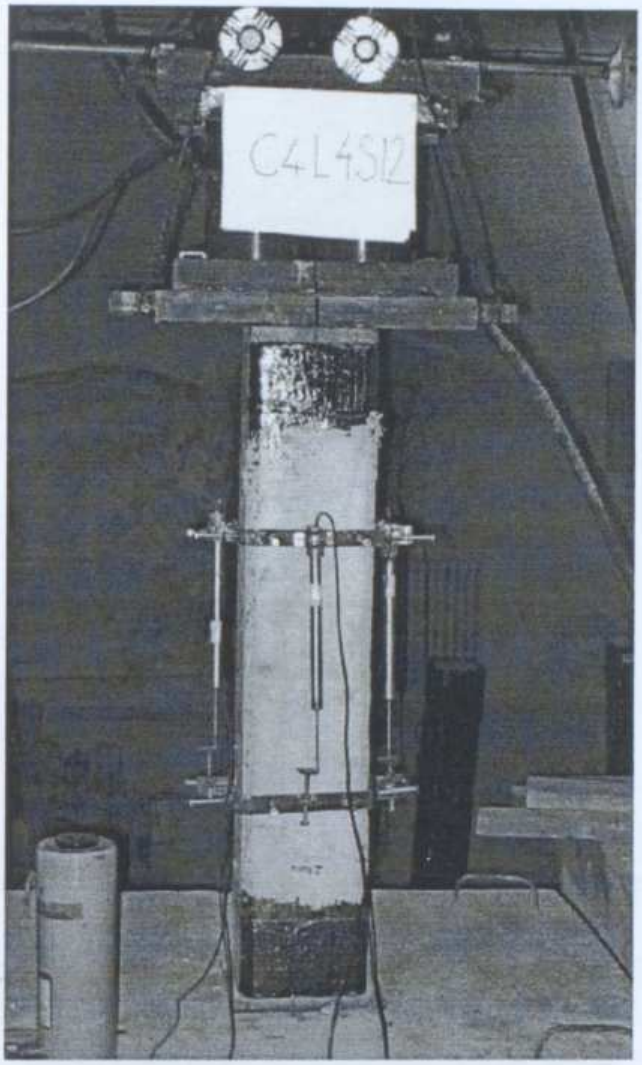
Şekil 3.60 C4L4S8 kolonu kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı



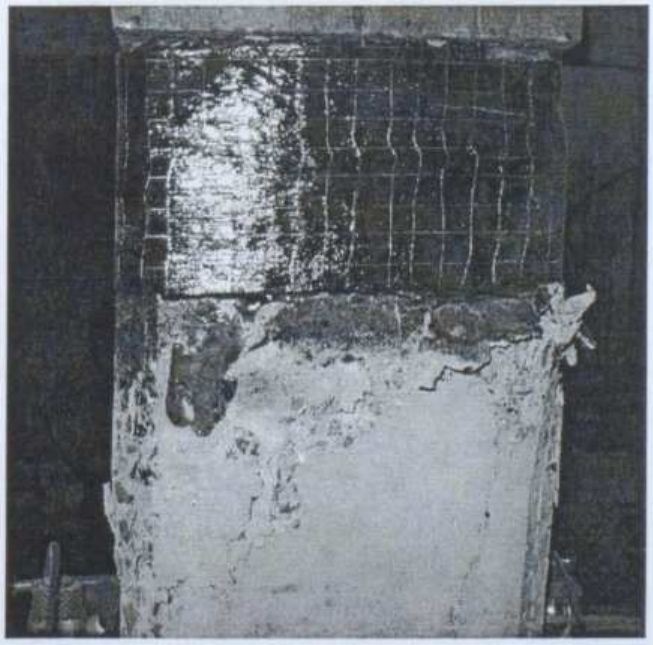
Şekil 3.61 C4L4S8 kolonu, kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı (başka bir açıdan görünümü)

3.9.2 C4L4S12 Kolonu

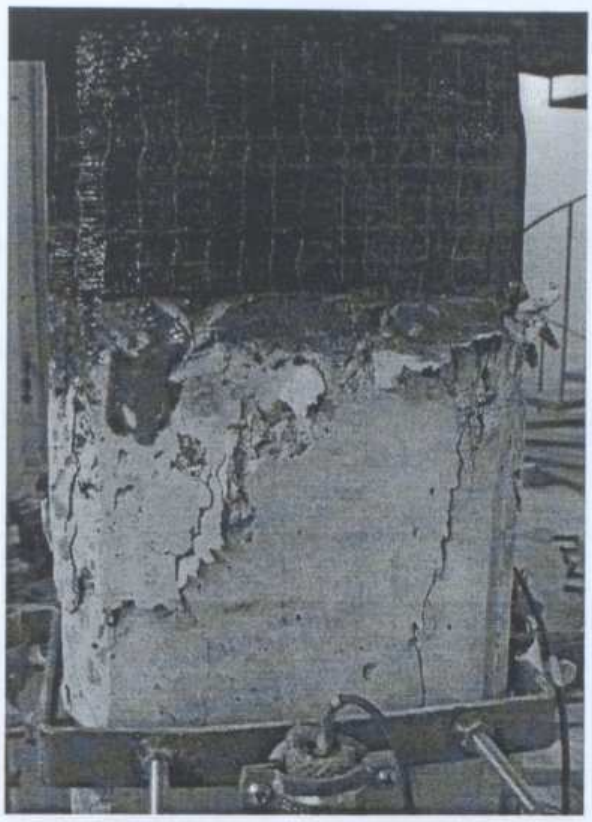
Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 240 kN mertebesine ulaştığında, kolondan cam kırılmasına benzer sesler gelmiştir. Yükün artışıyla 1015 kN mertebesinde LP sargısında artan sesle beraber kopma oluşmuştur. Eksenel yük 980 kN'a ulaştığında kolon üst başlık kısmında, LP sargısının bittiği yerden başlayıp gövde ortasına doğru ilerleyen çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Eksenel yük 1037 kN'a ulaştığında ise, üst kısımdaki LP sargısı koparak kolon göçme yüküne ulaşmıştır.



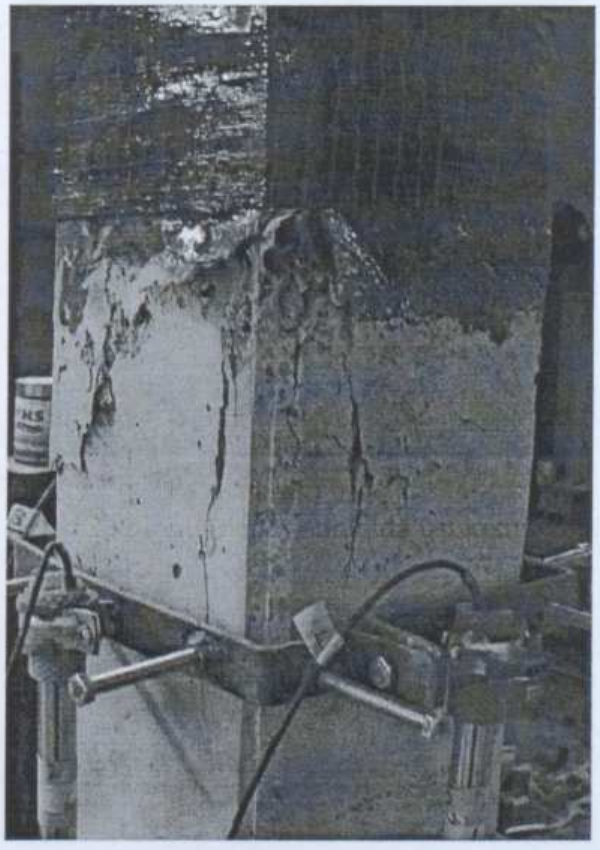
Şekil 3.62 C4L4S12 kolonu



Şekil 3.63 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar)



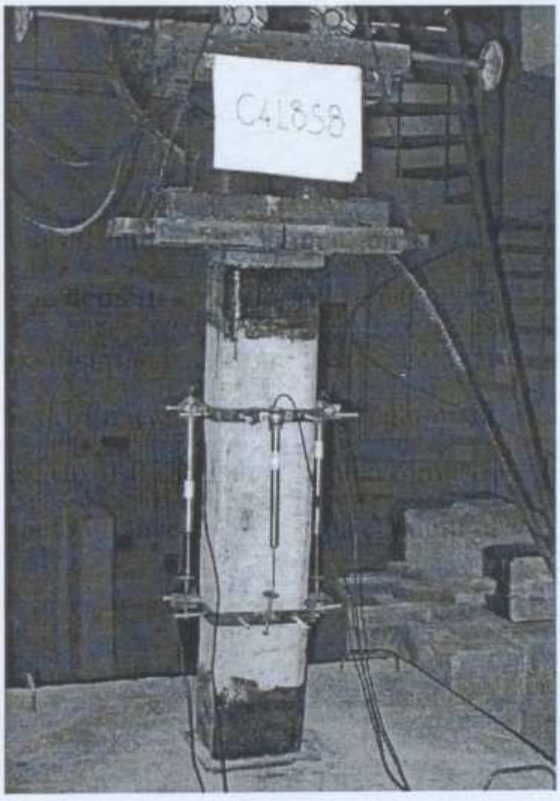
Şekil 3.64 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar)



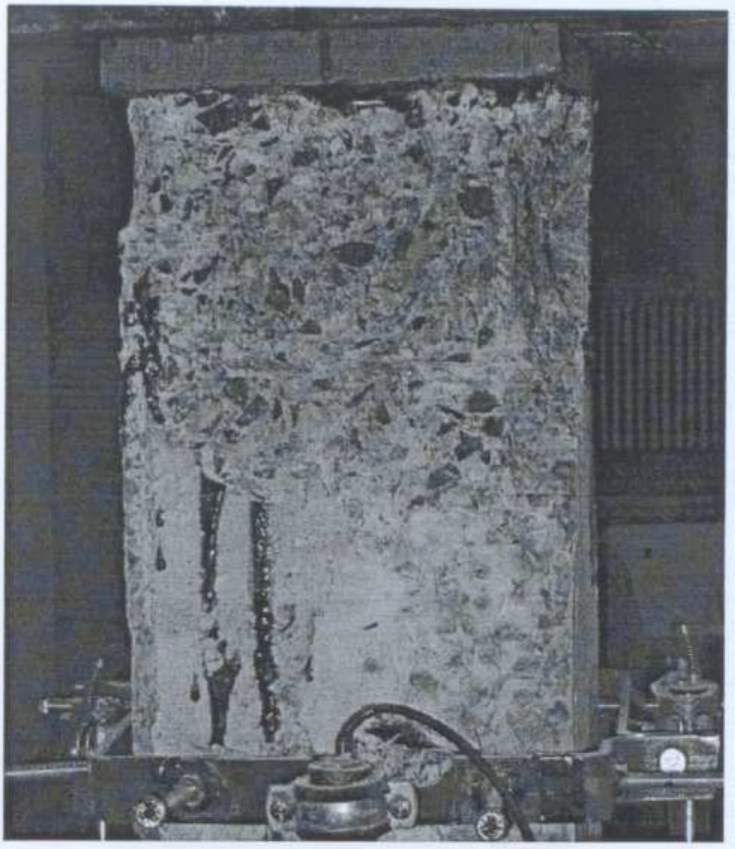
Şekil 3.65 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar ve orta gövdeye doğru ilerleyen çatlaklar)

3.9.3 C4L8S8 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde, bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 500 kN mertebesine ulaştığında, LP sargılı kolon üst başlık kısmında hafif bir şişme gözlenmiştir. Eksenel yük 840 kN'a ulaştığında kolondan cam kırılmasına benzer ses gelmiştir. 1103 kN'luk eksenel yük mertebesine ulaşıldığında ise, üst LP sargısında kopma olmuştur. Üst kısımdaki LP sargı daha sonra el ile açıldığında ise, beton bünyede çok sayıda çatlağın oluştuğu görülmüştür.



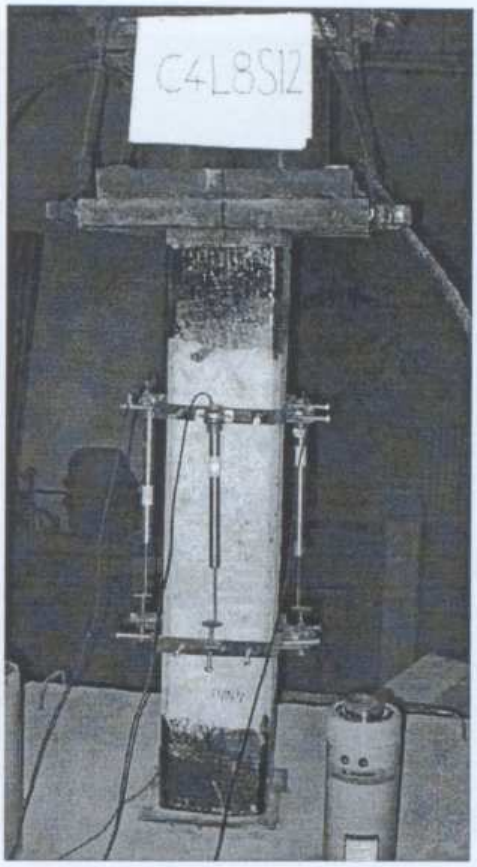
Şekil 3.66 C4L8S8 kolonu



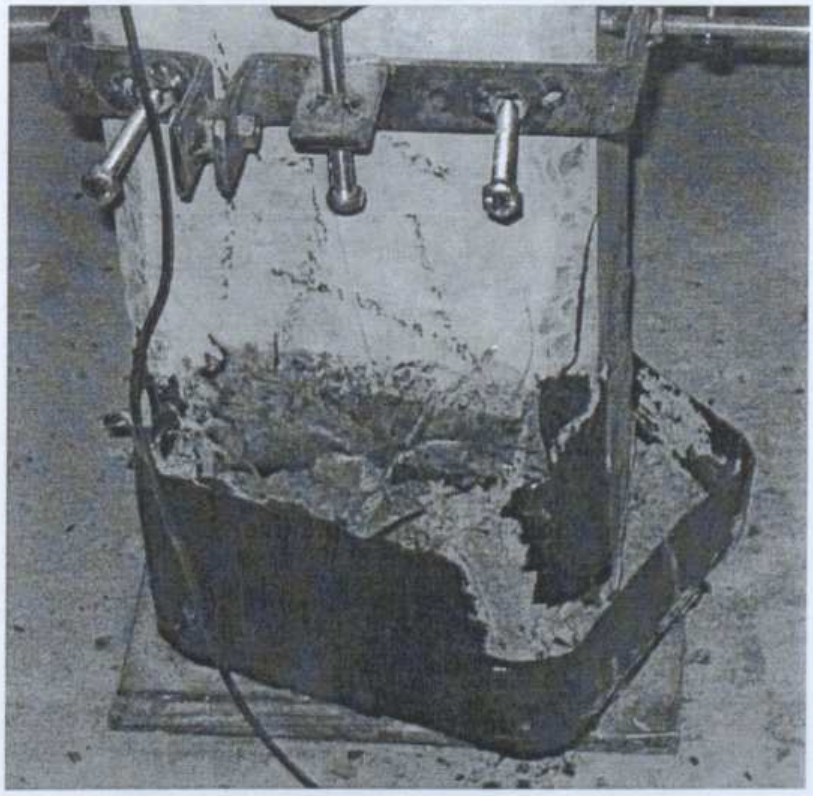
Şekil 3.67 C4L8S8 kolonu, deney sonrasında kopan LP sargının el ile sıyrılması ile görülebilen betondaki hasar

3.9.4 C4L8S12 Kolonu

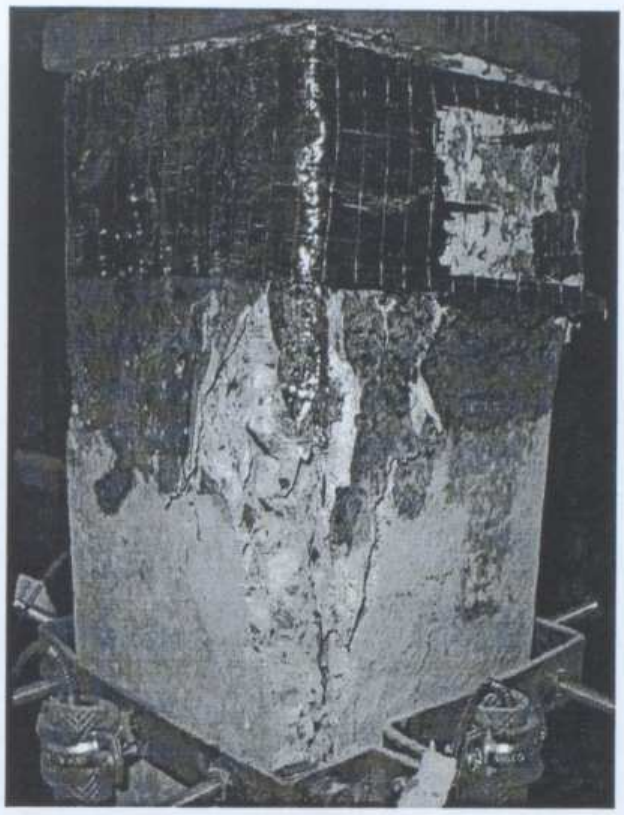
Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/12$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük, 770 kN mertebesine ulaştığında, kolon alt kısmından cam kırılmasına benzer sesler gelmiştir. Kolon alt LP sargısının bittiği yerden başlayan çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Artan yükle kılcal çatlaklar yukarı doğru kolon üst bölgesine ilerlemeye başlamıştır. Eksenel yük 1090 kN'a ulaştığında LP sargı önce alt kısımda, sonrası üst kısımda kopmuştur.



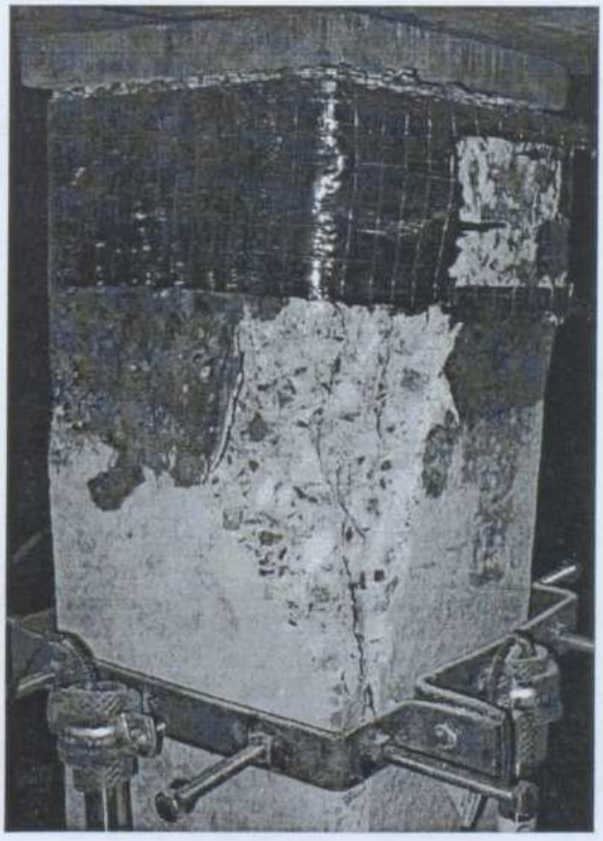
Şekil 3.68 C4L8S12 kolonu



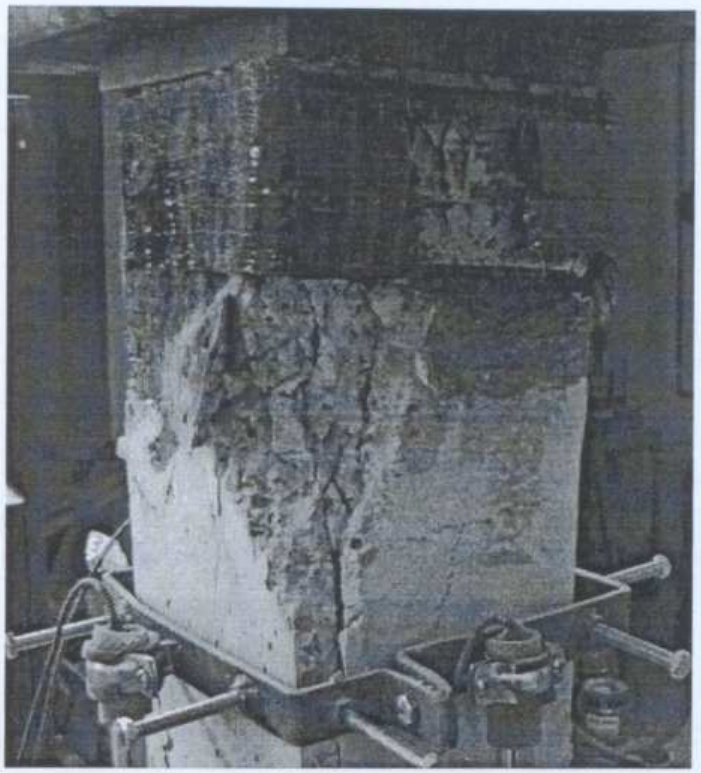
Şekil 3.69 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar

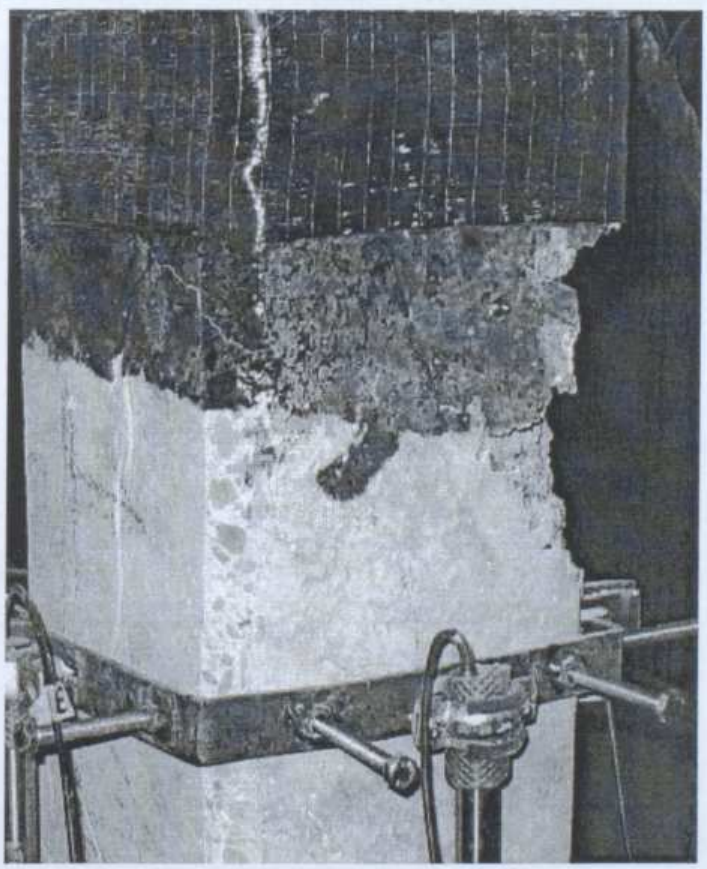


Şekil 3.70 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar

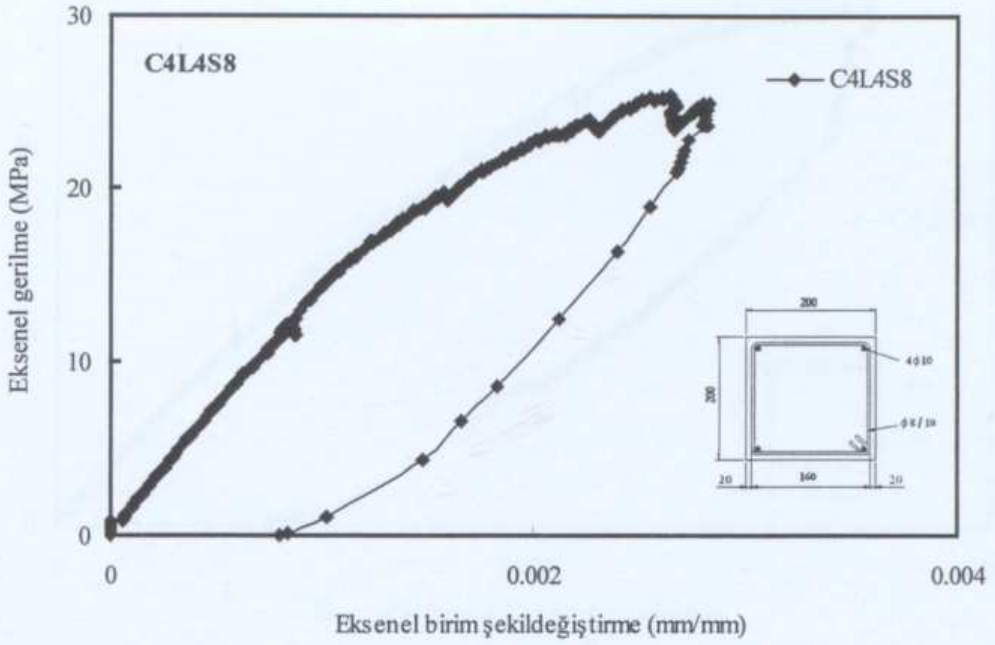


Şekil 3.71 C4L8S12 kolonu deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar

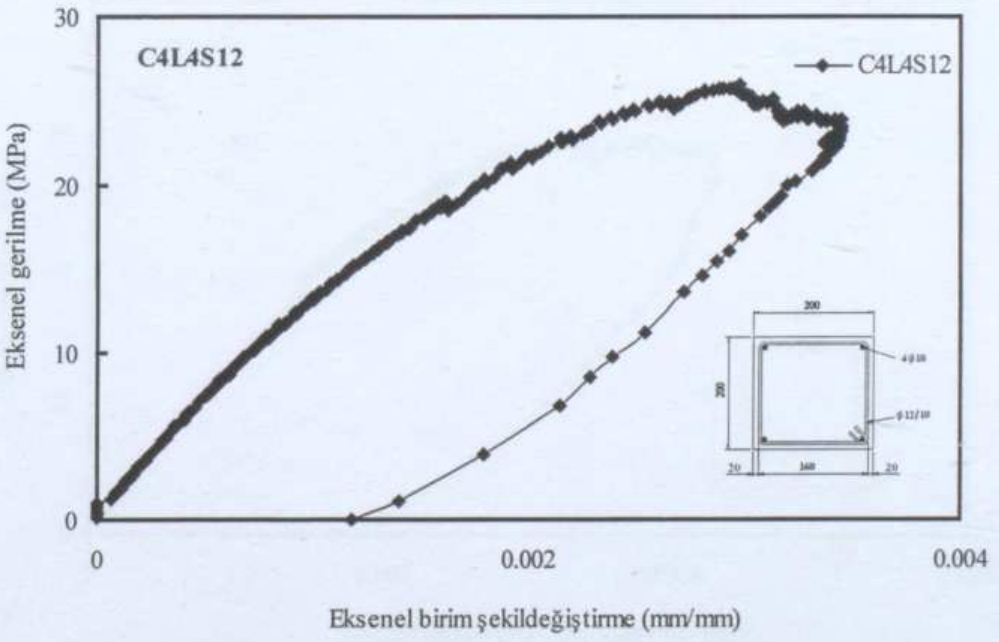




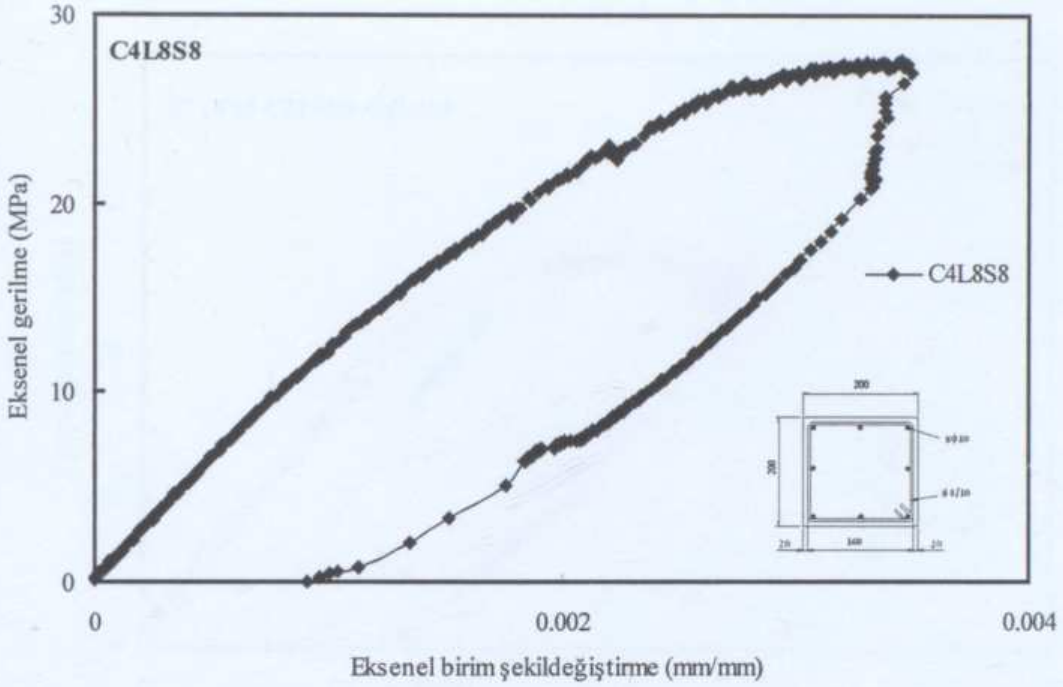
Şekil 3.72 C4L8S12 kolonu, deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar



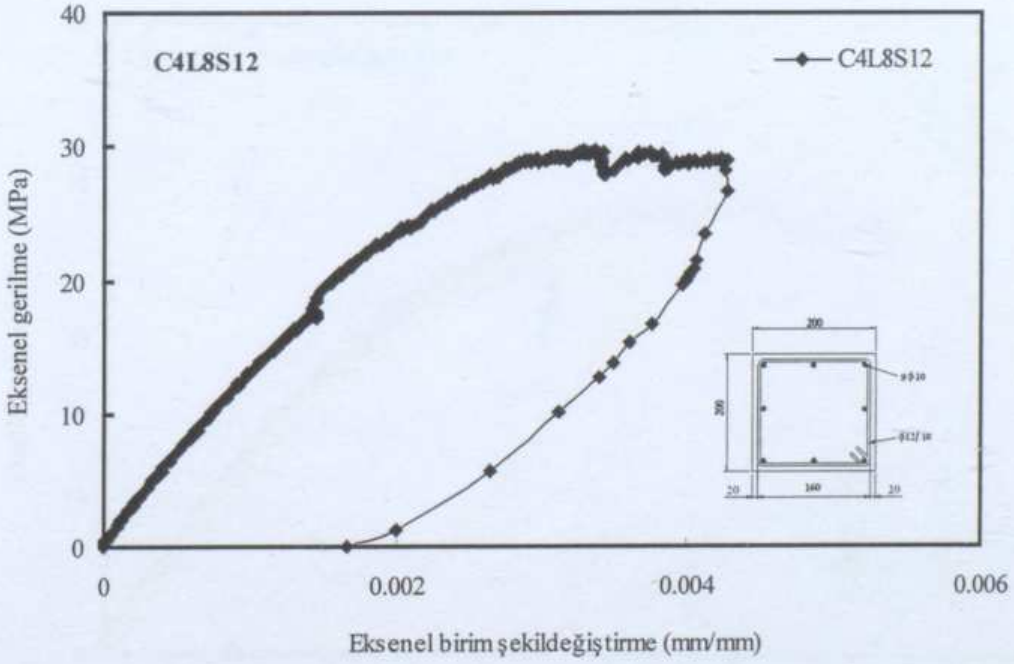
Şekil 3.73 C4L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



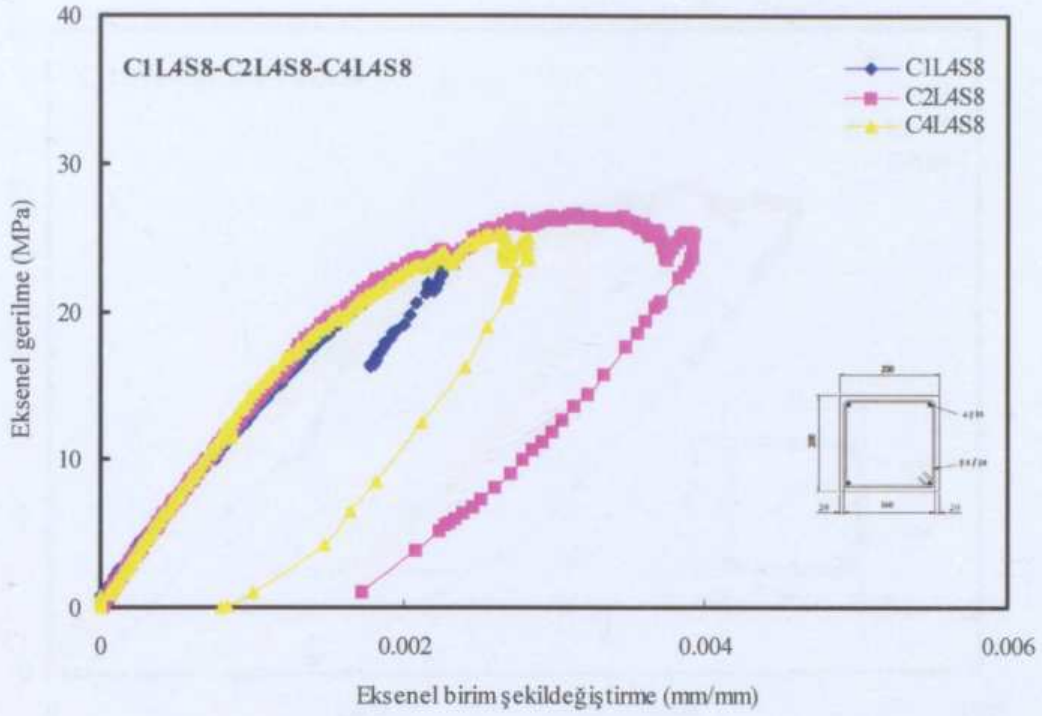
Şekil 3.74 C4L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



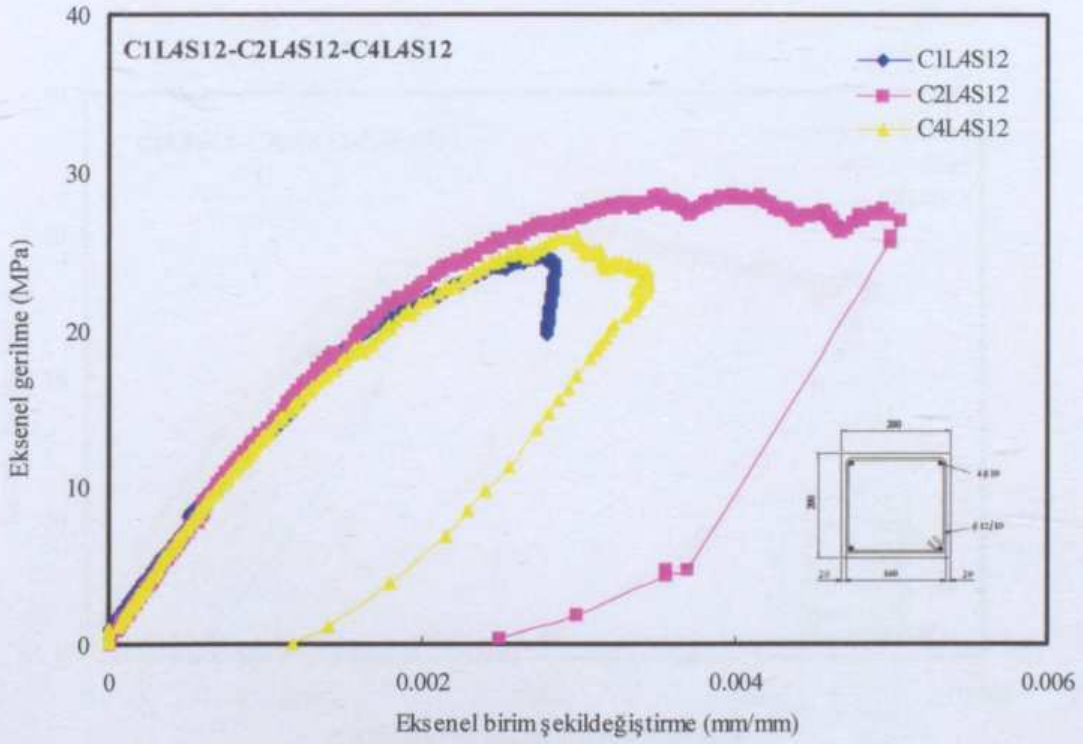
Şekil 3.75 C4L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



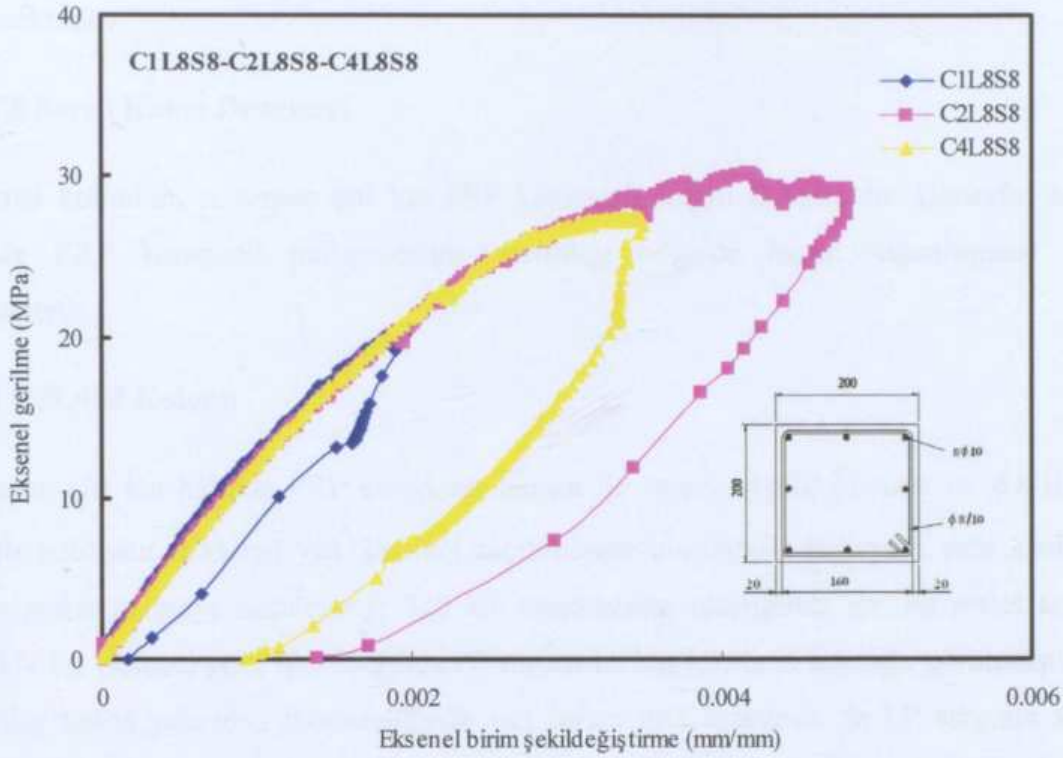
Şekil 3.76 C4L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



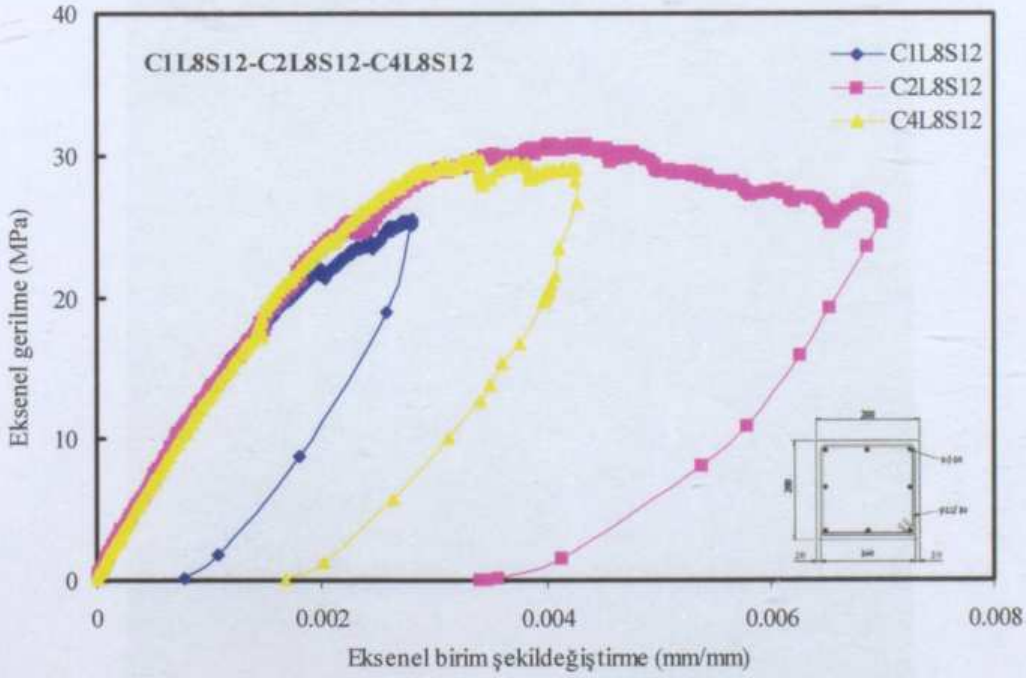
Şekil 3.77 C1,C2,C4 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.78 C1,C2,C4 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.79 C1,C2,C4 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.80 C1,C2,C4 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

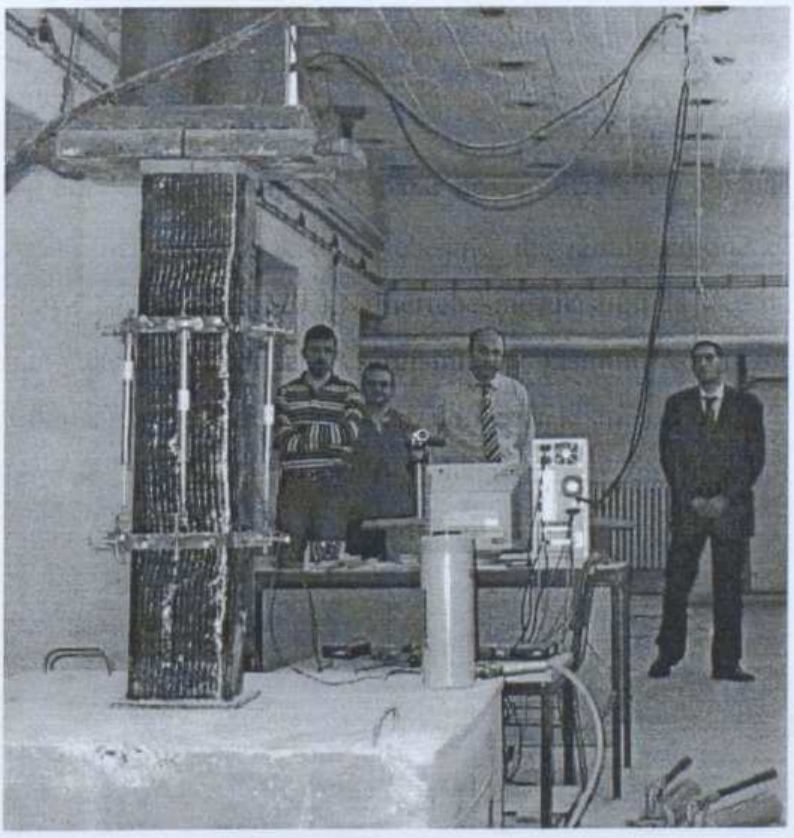
Şekil 3.77, 78, 79 ve 79'da yalın kolon, kısmi KLP sargılı ve iki kat kısmi KLP sargılı kolonlar ile mukayese edildiğinde; KLP sargının sünekliği önemli oranda artırdığı görülmektedir.

3.10 C5 Serisi Kolon Deneyleri

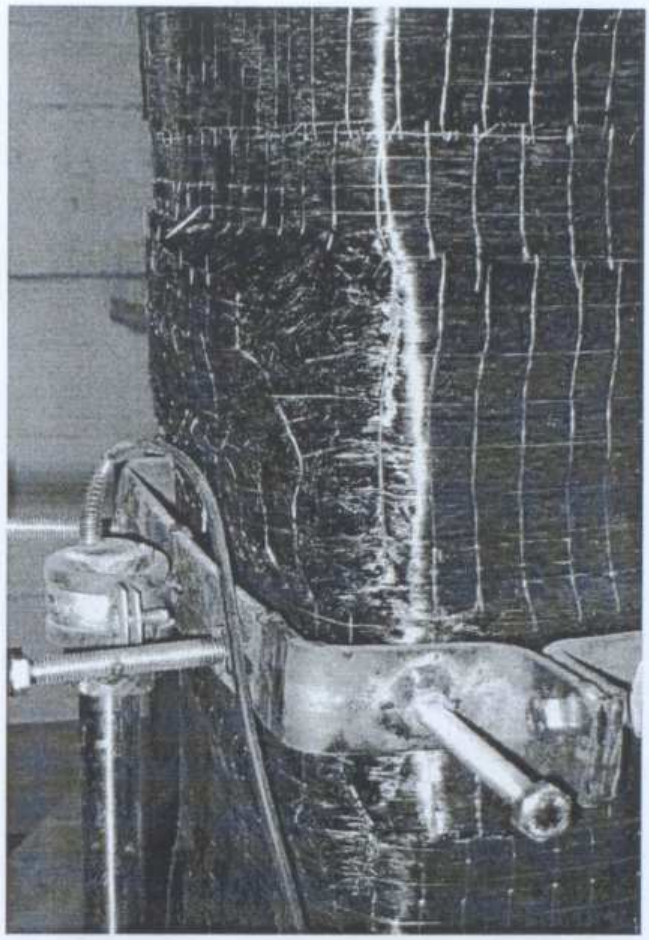
C5 serisi kolonları, tamamen çift kat FRP kompozit sargılı kolonlardır. Deneyler sonunda kolonda FRP kompozit malzemesinin yırtıldığı bölgede hasar yoğunlaşması olduğu gözlenmiştir.

3.10.1 C5L4S8 Kolonu

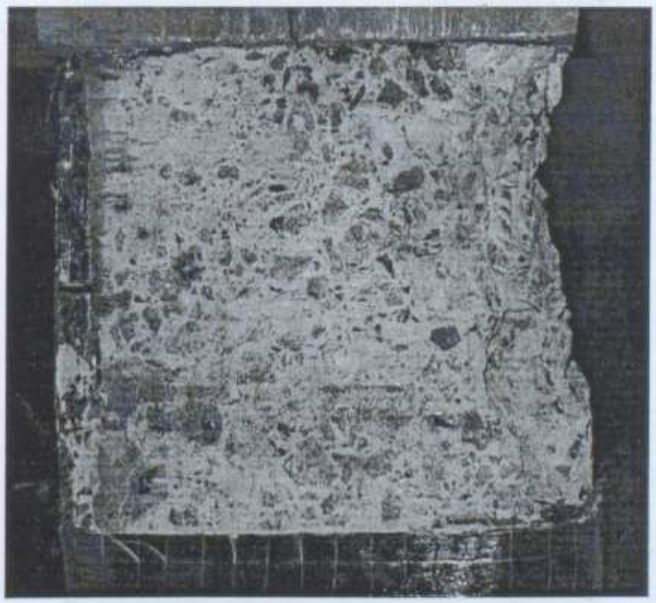
Tamamen çift kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 280 kN mertebesine ulaştığında kolondan cam kırılmasına benzer sesler gelmeye başlamıştır; 770 kN mertebesine ulaştığında ise, bu sesler artmıştır. 1137 kN luk eksenel yüke ulaşıldığında LP sargısının baş kısmının koptuğu görülmüştür. Yük boşaltılıp kolon yakından incelendiğinde ise; kolon orta kısmında da LP sargının kopmuş olduğu gözlemlenmiştir. LP sargı el ile sıyrıldığında ise; sargının koptuğu bölgede makro çatlaklar, uzak bölgelerde mikro çatlaklar görülmüştür.



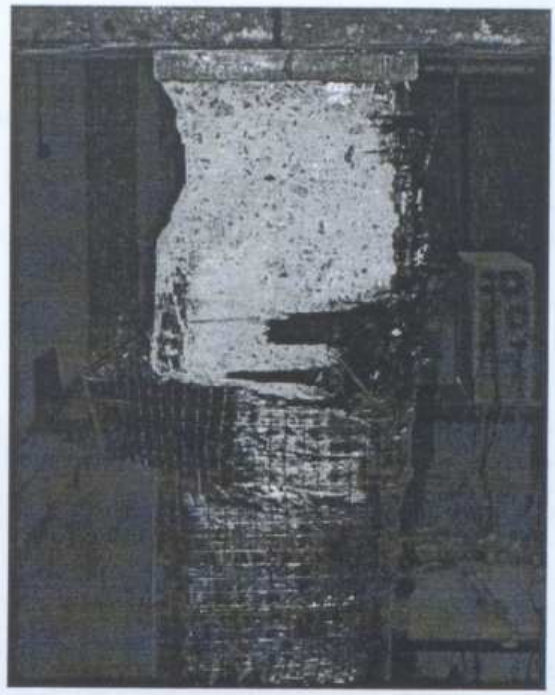
Şekil 3.81 C5L4S8 kolonu



Şekil 3.82 C5L4S8 kolonu, deney esnasında kolon orta bölgesinde LP sargı kopma



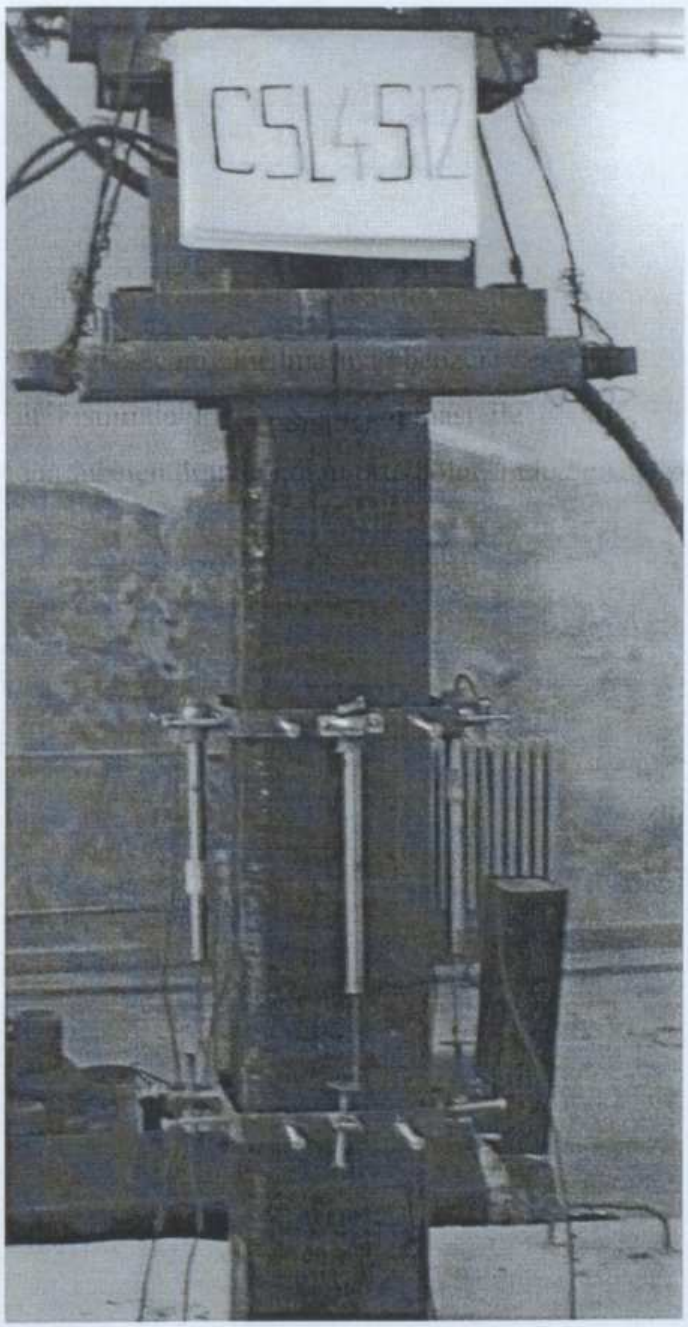
Şekil 3.83 C5L4S8 kolonu, deney sonrasında kolon üst başlık kısmından kopan LP sargının daha sonra el ile açılmasıyla ortaya çıkan betondaki hasar



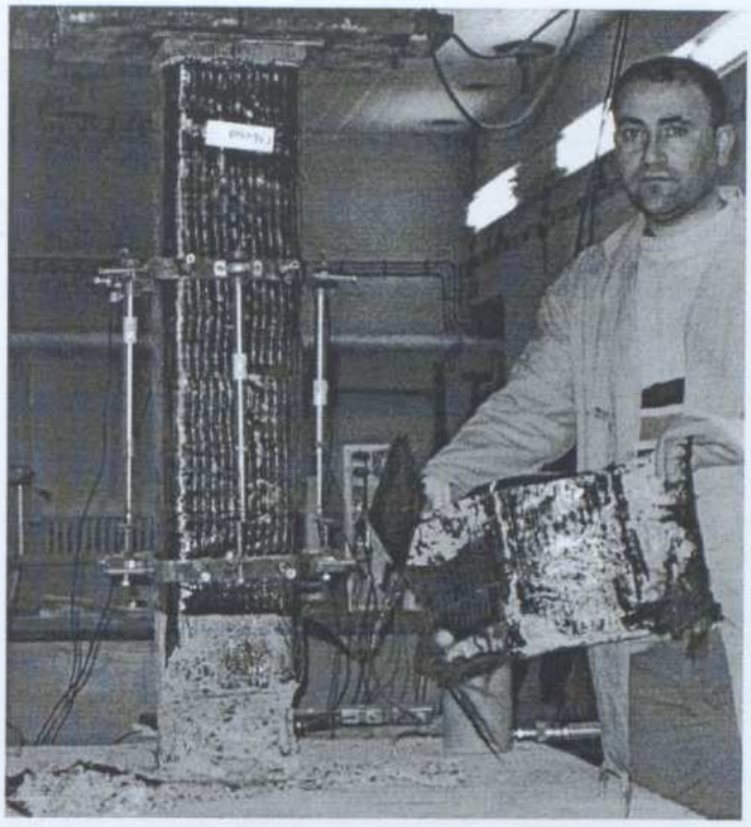
Şekil 3.84 C5L4S8 kolonunda deney sonrası oluşan hasarın değişik açılardan görünüşü
(Göçme yüküne yakın LP sargı yüzeyinde buruşmalar oluşmuştur)

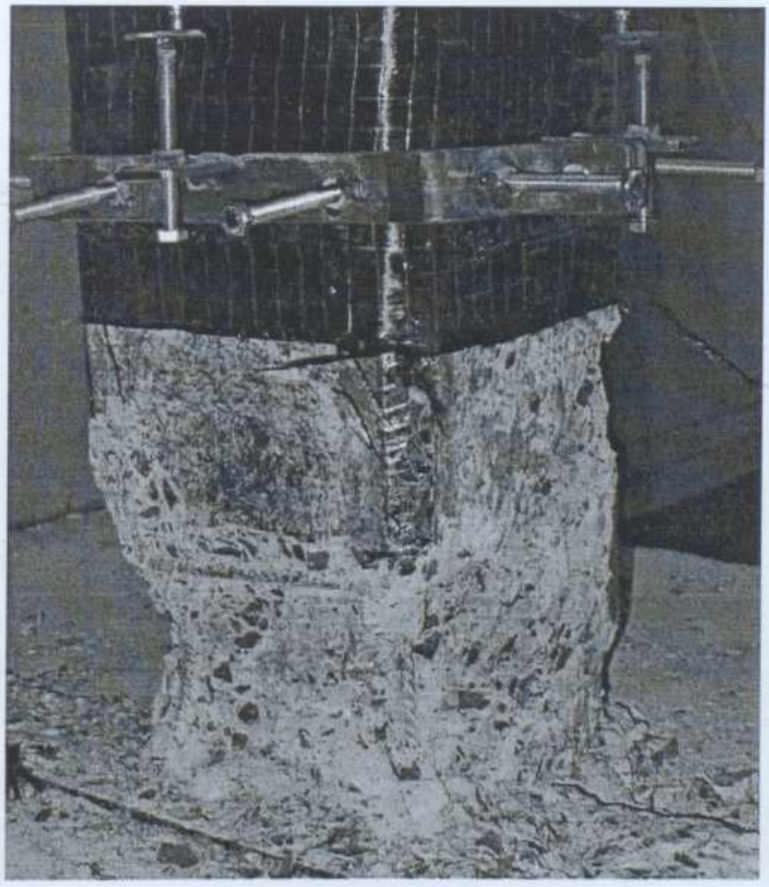
3.10.2 C5L4S12 Kolonu

Tamamen çift kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. C5L4S12 cam kırılmasına benzer ses ile 1204 kN eksenel yük mertebesinde kolon alt kısmında LP sargının kopması ile göçme yüküne ulaşmıştır. Yük boşaltılıp kolon yakından incelendiğinde kolon orta bölgesinde de LP sargının açılmış olduğu gözlenmiştir.

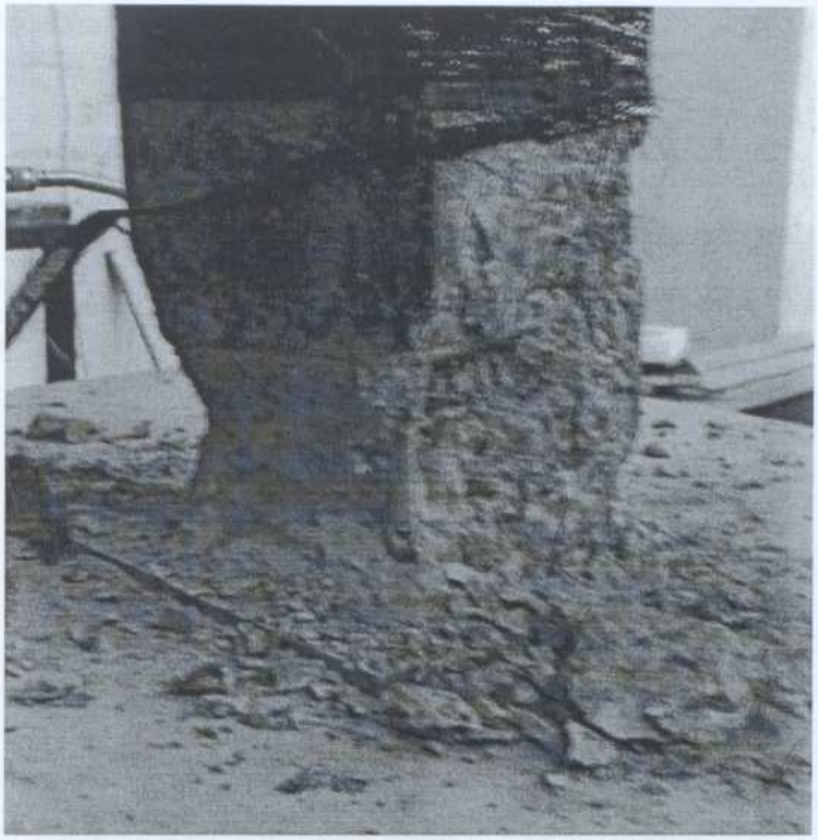


Şekil 3.85 C5L4S12 kolonu

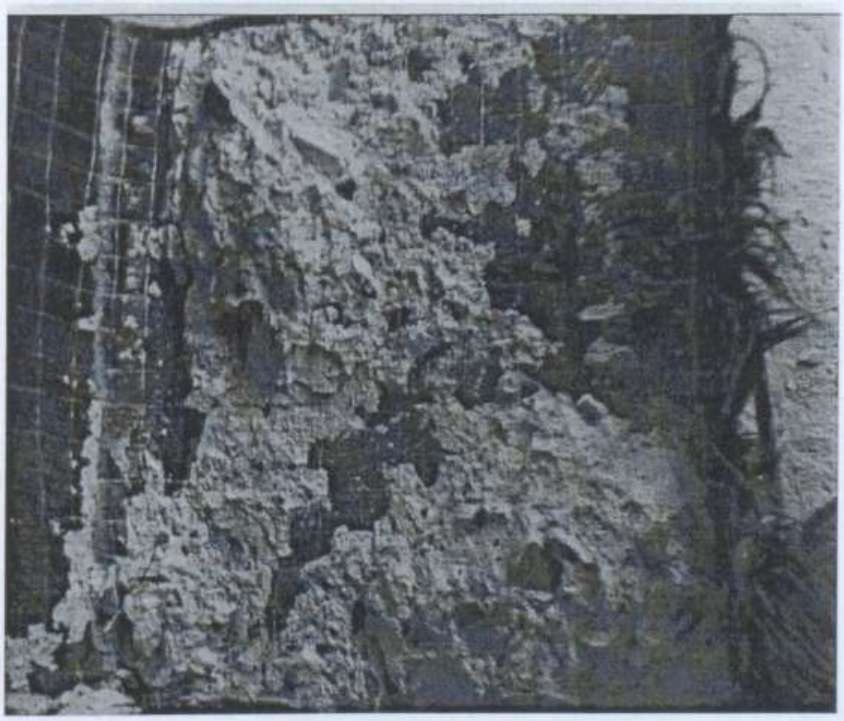




Şekil 3.86 C5L4S12 kolonu, deney sonrası oluşan hasar



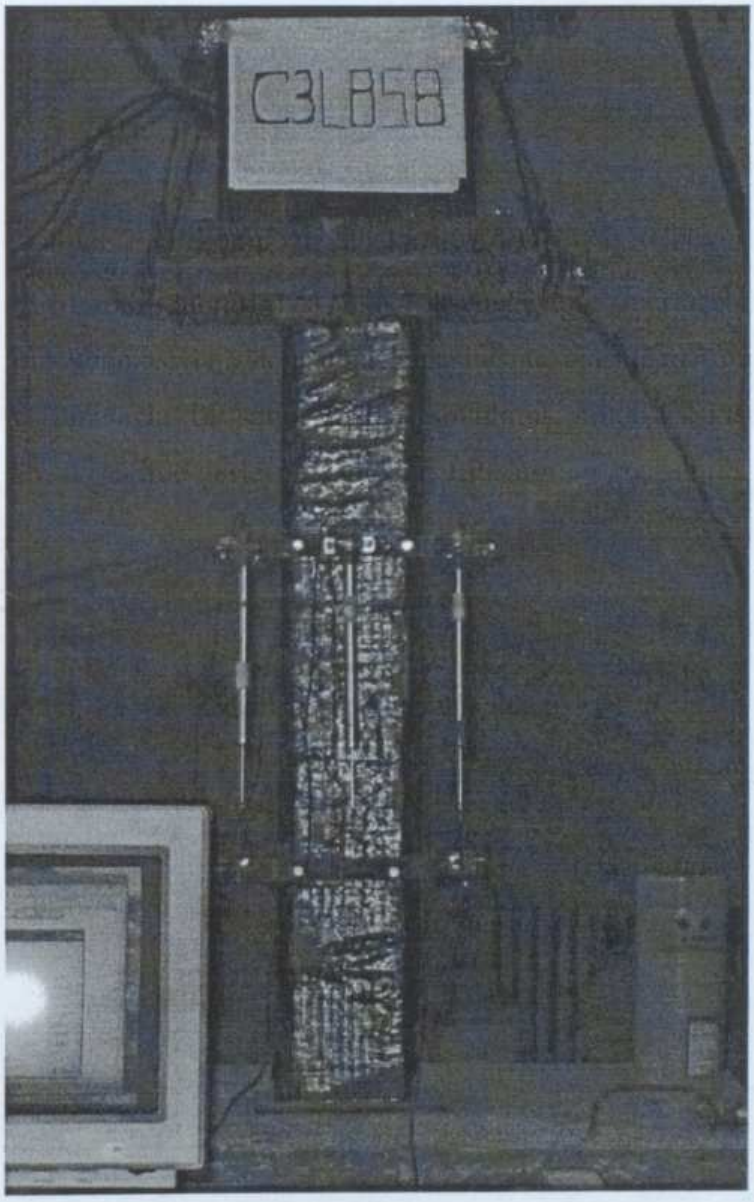
Şekil 3.87 C5L4S12 kolonu, deney sonrası alt kısımda LP sargının açılmasıyla görülebilen betondaki hasar



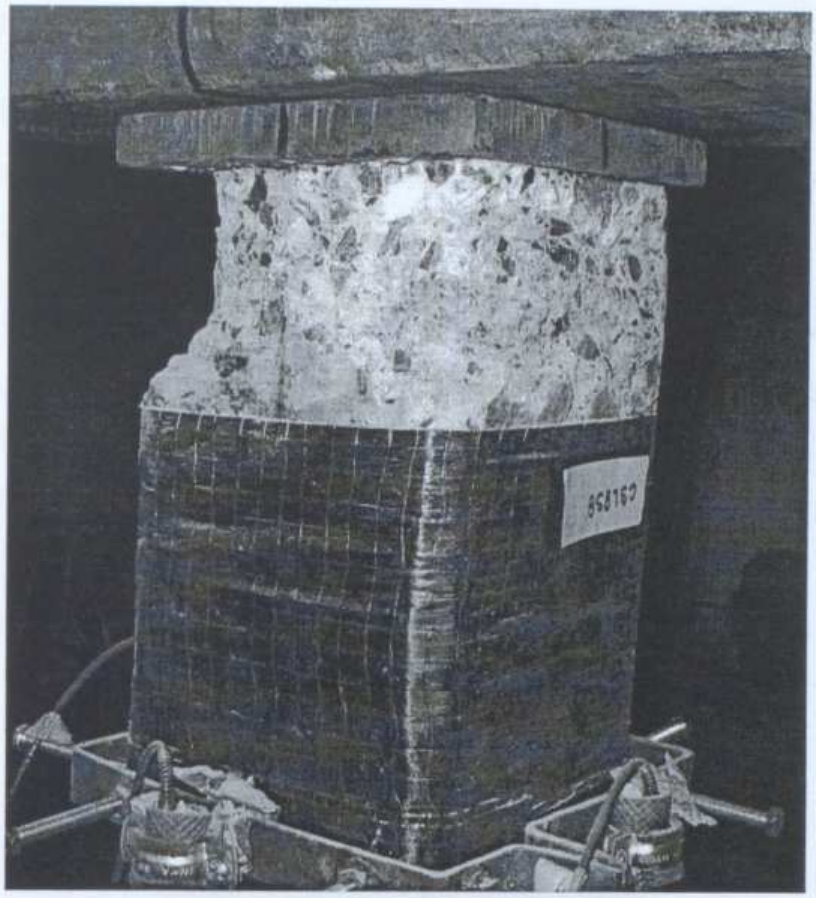
Şekil 3.88 C5L4S12 kolonu, deney sonrası LP sargının el ile sıyrıldıktan sonra beton ile temas eden yüzeyin görünüşü

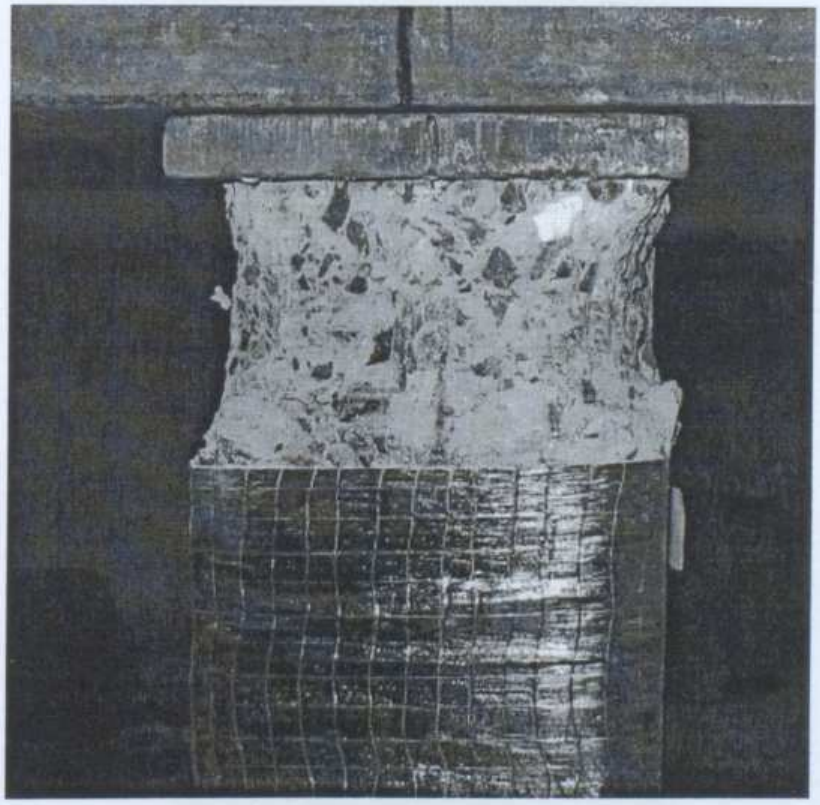
3.10.3 C5L8S8 Kolonu

Tamamen çift kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. C5L8S8 kolonu, 1267 kN eksenel yük mertebesinde, kolonun baş kısmında LP sargının kopmasıyla yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Yük boşaltılıp kolon yakından incelenmek amacıyla, LP sargı tabakası soyulmuş; kolon üst kısmından başlayarak orta bölgeyi içine alacak şekilde ilerleyen çatlaklar, LP sargının koptuğu bölgede ise, betonda ezilme görülmüştür.



Şekil 3.89 C5L8S8 kolonu



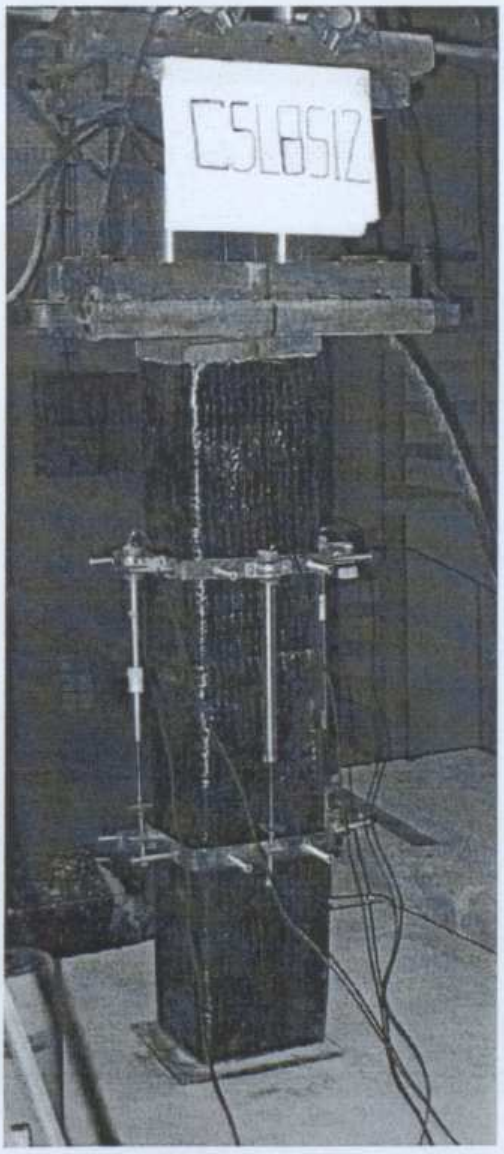


Şekil 3.90 C5L8S8 kolonu, deney sonunda LP sargının koptuktan sonra el ile sıyrıldığında betonda görülen hasar

3.10.4 C5L8S12 Kolonu

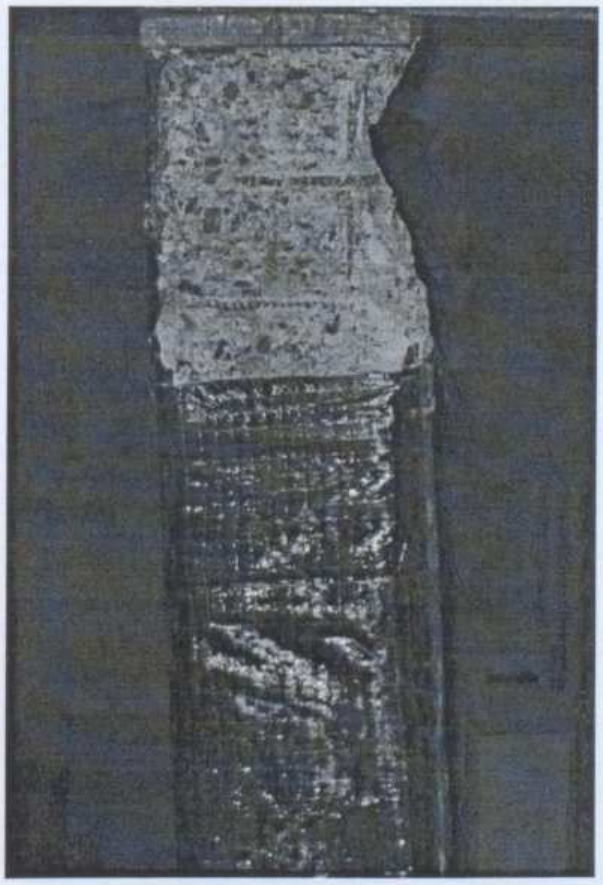
Tamamen çift kat halinde FRP kompozit malzemesi tabakası ile sarılmış, $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. C5L8S12 kolonu 1415 kN eksenel yük mertebesinde kolon orta bölgesinin az üstünde LP sargının kopması ile göçme yüküne ulaşmıştır.

İki LP sargılı kolonlarda, kolon göçme yükünün yarı mertebesine ulaştığında, cam kırılmasına benzer sesler duyulmaya başlanması; tüm C5 serisi kolonlarında gözlemlenmiştir. C5 serisi kolonlarında LP sargının kopma yeri, kopma gerçekleşinceye dek kestirilememiştir. LP sargının kopmuş olduğu bölgede ise kolon iç çekirdeğine kadar kesik konik şeklinde, çatlama, kırılma ve ezilme gözlemlenmiştir.



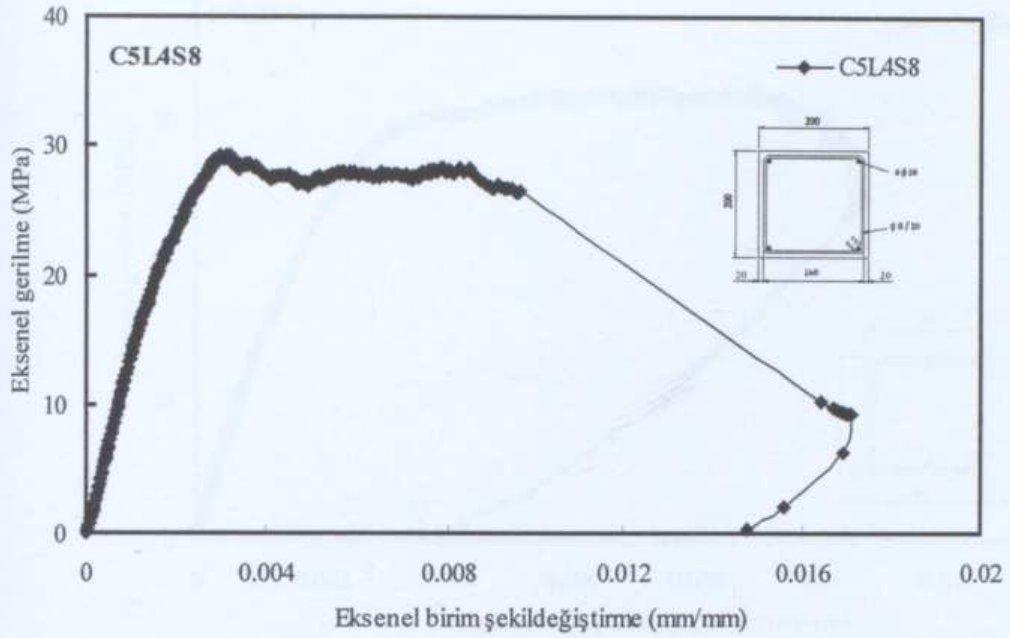
Şekil 3.91 C5L8S12 kolonu

Şekil 3.92 C5L8S12 kolonu, deney sonrası kolon orta kısmı üzerinde oluşan hasar

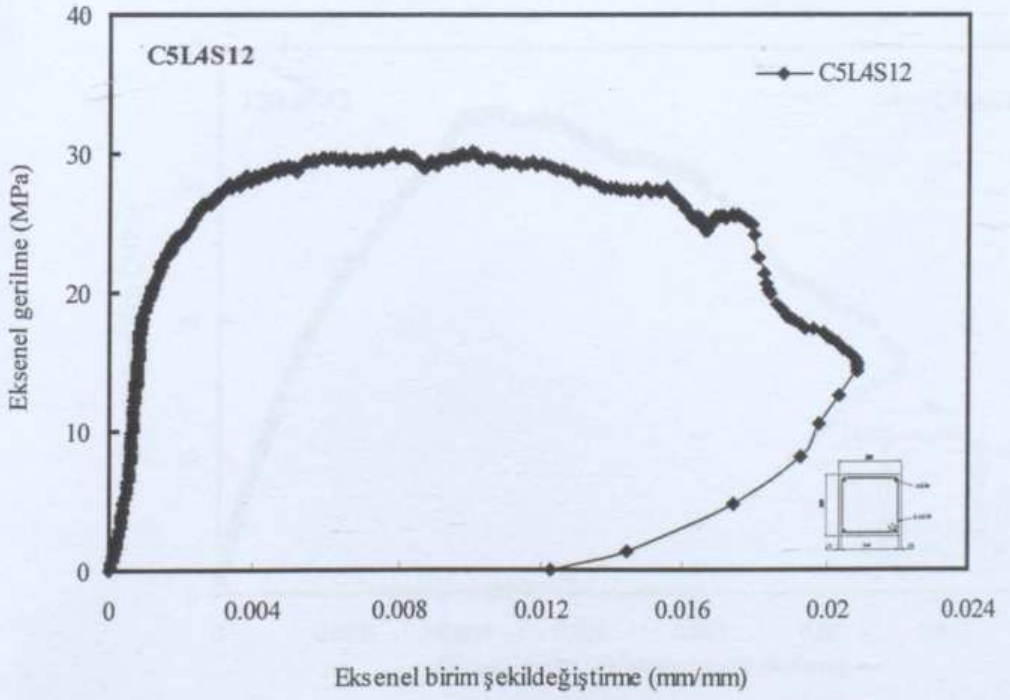


Şekil 3.93 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar

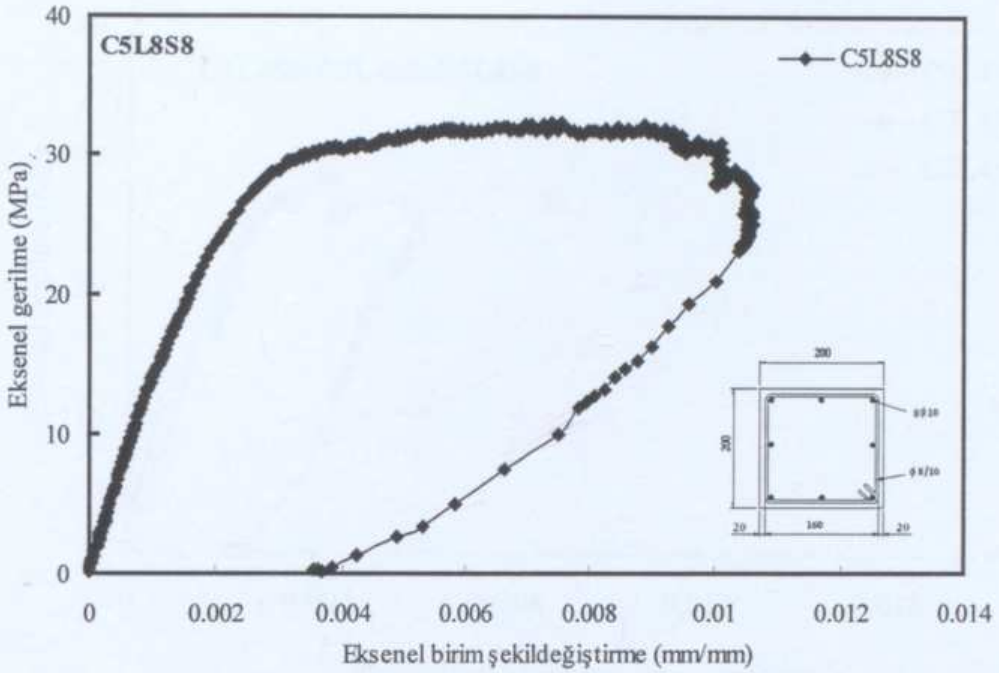
Şekil 3.94 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar



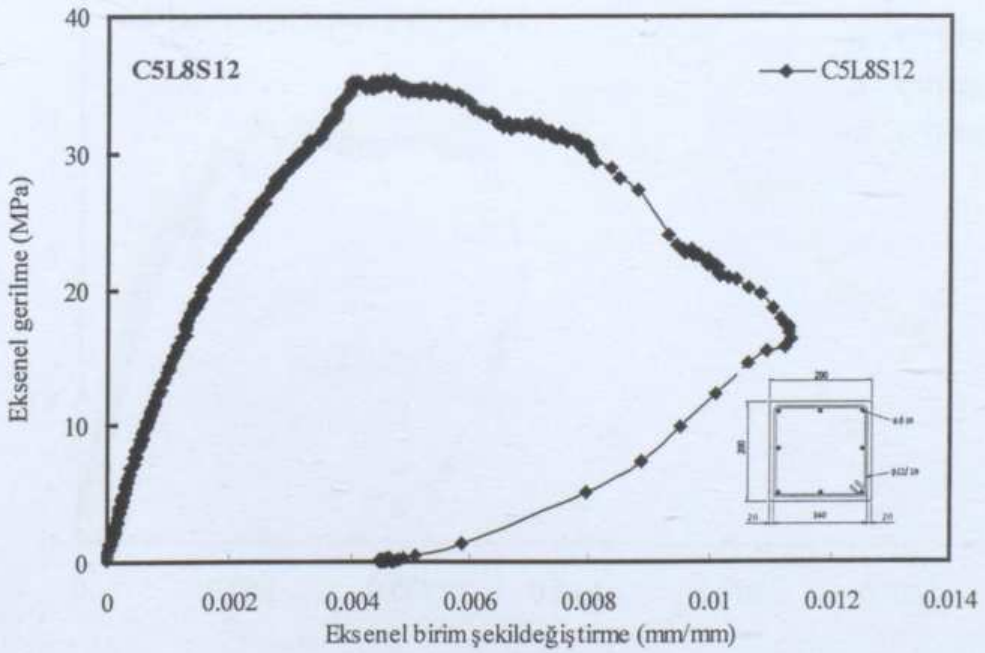
Şekil 3.95 C5L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



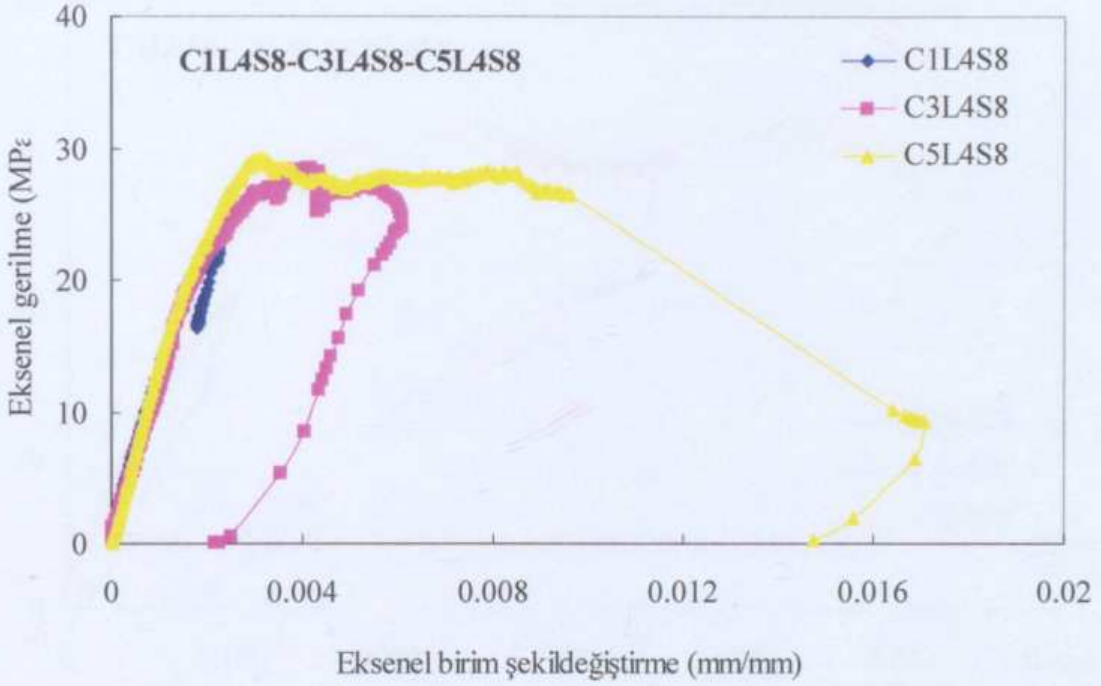
Şekil 3.96 C5L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



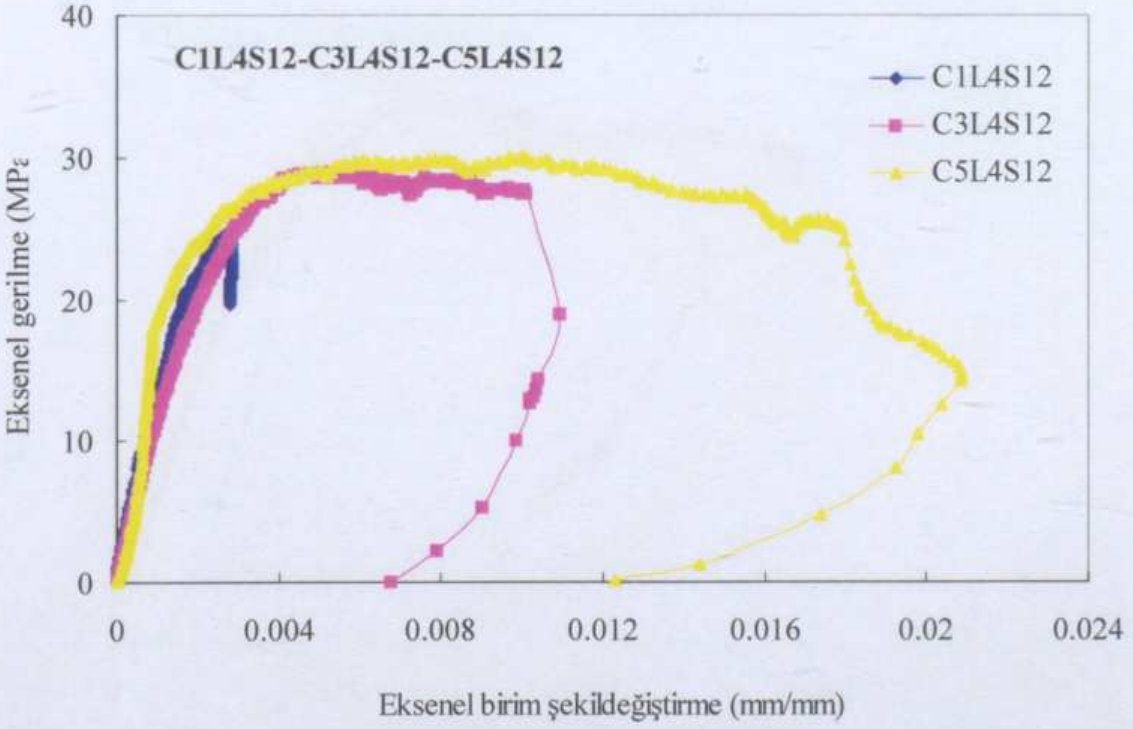
Şekil 3.97 C5L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



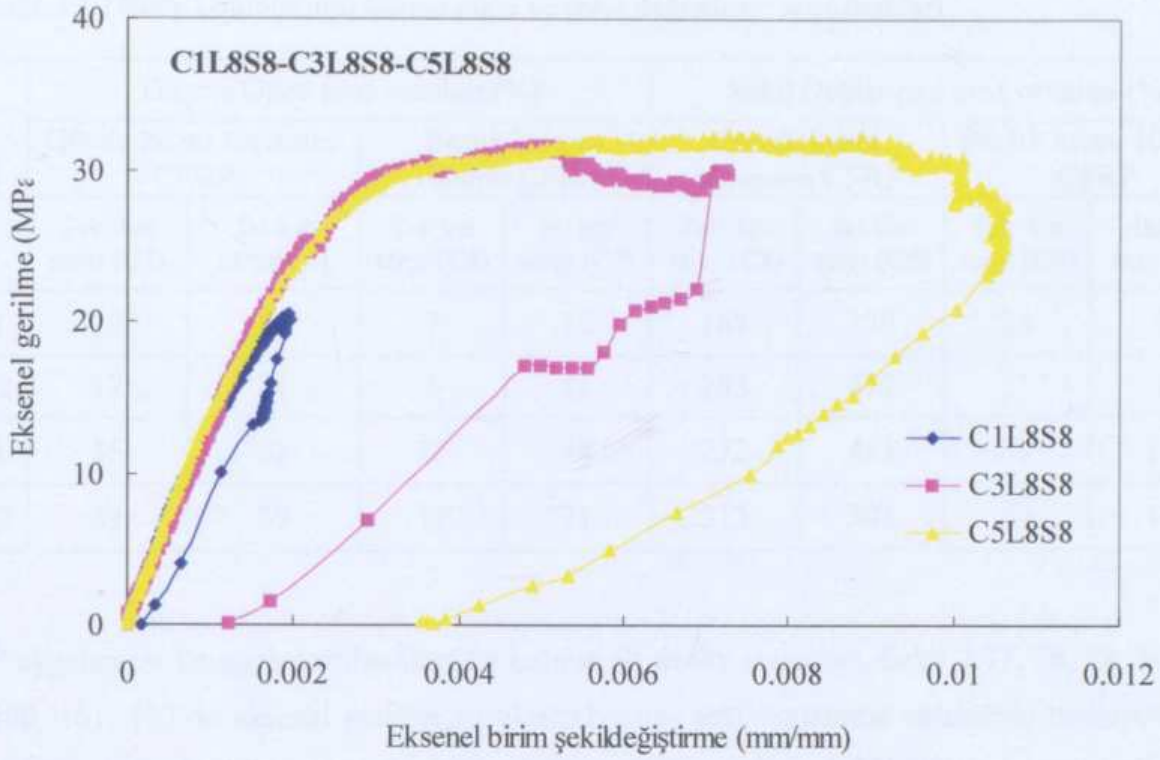
Şekil 3.98 C5L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



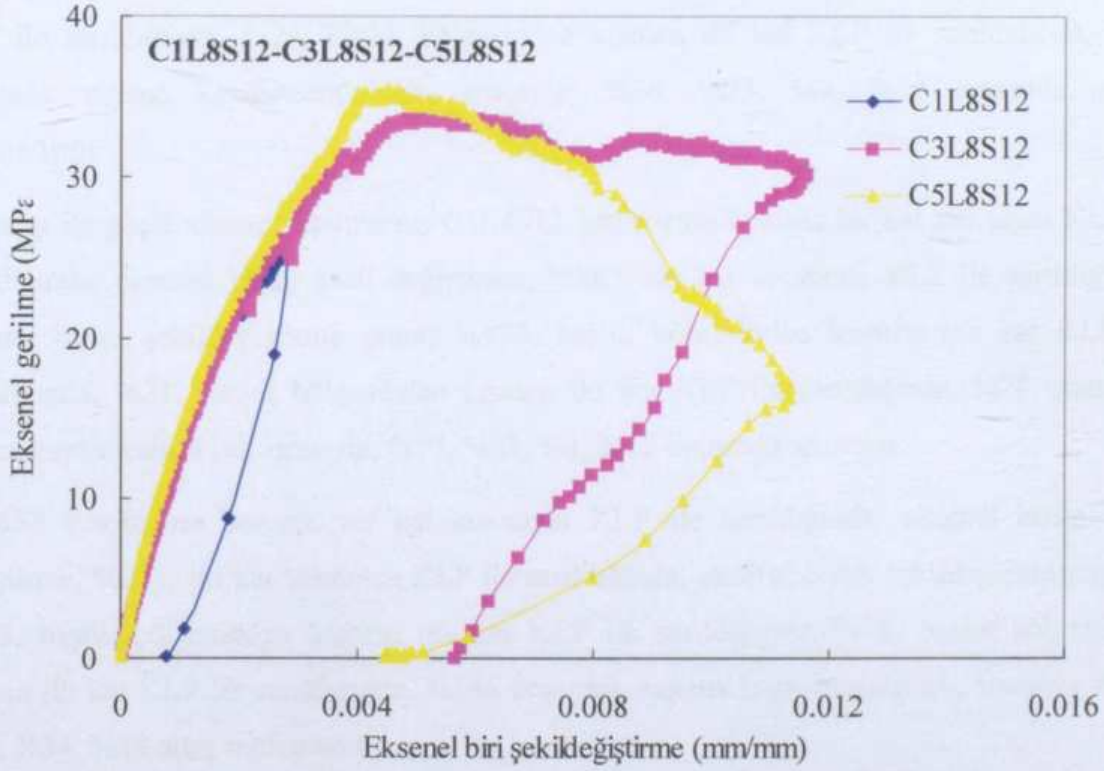
Şekil 3.99 C1,C3,C5 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.100 C1,C3,C5 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.101 C1,C3,C5 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.102 C1,C3,C5 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

3.11 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi:

Çizelge 3.1 Deney kolonlarının taşıma gücü ve şekil değiştirme artış oranları

	Taşıma Gücü artış oranları (%)				Şekil Değiştirme artış oranları (%)			
	Gövde kısmı tamamen CFRP		Başlık kısmı 100mm CFRP		Gövde kısmı tamamen CFRP		Başlık kısmı 100mm CFRP	
Yalın Kolon	Tek kat sargı **(C3)**	İki kat sargı**(C5)**	Tek kat sargı **(C4)**	İki kat sargı **(C2)**	Tek kat sargı **(C3)**	İki kat sargı **(C5)**	Tek kat sargı **(C4)**	İki kat sargı **(C2)**
C1L4S8	20	23	7	12	167	339	24	72
C1L4S12	17	21	4	15	283	479	21	78
C1L8S8	55	58	35	48	272	443	78	146
C1L8S12	33	39	17	21	313	302	52	149

FRP uygulaması ile güçlendirilen dört tip kolona ait deney sonuçları, Şekil 3.77, 78, 79, 80, 99,100, 101, 102'de eksenel gerilme ve eksenel birim şekildeğiştirme eğrileriyle mukayese edilmiştir. Aynı özellikte olup da güçlendirme yapılmamış olan C1L4S8 kolonu, bir kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekil değiştirme, %167, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekildeğiştirme oranı, %339, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %24, başlık bölgesinden kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %72 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %20, %23, %7, %12 oranında arttığı görülmüştür.

LP sargı ile güçlendirme yapılmamış C1L4S12 betonarme kolonu, bir kat tamamen KLP ile sarıldığında; eksenel birim şekil değiştirme, %283, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekildeğiştirme oranı, %479, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %21, başlık bölgesinden kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %78 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %17, %21, %4, %15 oranında artmıştır.

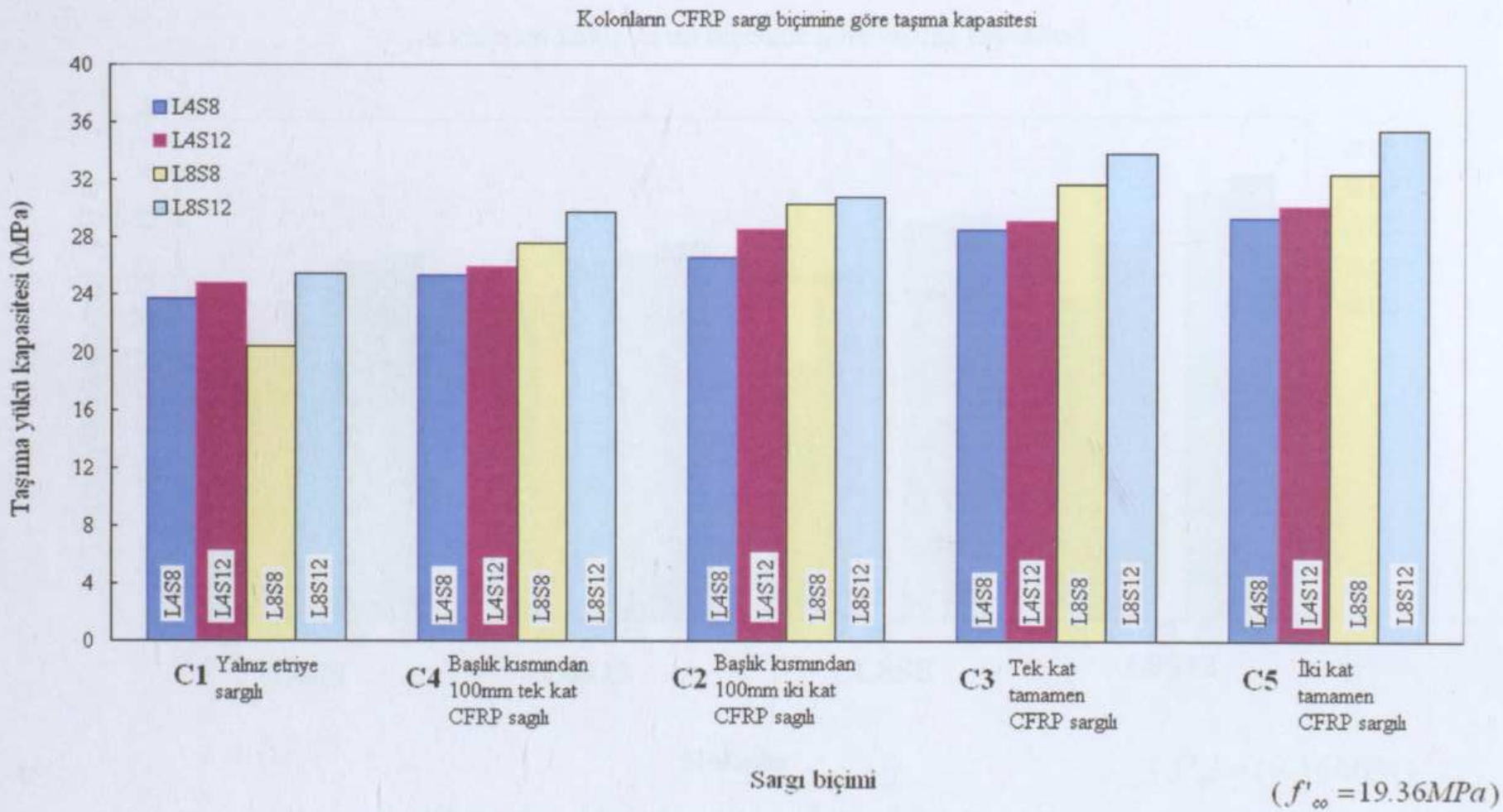
C1L8S8 betonarme kolonu, bir kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekil değiştirme, %272, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekildeğiştirme oranı, %443, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %78, başlık bölgesinden kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %146 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %54, %59, %34, %48 artış sağlamıştır.

LP sargı ile güçlendirme yapılmamış C1L8S12 betonarme kolonu ise; bir kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekil değiştirme, %151, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, %302, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %52, başlık bölgesinden

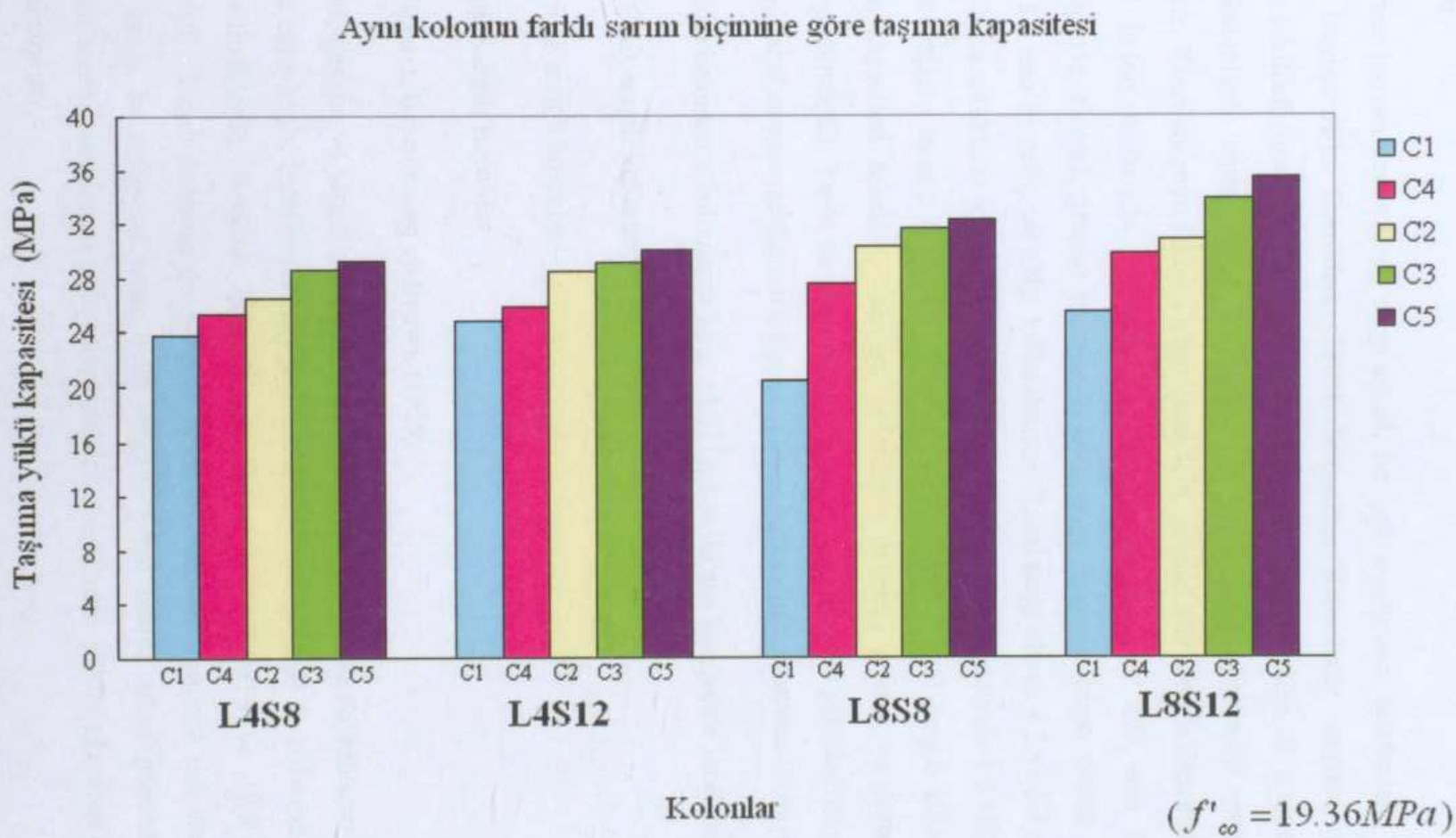
kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %149 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %33, %39, %17, %21 oranında arttığı görülmüştür.

C1L8S8 kolonu, C1L4S8 kolonuna göre %13.6 mertebesinde daha düşük bir yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Boyuna donatı sayısının iki katına çıkartılması beklendiğinin aksine taşıma gücüne olumlu yönde etki etmemiştir. Bunun nedeni betona göre daha kuvvetli bir malzeme olan çelik donatıların etrafında oluşan gerilme yığılmalarıdır. Böylelikle lokal olarak beton, çelik çubukların etrafında zayıflamakta ve bölgesel kırılmalara dolayısı ile kolonun taşıma gücünü yitirmesine neden olmaktadır. Özellikle bu durum sargı donatısının zayıf olduğu bölgede gerçekleşmesi beklenir.

Nitekim C1L8S12 kolonunda etriye çapı 12mm'ye çıktığında C1L8S12 kolonu C1L4S8 kolonuna göre %7.3'lük bir eksenel yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Buradan; kullanılan etriye çapı ile boyuna donatı sayısı ve çapı arasındaki ilişkinin kolonun taşıma gücünde etkili bir parametre olarak düşünülmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir (Chung vd., 2002, Köksal, 2006, Söylemez, 2006).



Şekil 3.103 Farklı sargı biçimlerine göre deney kolonlarının taşıma kapasitesi



Şekil 3.104 Benzer kolonların farklı sargı biçimleriyle kıyaslanması

4. BETONARME KOLONLARDA SARGILANMIŞ (KUŞATILMIŞ) BETON İÇİN BÜNYESEL MODELLER

4.1 Giriş

Betonarme taşıyıcı sistemlerde sargı etkisi, bir çok araştırmacı tarafından, 100 yılı aşkın süredir incelenmiştir. Considere (1903), betonarme sistemlerde sargının mukavemet ve betonun şekildeğiştirme özelliklerine olumlu etkisinin farkına varan ilk araştırmacılardandır. Beton kolonlarda enine donatı kullanımın da yanal şekildeğiştirmeyi yavaşlattığını öne sürmüştür. Yanal sargının etkisini görebilmek için, eksenel yük altında denemek üzere bir seri dairesel kolon üretmiştir. Numuneler 152 mm çapında ve 508 mm ila 1209 mm yüksekliğinde, altışarlı gruplar halinde hazırlanmıştır. Boyuna donatı olarak sekiz adet 6.4 mm ve 8.9 mm'lik çelik çubuklar kullanılmıştır. Yanal sargı olarak 4.3 ve 6.3 mm çapında ve 15 ila 30mm aralıklarla spiral sargı uygulanmıştır. Bu deney sonucunda 4.0 MPa ila 46.5 MPa arasında değişen basınç dayanımı değerleri görülmüştür. Yanal sargılı silindir kolonlarda dayanım kapasitesi artarken, sargısız kolonlarda davranış gevrek ve dayanımın yetersiz kaldığı görülmüştür. Yanal sargının basınç dayanımını ve eksenel şekildeğiştirme kapasitesini artırdığı, yanal sargının sıklığının artışıylada sünekliğin arttığı sonucuna varmıştır.

Bugün için betonarme kolonlarda sargı etkisi başlıca iki ana kategoride incelenebilir:

- Çelik sargılı kolonlar,
- FRP sargılı kolonlar.

4.2 Çelik Sargılı Kolonlar

4.2.1 Richart, Brandtzaeg ve Brown (1929)

Yazarlar, sargısız ve sargılı silindirlerin üç eksenli basınç altında davranışının incelenmesine öncülük etmişlerdir. İncelenen deney numuneleri 254 mm çapında ve 1016 mm yüksekliğinde beton silindirlerdir. Sargısız beton basınç dayanımı 16,7 MPa ve 19.9 MPa arasında değişmiştir. Sargılı betonun da, sargısız beton dayanımına ulaşılana dek muntazaman yük aldığı, ancak bu noktadan sonra çelik sargının yanal basınç etkisi gösterdiği, ayrıca; bu noktadan sonra, maksimum yüke ulaşılana dek uygulanan yükün eğiminin azalarak arttığı gözlemlenmiştir.

Yazarlar, sargılı beton basınç dayanımı f'_{cc} ve eksenel şekildeğiştirme ε'_{cc} için :

$$f_{cc} = f'_c + k_1 \sigma_3 \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + k_2 \frac{\sigma_3}{f'_c} \right) \tag{4.2}$$

bağıntılarını kullanmıştır. k_1, deney sonuçlarından bulunan etkili sargı katsayısıdır ve yaklaşık olarak değeri 4.1 ve

$$k_2 = 5k_1 \tag{4.3}$$

f'_c , sargısız beton basınç dayanımı,

ε_{cc}, sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim kısalma,

σ_3, sargının sağladığı yanal basınç gerilmesi,

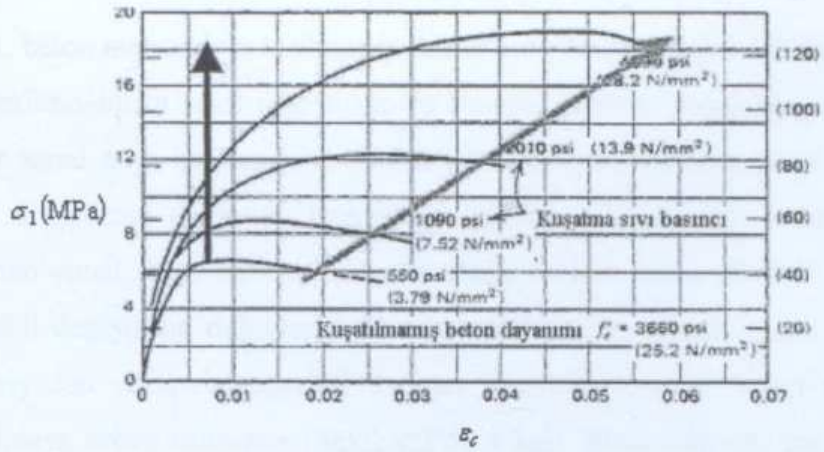
$$\sigma_3 = \frac{\rho_s f_s}{2}, \tag{4.4}$$

ρ_s , sargı donatısı hacimsel oranı,

f_s, sargı mukavemetidir.

4.2.2 Mander Beton Modeli (1988)

Mander beton modeli sargılı, dikdörtgen sargı donatılı, dairesel veya dikdörtgen kesitli yapı elemanların monotonik veya çevrimsel yükler altındaki davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilmiştir. Mander vd., (1988) 40 adet büyük ölçekli, dairesel, kare ve dikdörtgen betonarme kolonu eksenel yük altında denemişlerdir. Bu deneylerde kolonların statik ve dinamik yük etkileri altındaki davranışları araştırılmıştır.



Şekil 4.1 Silindir beton numuneler için üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Whittaker A., 2000)

Sargılı beton için geliştirilecek eksenel gerilme–birim şekil değiştirme bağıntısının sargılanmış elemanları tarafından olşturulan iki eksenli basınç etkisini de dikkate alması gerekmektedir. Bu amaçla Mander vd., (1988), diğer birçok araştırmacının da başvurduğu gibi Richart vd., (1928)'in Illinois Üniversitesi'nde yapılan üç eksenli beton deneylerinin sonuçlarını esas almıştır. Araştırmacılar, söz konusu deney sonuçlarını temel alarak çok eksenli yük altında taşıma gücünü, f_{cc}, betonun tek eksenli basınç mukavemeti $f_c^{'}$ ve uygulanan yanal basınç, σ_3, değerlerini kullanarak;

$$f_{cc} = f_c^{'} + k_1 \sigma_3 \tag{4.5}$$

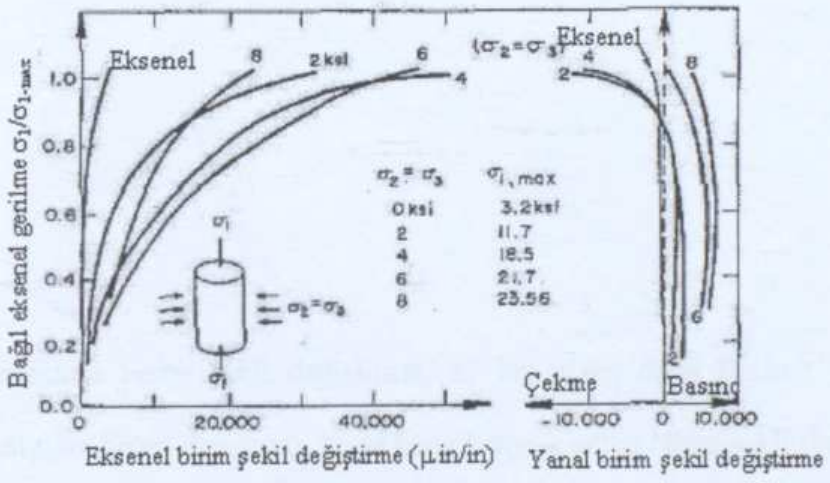
şeklinde ifade etmişlerdir. Benzer şekilde taşıma gücüne karşılık gelen birim şekil değiştirme değerini de

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c^{'}\left(1 + k_2 \frac{\sigma_3}{f_c^{'}}\right) \tag{4.6}$$

eşitliği ile dikkate almışlardır. Richart vd., (1928), $k_1 = 4.1$ ve $k_2 = 5k_1$ olarak bulurken Balmer vd., (1949) k_1 değerinin 4.5 ile 7 arasında değiştiğini ifade etmiştir. Richart vd., (1928), sargılı betonarme deney silindirlerinin sonuçlarını kullanarak k_1 için sabit bir 4.1 değerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir; ACI Yönetmeliği de uzun yıllardan beri bu önerileri dikkate almaktadır (Mander vd., 1988).

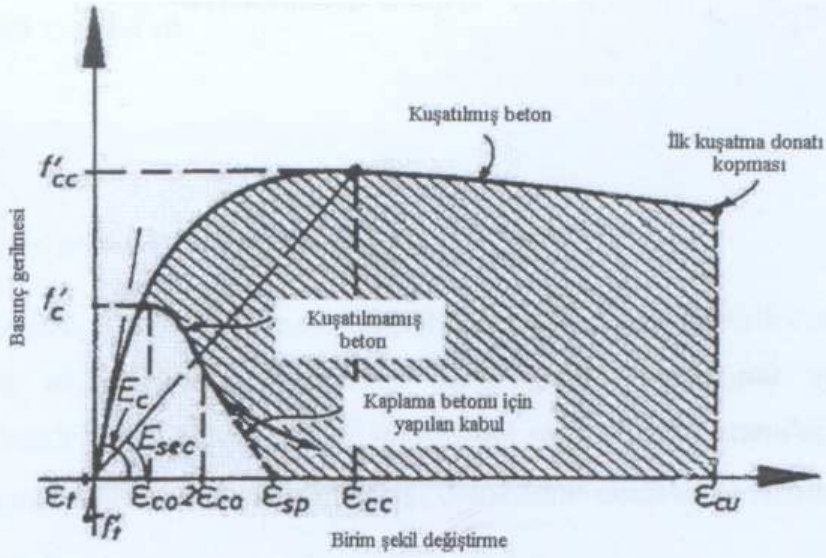
Betonun çok eksenli yükleme altındaki gerilme–birim şekil değiştirme davranışı Şekil 4.2'de

gösterilmişir. Silindirik beton numuneleri düzgün yanal basınca, $\sigma_2 = \sigma_3$, maruz bırakılmış ve eksenel yük, beton numunenin kırılmasına kadar arttırılmıştır. Şekil 4.2'den de anlaşılacağı gibi eksenel gerilme–birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme eğrileri her bir yanal sargı basıncı için farklıdır. Bu deneyler sonunda yanal sargı basıncının betonun şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisinin çok önemli olduğu gözlenmiştir. Deneylerde artan yanal sargı basıncı ile numunenin kırılma anına tekabül eden eksenel ve yanal birim şekil değiştirme değerlerin de artış görülmüştür. Ancak, yanal sargı basıncının belirli bir seviyeden sonraki değerleri kırılma anındaki eksenel birim şekil değiştirme değerinde azalmaya sebep olmuştur (Şekil 4.2'de 4 ksi). Buna rağmen, çok eksenli gerilme altındaki betonun davranışı bir eksenli gerilme altındaki ile karşılaştırıldığında, bir eksenli duruma göre çok daha büyük eksenel birim şekil değiştirme değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bilindiği üzere, betonda yanal sargı basıncı mevcut iken eksenel basınç altındaki davranışı, büyük süneklik kazanır (Chen ve Han, 1988).



Şekil 4.2 Çok eksenli gerilme altında gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri (Chen ve Han, 1988)

Mander vd., (1988), sargılı veya etriyeli yanal donatıyı haiz sargılı beton kesitler için gerilme–birim şekildeğiştirme bağıntısı önermişler ve Şekil 4.3'deki gerilme–birim şekil değiştirme modeli geliştirirken Popovics (1973) tarafından önerilen bağıntıyı temel almışlardır.



Şekil 4.3 Mander beton modeli (1988)

Monotonik olarak yüklenen betonda oluşacak gerilme aşağıdaki bağıntılar ile bulunabilir.

$$\sigma_1 = \frac{f_{cc}\, x\, r}{r - 1 + x^r} \tag{4.7}$$

ve

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \tag{4.8}$$

(4.8)'de ε_c betondaki birim şekil değiştirme, ε_1 ise; daha önce Richart vd., (1928)'de önerildiği gibi sargısız beton dayanımı $f_c^{'}$ ve buna karşılık gelen birim şekil-değiştirme $\varepsilon_c^{'}$'ne bağlı olarak Mander vd., (1988) çalışmasında

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c^{'}\left[1 + 5\left(\frac{f_{cc}}{f_c^{'}} - 1\right)\right] \tag{4.9}$$

bağıntısı ile verilmiştir ($\varepsilon_c^{'}$ değeri genellikle 0.002 alınır).

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\sec}} \tag{4.10}$$

(4.10)'daki

$$E_c = 5000\sqrt{f_c^{'}}\ \text{(MPa)} \tag{4.11}$$

betonun elastisite modülü ve

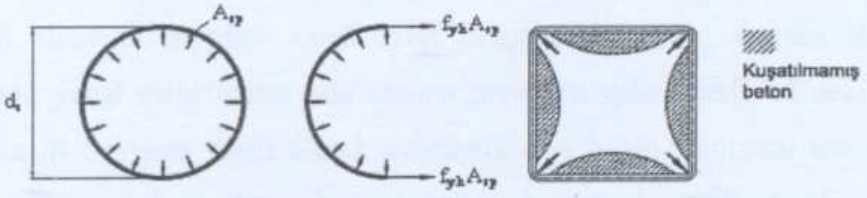
$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_1} \tag{4.12}$$

olarak ifade edilen sekant elastisite modülüdür.

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi spiraller ve dairesel halka etriyeler, geometrik özelliğinden dolayı eksenel basınç altında beton genişlerken çekme etkisinde kalırlar ve bu durumda çevreledikleri beton kesit üzerinde sürekli bir çizgisel sargı yükü oluştururlar. Betona etkiyen etkili yanal basınç σ_3 en büyük değerini, sargı donatısının akma mukavemeti f_{yh}'ye ulaştığı zaman alır. Bu değer

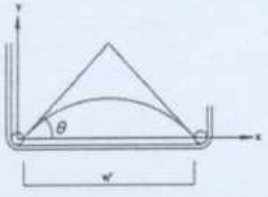
$$\sigma_3 = \frac{2 f_{yh} A_{sp}}{d_s s} \tag{4.13}$$

alınabilir. Burada d_s çekirdek çapı, A_{sp} sargı donatısı kesit alanı, s sargı adımıdır.



Şekil 4.4 Yanal sargı basıncı (Whittaker A., 2000)

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi etkili olarak çalışan/çalışmayan beton enkesit alanları tahmin edilebilir. Mander modelinde, Skeih ve Uzumeri (1983) modelindeki yaklaşıma benzer olarak, Şekil 4.5'den de görüldüğü gibi, boyuna donatı çubuklarından çizilen teğetler ve eğriler ile etkili ve etkili olmayan enkesit sınırları belirlenmiştir (Mander vd., 1988). Bu eğri bir üçgen ile başlangıç eğimi θ olan ikinci derece parabol arasında düşünülebilir. θ açısının 45°'ye yakın olduğu gözlenmiştir (Sheikh ve Uzumeri, 1983) (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Mander beton modelinde kuşatılmamış beton alanının elde edilişi için yapılan kabul

Sargı donatısı seviyesinde etkili olarak sargılanmamış beton çekirdek alanı, "taralı alan" için yapılan kabule bağlı olarak (4.14)'deki α_3 katsayısını, üçgen kabulü ve parabol kabulü için sırası ile 4 veya 6'ya eşit alınarak hesaplanabilir (Sheikh ve Uzumeri, 1983):

$$A_{et} = A_{co} - \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i^2}{\alpha_3} \tag{4.14}$$

Burada A_{co} en dış sargı donatısının kapadığı beton çekirdek alanı, n parabol veya üçgen sayısı ve C ise en dış sargı donatısı merkezleri arasındaki mesafedir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Eğer λ, etkili olarak sargılı beton enkesit alanı A_{et}'nin çekirdek beton alanı A_{co}'ya oranı olarak tanımlanır ise; bu katsayı

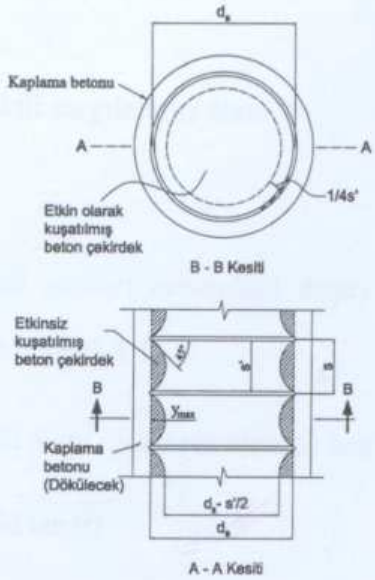
$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i^2}{\alpha_3 A_{co}} \tag{4.15}$$

olarak yazılabilir (Sheikh ve Uzumeri, 1983).

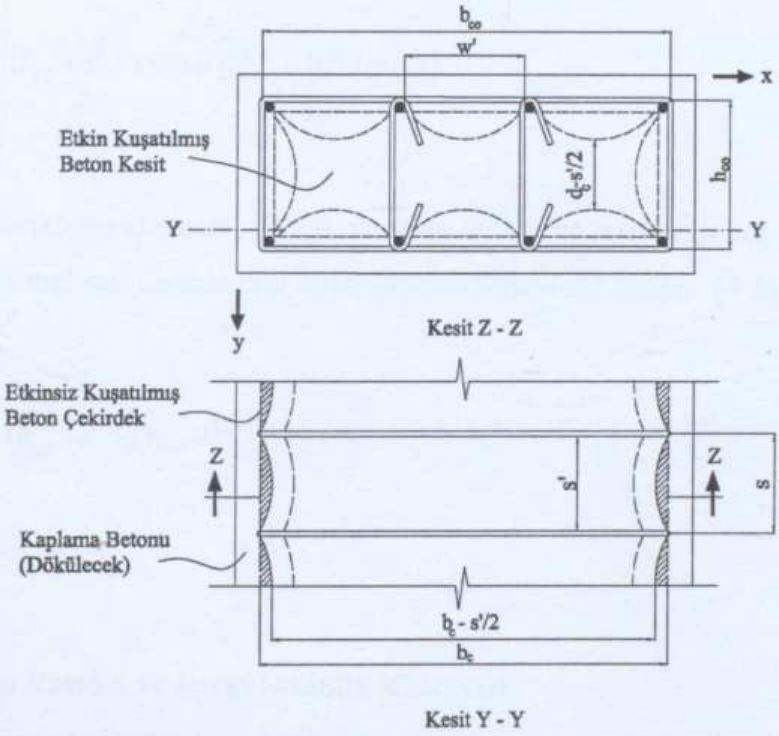
Ayrıca, kolon elemanı boyunca yanal sargı donatısı aralığının artması ile birlikte bu doğrultuda etkili yanal sargı basıncında azalma meydana gelir. Şekil 4.8'deki taralı alanlar düşey kolon kesiti boyunca etkili olarak sargılanmamış beton alanlarını temsil etmektedir. Kolon eleman boyunca hem düşey hem de yatay doğrultuda etkili olarak sargılanmış ve sargılanmamış beton alanlarının ikinci derece eğri ile birbirlerinden ayrıldığı kabul edilmiştir. Bu kabul için, seçilen eğrinin şeklinin pek bir önemi yoktur. Bir kolonun taşıma gücünü iki sargı donatısı arasında kalan en küçük beton enkesit alanı belirlemektedir. Kolon yüksekliği boyunca yerleştirilen yanal donatılar arası mesafenin artması daha küçük etkili beton enkesit alanları anlamına gelir. Bununla beraber, etkili olarak sargılanmış beton enkesit alanını tam olarak tahmin etmenin çok güç olduğu açıktır. Buna rağmen bu alan aşağıdaki basit alan bağıntısı ile dikkate alınabilir:

$$A_{co} = b_{co} h_{co} \tag{4.16}$$

$$A_{et} = \lambda A_{co} \tag{4.17}$$



Şekil 4.6 Sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış çekirdek enkesit alanı (Mander vd., 1988)



Şekil 4.7 Etriyeli/sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış beton çekirdek enkesit alanı (Mander vd., 1988)

Şekil 4.7'de b_{co} ve h_{co} değerleri, dikdörtgen kesitli kolonlarda birbirine dik iki doğrultudaki en dış sargı donatısı eksenleri arasında kalan mesafelerdir. Sargı donatısı seviyesindeki çekirdek alanı A_{co}'da yapılacak azaltma ihmal edilerek iki sargı donatısı arasındaki etkili olarak sargılanmış enkesit alanı

$$(b_{co}-2y_m)(h_{co}-2y_m) \tag{4.18}$$

olarak ifade edilir ise; sonuçta etkili sargılanmış alan:

$$A_{et}=\lambda(b_{co}-2y_m)(h_{co}-2y_m) \tag{4.19}$$

olarak bulunur. y_m, sargı donatı sıraları arasındaki düşey mesafenin yarısında y'nin en büyük değeridir: $y_m=0.25s\tan\theta$ (Şekil 4.7).

Böylece etkili sargılı beton enkesit alanı, çekirdek alanına bağlı olarak:

$$A_{et}=\lambda\,(b_{co}-0.5s\tan\theta)(h_{co}-0.5s\tan\theta) \tag{4.20}$$

şeklinde elde edilir.(4.15) bağıntısı (4.20)'de yerine yazılır ise;

$$A_{et}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}C_i^2}{\alpha_3\,A_{co}}\right)(b_{co}-0.5s\tan\theta)(h_{co}-0.5s\tan\theta) \tag{4.21}$$

olarak bulunur (Sheikh ve Uzumeri, 1983). Boyuna donatı yerleşiminin her iki yönde de eşit olarak dağıtıldığı, yanal sargı basıncının birbirine eşit olduğu bir kesitte (4.21) bağıntısı

$$A_{et}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}C_i^2}{\alpha_3\,A_{co}}\right)(b_{co}-0.5s\tan\theta)^2 \tag{4.22}$$

haline gelir.

4.2.2.1 Etkili Sargı Basıncı ve Sargı Etkinlik Katsayısı

Mander vd., (1988) etkili yanal sargı basıncı $\sigma_3^{'}$'nü hesaplamak için Sheikh ve Uzumeri (1983)'nin kullandıkları yaklaşıma benzer bir yol izlemişlerdir. Sargı donatısından beton kesite etki edecek en büyük yanal basınç gerilmesi, yanal tutma etkisinin tam anlamı ile oluşacağı beton çekirdek alanında meydana geleceği vurgulanmış ve Şekil 4.7'de bu amaç için izlenen yol ve yapılan kabuller gösterilmiştir.

İki sargı donatısının orta kısımlarına gidildikçe etkili olmayan sargılanmış beton enkesit alanları artacak ve böylece iki sargı donatısı arasında orta seviyedeki etkili sarılmış beton

enkesit alanı, A_{et} giderek küçülecektir. Bu gerçeğin yansıtılabilmesi için etkili yanal sargı basıncı

$$\sigma_3^{'} = \sigma_3 k_e \tag{4.23}$$

olarak dikkate alınmıştır. Burada σ_3 sargılanmış beton çekirdeğe etkiyen düzgün yayılı yanal sargı basıncı, k_e

$$k_e = \frac{A_{et}}{A_{co}^{'}} \tag{4.24}$$

olarak etkili sargı katsayısı, A_{et} etkili sargılı beton enkesit alanı, $A_{co}^{'}$

$$A_{co}^{'} = A_{co}(1-\rho_{co}) \tag{4.25}$$

olarak net çekirdek beton enkesit alanı ve ρ_{co} boyuna donatı toplam enkesit alanının beton çekirdek alanına oranıdır.

4.2.2.2 Sipiral ya da Halka Enine Donatıyla Sargılanmış Kesitlerde Sargı Etkinlik Katsayısı

Mander vd., (1988) modellerinde sargı donatısının tutma etkisinin gelişimini Şekil 4.8'de görüleceği gibi başlangıç eğimi 45° olan ikinci derece bir eğri olarak kabul etmişler ve iki sargı donatısının orta seviyesindeki etkili sargılı beton enkesitin alanı A_{et}'yi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir:

$$A_{et} = \frac{\pi}{4}\left(d_s - \frac{s^{'}}{2}\right)^2 \tag{4.26}$$

Burada $s^{'}$ sargı donatıları arasındaki temiz mesafe ve d_s sargı donatısının merkezine göre beton çekirdeğinin çapıdır. Ayrıca, net beton çekirdek alanı

$$A_{co}^{'} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1-\rho_{co}) \tag{4.27}$$

dir. Böylece (4.24)'de, (4.26) ve (4.27)'de belirtilen değişkenler yerine yazılır ise, halka sargılı kesitler için etkili sargı katsayısı k_e

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{co}} \tag{4.28}$$

olarak bulunur. Benzer olarak spiral donatılı kesitler için ise;

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{co}} \tag{4.29}$$

bağıntısı ile elde edilebilir.

Yanal sargı basıncı (4.13) ile ifade edilmişti. ρ_s sargı donatısı hacminin sargılanmış beton çekirdek hacmine oranı olarak tanımlanır;

$$\rho_s = \frac{A_{sp}\,\pi\, d_s}{\frac{\pi}{4} d_s^2\, s} \tag{4.30}$$

ve (4.30), (4.13)'te yerine yazılır ise, yanal sargı basıncı

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}\rho_s\, f_{yh} \tag{4.31}$$

olarak elde edilir. Böylece sargılı betona etkiyecek etkili yanal basınç

$$\sigma_3' = \frac{1}{2} k_e\, \rho_s\, f_{yh} \tag{4.32}$$

olarak elde edilir. Bu bağıntıda k_e değişkeni (4.28) veya (4.29)'dan alınmalıdır.

4.2.2.3 Dikdörtgen Sargılı Kolonlar için Sargı Etkinlik Katsayısı

Şekil 4.21'den görüleceği üzere; sargı donatısı tutma etkisinin beton yüzey üzerindeki dağılımı, başlangıç eğimi 45° olan ikinci derece bir eğri ile ifade edilmiştir. Sargı donatısının tutma etkisi düşeyde yanal donatılar arasında ve yatayda da boyuna donatılar arasında oluşmaktadır. Yanal sargı donatı seviyesindeki etkili sargı enkesit alanı, ikinci derece eğriler ile ifade edilmiş olan etkili olmayan sargılanmış kesit alanlarının çıkartılması ile bulunur.

Etkili olarak çalışmayan beton enkesit alanlarının toplam değeri, betonarme kesitte buluna n adet boyuna donatı sayısına göre

$$A_{et}^{'} = \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i^2}{6} \tag{4.33}$$

olarak hesaplanır. Daha önce (3.21)'de ifade edilmiş olan iki sargı donatısının orta seviyesindeki etkili sargılı beton enkesit alanı, $\alpha_3 = 6$ (etkili olarak çalışmayan/kabuk olarak çalışan beton enkesit alanının sınır eğrisi ikinci derece eğri olması durumu için) ve $\theta = 45^o$ (eğrinin başlangıç eğimi) olarak kabul edilmesi ile,

$$A_{et} = \left(b_{co} h_{co} - \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}{6} \right) (b_{co} - 0.5 s')(h_{co} - 0.5 s') \tag{4.34}$$

olarak bulunur. Böylece (3.24) ile ifade edilmiş olan k_e etkili sargı donatı katsayısı, dikdörtgen yanal sargılı kesitli kolonlar için

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i^2}{6 b_{co} h_{co}} \right) (b_{co} - 0.5 s')(h_{co} - 0.5 s')}{(1 - \rho_{co})} \tag{4.35}$$

olarak elde edilir. Dikdörtgen betonarme kesitlerde her iki yönde farklı miktarda sargı donatısı olabilir. Bu durumda her iki yöndeki etkili yanal sargı basınçlarını ifade etmek için

$$\rho_{sx} = \frac{A_{shx}}{s h_{co}} \tag{4.36}$$

ve

$$\rho_{sy} = \frac{A_{shy}}{s b_{co}} \tag{4.37}$$

olarak x ve y yönlerindeki sargı oranları tanımlanarak bu yönlerdeki beton yüzeylerine etkiyecek sargı basınçları, sırasıyla; x yönünde

$$\sigma_{3x} = \frac{A_{shx}}{s h_{co}} f_{yh} = \rho_{sx} f_{yh} \tag{4.38}$$

ve y yönünde

$$\sigma_{3y} = \frac{A_{shy}}{s\, b_{co}} f_{yh} = \rho_{sy} f_{yh} \tag{4.39}$$

bağıntıları ile bulunur. Böylece; (3.23)'den her iki yöndeki etkili yanal sargı basınçları, sırası ile

$$\sigma_{3x}^{'} = k_e\, \rho_{sx}\, f_{yh} \tag{4.40}$$

ve

$$\sigma_{3y}^{'} = k_e\, \rho_{sy}\, f_{yh} \tag{4.41}$$

olarak elde edilir (Mander vd., 1988).

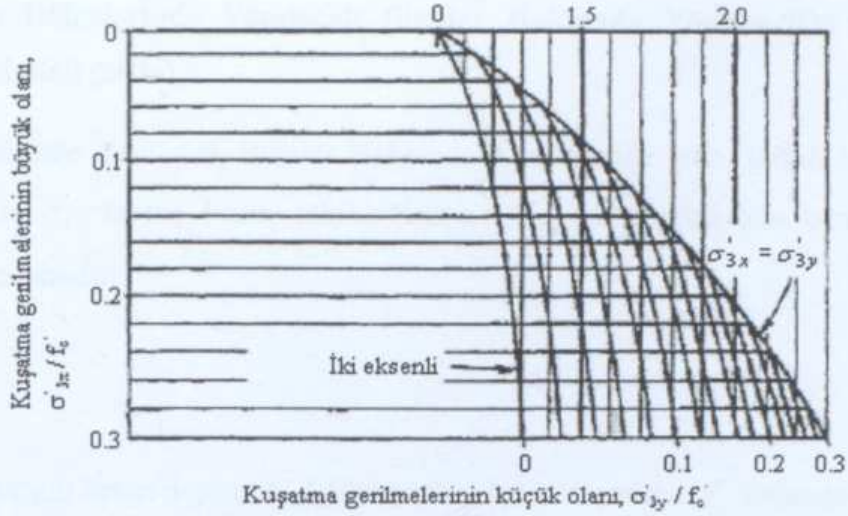
4.2.2.4 Sargılanmış Beton Taşıma Gücü

Mander vd., (1988), sargılanmış beton basınç dayanımı f_{cc}'yi hesaplayabilmek için, üç eksenli deney verileri ile iyi uyum sağlaması nedeni ile, William ve Warnke (1975) tarafından tanımlanmış beş değişkenli, çok eksenli kırılma yüzeyi modelini kullanmışlardır.

Şekil 4.8'de iki yöndeki yanal sargı basınçlarına bağlı çok eksenli kırılma kriterinin genel çözümü görülmektedir. Spiral veya halka enine donatıyla sargılanmış çekirdek beton bir kesitin eşit yanal basınçlar ile üç eksenli gerilmeye maruz kalması halinde; sargılanmış betonun dayanımı

$$f_{cc} = f_c^{'}\left(-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94\,\sigma_3^{'}}{f_c^{'}}} - 2\frac{\sigma_3^{'}}{f_c^{'}}\right) \tag{4.42}$$

olarak verilmiştir. Burada $f_c^{'}$ sargılanmamış beton basınç dayanımı, $\sigma_3^{'}$ ise (4.32) ile verilen etkili yanal sargı basıncıdır.



Şekil 4.8 Dikdörtgen kesitler için yanal sargı basınçları ile kuşatılmış beton dayanım hesabı (Mander vd., 1988)

4.2.2.5 Betondaki En Büyük Birim Kısalma

Eğilmeye çalışan betonarme elemanlarda meydana gelecek plastik mafsalların en büyük dönme kapasitelerini hesaplayabilmek için, betonun en büyük birim kısalması ε_{ccu} değerini tahmin etmek gerekir (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988). Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme değeri ε_{ccu}; enine donatıda oluşan ilk kopma anına tekabül eden değerdir.

Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme ε_{ccu} için Priestley (2000), Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., (1988), tarafından yapılan, deneysel verilerden okunan ε_{ccu} değerleri ile de iyi bir uygunluk gösteren

$$\varepsilon_{ccu} = 0,004 + 1.4\frac{\rho_s f_{yh}\ \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.43}$$

bağıntısını önermiştir.

Burada,

ρ_s : Hacimsel enine donatı oranı,

f_{yh} : Yanal donatı akma gerilmesi,

ε_{su} : Donatıdaki mütekabil birim şekil değiştirmedir.

4.2.3 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre Sargılı Beton Modeli (2006)

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre, sargılı betonda beton basınç gerilmesi σ_l, basınç birim şekildeğiştirmesi ε_c'nin fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir:

$$\sigma_l = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \tag{4.44}$$

Bu bağıntıdaki sargılı beton dayanımı f_{cc} ile sargısız beton dayanımı f_{co} arasındaki ilişki:

$$f_{cc} = \lambda_c f'_c \; ; \; \lambda_c = 2.254\sqrt{1 + 7.94\frac{\sigma_3}{f'_c}} - 2\frac{\sigma_3}{f'_c} - 1.254 \tag{4.45}$$

dir.

σ_3, "etkili sargı basıncı"dır. Yönetmelikte kullanılan bağıntılarda, Mander vd. (1988) Modeli temel alınmıştır. σ_3, etkili sargı basıncı, dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için aşağıdaki bağıntının ortalaması alınmaktadır.

$$\sigma_{3x} = k_e \rho_x f_{yw} \; ; \; \sigma_{3y} = k_e \rho_y f_{yw} \tag{4.46}$$

f_{yw}, enine donatının akma dayanımı, ρ_x ve ρ_y, ilgili doğrultuda, enine donatıların hacimsel oranı, k_e, etkili sargılama katsayısıdır.

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6 b_0 h_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2b_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2h_0}\right)\left(1 - \frac{A_s}{b_0 h_0}\right)^{-1} \tag{4.47}$$

a_i, kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı, b_0 ve h_0, çekirdek alandaki betonu sargılayan etriyelerin eksenleri arsında kesit boyutlarını, s, düşey doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki aralığı, A_s, boyuna donatı enkesit alanını gösterir. x ile r değişkenine ilişkin bağıntı aşağıda verilmiştir.

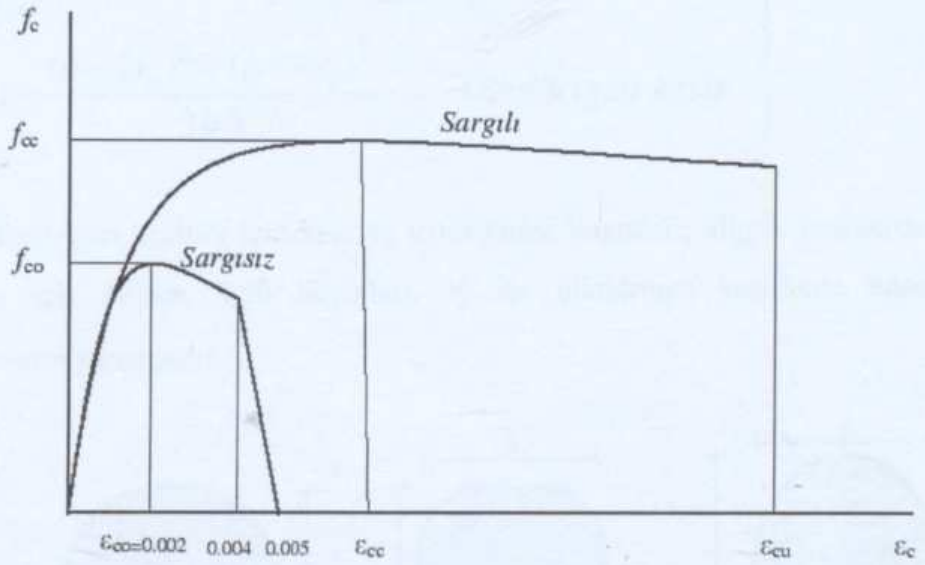
$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \; ; \; \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1 + 5(\lambda_c - 1)\right] \; ; \; \varepsilon_{co} \cong 0.002 \tag{4.48}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \; ; \; E_c \cong 5000\sqrt{f'_c} \; ; E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \tag{4.49}$$

Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi ε_{ccu} :

$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.50}$$

ρ_s, toplam enine donatının hacimsel oranı, ε_{su}, enine donatı çeliğinde maksimum gerilme altındaki birim uzamadır.



Şekil 4. 9 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2006)' a göre sargılı ve sargısız beton için gerilme şekildeğiştirme eğrileri

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre, LP sargılama ile kolonların eksenel basınç dayanımlarının arttırılabilmesi için, kolon kesitinin uzun boyutunun kısa boyutuna oranı ikiden fazla olmamalıdır. Kolonların en kesitleri dikdörtgenden elipse dönüştürülerek LP'nin etkililiği arttırılmalıdır. Elips kesitlerde uzun çapın kısa çapa oranı en fazla üç olabilir. LP ile sargılanmış bir kolonun eksenel yük dayanımı hesaplanırken beton basınç dayanımı için f_{cc}:

$$f'_{cc} = f'_c (1 + 2.4(\sigma_3 / f'_c)) \geq 1.2 f'_c \tag{4.51}$$

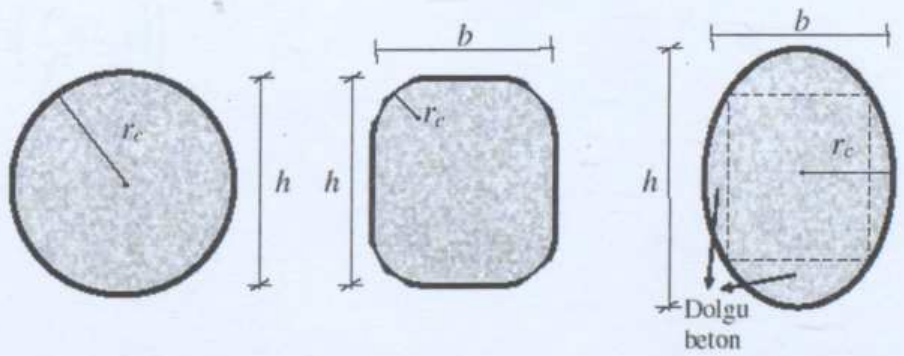
f'_c, sarılmamış betonun mevcut basınç dayanımı, σ_3, LP sargının sağladığı yanal basınç miktarıdır:

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}\kappa_a \rho_f \varepsilon_f E_f \tag{4.52}$$

κ_a, etkili kesit şekil katsayısı, ρ_f, LP hacimsel oranıdır. κ_a geometrik kesitlere göre farklılık gösterir.

$$\kappa_a = \begin{Bmatrix} 1 & \textit{Dairesel kesit} \\ \left(\dfrac{b}{h}\right) & \textit{Elips kesit} \\ 1 - \dfrac{(b-2r_c)^2 + (h-2r_c)^2}{3bh} & \textit{Dikdörtgen kesit} \end{Bmatrix} \tag{4.53}$$

b ve h dikdörtgen kesitler için kısa ve uzun kenar boyutları, eliptik kesitlerde kısa ve uzun yarıçaplar için elipsin ilgili boyutları, r_c ise dikdörtgen kesitlerde köselerde yapılan yuvarlatmanın yarıçapıdır.



a) Dairesel kesitli kolon b) Dörtgen kesitli kolon c) Eliptik kesitli kolon

Şekil 4.10 Kolon kesitlerinin köşelerde yapılan yuvarlatmalar (DBYBHY, 2006)

LP ile sargılanmıs bir kolonda sargılanmış beton basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma, ε_{cc}:

$$\varepsilon_{cc} = 0.002\left(1 + 15\left(\sigma_3 / f'_c\right)^{0.75}\right) \tag{4.54}$$

bağıntısı ile bulunabilir.

4.3 LP Sargılanmış Kolonlar

4.3.1 Saadatmanesh, Ehsani ve Li Sargı Modeli (1994)

Saadatmanesh vd.(1994), FRP sargılanmış beton kolonların monotonik yükler altında, davranışının belirlenmesini sağlayan ilk araştırmacılardandır. Modellerinde aşağıdaki parametreleri dikkate almışlardır:

i) Beton basınç dayanımı,

ii) FRP sargı kesiti,

iii) FRP sargı cinsi.

Daire ve dörtgen enkesitli FRP kompozit malzeme sargılı kolonların gerilme- şekildeğiştirme modeli, Popovics (1973)'i temel alan Mander vd.(1988) Modelini kullanmıştır. Monotonik yükleme ve yavaş birim şekildeğiştirme hızı için beton basınç gerilmesi σ_l:

$$\sigma_l = \frac{f'_{cc}\, xr}{r - 1 + x^r} \tag{4.55}$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \tag{4.56}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1 + 5\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right] \tag{4.57}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \tag{4.58}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \tag{4.59}$$

bağıntılarıyla bulunur. Sargılanmış beton basınç dayanımını, f'_{cc}, hesaplamak için William ve Warnke (1975) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılmıştır.

$$f'_{cc} = f'_c\left[-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94\sigma_3}{f'_c}} - 2\frac{\sigma_3}{f'_c}\right] \tag{4.60}$$

σ'_3, FRP sargı için etkili yanal sargı basıncıdır.

$$\sigma'_3 = \sigma_3 k_e \tag{4.61}$$

k_e, etkili sargı katsayısıdır. Dörtgen kolonlar için:

$$k_e = \frac{\left(1-\frac{s'}{2h}\right)\left(1-\frac{s'}{2b}\right)}{1-\rho_{cc}} \tag{4.62}$$

ρ_{cc}, boyuna donatının beton enkesitine oranı,

s', enine sargı donatısı temiz aralığı,

σ_3, kompozit FRP sargıdan ileri gelen yanal basınç,

$$\sigma_3 = \frac{2 f_{us} A_{st}}{d_s s} \tag{4.63}$$

f_{us}, kompozit sargı dayanımı, A_{st}, sargı kesit alanı, s, sargı genişliği,

d_s, kolon çapıdır.

Kolonun göçme yüküne ulaşmasının kompozit sargı gerilmesinin dayanıma ulaşmasıyla olmaktadır.

4.3.2 Samaan, Mirmiran ve Shahawy Sargı Modeli (1998)

Samaan vd. , FRP sargılı beton kolonlarda gerilme-şekildeğiştirme davranışını tahmin eden bir model sunmuşlardır. Sunulan modelde gerilme-birim şekildeğiştirme hem eksenel, hem yanal yönde bi-lineer olarak ifade edilmiştir. İlk eğimde gerilme, silindirik beton basınç dayanımının ulaştığı noktadır. İkinci eğim ise, eksenel yük almış betonarme eleman yanal doğrultuda bir birimşekil değiştirme davranışına gider; bu yanal şekildeğiştirme uzaması ikinci doğrultunun eğimini belirler. Bu modelde, betondaki genişleme oranı ve sargı rijitliği arasındaki korelasyon temel alınmıştır. Modeldeki parametreler FRP sargı ve çekirdek beton özelliklerine bağlıdır. FRP sargılı betonda bilineer davranışı göstermek için dört parametreli Richard ve Abbott(1975) modelinden yararlanılmıştır.

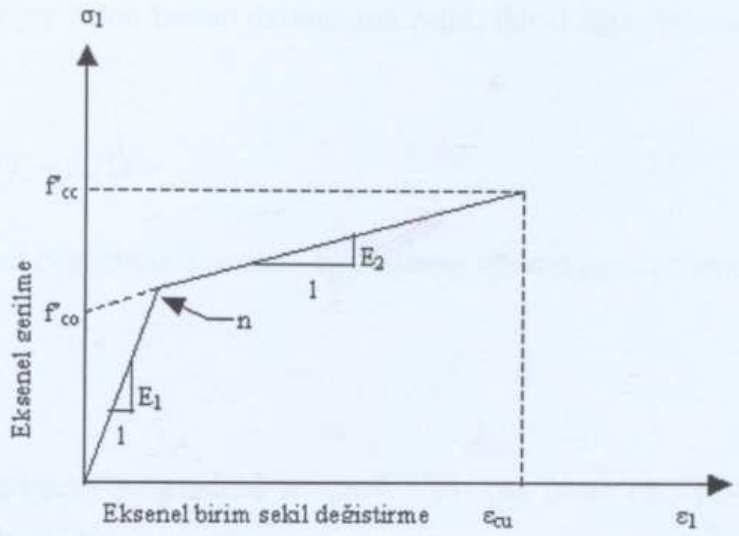
$$\sigma_l = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{\left[1+\left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}} + E_2\varepsilon_c \tag{4.64}$$

σ_l ve ε_c, sırasıyla eksenel beton basınç gerilmesi, eksenel birim şekildeğiştirme,

E_1 ve E_2, birinci ve ikinci eğimler,

f_o, gerilme ekseniyle, ikinci eğimin kesiştiği plastik gerilme başlangıç noktası.

n, eğride geçiş bölgesini belirleyen eğri-şekil parametresidir.



Şekil 4.11 Samaan, Mirmiran ve Shahawy sargı modeli, (1998)

Sargılı beton dayanımı, f'_{cc}:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1\sigma_3 \tag{4.65}$$

f'_c, sargısız beton basınç dayanımı, f_r, sargı basıncıdır. k_1, sargı basıncına bağlı etkililik katsayısı:

$$k_1 = 6.0 f_r^{-0.3} \tag{4.66}$$

dır.

Normalde pasif olan FRP sargı etkisi sargısız betonun f'_c, gerilmesine ulaşmasıyla aktif hale geçer. Bu nedenle eğrinin ilk eğimi E_1, yalnızca beton özelliğine bağlıdır. E_1 değeri için Ahmad ve Shah (1982) önerdikleri denklem kullanılmıştır:

$$E_1 = 3.950\sqrt{f'_c} \tag{4.67}$$

Eğrinin ikinci eğimi, E_2, sargı malzemesinin rijitliğine ve kısmen sargısız beton çekirdeğinin genişlemesine bağlıdır.

$$E_2 = 245.61 f'^{0.2}_c + 1.3456 \frac{E_j t_j}{D} \tag{4.68}$$

E_j, sargı yönü doğrultusunda etkili elastisite modülü, t_j, kompozit malzeme sargı kalınlığı, D, kolon çapıdır.

Sargılı beton ve sargısız beton basınç dayanımına bağlı, ikinci eğim eğrisinin ekseni kestiği nokta gerilmesi f_0:

$$f_0 = 0.872 f'_c + 0.371 f_r + 6.258 \tag{4.69}$$

Maksimum birim şekil değiştirme davranışı ε_{cu}, bilineer eğrinin geometrisinden:

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cu} - f_o}{E_2} \tag{4.70}$$

şeklinde bulunur. Eğri-şekil parametresi n, model için çok hasas bir değer değildir ve 1.5 sabit sayısal değeri alınabilir.

Eksenel gerilme-birim şekil değiştirme modeli, aynı zamanda betondaki genişlemeye de bağlı olarak:

$$f_c = \frac{(E_{1r} - E_{2r})\varepsilon_r}{\left[1 + \left(\frac{(E_{1r} - E_{2r})\varepsilon_r}{f_{or}}\right)^{n_r}\right]^{\frac{1}{n^r}}} + E_{2r}\varepsilon_r \tag{4.71}$$

ile ifade edilir.

Gerilme şekildeğiştirme eğrisinde ilk eğim, E_{1r}, Ahmad, (1981)'in sunduğu bağıntıdan:

$$E_{1r} = \frac{E_1}{\nu} \tag{4.72}$$

bulunabilir. ν, betonda poisson oranı 0.15 ila 0.22 arasında değişiklik gösterir (Chen, 1982). Gerilme şekil değiştirme eğrisinde ikinci eğim E_{2r} ise, yanal şekil değiştirme genişlemesine bağlı olarak, aşağıdaki bağıntıyla:

$$E_{2r} = \frac{E_2}{\mu_u} \tag{4.73}$$

şeklinde bulunur:

$$\mu_u = -0.187 Ln\left(\frac{2E_j t_j}{f'_c D}\right) + 0.881 \tag{4.74}$$

$$n_r = \frac{n}{\mu_u} \tag{4.75}$$

$$f_{or} = 0.636 f'_c + 0.233 f_r + 4.561 \tag{4.76}$$

$$f_r = \frac{2 f_j t_j}{D} \tag{4.77}$$

$$\varepsilon_{ru} = \frac{f'_{cu} - f_{or}}{E_{2r}} \tag{4.78}$$

$$\mu_u = -0.187 \ln\left(\frac{2E_j t_j}{f'_c D}\right) + 0.881 \tag{4.79}$$

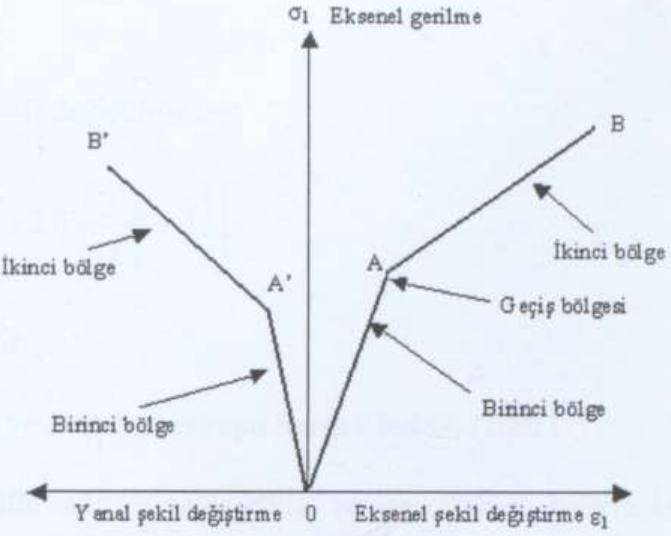
Analitik model, FRP kompozit sargılı kolonlarla yapılmış (Mirmiran, 1996, Picher, 1995, Nanni ve Bradford, 1995, Mastrapa, 1997) deneyler ile karşılaştırıldığında iyi bir korelasyon elde edilmiştir.

4.3.3 Saafi, Toutanji ve Li Sargı Modeli (1999)

Deneysel sonuçlar neticesinde, sargılı beton dayanımını hesaplayabilmek için çoğu araştırmacı Richart (1928)'ın öne sürdüğü bağıntıyı kullanmaktadırlar:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_l \tag{4.80}$$

Bu bağıntı, sargılı betonda dayanımı bulabilmek içindir. Ancak bu bağıntı, gerilme şekil değiştirme eğrisinde, her şekil değiştirme için, eksenel basınç dayanımını gösterememektedir.



Şekil 4.12 FRP sargılı beton için gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

FRP tüp sargılı numune için, gerilme şekil değiştirme davranışı şekil 4.12 görüldüğü gibidir. Sağ kısımdaki gerilme şekildeğiştirme eğrisi eksenel doğrultuya aittir. Sol kısımdaki eğri ise, sargı yanal genişlemesine ait gerilme şekildeğiştirme eğrisidir. Etkili sargı katsayısı k_1, sargı basıncına bağlı bir değişkendir.

$$k_1 = 2.2\left(\frac{\sigma_3}{f'_c}\right)^{-0.16} \tag{4.81}$$

4.79, 4.80'de yerine konulursa, ikinci bölgede her bir noktada basınç gerilmesi bulunur:

$$\sigma_3 = \frac{2t_{com}E_{com}\varepsilon_l}{d} \tag{4.82}$$

$$f(\varepsilon_l) = f'_c\left(1 + 2.2\left(\frac{\sigma_3}{f'_c}\right)^{0.84}\right) \tag{4.83}$$

$$f'_{cc} = f'_c\left(1 + 2.2\left(\frac{2tf_{com}}{df'_c}\right)^{0.84}\right) \tag{4.84}$$

İkinci bölgedeki her bir noktada birim şekil değiştirme:

$$\varepsilon = \varepsilon_{co}\left[1 + k_2\left(\frac{f(\varepsilon_l)}{f'_c} - 1\right)\right] \tag{4.85}$$

bağıntısıyla hesaplanabilir; k_2, etkili sargı katsayısı:

$$k_2 = 537\varepsilon_1 + 2.6 \tag{4.86}$$

Maksimum eksenel şekil değiştirme ise:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left(1 + (537\varepsilon_{com} + 2.6)\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right) \tag{4.87}$$

bağıntısı ile bulunabilir.

4.3.4 Yung C. Wang ve Jose I. Restrepo Sargı Modeli, (2001)

Mevcut sargı modellerinde çoğunlukla sargı etkileri birbirinden bağımsız olarak incelenirken, Yung vd. sargı modelinde, enine donatı sargı etkisi ve FRP sargı etkisi birlikte dikkate almıştır *(dual confinement* effect). Yung, Wang ve Restrepo (2001), yaptıkları çalışmada, FRP sargılı dikdörtgen ve kare kesitli betonarme basınç elemanlarını eksenel yükler altında incelemişlerdir. Deneylerinde 3 adet dikdörtgen ve 3 adet kare kolon numune kullanmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçlardan FRP sargısının boyuna donatıların burkulmalarını önlediğini görmüşler ve bu deneylerden elde ettikleri sonuçları temel alarak bir analitik bir model öne sürmüşlerdir. Betonarme kolon için eksenel kolon yükü P olarak verilmiştir.

$$P = P_c + P_s \tag{4.88}$$

P_c, beton tarafından taşınan eksenel basınç yükü,P_s, kolondaki boyuna donatı tarafından taşınan eksenel basınç yükü,

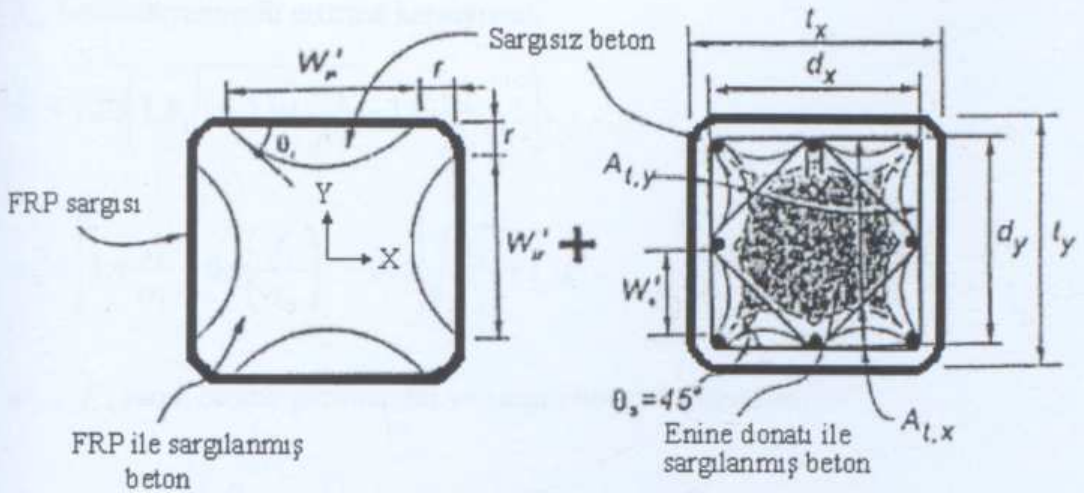
$$P_s = f_s A_s \tag{4.89}$$

şeklinde bulunmaktadır. Bu bağıntıda f_s boyuna donatıdaki basınç gerilmesidir, A_s, boyuna donatının enkesit alanıdır.

$$P_c = P_{co} + P_{cc,j} + P_{cc,js} \tag{4.90}$$

P_{co}, sargısız beton tarafından taşınan eksenel yük, $P_{cc,j}$, FRP sargı ile sarılmış, etkili kolon alanının taşıdığı eksenel basınç yükü, $P_{cc,js}$, FRP sargıya ve etriyeye bağlı olarak betonun taşıyabileceği eksenel basınç yükü olmak üzere (4.90) tekrar aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_c = f_{co}A_{cu} + f_{cc,j}A_{cj} + f_{cc,js}A_{cjs} \tag{4.91}$$



Şekil 4.13 Dörtgen kolonda FRP sargı ve enine donatı ile çift sargı etkisi

$A_{cu} = A_{cc,j} - A_{e,j}$, A_{cu}: sargısız beton enkesit alanını

(4.92)

$A_{cj} = A_{e,j} - A_{e,s}$, A_{cj} :FRP tabakası ile sarılmış etkili beton kesit alanını (4.93)

$A_{cjs} = A_{e,s}$, A_{cjs} hem FRP tabakası ile hem enine donatı ile sarılmış etkili beton kesit alanını

(4.94)

$A_{ccj} = t_x t_y - A_s - (4r^2 - \pi r^2)$, A_{ccj}: FRP tabakası ile sarılmış beton çekirdeği alanını

(4.95)

$$A_{e,j} = t_x t_y - \frac{w'^2_{jx} + w'^2_{jy}}{3} \tan\theta_j - A_s - (4r^2 - \pi r^2), \tag{4.96}$$

$A_{e,j}$, FRP kompozit ile sarılmış etkili beton kesit alanını,

$$A_{e,s} = \left(d_x d_y - \sum \frac{w'^2_s}{6} \right) \left(1 - 0.5 \frac{s'}{d_x} \right) \left(1 - 0.5 \frac{s'}{d_y} \right), \tag{4.97}$$

$A_{e,s}$, enine donatı ile sarılmış etkili beton kesit alanını,

$$f'_{cc} = k_c f'_c, \tag{4.98}$$

f'_{cc}, sargılı beton basınç dayanımını,

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 \tag{4.99}$$

k_c, beton dayanımını artırma katsayısını,

$$\alpha_1 = 1.25\left(1.8\sqrt{1+7.94\frac{\sigma_3}{f'_c}} - 1.6\frac{\sigma_3}{f'_c} - 1\right), \tag{4.100}$$

$$\alpha_2 = \left[1.4\frac{f_l}{\sigma_3} - 0.6\left(\frac{f_l}{\sigma_3}\right)^2 - 0.8\right]\sqrt{\frac{\sigma_3}{f'_c}} + 1 \ , \tag{4.101}$$

σ_3 , f_l, yanal basınç gerilmesini ve sargılı beton dayanımını

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1 + R\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right] \tag{4.102}$$

gösterir.

4.3.5 Lam ve Teng Sargı Modeli (2003)

Lam ve Teng'in FRP sargılı beton modeli, çok sayıda deney verilerin değerlendirmesini dikkate alır. Model aşağıdaki kabullere dayanır:

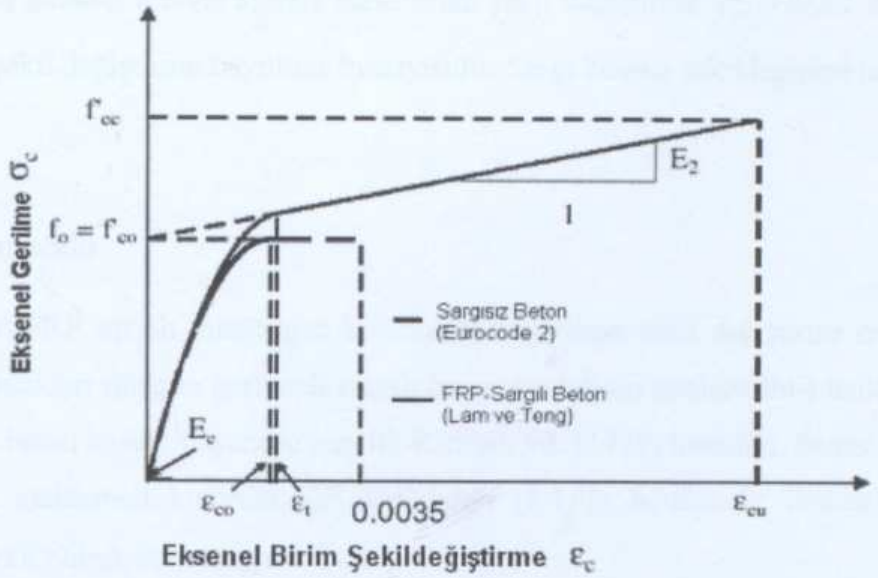
i) Gerilme-yerdeğiştirme eğrisindeki parabol ve doğrusal çizgi, Şekil 4.14'de verildiği gibidir;

ii) Parabolün ilk eğimi, sargısız betonun elastisite modülüyle aynı değeri taşır;

iii) İlk bölümdeki doğrusal olmayan kısım FRP sargı etkisinden ileri gelir;

iv) Parabolik olan ilk kısım, doğrusal olan ikinci kısımla teğet birleşir (bir başka deyişle, iki kısmın birleştiği yerdeki eğimler pratik olarak aynıdır;

v) Doğrusal olan ikinci kısım, sargılı betonun ulaştığı maksimum şekil değiştirme ε_{cu} ve dayanım kapasitesi f'_{cc} ile sona erer. Bu kabullere göre yapılan FRP sargı modeli Şekil 4.14'de açıklanmıştır.



Şekil 4.14 FRP sargılı betonda Lam ve Teng Modeli

Sonuç olarak, Lam ve Teng gerilme-birim şekildeğiştirme modelinde gerilme;

$$\sigma_c = \begin{pmatrix} E_c\varepsilon_c - \dfrac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}}\varepsilon_c^2 \\ f'_{co} + E_2\varepsilon_c \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} (0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_t) \\ (\varepsilon_t \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{cu}) \end{matrix} \tag{4.103}$$

E_c, sargısız betonda elastisite modülü, ε_t, geçiş noktasında eksenel şekil değiştirme, E_2, ikinci kısımdaki doğrunun eğimidir.

$$\varepsilon_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \tag{4.104}$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{cu}} \tag{4.105}$$

Bu modelde, basınç dayanımı,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + k_1\frac{\sigma'_3}{f'_c} \tag{4.106}$$

denklemiyle bulunmaktadır. Sargılı betonda eksenel şekil değiştirme, aşağıdaki bağıntıyla verilmiştir;

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + k_2\frac{\sigma_3}{f'_c}\left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}\right)^{0.45} \tag{4.107}$$

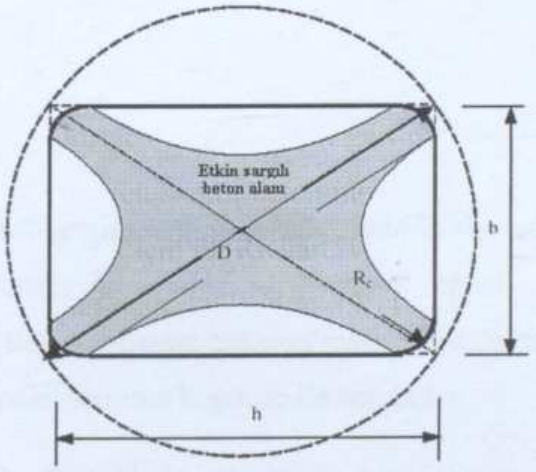
Sargısız betonda eksenel kuvvet altında maksimum şekil değiştirme $\varepsilon_{co} = 0.002$ olarak kabul edilmiştir. k_2, şekil değiştirme büyültme katsayısıdır. Sargı kopma şekildeğişimi ise;

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \tag{4.108}$$

bağıntısıyla bulunabilir.

Lam ve Teng'in FRP sargılı dikdörtgen kolonlar için gerilme şekil değiştirme modeli, daha önce sunmuş oldukları düzgün gerilmeli sargılı beton modelinin genişletilmiş halidir. Lam ve Teng'in, sargılı beton basınç dayanımı için ilk Richart, vd. (1929) önerdiği, Samaan'ın (1998) FRP kompozit malzemeli kolonlar için kullandığı (3.1)'in benzeridir. Ancak, kesit etki katsayısı k_{s1} farklı olarak sunulmuştur:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + k_1 k_{s1} \frac{\sigma_3}{f'_c} \tag{4.109}$$



Şekil 4.15 FRP Sargılı dikdörtgen kesit için etkili sargılanmış beton alanı

Eksenel şekil değiştirme değerinin bulunmasında ise, farklı bir kesit etki katsayısı, k_{s2}, kullanılmaktadır. Dikdörtgen kesitli kolonlarda, etkili sargılanmış beton alanı için kolon enkesiti düşünüldüğünde, boyuna donatı aralarında yaklaşık bir parobol oluşacak şekilde kemer olduğu, sonlu elemanlar yöntemiyle kanıtlanmıştır. Varolan tüm sargı modellerinde, etkili sargılı beton enkesit alanı, şekilde de görüldüğü üzere; köşelerden 45° lik açıyla parabol yaptığı görülür. Ancak bu açı değeri, dikdörtgen kesitli kolonlar için geçersizdir. Açı eğimi ancak kare kesitlerde "1" değerini alırken, dikdörtgen kesitlerde farklıdır. Bu yüzden, etkili sargılı beton enkesit oranı için, A_e / A_c ;

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1-((b/h)(h-2R_c)^2 + (h/b)(b-2R_c)^2/(3A_g)) - \rho_{sc}}{1-\rho_{sc}} \tag{4.110}$$

bağıntısını sunmuşlardır.

Bu araştırmalardaki deney numunelerinde, boyuna doğrultuda çelik donatı kullanılmış, sargı etkisi yalnızca FRP sarılarak oluşturulmuştur.

4.3.6 Xiao ve Wu Sargı Modeli (2000)

Deneysel parametreler, beton basınç dayanımı ve kompozit sargı kalınlığından oluşmaktadır. 152 mm çapında, 305 mm yüksekliğinde toplam 36 beton silindir üretilmiş ve eksenel basınç altında test edilmiştir. Düşük, orta ve yüksek dayanımda üç ayrı kalite beton kullanılmıştır. Beton malzemesinin özellikleri yanında, sargı uygulanmış betona etki eden iki faktörün daha; sargı modülü C_j, sargı dayanımı f_{ru} kullanılmıştır.

$$C_j = \frac{2t}{D} E_j \tag{4.111}$$

$$f_{ru} = \frac{2t}{D} f_{ju} \tag{4.112}$$

Deneysel sonuçlardan, eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme davranışının yaklaşık bilineer olduğu görülmüştür. Eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, önce sargısız beton davranışındaki gibi doğrusal ilerler, sargısız betonun maksimum dayanıma ulaşmasıyla eğride yumuşama olur ve FRP kompozit sargının kopması ile son bulur.

Sargılanmış beton mekanik özelliklerinden, basit bir bilineer eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme modeli sunulmuştur:

$$f_{cz} = E_c \varepsilon_{cz} + 2\nu_c f_r \tag{4.113}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\nu_c}{1 + \frac{c_j}{E_c}(1-\nu_c-2\nu_c^2)^2} \varepsilon_{cz} \tag{4.114}$$

$$f_r = C_j \varepsilon_r \tag{4.115}$$

$$E_c = 4733\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \tag{4.116}$$

ν_c, beton poisson oranı, 0.18 alınmıştır.

ε_r, betonda, çap doğrultusunda yanal birim şekil değiştirme,

f_r, sargı mukavemeti.

$$f_{cz} = \alpha f'_c + k f_r \tag{4.117}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_{ro} + \nu'_c \varepsilon_{cz} \tag{4.118}$$

α, deneysel değerlerden elde edilen sonuçlara göre 1.1 alınmaktadır.

k, son bölgedeki doğrusal çizgi eğimidir. Temelde regresyon analizi esas alınarak:

$$k = 4.1 - 0.75\frac{f'^2_c}{C_j} \tag{4.119}$$

$$\nu'_c = 7\left(\frac{f'_c}{C_j}\right)^{0.8} \tag{4.120}$$

bulunmuştur.

Bu modelde etkili sargı katsayısı, sargı modülü parametreleri ile FRP kompozit sargı dayanımı belirlenir. Sargılı betonda, beton dayanımı gibi malzeme özelliklerinin yanında, sargı modülü C_j, hesaplamalarda başta gelen parametredir. Sargılı betonda basınç dayanımı, FRP kompozit malzmesinin kopma şekildeğiştirme noktasına ulaşıncaya dek artar ve en yüksek dayanım kapasitesine ulaşır.

4.3.7 Köksal Modeli (2006) ve Köksal Modelinin LP Sargılı Betonarme Kolonlara Uygulanması

Bu çalışmada çelik sargılı betonarme kolonlar için önerilen Köksal Modeli (2006), KLP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

Gerçekte, sargılanmış betonun davranışı çok karmaşık ve bir çok faktöre bağlıdır. Çok eksenli gerilmeler altında beton dayanımı; çekme, basınç ve kesme gerilmelerinin birbirinden bağımsız olarak dikkate alınması ile ifade edilemez.

Betonda kırılma yükü, elemanın ya da deney numunesinin yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanır. Beton için önerilen kırılma kriterlerinde, akma, kırılma başlangıcı, yük taşıma

kapasitesi ve en büyük birim şekildeğiştirmeler dikkate alınmaktadır.

Betonarme kolonda enine donatı; eksenel basıç yükü altında yanal sargı etkisi oluşturur ve üç eksenli basınç gerilmeleri altında elemanın dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini artırır.

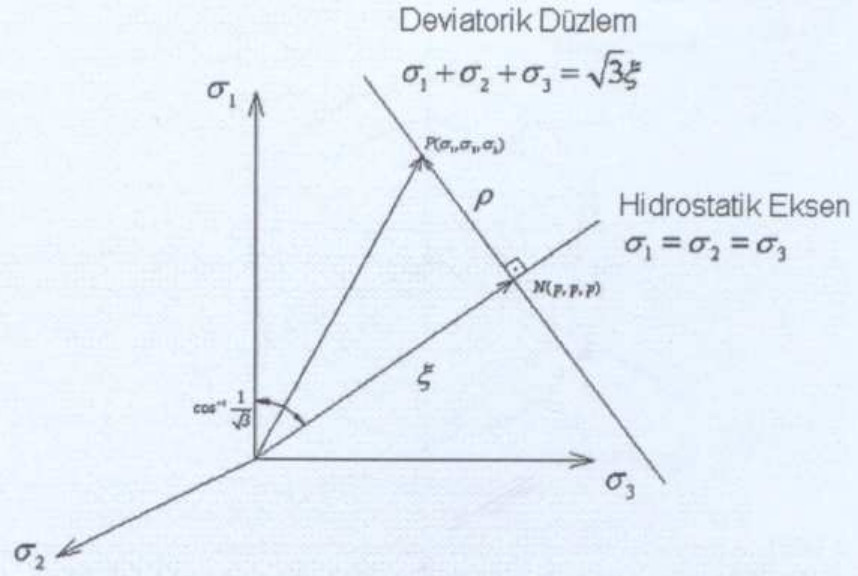
Sargılanmış betonarme eleman davranış modellerinde; bir boyutlu çubuk eleman için çubuk eksenine dik etkiyen yanal genişlemeyi engelleyen sargı tarafından oluşturulan basınç gerilmeleri dikkate alınır. Mander modeli (1988), taşıma gücü değerini belirliyebilmek için Haigh-Westergaard gerilme uzayında üç asal gerilme koordinatını alan William and Warnke (1975)'nin "eliptik kırılma fonksiyonu"nu kullanır (Şekil 4.16). William-Warnke (1975) tarafından geliştirilen beş parametreli model, eksenel olmayan basınç, eksenel olmayan çekme, eşit iki eksenli basınç ve çekme ile basınç meridyeni üzerindeki iki yüksek basınç gerilme noktalarının koordinatlarının bilinmesini gerektirir. Bu beş parametreden sadece basınç dayanımı deneysel olarak nispeten kolayca elde edilebilir. Eksenel çekme dayanımı için bile hassas deneyler yapılması gerekmektedir (Philips, 1993).

Beton için geliştirilen en karmaşık ve en fazla sayıda parametreye ihtiyaç duyan modelde betonun çekme ve basınç meridyenleri ikinci dereceden bir bağıntı ile ifade edilmektedir; bu parabol bağıntılar:

$$\sigma_m = a_0 + a_1 \rho_t + a_2 \rho_t^2 \tag{4.121}$$

$$\sigma_m = b_0 + b_1 \rho_c + b_2 \rho_c^2 \tag{4.122}$$

şeklindedir. Bu bağıntılarda $\sigma_m = \frac{I_1}{3}$ ortalama gerilme değerini, ρ_t ve ρ_c ise $\theta = 0°$ ile $\theta = 90°$'de hidrostatik eksene dik olarak bulunan deviatorik gerilmeleri göstermektedir. a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 ve b_2 malzeme sabitleridir. İki meridyen hidrostatik eksen üzerinde aynı noktada kesiştikleri için $a_0 = b_0$ alınabilir. Diğer beş parametre tek eksenli çekme, tek eksenli basınç, iki eksenli basınç, sargılanmış iki eksenli basınç ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) ve ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) deneyleri ile bulunabilir. Bu ise modelin uygulanabilirliğini güçleştirmektedir.



Şekil 4.16 Haigh-Westergaard asal gerilme uzayı

Çoğu model sayısal olarak karmaşık ve ihtiyaç duydukları malzeme parametreleri açısından gerçekçi değildir.

Gerilme kriterinin en pratik matematiksel formu; Von Mises kriterinin basit bir modifikasyonu olarak sunulan, metal ve granüler malzemelere uygulanabilen, en yüksek dayanımda hem hidrostatik basınç, hem deviatorik gerilme etkilerini dikkate alan Drucker Prager kriteridir.

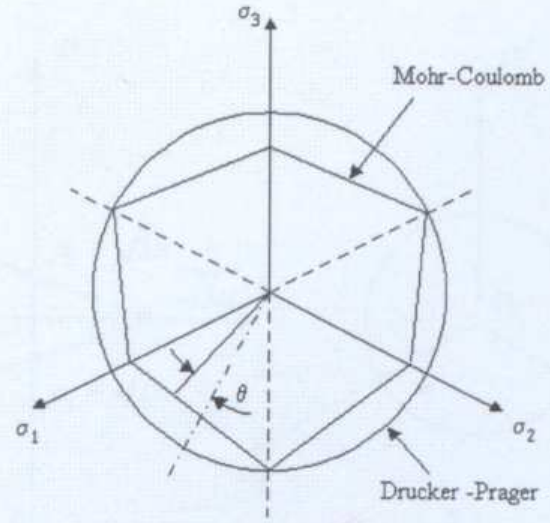
Drucker-Prager kriteri (1952), gerilmeyi temel alan bir hipotezdir ve Von Mises kriterinin basitleştirilmiş genel formu olduğu söylenebilir:

$$f(I_1,J_2)=\alpha I_1+\sqrt{J_2}-k=0 \tag{4.123}$$

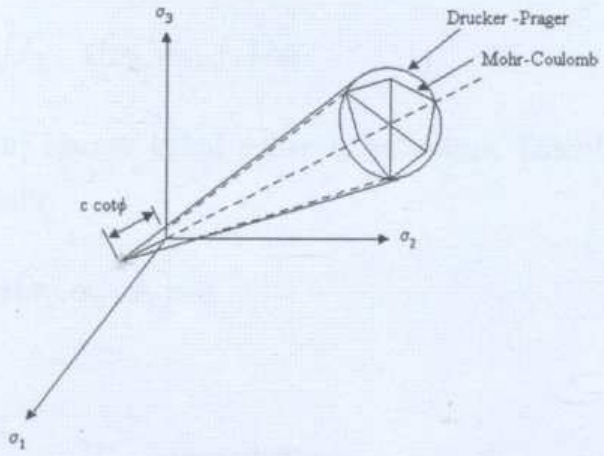
veya ξ,ρ değişkenleri cinsinden,

$$f(\xi,\rho)=\sqrt{6}\alpha\xi+\rho-\sqrt{2}k=0 \tag{4.124}$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada α ve k malzeme sabitleridir. (4.124)'ün gösterdiği akma yüzeyi asal gerilme uzayında bir dairesel konidir (Şekil 4.17 ve Şekil 4.20); meridyenleri ve π -düzlemindeki kesiti Şekil 4.19'da görülmektedir.

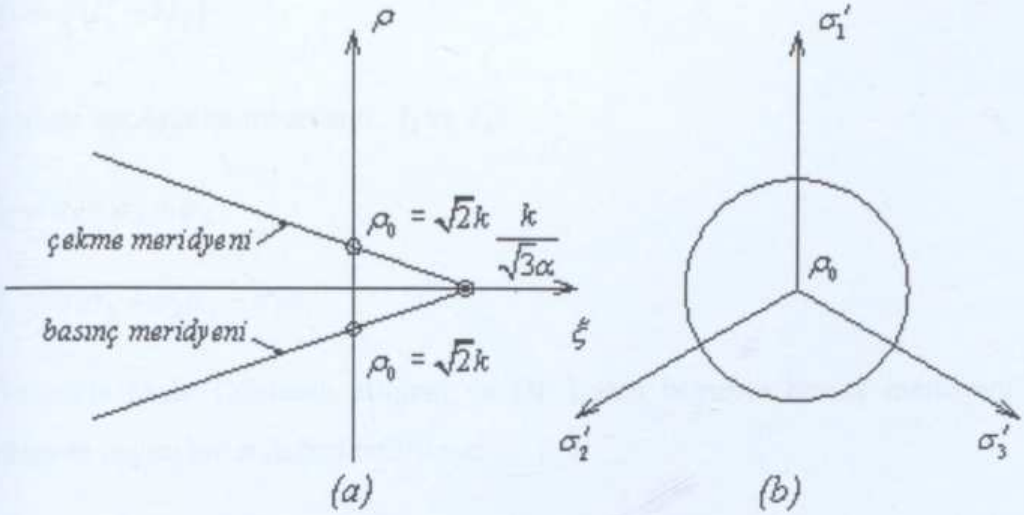


Şekil 4.17 Deviatorik düzlemde basınç durumu akma kriterleri



Şekil 4.18 Asal gerilmeler uzayında basınç durumu için akma kriterleri

Önceki çalışmalarda Drucker Prager kriteri (Karakoç and Köksal 1997, Polat vd., 2000, Köksal vd., 2003, Köksal vd., 2004, Doran 2004), yalın beton numunelere, betonarme kirişlere, yığma duvarlara, perdelere ve kolonlara başarılı bir şekilde tatbik edilmiştir. Hidrostatik basınç ve deviatorik gerilme etkilerini dikkate alan Drucker Prager kriteri, doğrusal olmayan beton davranışında gerçeğe yakın sonuç elde edilebilmesi için α ve k malzeme parametreleri Köksal Modeli (2006)'inde asal gerilmelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmişlerdir.

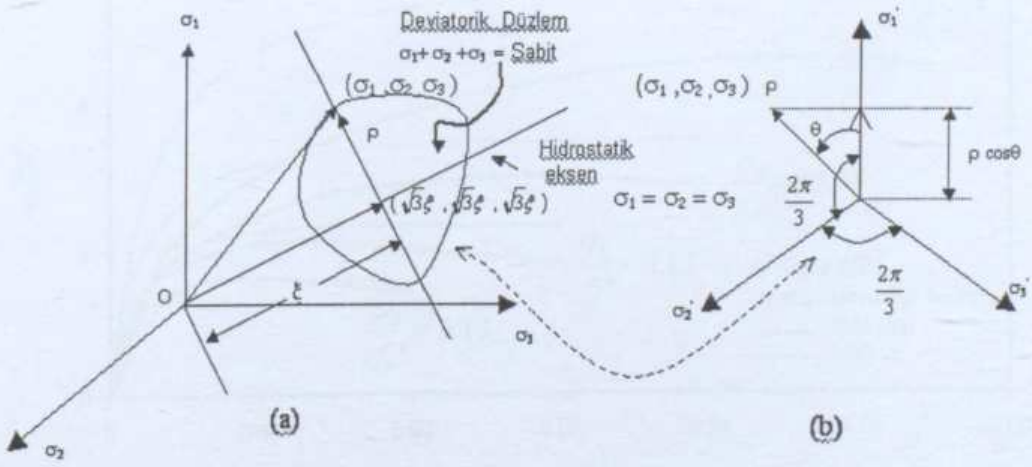


Şekil 4.19 Drucker-Prager kriteri: (a) Meridyenler (θ=0°), (b) π-düzlemi (Chen ve Han, 1988)

$$f = \alpha(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)I_1 + \sqrt{J_2} - k(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3) = 0 \tag{4.125}$$

Basınç gerilmeleri pozitif işaretli kabul edilerek, betonarme kolonlar için, kırılma yüzeyi farklı bir şekilde önerilebilir:

$$f = \sqrt{6}\,\alpha(\xi)\xi + \rho - \sqrt{2}\,k(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3) = 0 \tag{4.126}$$



Şekil 4.20 (a) Haigh-Westergaard gerilme uzayı, (b) gerilme durumu noktasının deviatorik düzlemde izdüşümü (Chen ve Han 1988).

Burada, $\rho(=\sqrt{2J_2})$ ve $\xi(=\frac{I_1}{\sqrt{3}})$; sırasıyla şekil 4.20'de görüldüğü üzere deviatorik ve hidrostatik uzunluktur. Burada gerilme deviyatörü tansörünün invaryantı, J_2 :

$$J_2 = \frac{1}{3}\left(I_1^2 - 3I_2\right) \tag{4.127}$$

gerilme tansörünün invaryantı, I_1 ve I_2:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{4.128}$$

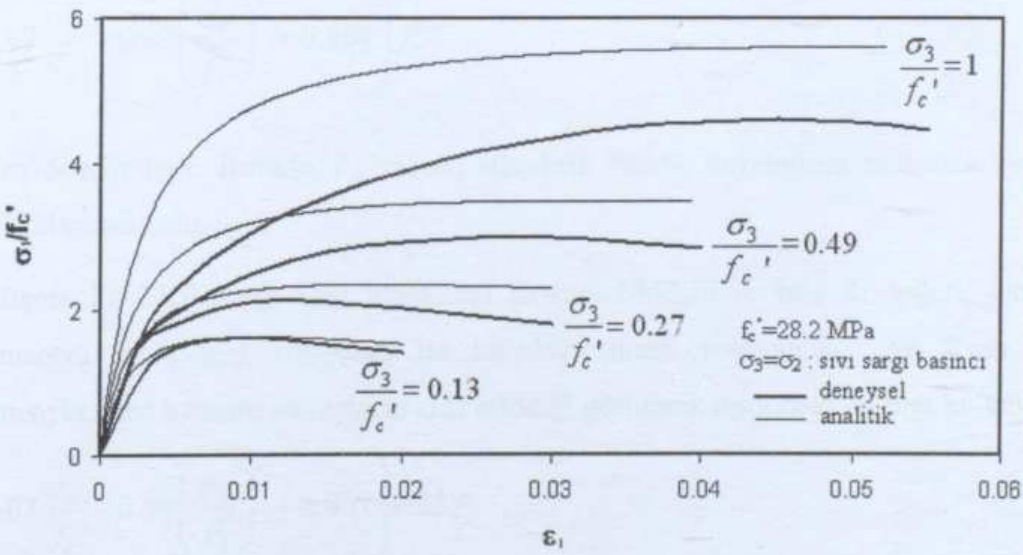
$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \tag{4.129}$$

Öncelikle Mohr Coulomb altıgeni ve DP konisi boyunca basınç meridyeni $\theta = 60^\circ$ için yüzeyde uygun bir α değeri belirlenir:

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}\left(3 - \sin\phi\right)} \tag{4.130}$$

$$k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}\left(3 - \sin\phi\right)} \tag{4.131}$$

İçsel sürtünme açısı, ϕ, ortalama olarak 30° alınırsa (Lubliner vd,. 1989, Karakoç ve Köksal 1997, Polat vd., 2001) α, 0.23. olarak bulunur. α, sabit değerini belirledikten sonra, Richart vd., (1928) deney sonuçları kullanılarak, Şekil 4.21'de görüldüğü



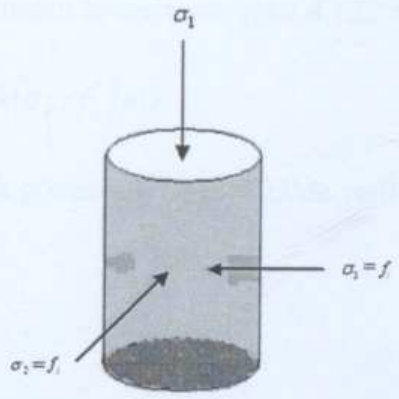
Şekil 4.21 Üç eksenli testler için eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Köksal, 2006)

üzere, k ,yanal sargı basıncı fonksiyonuna ve f'_c, silindir basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanır:

$$k = k\left(\sigma_{lt}, f_c^{'}\right) \tag{4.132}$$

σ_{lt}, eleman eksenine, iki ortogonal yönde etki eden, iki gerilmenin ortalamasıdır.

$$\sigma_{lt} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \qquad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \tag{4.133}$$



Şekil 4.22 Üç eksenli basınç gerilmesine maruz beton silindir

Köksal Modelinde, Richart vd., (1928) üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarından hareketle betonarme kolonlar da k, değeri için

$$k = \left(4.07\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}} - 0.89\left(\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}}\right)^2 + 0.807\right) f_c^{'} \tag{4.134}$$

bağıntısı önerilmiştir. Burada k, sadece silindirik basınç dayanımını malzeme parametresi olarak kullanmaktadır.

Bu çalışma ile FRP sargı için uyarlanan Köksal Modelinde ise; k değeri, yirmi farklı araştırmacıya ait deney sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda ve k'nın ***0.85*** ile çarpılmısıyla daha uyumlu sonuçların elde edildiği görülerek aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$k = \left(4.07\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}} - 0.89\left(\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}}\right)^2 + 0.807\right) 0.85 f_c^{'} \tag{4.135}$$

Hidrostatik uzunluk cinsinden malzeme parametresi α ise

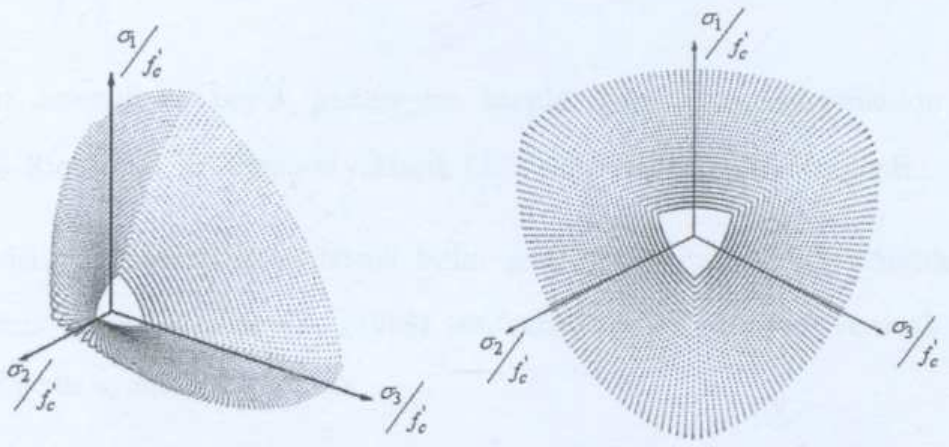
$$\alpha = \alpha(\xi) = 0.462\,\xi^{-0.2355} \qquad \frac{\xi}{f_c^{'}} \geq 0.58 \tag{4.136}$$

şeklinde, sabit 0.23 değeri yerine daha hassas bir bağıntı ile elde edilmektedir.

Deneyler esnasında en yüksek hidrostatik basıncın 20 MPa ve 60 MPa arasında olduğu gerçekleştiği görülmüştür. Basınç altında sargılı beton dayanımı, $\frac{\xi}{f_c'} \geq 0.58$, değeri ile makul bir üst değer oluşturmakla beraber, ortalama basınç gerilmesi, $3\sigma_m = \sqrt{3}\,\xi = f_c'$ dir. Bir önceki sabit değer α için kabul edilen 0.23 değeri, hidrostatik basıncı 20 MPa'dan büyük değerler için uygun olmaktadır. Sunulan kriterin son şekli 4.122'den elde edilmiştir:

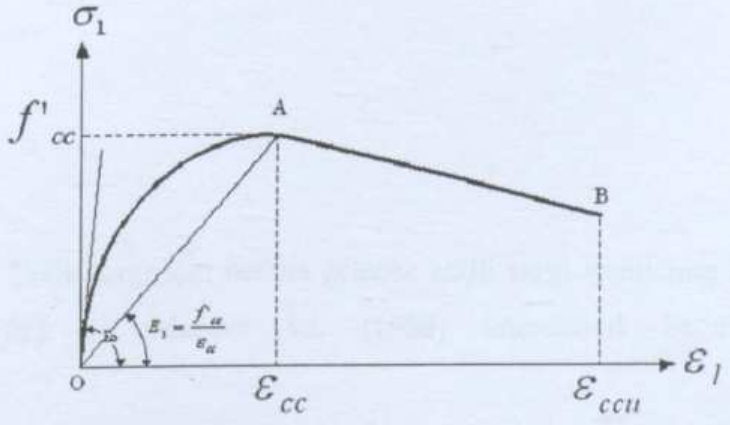
$$f = 1.132\,\xi^{0.7645} + \rho - \sqrt{2}\,k\left(\sigma_{ll}, f_c'\right) = 0 \qquad (4.137)$$

Sunulan kriterin geometrik gösterimi, Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23 Beton kırılma kriterinin gerilme uzayındaki geometrik gösterimi (Köksal, 2006)

Sargılanmış betonun gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Saenz (1964) tarafından tanımlanan bağıntı temel alınarak tanımlanmıştır:



Şekil 4.24 Sargılı beton için gerilme şekildeğiştirme ilişkisi (Saenz, 1964)

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_l E_0}{1+\left(\frac{E_0}{E_s}-2\right)\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}}+\left(\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \tag{4.138}$$

(4.137)'de $E_0 (= 4750\sqrt{f'_c})$; sargılanmış betonun başlangıç elastiklik modülü, E_s ise; sekant modülüdür, ε_{cc} sargılanmış betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirmedir. Sargılanmış beton dayanımı f'_{cc}'ye karşılık gelen birim şekildeğiştirme ε_{cc} (4.139) ile verilmiştir:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_c\left(1+k_2\frac{\sigma_3}{f'_c}\right) \tag{4.139}$$

ε'_c, sargısız betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen şekildeğiştirmesidir (genelde $\varepsilon'_c = 0.002$). Richart vd. k_2 değerinin yaklaşık $5k_1$'e eşit olduğunu göstermişlerdir.

Köksal Modelin'de betondaki en büyük birim şekil değiştirme ε_{cu} için; Priestley (2000) tarafından önerilen ve Mander vd., (1988) tarafından yapılan deneysel verilerden okunan ε_{cu} değerleri ile de uyumluluk gösteren;

$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + 1.4\frac{\rho_s f_{yh}\varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.140}$$

bağıntısı dikkate alınmıştır (Köksal, 2006).

FRP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modelinde ise beton numuneler için en büyük birim şekildeğiştirme, ε_{ccuFRP}:

$$\varepsilon_{ccuFRP} = 2\varepsilon_{ccu} \tag{4.141}$$

olarak önerilmiştir.

Köksal Modelinde, Çelik sargı için betona gelecek etkili sargı basıncının hesabı için Sheikh ve Uzümeri (1982) ve Mander vd. (1988) önerdikleri bağıntı kullanılmıştır.

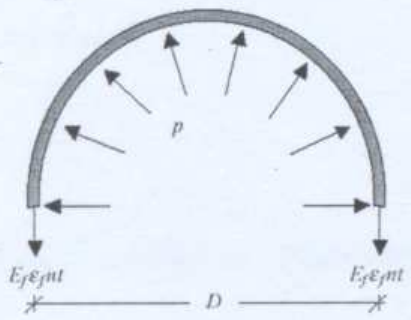
$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i^2}{\alpha_{uc} b_c d_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \tag{4.142}$$

$$\sigma_{l,i} = k_e \rho_i f_{yh} \qquad i = x, y$$
(4.143)

FRP sargılı kolonlara uyarlanan modelde yanal sargı etkisi, sargı donatısı ile FRP sargıdan gelen sargı etkisini beraber dikkate alır.

Yalnızca çelik sargılı kolonlar için önerilen Modelde sargı etkisi: **Sargı donatısı + FRP sargı** olarak uyarlanmıştır. Sargı donatısı Köksal Modelindeki gibi uygulanmış, FRP sargı etkisi ise dörtgen ve dairesel kolonlarda ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Önerilen modelde, LP sargılı dairesel kolonlarda, σ_l, yanal sargı basıncının bulunabilmesi için;



Şekil 4.25 LP kompozit sargıda gerilme

$$\sigma_l = \frac{2E_f \varepsilon_{fu} nt}{D} \tag{4.144}$$

bağıntısı kullanılmıştır. Dörtgen kesitli kolonlarda k_s geometrik kesit katsayısı kullanılmıştır.

$$\sigma_l = k_s \sigma'_l \tag{4.145}$$

σ'_l, LP sargılı dörtgen kolonlar için, eşdeğer dairesel $(=(b+h)/2)$ kolona dönüştürülerek bulunan sargı basıncıdır (Restrepol& De Vino, 1996, Harries vd. 1998, Chaallal& Shahawy, 2000 ve Lam& Teng, 2000). Kesit katsayısı, k_s:

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1-((b/h)(h-2R_c)^2 + (h/b)(b-2R_c)^2/(3A_g)) - \rho_{sc}}{1-\rho_{sc}} \tag{4.146}$$

olarak alınmıştır (Lam& Teng, 2000). FRP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal modeli, literatürde var olan deneyler ile ve kabul görmüş modeller ile karşılaştırılmıştır.

Silindirik basınç dayanımını malzeme parametresi olarak kullanılan Köksal modelinde, malzeme parametresi k'nın 0.85 katsayısı ile çarpılmasıyla, yanal betonarme sargı basıncına ek olarak FRP sargı etkisi ilave edildiğinde ve en büyük birim şekildeğiştirme için; sargılanmış beton dayanımına karşılık gelen birim şekildeğiştirmenin iki katı alınmasıyla, $\varepsilon_{ccu} = 2\varepsilon_{cc}$, FRP sargılı beton veya betonarme numuneler için oldukça uyumlu sonuçların elde edilebildiği görülmüştür.

FRP Sargılı Beton/Betonarme Kolonlar için Uygulanan Köksal Modeli özetlenirse;

FRP sargılı kolonlar için uygulan Köksal Modelin'de, kuşatılmış beton basınç dayanımı, σ_1 için, *Drucker-Prager* kriterinin değiştirilerek daha genel bir hale geliştirilmiş biçimi kullanılmıştır.

$$f = \sqrt{6}\,\alpha(\xi)\xi + \rho - \sqrt{2}\,k(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3) = 0 \tag{4.147}$$

$\rho(=\sqrt{2J_2})$ ve $\xi(=\frac{I_1}{\sqrt{3}})$,

sırasıyla deviatorik ve hidrostatik uzunluktur. Hidrostatik uzunluk cinsinden malzeme parametresi α :

$$\alpha = \alpha(\xi) = 0.462\,\xi^{-0.2355} \qquad \frac{\xi}{f_c'} \geq 0.58 \tag{4.148}$$

Gerilme tansörünün invaryantı, I_1 ve I_2:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{4.149}$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \tag{4.150}$$

Gerilme deviyatör tansörünün ikinci invaryantı:

$$J_2 = \frac{1}{3}\left(I_1^2 - 3I_2\right) \tag{4.151}$$

k,Yanal sargı basıncı fonksiyonuna ve f'_c, silindir basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanmıştır:

$$k = k\left(\sigma_{lt}, f_c^{'}\right) \tag{4.152}$$

σ_{lt}, eleman eksenine, iki ortogonal yönde etki eden iki basınç gerilmenin ortalamasıdır.

$$\sigma_{lt} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \qquad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \tag{4.153}$$

Silindirik basınç dayanımı malzeme parametresi olarak kullanılan k, yukarıda açıklandığı üzere:

$$k = \left(4.07\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}} - 0.89\left(\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}}\right)^2 + 0.807\right)0.85 f_c^{'} \tag{4.154}$$

bağıntısıyla dikkate alınmıştır. Yanal sargı basıncı, σ_{lt} , **Sargı donatısı + FRP sargı** etkisini birlikte gözetir.

$$\sigma_{lt} = \frac{2E_f \varepsilon_{fu} nt}{D}, \qquad \sigma_{lt} = k_s \sigma'_l \tag{4.155}$$

Kesit katsayısı, k_s:

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - ((b/h)(h-2R_c)^2 + (h/b)(b-2R_c)^2/(3A_g)) - \rho_{sc}}{1-\rho_{sc}} \tag{4.156}$$

Çelik sargıdan betona gelecek etkili sargı basıncı:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i^2}{\alpha_{uc} b_c d_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1-\rho_{cc})} \tag{4.157}$$

$$\sigma_{l,i} = k_e \rho_i f_{yh} \qquad i = x, y \tag{4.158}$$

dır. Gerilme-şekildeğiştirme eğrisi için Saenz Denklemi (1964) modele uyarlanmıştır:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_l E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2\right)\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}} + \left(\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \tag{4.159}$$

$E_0 (= 4750\sqrt{f'_c})$; sargılanmış betonun başlangıç elastiklik modülü, E_s ise; sekant modülüdür, ε_{cc} sargılanmış betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirmedir. Sargılanmış beton dayanımı f'_{cc}'ye karşılık gelen birim şekildeğiştirme ε_{cc} ile verilmiştir:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_c \left(1 + k_2 \frac{\sigma_3}{f'_c}\right) \tag{4.160}$$

$$\varepsilon'_c = 0.002 \tag{4.161}$$

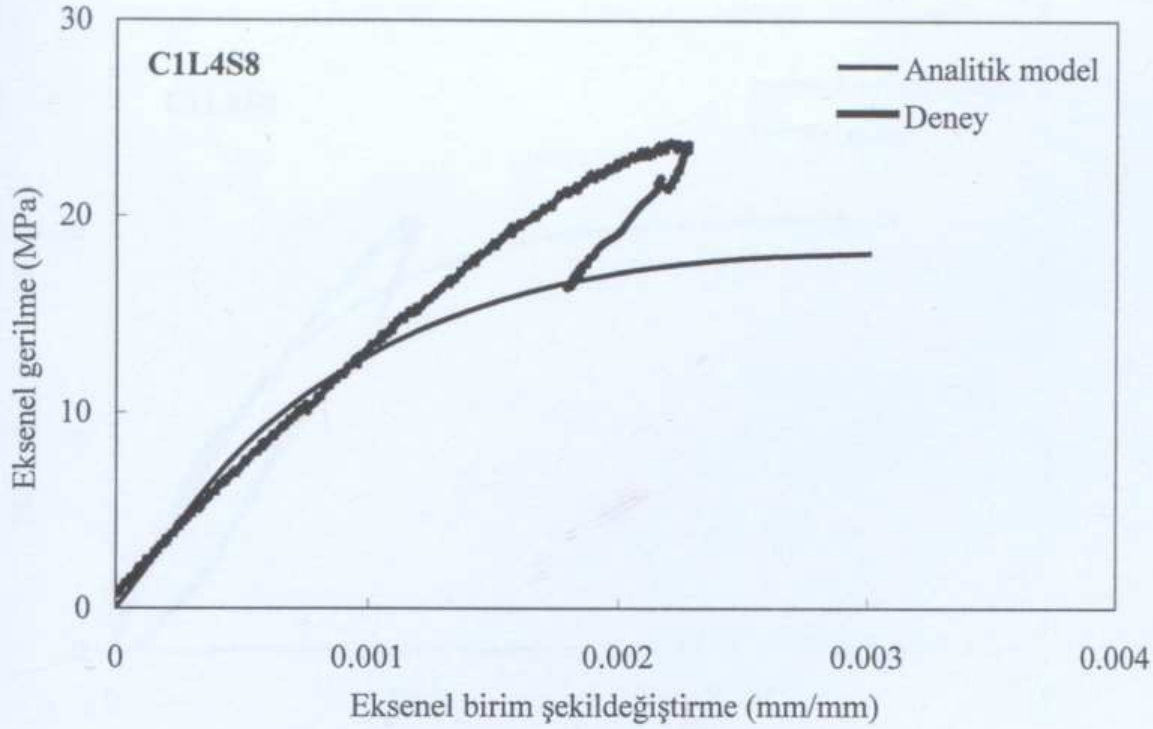
$$k_2 = 5\, k_1 \tag{4.162}$$

FRP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modelinde ise beton numuneler için en büyük birim şekildeğiştirme, ε_{ccuFRP} :

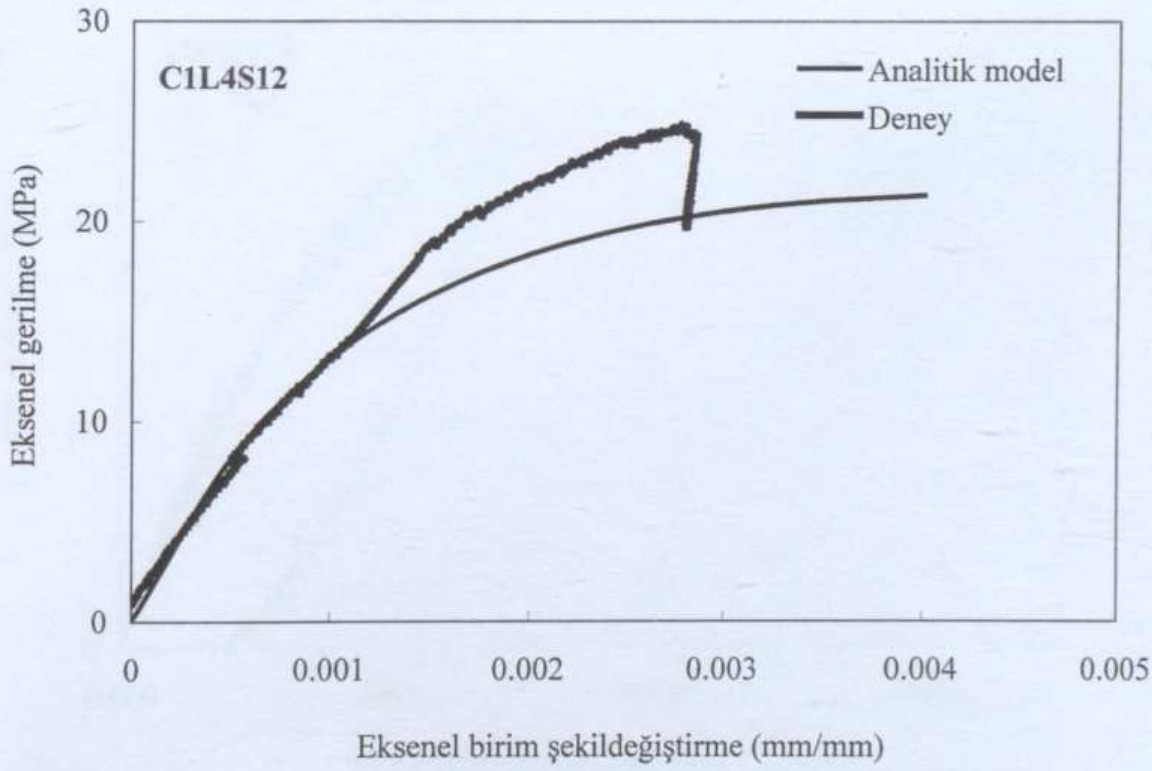
$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + 1.4 \frac{\rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.163}$$

$$\varepsilon_{ccuFRP} = 2\varepsilon_{ccu} \tag{4.164}$$

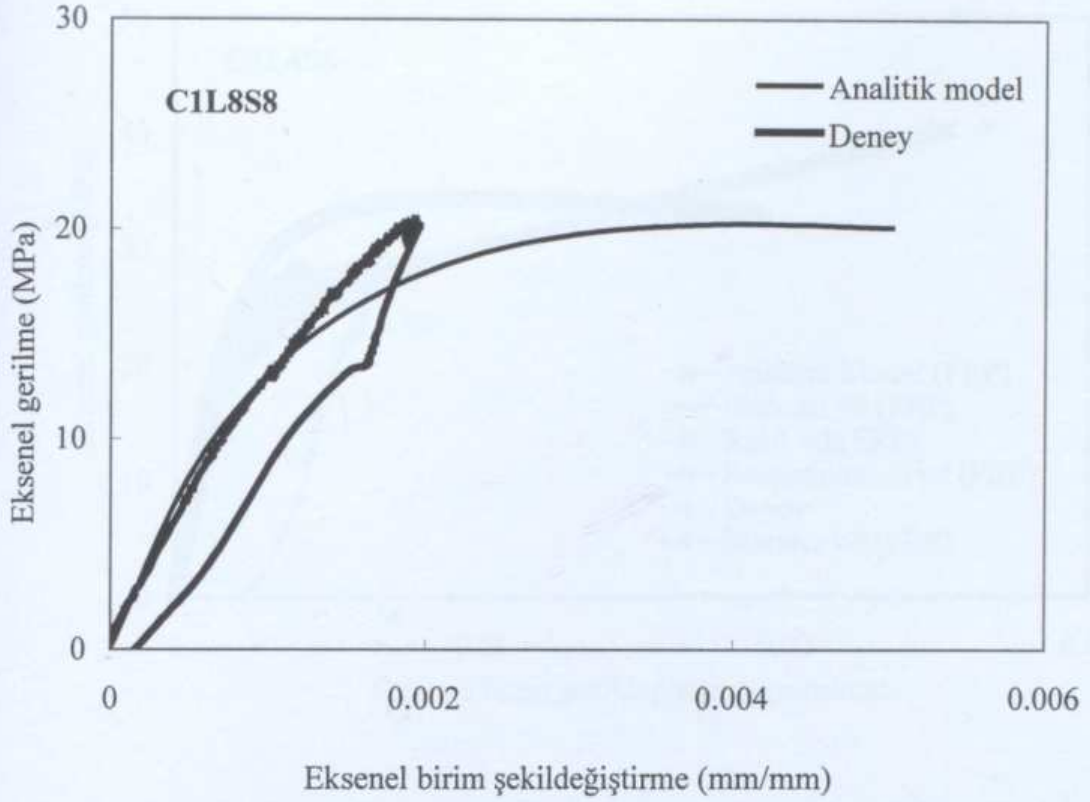
olarak hesaplanmıştır.



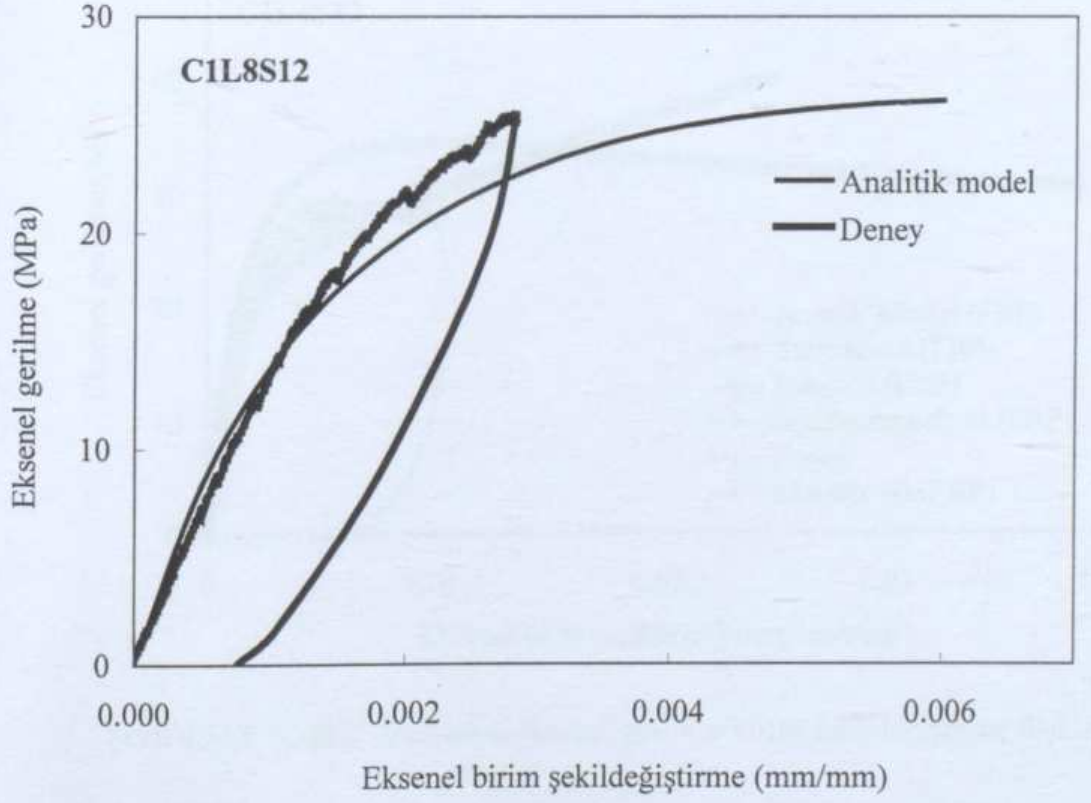
Şekil 4.26 C1L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



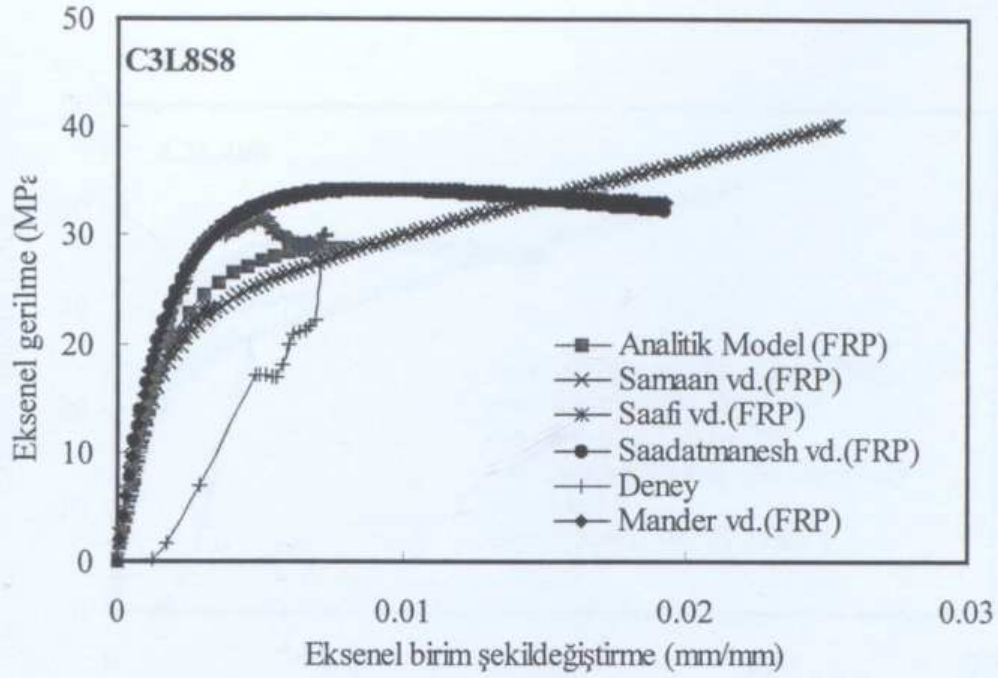
Şekil 4.27 C1L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



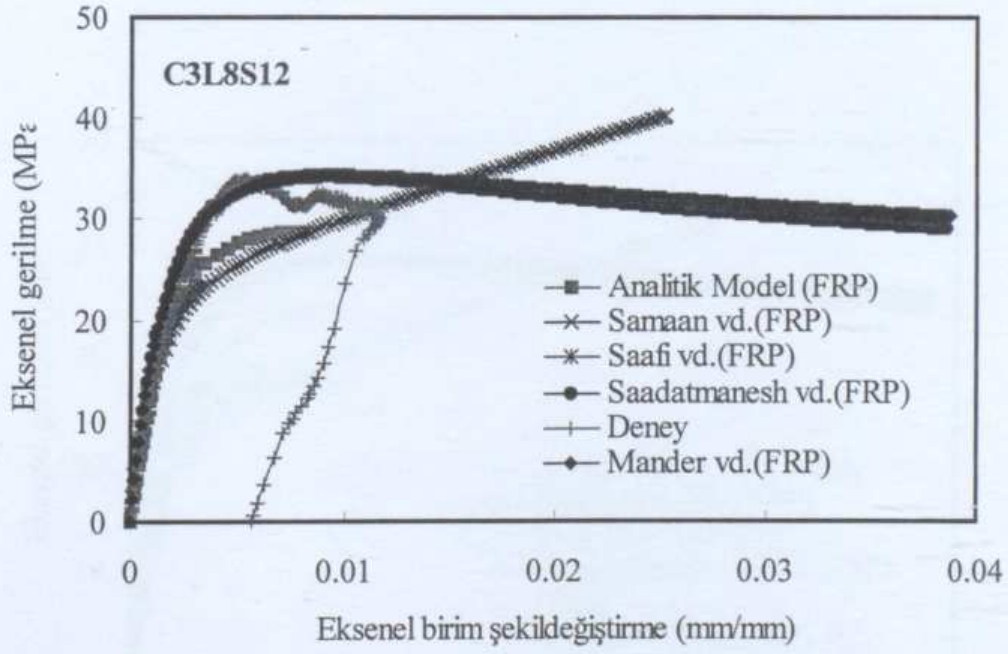
Şekil 4.28 C1L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



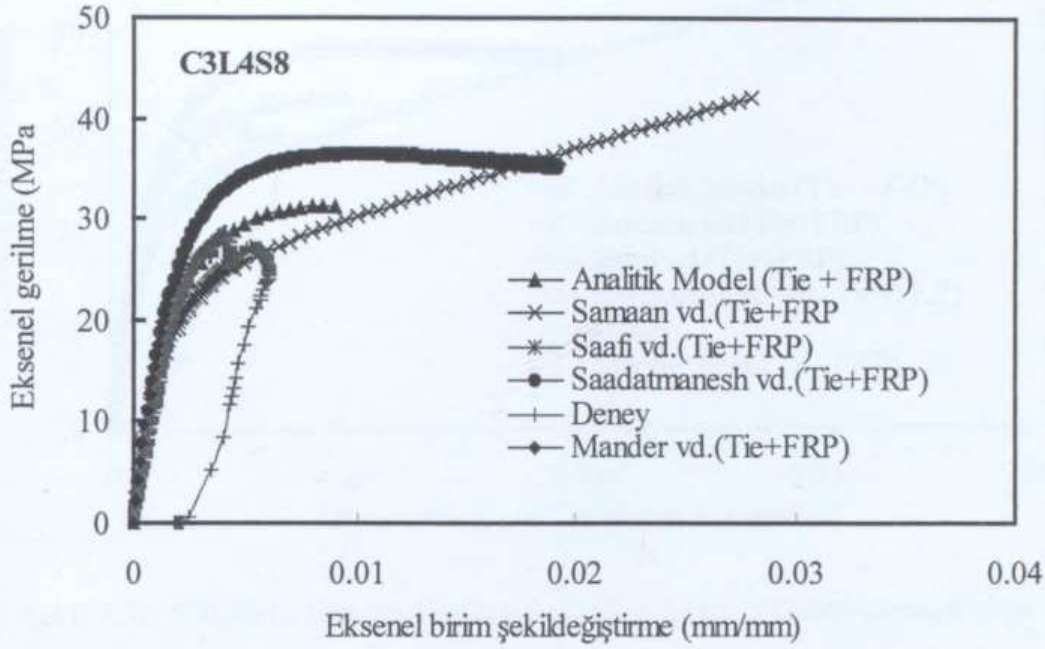
Şekil 4.29 C1L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



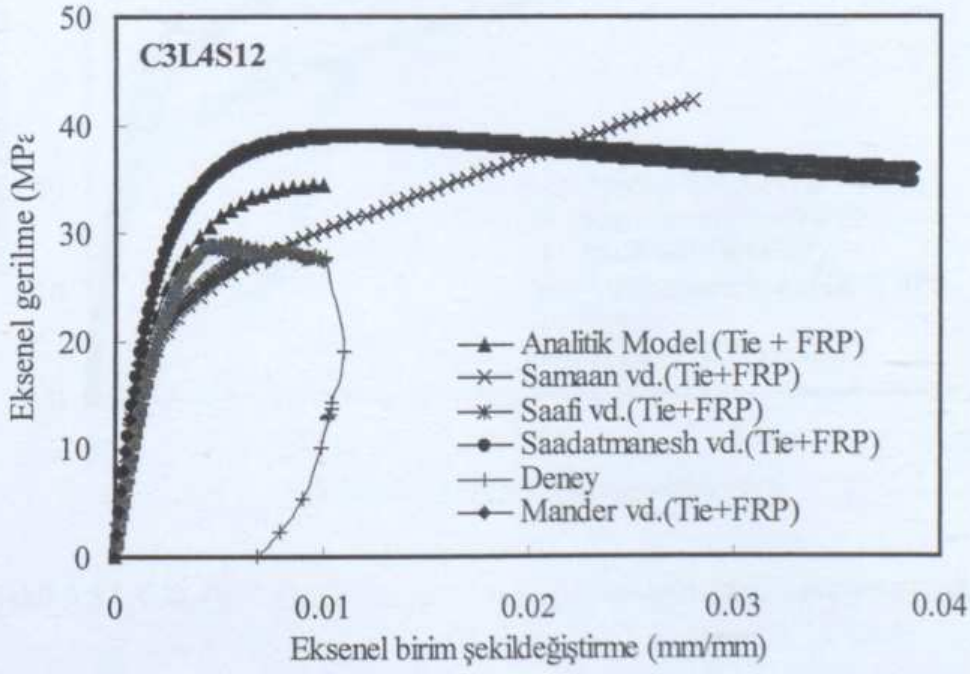
Şekil 4.32 C3L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



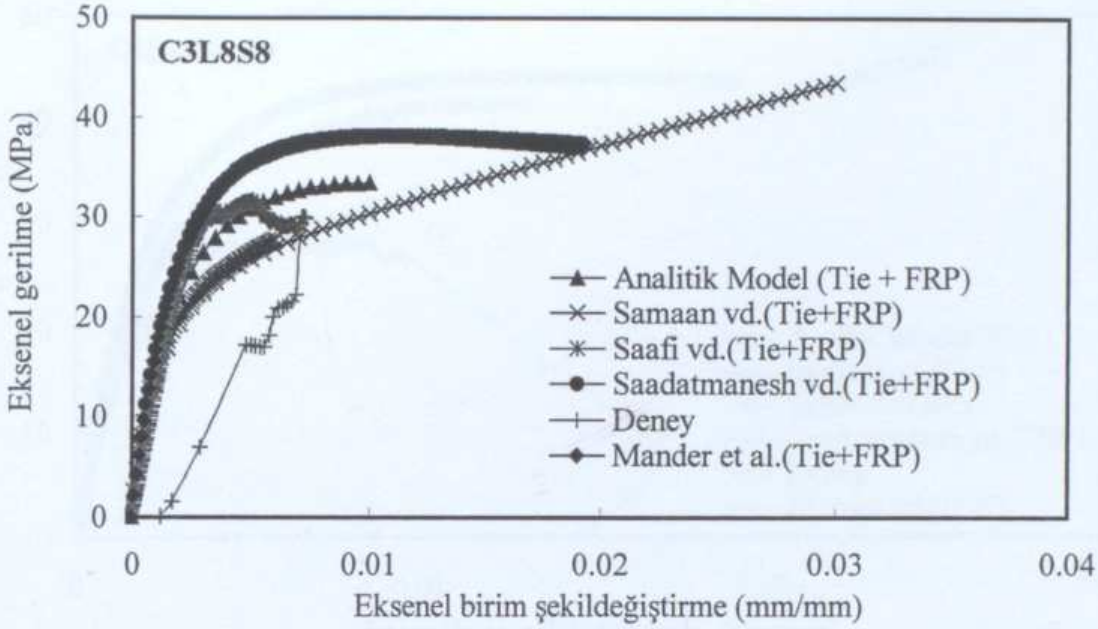
Şekil 4.33 C3L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



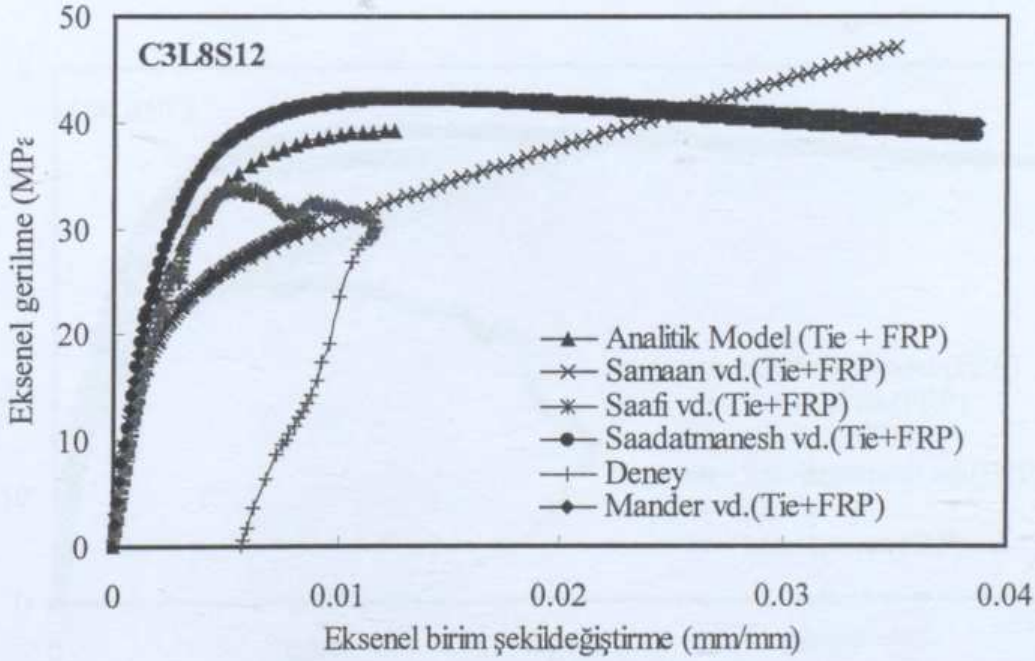
Şekil 4.34 C3L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



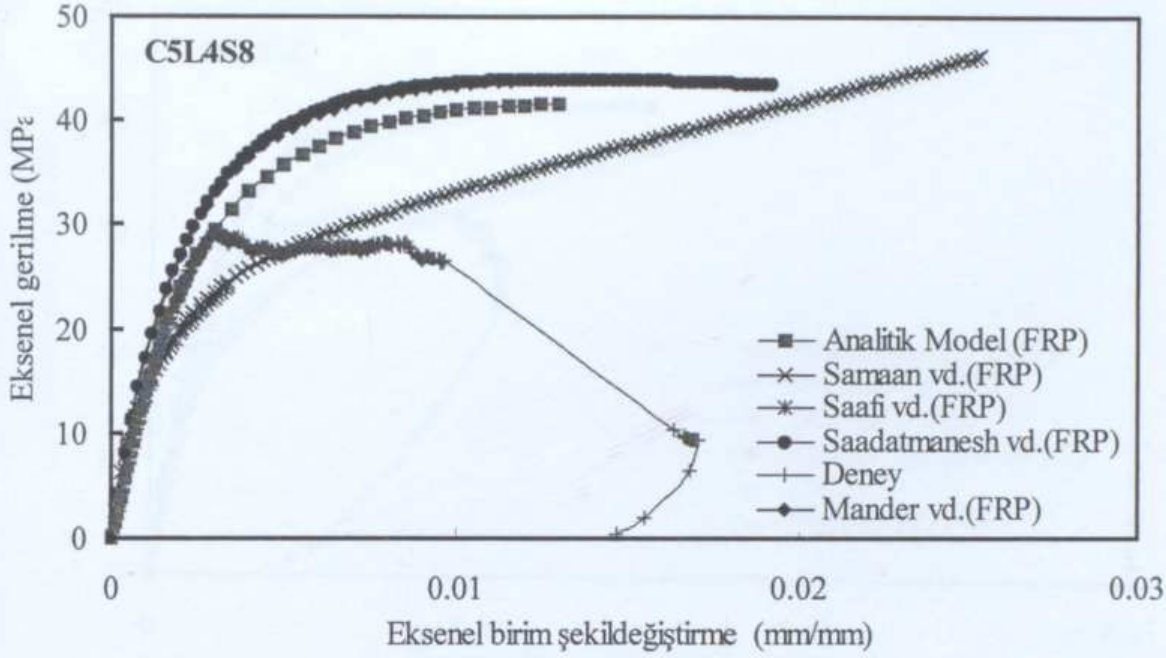
Şekil 4.35 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



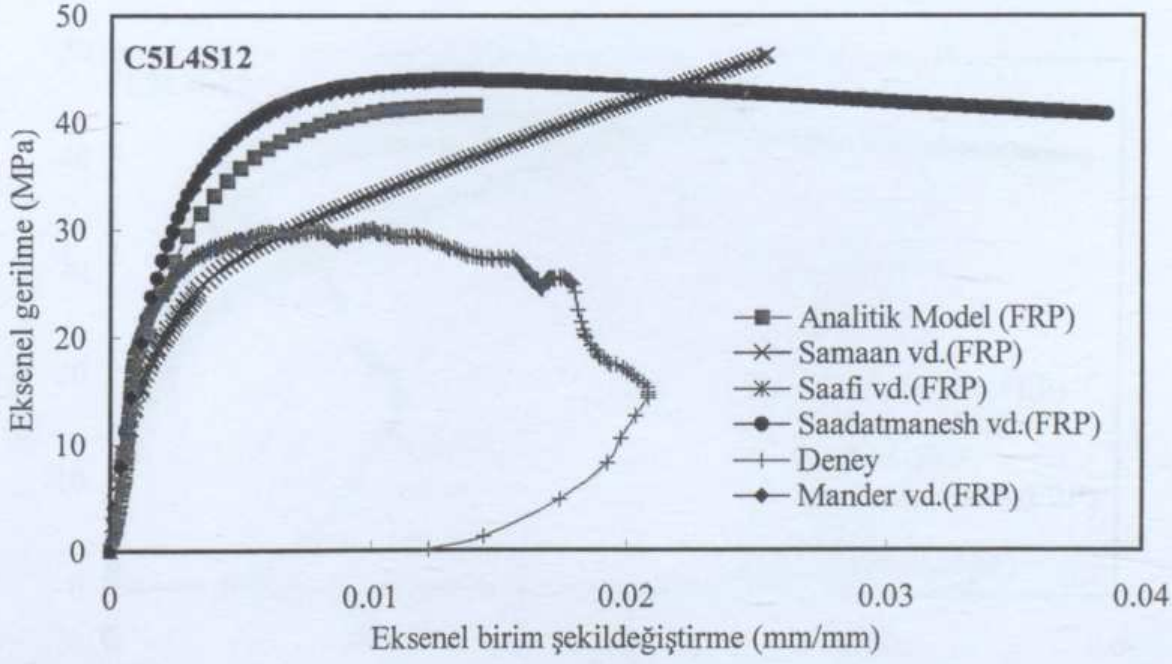
Şekil 4.36 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



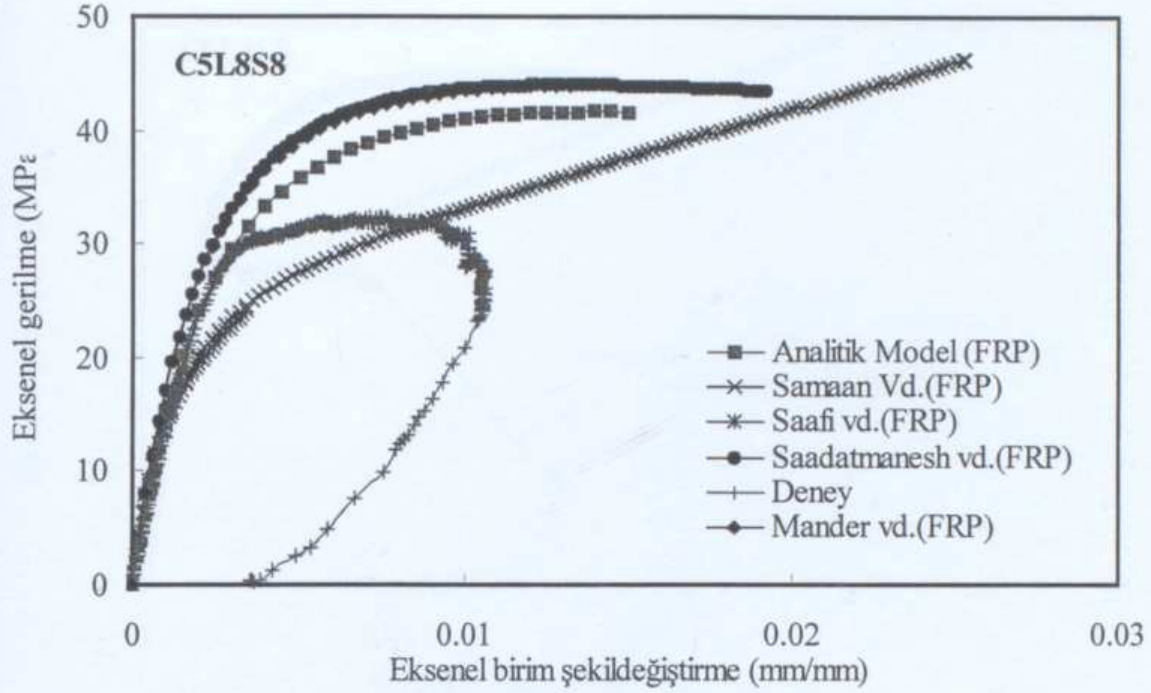
Şekil 4.37 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



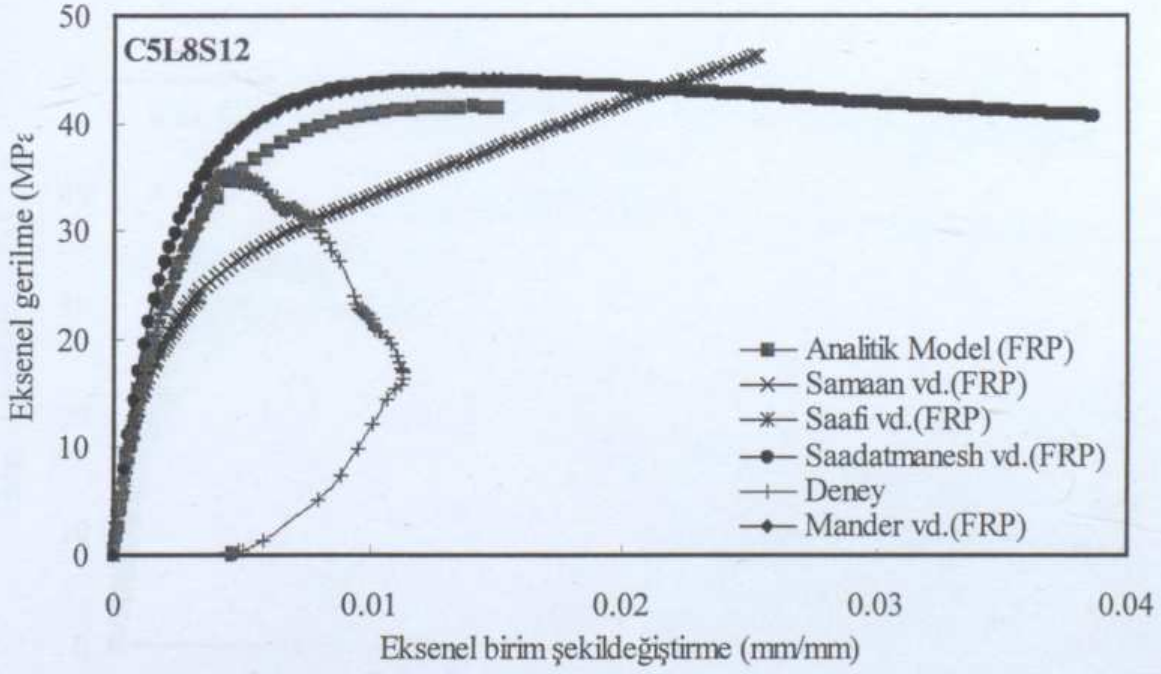
Şekil 4.38 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



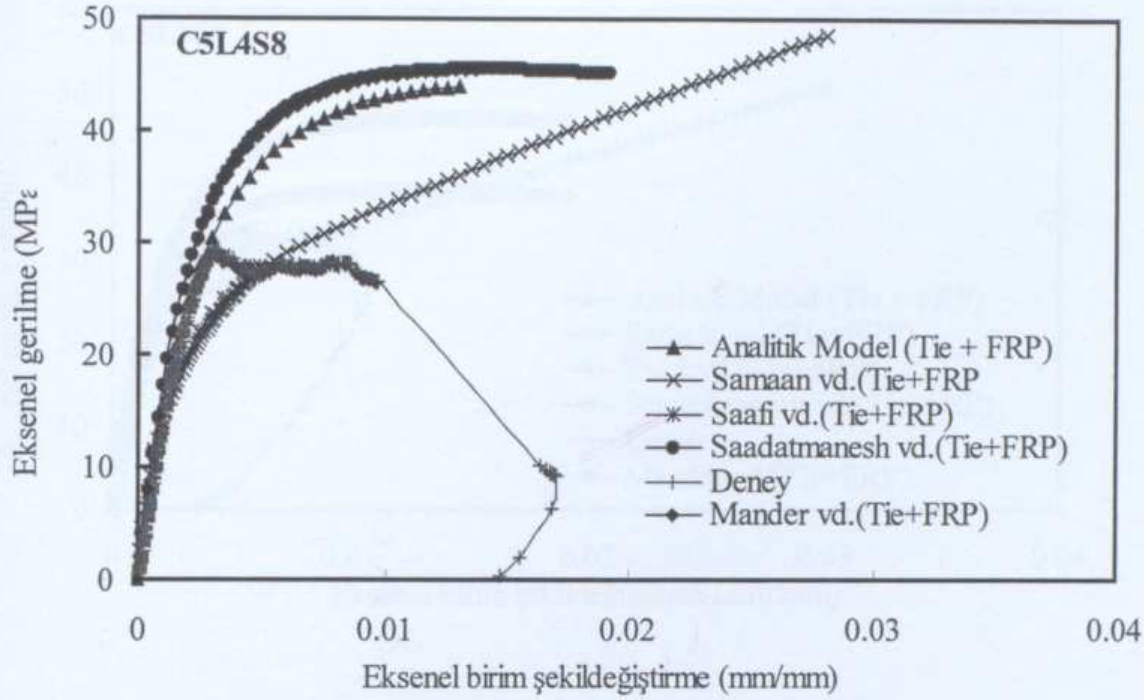
Şekil 4.39 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



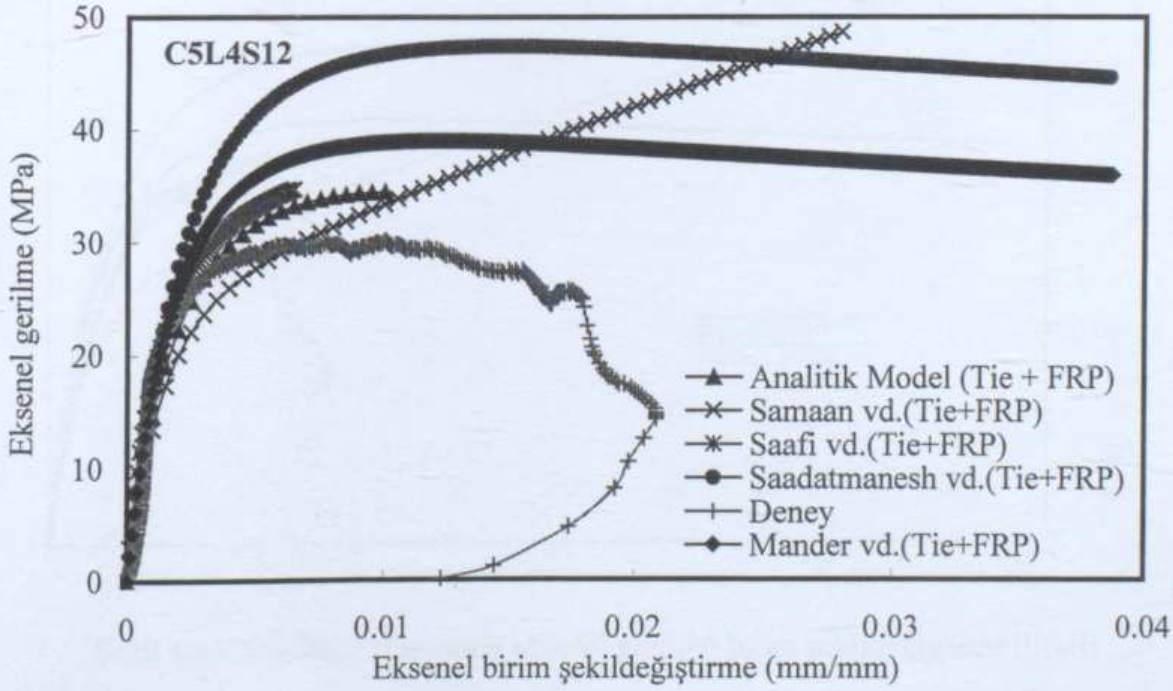
Şekil 4.40 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



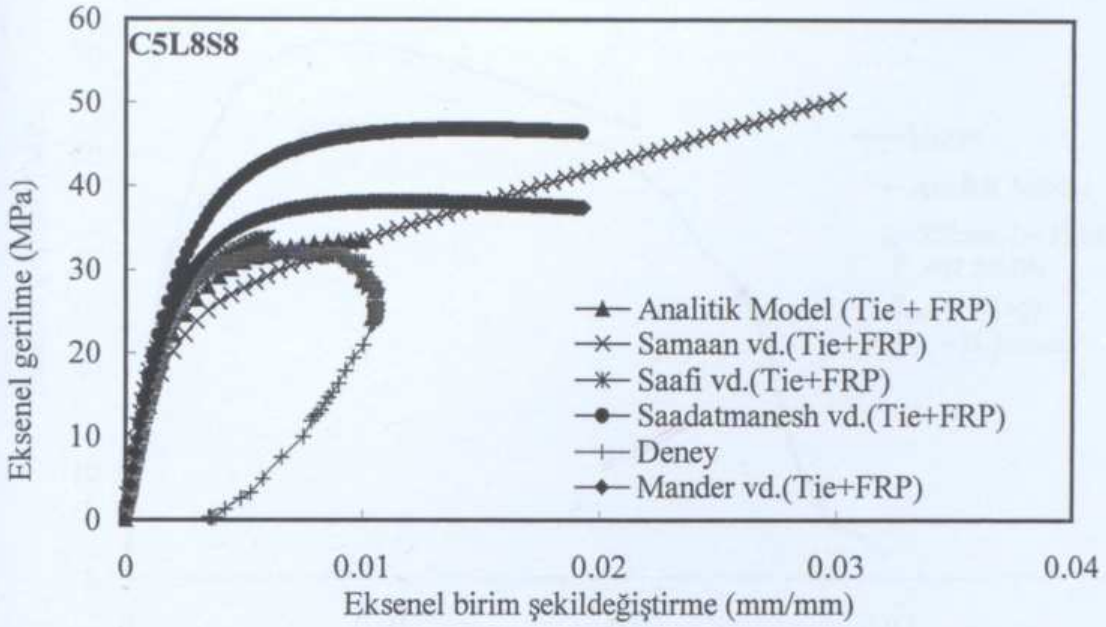
Şekil 4.41 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



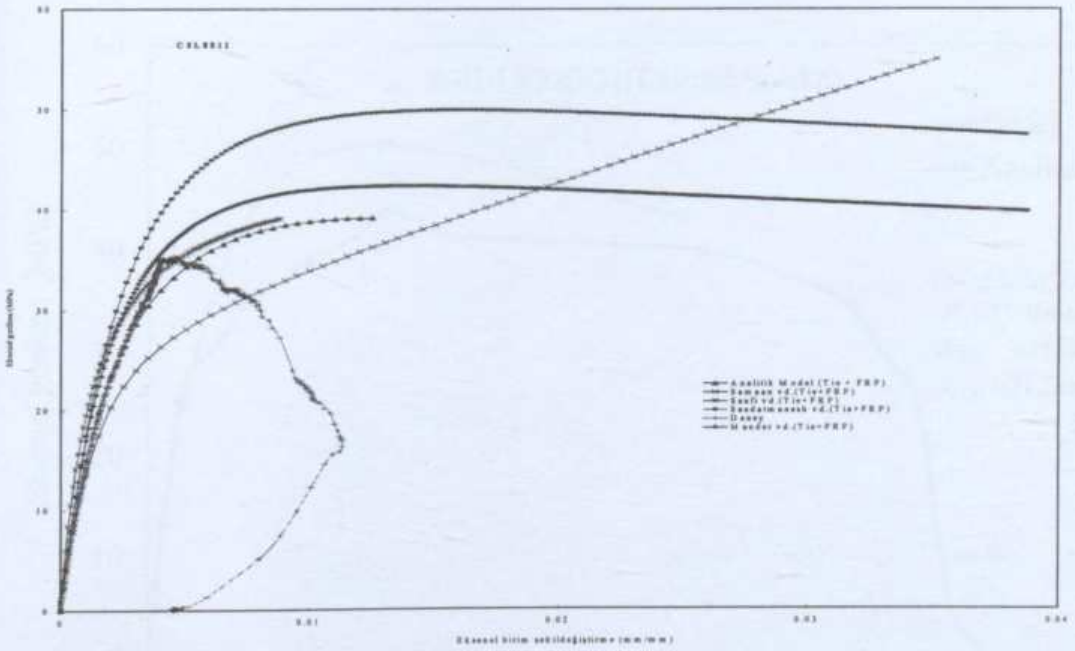
Şekil 4.42 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



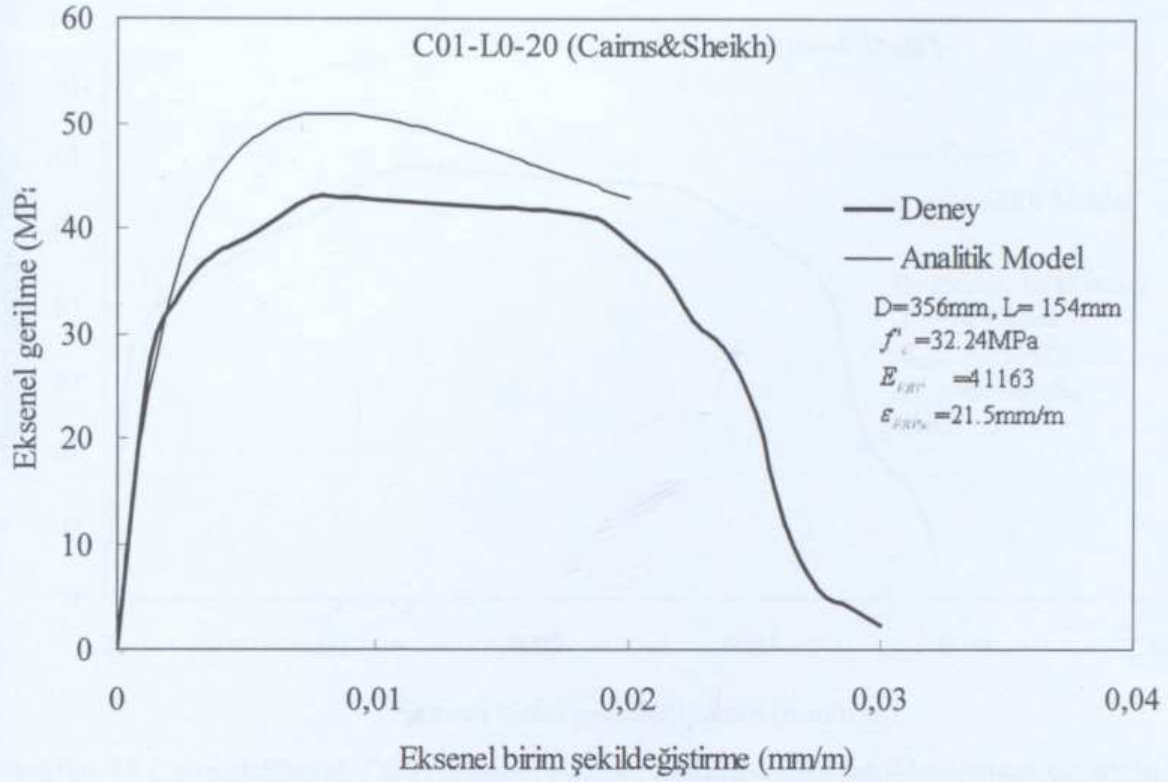
Şekil 4.43 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



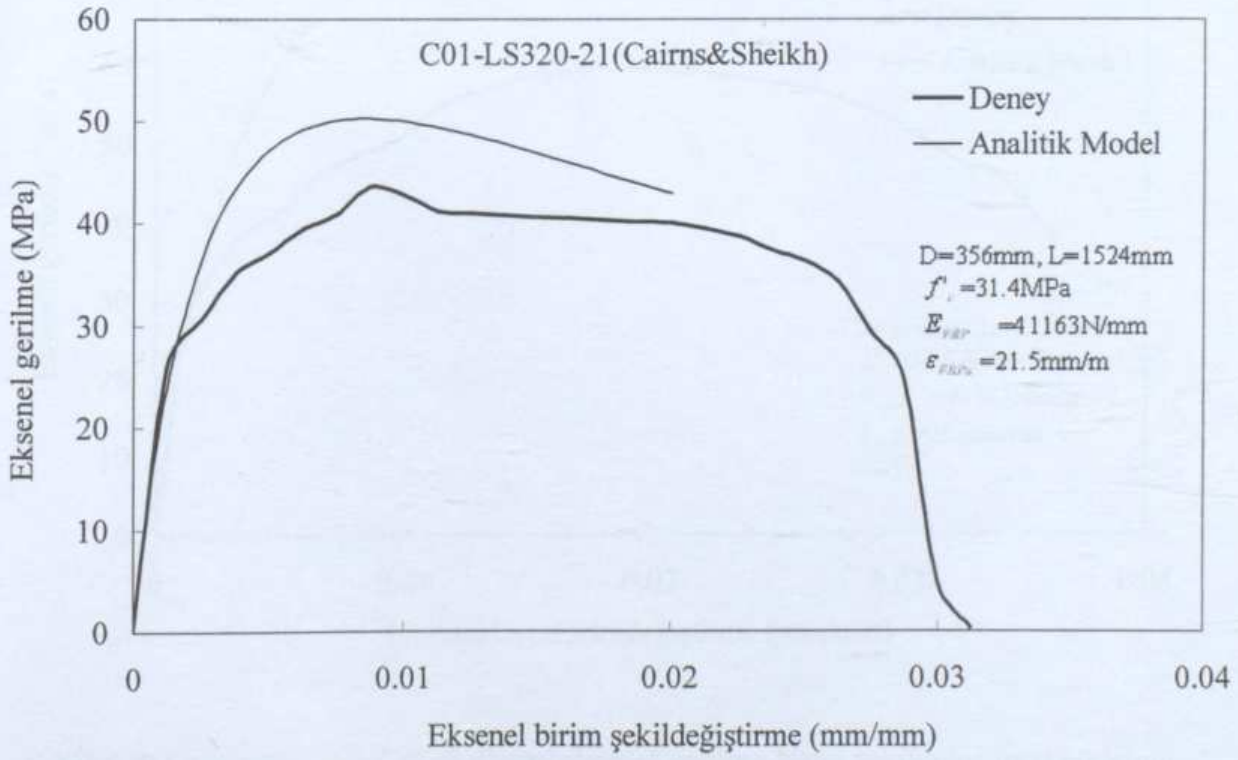
Şekil 4.44 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



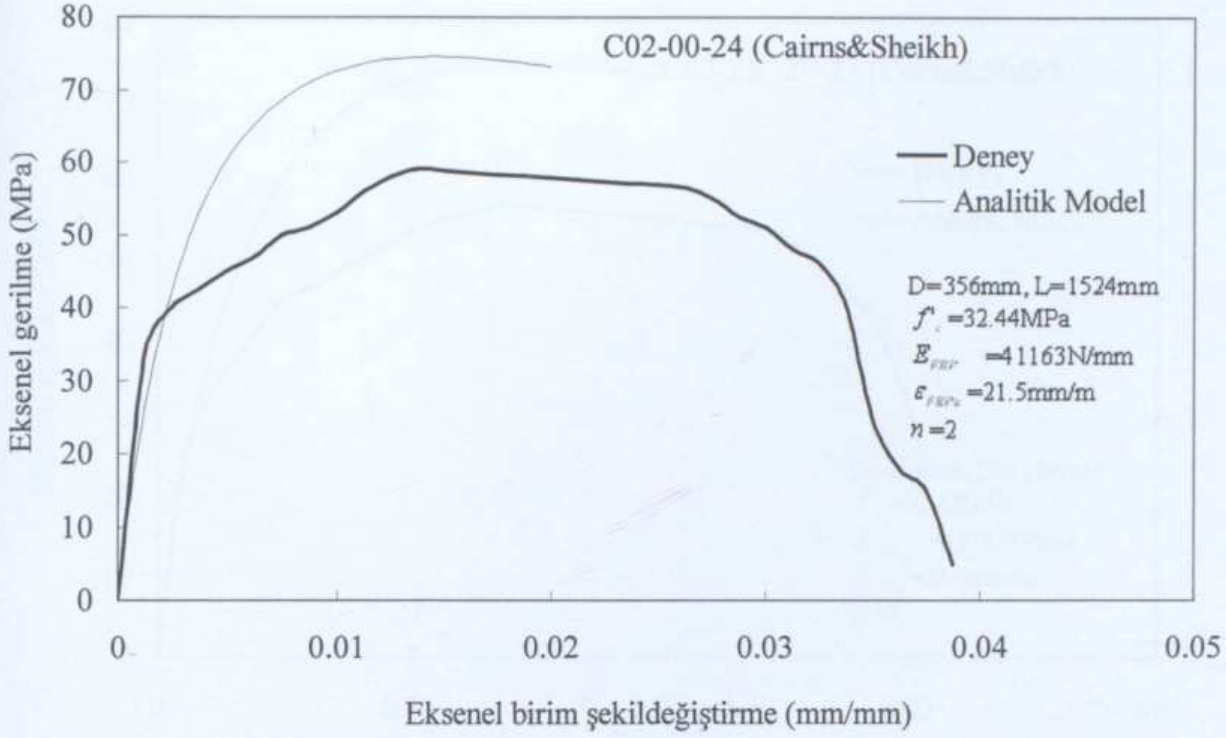
Şekil 4.45 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



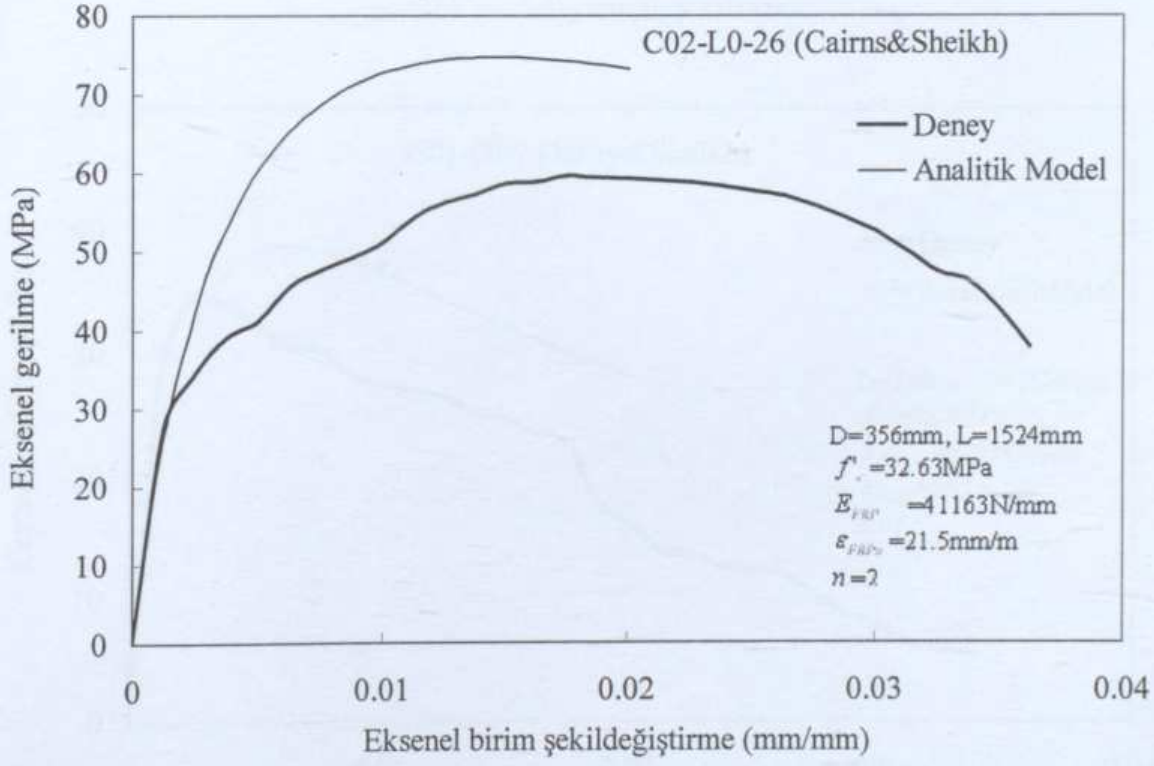
Şekil 4.46 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



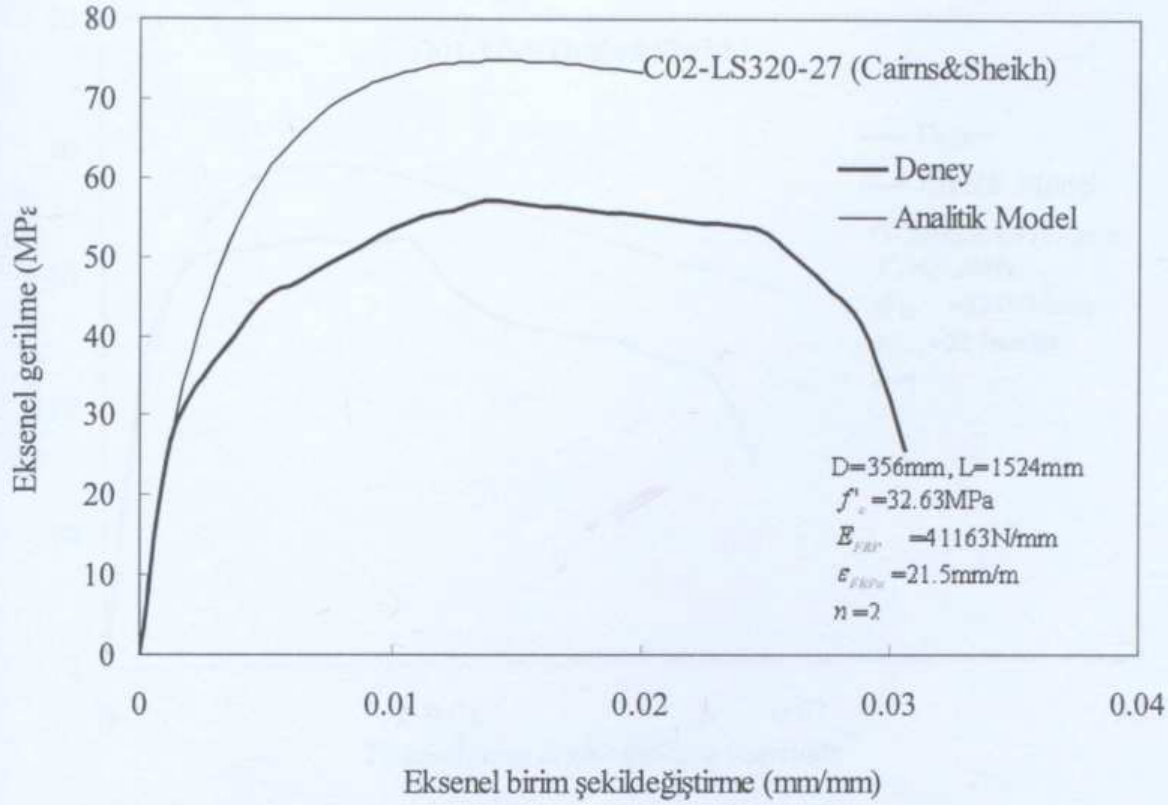
Şekil 4.47 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



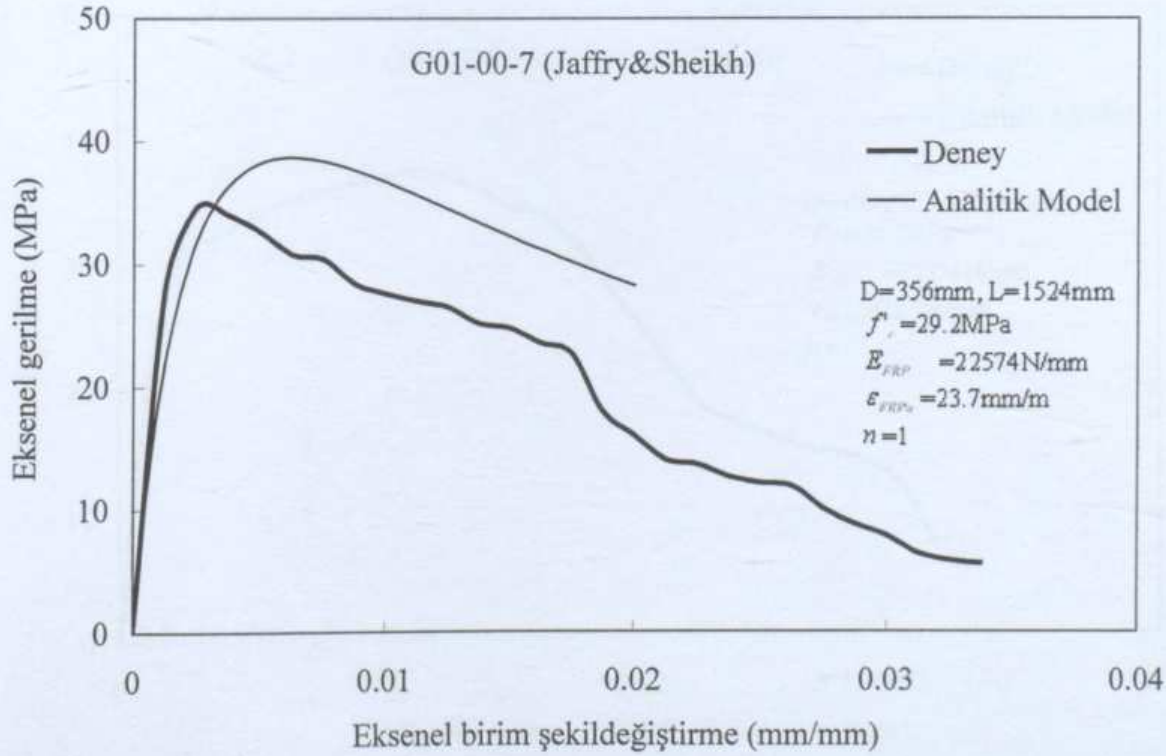
Şekil 4.48 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



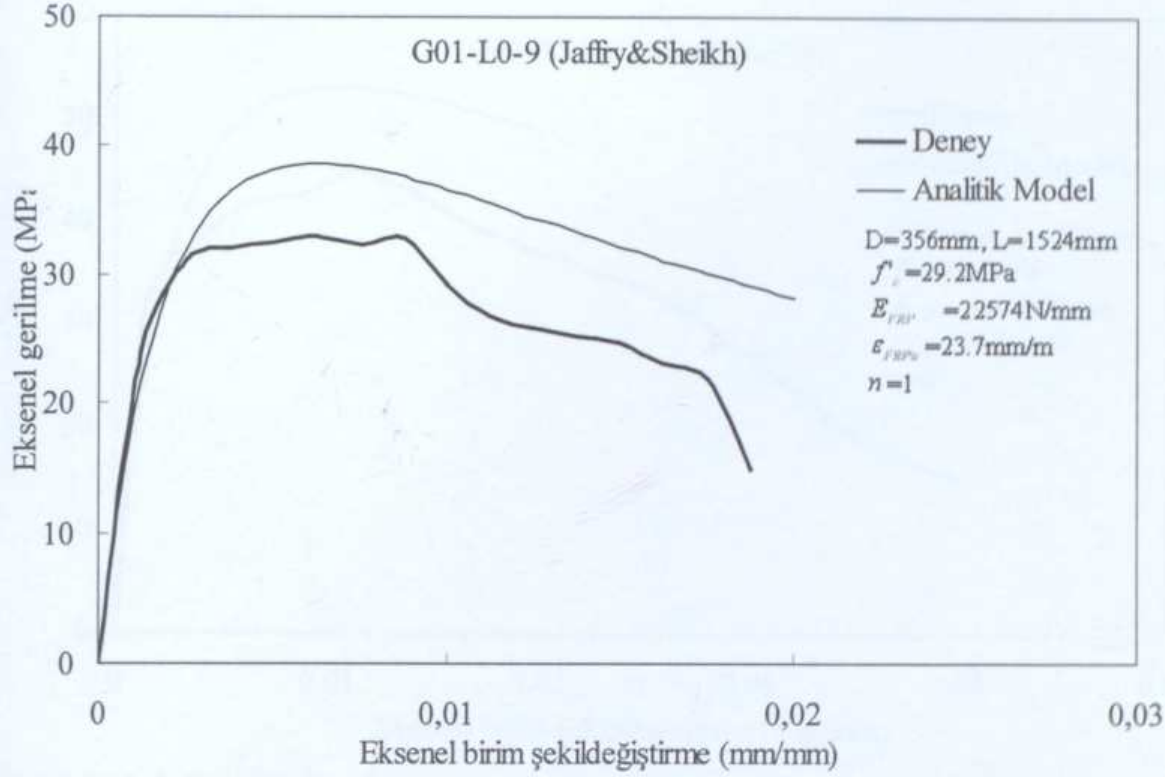
Şekil 4.49 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



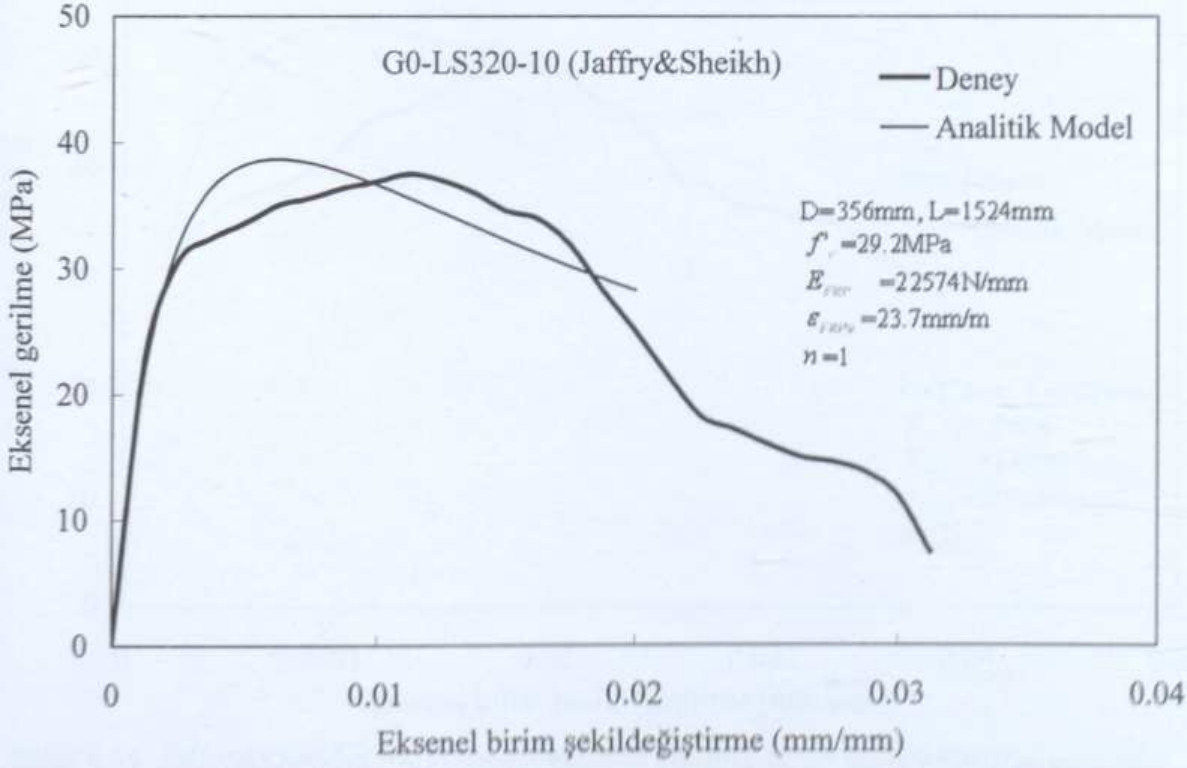
Şekil 4.50 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



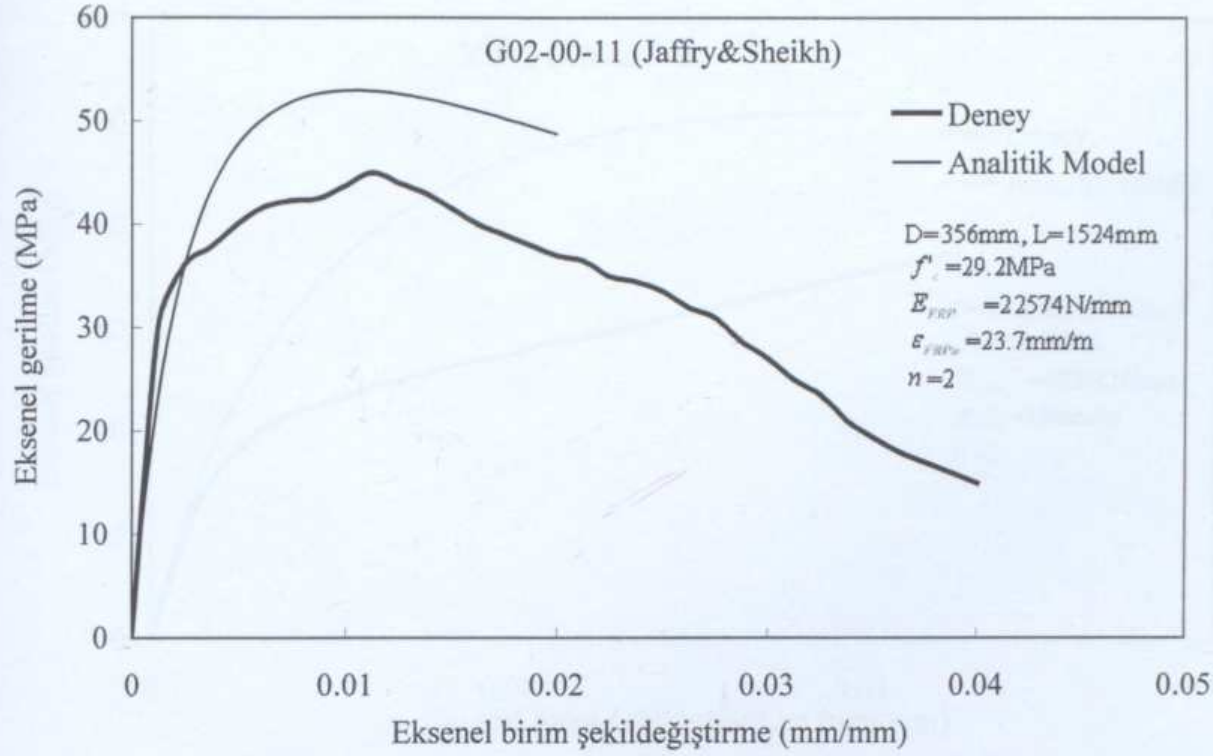
Şekil 4.51 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



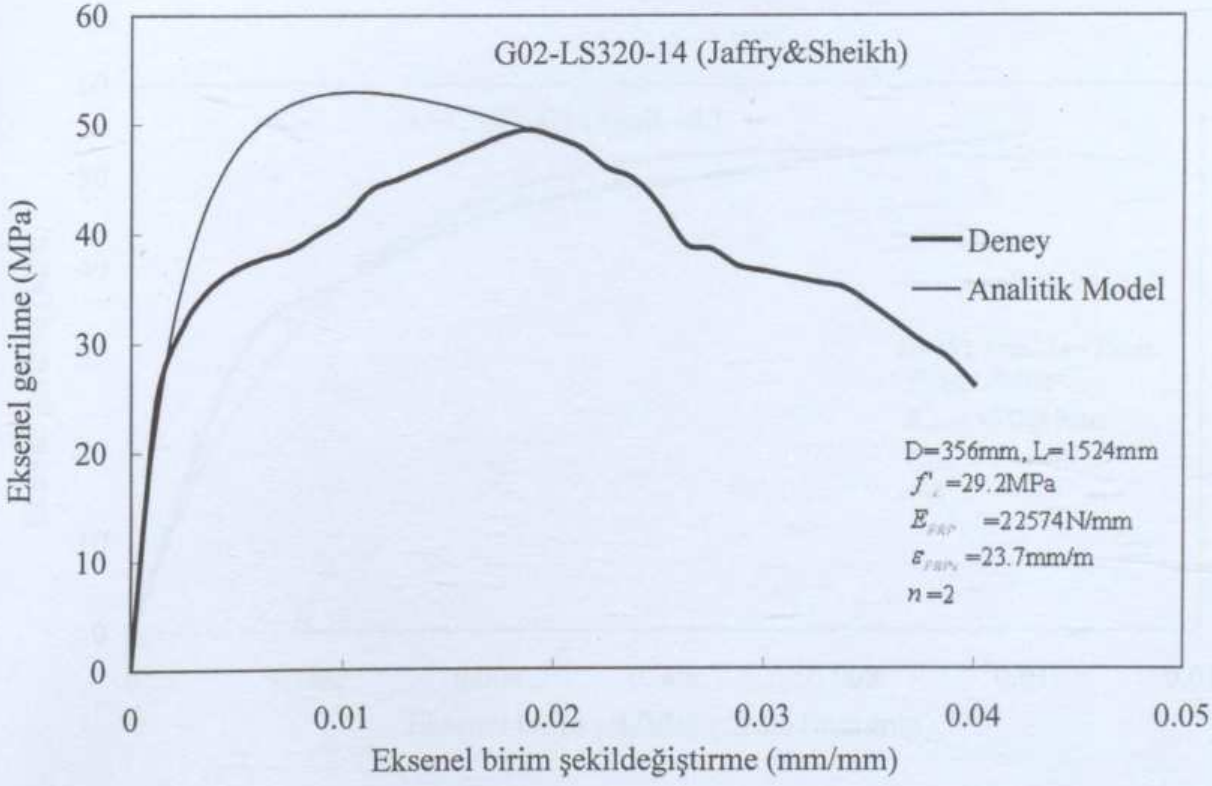
Şekil 4.52 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



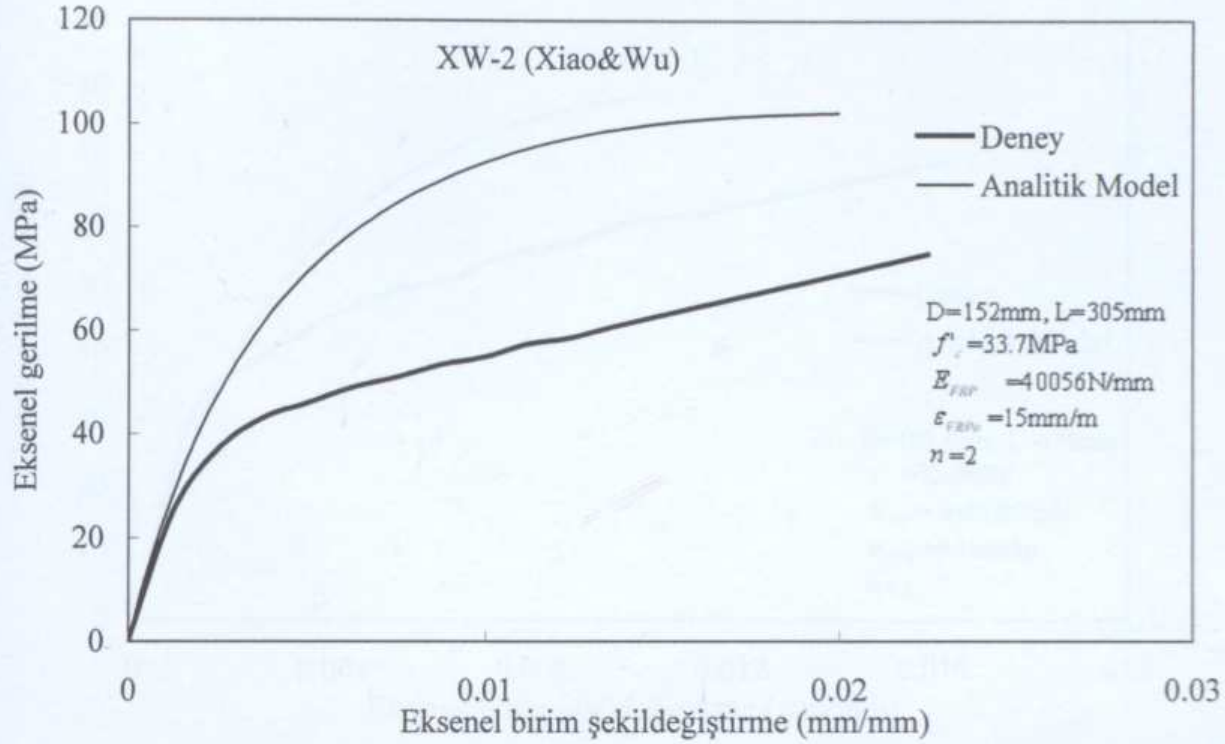
Şekil 4.53 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



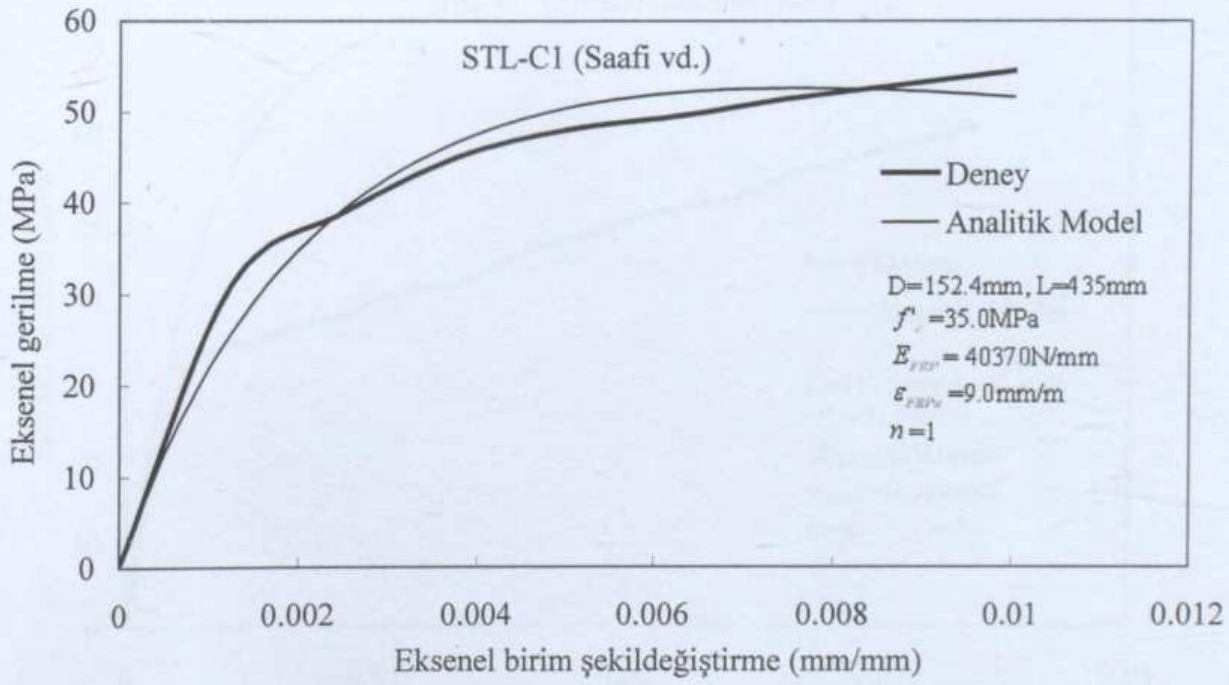
Şekil 4.54 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



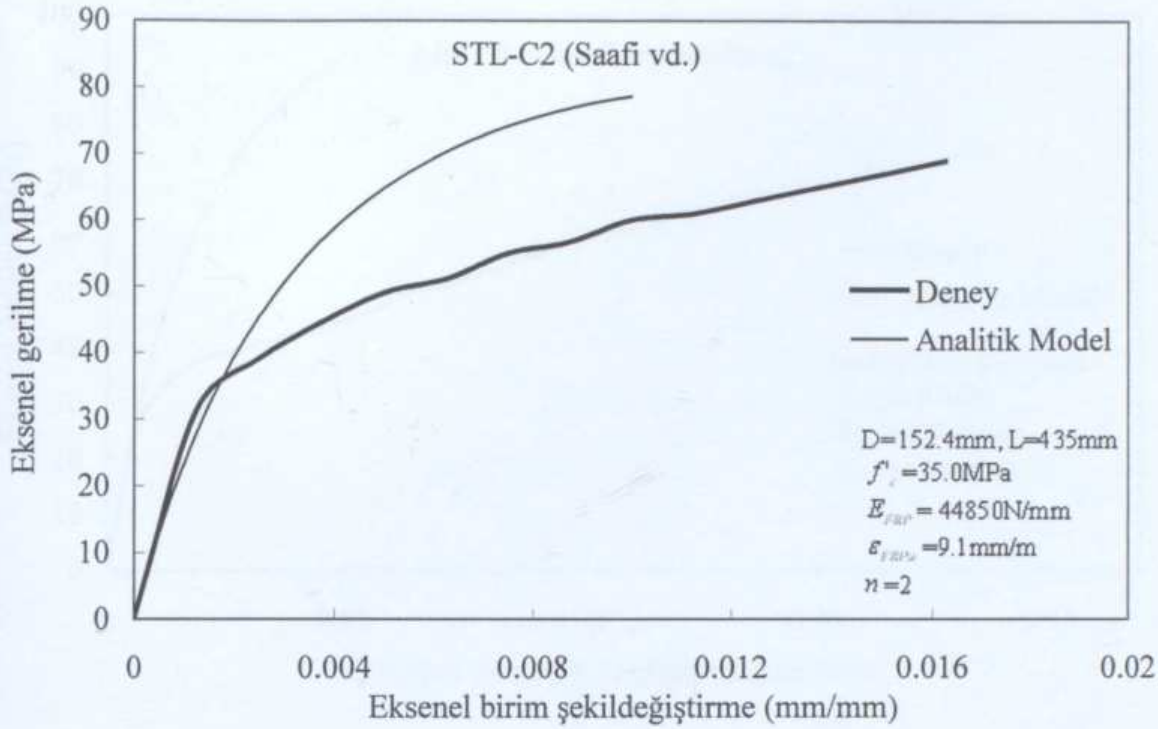
Şekil 4.55 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



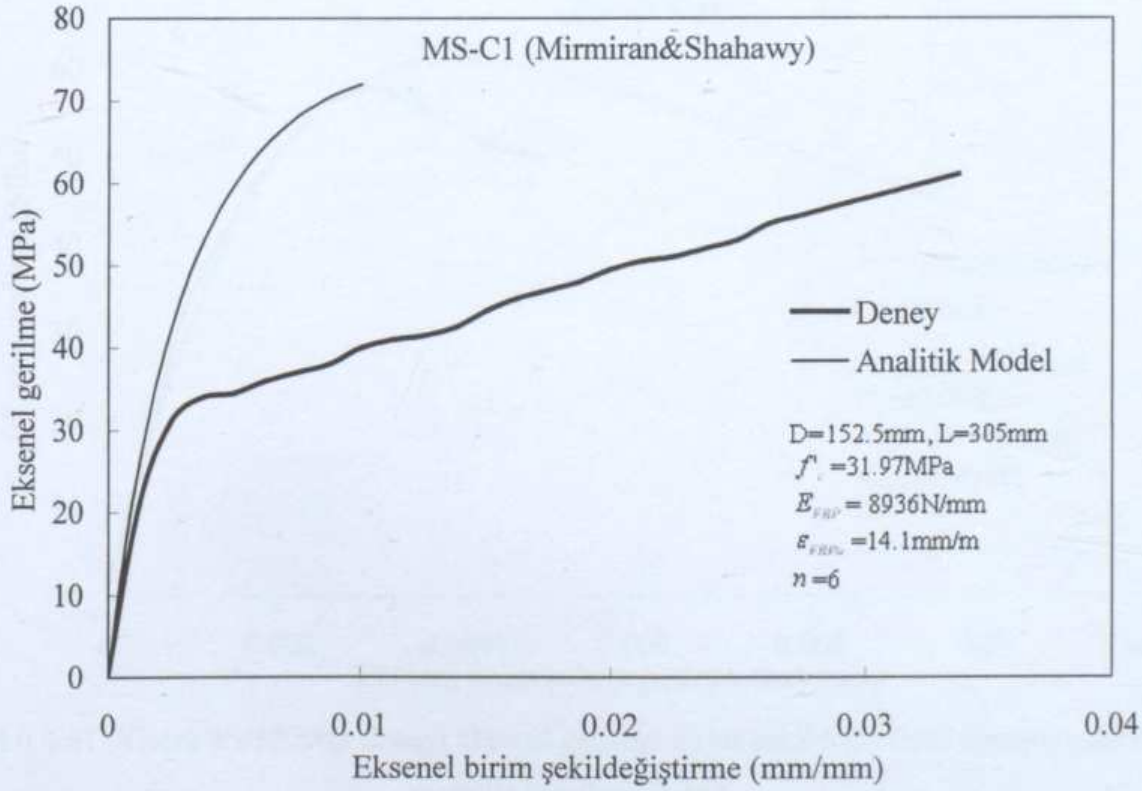
Şekil 4.56 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



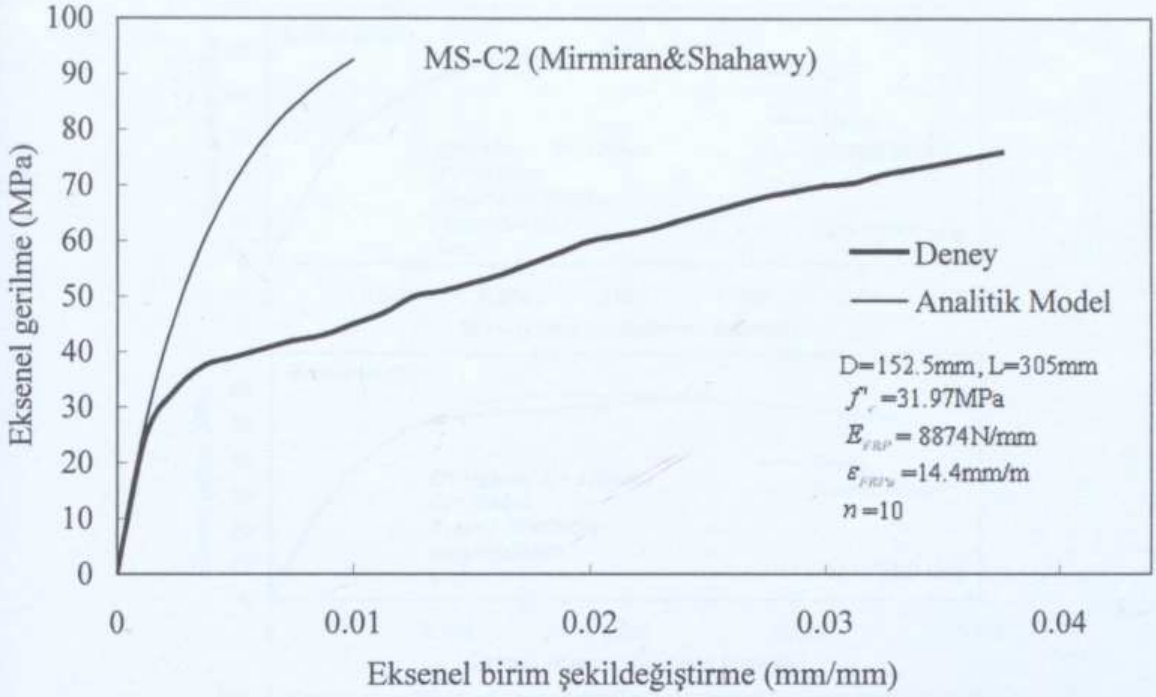
Şekil 4.57 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



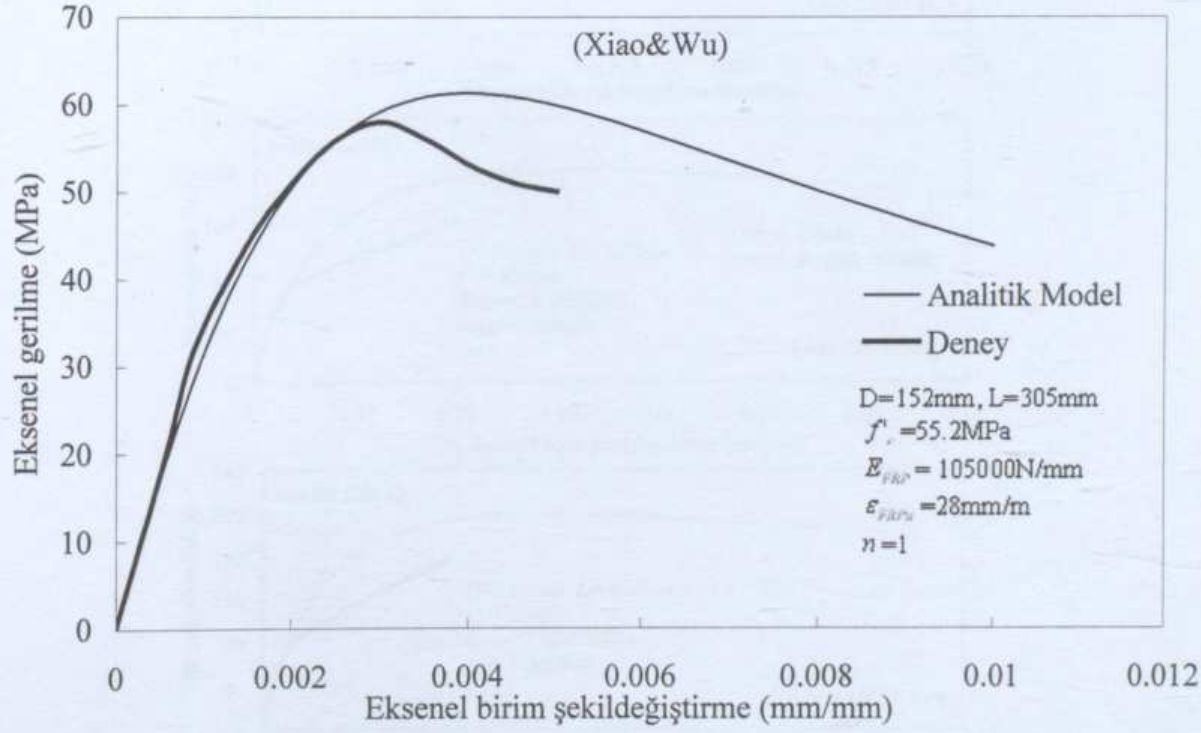
Şekil 4.58 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



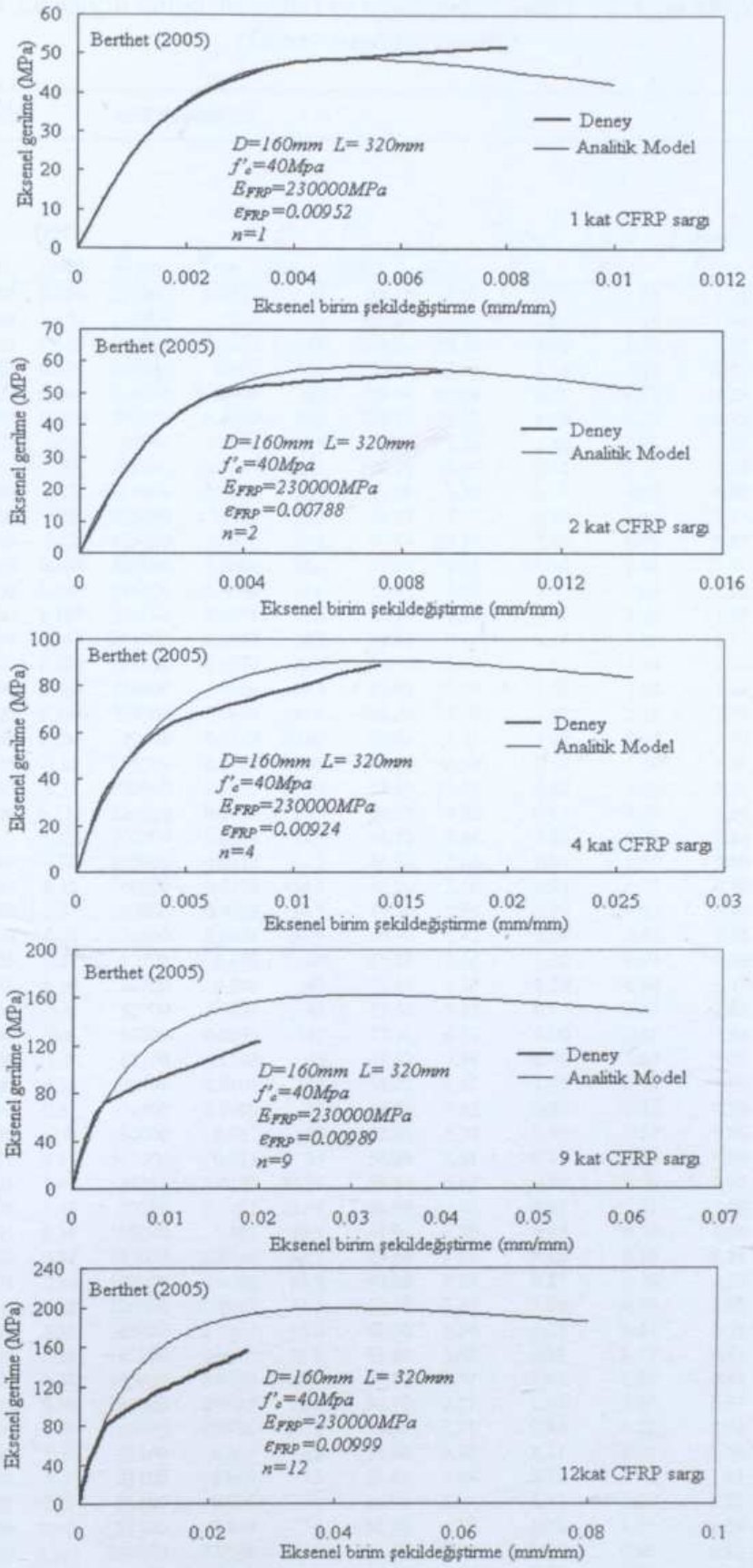
Şekil 4.59 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



Şekil 4.60 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



Şekil 4.61 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



Şekil 4.62 Berthet (2005) deneyleri eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması

Çizelge 4.1 LP sargılı kolon deneyleri ve uygulanan analitik modelin karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	h (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{A}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{B}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{C}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{D}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{E}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{F}$
HA1	51	102	0.089	235000	0.0113	41	86.10	9.27	1.07	1.02	1.24	1.29	1.04	1.45
HA2	51	102	0.179	235000	0.01	41	120.54	16.50	1.06	1.15	1.44	1.45	1.08	1.63
HA3	51	102	0.344	235000	0.0075	41	158.26	23.78	1.08	1.32	1.65	1.61	1.12	1.79
HA5	51	102	0.179	235000	0.002	103	130.81	3.30	1.18	1.05	1.12	1.13	1.04	1.19
HA6	51	102	0.344	235000	0.00725	103	193.64	22.98	0.91	0.92	1.23	1.16	0.95	1.30
HA7	51	102	0.689	235000	0.0055	103	303.85	34.92	1.12	1.23	1.73	1.56	1.22	1.76
PI1	153	305	0.36	83000	0.0084	39.7	55.98	3.28	1.12	0.95	1.05	1.11	0.98	1.21
WA1	100	200	0.67	223400	0.00667	30.2	104.49	19.97	0.91	1.13	1.32	1.35	0.91	1.49
WA2	100	200	0.14	611600	0.0025	30.2	41.68	4.28	0.91	0.79	0.89	0.97	0.82	1.08
WA3	100	200	0.28	611600	0.00167	30.2	55.87	5.72	1.06	0.96	1.11	1.20	0.99	1.34
WA4	100	200	0.42	611600	0.0021	30.2	63.42	10.79	0.83	0.86	1.02	1.09	0.82	1.22
KO1	100	200	0.167	235000	0.0084	34.3	57.28	6.59	0.94	0.86	1.01	1.08	0.89	1.21
KO2	100	200	0.167	235000	0.0092	34.3	64.83	7.22	1.02	0.94	1.11	1.19	0.97	1.33
KO3	100	200	0.167	235000	0.0096	32.3	61.69	7.54	0.98	0.92	1.08	1.16	0.93	1.30
KO4	100	200	0.167	235000	0.0063	32.3	57.82	4.94	1.14	1.00	1.14	1.23	1.04	1.37
KO5	100	200	0.334	235000	0.0077	32.3	86.89	12.09	1.03	1.08	1.30	1.37	1.03	1.54
KO6	100	200	0.334	235000	0.0066	34.8	82.82	10.36	1.05	1.04	1.26	1.33	1.03	1.49
KO7	100	200	0.334	235000	0.0091	34.8	103.36	14.29	1.07	1.15	1.41	1.45	1.07	1.63
T01	76	305	0.236	72600	0.0163	30.93	60.93	7.35	1.00	0.94	1.10	1.19	0.95	1.34
T02	76	305	0.22	230500	0.0125	30.93	94.96	16.68	0.93	1.08	1.28	1.33	0.93	1.48
T03	76	305	0.33	372800	0.0055	30.93	94.03	17.81	0.88	1.04	1.24	1.28	0.88	1.41
MA1	150	300	0.117	220000	0.0126	34.9	46.07	4.32	0.91	0.79	0.89	0.96	0.82	1.06
MA2	150	300	0.235	500000	0.0031	34.9	45.72	4.86	0.86	0.75	0.86	0.92	0.79	1.02
MA3	150	300	0.12	200000	0.0115	34.9	44.30	3.68	0.94	0.80	0.89	0.95	0.83	1.05
MA4	150	300	0.12	200000	0.0108	34.9	42.20	3.46	0.91	0.77	0.86	0.92	0.80	1.01
MA5	150	300	0.24	420000	0.0019	34.9	41.30	2.55	0.99	0.83	0.89	0.95	0.85	1.03
MA6	150	300	0.24	420000	0.0018	34.9	40.70	2.42	0.99	0.82	0.88	0.95	0.84	1.02
SH1	153	305	0.36	82700	0.006	49	59.29	2.34	1.10	0.93	0.99	1.03	0.94	1.10
SH2	153	305	0.66	82700	0.006	49	76.44	4.28	1.20	1.04	1.17	1.22	1.07	1.33
RL1	100	200	0.6	82700	0.0089	42	73.50	8.83	0.93	0.87	1.06	1.10	0.90	1.23
RL2	100	200	0.6	82700	0.0095	42	73.50	9.43	0.90	0.85	1.04	1.08	0.87	1.21
RL3	100	200	0.6	82700	0.008	42	67.62	7.94	0.90	0.83	1.00	1.04	0.86	1.17
MC1	100	200	0.35	72400	0.0101	32	54.08	5.12	1.05	0.93	1.06	1.15	0.97	1.28
MC2	100	200	0.35	72400	0.0099	32	48.00	5.02	0.94	0.83	0.95	1.02	0.86	1.14
SA1	152	435	0.8	32000	0.017	35	52.85	5.73	0.92	0.82	0.95	1.02	0.86	1.14
SA2	152	435	0.11	367000	0.013	35	54.95	6.91	0.87	0.80	0.94	1.00	0.83	1.13
MS1	153	305	1.44	37233	0.0123	30.86	53.70	8.62	0.80	0.78	0.93	0.99	0.78	1.12
MS2	153	305	1.44	37233	0.0177	29.64	66.99	12.41	0.81	0.87	1.04	1.10	0.81	1.23
XW1	152	305	0.38	105000	0.012	33.7	47.90	6.30	0.82	0.74	0.86	0.92	0.76	1.03
XW2	152	305	0.38	105000	0.0124	33.7	49.40	6.51	0.83	0.75	0.88	0.94	0.78	1.06
XW3	152	305	0.38	105000	0.0098	43.8	54.80	5.15	0.87	0.76	0.87	0.92	0.79	1.01
XW4	152	305	0.38	105000	0.0047	43.8	52.10	2.47	1.05	0.88	0.95	0.99	0.90	1.07
XW5	152	305	0.38	105000	0.0037	43.8	48.70	1.94	1.03	0.87	0.91	0.96	0.87	1.02
XW6	152	305	0.38	105000	0.0069	55.2	57.90	3.62	0.87	0.75	0.83	0.86	0.77	0.93
XW7	152	305	0.38	105000	0.0048	55.2	62.90	2.52	1.04	0.89	0.94	0.98	0.89	1.04
XW8	152	305	0.38	105000	0.0049	55.2	58.10	2.57	0.95	0.82	0.87	0.90	0.82	0.96
XW9	152	305	0.76	105000	0.0081	55.2	77.60	8.51	0.86	0.78	0.95	0.96	0.82	1.07
LO1	120	240	0.3	91100	0.007	43	58.50	3.19	1.11	0.95	1.04	1.09	0.97	1.18
LO2	120	240	0.3	91100	0.008	43	65.60	3.64	1.20	1.02	1.13	1.19	1.06	1.30
LO3	150	300	0.45	91100	0.008	38	62.00	4.37	1.16	1.00	1.13	1.20	1.04	1.33
LO4	150	300	0.45	91100	0.008	38	67.50	4.37	1.26	1.09	1.23	1.31	1.13	1.44
SS1	150	600	0.111	240000	0.0026	28.2	31.40	0.92	1.13	0.92	0.93	0.99	0.90	1.05
SS2	150	600	0.222	240000	0.0118	28.2	57.40	8.38	0.91	0.89	1.05	1.13	0.88	1.28
SS3	150	600	0.333	240000	0.0114	28.2	69.50	12.15	0.87	0.94	1.11	1.18	0.86	1.32
SS4	150	600	0.167	390000	0.0037	28.2	41.50	3.21	1.07	0.90	0.99	1.09	0.94	1.20
SS5	150	600	0.334	390000	0.0069	28.2	65.60	11.98	0.83	0.89	1.05	1.12	0.82	1.26
SS6	150	600	0.501	390000	0.0064	28.2	79.40	16.67	0.80	0.96	1.12	1.17	0.80	1.29

Çizelge 4.1 (devamı) LP sargılı kolon deneyleri ve uygulanan analitik modelin karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	h (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [A]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [B]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [C]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [D]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [E]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [F]
LL15	100	200	0.22	232000	0.010	23.04	80.35	10.34	1.22	1.31	1.49	1.64	1.19	1.84
LL16	150	300	0.33	232000	0.010	22.75	82.86	10.34	1.26	1.36	1.55	1.71	1.23	1.91
LL17	120	240	0.33	232000	0.010	22.73	89.44	12.92	1.17	1.36	1.52	1.66	1.15	1.84
LL18	100	200	0.33	232000	0.010	23.04	101.80	15.51	1.17	1.44	1.59	1.71	1.15	1.88
LL19	150	300	0.11	232000	0.010	24.99	48.09	3.45	1.31	1.11	1.22	1.36	1.16	1.51
LL20	120	240	0.11	232000	0.010	25.42	55.33	4.31	1.34	1.17	1.31	1.46	1.22	1.63
LL21	200	400	0.11	232000	0.010	25.01	61.08	5.17	1.36	1.22	1.39	1.54	1.26	1.73
LL22	150	300	0.22	232000	0.010	24.99	68.49	6.89	1.30	1.23	1.42	1.57	1.23	1.77
LL23	120	240	0.22	232000	0.010	25.42	79.75	8.52	1.31	1.31	1.52	1.67	1.27	1.88
LL24	100	200	0.33	232000	0.010	25.01	88.82	10.34	1.30	1.37	1.59	1.73	1.28	1.94
LL25	150	300	0.33	232000	0.010	24.99	87.04	10.34	1.28	1.35	1.56	1.70	1.25	1.91
LL26	120	240	0.33	232000	0.010	25.42	96.85	12.92	1.21	1.37	1.58	1.70	1.20	1.89
LL27	100	200	0.33	232000	0.010	25.01	107.40	15.51	1.19	1.44	1.63	1.74	1.18	1.92

[1] HA Harmon et al. (1992)
[2] PI Picher et al. (1996)
[3] WA Watanabe et al. (1997)
[4] KO Kono et al. (1998)
[5] TO Toutanji et al. (1999)
[6] MA Matthys et al. (1999)
[7] SH Shahawy et al. (2000)
[8] RL Rochette and Labossiere (2000)
[9] MC Micelli et al. (2001)
[10] SA Saafi et al. (1999)
[11] MS Mirmiran and Shahawy (1997)
[12] XW Xiao and Wu (2000)
[13] LO De Lorenzis et al. (2002)
[14] SS Dias da Silva ve Santos (2001)
[15] PE Pessiki et al. (2001)
[16] WC Wang and Cheong (2002)
[17] SH Shehata et al. (2002)
[18] KS Kshirsagar et al. (2000)
[19] BE Berthet (2005)
[20] LL Lin and Li (2003)

[A] FRP sargılı kolonlar için uygulanan Köksal Modeli
[B] Saadatmanesh vd. Modeli
[C] Samaan vd. Modeli
[D] Saafi vd. Modeli
[E] Xiao vd. Wu Modeli
[F] Lam ve Teng Modeli

Çizelge 4.2 128 Adet CFRP sargılı beton numunesi için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

(128 numune için)	Köksal	Saadatmanesh vd.	Samaan vd.	Saafi vd.	Xiao&Wu	Lam&Teng
Ortalama	1.03	1.00	1.15	1.22	0.97	1.36
Standart Sapma	0.17	0.20	0.22	0.25	0.15	0.29
Ortalama Mutlak Hata	13.38	16.64	15.66	17.56	14.44	23.60

Çizelge 4.3 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	b (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{A}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{B}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{C}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{D}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{E}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{F}$
C3L4S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	28.59	3.05	0.96	0.81	0.88	1.01	0.85	1.12
C3L4S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	29.15	3.74	0.89	0.77	0.85	0.97	0.80	1.09
C3L8S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	31.70	3.51	1.00	0.86	0.94	1.07	0.89	1.20
C3L8S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	33.88	4.78	0.90	0.82	0.91	1.04	0.83	1.17
C5L4S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	29.32	5.54	0.72	0.67	0.75	0.86	0.67	0.96
C5L4S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	30.12	6.22	0.68	0.66	0.74	0.84	0.64	0.95
C5L8S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	32.35	6.00	0.75	0.72	0.80	0.92	0.71	1.03
C5L8S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	35.40	7.26	0.73	0.73	0.82	0.93	0.69	1.04

Çizelge 4.4 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

(8 betonarme numune için)	Köksal	Saadatmanesh vd.	Samaan vd.	Saafi vd.	Xiao&Wu	Lam&Teng
Ortalama	0.83	0.76	0.83	0.95	0.76	1.07
Standart Sapma	0.12	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09
Ortalama Mutlak Hata	22.95	33.13	20.72	8.37	33.35	8.37

Çizelge 4.5 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (***Etriye katkısı ihmal edildiğinde***) (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	b (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{A}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{B}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{C}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{D}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{E}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{F}$
C3L4S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	28.59	2.49	1.06	0.87	0.93	1.06	0.91	1.17
C3L4S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	29.15	2.48	1.08	0.89	0.95	1.08	0.93	1.20
C3L8S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	31.70	2.49	1.17	0.97	1.03	1.18	1.01	1.30
C3L8S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	33.88	2.48	1.25	1.03	1.10	1.26	1.08	1.39
C5L4S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	29.32	4.98	0.76	0.70	0.78	0.89	0.70	1.00
C5L4S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	30.12	4.96	0.79	0.72	0.80	0.91	0.72	1.03
C5L8S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	32.35	4.98	0.84	0.77	0.86	0.98	0.78	1.10
C5L8S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	35.40	4.96	0.92	0.85	0.94	1.08	0.85	1.21

Çizelge 4.6 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistisel karşılaştırılması (***Etriye katkısı ihmal edildiğinde***)(Deney/Analitik model)

(8 betonarme numune için)	Köksal	Saadatmanesh vd.	Samaan vd.	Saafi vd.	Xiao&Wu	Lam&Teng
Ortalama	0.98	0.85	0.92	1.05	0.87	1.18
Standart Sapma	0.18	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13
Ortalama Mutlak Hata	16.62	20.36	12.89	9.92	18.97	14.05

Çizelge 4.1'de Literatürde daha önce yapılmış toplam 128 adet CFRP sargılı silindirik beton numuneler ile uygulanan analitik model ve diğer bünyesel beton modelleri Deney/Analitik Model olarak karşılaştırıldığında; LP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modeli'nde ortalama, 1.03, standart sapma, 0.17, Saadatmanesh vd. Modeli'nde ortalama, 1.00, standart sapma, 0.20, Samaan vd. Modeli'nde ortalama, 1.15, standart sapma, 0.22, Saafi vd. Modeli'nde ortalama, 1.22, standart sapma0.25, Xiao ve Wu Modeli'nde ortalama, 0.97, standart sapma, 0.15, Lam ve Teng. Modeli'nde ortalama, 1.39, standart sapma, 0.29 olarak bulunmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda ise; deney yükü/analitik model tahmin oranı dikkate alındığında 1.03 ortalama ve 0.13 standart sapma değerleri ile Köksal Modelinin LP sargılı betona uygulanmış biçimi için deneylere oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çizelge 4.3 Deney Kolonları: uygulanan analitik model ve diğer bünyesel beton modellemeleri (Deney/Analitik Model) karşılaştırıldığında; LP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modeli'nde ortalama, 0.83, standart sapma, 0.12, Saadatmanesh vd. Modeli'nde ortalama, 0.76, standart sapma, 0.07, Samaan vd. Modeli'nde ortalama, 0.83, standart sapma, 0.07, Saafi vd. Modeli'nde ortalama, 0.95, standart sapma 0.08, Xiao ve Wu Modeli'nde ortalama, 0.76, standart sapma, 0.09, Lam ve Teng. Modeli'nde ortalama, 1.07, standart sapma, 0.09 değerleri bulunmuştur.

Çizelge 4.5'de görüldüğü üzere betonarme etriye katkısı düşünülmeden yalnızca CFRP sargı etkisi dikkate alınarak FRP sargılı beton/betonarme numuneler için uygulanan analitik model ve diğer bünyesel beton modelleri ile çözüm yapılmıştır. Bunun sonucunda; LP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modeli'nde ortalama, 0.98, standart sapma, 0.18, Saadatmanesh vd. Modeli'nde ortalama, 0.85, standart sapma, 0.12, Samaan vd. Modeli'nde ortalama, 0.92, standart sapma, 0.11, Saafi vd. Modeli'nde ortalama, 1.05, standart sapma 0.12, Xiao ve Wu Modeli'nde ortalama, 0.87, standart sapma, 0.13, Lam ve Teng. Modeli'nde ortalama, 1.18, standart sapma, 0.13 değerleri bulunmuştur.

CFRP sargılı betonarme kolonlarda etriye etkisi dikkate alınarak ve etriye etkisi ihmal edilerek yapılan analizlerde; CFRP ile sargılamada sargı yanal basıncının, etriyelerce oluşturulan yanal basınca nispetle, beklenildiği gibi, çok yüksek olduğu görülmektedir; bunun pratik anlamı, betonarme etriyeler sargı etkisi oluşturacak mertebede sık ve yoğun olmadığı sürece, sargılama etkileri kabili ihmaldir.

5 SONUÇ ve ÖNERİLER

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarı'nda gerçekleşetirilen bu deneysel çalışmada; kare kesitli (a*a), yükseklik (h)/(a) oranı 5:1 olan klasik enine donatılı (etriyeli) betonarme kolonlarda LP'li sargının kolon davranışına etkisi incelenmiş, elde edilen sonuçlar ile literatürde bulunan çeşitli deneysel veriler temel alınarak LP sargılı betonarme kolon davranışı için önerilmiş başlıca bünyesel modeller karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1) Sargılı betonarme kolonlar için önerilen-r bünyesel modeller; bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen büyük ölçekli betonarme kolon deneylerinden elde edilen sonuçlar ile ve literatürde bulunan çoğunluğu küçük ölçekli beton silindirler numunelerde sargı (kuşatma) etkisini inceleyen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara paralel olarak, betonarme kolonlar için literatürde yer alan Köksal Beton Modeli (2006) LP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

2) Gerçekleştirilen bire bir ölçekli betonarme kolon deneylerinde; numunelerin dört yüzünden alınan LVDT okumalarında, beklenildiği gibi, ilk belirgin şekil değiştirmelerin ortaya çıktığı bölgeye bağlı olarak, bozulan geometrik ve mekanik simetrinin etkisiyle, farklılıkların belirginleştiği görülmüştür. Bu yüzden şekil-değiştirme ölçerlerin, şekil-değiştirmenin yoğunlaşacağı önceden tahmin edilen ve davranışı daha iyi bir şekilde karakterize edebilecek kritik bölgelere yerleştirilmesine özen gösterilmiş, LVDT'lerden aktarılan okumaların ortalamasının alınması yolu ile değerlendirmeler yapılması yoluna gidilmiştir. Bununla beraber bu husus ve ölçme tekniği modelleme açısından tartışmaya açıktır. Kolon orta bölgesine yerleştirilen LVDT okumalarının bünyesel davranışı gerçeğe yakın bir şekilde yansıttığı görülmüş ve FEA ile gösterilmiştir.

3) Betonarme enine donatıyla sargılı kolonlar, maksimum taşıma yüklerine ulaştıktan sonra, yükleme yapılmaya devam edilememiştir; bir başka anlatımla yükleme azalmaya başlayınca deneye son verilmiştir. Bu deneylerde beton kabuğun dökülmesi biçiminde taşıma gücüne ulaşma gözlenmiştir. Buna mukabil LP sargılı kolonlar, maksimum yük aşıldıktan sonra da yük almaya devam edebilmiştir. Bu numunelerde LP sargı bölgesel olarak kısmen yırtılsa da, diğer bölgelerdeki LP sargı çalışmaya devam ederek, göçmeyi belirgin şekilde geciktirmiştir.

KLP kompozit sargının betonarme kolonlarda taşıma gücünü artırarak ve beton ezilmesi ile donatı sıyrılmasından kaynaklanan erken dayanım düşmesini önleyerek önemli oranda sünek davranış sağladığı gözlenmiştir. KLP kompozit sargının betonarme kolonlar üzerinde oluşturduğu kuşatma etkisi ile klasik enine donatıların karşılamış olduğu yanal gerilme azalmakta ve beton bütünlüğü korunarak daha yüksek taşıma kapasitesine ve şekildeğiştirme kapasitesine ulaşılması sağlanmaktadır.

4) Literatürde kabul görmüş çoğu LP sargılı beton modelleri, genelde küçük boyutlu numuneler üzerinde yapılan deneylere dayanılarak geliştirilmiş modelerdir. Bu bağlamdaki önerilerin doğrudan yapı elemenları üzerinde yapılmış deneysel sonuçlarla zenginleştirilmesi arzu edilir. Bu çalışmada, sınırları yukarıda çizilmiş belirli bir alanda birebir ölçekli yapı elemanı deneyleri ile bu yapılmaya çalışılmıştır.

Mevcut LP sargılı kolonlar için geliştirilmiş bünyesel beton modelleri, bu deneylerdeki kolon numunelerine uygulandığında; gerilme-birim kısalma eğrilerine en yakın sonuçları, bu çalışmada **LP sargılı kolonlar için uyarlanan Köksal beton modeli** ile elde edilmiştir. Ayrıca, uyarlanan bu model, literatürde yer alan toplam 128 LP sargılı beton numunenin taşıma güçlerini tahmin etmede, diğer analitik modeller ile karşılaştırılmıştır. Deneyle tespit edilen taşıma güçleri önerilen analitik modelle bulunan taşıma gücüne bölünerek normalize edildiğinde; 1.03 ortalama ve 0.17 standart sapma değerleri ile "Köksal (2006) Modelinin LP sargılı betona uyarlanmış biçimi"nin iyi bir sonuç verdiği görülmüştür. Bu değerler, literatürdeki diğer modellerde; Saadatmanesh vd. (1994) için 1.00 ve 0.20, Samaan vd. (1998) için 1.15 ve 0.22, Saafi vd. (1999) için 1.22 ve 0.25, Xiao ve Wu (2003) için 0.97 ve 0.15, Lam ve Teng (2003) için 1.36 ve 0.29 dur.

Köksal Modeli (2006) kolon deneyleri için yaptığı tahminlerde 0.83ortalama ve 0.12 standart sapma göstermiştir. Farkın nedenlerinin; keskin köşelere sahip kolonlarda kuşatma etkisinin azalması ve yine etriye ve boyuna donatı ile birlikte çalıştırılan LP sargının davranışındaki değişiklikler olabileceği düşünülmüştür. Muhtemelen bu nedenlerle, elde edilen sonuçlar, 128 numune için elde edilenlere göre daha düşük taşıma gücü değerleri vermiştir.

5) Köksal Modeli (2006) FRP sargılı betonarme kolonlara uyarlanırken, sargı etkisi iki şekilde değerlendirilmiştir. İlk olarak etriye ve FRP sargı etkisi birlikte değerlendirilmiş, ikincisinde ise yanal sargılama (kuşatma) basıncı için sadece FRP sargı dikkate alınmıştır. Sonucun, beklenildiği gibi, sargılı kolon taşıma kapasitesi bakımından pratik olarak önemli bir fark

göstermediği görülmüştür; bunun pratik anlamı, FRP sargının oluşturduğu yanal basıncın betonarme eniye donatıca oluşturulan yanal basınca göre oldukça baskın olmasıdır. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.5'de yanal sargı basınçları özetlenmiştir.

6) C1L8S8 kolonu, C1L4S8 kolonuna göre %13.6 mertebesinde daha düşük bir yük taşıma kapasitesi göstermiştir. Boyuna donatı sayısının iki katına çıkartılmasının, beklendiğinin aksine taşıma gücüne olumlu yönde etki etmemiştir. Bunun; betona göre daha rijit bir malzeme olan çelik donatıların etrafında oluşan gerilme yığılmaları olabileceği düşünülmüştür. Böylelikle lokal olarak beton, çelik çubukların etrafında zayıflamakta ve bölgesel kırılmalara dolayısı ile kolonun taşıma gücüne erken ulaşmasına neden olmaktadır. Özellikle bu durumun sargı donatısının zayıf olduğu bölgede gerçekleşmesi beklenir. Buradan, kullanılan etriye çapı ile boyuna donatı sayısı ve çapı arasındaki ilişkinin kolonun taşıma gücünde etkili bir parametre olarak düşünülmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir

7) 5:1 (h/a) oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanların 2:1 oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanlara göre göçme yüküne ulaştıklarında kırılma biçimlerinde farklılık gösterdiği görülmüştür. Benzer sonuç, sonlu elemanlar ile modellenerek, doğrusal olmayan analiz yapıldığında; 5:1 oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanda üst çeyrek kısımda, 2:1 oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanda ise orta kısımda maksimum gerilmeye zorlanarak göçme yüküne ulaştığı görülmüştür. Eksenel basınç altındaki betonarme çubukların davranışında ve kırılma biçiminde boyut (h/a) etkisinin önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

8) Çoğu araştırmacı, eksenel yük altındaki betonarme elemanlarda kırılma bölgesini kontrol altına alabilmek için, ya başlık kısımlarındaki sargıyı güçlendirmiş, ya da eleman orta bölgesindeki sargı etkisini zayıf tutmuştur. Ancak bu tarz bir yaklaşım, elemanın gerçek davranışının belirlenebilmesini mümkün kılmaktan öte, önceden belirli bir davranışa zorlar ki bu da betonarme üzerindeki belirsizliklerin ortadan kalkmasına yardımcı olamaz.

9) YTÜ Yapı Laboratuarı KLP sargılı kolon deneylerinde; duvar kağıdı gibi yüzeye sarılan KLP sargı üzerinden rulo ile geçerek aralarda hava boşluklarının kalması olabildiğince engellenmeye çalışıldı ise de, özellikle iki kat uygulanan KLP sargı işlemlerinde boşlukların kalmaması tam olarak sağlanamamıştır. Bazı araştırmacıların; sargı etkisini kısmen zayıflatan bu hava boşlukları bir ölçüde analitik modellerine yansıtmak amacıyla bir katsayı öngörmüş olsalar da, bu konuda yeterli çalışma olmadığı anlaşılmaktadır. Bu anlamda işçilik kusurlarını azaltmak amacıyla yeni teknikler geliştirilmesine ihtiyaç olduğu açıktır. Bununla beraber, bu

aşamada; birden çok katmanlı LP sargılı numunelerde oluşacak yanal kuşatma basıncının sargı katman sayısı ile orantılı olamayacağı söylenebilir.

10) KLP sargılı betonarme kolon deneylerinde; genel olarak sargının köşe noktalarda koparak yırtılması biçiminde taşıma gücüne ulaşma gözlenmiştir. Bu da göstermektedir ki; sargı işlemi öncesi dörtgen enkesitli kolonların kesit köşelerinin tavsiye edilen yarıçaplarda yuvarlatılmasına özen gösterilmesinin önemi açıktır.

KLP sargı işlemi; hızlı uygulanabilme avantajının yanında, işçilik bakımından titizlik ve teçrübe gerektirir. Uygulamalarda, gerekli verimi alabilmek için, uygulama tekniklerini bilen, ehil kişilere ihtiyaç vardır.

LP sargının sağladığı yukarıda işaret edilen dayanım ve süneklik artışı yanında, kolay ve hızlı uygulanabilirliği de göz önüne alındığında, yapı güçlendirmesinde belirgin bir etkinliğe sahip bir güçlendirme yöntemi olarak ilk sıralarda düşünülebileceği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.

ACI 440R-96 (1996) State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI) Committee 440, Farmington Hills, Michigan, USA.

ACI Committee 440 Report (2002). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" ACI Committee 440, Technical Committee Document 440.2R-02.

Ahmad, S.H., Khaloo, A.R., ve Irshaid, A. (1991), "Behaviour of Concrete Spirally Confined by Fiberglass filaments", Magazine of Concrete Research, v. 43, No. 156, pp. 143-148, Cement Concrete Assocation, London, UK.

Akgün, Ş., (2006), "Betonarme Kolonlarda Kuşatma Etkisi ve Sonlu Eleman Analizleri", YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Assa, B., Nishiyama, M., Watanabe F., (2001a), "New Approach for Modeling of Confinement I Circular Columns", ASCE Structural Journal, July.

Assa, B., Nishiyama, M., Watanabe F., (2001b), "New Approach for Modeling of Confinement I Square Columns", ASCE Structural Journal, July.

Bazănt, Z., P., Xiang., Y., (1997) "Size Effect in Compression Fracture: Splitting Crack and Band Band Propagation" J. Eng. Mech., Am. Soc. Civil Eng. 123:162-172

Berthet, J.F., Ferrier, E., Hamelin, P. (2005), "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study", Construction and Building Materials 19 ,pp. 223–232

Brocca. M., Bazănt, Z., P (2001) "Size Effect in Concrete Columns: Finite-Element Analysis with Microplane Model" J. Struct. Engrg., Volume 127, Issue 12, pp. 1382-1390

Campione, G., Miragia, N. (2003) "Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP", Cement and concrete Composites, 25: 31-41

Celep, Z (2000) "Mevcut Betonerme Binaların Deprem Güvenliğinin Belirlenmesi ve Güçlendirilmesi" TMMOB İnşaat mühendisleri odası, İstanbul şubesi

Chen, W.,F., Han D.J. (1988), "*Plasticity for Structural Engineers*" Springer-Verlag, New York.

Chung, H. S., Yang, K., Y., Lee., Y., H., ve Eun, H., C., (2002) "Strength and Ductility of Laterally Confined Concrete Columns" Can. J. Civ. Eng. 29: 820-830.

De Lorenzis L, Micelli F, La Tegola A. (2002), "Influence of specimen size and resin type on the behavior of FRP-confined concrete cylinders." In: Shenoi RA, Moy SSJ, Hollaway LC, editors, Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, Proceedings of the First International Conference, London, UK: Thomas Telford,:231 239

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2006), 26100 Sayılı Resmi Gazete

Dias da Silva V, Santos JMC.(2001). "Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites." In: Figueiras J, Juvandes L, Faria R, Marques AT, Ferreira A, Barros J, Appleton J, editors, Composites in Constructions, Proceedings of the International Conference, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, pp.257–262.

Doran, B., Köksal, H. O., Polat, Z. ve Karakoç, C. (1998), "Betonarme Elemanlarda Sonlu Eleman Uygulamalarında Drucker-Prager Akma Kriterinin Kullanılması" İMO Teknik Dergi, pp. 1617-1625, yazı 117.

Elmas, M., Çaglar, N. ve Mert, N. (1997), "Structural Behaviour of RC Beams Strengthened Glued with Epoxy of Thin Steel Plates", Proceedings of III. Technical Congress, Middle East Technical University, Vol. 3, pp. 763-772, 15-16 September 1997, Ankara.

İlki, A., Kumbasar, N.(2002), "Compressive Behaviour of Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets", Structural Engineering and Mechanics, Vol.13, No.1, pp.75-90

İlki, A., Kumbasar, N. (2003), "Compressive Behaviour of Carbon Fiber Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-Circular Cross-sections", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 381-406.

İlki, A., Kumbasar, N., Özdemir, P., Fukuta, T., (2004), "A Trilinear Stress-Strain Model for Confined Concrete", Str.Eng. and Mech., Vol. 18, No. 5, 2004, pp. 541-563

Fam, A.Z, Rizkalla, S.H. (2001), "Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes" ACI Struct J volume 98, no.4 , pp.451 –61.

Fardis, M. N. And Khalili, H. (1982), "Conrete encased in fiberglass-reinforced plastic", ACI Journal, vol.78, pp. 440-445.

Fardis, M.N. and Khalili, H. (1982), "FRP-encased Concrete as a Structural Material" Magazine of Concrete Research, 34(122): 191–202.

Harmon T.G., Slattery K.T. (1992), "Advanced Composite Confinement of Concrete" 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Sherbrooke, Québec, Canada. pp. 299-306.

Hognestad, E., (1951), "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", Bulletin Series No.399, University of Illinois Eng. Exp. Station, Urbana.

Karakoç, C., Polat, Z., Köksal, H.O., Turgay, T. ve Akgün, Ş. (2006), "Evaluation of Experimental Procedures for Confined Concrete Columns Using 3D Finite Element Analyses" Third International Conference on High Performance Structures and Materials, Wessex Institute of Technology Ostend: Belgium (to be printed in HPSM CMEM-2007)

Karamuk, E, (2005), "Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzeme ile Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların Eksenel Yükler Altında Davranışı" Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü

Karbhari, V. M. ve Gao, Y. (1997), "Composite jacketed concrete under unaxial compression-verification of simple design equations", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 185-193.

Kim, J., K. Ve Yi., S., T., (2002) "Application of Size Effect to Compressive Strength of Concrete Members", Sadhana Vol.27, Part 4 , August 2002, pp. 467-484. Printed in India.

Koç, V, (2004), "Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzemeler ile Güçlendirilmiş Düşük ve Normal Dayanımlı Beton Elemanların Davranışı", İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Kono S., Inazumi M., Kaku T.,(1998) Evaluation of Confining Effects of CFRP Sheets on Reinforced Concrete Members. Proceedings of the 2nd International Conference on composites in Infrastructure ICCI'98, 5-7 January . Tucson, Arizona. pp. 343-355

Köksal, H.O. (1998), "Modelling of Concrete Fracture" Doktora Tezi, Boğaziçi University, İstanbul.

Köksal, O., Doran, B., Polat, Z. ve Karakoç, C., (1998), "Betonarme Elemanlarda Yapılan Sonlu Elemanlar Uygulamalarında Drucker-Prager Akma Kriterinin Kullanılması", *Teknik Dergi (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayın Organı*, Vol. 9, No. 2, pp. 1617-1627, April.

Köksal, H. O. (2006), "A Failure Criterion for RC Members under Triaxial Compression, Structural Engineering and Mechanics", Techno Press 24(2): 137-154.

Kshirsagar, S., Lopez-Anido, R.A., Gupta, R,K., (2000), "Environmental aging of fiber-reinforced polymer-wrapped concrete cylinders." ACI Mater J;97(6):703 –12.

Kunduracı, L., (2004), "Betonarme Çerçeve Sistemlerin, Doğrusal Olmayan İtme Analizleri" YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,

Lam, L. And Teng, J. G. (2001a) "Strength models for FRP-confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Submitted.

Lam, L. and Teng, J.-G. (2002), "Strength Models for Fiber-Reinforced-Plastic-Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, 128 (5): 612–623.

Lam, L. and Teng, J.-G. (2003), "Design-oriented Stress-strain Models for FRP-confined Concrete" Construction and Building Materials, in press.

Lin, C.T., Li Y.F., (2003), "An effective peak stress formula for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics", Canadian Journal of Civil Engineering, 30, pp.882-889

Lorenzis,L. (2001), "A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composite" Chalmers University.

Marques, S. P. C., Marques, D. C. S. C., Silva, J. L., and Cavalcante, M. A. A. (2004), "Model for Analysis of Short Columns of Concrete Confined by Fiber-Reinforced Polymer" Journal of Composites for Construction., Volume 8, No.4, pp. 332-340 (July/August)

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988), "Theoritical stress-strain model for confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988), "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, no. 8, pp. 1827-1849.

Masia., M.,J., Gale. T., N., Shrive., N., G., (2004) "Size Effect in Axially Loaded Square Section Concrete Prisms Strengthened Using Carbon Fibre Reinforced Polymer Wrapping" Can. J. Civ. Eng. 31: 1-13.

Matthys,S., Taerwe, L., Audenaert, K., (1999), "Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping" Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP-188, Farmington, Michigan, USA: American Concrete Institute, pp:217–229.

Matthys, S., Toutanji, H., Taerwe, L., (2006), "Stress–Strain Behavior of Large-Scale Circular Columns Confined with FRP Composites" J. Struct. Engrg., Volume 132, Issue 1, pp. 123-133

Micelli F, Myers JJ, Murthy S. , (2001), "Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP" Proceedings of CCC2001 International Conference on Composites in Construction, Porto, Portugal October 10-12.

Mirmiran, A. ve Shahawy, M. (1996), "A new concrete-Filled hollow FRP composite column", Composites: Part B, Vol. 27B, pp. 263-268

Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M. ve El Echary, H. (1998), "Effect of column parameters on FRP-confinede concrete", Joournal of Composites for Construction, ASCE, Vol.2, No. 4, pp.175-185.

Mirmiran, A., Shahawy, M. ve Samaan, M. (1999), "Strength and ductility of hybrid FRP-concrete beam-columns", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 1085-1093.

Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T. ve Kobayashi, A. (1999), "Strengthening Effects of Concrete Columns with Carbon Fiber Sheet" Transactions of The Japan Concrete Institute, 21: 143–150

Nanni, A. ve Bradford, N. M. (1995), "FRP Jacketed concrete under uniaxial compression" Construction and Building Materials, Vol.9, No.2, pp. 115-124, Elsevier Science Ltd., London, UK.

Nanni, A. ve Norris, M.S. (1995), "FRP Jacketed concrete under flexure and conbined flexure-compression", Construction and Building Materials, Vol. 9, No.5,pp. 273-281.

Ohno, S., Miyauchi, Y., Kei, T. ve Higashibata, Y. (1997), "Bond properties of CFRP plate joint", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Sapporo, Japan, pp.241-248.

Park, R. ve Paulay, T. (1975), "Reinforced Conrete Structures", John Wiley & sons, New York, USA.

Pessiki S, Harries KA, Kestner JT, Sause R, Ricles JM. (1997), "Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets" Journal of Composites in Constraction, ASCE Volume,5(4):237-45

Picher F., Rochette P., Labossiére P., (1996), "Confinement of Concrete Cylinders with CFRP" Proceedings of the 1st Composites in Infrastracture ICCI'96, 15-17 January. Tucson, Arizona. Pp.829-841.

Polat, Z., Doran, B., Köksal, H.O., (2000), "Drucker-Prager Akma Kriteri Kullanılarak Betonda Doğrusal Olmayan Davranışın İncelenmesi", YTÜD, Journal of Yıldız Technical Univercity, 2000-1, sf. 1-10. ISSN:1300-1220

Popovics, S. (1973), "A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 5, pp. 583-599.

Priestley, M. J. N., Seible, F. ve Calvi, G. M. (1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, New York, USA.

Purba, B.K. ve Mufti, A.A. (1999), "Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 26, pp. 560-596.

Restrepol, J.I. ve De Vino, B. (1996), "Enhancement of the Axial Load-capacity of Reinforced Concrete Columns by Means of Fiberglass-epoxy Jackets", In: El-Badry, M.M. (ed.), Proceedings, Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, pp. 547–690, Montreal, Canada.

Richart, F.E., Brandtzaeg, A. ve Brown, R.L. (1928), "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stress", University of Illinois, Engineering Experimental Station, Illinois, USA.

Richard, R M., ve Abbott, B. J. (1975), "Versatile elastic-plastic stress-strain formula" Journal of Engr. Mech., ASCE 101(4): 511-5.

Rochette, P. ve Labossiere, P. (2000), "Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites", Journal of Composites for Construction, ASCE, 4(3): 129–136.

Rousakis, T., (2001), "Experimental Investigation of Concrete Cylinders Confined by Carbon FRP Sheets, Under Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load." Research Report, Chalmers Univercity of Technology, Göteborg, Sweden.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. ve Li, M. W. (1994), "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 4, pp. 434-447.

Saafi, M., Toutanji, H. A. ve Li, Z. (1999), "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes", ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.

Saatçioğlu, M., Elnabelsy, G., (2001), "Seismic Retrofit of Bridge Columns with CFRP Jackets", Composites in Civil Engineering.No.1, pp.833-838.

Samaan, M., Mirmiran, A. ve Shahawy, M. (1998), "Model of Concrete Confined by Fiber Composites", Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(9): 1025–1031.

Saatçioğlu, M. (2002) "Yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde yeni yöntemler", Yapıların onarım ve güçlendirilmesi alanında yeni gelişmeler, İTÜ, 10 mayıs 2002:221-232

Samdani, S., (2003), "Analytical Study of FRP-confined Concrete Columns" A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of master of applied science in civil engineering (structures) Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Seible, F.,Priestley, M.J.N., Hegemier, G. A. ve Innamorato, D. (1997), "Seismic retrofit of RC columns with continous carbon fiber jackets", Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 1, No.2, pp. 52-62.

Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman, A.,(2000), "Test and modeling of carbon-wrapped concrete columns" Composites Part B, No. 31, pp.471 –80. Engineering, ASCE

Shehata, I.A.E.M, Carneiro, L.A.V., Shehata, L.C.D.,(2002), "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets" Mater Struct;35(1):50 –8.

Sheikh, Shamim A., Yau, Grace, (2002), "Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers", ACI Structural Journal, 99(1): 72-80.

Shrive,P.L., Azarnejad, A., Tadros, G., McWhinnie, C. ve Shrive, N.G. (2003), "Strengthening of concrete columns with carbon fibre reinforced polymer wrap". Can. J. Civ. Eng. 30(3): 543-554.

Söylemez, F., (2006), "Betonarme Kolonlarda Kuşatma Etkisi İçin Sonlu Eleman Modeli", YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Spoelstra, M.R. ve Monti, G. (1999), "FRP-confined Concrete Model" Journal of Composites for Construction, ASCE, 3(3): 143–150.

Tezcan, A., (2004), "Kolon Sarılma Bölgelerinin CFRP Kompozitler ile Güçlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Turgay, T., Köksal, H.O., Polat, Z., Karakoç, C. (2007), "Stress-strain Chracteristics of RC Columns Externally Confined with CFRP Jackets", International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-6, 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Catania, ITALY, June 17-22, 2007.

Toutanji, H.A. (1999), "Stress-strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", ACI Materials Journal, 96(3): 397–404.

Xiao, Y. ve Wu, H. (2000), "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 12(2): 139–146.

Watanabe, K.,Nakamura, H., Honda, Y., Toyoshima, M., Iso M., Fujinaki T., Kaneto M., Shirai, N. (1997), "Confinement Effect of FRP Sheet on Strengt h and Ductility of Concrete

Cylinders under Uni-axial Compression." In:Proceeding s of the Third International Symposium on Non-Metallic FRP for Concrete Structures, Japan,1997,pp.233-240

Wang, P., Cheong, K.K., (2001),"RC columns strengthened by FRP under uniaxial compression" In: Teng, JG, editor, FRP Composites in Civil Engineering, Proceedings of the International Conference, edited by Teng JG, Oxford, UK: Elsevier Science Ltd, pp.327–334.

Wang, Y.C. ve Restrepo, J. I. (2001), "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-reinforced Polymer Jackets", ACI Structural Journal, 98(3): 377–385.

William, K J., ve Warnke, E. P. (1975), "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete" Proc., International Association for Bridge and Struct. Engr., 19: 130.

Xiao, Y., Wu, H.., (2000), "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets" J Mater Civ Eng ASCE;12(2):139 –46.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.04.1974	
Doğum yeri	Bolu	
Lise	1985-1992	İzzet Baysal Anadolu Lisesi
Lisans	1993-1997	Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1997-2000	Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	2001- 2007	Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurumlar

1998-2001	Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Arş. Gör.
2001-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi, Arş. Gör.

0030754

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Frp Uyg. Eks. Yüklü Bet. Kol. Davranışı

Doktora Tezi

TAHSİN TURCAY

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC) : R 150/623

Kayıt No : 3739

Geldiği Yer : Fen Bilimler Ens.

Tarih : 27.12.2007

Fiyat : 8,85

Fatura No :

Ayniyat No : 23

Ek :

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Demirbaş No:.....

2550702039999318070000 1

FRP UYGULANMIŞ EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN DAVRANIŞI

623

İnşaat Yük. Müh. Tahsin TURGAY

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi	:	29 Haziran 2007
Tez Danışmanı	:	Prof. Zekeriya POLAT (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı	:	Doç. Dr. H. Orhun KÖKSAL (YTÜ)
Jüri Üyeleri	:	Prof. İbrahim EKİZ (YTÜ)
	:	Prof. Dr. Cengiz KARAKOÇ (BÜ)
	:	Prof. Dr. Muzaffer ELMAS (SAÜ)
	:	Doç. Dr. Alper İLKİ (İTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ....i
KISALTMA LİSTESİ....iv
ŞEKİL LİSTESİ....v
ÇİZELGE LİSTESİ....xiii
ÖNSÖZ....xiv
ÖZET....xv
ABSTRACT....xvi
1. GİRİŞ....1
1.1 Genel Bilgiler....1
1.2 Önceki Çalışmalar....3
1.3 Çalışmanın Amacı....7
2. KOMPOZİT MALZEMELER....8
2.1 Lifli Polimerler (LP)....9
2.1.1 Lifler....9
2.1.2 Liflerin Özellikleri....9
2.1.3 Liflerin Fiziksel Özellikleri....10
2.1.3.1 Kimyasal Direnç....10
2.1.3.2 Ultraviole ışınıma karşı direnç....10
2.1.3.3 Elektrik iletkenliği....10
2.1.3.4 Basınç Mukavemeti....10
2.1.3.5Rijitlik....10
2.1.3.6.Yangın....10
2.1.4 Liflerin Mühendislik Özellikleri....11
2.1.4.1 Dokumalar(Wraps)....11
2.1.4.2 Levhalar....11
2.1.4.3 Lif Seçimi....11
2.1.4.4 Yapıştırıcılar....12
2.2 FRP Kompozitlerin Yapısı....12
2.3 FRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri....13
2.4 Eksenel ve Eksantrik Yüklü Kolonların Güçlendirilmesi....14
2.4.1 FRP Kompozit Malzemesi ile Güçlendirme Yöntemleri....16
2.4.1.1 Sargılama....17
2.4.1.2 Lif Doğrultusunda Sargılama....17

2.4.1.3 Prefabrike Manto Kullanılması (Prefabricated Shell Jacketing)....18
2.4.2 Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması....18
2.4.2.1 Uygulama Yönünden....18
2.4.3 Kesit Şeklinde İyileştirme....20
2.5 Sargılı Betonarme Kolonun Tipik Davranışı ve Göçme Modu....21
2.5.1 Dairesel Betonarme Kolon....21
2.5.2 Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolon....22
2.5.3 FRP Sargılı Betonun Basınç Dayanımı....23
3. DENEYSEL ÇALIŞMA....24
3.1 FRP Kompozit Malzemesi ile Kolonların Sarılması....24
3.2 Deney Programı....24
3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler....25
3.3.1 Beton Özellikleri....25
3.3.2 Çelik Özellikleri....26
3.3.3 FRP Kompozit Malzemesi Özellikleri....26
3.3.4 Karbon Lifli Kompozitlerin Sarılması....26
3.3.5 Deney Platformu....27
3.3.6 Ölçüm Düzeni....27
3.4 Diğer Araştırmacılara Ait Yapılmış Deneysel Çalışmalar: 34
3.5 Deneylerde Kullanılacak Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özellikleri....38
3.6 C1 Serisi Kolon Deneyleri 38
3.6.1 C1L4S8 Kolonu....38
3.6.2 C1L4S12 Serisi Kolonu....41
3.6.3 C1L8S8 Kolonu....43
3.6.4 C1L8S12 Kolonu....44
3.7 C2 Serisi Kolon Deneyleri 52
3.7.1 C2L4S8 Kolonu....53
3.7.2 C2L4S12 Kolonu....54
3.7.3 C2L8S8 Kolonu....57
3.7.4 C2L8S12 Kolonu....58
3.8 C3 Serisi Kolon Deneyleri....61
3.8.1 C3L4S8 Kolonu....61
3.8.2 C3L4S12 Kolonu....63
3.8.3 C3L8S8 Kolonu....64

3.8.4 C3L8S12 Kolonu....65
3.9 C4 Serisi Kolon Deneyleri....68
3.9.1 C4L4S8 Kolonu....68
3.9.2 C4L4S12 Kolonu....70
3.9.3 C4L8S8 Kolonu....73
3.9.4 C4L8S12 Kolonu....74
3.10 C5 Serisi Kolon Deneyleri....82
3.10.1 C5L4S8 Kolonu....82
3.10.2 C5L4S12 Kolonu....85
3.10.3 C5L8S8 Kolonu....88
3.10.4 C5L8S12 Kolonu....90
3.11 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi....97
4 . BETONARME KOLONLARDA SARGILANMIŞ(KUŞATILMIŞ) BETON İÇİN BÜNYESEL MODELLER....101
4.1 Giriş....101
4.2 Çelik Sargılı Kolonlar....101
4.2.1 Richart, Brandtzaeg and Brown (1929)....101
4.2.2 Mander Beton Modeli (1988)....102
4.2.2.1 Etkili Sargı Basıncı ve Sargı Etkinlik Katsayısı....109
4.2.2.2 Sipiral ya da Halka Enine Donatıyla Sargılanmış Kesitlerde Sargı Etkinlik Katsayısı....110
4.2.2.3 Dikdörtgen Sargılı Kolonlar için Sargı Etkinlik Katsayısı....111
4.2.2.4 Sargılanmış Beton Taşıma Gücü....113
4.2.2.5 Betondaki En Büyük Birim Kısalma....114
4.2.3 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre Sargılı Beton Modeli(2006)....115
4.3 LP Sargılanmış Kolonlar....117
4.3.1 Saadatmanesh, Ehsani ve Li Sargı Modeli (1994)....117
4.3.2 Samaan, Mirmiran ve Shahawy Sargı Modeli (1998)....119
4.3.3 Saafi, Toutanji ve Li Sargı Modeli (1999)....122
4.3.4 Yung C. Wang ve Jose I. Restrepo Sargı Modeli, (2001)....124
4.3.5 Lam ve Teng Sargı Modeli (2003)....126
4.3.6 Xiao ve Wu Sargı Modeli (2000)....129

4.3.7 Köksal Modeli (2006) ve Köksal Modelinin LP Sargılı Betonarme Kolonlara Uygulanması.....130
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....167
KAYNAKLAR.....171
ÖZGEÇMİŞ.....178

SİMGE LİSTESİ

A	Etkinsiz kuşatılmış beton kesit alanı
A_{co}	Beton çekirdek alanı
A'_{co}	Net beton çekirdek alanı
A_{et}	Etkin kuşatılmış beton kesit alanı
A_{sh}	Sargı (kuşatma) donatısı toplam alanı
A_{shx}	x doğrultusundaki sargı donatısı toplam alanı
A_{shy}	y doğrultusundaki sargı donatısı toplam alanı
A_{si}	i. donatı sırasındaki toplam boyuna donatı alanı
A_{sp}	Spiral veya halka sargı donatısı kesit alanı
a_0	Malzeme sabiti
a_1	Malzeme sabiti
a_2	Malzeme sabiti
b	Kesit genişliği
b_0	Malzeme sabiti
b_1	Malzeme sabiti
b_2	Malzeme sabiti
b_{co}	Kesit genişliği doğrultusunda en dış sargı donatısı merkezleri arasındaki mesafe
b'_{co}	Kesit genişliği doğrultusunda en dış sargı donatısı dıştan dışa mesafe
c	Kohezyon açısı
d	Sargı donatısının çapı
d_i	i. donatı sırasının beton kesitin üst kenarına olan mesafe
d_s	Spiral veya halka sargı donatısının merkezleri arasındaki mesafe
E	Elastisite Modülü
E_c	Betonun elastisite modülü
E_s	Çeliğin elastisite modülü
E_{FRP}	Lifli polimerin elastisite modülü
E_{sec}	Sekant elastisite modülü
f_{cc}	Betonun çok eksenli yük altında taşıma gücü
f'_c	Sargısız beton basınç dayanımı
f_s	Çelikteki basınç veya çekme gerilmesi
f_{sh}	Sargı donatısındaki gerilme
f_{si}	i. donatı sırasındaki gerilme
f_{su}	Çeliğin kopma gerilmesi
f_{t1}	Sıvı kuşatma basıncı
f_{t2}	Elastik ve izotropik malzeme kuşatma etkisi altındaki eksenel yük dayanımı
f_{u2}	Elastik ve izotropik malzeme eksenel yük dayanımı
f_y	Çeliği akma gerilmesi
f_{yh}	Sargı donatı çeliğinin akma dayanımı
h	Kesit yüksekliği
h_{co}	Kesit yüksekliği doğrultusunda en dış sargı donatısı merkezleri arasındaki mesafe
h'_{co}	Kesit yüksekliği doğrultusunda en dış sargı donatısı dıştan dışa mesafe
I_1	Gerilme tansörünün birinci invaryantı
I_2	Gerilme tansörünün ikinci invaryantı
J_2	Deviatörik gerilme tansörünün ikinci invaryantı
K	Düzeltme katsayısı
k	Malzeme sabiti
k_e	Sargılama etkinlik katsayısı
kd	Tarafsız eksen derinliği

k_1	Poisson oranına bağlı kuşatma gerilmesi katsayısı
k'_1	Poisson oranına bağlı bir fonksiyon
k_2	Azaltma katsayısı
k_{2x}	x doğrultusundaki azaltma katsayısı
k_{2y}	y doğrultusundaki azaltma katsayısı
M	Moment
M_y	Akma momenti
m	Çeliğin malzeme özelliklerine bağlı bir katsayı
n	LP sargı sayısı
P	Eksenel kuvvet
P_d	Betonarme kesit eksenel yük dayanımı
R	Eğrilik yarıçapı
r	Betonun elastisite ve sekant elastisite modüllerine bağlı bir fonksiyon
r_1	Çeliğin kopma ve pekleşme birim şekildeğiştirmeleri arasındaki fark
s	Kuşatma donatısı adım veya konma mesafesi
s'	Kuşatma donatıları arasındaki temiz mesafe
S_i	i. donatı sırasındaki toplam çekme veya basınç kuvveti
s_l	Komşu iki boyuna donatı merkezleri arasındaki en büyük mesafe
s_{lx}	x doğrultusunda komşu iki boyuna donatı merkezleri arasındaki en büyük mesafe
s_{ly}	y doğrultusunda komşu iki boyuna donatı merkezleri arasındaki en büyük mesafe
t	LP sargı kalınlığı
w'	Komşu iki boyuna donatı arasındaki temiz mesafe
x	Beton birim şekil değiştirmesine bağlı bir fonksiyon
y_m	Etkili sargılanmış alanı veren eğrinin en büyük değeri
α	Toplam gerilme çarpanı
α_1	Sargı donatısının doğrultusu ile kesitin kenar doğrultusu arasındaki açı
α_2	Malzeme sabiti
α_3	Etkili sargılanmış alanı veren eğrinin şeklinin kabulüne göre değişen bir katsayı
ε_c	Betondaki birim şekildeğiştirme
ε'_c	Betondaki en büyük gerilmeye karşılık gelen birim şekildeğiştirme
ε_{cm}	Betonarme enkesit en üst basınç lifindeki birim şekil değiştirme
ε_{cu}	Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme
ε_{cy}	Çekme donatısının akma anına karşılık gelen betonarme enkesit en üst basınç lifindeki birim şekil değiştirme
ε_{rup}	LP sargıdaki en büyük birim şekildeğiştirme
ε_s	Donatıdaki birim şekildeğiştirme
ε_{sf}	Donatı kopma gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme
ε_{sh}	Çeliğin pekleşme başlangıç birim şekildeğiştirmesi
ε_{si}	i. donatı sırasındaki birim şekildeğiştirme
ε_{sp}	Kaplama betonunun dökülme anındaki birim şekildeğiştirme
ε_{sy}	Çeliğin akma birim şekildeğiştirmesi
ε_l	Sargılanmış beton en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme
ϕ	Donatı çapı
ϕ_1	Betonun içsel sürtünme açısı
γ	Ağırlık merkezi çarpanı
φ	Elemanın birim uzunluğundaki dönme (eğrilik)
φ_y	Akma eğriliği
λ	Etkili sargılanmış beton alanının çekirdek alanına oranı

μ	Poisson oranı
θ	Etkili sargılanmış beton alanını tanımlayan eğrinin başlangıç eğiminin açısı
ρ_c	Deviatorik gerilme (θ=90°)
ρ_{co}	Toplam boyuna donatı alanının beton çekirdek alanına oranı
ρ_s	Kuşatma donatısının hacimsel oranı
ρ_t	Deviatorik gerilme (θ=0°)
ρ_{sx}	x doğrultusundaki sargı donatısının hacimsel oranı
ρ_{sy}	y doğrultusundaki sargı donatısının hacimsel oranı
σ_l	Sargı gerilmelerinin küçük olanı
σ_m	Ortalama gerilme
σ_1	Sargılanmış beton basınç dayanımı
σ_2	2 doğrultusundaki sargı basıncı
σ_3	3 doğrultusundaki sargı basıncı
σ'_3	Etkili sargılama basıncı
σ_{3e}	Eşdeğer sargılama basıncı
σ_{3ex}	x doğrultusundaki eşdeğer sargı basıncı
σ_{3ey}	y doğrultusundaki eşdeğer sargı basıncı
σ_{3x}	x doğrultusundaki sargı basıncı
σ'_{3x}	x doğrultusundaki etkili sargı basıncı
σ_{3y}	y doğrultusundaki sargı basıncı
σ'_{3y}	y doğrultusundaki etkili sargı basıncı

KISALTMA LİSTESİ

DP	Drucker Prager
FRP	Fiber donatılı polimer (Fiber Reinforcement Polymer)
KLP	Karbon lifli polimer
LP	Lifli polimer
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 FRP ve yumuşak çeliğin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....13
Şekil 2.2 FRP ile sarılmış beton için gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi, (Purba ve Mufti, 1999).....16
Şekil 2.3 Betonarme kolonlar için tipik sargılama yöntemleri a) FRP tabakası ile tamamen sarma, b) FRP tabakası ile sürekli kısmî spiral sargı, c) FRP tabakası ile kısmî sargılama.....17
Şekil 2.4 Lif doğrultusunda sargı makinesiyle sargılanma.....18
Şekil2.5 Dikdörgen kolonda şekil iyileştirme ve FRP sargı ile güçlendirme (a) köşe yuvarlatmasız, (b) köşe yuvarlatmalı.....19
Şekil 2.6 Prefabrik FRP kabuklar: (a) solda Mander tipi, sağda kabuk tipi, (b) kabuğun montaj için açılması (Teng vd., 2002).....20
Şekil 2.7 FRP kompozitte yanal kuşatma(sargı) basıncı.....21
Şekil 2.8 FRP ile sargılanmış betonarme enkesitinde, etkili sargı çekirdeği.....22
Şekil 2.9 FRP sargılı kare betonarme numunenin göçme modu (YTÜ deneyleri, 2006) 22
Şekil 3.1 Numune köşelerinin çeyrek daire kesitinde yuvarlatılması.....27
Şekil 3.2 YTÜ deneylerinde deney düzeneği ve kolon donatı detayı.....28
Şekil 3.3 Numune üzerinde LVDT'lerin montajı.....29
Şekil 3.4 Betonarme kolonların sonlu elemanlar ile modellenerek doğrusal olmayan analizi sonucunda eksenel kısalmaların kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).....30
Şekil 3.5 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda, kırılmaya neden olacak çekme gerilmelerinin kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).....31
Şekil 3.6 Eksenel yük etkisinde C1L4S8 BA kolonun yük altındaki dörtte birine ait yanal şekil değiştirme dağılımı.....33
Şekil 3.7 Basınç kırılmasında, boyut etkisi (Kim ve Tae Yi, 2002).....36
Şekil 3.8 Boyut etkisinden dolayı basınç altında kırılma şekilleri (Kim ve Tae Yi, 2002).....36
Şekil 3.9 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda, kırılmaya neden olacak maksimum çekme gerilmeleri dağılımı.....37
Şekil 3.10 Beton kolonlarda sonlu elemanlar analizi ile boyut etkisinin incelenmesi (Michele Broccal and Zdenek P. Bazant, 2001).....37
Şekil 3.11 C1L4S8 kolonu ve beton dökülmeden önce hazırlanmış donatı kafesi.....39
Şekil 3.12 C1L4S8 kolonu üst kısmında deney esnasında oluşan çatlaklar.....39
Şekil 3.13 C1L4S8 kolonu alt kısmında oluşan çatlaklar.....40
Şekil 3.14 C1L4S8 kolonu deney sonrasında üst kısımda oluşmuş çatlaklar.....40
Şekil 3.15 C1L4S12 kolonu.....41
Şekil 3.16 C1L4S12 kolonu (yükleme esnasında ilk çatlakların oluştuğu kısım).....41
Şekil 3.17 C1L4S12 kolonu, artan yükle beraber açılan çatlak.....42
Şekil 3.18 C1L4S12 kolonu (üst başlığında görülen ezilme).....42
Şekil 3.19 C1L8S8 kolonu.....43
Şekil 3.20 C1L8S8 kolonu (yüklemeyle beraber ilk görülen çatlak).....43
Şekil 3.21 C1L8S8 kolonu (alt uç kısmında oluşan çatlak).....44
Şekil 3.22 C1L8S12 serisi kolonu.....44
Şekil 3.23 C1L8S12 kolonu (üst uç bölgesi).....45
Şekil 3.24 C1L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....46
Şekil 3.25 C1L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....46
Şekil 3.26 C1L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....47
Şekil 3.27 C1L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....47

Şekil 3.28 Betonarme kolonun sonlu elemanlar programında hatalı ve hatasız olarak sonlu elemanlara ayrılması (Köksal vd., 2006).....48
Şekil 3.29 Deney sonuçlarından elde edilen üç LVDT'nin ortalama okumaları ile geometrik hatalar etkisinde modellenen kolonların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre eksenel yük-eksenel kısalma eğrilerinin karşılaştırılması (Köksal vd., 2006).....49
Şekil 3.30 İdeal kolondaki sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ağır hasar görmüş bölgeye yerleştirilen kritik LVDT okumalarının karşılaştırılması (Köksal vd., 2006).....50
Şekil 3.31 C2L8S12 kolonuna ait: (a) Şiddetli oturmuş kenar (b) Komşu kenardaki makro çatlaklar (Köksal vd., 2006).....51
Şekil 3.32 C2L4S12 kolonu.....53
Şekil 3.33 C2L4S8 kolonu (deney sonrası alt uç bölgesi).....54
Şekil 3.34 C2L4S12 serisi kolonu.....54
Şekil 3.35 C2L4S12 serisi kolonu.....55
Şekil 3.36 C2L4S12 kolonu (deney sonrası göçme bölgesinin görünümü).....56
Şekil 3.37 C2L8S8 kolonu.....57
Şekil 3.38 C2L8S8 kolonu (deney sonrası kolon alt uç bölgesi).....57
Şekil 3.39 C2L4S12 kolonu.....58
Şekil 3.40 C2L8S12 kolonunda oluşan hasarın yakın plan hasar görünümü.....58
Şekil 3.41 C2L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....59
Şekil 3.42 C2L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....59
Şekil 3.43 C2L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....60
Şekil 3.44 C2L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....60
Şekil 3.45 C3 kolon deneylerine ait düzenek.....61
Şekil 3.46 C3L4S8 kolonu.....62
Şekil 3.47 C3L4S8 kolonu (deney sonrası alt kısımda LP sargının kopması sonrasında görülen beton ezilmeleri).....62
Şekil 3.48 C3L4S12 kolonu.....63
Şekil 3.49 C3L4S12 kolonu (göçme yüküne ulaşmasıyla beraber LP sargı ve etriyenin kopmuş olduğu görülmüştür).....63
Şekil 3.50 C3L8S8 serisi kolonu.....64
Şekil 3.51 C3L8S8 kolonu, deney sonrası 64
Şekil 3.52 C3L8S12 kolonu.....65
Şekil 3.53 C3L8S12 kolonu, deney sonrası.....65
Şekil 3.54 C3L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....66
Şekil 3.55 C3L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....66
Şekil 3.56 C3L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....67
Şekil 3.57 C3L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....67
Şekil 3.58 C4L4S8 kolonu.....68
Şekil 3.59 C4L4S8 kolonu göçme yüküne ulaşması sonucu LP sargının kopması.....69
Şekil 3.60 C4L4S8 kolonu kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı.....69
Şekil 3.61 C4L4S8 kolonu, kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı (başka bir açıdan görünümü).....70
Şekil 3.62 C4L4S12 kolonu.....71
Şekil 3.63 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar).....71
Şekil 3.64 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar).....72
Şekil 3.65 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar ve orta gövdeye doğru ilerleyen çatlaklar).....72
Şekil 3.66 C4L8S8 kolonu.....73
Şekil 3.67 C4L8S8 kolonu, deney sonrasında kopan LP sargının el ile sıyrılması ile

görülebilen betondaki hasar.....74
Şekil 3.68 C4L8S12 kolonu.....75
Şekil 3.69 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar.....75
Şekil 3.70 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar.....76
Şekil 3.71 C4L8S12 kolonu deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar.....76
Şekil 3.72 C4L8S12 kolonu, deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar.....77
Şekil 3.73 C4L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....78
Şekil 3.74 C4L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....78
Şekil 3.75 C4L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....79
Şekil 3.76 C4L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....79
Şekil 3.77 C1,C2,C4 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....80
Şekil 3.78 C1,C2,C4 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....80
Şekil 3.79 C1,C2,C4 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....81
Şekil 3.80 C1,C2,C4 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....81
Şekil 3.81 C5L4S8 kolonu.....82
Şekil 3.82 C5L4S8 kolonu, deney esnasında kolon orta bölgesinde LP sargı kopma.....83
Şekil 3.83 C5L4S8 kolonu, deney sonrasında kolon üst başlık kısmından kopan LP sargının daha sonra el ile açılmasıyla ortaya çıkan betondaki hasar.....83
Şekil 3.84 C5L4S8 kolonunda deney sonrası oluşan hasarın değişik açılardan görünüşü(Göçme yüküne yakın LP sargı yüzeyinde buruşmalar oluşmuştur).....84
Şekil 3.85 C5L4S12 kolonu.....85
Şekil 3.86 C5L4S12 kolonu, deney sonrası oluşan hasar.....86
Şekil 3.87 C5L4S12 kolonu, deney sonrası alt kısımda LP sargının açılmasıyla görülebilen betondaki hasar.....87
Şekil 3.88 C5L4S12 kolonu, deney sonrası LP sargının el ile sıyrıldıktan sonra beton ile temas eden yüzeyin görünüşü.....87
Şekil 3.89 C5L8S8 kolonu.....88
Şekil 3.90 C5L8S8 kolonu, deney sonunda LP sargının koptuktan sonra el ile sıyrıldığında betonda görülen hasar.....89
Şekil 3.91 C5L8S12 kolonu.....90
Şekil 3.92 C5L8S12 kolonu, deney sonrası kolon orta kısmı üzerinde oluşan hasar.....91
Şekil 3.93 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar.....91
Şekil 3.94 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar 92
Şekil 3.95 C5L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....93
Şekil 3.96 C5L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....93
Şekil 3.97 C5L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....94
Şekil 3.98 C5L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....94
Şekil 3.99 C1,C3,C5 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....95
Şekil 3.100 C1,C3,C5 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....95
Şekil 3.101 C1,C3,C5 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....96
Şekil 3.102 C1,C3,C5 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....96
Şekil 3.103 Farklı sargı biçimlerine göre deney kolonlarının taşıma kapasitesi.....99
Şekil 3.104 Benzer kolonların farklı sargı biçimleriyle kıyaslanması.....100
Şekil 4.1 Silindir beton numuneler için üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Whittaker A., 2000).....103
Şekil 4.2 Çok eksenli gerilme altında gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Chen ve Han, 1988).....104

Şekil 4.3 Mander beton modeli (1988).....105
Şekil 4.4 Yanal sargı basıncı (Whittaker A., 2000).....106
Şekil 4.5 Mander beton modelinde kuşatılmamış beton alanının elde edilişi için yapılan kabul.....106
Şekil 4.6 Sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış çekirdek inkiest alanı (Mander vd., 1988).....108
Şekil 4.7 Etriyeli/sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış beton çekirdek enkesit alanı (Mander vd, 1988).....108
Şekil 4.8 Dikdörtgen kesitler için yanal sargı basınçları ile kuşatılmış beton dayanım hesabı (Mander vd., 1988).....114
Şekil 4.9 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2006)' a göre sargılı ve sargısız beton için gerilme şekildeğiştirme eğrileri.....116
Şekil 4.10 Kolon kesitlerinin köşelerde yapılan yuvarlatmalar (A.B.Y.Y.H.Y., 2006).....117
Şekil 4.11 Samaan, Mirmiran ve Shahawy sargı modeli, (1998).....120
Şekil 4.12 FRP sargılı beton için gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....123
Şekil 4.13 Dörtgen kolonda FRP sargı ve enine donatı ile çift sargı etkisi.....125
Şekil 4.14 FRP sargılı betonda Lam ve Teng Modeli.....127
Şekil 4.15 FRP Sargılı dikdörtgen kesit için etkin sargılı beton alanı.....128
Şekil 4.16 Haigh-Westergaard asal gerilme uzayı.....132
Şekil 4.17 Deviatorik düzlemde basınç durumu akma kriterleri.....133
Şekil 4.18 Asal gerilmeler uzayında basınç durumu için akma kriterleri.....133
Şekil 4.19 Drucker-Prager kriteri (a) Meridyenler (θ=0°), (b) π düzlemi (Chen ve Han, 1988).....134
Şekil 4.20 (a) Haigh-Westergaard gerilme uzayı, (b) gerilme durum noktasının deviatorik düzlemde izdüşümü (Chen ve Han 1988).....134
Şekil 4.21 Üç eksenli testler için eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Köksal, 2006).....135
Şekil 4.22 Üç eksenli basınç gerilmesine maruz beton silindir.....136
Şekil 4.23 Beton kırılma kriterinin gerilme uzayındaki geometrik temsili (Köksal, 2006)...137
Şekil 4.24 Sargılı beton için gerilme şekildeğiştirme ilişkisi (Saenz, 1964).....137
Şekil 4.25 LP kompozit sargıda gerilme.....139
Şekil 4.26 C1L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....143
Şekil 4.27 C1L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....143
Şekil 4.28 C1L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....144
Şekil 4.29 C1L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.....144
Şekil 4.30 C3L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....145
Şekil 4.31 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....145
Şekil 4.32 C3L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....146
Şekil 4.33 C3L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....146
Şekil 4.34 C3L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....147
Şekil 4.35 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....147
Şekil 4.36 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....148
Şekil 4.37 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....148
Şekil 4.38 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....149
Şekil 4.39 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....149
Şekil 4.40 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....150
Şekil 4.41 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....150

Şekil 4.42 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....151
Şekil 4.43 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....151
Şekil 4.44 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....152
Şekil 4.45 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi.....152
Şekil 4.46 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....153
Şekil 4.47 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....153
Şekil 4.48 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....154
Şekil 4.49 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....154
Şekil 4.50 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....155
Şekil 4.51 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....155
Şekil 4.52 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....156
Şekil 4.53 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....156
Şekil 4.54 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....157
Şekil 4.55 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....157
Şekil 4.56 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....158
Şekil 4.57 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....158
Şekil 4.58 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....159
Şekil 4.59 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....159
Şekil 4.60 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....160
Şekil 4.61 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....160
Şekil 4.62 Berthet (2005) deneyleri eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması.....161

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 GFRP, CFRP ve AFRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Head,1996).....14
Çizelge 2.2 E-Cam, HT-Karbon ve Aramid lifler arasında, karşılaştırma (Meier ve Winistorfer, 1995).....15
Çizelge 2.3 Kolon güçlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılması (Teng. vd., 2002).....19
Çizelge 3.1 Deney kolonlarının taşıma gücü ve şekildeğiştirme artış oranları.....97
Çizelge 4.1 Yapılmış LP sargılı kolon deneyleri ve uygulanan analitik modelin karşılaştırılması (Deney/Analitik Model).....162
Çizelge 4.2 128 Adet CFRP sargılı beton numunesi için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model).....164
Çizelge 4.3 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (Deney/Analitik model).....165
Çizelge 4.4 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model).....165
Çizelge 4.5 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (*Etriye katkısı ihmal edildiğinde*) (Deney/Analitik model).....165
Çizelge 4.6 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistisel karşılaştırılması (*Etriye katkısı ihmal edildiğinde*)(Deney/Analitik model).....165

ÖNSÖZ

Depremler her yıl Dünya da binlerce kişinin hayatını kaybetmesine ve büyük maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu global olgu, giderek daha iyi anlaşılmaya ve mevcut yapıların depreme karşı performansları sorgulanmaya ve araştırılmaya başlanmıştır. Deprem bölgelerindeki yapıları uygun bir şekilde güçlendirmek ve onarmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Betonarme yapı kolonlarının en etkili ve hızlı güçlendirme ve onarım tekniklerden biride FRP tabakası ile dıştan sargılamadır. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, sargılı beton davranış modelleri incelenerek, Köksal (2006) tarafından, Drucker-Prager akma/kırılma kriterinin sargılanmış (kuşatılmış) beton davranışını içine alacak şekilde değiştirilmesi ile önerilen tek parametreli kırılma kriteri kullanılarak elde edilen model LP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

Doktora çalışmamın en başından beri, beni yönlendiren, çalışmamın şekillenmesi ve ortaya çıkmasında büyük teşvik ve yardımlarını gördüğüm ve bu doktora çalışması süresince benden hiçbir şekilde ilgi ve desteğini esirgemeyen daima destekleyip cesaretlendiren çok değerli hocam Sayın Prof. Zekeriya POLAT'a, her türlü yardım, yönlendirme ve önerilerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hasan Orhun KÖKSAL'a içtenlikle teşekkür ederim.

Deneysel çalışmada fikir veren, yol gösteren, önerileriyle katkı sağlayan değerli hocalarım Sayın Prof. İbrahim EKİZ'e, Sayın Prof. Dr. Muzaffer ELMAS'a, Sayın Prof. Dr. Cengiz KARAKOÇ'a, ve Sayın Doç. Dr. Alper İLKİ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında emeği geçen Teknisyen Şemsettin Tonkuş'a, LP sargı malzemesinin temininde yardımcı olan BASF, Degussa Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş. ye teşekkür ederim.

Şu ana kadar yaptığım çalışmalarımda her türlü olanak ve imkanları sağlayan, çok değerli babam Âkil TURGAY'ı saygıyla anarken, her zaman yanımda olan annem Gündüz TURGAY ve kardeşim Safiye TURGAY'a çok teşekkür ediyor sevgilerimi sunuyorum.

Tahsin TURGAY

Ocak 2007

ÖZET

Günümüzde pekçok yapı güçlendirme teknikleri mevcuttur ve bunlar yapıların değişik özelliklerine göre çeşitlilik gösterir; yapıların taşıyıcı sistem özellikleri, mevcut durumu, yapısal ve yapısal olmayan malzeme özellikleri, kullanım amacı, değişik mimari ve komşu binalarla ilgili kısıtlamalar vb. etkenler, güçlendirme tekniğinin seçiminde rol oynar. Çoğu güçlendirme tekniklerinin zahmetli, uygulamasında mekânın kullanımını uzun süreli engellemesi, geniş uygulama yer ve şantiye alanına ihtiyaç göstermesi, yapının mimari ve işlevsel özelliklerini değiştirmeye zorlayan teknik gereklilikler, imalat sürecinin uzun ve genelde yapının tamamen boşaltılması gerektirmesi gibi pek çok nedenle; geleneksel güçlendirme teknikleri yerini yeni tekniklere bırakmaya zorlanmaktadır. Lifli polimer (FRP/LP) sargı tekniği yeni tekniklerdendir. LP kompozit sargılar; betonarme kolonlarda yaygın ve başarı ile kullanılmakta ve mevcut kolonların eksenel taşıma gücünü, kesme mukavemetini ve şekildeğiştirme kapasitesini yükseltmektedir.

Literatürde LP sargılı beton elemanlarla ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışma bulunmasına rağmen, bunların önemli bir kısmının sargılı standart silindir deneylerine dayanmasından dolayı, betonarme yapı elemanlarına doğrudan uygulanmaları tartışmaya açıktır. Bu bağlamda, yeni bir güçlendirme yöntemi olan LP sargılı kare kesitli betonarme kolon davranışını yansıtan model oluşturabilmek amacıyla; bu tez kapsamında YTÜ Yapı Laboratuarında 20 adet büyük ölçekli betonarme kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Betonarme kolonların düğüm noktaları bölgesindeki ve eksenel basınç dayanım, sünek davranış kapasitesi, kesme-kayma mukavemetindeki zafiyetleri giderme amacıyla sargı tekniklerine başvurulması ihtiyacı göz önünde tutularak; kurgulanan ve gerçekleştirilen deneylerde, LP sargının kolon numunelerinin uç bölgelerinde bir ve iki kat, tamamında bir ve iki kat kullanılmasının, eksenel yükler altında kolon davranışını nasıl etkilediği incelenmiş ve analitik modellemeleri yapılmıştır.

LP sargılı kolonlar için; Samaan vd., Saafi vd., Saadatmanesh vd., Xao ve Wu, Lam ve Teng, vd. bünyesel beton modelleri irdelenerek, Köksal (2006) tarafından, Drucker-Prager akma/kırılma kriterinin sargılanmış beton davranışını içine alacak şekilde değiştirilmesi ile önerilen ve silindirik basınç dayanımını değişken olarak kullanan bünyesel beton modeli, LP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler dâhil, literatürde yer alan 136 adet deney sonucu değişik modeler için karşılaştırıldığında; önerilen amaca uygun geliştirilmiş Köksal modelinin en yakın tahminlerde bulunabildiği görülmüş ve gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sargı, Sargı Etkisi, LP/FRP Sargı Etkisi Analitik Modelleri

ABSTRACT

Although there are different techniques for retrofitting of existing structures, a unique retrofitting technique may not be valid for every structures due to the structural and non-structural material characteristics, function of structure, architectural plan, several restrictions coming the using architectural issues and the neighboring structure interactions. Since there are difficulties in retrofitting structures such as improper architectural requirements like the need of a large construction area, long term retrofitting work and out of service of the building. There is an increasing need for the new retrofitting ways to win such problems. FRP composite wrapping is a new technique that improves confinement so increase the axial load capacity and the ductility of the member.

Although there is a large variety of theoretical and experimental investigations on confinement of concrete cylinders with FRP, experimental investigations on large scale reinforced columns confined with FRP are not so much in literature, so it is difficult to evaluate the actual behavior to take into account by such cylindrical experiment samples tested under axial loading. So the direct applications of the results to the RC structures are still open to discuss. In this study twenty 1/1 large scale square RC column specimens are tested at the YTU Structural Laboratory. In order to rehabilitate the structural joint and to improve axial compressive strength, ductility and shear capacity, these reinforced concrete members strengthened by FRP composite wrapping in four different forms; by partial wrapping at the top and the bottom ends, complete wrapping in one and two layers. Test results indicate that a slight increase on the axial compressive strengths and the significant improvement on ductility by FRP composite externally applied to the specimens in transverse direction are occurred.

The existing analytical models for the FRP confined concrete are also presented and compared point out that same results; the data of 136 experiments are compared with analytical models of Samaan etc., Saafi etc., Saadatmanesh etc., Xao and Wu, Lam and Teng Models; are also studied in comparisons. As a new approach adopting Köksal model introducing a new failure criterion of concrete under triaxial compression, the stress-strain relations of twenty of the experimentally tested RC columns confined with FRP jackets are successfully predicted. The model had been previously developed for RC columns confined with conventional reinforcement of steel (Köksal, 2006).

Proposed model gives more reasonable predictions than most of the existing model's and the comparisons made between the predicted results and experimental data indicate that the accuracy of stress-strain curves of confined concrete with FRP composite are quite enough.

Key words: Confinement, FRP, Analytical Model for Confinement

1.GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Betonarme elamanlar, ekonomik ömürleri süresince; yangın, korozyon, deprem gibi dış, veya aşırı yükleme, kullanım amacının değişmesi gibi olumsuz yönde etkiler altında, hasara uğrayabilir. Türkiye, Dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin (Alp-Himalaya) üzerinde bulunmaktadır. Deprem Bölgeleri Haritası'na (1996) göre Ülkemizin %92'si deprem bölgelerinde yer almakta, nüfusumuzun %70'i I. ve II. derece deprem bölgelerinde yaşamaktadır. Ayrıca; son elli yıl içinde nüfus artışına ve iç göçlere bağlı olarak ortaya çıkan kaçak ve plansız yapılaşma sonucu, önemli oranda depreme dayanıksız, denetim dışı oluşmuş bir yapı stoğu ile karşı karşıya kalınmış durumdadır. Mevcut yapı stoğunun 2006 Deprem Yönetmeliğine uygun olacak şekilde hızla iyileştirilmesi gerekmektedir. İyileştirme araçlarından biri de, ekonomik olması durumunda onarım ve güçlendirmedir. Bu amaçla hazırlanan 2006 Deprem Yönetmeliğine (DBYBHY-2006) göre yapıların onarım ve/veya güçlendirilmesine karar verilmesinde, Deprem Yönetmeliğindeki olası şiddetli bir deprem altında binanın davranışının ne olacağının tahmin edilmesi ve kapasite tasarım yaklaşımına göre yapının istenilen davranışa uymaya zorlanması gerekmektedir (Celep, 2000). Yapıldığı yıllarda geçerli olan deprem yönetmeliğine göre boyutlandırılmış olan bir bina, değişik gelişmeler nedeniyle analiz ve tasarım parametreleri değiştirilmiş yeni deprem yönetmeliğine göre yetersiz durumda kalmış olabilir. Örneğin 1998 ve 2006 Yönetmelikleri kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerini daha küçük öngörmüş ve bu nedenle 1975 yönetmeliğine uygun olarak yapılan çok sayıdaki kullanımda bulunan bina kolonları eksenel yük açısından güvensiz sayılabilecek bir duruma düşmüş olabilir:

$N_{d\max} \leq 0.5 fck.A_c$ (ABYYHY,1998 ve 2006)

$N_{d\max} \leq 0.6 fck.A_c$ (ABYYHY,1975)

Betonarme yapı elemanları için günümüzde çok değişik güçlendirme malzemeleri ve teknikleri mevcuttur. Modern ve kaliteli malzemeler genelde pahallı olup uygulaması daha çok özen ister. Dikkatsiz ve rastgele yapılacak uygulamada malzemeden beklenen verimin alınması mümkün değildir. Bu nedenle, onarım ve güçlendirme için malzeme seçimine özen gösterilmelidir. Şantiye koşullarında; uygulanabilirlik, onarım süresi, maliyet analizi, estetik, istenilen amaca uygunluk, yapının olası kullanım şekillerinin ve mimarisinin etkileri, onarım

sırasında yapının kullanımına getirilen kısıtlamalar malzeme seçiminde göz önünde tutulabilir.

Bu çalışmada kolonların eksenel yük taşıma kapasiteleri ile sünekliklerini artırmada son derece etkili olan lifli polimer (LP) malzemesinin kullanımı ve davranış üzerine etkileri incelenmektedir.

Uzun yıllar uçak ve otomobil üretiminde kullanılan lif takviyeli polimerlerin (Fiber Reinforced Polimer, FRP) yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılışı, Fardis ve Khalli'nin (1981) betonarme elemanlara cam lifi takviyeli polimer (CLP) sararak, sargı etkisini incelemesiyle başlamıştır.

Lif Takviyeli Polimer (LP) kompozit malzemelerin kullanımı; betonarme yapıların güçlendirilmesinde bilinen yöntemler olan çelik lamalarla sarma, kesit büyültme ve dıştan sonradan germe (post-tension) yöntemlerine göre, uygulanması daha kolay ve hızlı bir seçenektir. LP güçlendirme sistemlerinde, LP kompozit malzemeler betonarmeyi dıştan sararak kullanılır. LP sistemleri geleneksel güçlendirme tekniklerine göre birçok avantaj sağlar; hafiftirler, diğerlerine nazaran uygulanması kolaydır ve korozyona uğramazlar. Bu üstünlükleri nedeniyle, ülkemizde hızla yaygınlaşan bir onarım, güçlendirme (O/G) tekniği durumuna gelmiştir. LP ile güçlendirilmiş elemanların davranışı hakkında araştırmacılar tarafından çok sayıda bünyesel modeler ve çözümlemeler önerilmeye başlanmıştır.

Deprem etkileri karşısında, sistem iyileştirmenin önemli bir yolu da sünekliği artırmaktır (ACI Committee 440,2001). Yüksek şekil değiştirme kabiliyetli ve şekil değiştirirken taşıma gücünde önemli bir kayıp oluşturmadan deprem enerjisini dönüştürerek yeniden dağılıma izin veren elemanlara süneklik düzeyi yüksek elemanlar denir. Süneklik düzeyi yüksek yapı elemanları, dolayısıyla bu elemanları içeren yapı sistemleri göçmeden önce büyük plastik/kalıcı şekil değiştirmeler yapabilmekte ve bu suretle yapı tepkisini küçülterek can güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

FRP, hafif, korozyona dayanıklı, yüksek çekme dayanımına sahip bir malzemedir. Bu malzemelere istenilen biçim verilebilir, LP sistemlerinde lif ve reçine kullanımı, diğer geleneksel güçlendirme sistemleriyle kıyaslandığında; pahallı olmasına karşın uygulama kolaylığı, yer kaybı olmaması gibi üstünlükleri ile tercih edilebilen seçenekler oluşturabilmektedir. ACI Committee 440 Yönetmeliğinde (Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yapı elemanın dıştan LP sistemleriyle sargılama için tasarım

yönetmeliği) verilen bilgilere göre; LP, genelde betonarme yapıların dayanımını artırmak, mevcut kolon ve kirişlerde ise, dayanım ve sünekliği artırmak için kullanılabilir.

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarında; bu tez çalışması kapsamında, enine donatılı betonarme kolonların LP kompozit malzemesi ile sarıldığında oluşacak eksenel yük dayanım kapasitesi artış oranlarını incelenmek üzere bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

1.2 Önceki Çalışmalar

1990'lı yılların başlangıcında kolonları güçlendirmek için; ek donatılar kullanarak kolonları mantolamak veya çelik manto sarıp içersine çimento şerbeti enjekte etmek şeklinde başlıca iki yöntem kullanılmıştır. Çelik manto sarmak betonarme mantolamaktan daima daha etkili olmuştur. Ancak, her iki yöntemde de uygulama güçlüğü bulunmaktadır. Ayrıca, bu çeşit uygulama ile yapıda ağırlık artmakta ve çelik mantolar sert iklim koşullarında yeterli dayanım gösterememektedir (Ballinger, 1993). Son yıllarda, LP kompozitlerin kullanımının hızla yaygınlaşmasıyla betonarme kolonların güçlendirilmesinde çelikle kuşatarak güçlendirmenin yerini LP sargıların aldığı görülmektedir. LP ile kolon güçlendirmenin en genel şekli dıştan LP tabakası ile sarma şeklinde olur. Betonarme kolonları çelik veya LP mantolama ile güçlendirme yöntemi, sağladığı yanal sargı etkisinden ötürü eksenel basınç dayanımını ve sünekliği oldukça artırmaktadır. Karbon lifli polimer (KLP) kompozit malzemesi ile sargı yöntemi yeni bir teknik olmasına rağmen betonarme elemanlara sarılmasıyla ortaya çıkan basınç dayanım kapasitesini ve eksenel gerilme-şekildeğiştirme davranışını açıklamak için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Mirmiran ve Shahawy (1997), FRP kompozit malzemeleri kullanarak ürettikleri tüp elemanlarla daire enkesitli beton elemanları sararak, bu tür bir sargılamanın elemanların eksenel basınç altındaki davranışına etkisini araştırmış ve bu yöntemin elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir.

Saadatmanesh ve diğ. (1997), mevcut yapılarda bulunan kusurları inceleyen bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış, yetersiz bindirme boyu ve enine donatı eksikliği bulunan köprü kolonları incelenmiştir. 1/5 ölçekli 2 adet daire, 2 adet dikdörtgen enkesitli sağlam temellere mesnetlenmiş kolon numunesi üretmişlerdir. Her iki en kesit türü için bir numunenin boyuna donatılarını sürekli, diğer numunenin boyuna donatılarını ise bindirmeli ekli olarak tasarlamışlardır. Bu kolonlara önceden hasar verilmiş ve sonrasında LP kompozit ile enine doğrultuda sarılarak

güçlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, güçlendirme işlemlerinin daire enkesitli kolonlarda etkili olduğu gibi dikdörtgen enkesitli kolonlarda da etkili olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş bütün kolonlarda eksenel yük taşıma ve süneklik kapasitelerinde artış kaydedilmiştir.

Seible ve diğ. (1997), deprem yönetmeliğine uygun olarak tasarlanmamış köprü kolonları ve bunların FRP kompozitle güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadan önce teorik bir çalışma yürüterek güçlendirme için gerekli kompozit kalınlığı üzerine bağıntılar geliştirmişlerdir. Farklı göçme şekilleri (kesme, eğilme, aderans kaybı) oluşacak kolonlarda yapılacak güçlendirme işlemi için farklı kalınlıkta kompozite ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Her iki durum için de uygulanacak kompozit kalınlığı kolon boyunca değişiklik göstermektedir. Geliştirilen kriterlere göre güçlendirilen kolonların performansı önemli oranda artmıştır. Deneylerde teorik olarak hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesinin üzerine çıkılmış, yerdeğiştirme sünekliği büyük ölçüde artmış ve aderans çözülmesi önlenmiştir.

Spoelstra ve Monti (1999), Mimiran ve Shahawy'nin yapmış oldukları testleri kullanarak, FRP sargılı dairesel kolonlar için, ampirik bir bağıntı sunmuşlardır; bu amaçla maksimum dayanım, maksimum şekil değiştirme, Sekant rijitliği, yanal yerdeğiştirme parametrelerini kullanmışlardır. Öne sürdükleri model, sadece FRP sargılı dairesel kolonlar ile sınırlı kalmıştır.

Yung, Wang ve Restrepo (2001), yaptıkları çalışmada; FRP sargılı dikdörtgen ve kare betonarme basınç elemanlarını eksenel yükler altında incelemişlerdir. Deneylerde kare kolon kullanmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçlardan FRP sargısının boyuna donatıda burkulmayı önlediğini görmüşlerdir. Bu deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre çift sargı etkisini (dual confinement effect); LP sargı ve çelik sargı etkisini birlikte dikkate alan bir matematik model önermişlerdir.

Xiao ve Wu (2000), maksimum dayanım kapasitesini; sargılı betonda sargı basıncı, sargı oranı, beton ve kompozit malzeme özelliklerine bağlı parametreler cinsinden, lineer teori ve deneysel verilere dayanarak bir bağıntıyı önermiştir.

M. Shahawy, A. Mirmiran ve T. Beitelman (2000), yaptıkları deneysel çalışmada, 152,5mm çapında ve 305mm yüksekliğinde 45 adet numuneyi, sargı etkisini görebilmek için, beş adet farklı sargı kombinasyonu kullanarak test etmişlerdir. Aynı zamanda kullandıkları test

numunelerini, Drucker Prager plastisite modelini sonlu elemanlara (ANSYS) uygulayarak test numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarını temel alarak LP sargılı betonun doğrusal olmayan davranışı için 4 parametreli bir bağıntı önermişlerdir.

Saatcioğlu ve Elnabelsy (2001), deprem tasarımı bugünkü koşullarla göre yapılmayan 1970 öncesi inşa edilen köprü kolonlarının FRP ile güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Mevcut köprü kolonlarının önemli bölümünü temsil eden, yetersiz enine donatısı ve bindirme boyu olan daire ve kare enkesitli konsol kolon numuneleri üretmişlerdir. Numuneler FRP ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmişlerdir. Deneyler sonucunda, referans numunesi olan daire ve kare enkesitli kolonlarda erken safhalarda aderans çözülmesi ile başlayan dayanım kaybı görülmüştür. Dairesel enkesitli kolonlarda yapılan güçlendirme, deprem performansını önemli ölçüde artırmıştır; İleri düzeyde yerdeğiştirmelere gidildiği halde aderans kaybı oluşmamıştır. Kare enkesitli kolonlarda uygulanan güçlendirme işlemi, aderans kaybının önlenmesi anlamında fazla başarılı olmamıştır. Bu kolonlarda sınırlı iyileşme elde edilmiştir.

Assa, Nishiyama ve Watanabe (2001a, 2001b), deneylerinde; 24 adet sargılı kolon, 34 adet normal dayanımlı beton, 31 adet yüksek dayanımlı betonarme kolon kullanmışlardır. Sargılı ve sargısız kolonlarda şekil-değiştirmeleri incelemişler ve bunlara dair gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini çizmişlerdir. Ancak geliştirdikleri model, sargı aralığı parametresini kapsamamaktadır, sadece düzenli sargı aralığını haiz dairesel kolonlar için uygundur. Bölgesel farklı sargı konfigürasyonuna sahip kolonlar için uygun değildir. Hesapta sadece çekirdek alan dikkate alınmış, örtü betonu gözardı edilmiştir

Toutanji (1999), yaptığı deneysel ve analitik çalışmasında, daire enkesitli beton elemanları farklı türden lif (cam ve karbon lif) sargıları ile güçlendirdikleri elemanların eksenel yükler altındaki davranışını incelemiş, deneyler sonucunda güçlendirilmiş elemanların dayanım, süneklik ve enerji yutabilme kapasitesi gibi özelliklerinin büyük ölçüde geliştiğini göstermiştir. Sonuçta LP sargılı beton davranışının belirlenebilmesi için yeni bir analitik model sunmuştur.

İlki ve Kumbasar (2002) tarafından yapılan çalışmada 20 adet daire enkesitli, hasarlı ve hasarsız numuneler CFRP tabakalar ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiş ve monoton artan ve tekrarlı yükler altında test edilmişlerdir. Bu çalışma sonucunda CFRP tabakalar ile güçlendirilmiş elemanların dayanım ve şekil değiştirmesinin CFRP tabaka kalınlığı ile orantılı

olarak önemli ölçüde arttığı gösterilmiş olup önerdikleri analitik modeli, literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Marques, Silva ve Cavalcante (2004) yaptıkları çalışmada, LP ile sargılı dairesel ve karesel kısa kolonlarda eksenel yük davranışını matematik olarak modellemişlerdir. Bu modellemede, daha önce yayınlanmış Restrepo (2001)'un deney sonuçları kullanılmıştır. Sunulan modelin geçerliliği bu deney sonuçlarına göre test edilmiş ve kolonlarda gerilme şekildeğiştirme davranışı bakımından tatminkâr sonuçlar elde etmişlerdir.

Michel Samaan, Amir Mirmiran, Mohsen Shahawy (1998), 152.5X305mm boyutlarında silindirik 30 adet numune üzerinde deney yaparak, LP sargılı beton silindirleri çelik sargılı beton silindirler ile karşılaştırmıştır. Varolan sargı modellerini kullanmışlardır: Mander vd. (1988), Fardis ve Khalili (1982), Ahmad ve Shah (1982), Monti ve Spoelstra (1997). Bu modeller içersinde, FRP sargı modeline göre uyarlandığında en iyi sonucu Ahmad ve Shah (1982), Monti ve Spoelstra (1997)'nın sundukları model vermiştir. Hiçbir model, FRP sargılı betonda, maksimum dayanım kapasitesini yeterli yaklaşıklıkla tahmin edememiştir. Bu nedenle yazarlar, göçme yükünün belirlenmesi amacıyla yeni bir model sunmuşlardır. FRP sargılı betonda bilineer davranış için, Richard ve Abbott (1975)'nun 4 parametreli modelini yeniden düzenleyerek yeni bir bağıntı elde etmişlerdir.

Sheikh ve Yau (2002), sağlam temellere mesnetlenmiş konsol kolon numunelerinin güçlendirilmesini konu alan deneysel bir çalışma yapmışlardır. Dairesel enkesitli, enine donatı oranları ve aralıkları farklı 12 adet numune üretmişlerdir. Deneylerde eksenel yük seviyesi, FRP kompozitin türü ve kalınlığı değişken olarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda eksenel yük seviyesinin artırılmasının süneklik ve şekildeğiştirme kapasitesini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Eksenel yük oranı yüksek olan numuneler için FRP kompozitin sarım sayısının artırılması gerektiği belirtilmiştir. Enine donatı oranının artırılması ve aralığının düşürülmesi sonucu boyuna donatıların stabilesi artmış, daha sünek bir davranış elde edilmiş ve enerji yutma kapasitesinde önemli gelişme sağlanmıştır. Eksenel yük oranının yüksek olduğu numunelerde tek kat GFRP kompozitin, CFRP kompozitin yanında etkili performans gösteremediği görülmüştür. Genel olarak FRP kompozit ile güçlendirme işlemi kolonların dayanım, enerji yutma ve süneklik kapasitelerini geliştirmiştir. ACI 318-99'e uygun enine donatıya sahip numuneler, güçlendirilmiş numuneler eşit veya daha iyi performans sergilemiş olduğunu belirtmektedirler.

1.3 Çalışmanın Amacı

Betonarme yapıların sismik kuvvetlere karşı tasarımında; yapı elemanlarının göçme olmaksızın gerçekleşecek elastik ötesi şekildeğiştirmeler yapmasına izin verilir. Plastik şekildeğiştirmeler sayesinde ortaya çıkan enerjinin yutulması, yapının dinamik tepkisini azaltmaktadır. Betonarme elemanların sünek bir davranış sergileyerek göçmeden ortaya çıkan enerjiyi yutabilmesi için yeterli enine donatı ile sarılması gerekmektedir. Sargılı betonun davranışı, sargısız betona göre oldukça farklıdır. Sargı donatısının davranış üzerindeki en önemli etkisi; basınç dayanımını ve sünekliği artırmasıdır. Betonarme yapıların depremler karşısında gösterecekleri elastik ötesi davranışın doğru olarak belirlenmesi, sargılı betona etkiyen parametrelerin gerçekçi olarak tahmin edilebilmesine bağlıdır.

Sargılı betonun davranışı; enine donatı hacimsel oranı, aralık, çap ve dayanımı, boyuna donatının kesit içinde dağılımı, beton basınç dayanımı, yükleme hızı ve biçimi gibi parametrelere bağlıdır. Amaç bu parametrelerle, betonarme elemanın davranışlarının gerçeğe daha yakın sonuç veren davranış modelini geliştirmektir. Günümüze değin, sargılı beton için birçok gerilme-şekildeğiştirme modeli ve bağıntıları ortaya konulmuştur. Bunlardan en yaygın kabul görenleri; Richart vd. (1928), Priestley vd. (1981), Sheikh ve Uzumueri (1982), Mander vd. (1988), Saatçioğlu vd. (1995) olmuştur.

Bu çalışmanın amacı; öncelikle sargılı betonarme kolonların FRP kompozit malzemesiyle mesnet bölgelerinden ve tamamen sarılmış FRP sargılı betonarme kolonların davranışını incelemektir.

Daha önce yapılmış olan sargılı beton modeli önerileri dikkate alınarak (Köksal, 2006), öncelikle enine donatılı betonarme kolonların deneyleri gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Sonrasında uç bölgeler tek ve çift kat CFRP kompozit malzemesi ile sarılı eş donatı konfigürasyonuna sahip kolonların deneyleri yapılmış ve en sonunda ise tek ve çift kat tamamen sargılanmış betonarme kolonların deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylerden ve literatürdeki çalışmalardan elde edilen davranış hakkındaki bilgiler, daha önceki çalışmalarda önerilen modellerin kıyaslanmasında kullanılmış ve son olarak, betonarme kolonlar için önerilen kuşatılmış üç eksenli basınç etkisindeki model (Köksal, 2006), FRP kompozit malzemesi ile sargılanmış betonarme kolonlar içinde uygulanır hale getirilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Tarihsel gelişim içersinde insanın malzeme kullanımı incelendiğinde; genelde üç ana evre göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki, insanların doğada buldukları malzemeyi amaçlarına uygun biçimde kullanmaya çalıştıkları evredir. Malzeme kullanımı açısından önemli bir farklılığı içeren evre, doğadan sağlanan malzemenin biçimlendirilerek kullanılmaya başlandığı ve bunun sürdüğü dönemdir. Bu devrede, doğadan elde edilen malzeme bir hammadde gibi değerlendirilmiş, gitgide değişen ve gelişen tekniklerle kullanıcının amacına uygun şekilde biçimlendirilerek kullanılmıştır.

Belirli bilimsel gelişmeler ve buna bağlı olarak meydana gelen teknolojik ilerlemeler sonucunda, insanın doğadan sağladığı bu hammaddelere kendi bilgi ve deneyimini katarak sahip olduğu teknik olanaklarla yepyeni malzemeler ürettiği üçüncü bir aşamaya geçilmiştir. Bir tarih vermek gerekirse; sembolik olarak "Sanayi Devrimi" ile birlikte başladığı kabul edilen bu evrede, doğadan elde edilen hammadeler belirli işlemlerden geçirilerek, yeni, kullanım amacına uygun mamul veya yarı mamul malzemeler haline getirilmeye başlanmıştır.

Birden çok malzemenin bir araya getirilmesiyle üretilen malzemeye genelde "Kompozit Malzeme" adı verilir. Birden çok malzemenin biraraya getirilmesi, doğal olarak tek tek bileşenlerinde bulunmayan özellikte bir malzemeyi üretebilme amacına yöneliktir. Genel olarak kompozit malzeme, mevcut ve/veya ayrı iki veya daha çok malzemeyi fiziksel olarak karıştırmak yoluyla elde edilen ve kendisini oluşturan malzemenin her birinden farklı özelliklere sahip olan çok bileşenli malzeme olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeleri dört alt grupta toplamak mümkündür: i) Daneciklerle güçlendirilmiş kompozit malzeme, ii) Danelerle donatılı kompozit malzeme, iii) Liflerle donatılı kompozit malzeme, iv) Tabakalı kompozit malzeme.

Liflerle donatılı kompozit malzeme; genellikle yeterli basınç dayanımına mukabil, çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılgan malzemelerin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi; kırılganlığının giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla, bu özellikleri iyileştirecek nitelikte liflerle donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir.

2.1 Lifli Polimerler (LP)

Lifli polimerler/LP (literatürde bilinen adıyla FRP'ler), bir polimer reçinesinin içine gömülmüş yüksek mukavemetli liflerden oluşan kompozit elemanlardır. Yüksek korozyon dayanımının yanında göçmeye ulaşıncaya kadar doğrusal bir gerilme şekildeğiştirme ilişkisi gösteren LP, lif yönünde geniş bir rijitlik ve mukavemet yeteneğine sahiptirler. LP kompozitlerin içindeki lifler, asıl yük taşıyan elemanlardır. Reçineler ise, lifleri bir arada tutmak, hasardan korumak, sıralı düzenlerini sürdürmek ve yükün aralarında dağıtımını sağlamak üzere lifleri çevrelerler. En yaygın polimerik reçine tipleri; polyester, vinilester ve epoksilerdir.

LP kompozitler, çeliğin çekme ve yorulma dayanımları ile karşılaştırıldığında oldukça önemli mekanik ve fiziksel özellikler taşımaktadırlar. Çeliğin taşıma ve montaj sırasındaki ağırlığı, korozyon riskinin yüksekliği gibi sakıncalarını ortadan kaldıran LP mühendislere; düşük ağırlık, korozyona dayanıklılık, yüksek rijitlik ve dayanım gibi önemli avantajlar sağlar.

2.1.1 Lifler

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan en uygun lifler; karbon, aramid ve cam liflerdir.

2.1.2 Liflerin Özellikleri;

Yapılacak uygulamalar göre kullanılacak liflerin seçiminde çeşitli faktörler rol oynar. Bunların başlıcaları; yapının tipi, beklenen yükleme ve çevre koşulları olarak özetlenebilir. Kısaca açıklamak gerekirse;

Cam lifleri çok kullanılan güçlendirme lifleridir. Diğer liflere göre ucuz olmasının yanında işlenme karakteristikleri de çok iyidir.

Karbon lifleri yüksek mukavemet ve yüksek rijitlik elde edebilmek için en çok kullanılan takviye malzemesidir.

Aramid lifleri çok sıkı organik sentetik liflerdir.

Karbon ve aramid lifleri birçok kimyasal etkiye karşı direnç gösterirlerken, cam lifleri alkalilerden etkilenirler.

Karbon ve cam liflerinin basınç mukavemeti, çekme mukavemetlerine yakındır. Aramid'in basınç mukavemeti ise çekme mukavemetinden oldukça düşüktür.

Karbon, aramid ve cam lifleri toksik etkisi olmayan ve kirlilik açısından tehlikeli sayılmayan malzemelerdir.

2.1.3 Liflerin Fiziksel Özellikleri

2.1.3.1 Kimyasal Direnç

Karbon ve aramid lifleri kimyasal etkinin bir çok şekline karşı direnç gösterir. Cam lifinin bir çok türü ise alkaliler (pH'ı yaklaşık 11'den büyük olan) tarafından etkilenmekle beraber asitlerden etkilenmezler. Aramidler, cam ve karbon liflerine nazaran daha çok su absorbe ederler. Bu da reçine/lif arayüzünde problemlere neden olur.

2.1.3.2 Ultraviole ışınıma karşı direnç

Karbon ve cam lifleri ultraviole ışınımdan etkilenmezler. Aramid lifleri ise ultraviole etkisiyle renk değişimine uğrarlar ve dayanımında azalma görülür.

2.1.3.3 Elektrik iletkenliği

Aramid ve cam lifler iletken değildirler, bu yüzden enerji hatlarının ve demiryollarının yakınında, komünikasyon araçlarında kullanımına uygundur. Karbon lifleri elektriği iletirler. Bu özelliklerinden dolayı elektrikli ekipmanların yakınında karbon lifli polimer (KLP)'lerin kesimi yada işlenmesi sırasında çok dikkat edilmelidir.

2.1.3.4 Basınç Mukavemeti

Karbon ve cam liflerinin basınç mukavemeti, çekme mukavemetine yakındır. Aramid'in basınç mukavemeti ise çekme mukavemetinden oldukça düşüktür.

2.1.3.5 Rijitlik

Karbon liflerinin elastisite modülü çeliğin elastisite modülüyle benzerlik gösterir. Aramid'in rijitliği daha düşük, cam lifinin rijitliği ise en düşüktür.

2.1.3.6 Yangın

Cam lifleri, erime noktasına kadar (1000oC üzerinde) dayanım gösterirken karbon lifleri 650oC üzerindeki bir ortamda okside olurlar. Aramid lifleri ise genellikle 200 oC üzerindeki ortamlarda kullanılmazlar. Bu üç liften hiçbiri yanmayı, tutuşmayı tahrik etmezler. Kompozitlerde reçine baskın bir rol oynar, çoğu toksik duman meydana getirir.

2.1.4 Liflerin Mühendislik Özellikleri

Kompozit sistemlerin bütün mekanik ve mühendislik özelliklerini lifler etkiler. Tasarım için lifin çekme dayanımı ve çekme modülü dikkate alınır. Bu değerler de FRP örneklerinin çekme deneyi ile tespit edilir. Lif takviyeli polimerlerin gerilme şekildeğiştirme eğrisi nihaî gerilmesine ulaşıncaya kadar yaklaşık doğrusaldır, sonra da gevrek bir şekilde kopa gösterir.

2.1.4.1 Dokumalar (Wraps)

Tekstil malzemelerinin özellikleri, kullanılan lif miktarına ve cinsine bağlıdır. Diğer bir özellik ise liflerin dizilimidir. Örtülmüş dokumanın iki yönde davranış özellikleri varken, paralel lif dizilimi dokumaya tek yönde davranış özelliği kazandırır. Örülmüş dokumalarda, liflerin %70'i boyuna %30'u enine yönde teşkil edilir. Göz önünde bulundurulması gereken bir nokta; dokuma malzemesindeki lif ipliklerinin birbirlerine dolanmasının mukavemeti düşüreceğidir. Malzemenin kalınlığı 0,1mm mertebesinde incedir, 500mm veya daha fazla genişlikte imal edilebilmektedir.

2.1.4.2 Levhalar

Tek yönlü levhalar, genelde lifin sürekli olarak bir makine ile örgü şeklinde sarılmasıyla (pultration) oluşturulurlar. Devam eden iplikler şeklindeki lifler, emdirilmiş lif demeti halinde dikkatlice kontrol edilerek reçine banyosu içersinden çekilirler ve gerekli şekli alırlar. Kalıp, reçine kürü oluşumu için ısıtılır. Boyuna yönde yüksek mukavemet ve sertlik istenen ölçüde sağlanır (%65). Enine levhalar 1-2 mm kalınlığında ve genelde (değişken olmak üzere) 50-100mm genişliktedir.

2.1.4.3 Lif Seçimi

Lif tipi seçilirken göz önünde bulundurulması gereken faktörler; yüklemenin tipi, çevre koşulları ve proje maliyetidir. Karbon lifleri, yüksek mukavemet ve yüksek dayanıma sahiptirler ve çevre koşullarında etkilenmezler. Karbon liflerinin sürekli gerilmelere dayanımları nispeten iyidir.

E-cam lifleri malzeme maliyetini düşürür, ancak karbon liflerinden daha az dayanım ve şekil-değiştirme modülene sahiptir. Ayrıca karbon liflerinin uzun dönem davranışlarındaki üstün niteliğini de gösteremezler. Genelde E-cam lifleri neme ve diğer çevre koşullarına maruz kaldıklarında ömürleri azalır. E-cam lifleri nihaî mukavemetlerinin %30'undan daha yüksek devamlı gerilmelerde sünme etkisiyle koparlar.

Farklı özelliklerde olan birkaç çeşit karbon lifi mevcuttur. Beton elemanın davranışı (ilâve yük taşıma kapasitesinin arttırılması, kayma dayanımı arttırılması, vb.) geliştirilmek istendiğinde daha yüksek dayanımlı ve kırılmadaki uzaması daha yüksek olan karbon lifi seçilmelidir. Kullanılabilirliğin (sehim, emniyet gerilmeleri vb.) önemli olduğu uygulamalarda ise daha yüksek elastisite modülüne sahip karbon lifi seçimi doğru olur.

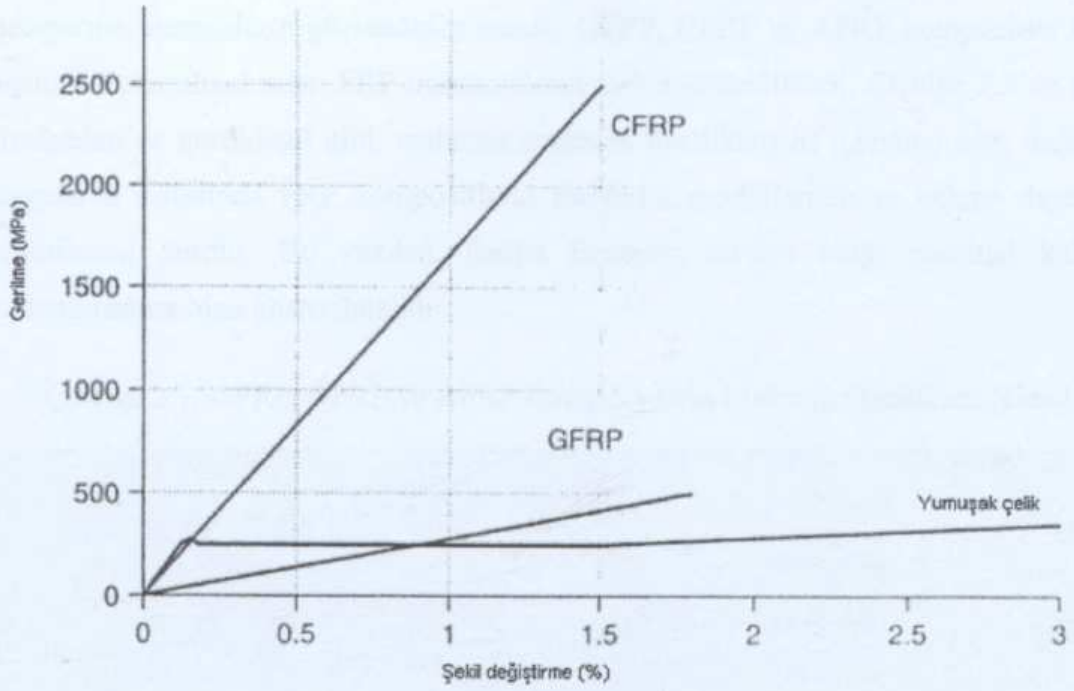
2.1.4.4 Yapıştırıcılar

Yapıştırıcı malzemeler yüzey ekleriyle beraber tutma yeteneğine sahip malzemelerdir. Temel olarak yapıştırıcının amacı; yapışkan katmanın kalınlığı boyunca kayma gerilmelerini aktarabilme kabiliyetleri ile kompozit davranışı sağlayarak FRP ve beton arasındaki aderansın devamlılığını gerçekleştirebilmektir.

2.2 FRP Kompozitlerin Yapısı

FRP kompozitler; sürekli liflerin reçine matris içinde birbirlerine sarılmasıyla oluşturulur. En çok bilinen lifler; karbon lifler, cam lifler ve aramid liflerdir. Reçineler ise; epoksi reçinesi, polyester reçinesi ve vinylester reçinesi olarak sınıflandırılabilir. Liflerin kullanımlarına göre, FRP kompozitler, üç sınıfa ayrılır:

- Cam lifi donatılı polimer (Glass Fibre Reinforced Polymer, GFRP), CLP
- Karbon lifi donatılı polimer (Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP), KLP
- Aramid lifi donatılı polimer (Aramid Fibre Reinforced Polymer, AFRP), ALP



Şekil 2.1 FRP ve yumuşak çeliğin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Sayılan üç çeşit FRP malzemesi; gerilme şekildeğiştirme bakımından benzer davranış gösterirler; doğrusal elastik artış ve sonunda gevrek kopma gerçekleşir. FRP kompozit malzeme kullanımında bu önemli bir özelliktir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere: FRP malzemeler için yüksek mukavemet ve gevrek davranış, çelik için sünek davranış sözkonusudur. Bir başka anlatımla; FRP malzemeler çeliğin sahip olduğu sünekliğe sahip değildirler. Bununla beraber, bu malzemelerin gevreklik özelliği, betonarme elemanın gevrek davranışından dolayı sınırlı kalmaktadır. Betonarme elemanda sargı etkisini sağlamak için kullanıldığında, bu malzemeler, kolonların sünekliliğini ve dayanımlarını çok yüksek ölçüde artırır. İkinci olarak: FRP kompozitindeki gevrek davranış(süneklik özelliğine sahip olmama) dayanımdaki yeniden dağılım kabiliyetini sınırlar. FRP kompozit malzeme, yeterli eğilme rijitliğine sahip betonarme yapılarda uygulandığında tatminkâr sonuç verir.

2.3 FRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

FRP kompozitlerinin uçak endüstrisinde uzun yıllardan beri kullanıldığı bilinmektedir. Bu nedenle günümüzde bu malzemelerin özellikleri çok iyi bilinmektedir. Bu malzemelerin inşaat mühendisliğinde uygulamaları, ilk başlarda yüksek maliyetten dolayı sınırlı kalmıştır. Ancak inşaat mühendisliğinde geniş uygulamalara yer verilmesiyle birlikte maliyet de hızla düşmüştür.

Betonarme elemanların güçlendirilmesinde; GFRP, CFRP ve AFRP kompozitler başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. FRP malzemelerin mekanik özellikleri, Çizelge 2.1'de verilmiştir; çizelgeden de görüldüğü gibi, malzeme mekanik özellikleri lif içeriğine göre değişmektedir. Uygulama esnasında FRP kompozitlerin elastiklik modüllerinin ve çekme dayanımlarının kestirilmesi zordur. Bu yüzden, üretici firmanın tavsiye ettiği nominal kalınlıkta lif kullanılmasına itina gösterilmelidir.

Çizelge 2.1 GFRP, CFRP ve AFRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Head,1996)

Tek yönlü dokunmuş kompozit malzeme	Lif İçeriği (% ağırlık oranına göre)	Yoğunluk (kN/m3)	Boyuna çekme Modülü (GPA)	Çekme Dayanımı (MPa)
Cam lifi donatılı polyester tabaka (GFRP)	50-80	16-20	20-55	400-1800
Karbon lifi donatılı epoksili tabaka (CFRP)	65-75	16-19	120-250	1200-2250
Aramid donatılı epoksili tabaka (AFRP)	60-70	10.50-12.50	40-125	1000-1800

Betonarme elemanların FRP kompozit malzemesi ile güçlendirilmesi örnekleri, birçok bakımdan iyi sonuçlar vermiştir. Bu yeni teknolojide son yıllarda hızlı bir gelişme sağlanmıştır. Literatürde konuyla ilgili çok sayıda makale bulunmaktadır. Bununla beraber, çoğu tasarım tavsiyeleri yazarların kendileri tarafından geliştirilmiştir. Bir başka anlatımla bu bağlamda yeterince kabul görmüş tasarım yönetmelikleri bulunmamaktadır (Teng, 2000).

2.4 Eksenel ve Eksantrik Yüklü Kolonların Güçlendirilmesi

1990'ların ilk yıllarında kolonları güçlendirmek için başlıca iki yol izlenmiştir:

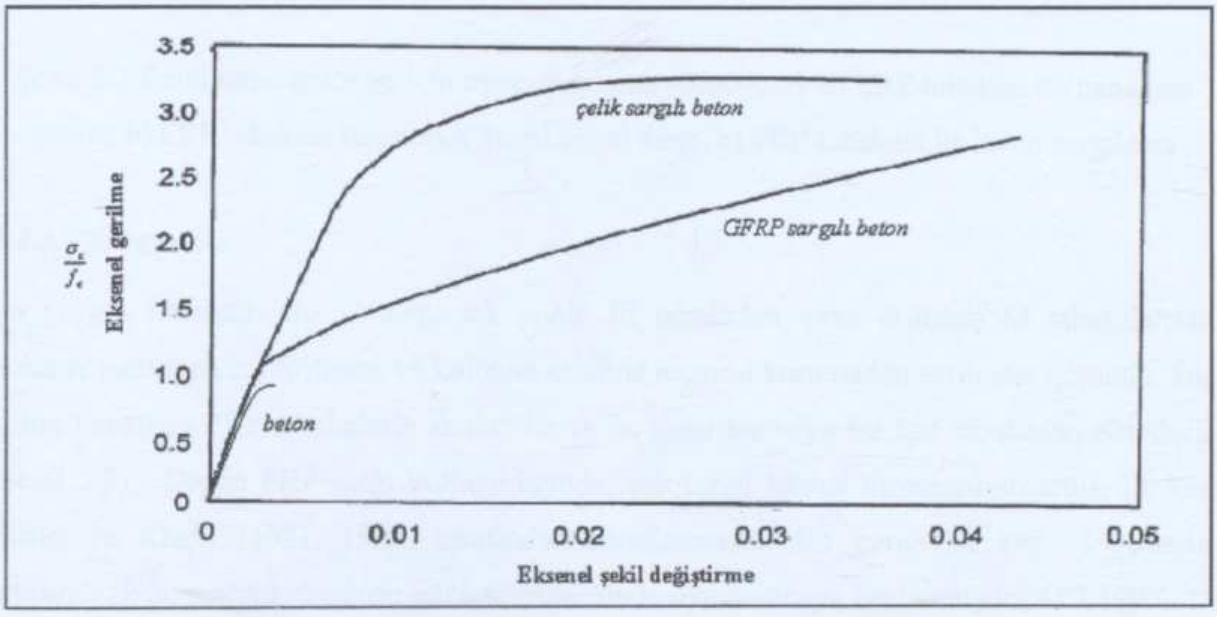
- Kolonlara mantolama yapmak ve ilave donatı eklemek, veya çelik manto sarıp içersine çimento şerbeti enjekte etmek (Ballinger, 1993),
- Çelik manto sarmak,

Çizelge 2.2 E-Cam, HT-Karbon ve Aramid lifler arasında, karşılaştırma (Meier ve Winistorfer, 1995)

Özellik	Lifli kompozit tabakalar		
	E-Cam lifli (E-Glass Fiber)	HT-Karbon Lifli (Carbon Fiber)	Aramid Lifli (Aramid Fiber)
Çekme Dayanımı	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Basınç Dayanımı	İyi	Çok iyi	Yeterli değil
Young Modülü	Yeterli	Çok iyi	İyi
Uzun Süreli Davranış	Yeterli	Çok iyi	İyi
Yorulma Davranışı	Yeterli	Mükemmel	İyi
Yoğunluk	Yeterli	İyi	Mükemmel
Alkaline Dayanımı	Yeterli değil	Çok iyi	İyi
Maliyet	Çok iyi	Yeterli	Yeterli

Çelik manto sararak güçlendirme ve betonarme mantolama ile güçlendirmenin uygulama güçlüğü bulunmaktadır. Bu çeşit uygulamalarda yapıda ağırlık artmakta ve çelik mantolar sert iklim koşullarında yeterli dayanım gösterememektedir (Ballinger, 1993). Son yıllarda, FRP kompozitlerin yaygınlaşmasıyla, betonarme kolonların güçlendirilmesinde çelikle kuşatarak güçlendirmenin yerini FRP sargıların aldığı görülmektedir. FRP ile kolon güçlendirmenin en genel şekli; dıştan FRP tabakası ile sarma şeklinde olur. Var olan betonarme kolonları çelik

veya FRP mantolama ile güçlendirme yöntemi, sağladığı yanal sargı etkisiyle eksenel basınç dayanımını ve sünekliği oldukça artırmaktadır (Mander, 1988). FRP nin betonarme elemana sarılmasıyla, basınç dayanımı ve eksenel basınç-şekil değiştirme davranışına dair çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Fardis ve Khalili 1981, Ahmad vd. 1991, Harmon ve Slattery 1992, Demers ve Neale 1994, Howie ve Karbhari, 1994, Nanni ve Bradford, 1995, Karbhari ve Gao 1997, Mirmiran ve diğerleri 1998a, Demers ve Neale 1999, Miyauchi vd. 1999, Purpa ve Mufti 1999, Saafi vd. 1999, Toutanji 1999, Rochette ve Labossiere 2000, Xiao ve Wu 2000, Zhang vd. 2000).



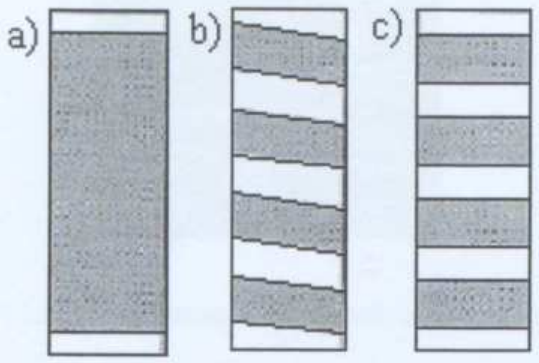
Şekil 2.2 FRP ile sarılmış beton için gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi

(Purba ve Mufti, 1999)

Her iki çeşit sargıda da benzer özellikler görülse de, çelik ile sargılamadaki, tasarım yöntemleri, FRP, sargılamada doğrudan uygulanamayacağı literatürde bulunan çalışmalarda gösterilmiştir (Mirmiran, Shahawy 1997, Somaa 1998, Saafi 1999, Spoelstra ve Monti 1999).

2.4.1 FRP Kompozit ile Güçlendirme Yöntemleri

Mevcut kolonları FRP kompozit kullanarak güçlendirmek için çok sayıda farklı teknikler geliştirilmiştir. FRP kompozit malzemeyle uyarlanmış güçlendirme yöntemleri üç sınıfa ayrılabilir: (a) Sargılama, (b) Lif doğrultusunda sarma, (c) Önceden hazırlanmış kabukla mantolama.



Şekil 2.3 Betonarme kolonlar için tipik sargılama yöntemleri: a) FRP tabakası ile tamamen sarma, b) FRP tabakası ile sürekli kısmî spiral sargı, c) FRP tabakası ile kısmî sargılama

2.4.1.1 Sargılama

En yaygın tekniktir. Bu yöntem, tek yönlü lif tabakaları veya örülmüş lif tabakalarının polimer reçineleri emdirilmesi ve kolonun etrafına reçinesi kurumadan sarılması işlemidir. Bir kolon tamamen FRP tabakalarla sarılabilir ve bu sargı bir veya bir kaç tabakadan oluşabilir (Şekil 5.3). Dıştan FRP sargı kullanıldığında, betondaki basınç dayanımının artışı, ilk kez Fardis ve Khalli (1981, 1982) tarafından kanıtlanmıştır. Bu görüş ilk kez 1980'lerin ortasında, betonarme kolonların güçlendirilmesinde uygulanmaya başlanmıştır (ACI 1996). O tarihten bu yana köprülerin ve bina kolonlarının güçlendirilmesinde bu tekniğin uygulanmasına ait birçok rapor mevcuttur (Neale ve Labossiere 1997, Teng 1997).

2.4.1.2 Lif Doğrultusunda Sargılama

Lif doğrultusunda sargılama, temelde 2.4.1.1'deki sargılama yöntemiyle aynıdır. Ancak, bu yöntemde bilgisayar kontrollü sargı makinesi kullanılmaktadır. FRP sargının kontrollü kalınlıkta kullanılması ve liflerinin uygun doğrultularda sarılması ile kullanılan sargı miktarında hacimsal tasarruf sağlanabilir. Kolonları güçlendirmek için ilk sargı makinesi, 1980lerin ortasında Japonlar tarafından geliştirilmiştir (ACI, 1996).

Şekil 2.4 Lif doğrultusunda sargı makinesiyle sargılanma

2.4.1.3 Prefabrike Manto Kullanılması (Prefabricated Shell Jacketing)

Mevcut betonarme kolonlar, prefabrike manto kullanılarak güçlendirilebilirler. Uygulanacak alan dikkate alınarak prefabrike mantolar, tabaka halinde veya iplikçik lifleri halinde önceden hazırlanır. Bunlar, yarım çember veya L, U şekillerinde parçalardır (Nanni ve Norris 1995, Ohno vd. 1997) ve açılıp kolonun etrafına yerleştirilebilmesi için, uzunluğuna kesilmiş, yarılmış silindir prizma yüzeyi şeklindedirler (Xiao ve Ma 1997). FRP sargının etkili olabilmesi için, kolon ile FRP tabaka arasında yüzey boyunca tam bir temas sağlanması gerekir. Hazır kabuğun kesitle bütünleştirilmesi; kabukla kolon arasında yapıştırıcı madde kullanarak veya çimento harçı veya şerbeti enjekte edilerek sağlanır (Nanni ve Norris 1995, Ohno vd. 1997).

2.4.2 Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Her üç yöntemin de avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar Çizelge 2.3'de özetlenmiştir. Dıştan sargılama yöntemi; esneklik ve kolay uygulama avantajları yönüyle en uygun yöntem olarak gözükmektedir. Lif doğrultusunda makineyle sargı yöntemi de dıştan sargılama ile aynı avantajları taşır.

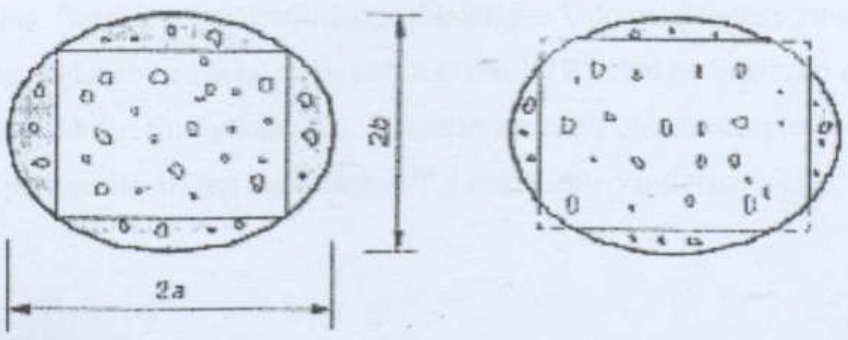
2.4.2.1 Uygulama Yönünden

Her üç teknikte de, FRP uygulaması yapılmadan önce ön hazırlık uygulamaları yapılmalıdır. Güçlendirilecek kolonun yüzeyi kuru, sert ve temiz olmalıdır. Kolonun hasar görmüş kısımları ve çatlaklar, önce iyi bir beton tamir harcı ile onarılmalıdır. Onarılmış yüzey tamir harcı ile sıvanmalıdır.

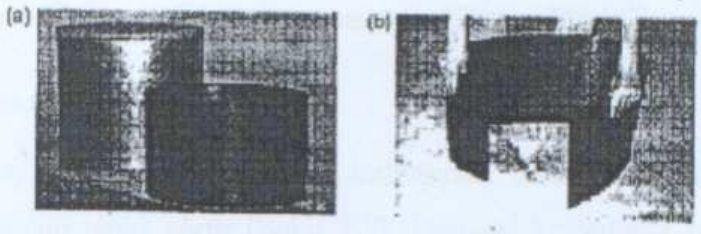
Çizelge 2.3 Kolon güçlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılması (Teng. vd., 2002)

YÖNTEM	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Sargılama (Wrapping)	Değişik kesitlere uygulama yeteneği	Kalitede kontrol güçlüğü
	İşçiliğin özel araçlar gerektirmemesi	Yoğun işçilik gerektirmesi
Lif doğrultusunda sargılama (Filament winding)	Gelişmiş-güvenilir kalite kontrol	Değişik kesitlere uygulanma yeteneği zayıf
	Sahada işçiliğ az	Uygulama esnasında özel araçlar gerektirmesi
Prefabrike manto (Prefabricated shells)	En iyi kalite kontrolü	Değişik kolon kesitlerine uygulama yeteneği sınırlı
	Saha uygulamasında işçilik çok az	Prefabrikasyon maliyeti

FRP sargısından etkili bir çekme dayanımı sağlanması için, dikdörtgen kolonların sargılanması esnasında köşeler yuvarlatılmalıdır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Dikdörgen kolonda şekil iyileştirme ve FRP sargı ile güçlendirme (a) köşe yuvarlatmasız, (b) köşe yuvarlatmalı



Şekil 2.6 Prefabrik FRP kabuklar: (a) solda Mander tipi, sağda kabuk tipi, (b) kabuğun montaj için açılması. (Teng vd., 2002)

2.4.3 Kesit Şeklinde İyileştirme

FRP ile sargılama dikdörtgen kolonlara göre dairesel kolonlarda çok daha etkindir. Bu nedenle, FRP ile sargıda etkinliği araştırmak için kolonların dikdörtgen ve kare kesitleri, olabildiğince eliptik ve/veya dairesel şekle getirilebilir.

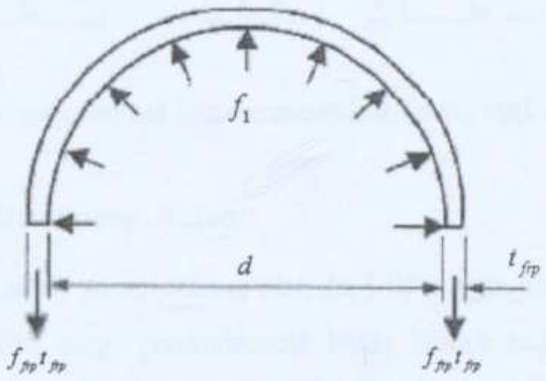
Sargı etkisini araştırmak için kolon kesitini değiştirme (section modification) fikri, ilk kez Priestley ve Seible (1995) tarafından ortaya atılmıştır. Yazarların yaklaşımlarına göre; FRP tabakalar ile güçlendirilecek dikdörtgen kolonlar sarılmadan önce kesitleri beton dolgu yastıkları ile dairesel veya eliptik şekle getirilmeleri uygun olur. Sargılama öncesi şekil iyileştirme hızlı sertleşen harç ile yapılabilir (Saadatmanesh vd. 1997). Dikdörtgen kolonlar için gereksiz kesit büyütülmesine neden olunmaması amacıyla dairesel yerine eliptik kesit tercih edilebilir. Kare kolonlarda değiştirilen kesitin doğal olarak dairesel kesit olması gerekir. Bununla beraber; kesit iyileştirmede daha birçok geometrik şekil seçenekleri bulunabilir.

Dikdörtgen kolonların güçlendirilmesinde; prefabrik dairesel veya eliptik FRP kabuklar da kullanılabilir (Teng ve Lam 2001). Bunun için eliptik şekildeki FRP kabuk, kolon etrafına bir çeşit kalıp gibi yerleştirilir; FRP kabukla kolon arasında kalan boşluk ise, daha sonra betonla doldurulur. Gerekirse, güçlendirilecek dikdörtgen kolonun köşeleri yuvarlatılarak da boyutta küçültme sağlanabilir (Şekil 5.5). Fabrikasyon FRP kabukta, Şekil 5.6 de görüldüğü gibi bir yarık bırakılabilir. Bu tip kabuklar, inceliklerine bağlı olarak kolayca açılabilirler ve kolonun etrafına yerleştirilebilirler; bunu düşey FRP ankrajının yapılması/yapıştırılması izler.

2.5 Sargılı Betonarme Kolonun Tipik Davranışı ve Göçme Modu

2.5.1 Dairesel Betonarme Kolon

FRP sargılı bir kolon eksenel basınca maruz kaldığında, beton yanal olarak genişler ve bu genişleme, FRP sargıdan tepki görür (Şekil 2.7). Dairesel kolonlarda sargıya gelen kuvvet merkezden dışarıya doğru düzgün yayılıdır.



Şekil 2.7 FRP kompozitte yanal kuşatma(sargı) basıncı

Sargının sağladığı basınç;

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp} f_{frp}}{2} \tag{5.1}$$

dır. Burada;

f_l, yanal sargının sağladığı basınç (sargının tepkisi),

f_{frp}, çember yönünde FRPnin çekme dayanımı,

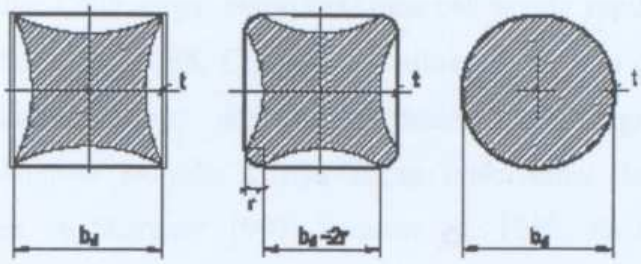
t_{frp}, FRP sargısının toplam kalınlığı,

d, Sargılanmış betonarme kolonun çapı,

ρ_{frp}, FRP sargısının hacimsel oranıdır; bu oran aşağıdaki denklemle bulunabilir:

$$\rho_{frp} = \frac{\pi d t_{frp}}{\pi d^2/4} = \frac{4 t_{frp}}{d} \tag{5.2}$$

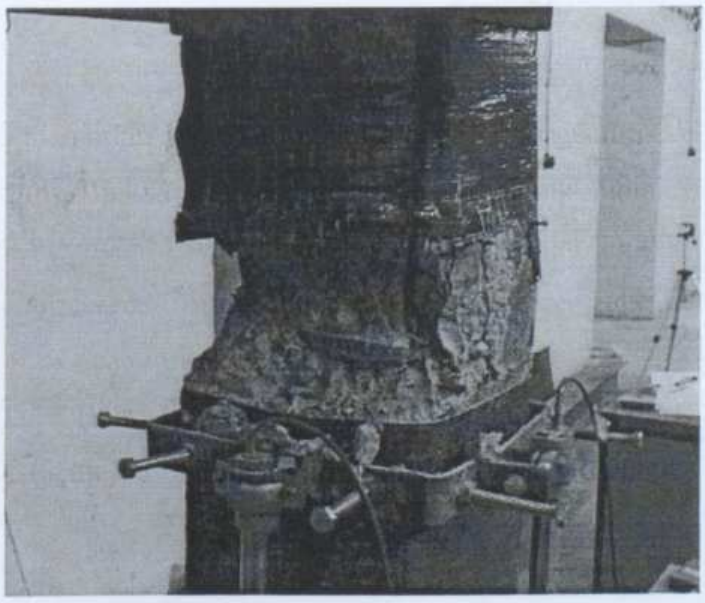
Literatürde dairesel kesitli betonarme kolon numunelerine dair bir çok çalışma vardır (Lam ve Teng 2001a, Demers ve Neale 1994, Nanni ve Bradford 1995).



Şekil 2.8 FRP ile sargılanmış betonarme enkesitinde, etkili sargı çekirdeği

2.5.2 Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolon

Dikdörtgen kolonların kenarları yuvarlatılmış olsa da, FRP sargısının etkinliği dairesel kolona göre daha az olacaktır. Bu, sargı geometresine bağlı olarak radial basınç gerilmelerinin düzgün yayılı olamamasından kaynaklanır. Şekil 2.9' da görüldüğü üzere; göçme modu genelde, FRP sargısının çekme kırılmasından dolayı köşelerde olur. Bu yüzden FRP sargısı, kolonun eksenel basınç dayanımında beklendiğinden az artış sağlar; artış oranı dairesel kesit kolonlara göre düşüktür. Bununla beraber; FRP ile sargılanmış dikdörtgen kolonda dayanım artışı, yine de makul ölçülerde olabilir (Mirmiran vd. 1998a, Rochette ve Labossiere 2000, Xia ve Wu 2000).



Şekil 2.9 FRP sargılı kare betonarme numunenin göçme modu (YTÜ deneyleri, 2006)

2.5.3 FRP Sargılı Betonun Basınç Dayanımı

Kolonların güçlendirilme tasarımında; FRP sargısından ileri gelen beton dayanımı artımını hesaplamak mümkündür. Çelik sargılı beton hakkında çok sayıda yapılmış çalışma mevcuttur (Richart vd. 1928, Mander vd. 1988, Cusson ve Paultre 1995). Son çalışmalar, çelik sargılı betonarme kolon eksenel basınç dayanım modelinin LP sargılı betonarme kolona değiştirilmeden uygulanması halinde, aşırıya kaçan mukavemet dayanım elde edildiğini göstermiştir (Mirmiran ve Shahawy 1997, Samaan vd. 1988, Saafi vd. 1999). Bununla beraber; çelik sargılı kolon hesap modellerinin bazı düzeltmelerle, LP sargılı kolonlar için de uygulanabileceğini gösteren çalışmalar da mevcuttur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 FRP Kompozit ile Kolonların Sarılması

Yapı elemanlarının onarım ve güçlendirme metotlarından biri olan FRP kompozit ile sargılama yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. FRP kompozit sarılarak yapılan güçlendirme çalışmalarının etkinliği ile eleman davranış ve dayanımı üzerine etkileri, çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. Literatürdeki deneysel çalışmaların çoğu küçük ölçekli test numuneleri ile yapılmış olup, çoğu yazar tarafından da bire bir ölçekte test numuneleriyle yapılan deneylerin yetersiz sayıda olduğu vurgulanmıştır. Deney numunelerinin tasarımı ve üretiminde bu hususlar göz önüne alınmıştır.

Bu amaçla düzenlenen deney programında 200x200mm enkesitinde 1030mm boyunda, beton kalitesi yönünden özdeş betonarme basınç elemanları kullanılmıştır. Basınç elemanları, farklı enine ve boyuna donatı konfigürasyonuna sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Hasarsız kolon numuneleri daha sonra FRP kompozit ile sarılarak, yapılan güçlendirme işleminin kolonlara katkısı incelenmiştir.

Deneysel çalışmada aşağıdaki maddelerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır;

a) Farklı enine ve boyuna donatı konfigürasyonunda üretilen betonarme kolonların eksenel basınç altında sargı (kuşatma) etkisi davranışının incelenmesi,

b) FRP kompozit ile sargılı betonarme kolonların eksenel basınç altında kuşatma etkisi davranışının incelenmesi.

3.2 Deney Programı

Deneysel çalışmada; malzeme bakımından özdeş, farklı donatı konfigürasyonuna sahip dört çeşit betonarme kolonlar üretilmiştir. Hazırlanan deney numuneleri, 200x200mm enkesitinde 1030mm boyunda;

I. $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı,
II. $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı,
III. $8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı,
IV. $8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı

konfigürasyonuna sahip olan betonarme elemanlardır. Bu kolonlar 5 seri halinde (C1, C2, C3, C4 ve C5) sargısız eksenel mukavemetlerini, FRP kompozit ile sarılı iken eksenel mukavemetleri ve iki kat FRP kompozit malzemesi ile sarılı iken eksenel mukavemetlerini belirlemek üzere eksenel yüke maruz bırakılmışlardır.

Kolonlar bir döküm üretilmiş ve 2X3 adet 15/30 standart silindir numune alınarak 28. ve 60. günlerde basınç dayanımları belirlenmiş ve ayrıca bir kolondan 3 adet karot numunesi alınmıştır. Beton kalitesi, genelde mevcut yapıları temsil edebilmesi için düşük kalitede tutulmuştur. Bunda mevcut deney düzeneğinin yükleme kapasitesinin de rolü olmuştur.

3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Hazırlanan numunelerde; 28 günlük ortalama beton silindir dayanımı 18.08 MPa, 60 günlük ortalama beton silindir dayanımı 19,36 MPa olan hazır beton, BÇ-III donatı ve FRP kompozit, Degussa Firması tarafından üretilen MBrace Fibre ve bu malzemeyi sarma işleminde ise MBT-MBrace epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır.

3.3.1 Beton Özellikleri

Deney elemanlarının beton karışımlarında farklılığın olmaması için tüm deney elemanları bir döküm hazır betonla üretilmiştir. $1m^3$ beton karışımındaki malzeme miktarları şöyle alınmıştır:

Çimento (PC 42.5), 230 kg,

Su, 186 kg,

Doğal kum(0.3mm), 361 kg,

Taş kumu(0.5mm), 410 kg,

No 1 mıcır, (5-12mm), 511 kg

No 2 mıcır, (12-22mm), 669 kg,

Kimyasal katkı, normal seviyeli akışkanlaştırıcı, 1.15 kg.

Sertleşmiş beton birim hacim ağırlığı, 2.368 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Kalıba döküm esnasında yapılan slump deneyinde slump 16cm ölçülmüştür.

Kolonların bulunduğu ortamın 28 günlük ortalama ısısı 16^0C derece olarak ölçülmüştür. 28 gün boyunca beton her gün düzenli olarak sulanmıştır. Kolon üretiminde kullanılan betondan 2X3 adet 15x30 boyutlarında silindir numune alınmıştır. Bu numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp kirece doygun suda, laboratuar ortamında bekletilmiştir. 28 gün yaştaki deneylerde, 19.30 MPa, 16.42 MPa, 18.54 MPa'lık dayanımlar elde edilmiş ve bunların ortalaması f_{c28}, 18.08MPa olarak hesaplanmıştır. Kolon deneyi yaşını yansıtan, 60. günde, alınan 3 adet numune teste tabi tutulmuştur. Testlerin sonucunda, 19.24 MPa, 19,21MPa, 19,63MPa'lık dayanımlar elde edilmiş, bunların ortalaması dayanımı f_{c60}, 19,36MPa olarak hesaplanmıştır.

3.3.2 Çelik Özellikleri

Betonarme yapı elamanlarında donatı olarak TS708 standartlarına uygun S420 nervürlü betonarme çeliği kullanılmıştır. Yapılan donatı çekme deneyinde, üç numune ortalaması akma dayanımı f_{yk}, 422 (N/mm^2) bulunmuştur.

3.3.3 FRP Kompozit Malzemesi Özellikleri

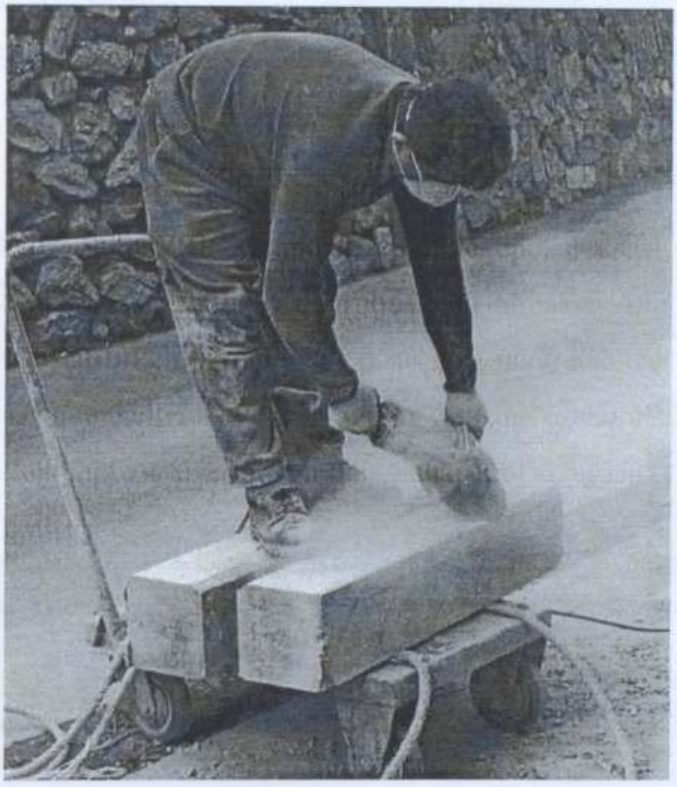
FRP kompozit malzemesi olarak, Degussa Firmasına ait bir ürün olan MBrace Fibre, Mbrace FRP 300 mm genişliğinde, 165 mikron kalınlığındaki tek yönlü fiber donatısı kullanılmıştır. MBrace Fibre elastisite modülü 230000 MPa, birim kopma uzaması (ε_u) ise % 1.5'dur.

3.3.4 Karbon Lifli Kompozitlerin Sarılması

Sargı işlemine başlamadan önce; hazırlanan kare kesitli numuneleri, eksenel yük altında gerilme yığılmasını en aza indirmek üzere, köşeleri 20 mm yarıçapında çeyrek daire kesitinde yuvarlatılmıştır (Şekil 3.1). Yuvarlatma işleminden sonra güçlendirme malzemesinin yüzeye tam yapışabilmesi sağlamak için, numune yüzeyleri fırça kullanılarak toz ve kirden arındırılmıştır.

Temizlenen yüzey önce epoksi polyamin astar malzemesi sürülerek bir gün beklenmiştir (Mbrace primer, karışım oranı 0.77:A ve 0.23:B). Daha sonra FRP kompozit malzemesinin yüzeye yapışmasını sağlayan iki bileşenli epoksi esaslı yapıştırıcı malzemesi (Mbrace saturant, karışım oranı 0.76:A ve 0.24:B) rulo ile numune yüzeyine sürülmüştür. Önceden

gerekli boyda kesilip hazırlanan FRP kompozit, rulo ile epoksi esaslı yapıştırıcı sürülen yüzeye sarılmaya başlanmıştır. Sargının lif doğrultusunda olmasına dikkat edilmiştir. FRP kompozit malzemesi el ile sarılırken, ikinci kişi LP sargının üzerinden rulo ile geçerek içerde hava boşluklarının kalmasını engellemiş ve daha iyi bir yapışma sağlamıştır. Bindirme payı da sarıldıktan sonra CFRP kompozit üzerine bir kat daha epoksi esaslı yapıştırıcı sürülerek gerekli kür süresi beklenmiştir.



Şekil 3.1 Numune köşelerinin çeyrek daire kesitinde yuvarlatılması

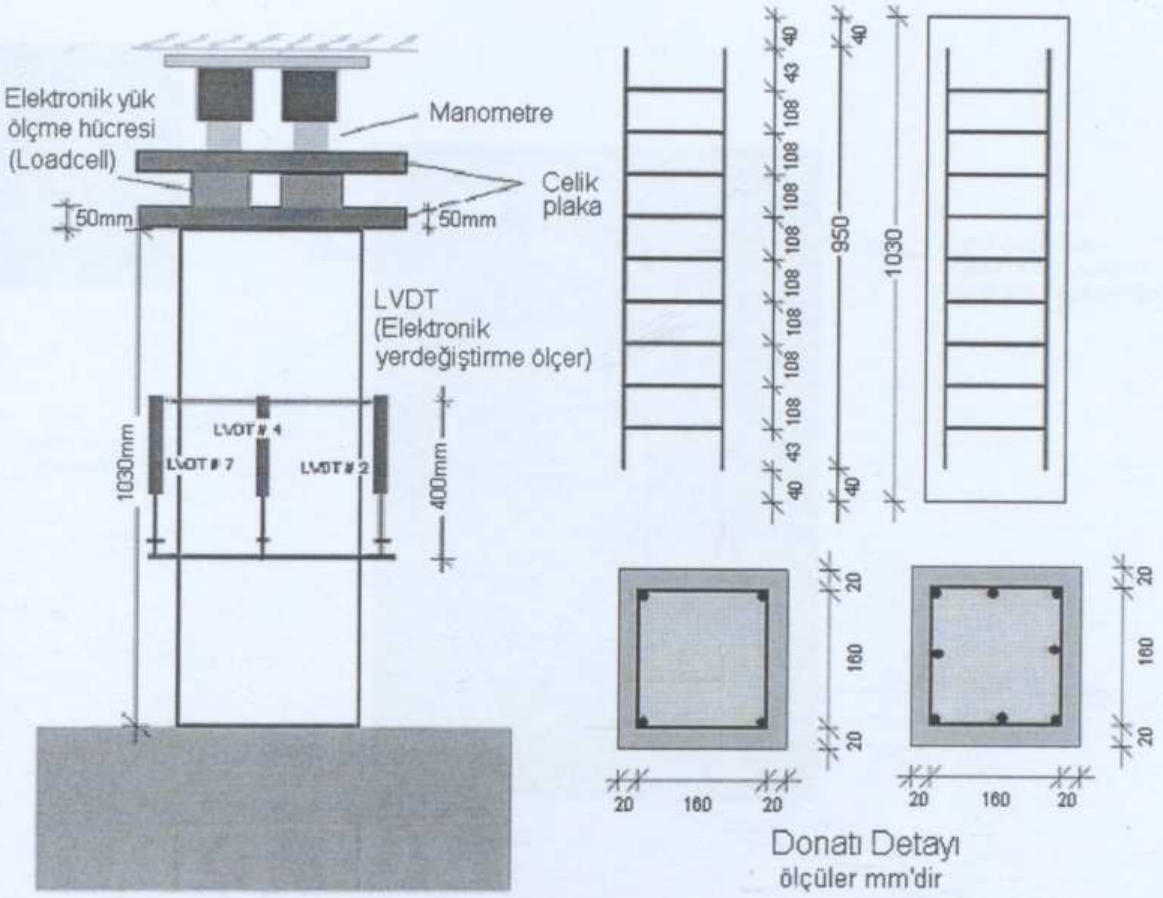
3.3.5 Deney Platformu

Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarı'nda kolon deneylerine uygun olan deney tüpünün bodrum katında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan düzenek, 2000 kN eksenel yük uygulanabilme kapasitesine sahiptir.

3.3.6 Ölçüm Düzeni

Deney öncesinde; LVDT (elektronik deplasman ölçer) ve LOADCELL (elektronik yük ölçme hücresi) ölçüm cihazlarının kalibrasyonları yaptırılmıştır. Manometre için ölçme belirsizliği %0.8 olarak verilirken maksimum sapma %1.7 ve maksimum histerisis ise %0.6 olarak bulunmuştur. LVDT ile 0.0001 cm hassasiyetle saniyede bir okuma alınmıştır. LOADCELL ve LVDT'ler tek bir kartla eş zamanlı olarak her saniyede bir okuma alır hale getirilmiş ve bu

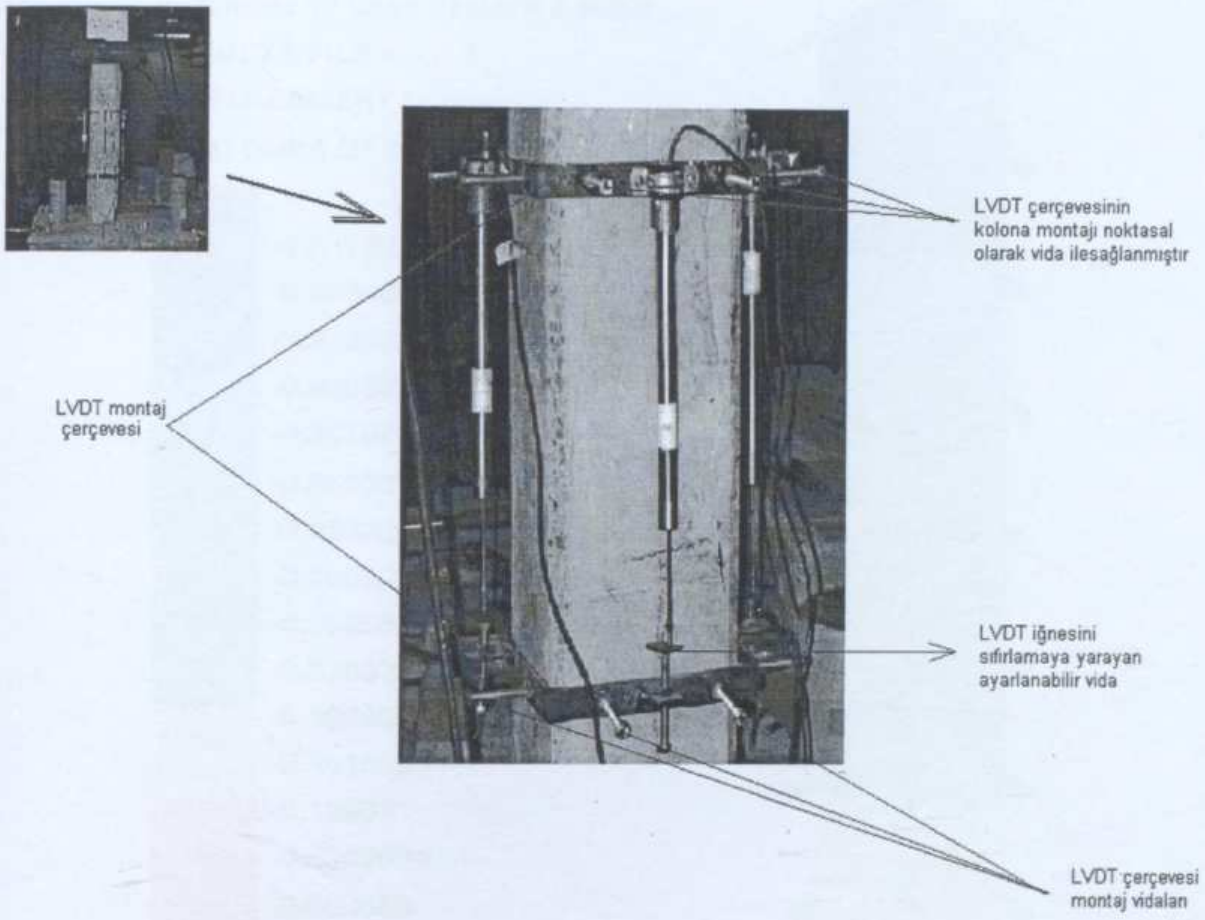
şekilde tüm deney dataları bilgisayar ortamında toplanmıştır. Deney sırasında her saniyede LVDT'lerden ve LOADCELL'den alınan okumalar, excel yazılım programında grafik haline dönüştürülmüştür.



Şekil 3.2 YTÜ deneylerinde deney düzeneği ve kolon donatı detayı

LVDT'ler ile kolonun orta kısmında 400 mm uzunluktaki bir bölgede okumalar alınmıştır. Bunun için kolonun dört kenarına birer LVDT yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). LVDT'lerin kolona montajı kesitte sargı etkisi oluşturmayacak özel bir düzenekle sağlanmıştır (Şekil 3.2 ve 3.3). LVDT'lerin yerleştirilmesi için kolon ebadından 10 mm daha geniş 210x210mm boyutlarında bir çelik çerçeve imal edilmiş ve bu çerçeve üzerindeki vidaların 4 yönden noktasal olarak kolon yüzüne dik sıkıştırılması suretiyle LVDT'ler kolona tutturulmuştur. Bu şekilde çerçevenin kolonda ilave bir kuşatma etkisi oluşturmasından kaçınılmıştır. Alt kısımdaki çerçevede, LVDT uçlarının bastığı yer, vida yardımı ile aşağı yukarı ayarlanılabilir olup, bu şekilde ilk okuma değeri için ayarlama yapılabilmiştir. Şekildeğiştirme değerlerinin okunması için toplam kolon uzunluğunun %40'ına karşılık gelen kolon orta bölgesinin seçilmesinin nedeni, bu bölgede hem gerilme, hem de şekil değiştirmeler için ortalama

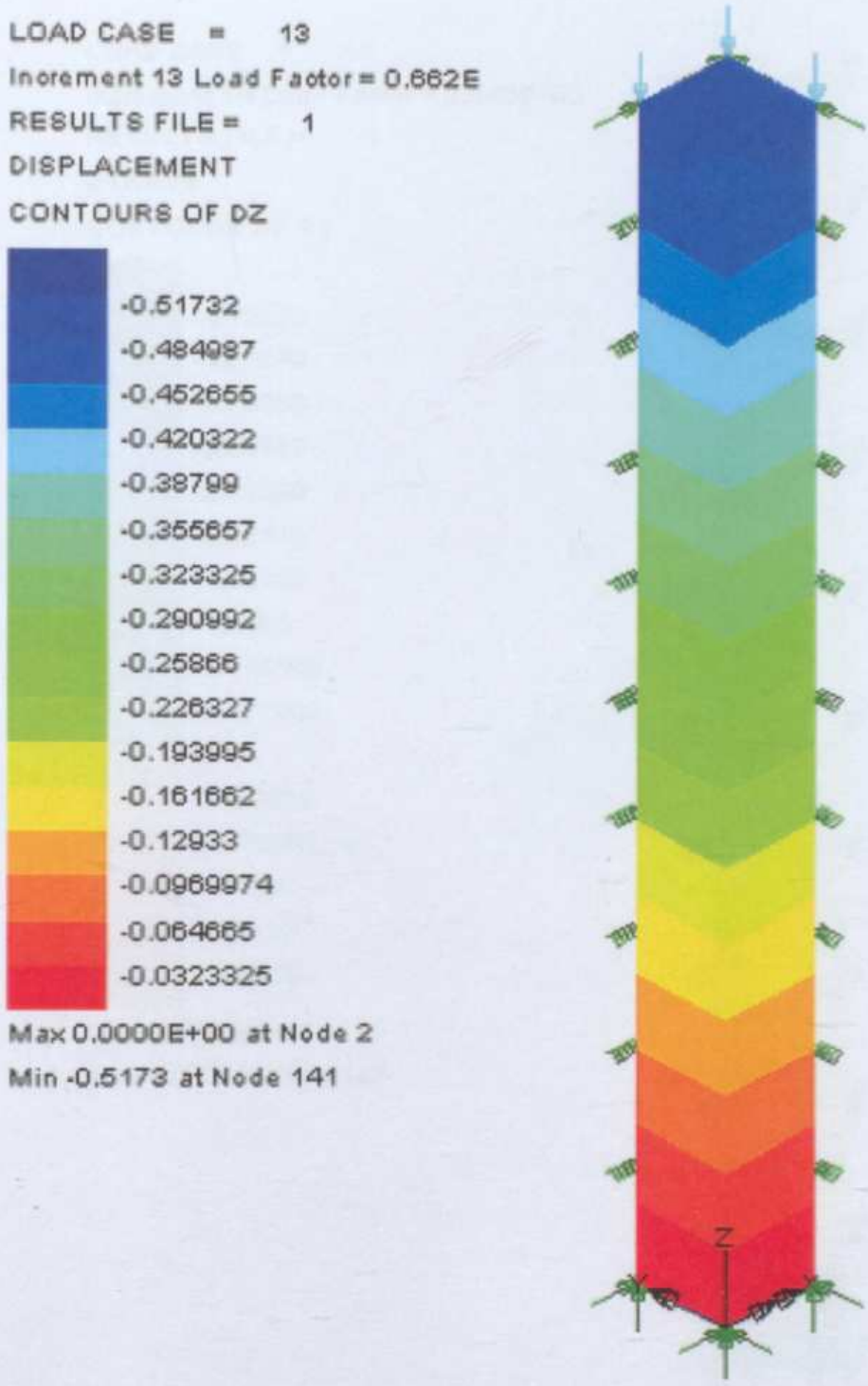
değerlerin oluşması beklentisidir. Böylelikle tek boyutlu bir elemanda kullanılacak değerler elde edilmiş sayılabilir.



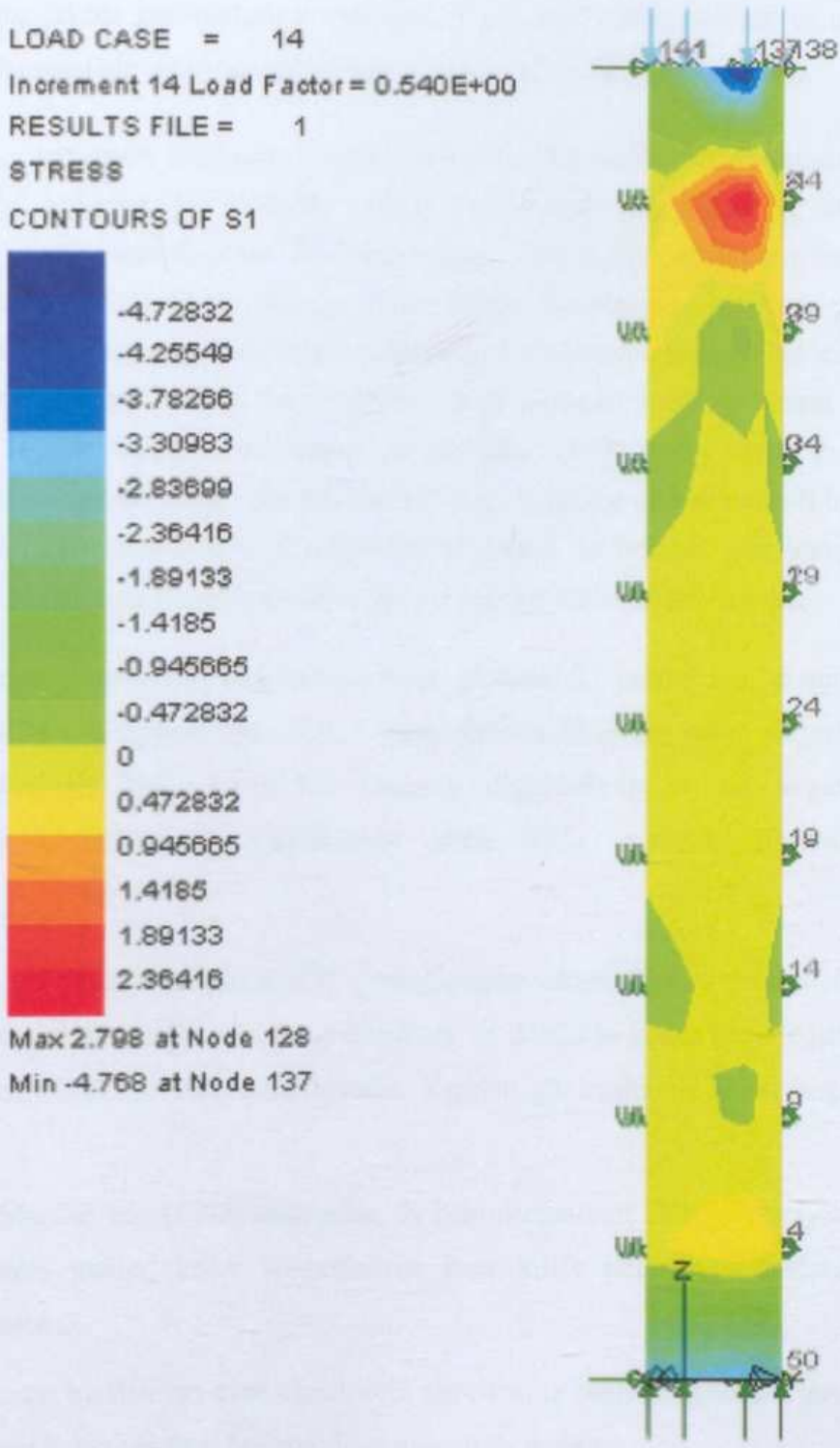
Şekil 3.3 Numune üzerinde LVDT'lerin montajı

Mimiran ve Shahawy (1997), LVDT'lerden ölçülen değerlerin ortalama birim şekildeğiştirme değerleri olarak kullanabileceğini ve strain-gauge ölçümleri kadar hassas değerler elde edileceğini belirtmişlerdir (İlki vd., 2003). Kolon yüzeyinin üzerindeki kusurlardan dolayı Strain-gauge ile alınan ölçümlerde LVDT'ye göre daha olumsuz sonuç elde edilebilmektedir. İlki ve Kumbasar (2003) deneysel çalışmalarında, eksenel birim şekildeğiştirme için, LVDT ölçümleri kullanmıştır.

Eksenel basınç deneylerinde yerdeğiştirmenin belirlenebilmesi için, ölçüm boyunun belirlenmesi hususunda: (Koç, 2004) 500 mm'lik eksenel yük uygulanan numuneler için iki ayrı ölçüm boyu kullanmıştır. LVDT ölçüm boyu 250 mm ve 500 mm olarak alınmıştır. Deneyler esnasında veri toplamada kullanılan şekil değiştirme ölçer ve yerdeğiştirme ölçerlerin benzer sonuçlar verdiğini belirtmiştir.



Şekil 3.4 Betonarme kolonların sonlu elemanlar ile modellenerek doğrusal olmayan analizinde eksenel kısalmaların kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).



Şekil 3.5 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda, kırılmaya neden olacak çekme gerilmelerinin kolon boyunca dağılışı (Köksal vd., 2006).

Betonarme kolonların sonlu elemanlar ile modellenerek doğrusal olmayan analizinde ortalama şekil değiştirmelere en yakın şekil değiştirmelerin kolon boyunun orta kısmında oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.4). Doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde ise; kırılmaya neden olacak maksimum çekme gerilmelerinin yaklaşık olarak kolon boyunca üst ve alt uçlarda yaklaşık 1/4 lük *h* mesafede oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.5) (Köksal vd., 2006).

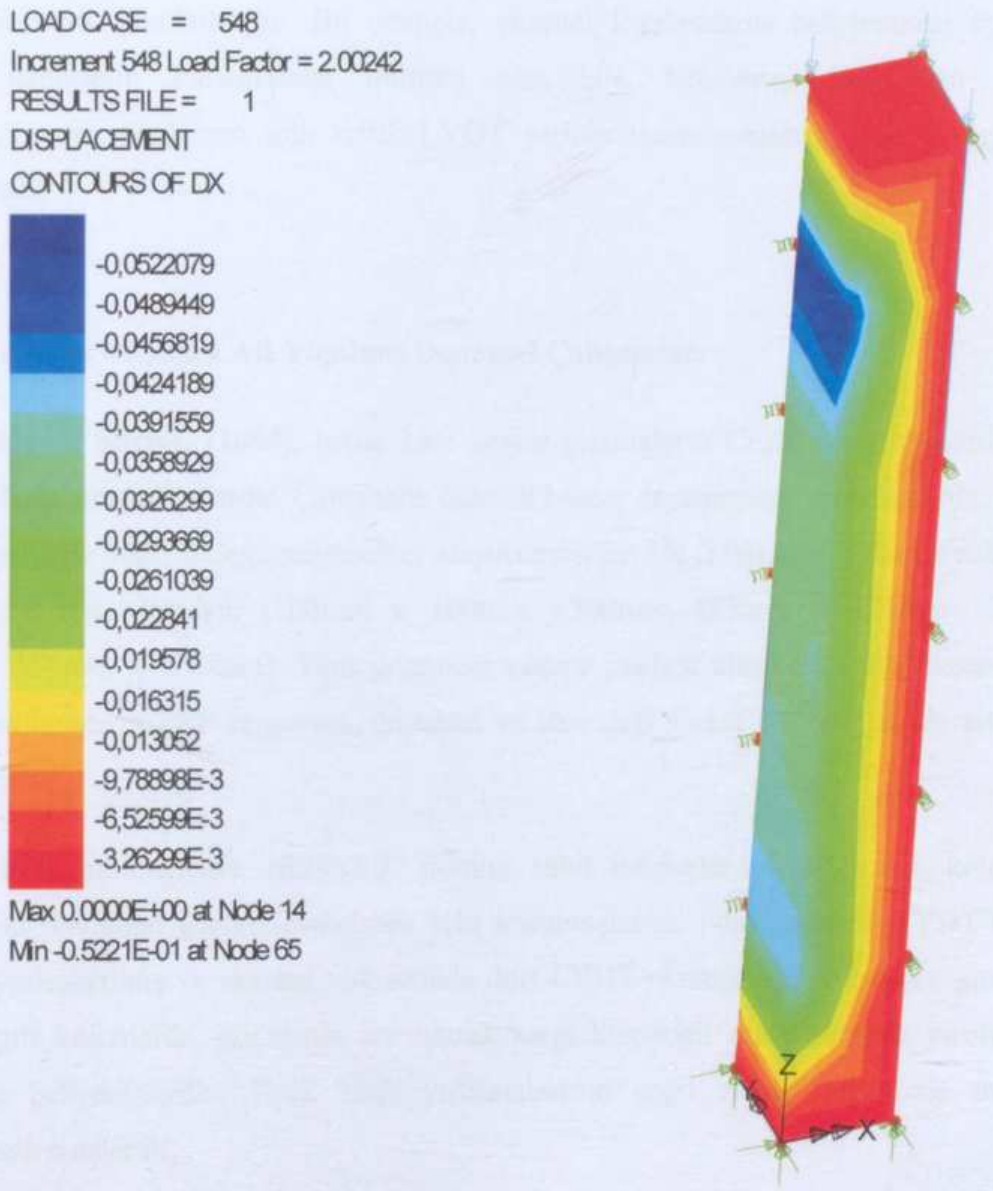
Söylemez (2006), çalışması kapsamında gerçekleştirilen BA kolonların doğrusal olmayan analizi sonucunda, kolonun dış yüzünde oluşan yanal şekil değiştirme ile kolonun iç yüzündeki yanal şekil değiştirmeler arasında büyük farklılıklar olduğunu belirtmiştir. Kolonun orta bölgesine yapıştırılacak bir strain-gauge okumasının ortalama bir değer vereceğinin ayrıca bir kanıtlanmış şekli mevcut değildir. LP yüzeyine yapıştırılan stain-gauge, yüzeydeki kusurlar, kolonda ezilme kırılmasıyla içinde bulunan yanal ve enine donatının itmesi ile farklı değerler okunmasına neden olduğundan LVTD kadar ortalama değerleri yansıtan sonuçları vermemektedirler. Bu etkiler, LP sargı üzerinde de çok eksenli bir gerilme durumu yaratarak kupon testinden elde edilen ve malzeme ile beraber sunulmuş olan LP değerlerinin sargı dayanım değerlerini de olumsuz bir şekilde etkileyebilmektedir.

Yüklemenin eksenel (concentric) oluşmasına özen gösterilmiş; bunun için analitik taşıma gücünün 1/4'ü kadar yük altında tüm LVDT okumalarının birbirine yakın değerler alması sağlanarak, gerektiğinde kolonun planda konumu değiştirilmiş ve en uygun konum bulunmaya özen gösterilmiştir. Yüklemenin sabit hızla gerçekleştirilmesine özen gösterilmiştir.

Deney esnasında kolonun dört yüzündeki yerdeğiştirme okumalarının teorik olarak eşit olmaları gerekirken ancak yerel çatlakların oluşması ve özellikle kalıcı şekildeğiştirmelerin başlaması ile farklı okumalar elde edilmektedir. Yapılan gözlemler de bunu doğrulamıştır (Köksal, 2006).

Benzer yaklaşım Mander vd., (1988) tarafından da benimsenmiştir. Dört potansiyometredeki ortalama okumaların yerine, hasar bölgesindeki bazı kritik potansiyometrelerdeki ölçü uzunluğu ele alınmıştır.

Kolondaki maksimum kısalmaları elde etmek için sınırlanmış hasar bölgesine konulan kritik LVDT'nin kesin yeri hakkında bazı belirsizlikler olduğu da açıktır.



Şekil 3.6 Eksenel yük etkisinde C1L4S8 BA kolonun yük altındaki dörtte birine ait yanal şekil değiştirme dağılımı

Bu amaçla, göçme yüküne yakın olan LVDT okumalarının ortalamaları kullanılırken, göçme yükünün yaklaşık olarak %75 değerini aldığı, kararsız çatlağın yayılmaya başlamasından sonra kolonun şiddetli oturmuş kenarındaki hasarın yığılmasını gösteren kritik LVDT okumaları tercih edilmiştir.

Diğer taraftan göçme bölgesindeki kritik LVDT'nin kesin olarak yerinin belirlenmesinde bazı belirsizlikler vardır. Kolonun hasarlı bölgesindeki LVDT için alternatif yerler, kolondaki oturma ölçülerek planlanabilir. Bu sonuçla, eksenel kısalmaların belirlenmesi için bazı ortalama değerlerin kullanılması ihtimali olsa bile, betonarme kolonların eksenel şekildeğiştirmenin ölçülmesi için kritik LVDT yerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

3.4 Diğer Araştırmacılara Ait Yapılmış Deneysel Çalışmalar:

Masia, Gale ve Shrive, (2004), beton kare kesitli prizmaların CFRP ile güçlendirilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada eksenel basınç dayanımının ve sünekliğin, eleman enkesit boyutuyla değişip değişmeyeceğini araştırmışlardır. Üç farklı kare enkesite sahip otuz adet numune test edilmiştir (100mm × 100mm ×300mm, 125mm × 125mm 375mm, 150mm × 150mm × 450mm). Tüm prizmalar göçme yüküne ulaşıncaya dek eksenel yüke maruz bırakılmıştır. CFRP sargısının, dayanım ve sünekliği dikkat çeken düzeyde artırdığını belirtmişlerdir.

Yazarlar, tüm numunelerde, *(h/b):(3/1)* oranını sabit tutmuşlardır. Bu oranı, kolon orta bölgesindeki davranışı gözlemleyebilmek için korumuşlardır. Numunelerde LVDT'ler orta bölgelere yerleştirilmiş ve eksenel yük altında dört LVDT okumasının ortalaması alınmıştır. CFRP sargılı kolonlarda, göçmenin ani olarak sargı kompozit malzemesinin yırtılmasıyla oluştuğunu belirtmişlerdir. Tipik sargı yırtılmalarının çoğu zaman köşelerde meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Mirmiran, Shahawy, Samaan, El Echary, Mastrapa ve Pico, (1998), CFRP kompozit malzemesinin, beton kolonlarda, sargı etkisi oluşturabilmesi için belli parametrelerin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda inceledikleri parametrelerden biri de narinliktir (eleman enkesitinin boya olan oranı). Uzunluk, 5:1 oranından sonra etkileten bir parametre olup, ACI ya göre bu narinlikteki kolonlarda %10 eksantrisite ve %20 dayanım azalması görülebilir.

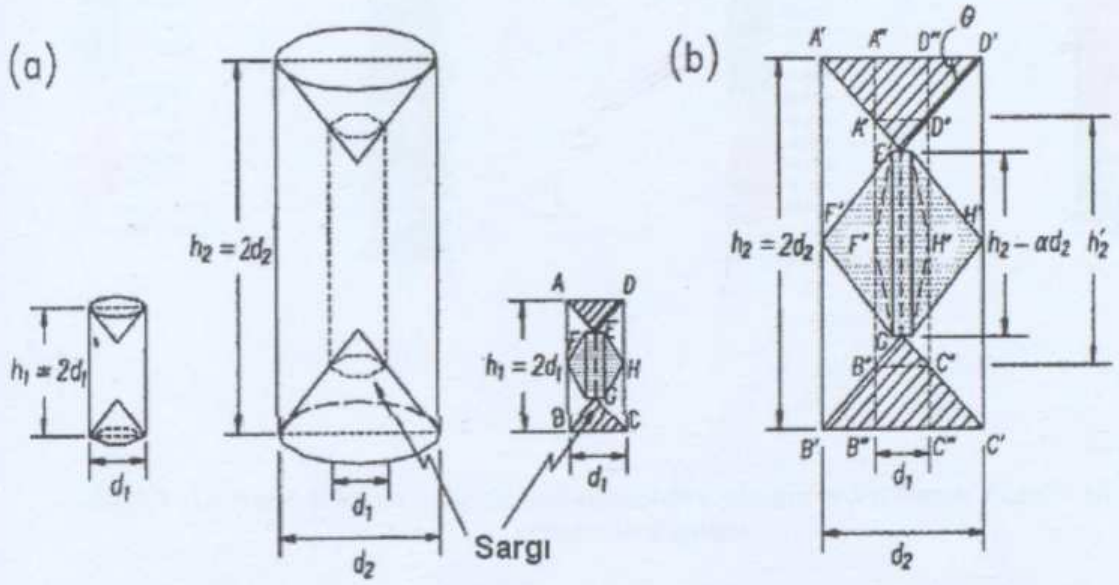
Yazarlar, deney numunelerinin orta kısımlarından LVDT ile okuma yapmışlardır. 2:1 oranın daki numuneler, ortadan çatlayarak göçme yüküne ulaşmıştır. 3:1 oranındaki numuneler üst veya alt kısım çeyreğinden, dörtte birlik kısmından çatlayarak göçme yüküne ulaşmıştır. 4:1 lik numuneler ise orta kısmın uzağında bir bölgede kırılarak göçme yüküne ulaşmıştır. 5:1 oranındaki numunelerin ise hiç biri göçme yüküne ulaşırken orta bölgede kırılmamıştır.

Matthys, Toutanji ve Taerwe, (2006), çoğu gerilme şekildeğiştirme davranışının küçük ölçekli, silindirik numuneler ile araştırıldığını, var olan modellerin ise bu numuneler ile karşılaştırıldığını belirtmişlerdir. Bu bağlamda, daha gerçeğe yakın davranış modelleyebilmek için büyük ölçekte FRP sargılı kolonlar incelenmiştir. Yazarlar, şu ana dek yapılan çalışmaların çok sayıda FRP sargılı küçük boyutta test numunelerinin artan iteratif yaklaşımla (Design-orientation) tasarıma dayalı model veya hesaba dayalı (Analysis Orientation) model sunulduğunu belirtmiş, kendilerinin 400 mm çapında 2000 mm yüksekliğinde hazırladıkları numune ile büyük ölçekli kolonu analiz eden ilk kişiler olduğunu belirtmişlerdir. Altı adet betonarme kolon imal edilmiştir. Yazarlar kolon göçme yüküne ulaşırken ki davranışı şu şekilde belirtmişlerdir: Enine sargılı kolonlar homojen bir yapıda değildirler. Dolayısı ile kolonda göçme yükünün neden olduğu lokal çatlağın yerinin belirlenmesi zordur. Ancak FRP kompozit malzemesinin yırtılması, öncelikle betonarme kolon içersindeki enine donatının kopmasıyla, o bölgede zayıflığa neden olması böylelikle homojen olmayan malzemede gerilme yoğunluğu ve FRP kompozit malzemenin kopmasını tetiklemektedir.

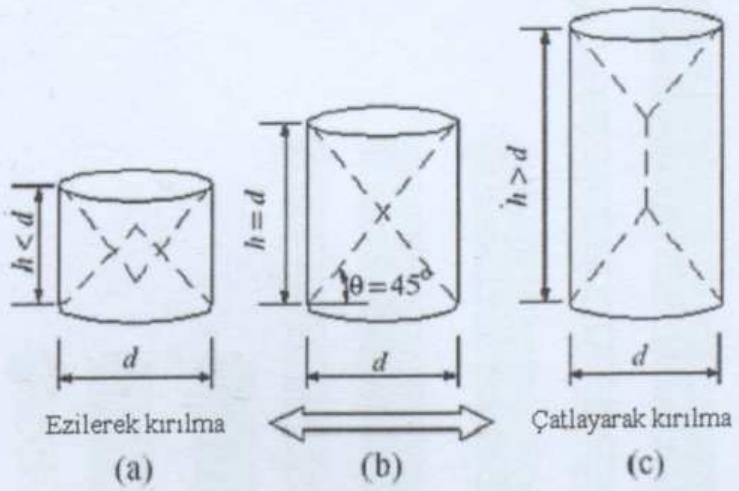
Yazarlar, sargılı beton davranışlarının çoğunun çelik sargılı betonarme kolonlar için yapıldığını ve artan yük karşısında betonun genişleyeceği ve enine donatıyı zorlamak isteyeceği, bu durumda da çeliğin akma dayanımının etkin bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşın, FRP kompozit malzemesinin ise göçme yüküne kadar lineer elastik olarak davranış gösterdiğini, bu durumda da modellemelerde bu durumun dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kim, Tae Yi , (2002), Eksenel basınç altındaki beton elemanlarda boyut etkisini incelemişlerdir. Yazarlar öncelikle, basınç gerilmesinin, çekme gerilmesine göre daha çok karmaşık yapıya sahip olduğunu, bununda çekmede gerilmenin belli noktalarda yoğunlaştığı, basınç gerilmesinin ise tüm bünyeye yayıldığını belirtmişlerdir. Yazarlar öncelikle numunelerde boyut etkisini, numunede kullanılan agrega boyutunun etki ettiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda Bazant (1984) boyutsal analizlerde dikkate aldığı boyut etki kanununu (*size effect law)* açıklamışlardır. İçsel kırıkların boyutlarının, kullanılan maksimum

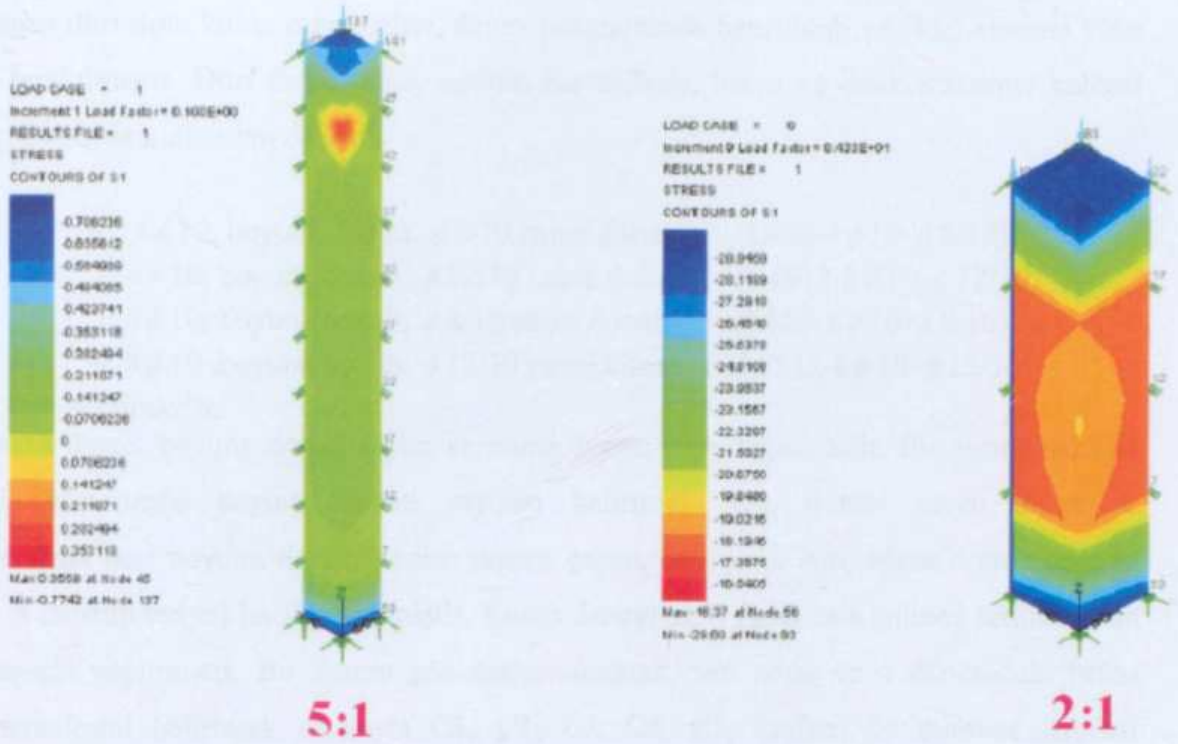
agrega boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak aynı agrega yapısına sahip, farklı büyüklükteki numunelerinde farklı kırılma davranışında bulunacaklarını belirtmişlerdir. Aynı boyutta olmayan silindir numuneler için boyut etki katsayısı sunmuşlardır: silindirik bir beton numuneye basınç yükü uygulandığında, yanal yönde genişleme eğilimine gidecektir. Bu durumda beraberinde numunede sürtünme kuvvetleri doğurur. Böylece kırılma konisi oluşur. Yanal zorlanmalardan kurtulunduğunda yanal basınç kuvveti de kaybolmuş olur ve yarılma şeklinde kırılmalar oluşur. Bu kırılma oluşumunun yeri ise numune boyutunun (boy/enkesit) oranına bağlıdır.



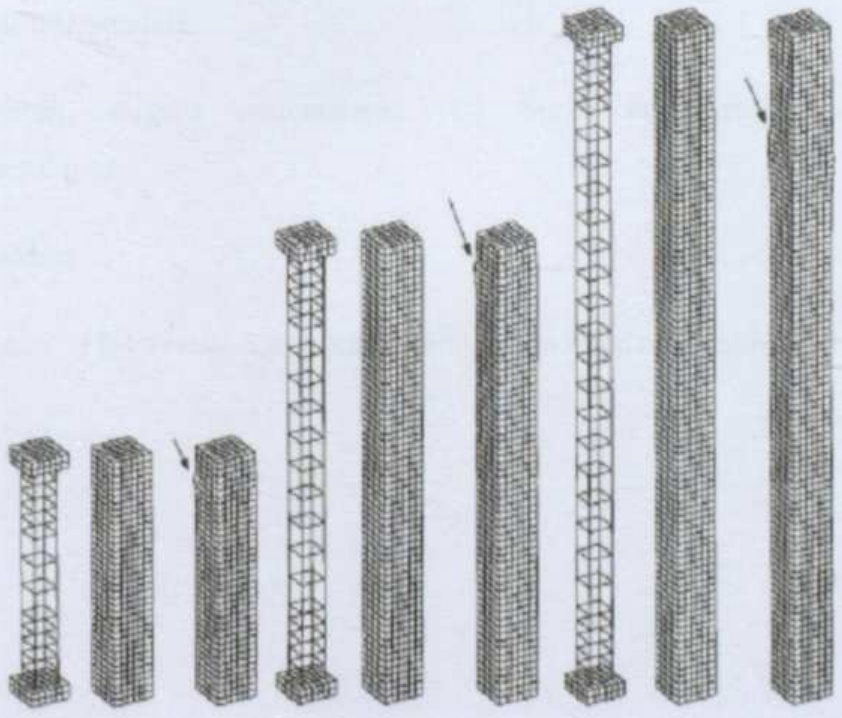
Şekil 3.7 Basınç kırılmasında, boyut etkisi (Kim ve Tae Yi, 2002)



Şekil 3.8 Boyut etkisinden dolayı basınç altında kırılma şekilleri (Kim ve Tae Yi, 2002)



Şekil 3.9 Doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde kırılmaya neden olacak maksimum çekme gerilmeleri dağılımı



Şekil 3.10 Beton kolonlarda sonlu elemanlar analizi ile boyut etkisinin incelenmesi (Michele Broccal and Zdenek P. Bazant, 2001)

3.5 Deneylerde Kullanılacak Numunelerin İsimlendirilmesi ve Özellikleri

Hazırlanan dört tipte kolon numuneleri, deney programında belirtildiği şekilde, eksenel yüke maruz bırakılmıştır. Dört farklı deney setinin her birinde, beton ve çelik malzeme kalitesi sabittir. Deneyde kullanılan donatı;

1. 4ϕ10, boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı (L4S8-4ϕ10-ϕ8/10)
2. 4ϕ10, boyuna donatı, ϕ12/10 enine donatı (L4S12-8ϕ10-ϕ12/10)
3. 8ϕ10, boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı (L8S8-8ϕ10-ϕ8/10)
4. 8ϕ10 ,boyuna donatı, ϕ12/10 enine donatı (L8S12-8ϕ10-ϕ12/10)

,şeklindedir.

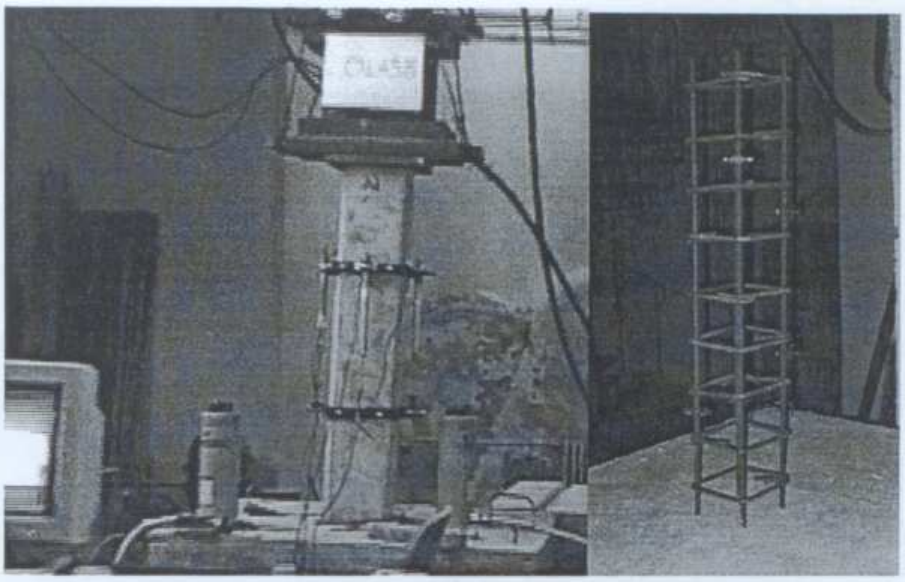
Görüldüğü üzere; boyuna donatı sayısı ve enine donatı çapı değişkendir. Bu durum dikkate alınarak gösterimde boyuna donatı sayısını belirtmek için, donatı sayısı önüne **L** (Longitudinal bar/ boyuna donatı), enine donatı çapını belirtmek için, enine donatı çapının önüne **S** (stirrup/etriye) harfi getirilmiştir. Kolon deneyleri, 5 farklı seri halinde farklı zaman aralıklarında yapılmıştır. Bu durum göz önüne alınarak, seri adını ve o dönemdeki beton mukavemetlerini belirtmek amacıyla C1, C2, C3, C4, C5, harfleri ile numune isimleri başlatılmıştır. Daha sonra ise boyuna donatı sayısı ve enine donatı çapını belirten L ve S harfleri kullanılmıştır; örnekse: 1. seri, **4**ϕ10, boyuna donatı, ϕ**8**/10 enine donatı, **C1L4S8** gibi.

3.6 C1 Serisi Kolon Deneyleri

C1 serisi kolonları, sargısız numunelerdir. C1 Serisi kolonları 4 farklı donatı konfigürasyonuna sahiptir.

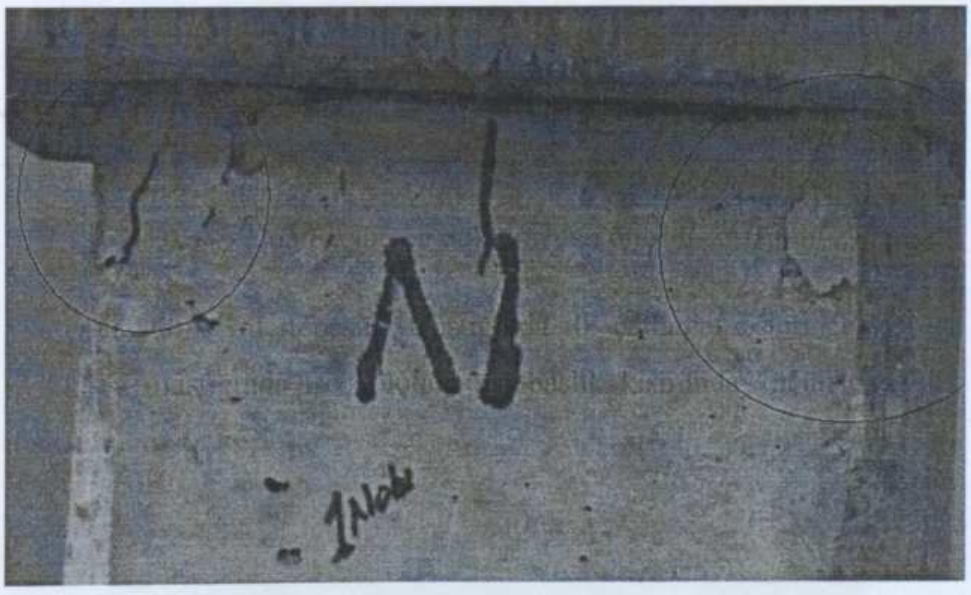
3.6.1 C1L4S8 Kolonu

4ϕ10, boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur.



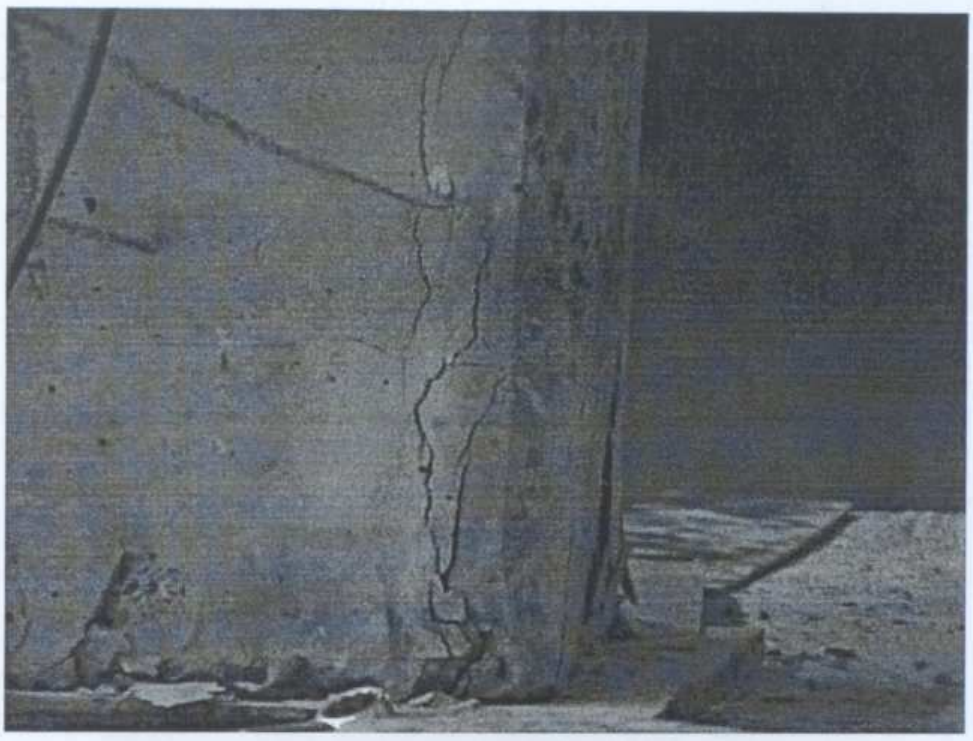
Şekil 3.11 C1L4S8 kolonu ve beton dökülmeden önce hazırlanmış donatı kafesi

Kolonda, yükleme 200kN mertebesine ulaştığında ilk çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Yükleme, 340kN'a ulaştığında ise kolonun üst başlık kısmında küçük çatlaklar oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir.



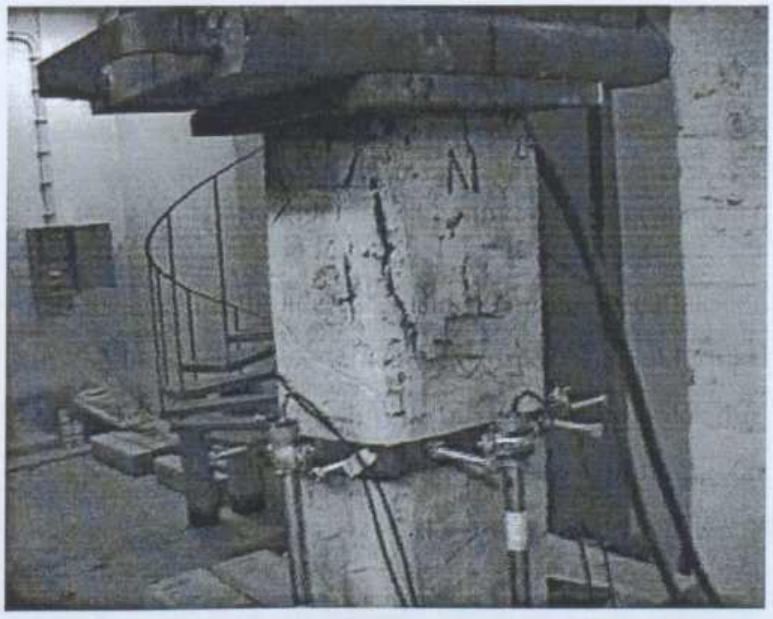
Şekil 3.12 C1L4S8 kolonu üst kısmında deney esnasında oluşan çatlaklar

Yükleme 540kN mertebesine ulaştığında ise, alt başlık kısmında çatlaklar saptanmıştır.



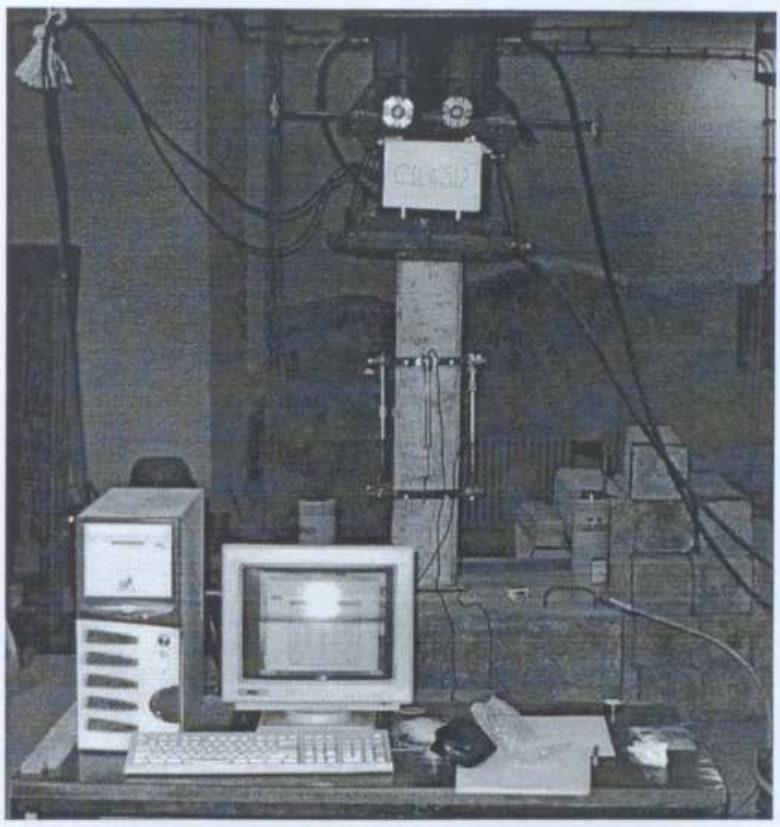
Şekil 3.13 C1L4S8 kolonu alt kısmında oluşan çatlaklar

Yükleme 600 kN mertebesine ulaştığında üst başlık kısmındaki çatlak açılmıştır ve belirgin çatlaklar oluşmuştur. Yüklemenin ilerlemesiyle, mikro çatlakların makro çatlaklara dönüştüğü, kısmi olarak kabuk betonun belirgin bir şekilde çekirdek betonundan ayrıldığı gözlemlenmiştir. 949 kN yük mertebesine gelindiğinde ise, kolonun göçme yüküne ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3.14 C1L4S8 kolonu deney sonrasında üst kısımda oluşmuş çatlaklar

3.6.2 C1L4S12 Kolonu

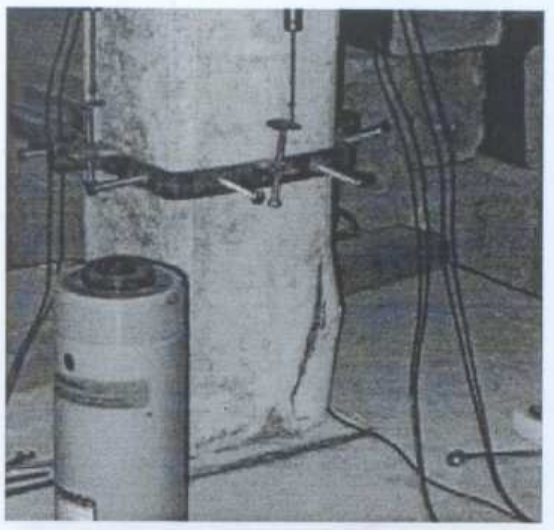


Şekil 3.15 C1L4S12 kolonu

$4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip bir kolondur. 263 kN yük mertebesinde ilk çatlak sesleri duyulmaya başlamıştır. Yük seviyesi 460 kN'a ulaştığında ise, kolonda çatlak sesleri artmıştır.

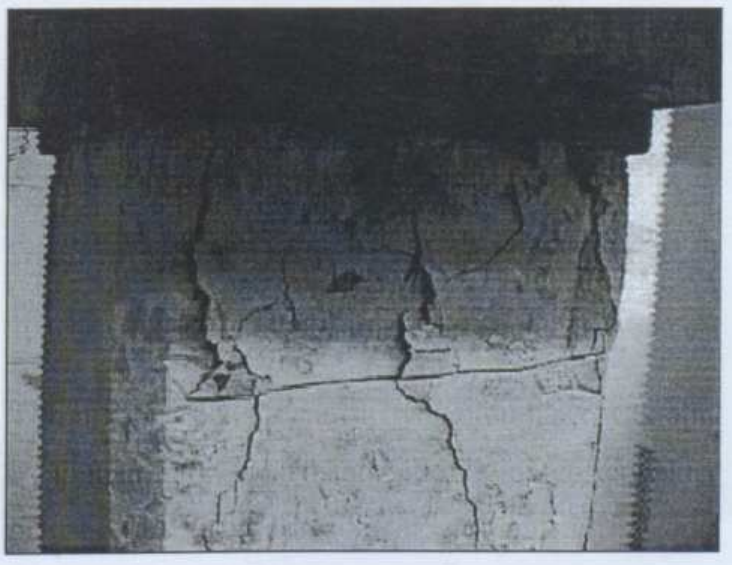
Şekil 3.16 C1L4S12 kolonu (yükleme esnasında ilk çatlakların oluştuğu kısım)

675 kN yük seviyesine ulaşıldığında, alt başlıkta başlayan kılcal çatlaklar giderek açılmaya başlamıştır.



Şekil 3.17 C1L4S12 kolonu, artan yükle beraber açılan çatlak

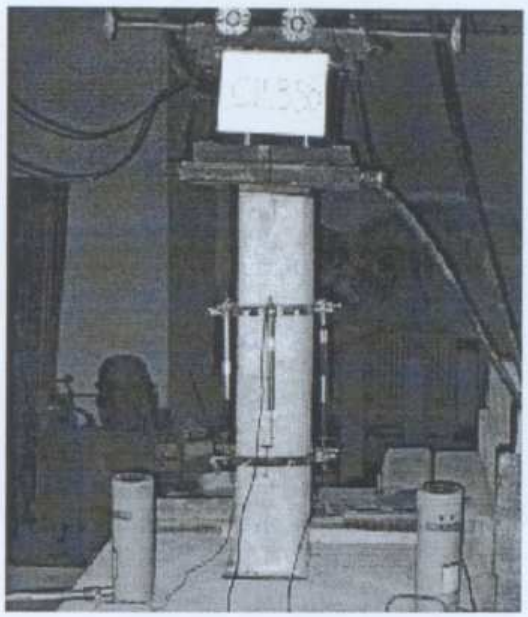
Yükleme esnasında kolon kabuk betonu atmıştır ve kolon halen yük almaya devam etmiştir. Bu durum, kolonda bulunan sargı donatısının etkinliğini göstermektedir. Göçme yüküne ulaşıldığında ise kolon üst başlık kısmında ezilmeler görülmüştür.



Şekil 3.18 C1L4S12 kolonu (üst başlığında görülen ezilme)

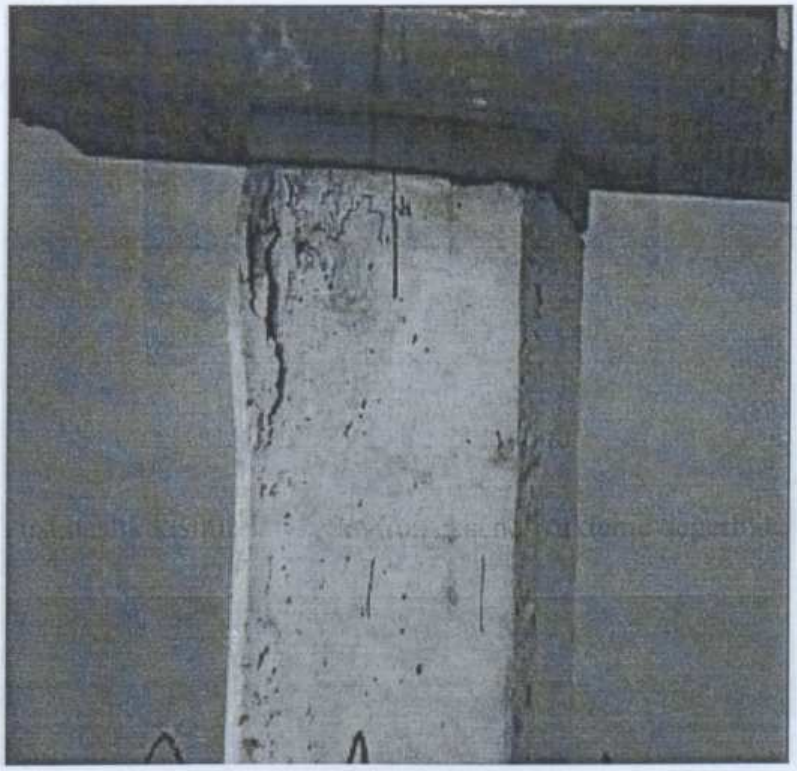
3.6.3 C1L8S8 Kolonu

$8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip bir kolondur.



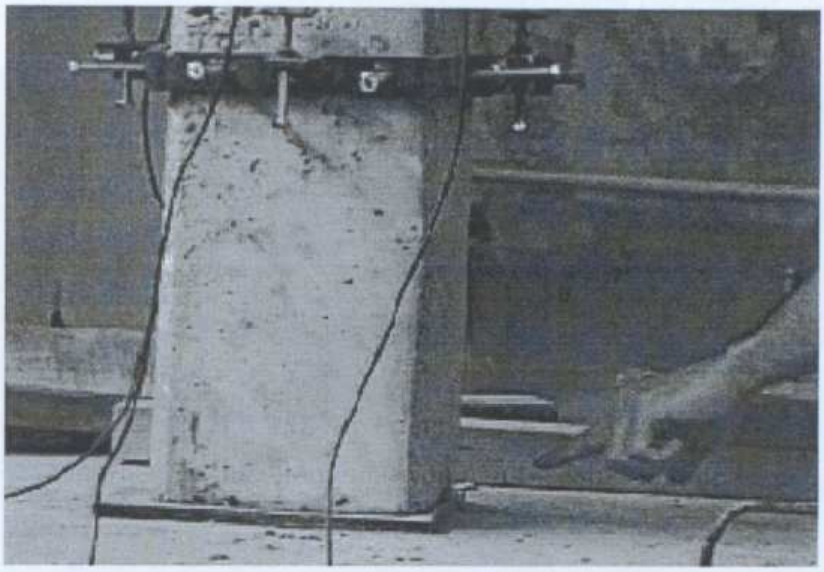
Şekil 3.19 C1L8S8 kolonu

İlk çatlama kolon üst başlık kısmında 375 kN'luk eksenel yükleme değerinde oluşmuştur.



Şekil 3.20 C1L8S8 kolonu (yüklemeyle beraber ilk görülen çatlak)

525 kN yükleme mertebesine ulaşıldığında kolon alt başlık kısmında çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

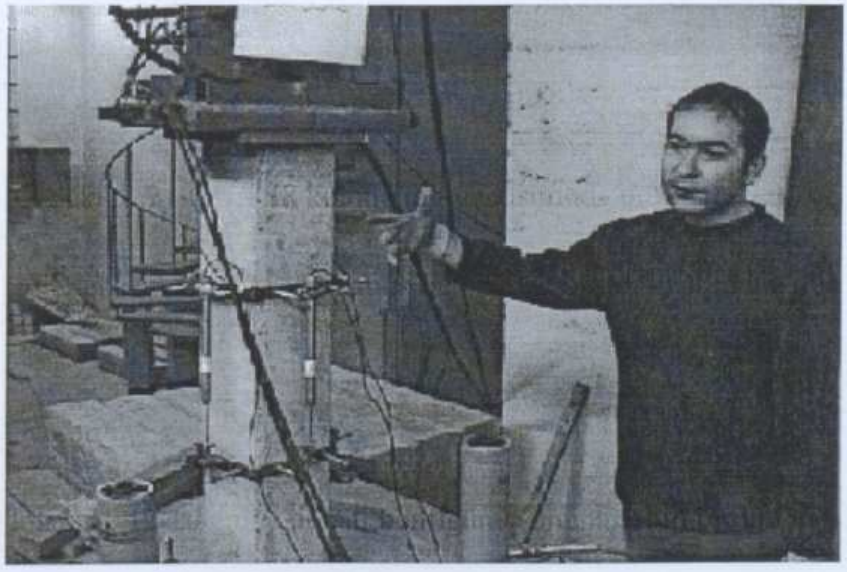


Şekil 3.21 C1L8S8 kolonu (alt uç kısmında oluşan çatlak)

808kN yükleme mertebesinde ise kolon kabuk betonu üst başlık kısmından dökülerek göçme oluşmuştur.

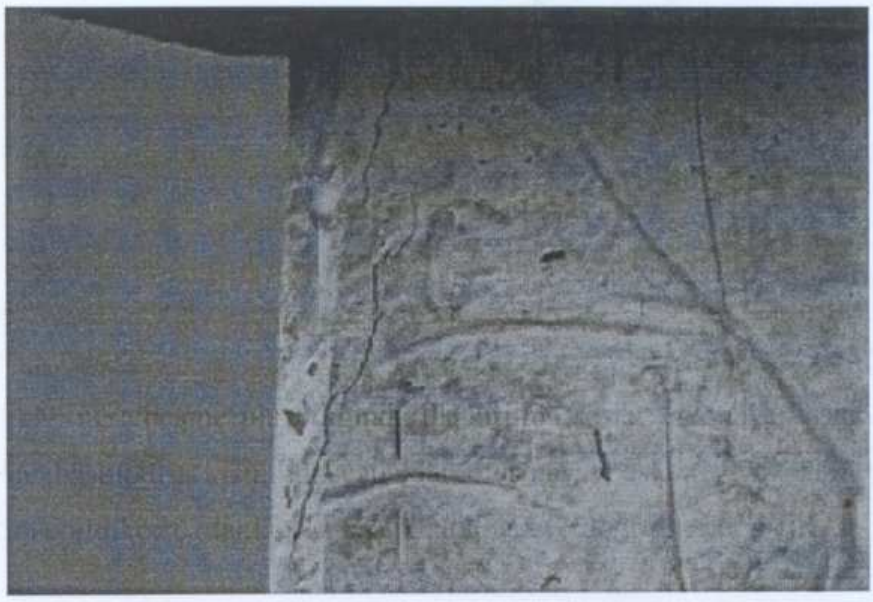
3.6.4 C1L8S12 Kolonu

$8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip bir kolondur.

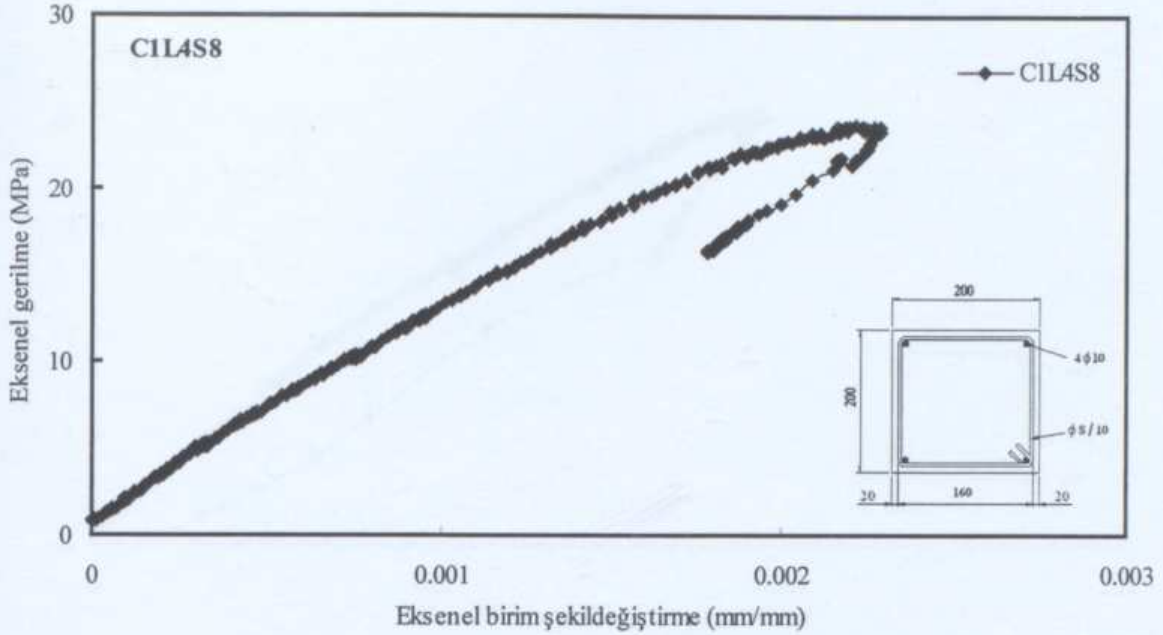


Şekil 3.22 C1L8S12 serisi kolonu

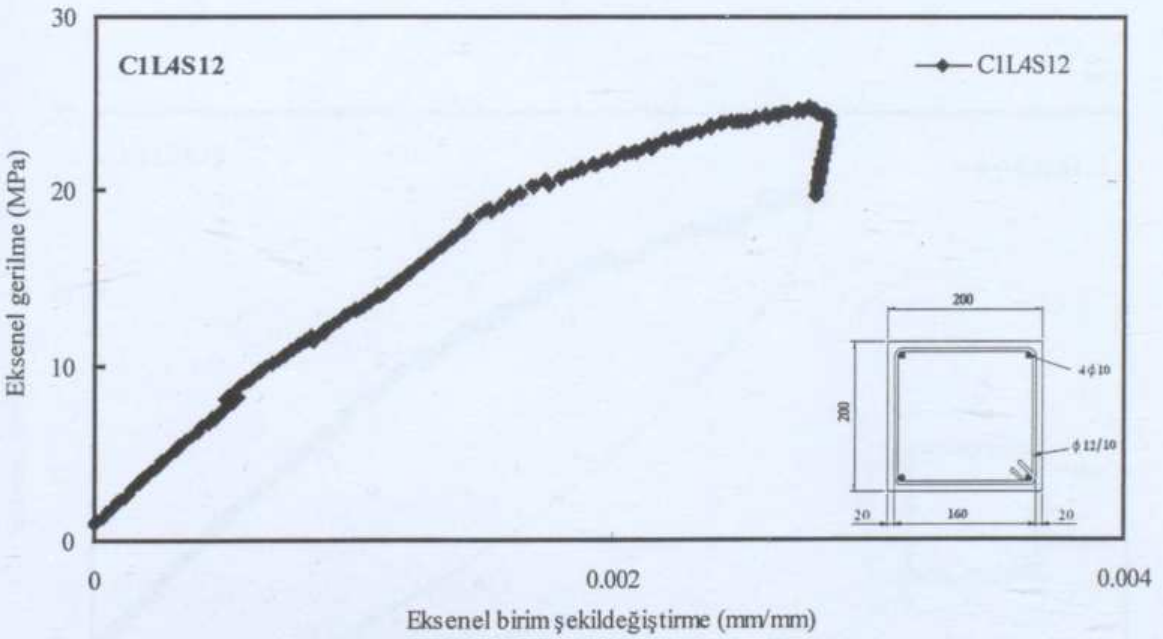
Yükleme 650 kN mertebesine ulaşıldığında ilk kırılma sesleri gelmeye başlamıştır. 770 kN yük seviyesinde başlık üst kısmında çatlaklar oluşmaya başlamış ve ezilme görülmüştür. Yükleme devam edildikçe çatlaklar üst başlıktan gövdeye doğru ilerlemiştir.



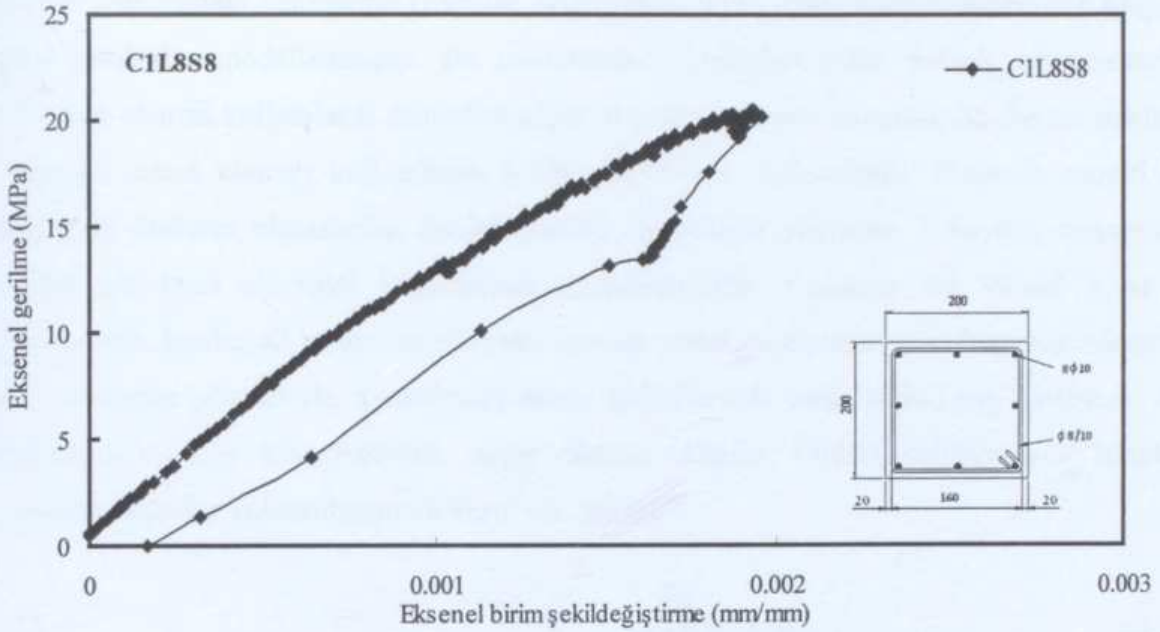
Şekil 3.23 C1L8S12 kolonu (üst uç bölgesi)



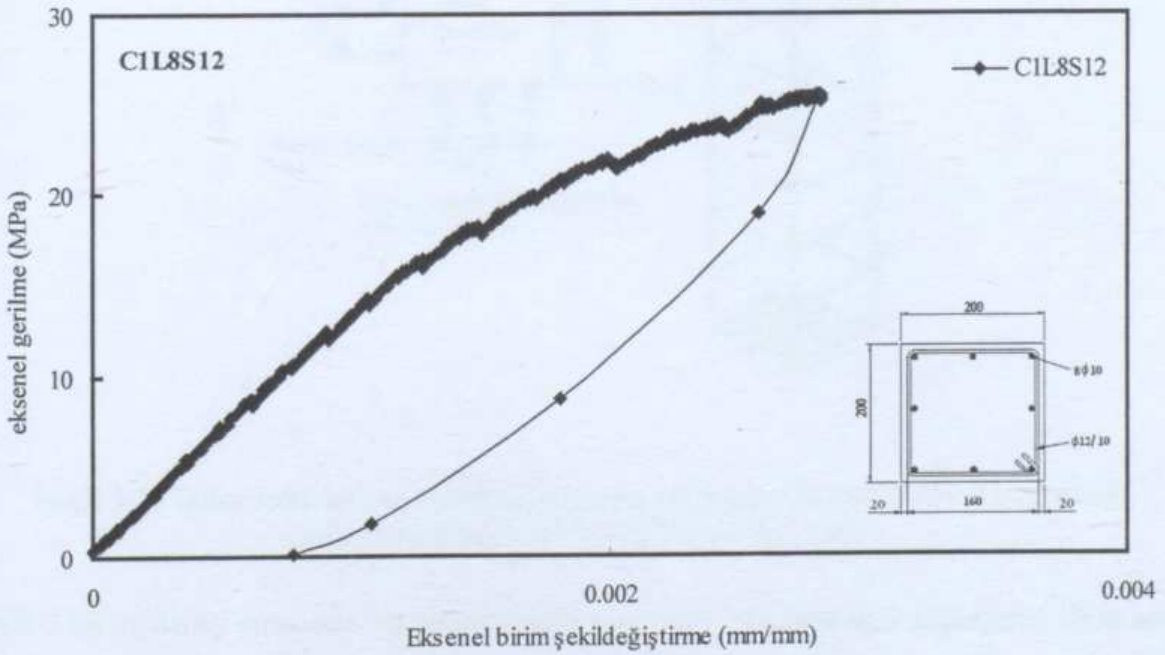
Şekil 3.24 C1L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.25 C1L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

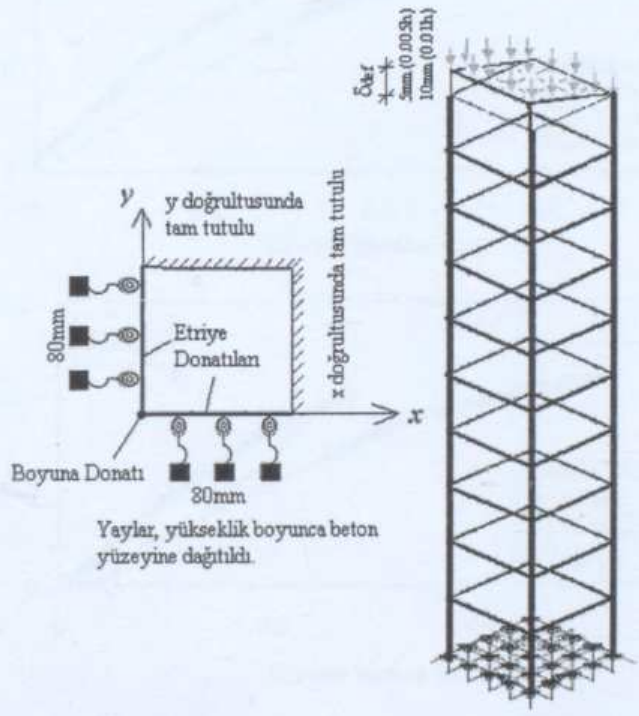


Şekil 3.26 C1L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.27 C1L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

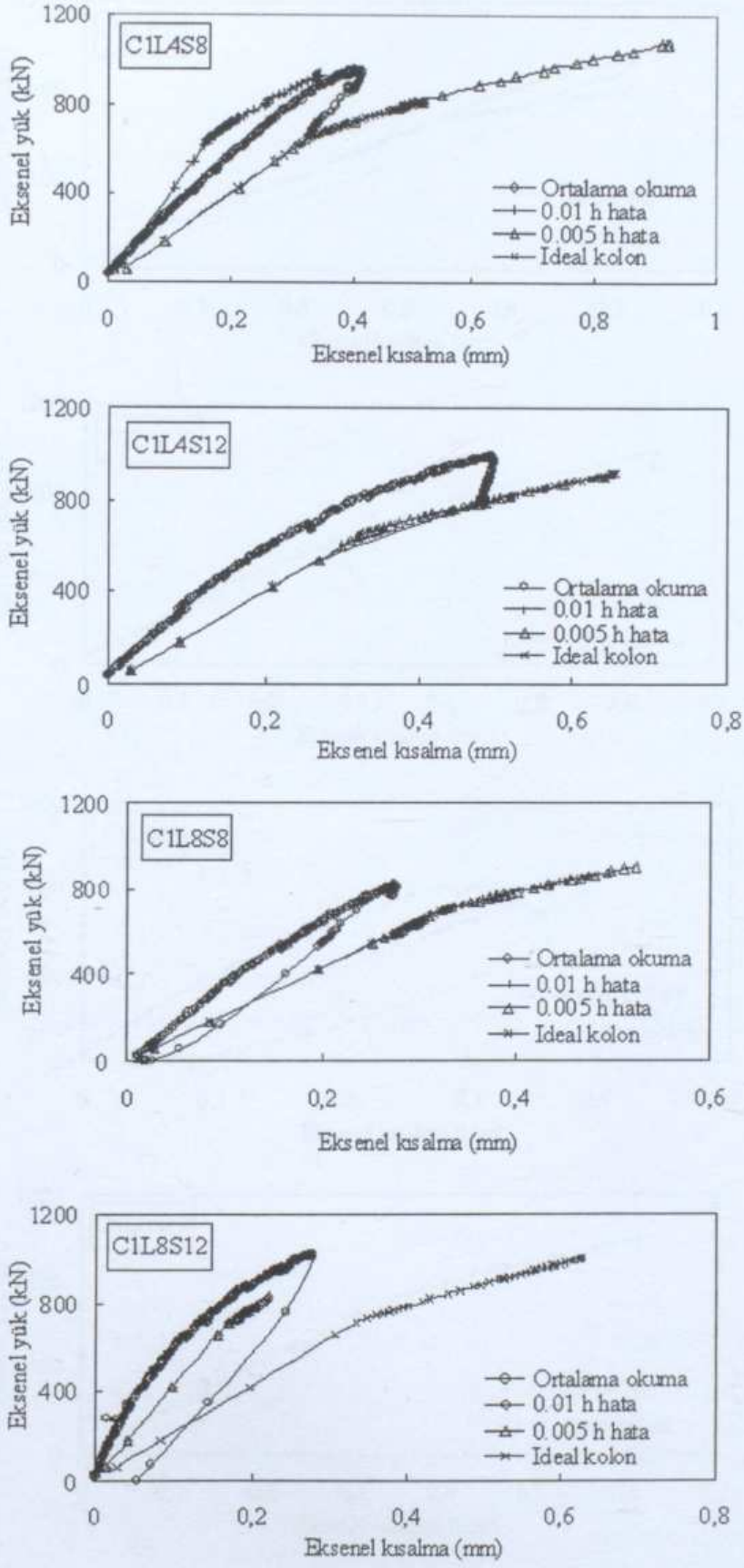
Deneysel çalışmadaki betonarme kolonlar, doğrusal olmayan sonlu eleman modeliyle Akgün, (2006) tarafından modellenmiştir. Bu modellemede kolonlar; sekiz noktalı, eşparametrik, sürekli katı eleman kullanılarak modellenmiştir. Boyuna ve yanal donatılar iki düğüm noktalı, üç boyutlu çubuk eleman kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür. Sistemin simetri ve yüklemenin üniform olmasından faydalanılarak, eşmerkezli yüklenen 3 boyutlu betonarme kolonlar 1/4 kesit simetrisi kullanılarak modellenmiştir. Kolonun üst yüzeyi x ve y doğrultusunda tutulu, alt yüzey ise ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen deney kolonlarında sargı etkisi, yay katsayıları ile tanımlanmıştır. Yay katsayılarında değer olarak, Akgün, (2006) çalışmasında sunulan parametrik değerler kullanılmıştır (Köksal vd., 2006).



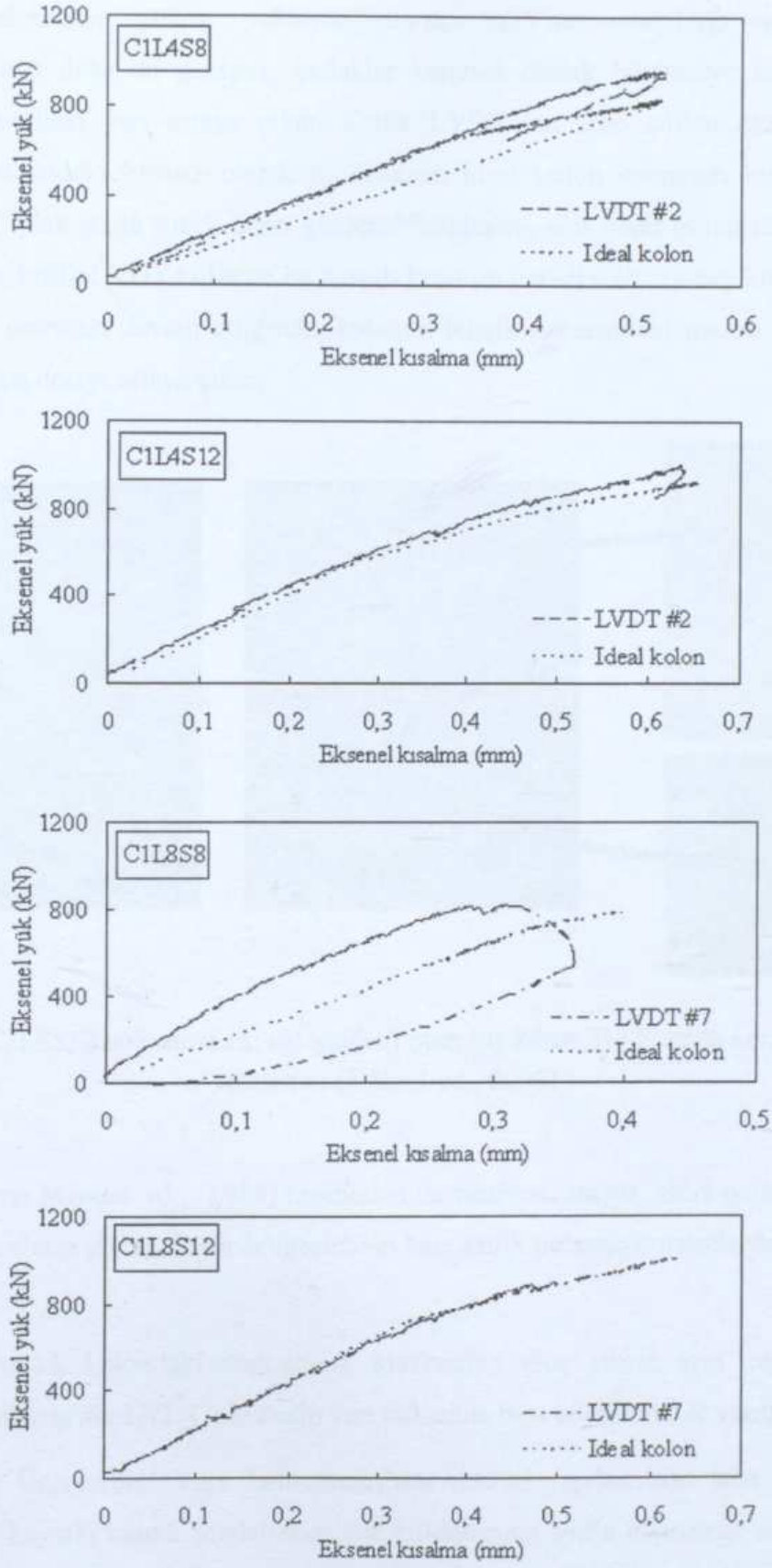
Şekil 3.28 Betonarme kolonun sonlu elemanlar programında hatalı ve hatasız olarak sonlu elemanlara ayrılması (Köksal vd., 2006)

Şekil 3.29'de deney sırasında okumaları yapan üç LVDT'nin ortalama değerlerini ifade eden eğriler ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen %1 ve %0,5 hata oranı içeren kolonların eksenel yük altındaki kısalma eğrileri görülmektedir.

%1 ve %0,5 hata oranı içeren kolonların eksenel yük-eksenel kısalma eğrileri ile deney sonuçlarından elde edilen, ortalama okumalar yapan LVDT sonuçlarına çok yakındır (Şekil 3.30).

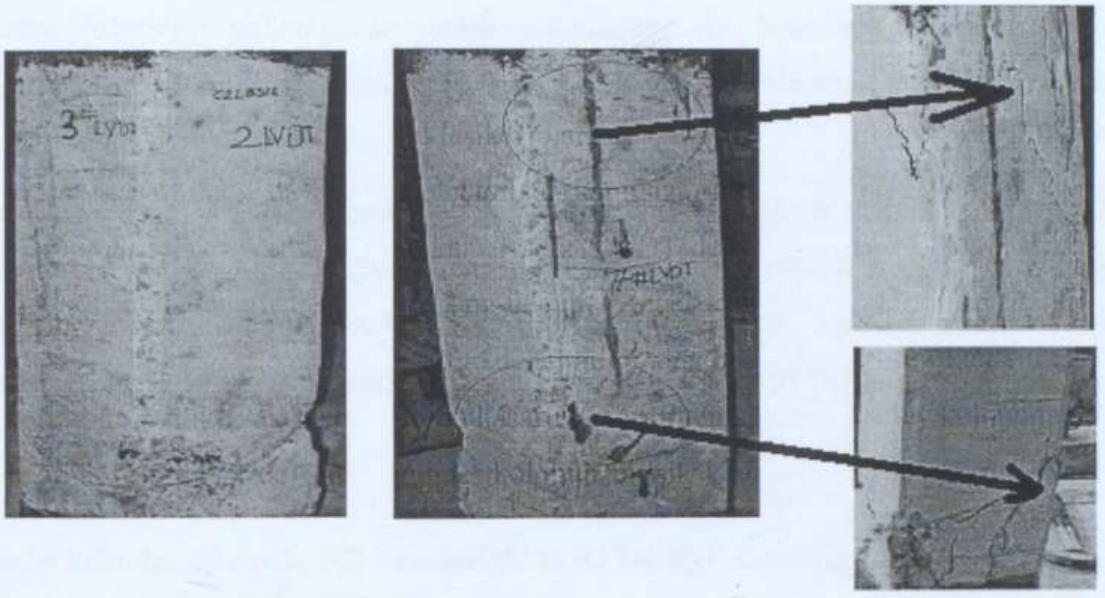


Şekil 3.29 Deney sonuçlarından elde edilen üç LVDT'nin ortalama okumaları ile geometrik hatalar etkisinde modellenen kolonların sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre eksenel yük-eksenel kısalma eğrilerinin karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)



Şekil 3.30 İdeal kolondaki sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ağır hasar görmüş bölgeye yerleştirilen kritik LVDT okumalarının karşılaştırılması (Köksal vd., 2006)

Özellikle maksimum yükün yaklaşık olarak %75'ine ulaşıldığı zaman, plastik şekildeğiştirmeler daha da genişler, çatlaklar kararsız olarak büyümeye başlar ve makro çatlakların hasardaki yeri ortaya çıkar. Kritik LVDT'den elde edilen okumalarla, sonlu elemanlar analizindeki hatasız olarak modellenen ideal kolon sonuçları birbirine yakındır (Şekil 3.29). Çıplak gözle sınırlı hasar gözlenebildiğinden, ağır hasar gören kenarın yerleşimi farklı olsa bile, kritik LVDT kolonun bu hasarlı kenarını temsil eder. Deney kolonunun göçme yüküne yakın oturması devam ettiğinde, kolonun bitişik kenarındaki makro çatlaklar hacim genişlemesinden dolayı ortaya çıkar.



Şekil 3.31 C2L8S12 kolonuna ait: (a) Şiddetli oturmuş kenar (b) Komşu kenardaki makro çatlaklar (Köksal vd., 2006)

Benzer yaklaşım Mander vd., (1988) tarafından da benimsenmiştir. Dört potansiyometredeki ortalama okumaların yerine, hasar bölgesindeki bazı kritik potansiyometrelerdeki ölçü dikkate alınmıştır.

Ancak açıktır ki; kolondaki maksimum kısalmaları elde etmek için sınırlanmış hasar bölgesine konulan kritik LVDT'nin kesin yeri hakkında bazı belirsizlikler vardır.

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarı'nda testleri yapılan dört adet kolonun deney dataları ile üç boyutlu olarak modellenen test kolonlarının sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, eksenel şekildeğiştirmenin ölçülmesindeki bazı belirsizlikler araştırılmıştır.

Bu amaçla; göçme yüküne yakın olan LVDT okumalarının ortalamaları kullanılırken, göçme yükünün yaklaşık olarak %75 değerini aldığı, kararsız çatlağın yayılmaya başlamasından sonra kolonun şiddetli oturmuş kenarındaki hasar yığılmasını gösteren kritik LVDT okumaları tercih edilmiştir.

Bu durumda sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel veriler iyi uyum sağlamaktadır.

Diğer taraftan göçme bölgesindeki kritik LVDT'nin kesin olarak yerinin belirlenmesinde bazı belirsizlikler vardır. Kolonun hasarlı bölgesindeki LVDT için alternatif yerler, kolondaki oturma ölçülerek planlanabilir. Bu sonuçla, eksenel kısalmaların belirlenmesi için bazı ortalama değerlerin kullanılması yeterli sayılabilirse de, betonarme kolonların eksenel şekildeğiştirmenin ölçülmesi için kritik LVDT yerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulduğu görünmektedir.

Kolonların üst yüzeyindeki karşılıklı iki kenarın arasında çok küçük yükseklik farkını dikkate alan sonlu eleman analizi sonuçları ile LVDT ortalamalarının birbirine yakın çıkması dikkate değerdir. Kolon numunelerindeki bu tür hataların hazırlık aşaması sırasında olması mümkündür ve kolonlar hazırlanırken dikkatle kontrol edilmelidir (Köksal vd., 2006).

3.7 C2 Serisi Kolon Deneyleri

C2 serisi kolonlar uçlarında 100 mm derinlikte iki kat FRP sargılıdır. Bunun için kolon sargı köşeleri 20 mm çapında yuvarlatılarak pahlanmış ve FRP sarılacak bölgeye astar solventi sürülmüştür. FRP sargı-kolon ve sargı-sargı arasında boşluk bırakılmamasına özen gösterilmiştir. Bunun için gerekli görüldüğünde FRP kompozit malzemesi uygulanacak yüzey epoksi harcı ile pürüzsüz bir hale getirilmiş ve bundan sonra FRP kompozit malzemesinin sargı işlemine başlanmıştır. FRP kompozit malzemesi sarılırken üzerinden rulo ile geçilmiş, bu sayede olabilecek hava boşlukları en aza indirilmiştir. LP sargı aderans boyu için, ACI Committee 440' belirtildiği üzere:

$$L_e = \frac{23300}{\left(nt_{frp}E_{frp}\right)^{0.58}} \tag{3.1}$$

bağıntısı göz önüne alınmıştır. Bu bağıntıya göre, aktif sargı aderans boyu, 51.5 mm olması gerekirken, 150-200 mm alınarak uygulamada olabilecek yetersiz ankraj ihtimali bertaraf edilmiştir.

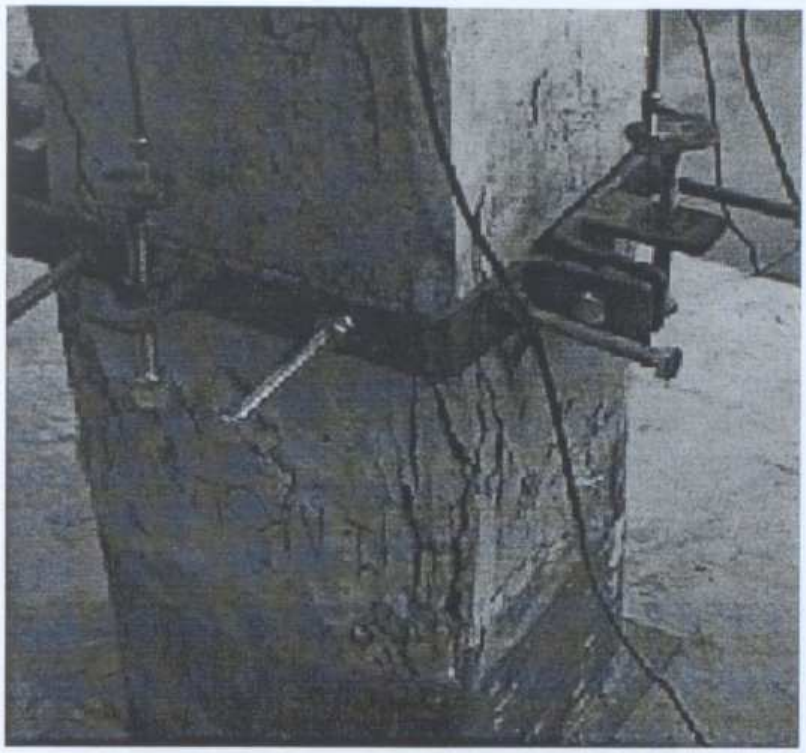
C2 serisi, iki kat kısmi FRP sargılı kolon deneylerinde, FRP malzemesi sargısının son bulduğu noktada, ilk çatlakların başlayıp, bu bölgede yoğunlaşarak orta bölgeye doğru ilerlediği, tüm C2 serisi deneyler için ortak bir gözlemdir ve FRP kompozit malzemesinin etkinliğine işaret etmektedir

3.7.1 C2L4S8 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 10 cm derinliğinde 2 kat FRP kompozit tabakası ile sarılmış, $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 8/10$ enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur.

Şekil 3.32 C2L4S8 kolonu

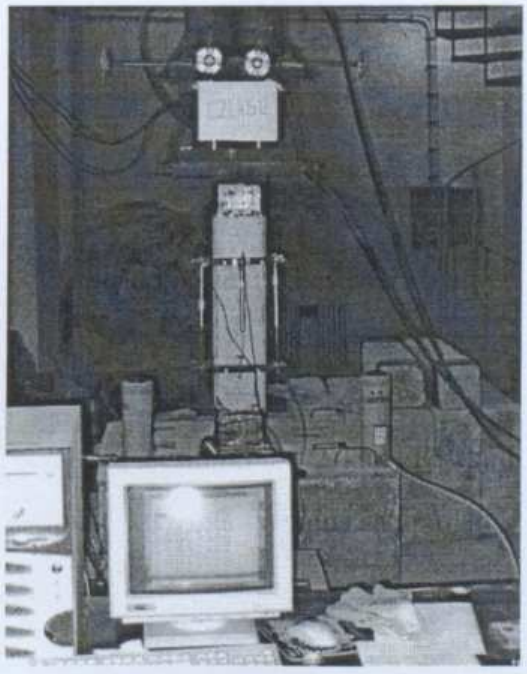
Yükleme 440 kN mertebesine ulaştığında çatlama sesleri başlamıştır. 975 kN yük mertebesinde ise kolonda, FRP kompozit sargının bittiği yerde çatlaklar görülmeye başlamış ve kolon bu bölgede dağılarak taşıma gücüne ulaşmıştır.



Şekil 3.33 C2L4S8 kolonu (deney sonrası alt uç bölgesi)

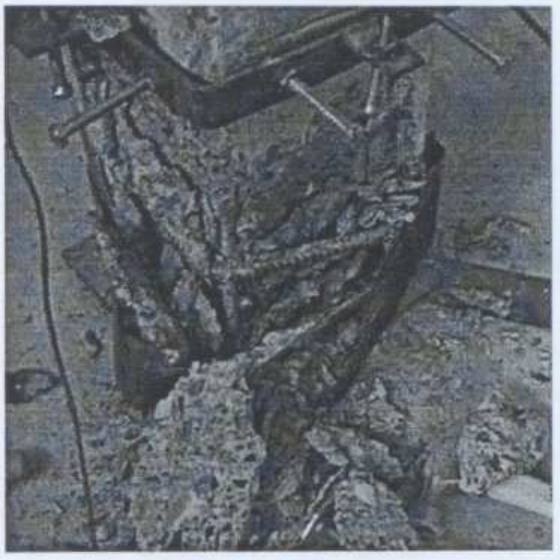
3.7.2 C2L4S12 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 10 cm derinliğinde 2 kat FRP kompozit ile sarılmış, $4\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur

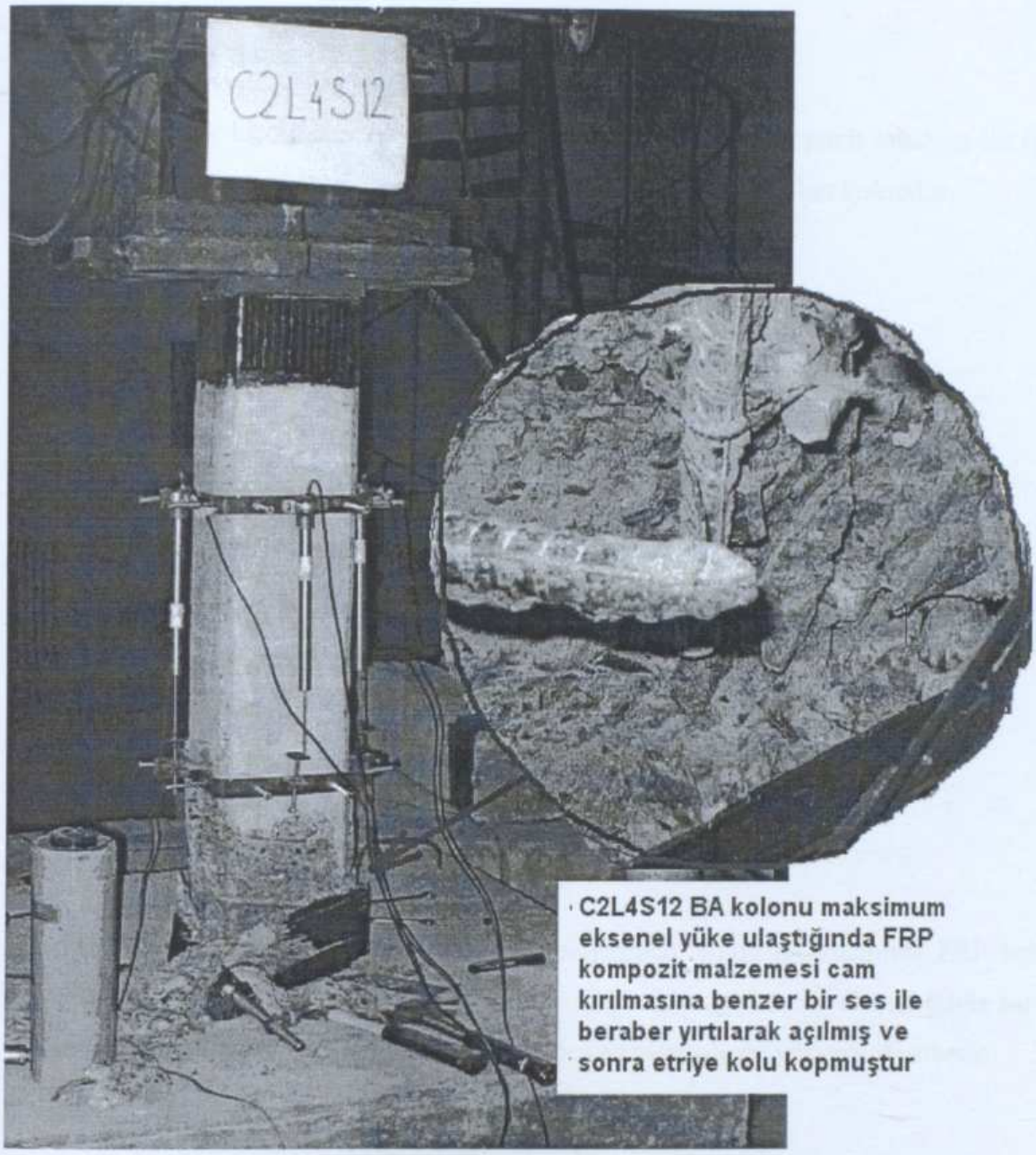


Şekil 3.34 C2L4S12 serisi kolonu

Bu kolonda 420 kN'da ilk çatlak oluşmaya başlamıştır ve 1142 kN yük mertebesinde ise alt başlıktaki FRP kompozit malzemesi yırtılarak aniden açılma yapmış, bu bölgedeki betonun dağıldığı görülmüştür.



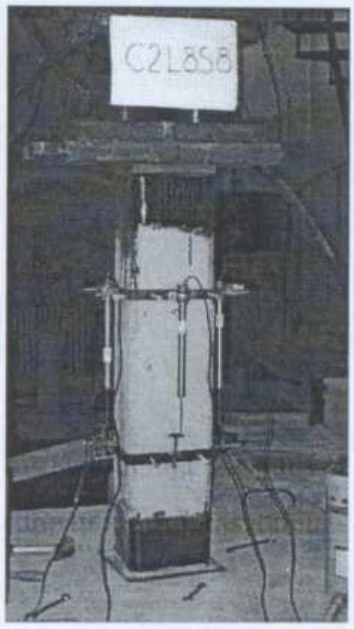
Şekil 3.35 C2L4S12 serisi kolonu



Şekil 3.36 C2L4S12 kolonu (deney sonrası göçme bölgesinin görünümü)

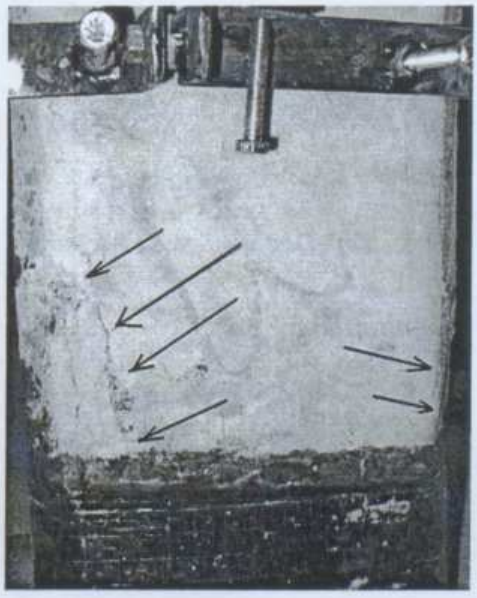
3.7.3 C2L8S8 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 10 cm uzunluğunda, 2 kat FRP kompozit tabakası ile sarılmış, 8ϕ10 boyuna donatı, ϕ8/10 enine donatı konfigürasyonına sahip olan kolondur.



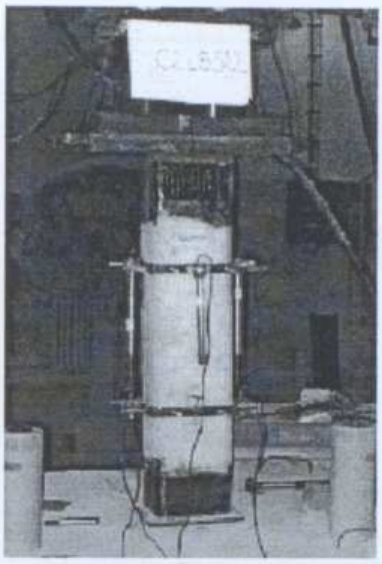
Şekil 3.37 C2L8S8 kolonu

C2L8S8 kolonunda ilk çatlak 525 kN yük seviyesinde, kolon alt kısmında FRP kompozit sargının bittiği noktadan oluşmaya başlamıştır. 1213 kN mertebesine ulaşıldığında ise mikro çatlakların büyük çatlaklara dönüştüğü görülmüş ve kolon göçme yüküne ulaşmıştır.



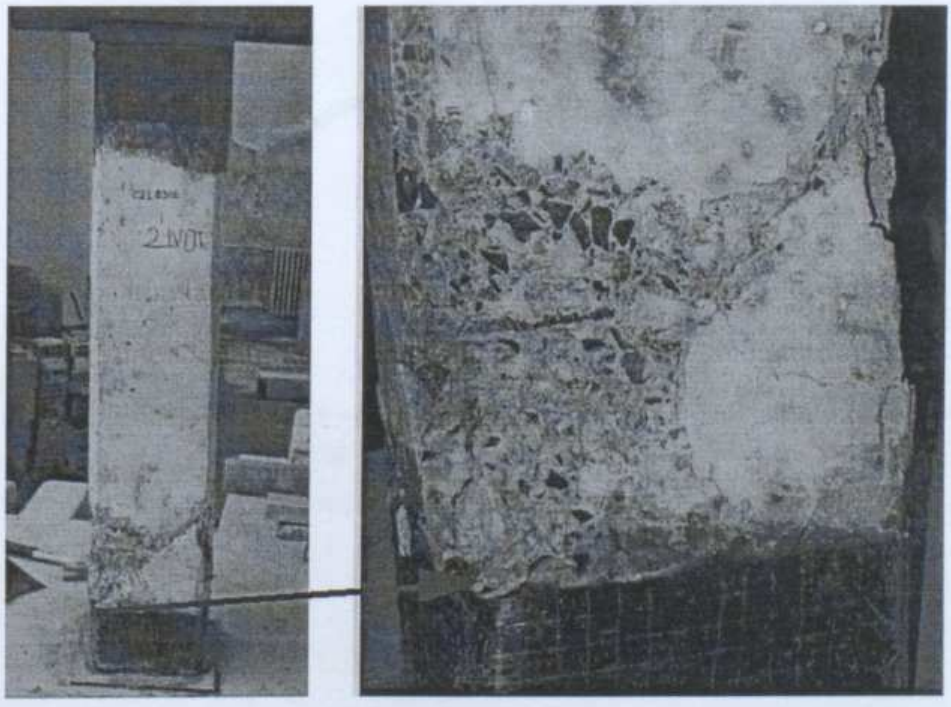
Şekil 3.38 C2L8S8 kolonu (deney sonrası kolon alt uç bölgesi)

3.7.4 C2L8S12 Kolonu

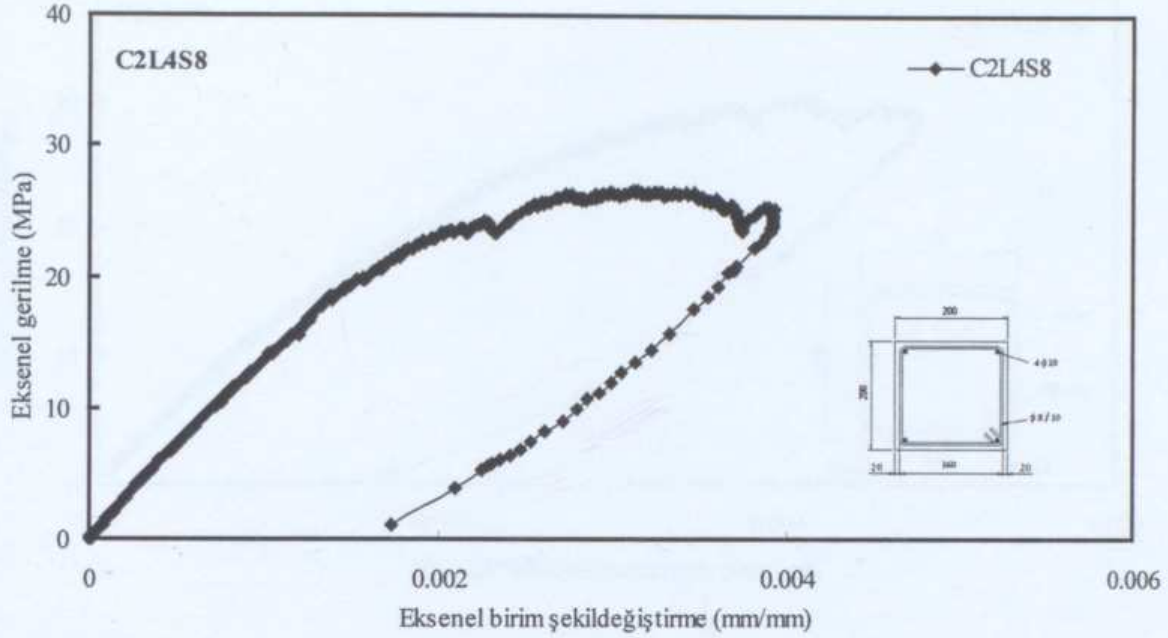


Şekil 3.39 C2L4S12 kolonu

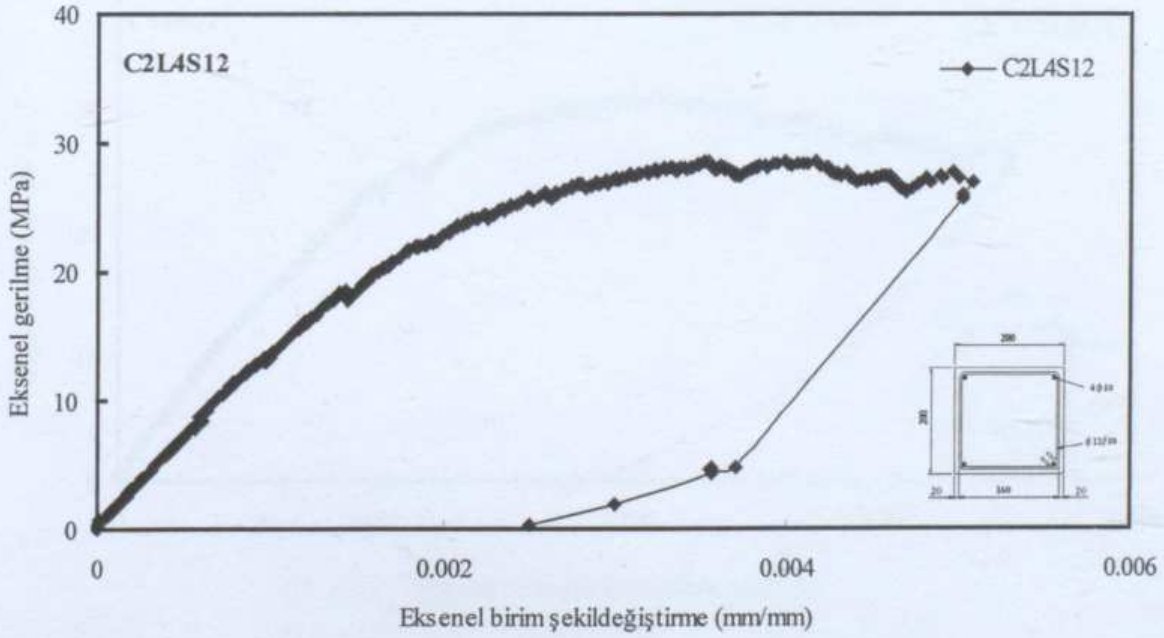
Alt ve üst başlık kısmından 10 cm derinliğinde 2 kat FRP kompozit ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna donatı, $\phi 12/10$ enine donatı konfigürasyonuna sahip olan kolondur. Yükleme 350 kN mertebesine geldiğinde FRP kompozit malzemesinden camsı çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Çatlak, önceki kolonlarda olduğu gibi, FRP kompozit sargının bittiği yerden oluşmaya başlayarak gövde ortasına doğru ilerlemiş ve kırılma gerçekleşmiştir.



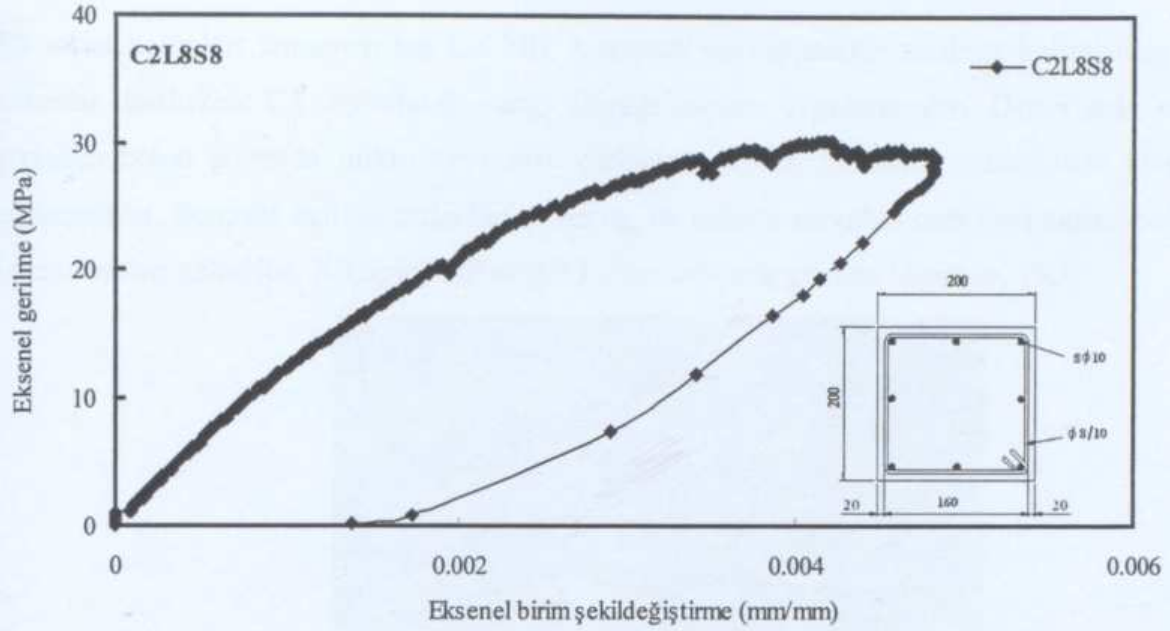
Şekil 3.40 C2L8S12 kolonunda oluşan hasarın yakın plan görünümü



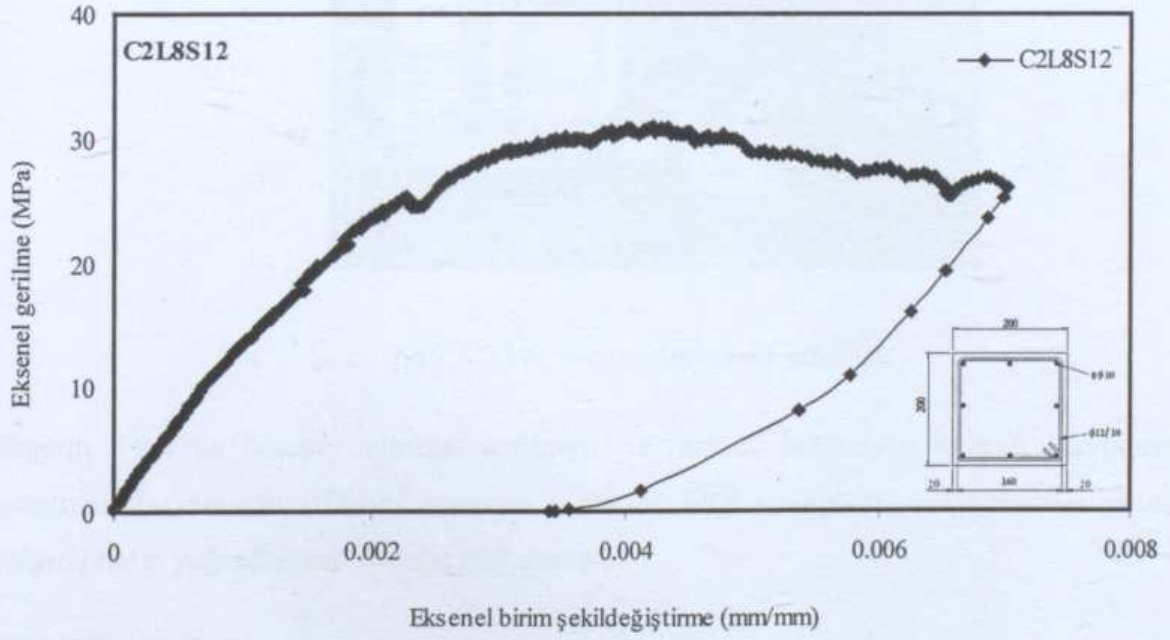
Şekil 3.41 C2L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.42 C2L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



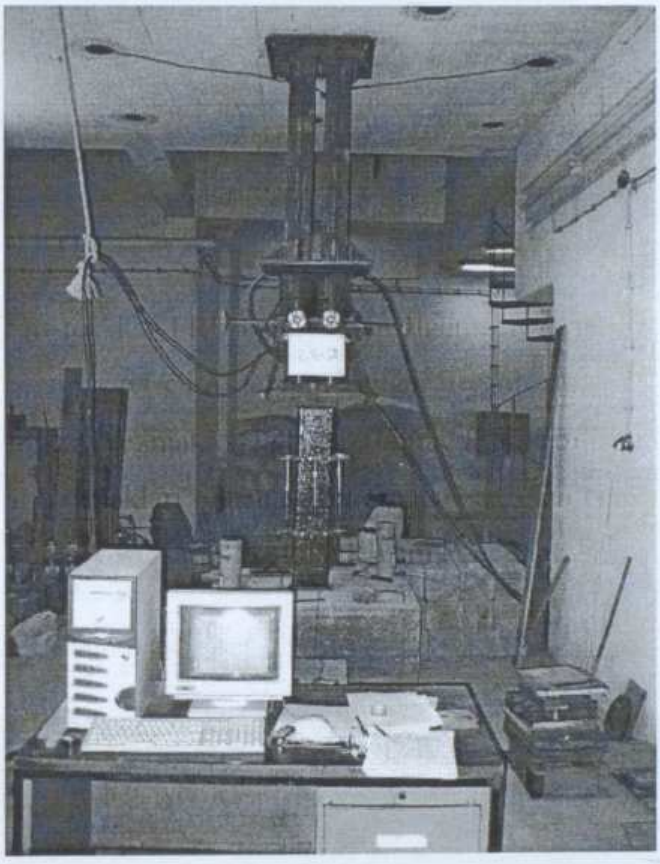
Şekil 3.43 C2L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.44 C2L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

3.8 C3 Serisi Kolon Deneyleri

C3 serisi kolonlar; tamamen tek kat FRP kompozit malzemesiyle sarılmış kolonlardır. Bu kolonlar sarılırken C2 serisindeki sargı tekniği aynen uygulanmıştır. Deneylerde sargı etkisinin beton gövdede mikro ve makro çatlaklar takiben hissedilir mertebelere ulaştığı gözlenmiştir. Betonda ezilme çatlakları oluşmuş, bu esnada sargıdan cam kırılmasına benzer kopma sesleri gelmiştir. Komple FRP sargılı kolonun taşıma gücüne ulaşması, FRP

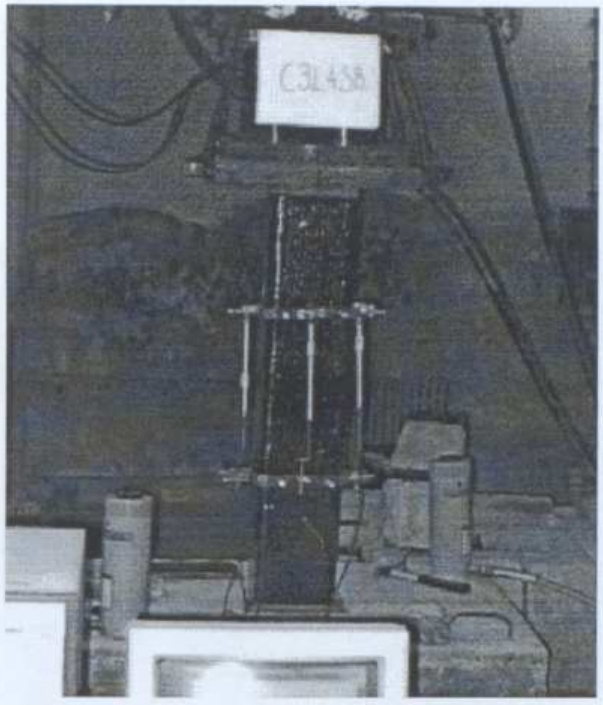


Şekil 3.45 C3 kolon deneylerine ait düzenek

sargının kuşatma basıncı altında yırtılması ve kabuk betonuyla birleşik davranışının bozulmasıyla olmuştur. Deney sonunda, kolonda FRP kompozit malzemesinin yırtıldığı bölgede hasar yoğunlaşması olduğu gözlenmiştir.

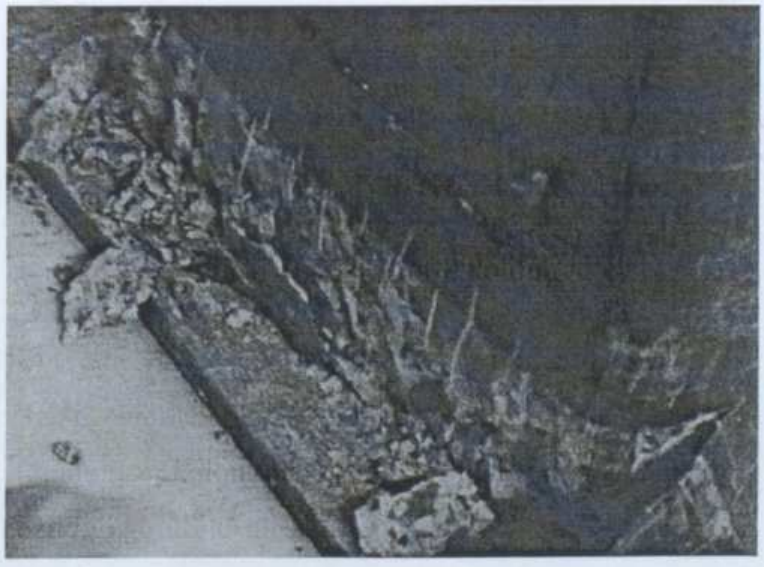
3.8.1 C3L4S8 Kolonu

Tamamen tek kat halinde FRP kompozit ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna donatılı, $\phi 8/10$ enine donatılı konfigürasyonına sahip olan kolondur.



Şekil 3.46 C3L4S8 kolonu

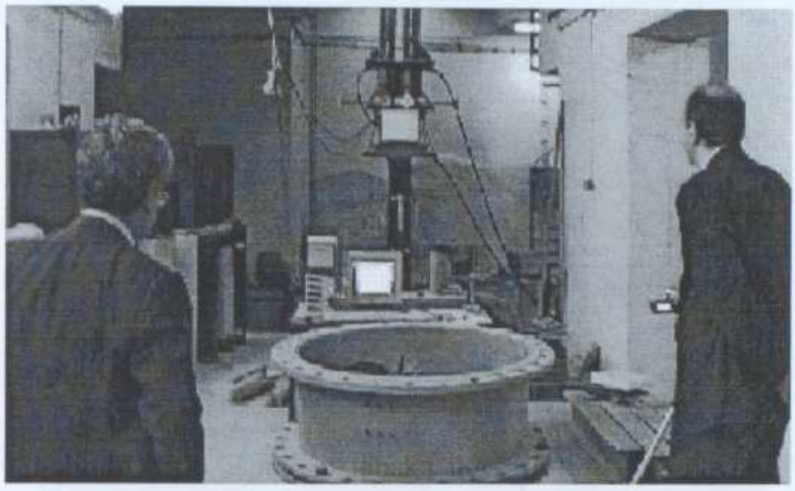
Yükleme 1100 kN mertebelerindeyken, kolon üst kısmından ses gelmiş olup, bu bölgedeki FRP kompozit malzemesinde buruşma olduğu görülmüştür. Yükleme sona erip numune yakından incelendiğinde ise kolon alt kısmında FRP kompozit sargının açıldığı ve bu bölgedeki betonun ezildiği görülmüştür.



Şekil 3.47 C3L4S8 kolonu (deney sonrası alt kısımda LP sargının kopması sonrasında görülen beton ezilmeleri)

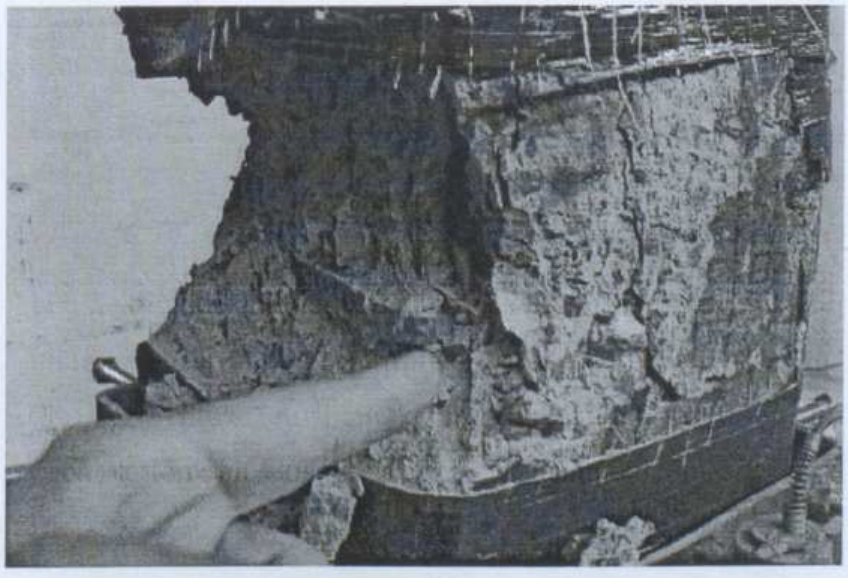
3.8.2 C3L4S12 Kolonu

Tamamen tek kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna donatılı, $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur.



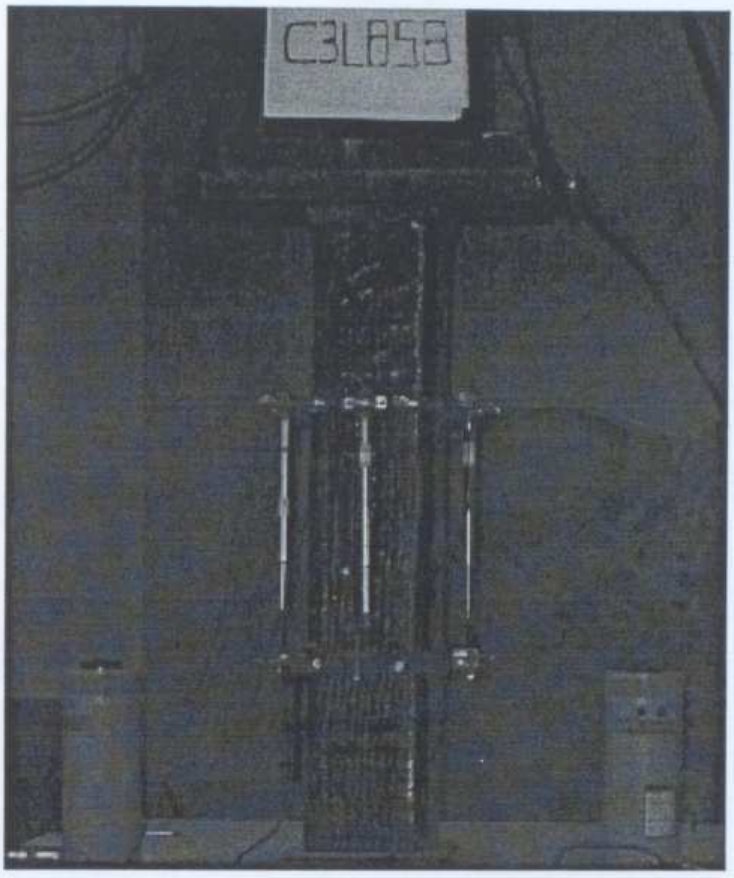
Şekil 3.48 C3L4S12 kolonu

Bu kolon 1165 kN'a geldiğinde ani olarak üst kısma yakın bir bölgede FRP kompozit sargının yırtılmasıyla taşıma gücü dayanımını yitirmiştir. FRP kompozit sargının açıldığı bölge incelendiğinde; betonun ezilmiş, etriyenin kopmuş ve boyuna donatının burkulma yaptığı görülmüştür. Ayrıca kolon alt kısmında FRP sargının açılması ve betonda ezilme görülmüştür.



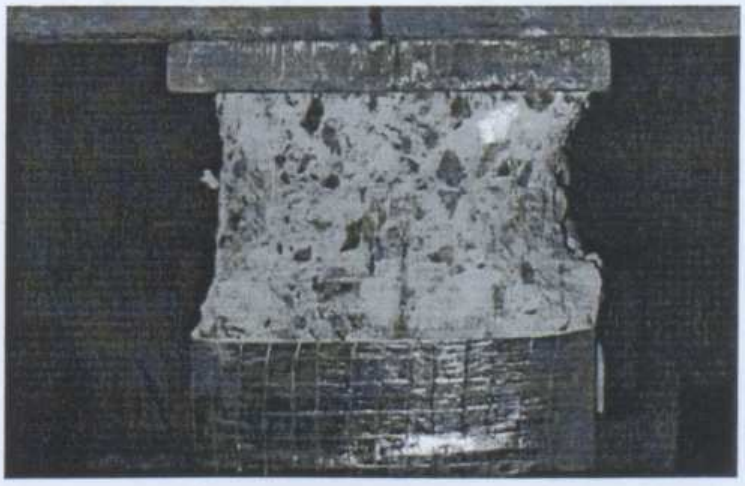
Şekil 3.49 C3L4S12 kolonu (göçme yüküne ulaşmasıyla beraber LP sargı ve etriyenin kopmuş olduğu görülmüştür)

3.8.3 C3L8S8 Kolonu



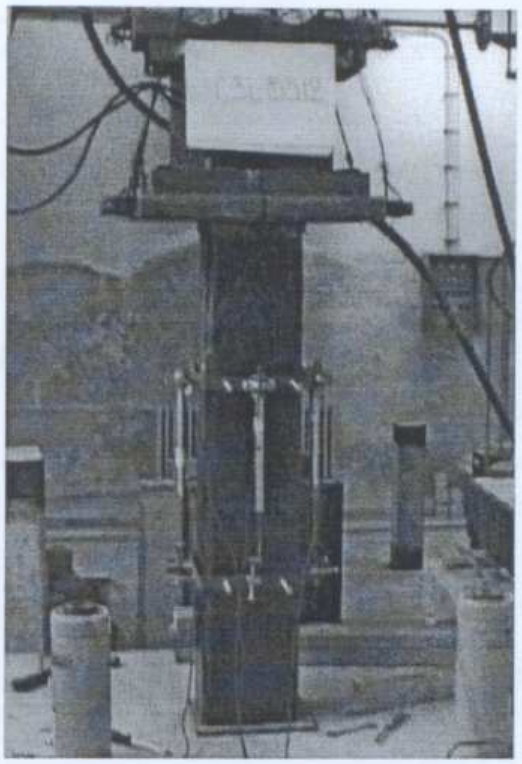
Şekil 3.50 C3L8S8 serisi kolonu

Tamamen tek kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna donatılı, $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. Bu kolon da diğerleri gibi başlık kısmından ani olarak FRP kompozit malzemesinin yırtılmasıyla göçme yüküne ulaşmıştır.



Şekil 3.51 C3L8S8 kolonu, deney sonrası

3.8.4 C3L8S12 Kolonu

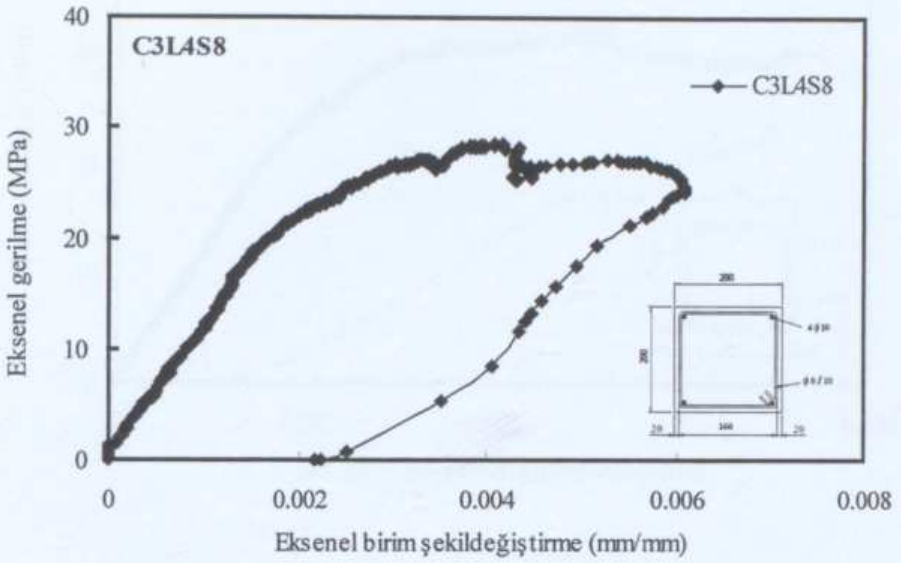


Şekil 3.52 C3L8S12 kolonu

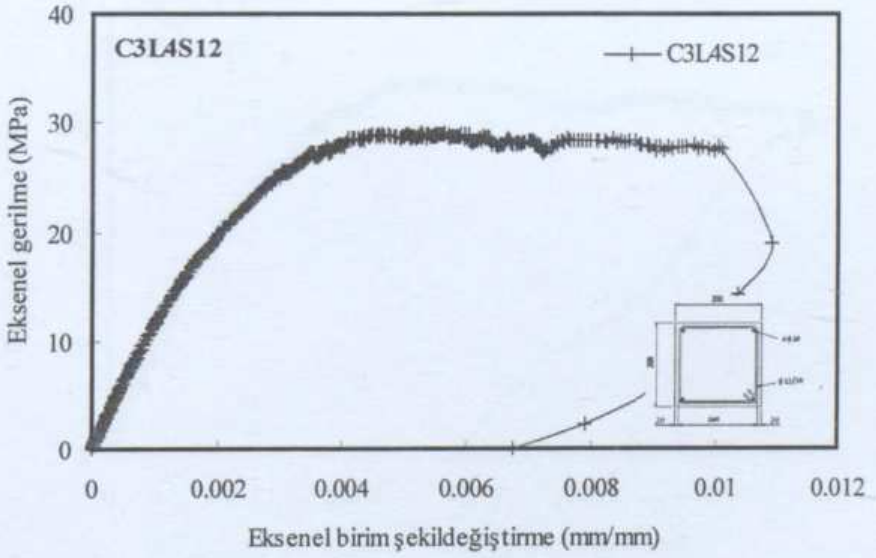
Tamamen tek kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna donatı ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. Bu kolonda diğerleri gibi başlık kısmından ani olarak FRP kompozit sargının yırtılmasıyla göçmüştür.

Şekil 3.53 C3L8S12 kolonu, deney sonrası

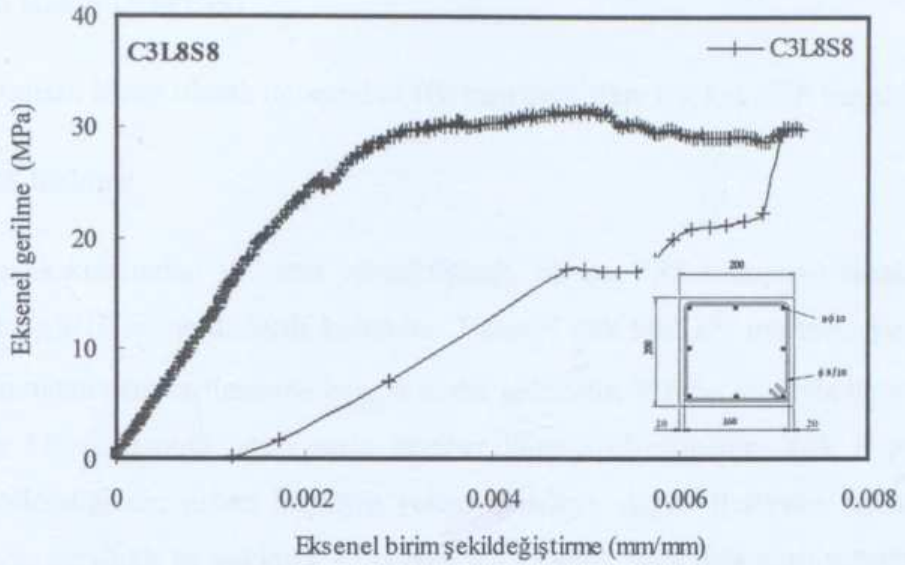
Bu seri kolonlarda FRP sargısının etkisi ile kırılma bölgesinin giderek kolon orta bölgesine yöneldiği görülmüştür.



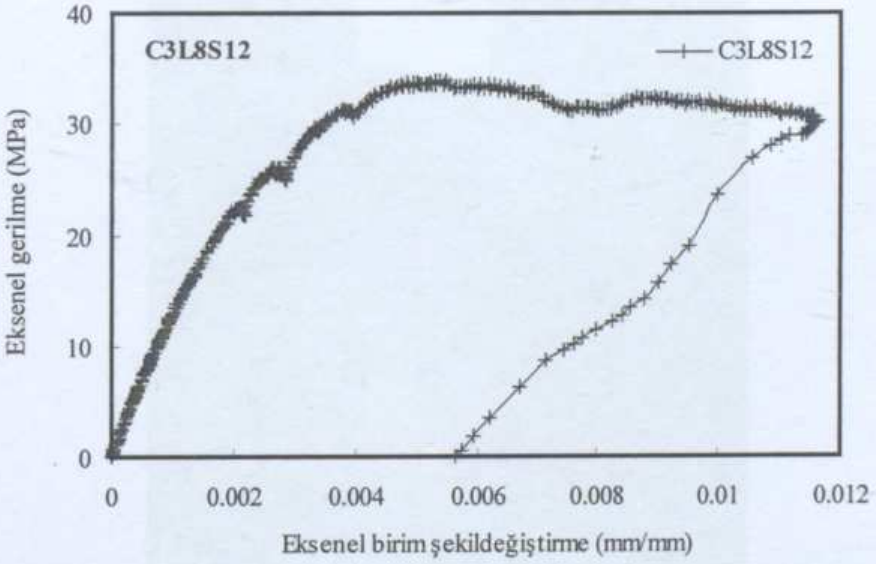
Şekil 3.54 C3L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.55 C3L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



Şekil 3.56 C3L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



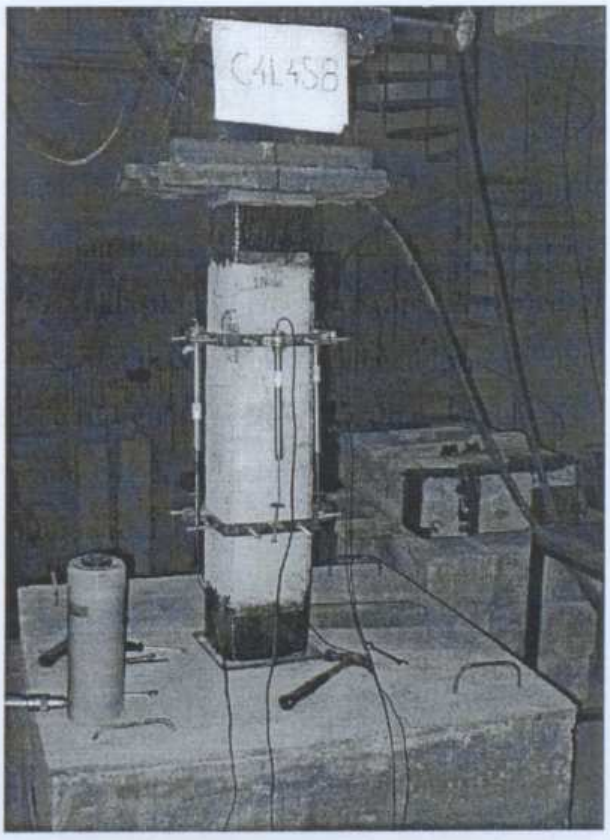
Şekil 3.57 C3L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

3.9 C4 Serisi Kolon Deneyleri

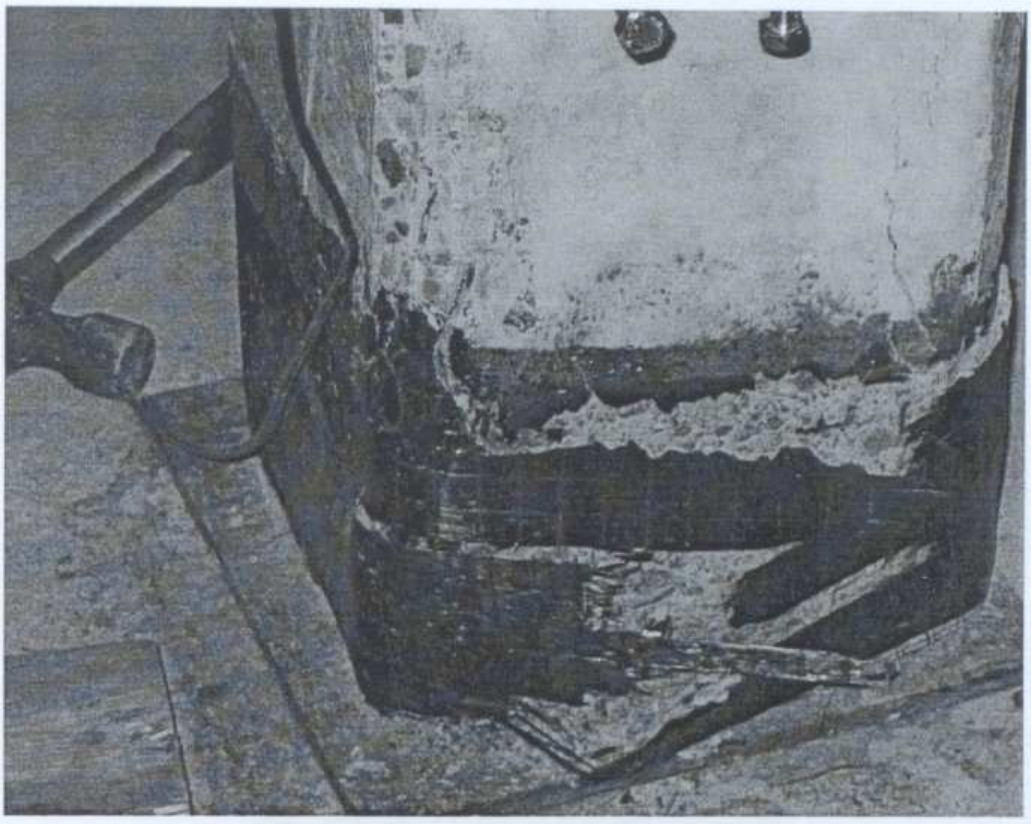
C4 serisi kolonları; kısmi olarak uçlarından 100 mm derinlikte tek kat FRP sargılıdır.

3.9.1 C4L4S8 Kolonu

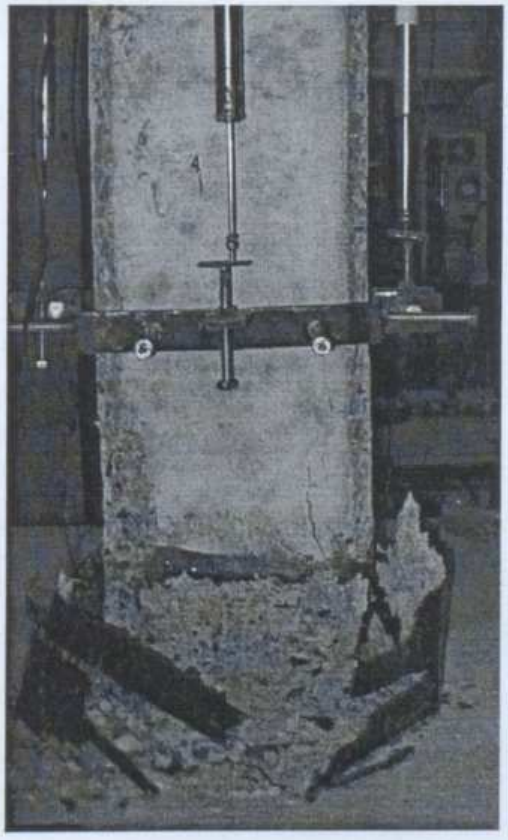
Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde, bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 980 kN mertebesine ulaştığında, kolon alt kısmından cam kırılmasına benzer sesler gelmiştir. Yükün artışıyla beraber 1015 kN mertebesinde LP sargısında artan sesle beraber kopma oluşmuştur. Yük boşaltılıp kolon yakından incelendiğinde; alttan başlayıp yukarı gövdeye doğru ilerleyen kılcal çatlakların kolon boyunca, karşılıklı ve yaklaşık 45°derece açı yaparak ilerlediği görülmüştür. Bu durum tam eksenel (concentric) sayılabilecek yük uygulanabilmiş olduğunu gösterir. Kopan LP sargısı, daha sonra el ile sıyrıldığında; betonda ezilme, kabuk betonunda ayrılma ve kolon enine ve boyuna donatılarının gözle görülebilirlik gözlenmiştir. LP sargısının beton yüzey ile olan birleşimi bu deneyde bir kere daha izlenebilmiştir.



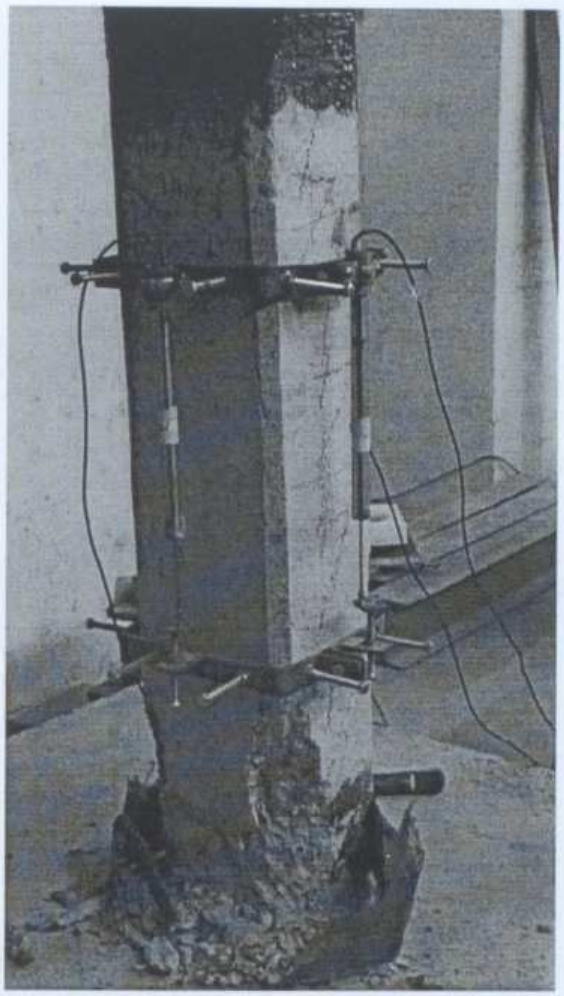
Şekil 3.58 C4L4S8 kolonu



Şekil 3.59 C4L4S8 kolonu göçme yüküne ulaşması sonucu LP sargının kopması



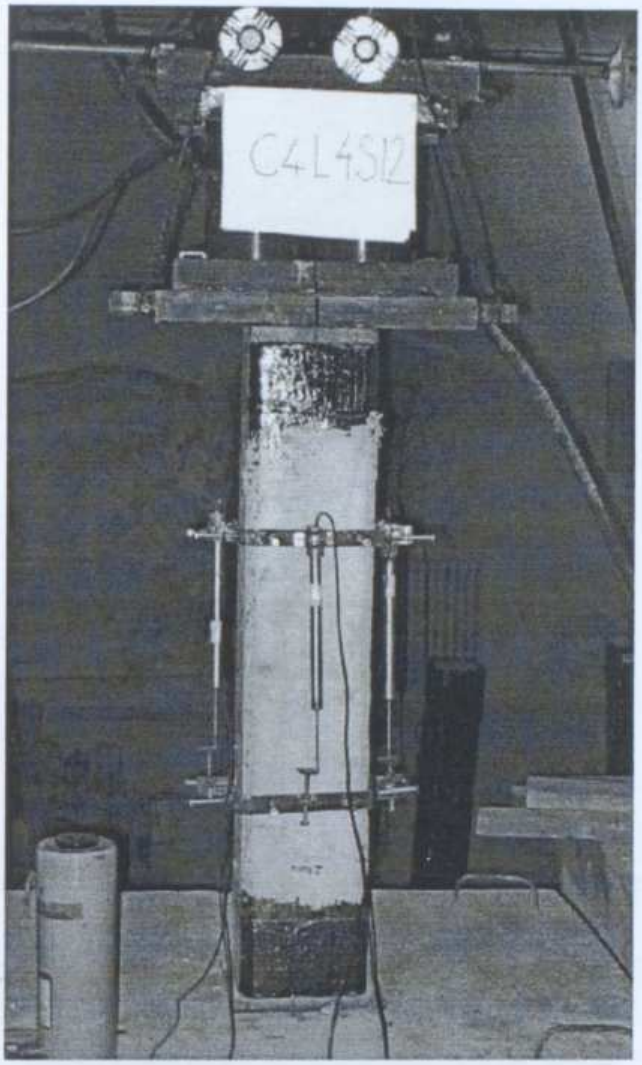
Şekil 3.60 C4L4S8 kolonu kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı



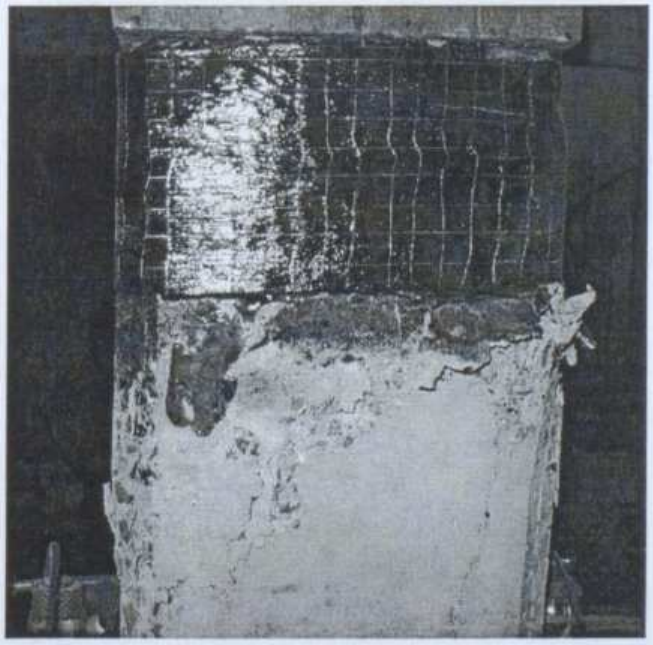
Şekil 3.61 C4L4S8 kolonu, kopan LP sargı el ile açıldıktan sonra görülen beton hasarı (başka bir açıdan görünümü)

3.9.2 C4L4S12 Kolonu

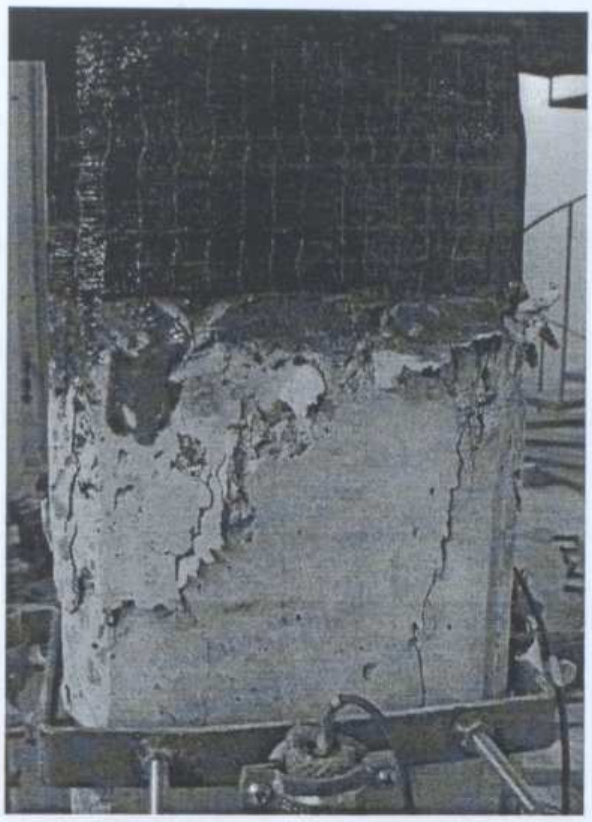
Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 240 kN mertebesine ulaştığında, kolondan cam kırılmasına benzer sesler gelmiştir. Yükün artışıyla 1015 kN mertebesinde LP sargısında artan sesle beraber kopma oluşmuştur. Eksenel yük 980 kN'a ulaştığında kolon üst başlık kısmında, LP sargısının bittiği yerden başlayıp gövde ortasına doğru ilerleyen çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Eksenel yük 1037 kN'a ulaştığında ise, üst kısımdaki LP sargısı koparak kolon göçme yüküne ulaşmıştır.



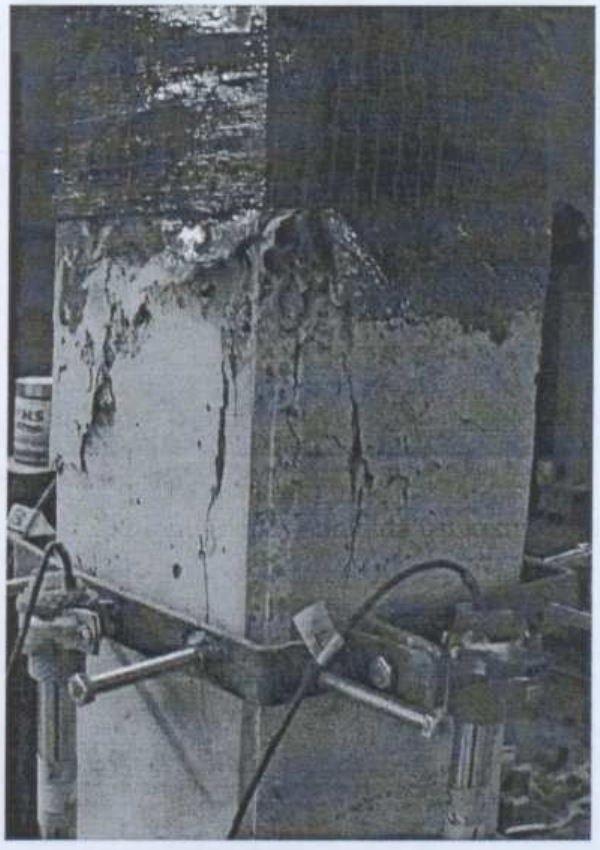
Şekil 3.62 C4L4S12 kolonu



Şekil 3.63 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar)



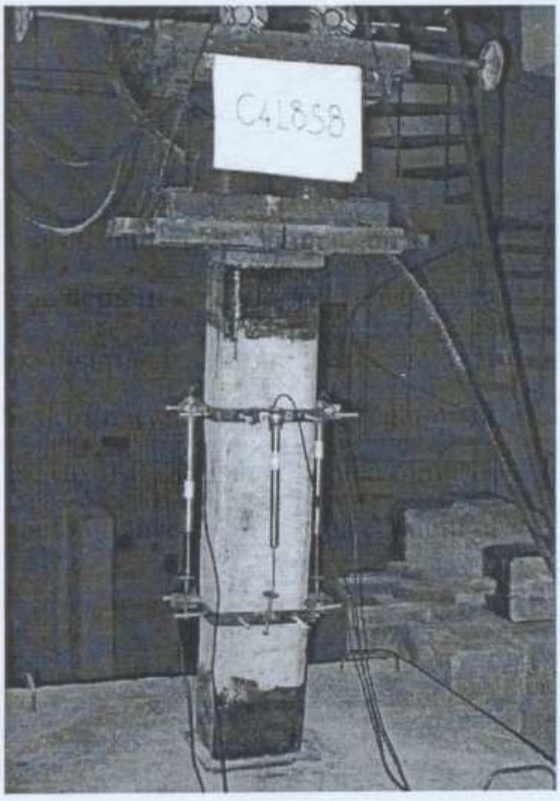
Şekil 3.64 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar)



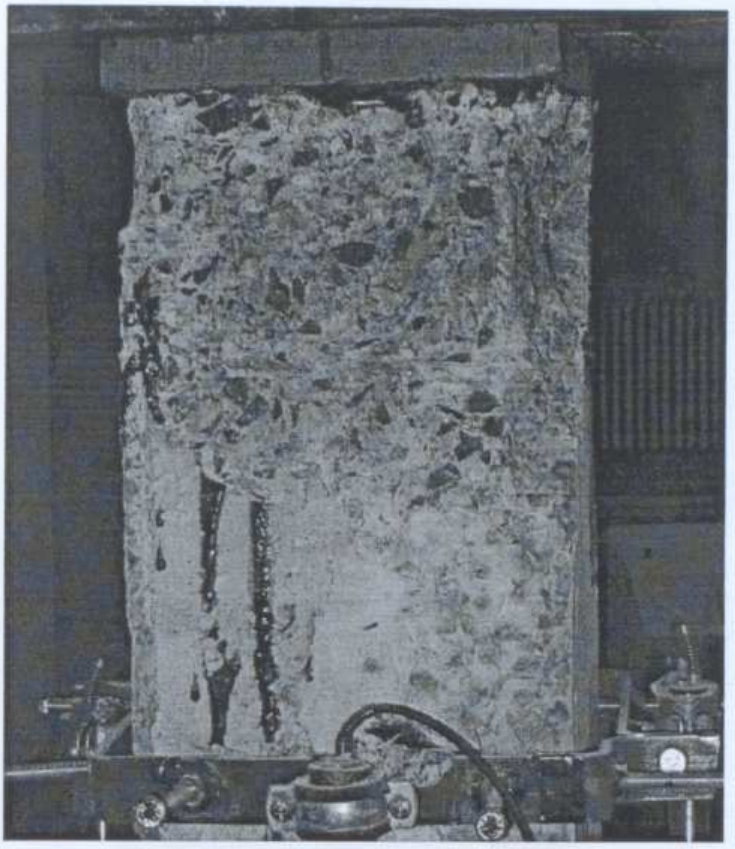
Şekil 3.65 C4L4S12 kolonu (deney sonunda üst kısımda görülen hasar ve orta gövdeye doğru ilerleyen çatlaklar)

3.9.3 C4L8S8 Kolonu

Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde, bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 500 kN mertebesine ulaştığında, LP sargılı kolon üst başlık kısmında hafif bir şişme gözlenmiştir. Eksenel yük 840 kN'a ulaştığında kolondan cam kırılmasına benzer ses gelmiştir. 1103 kN'luk eksenel yük mertebesine ulaşıldığında ise, üst LP sargısında kopma olmuştur. Üst kısımdaki LP sargı daha sonra el ile açıldığında ise, beton bünyede çok sayıda çatlağın oluştuğu görülmüştür.



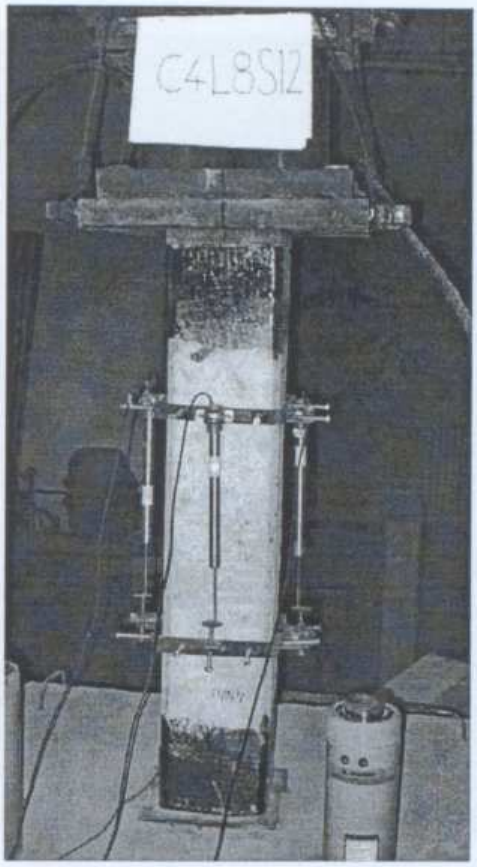
Şekil 3.66 C4L8S8 kolonu



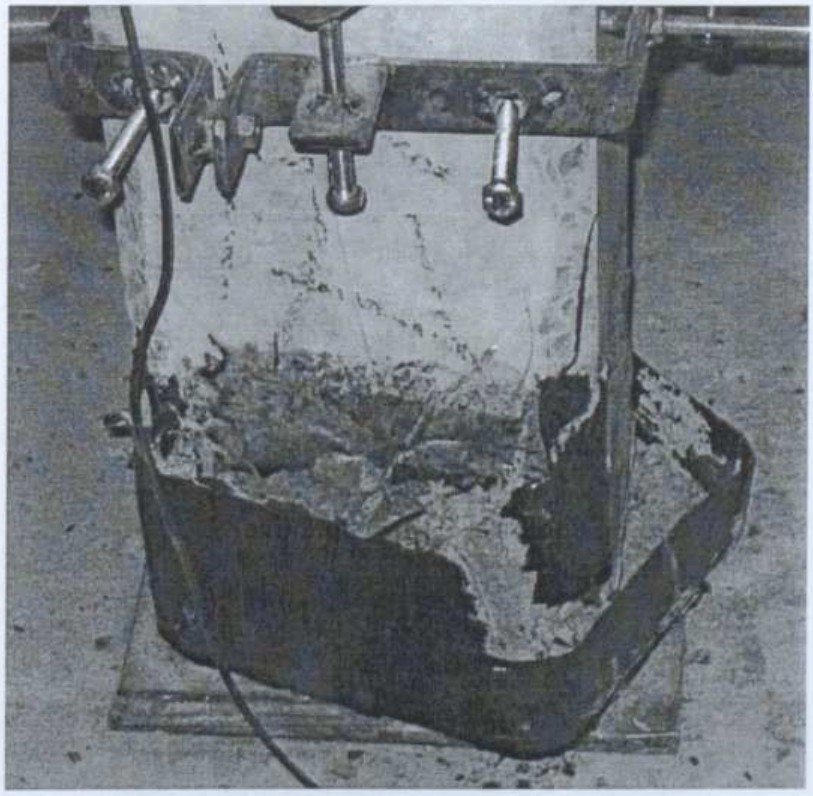
Şekil 3.67 C4L8S8 kolonu, deney sonrasında kopan LP sargının el ile sıyrılması ile görülebilen betondaki hasar

3.9.4 C4L8S12 Kolonu

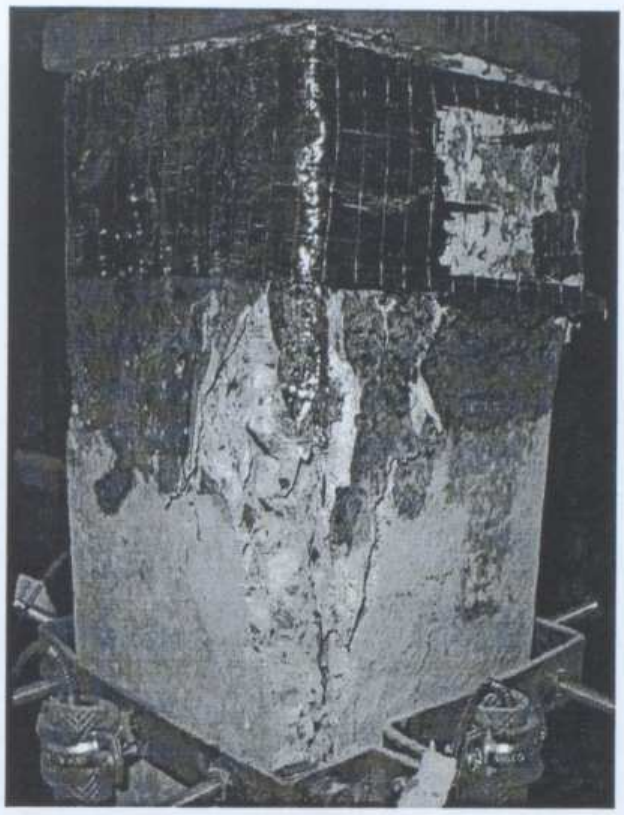
Alt ve üst başlık kısmından 100 mm yüksekliğinde bir kat FRP kompozit tabaka ile sargılı $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/12$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük, 770 kN mertebesine ulaştığında, kolon alt kısmından cam kırılmasına benzer sesler gelmiştir. Kolon alt LP sargısının bittiği yerden başlayan çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Artan yükle kılcal çatlaklar yukarı doğru kolon üst bölgesine ilerlemeye başlamıştır. Eksenel yük 1090 kN'a ulaştığında LP sargı önce alt kısımda, sonrası üst kısımda kopmuştur.



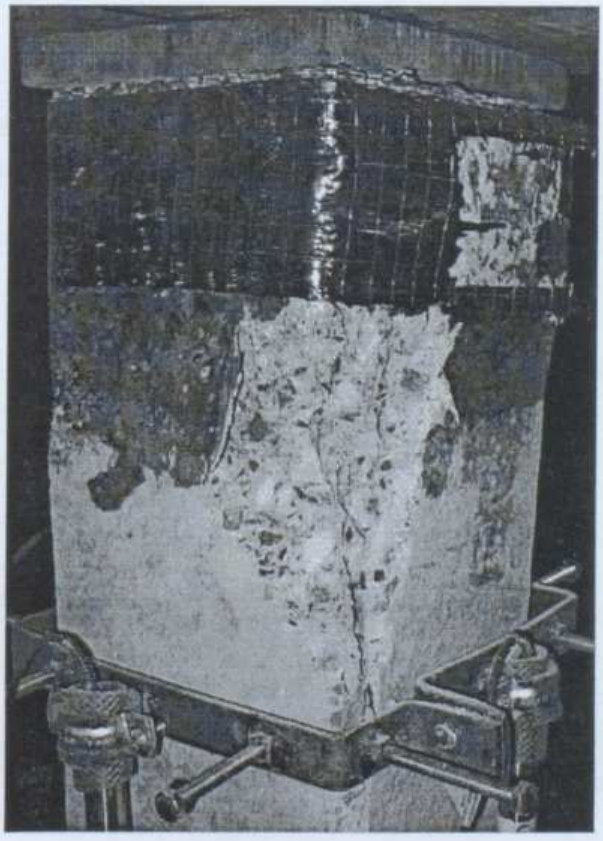
Şekil 3.68 C4L8S12 kolonu



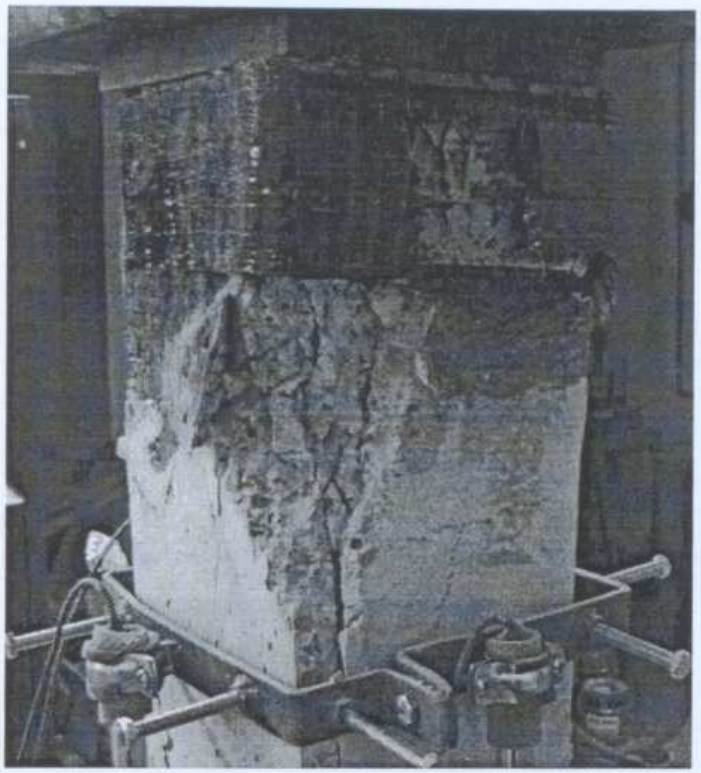
Şekil 3.69 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar

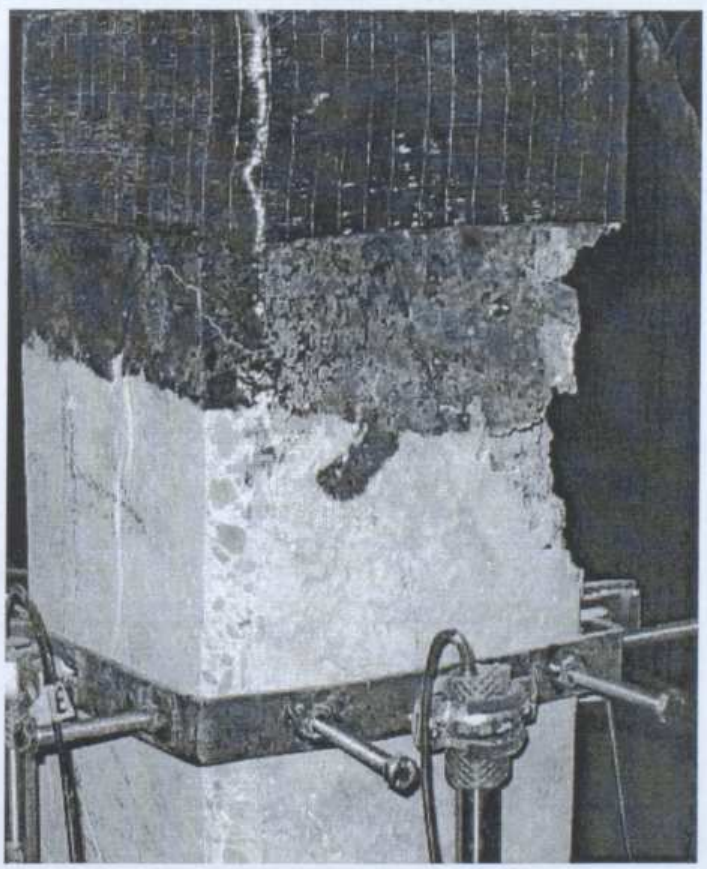


Şekil 3.70 C4L8S12 kolonu deney sonrası görülen hasar

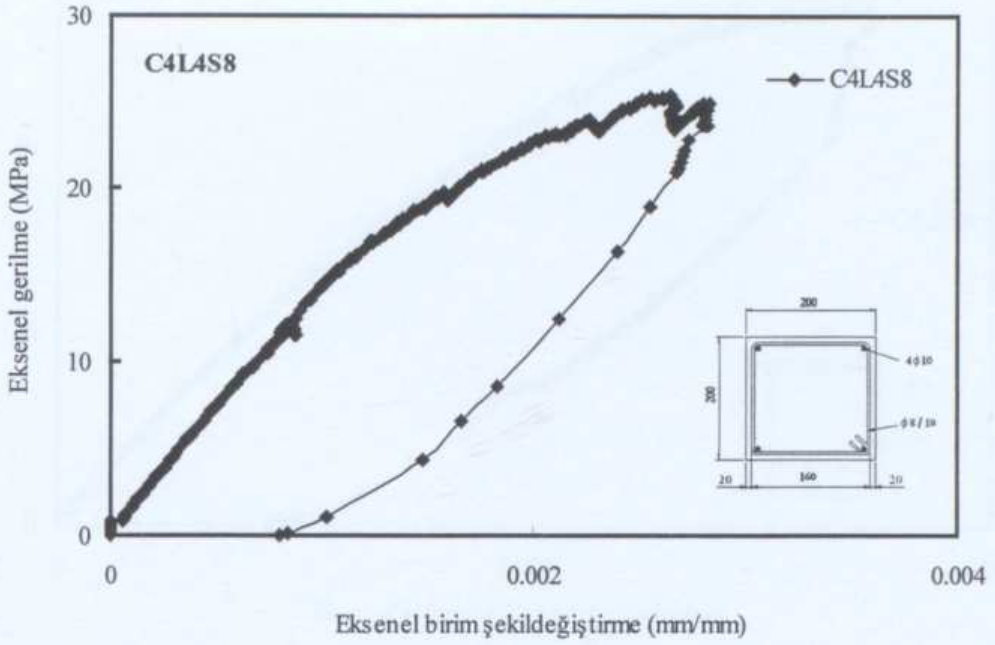


Şekil 3.71 C4L8S12 kolonu deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar

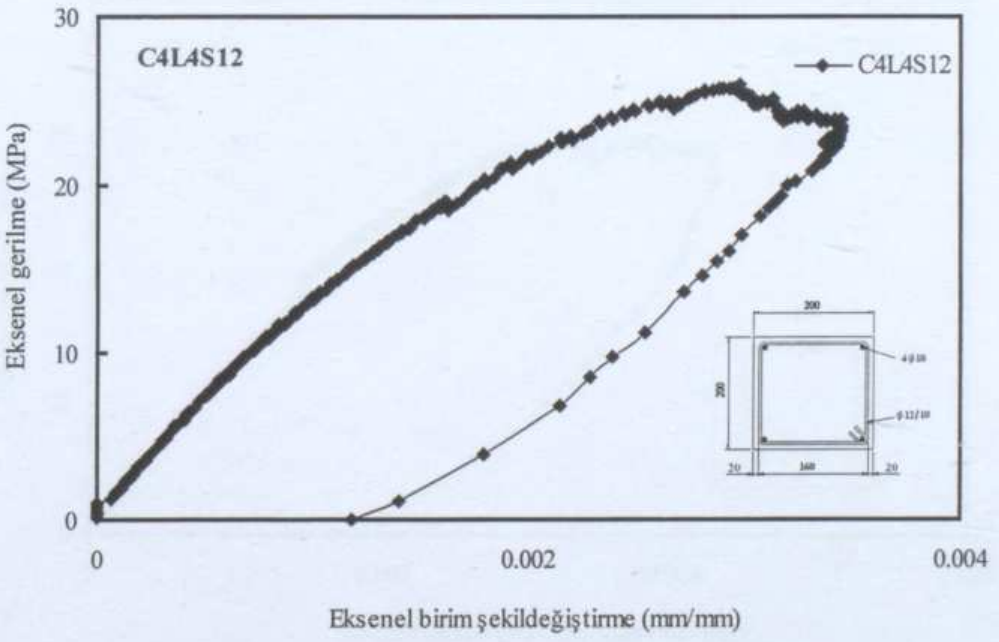




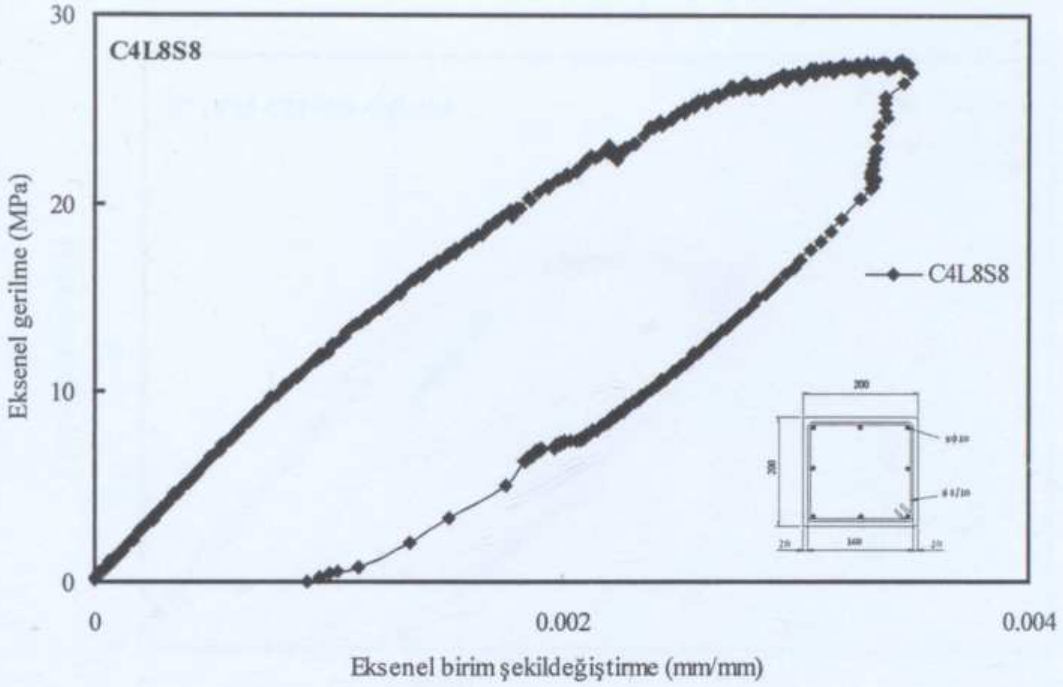
Şekil 3.72 C4L8S12 kolonu, deney sonrası üst başlık kısmında görülen hasar



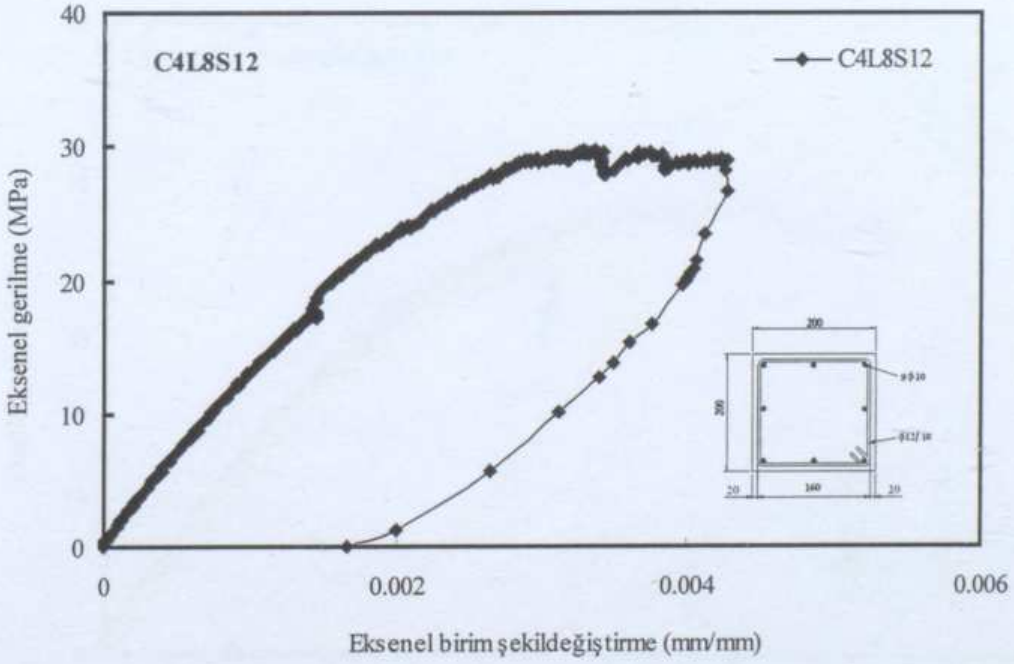
Şekil 3.73 C4L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



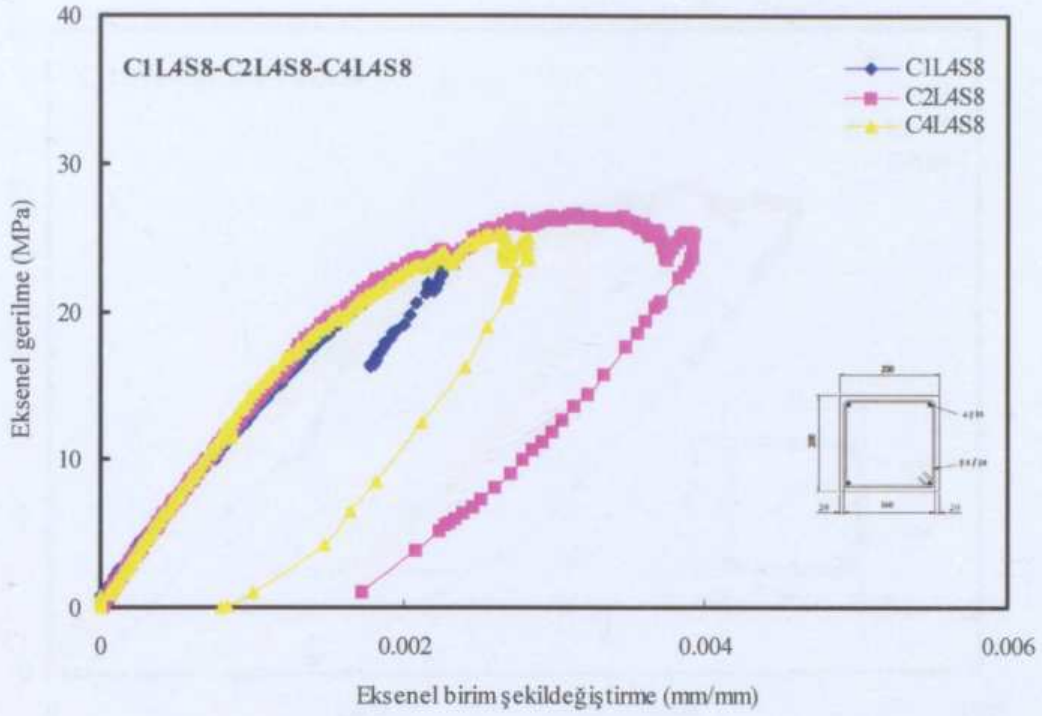
Şekil 3.74 C4L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



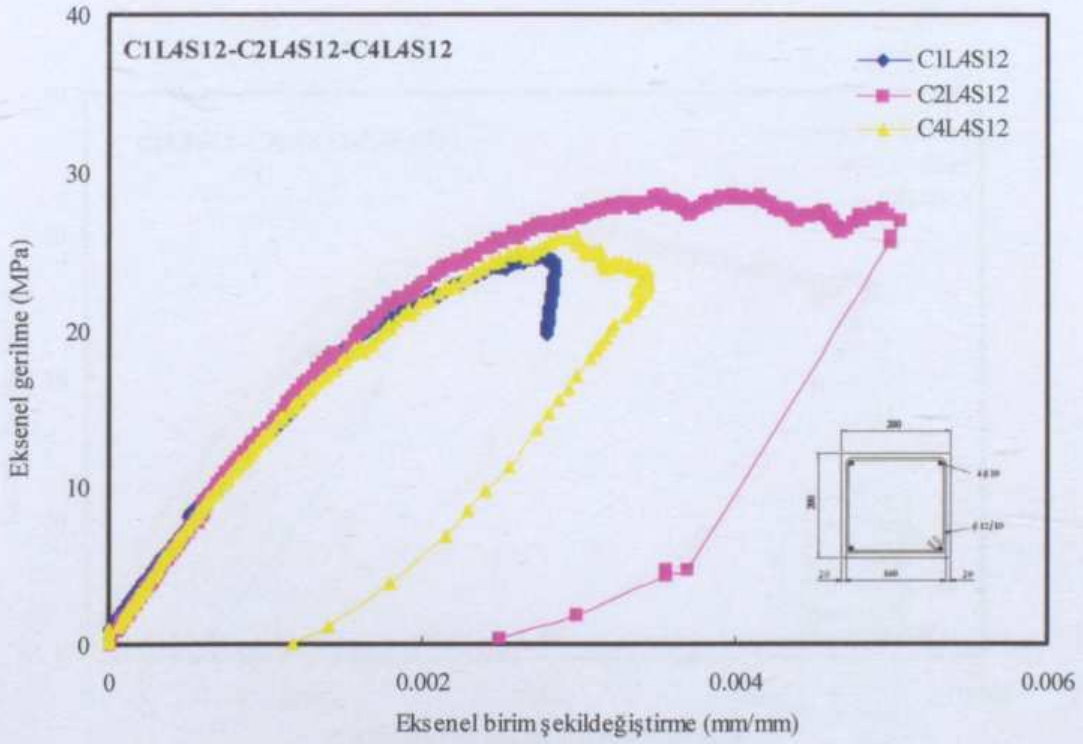
Şekil 3.75 C4L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



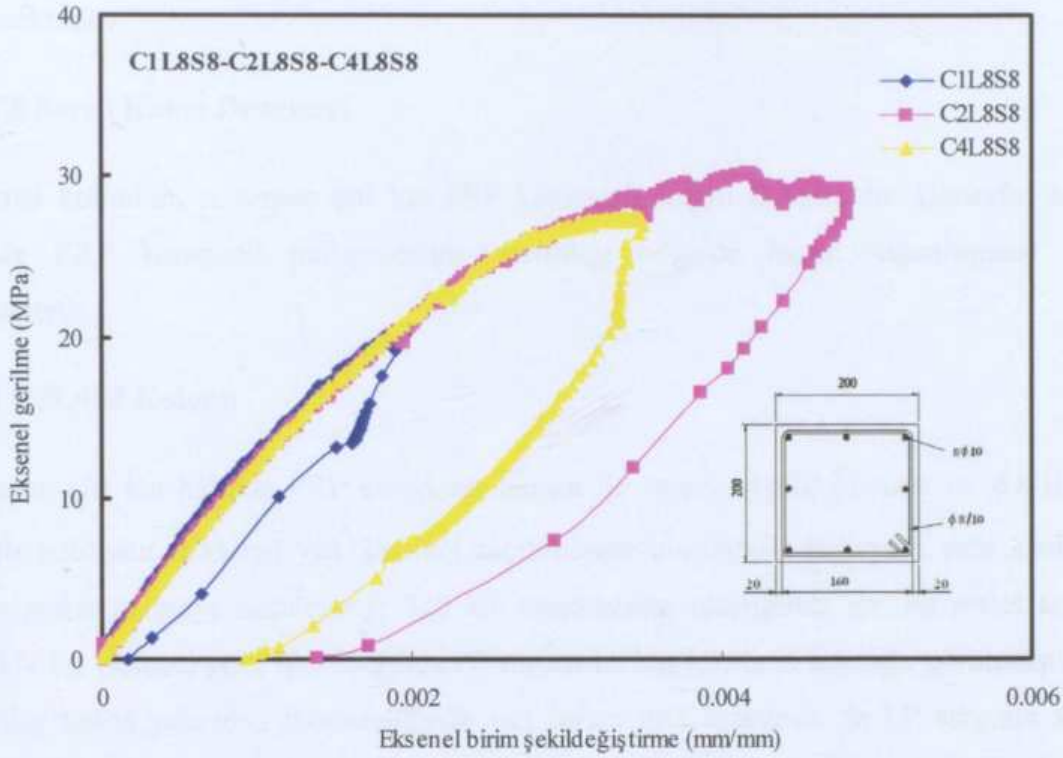
Şekil 3.76 C4L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



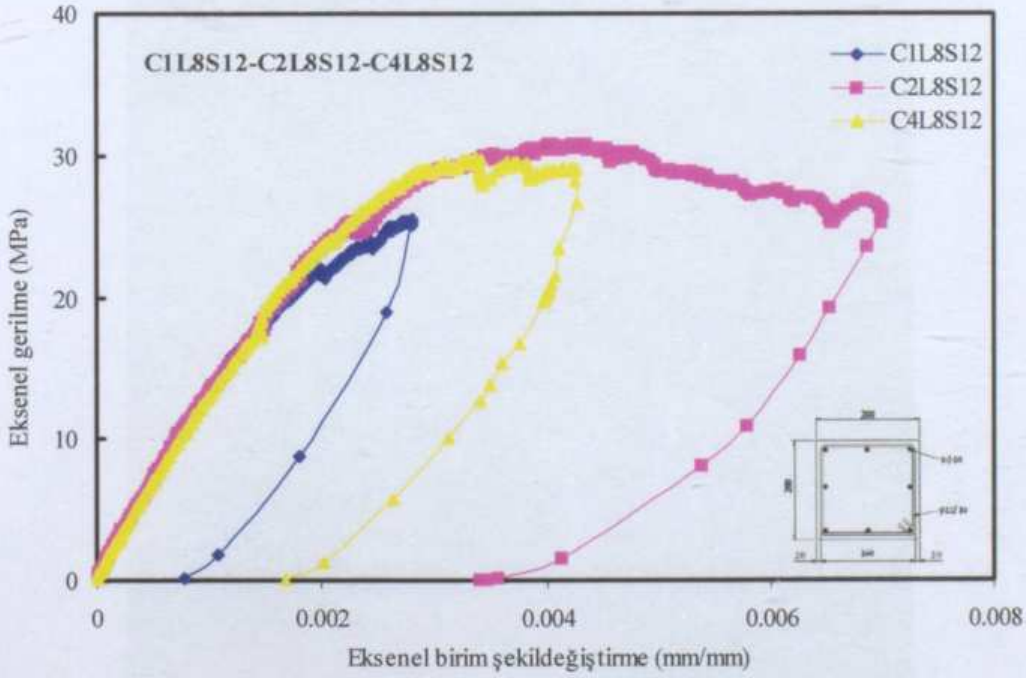
Şekil 3.77 C1,C2,C4 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.78 C1,C2,C4 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.79 C1,C2,C4 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.80 C1,C2,C4 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

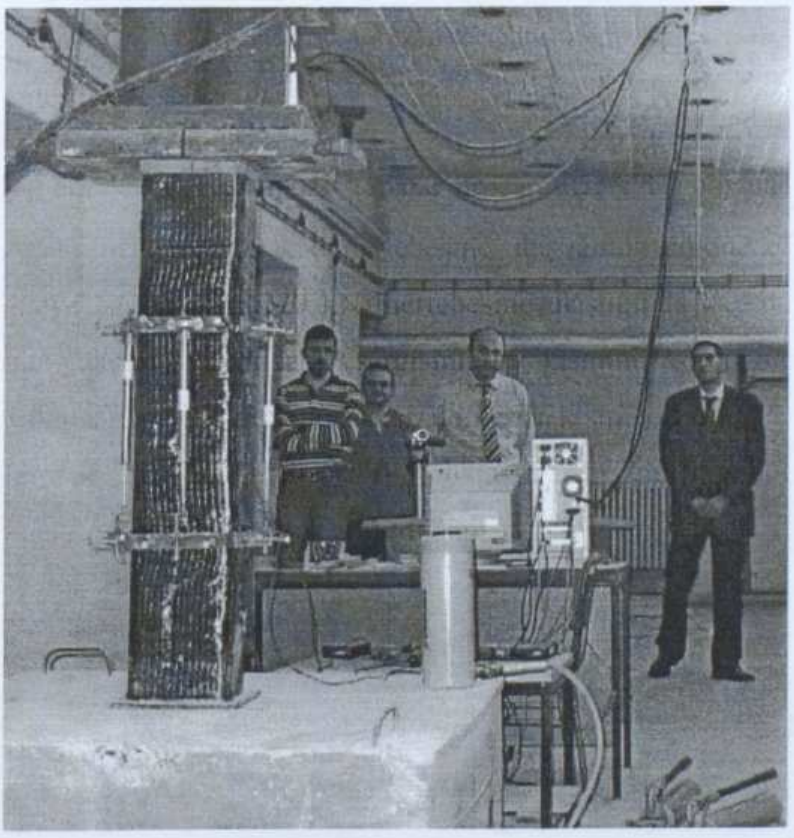
Şekil 3.77, 78, 79 ve 79'da yalın kolon, kısmi KLP sargılı ve iki kat kısmi KLP sargılı kolonlar ile mukayese edildiğinde; KLP sargının sünekliği önemli oranda artırdığı görülmektedir.

3.10 C5 Serisi Kolon Deneyleri

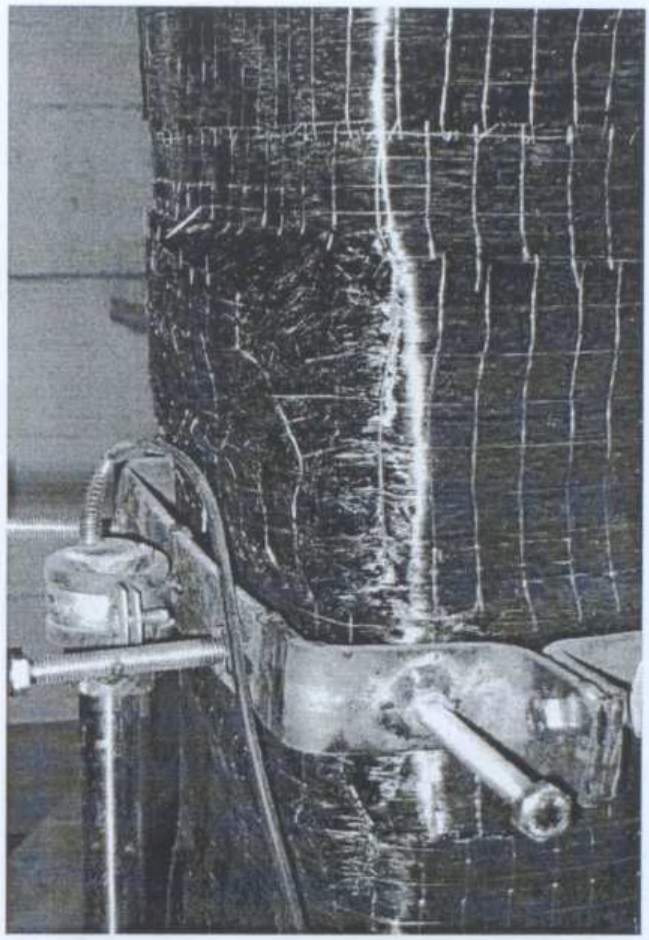
C5 serisi kolonları, tamamen çift kat FRP kompozit sargılı kolonlardır. Deneyler sonunda kolonda FRP kompozit malzemesinin yırtıldığı bölgede hasar yoğunlaşması olduğu gözlenmiştir.

3.10.1 C5L4S8 Kolonu

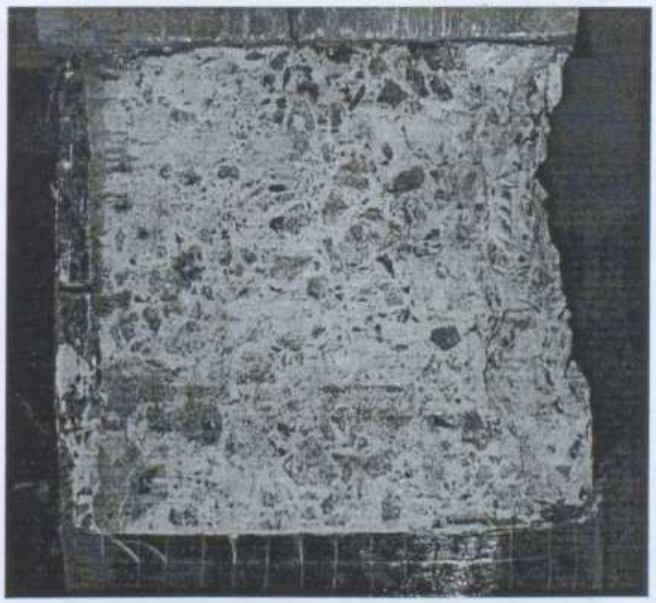
Tamamen çift kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. Eksenel yük 280 kN mertebesine ulaştığında kolondan cam kırılmasına benzer sesler gelmeye başlamıştır; 770 kN mertebesine ulaştığında ise, bu sesler artmıştır. 1137 kN luk eksenel yüke ulaşıldığında LP sargısının baş kısmının koptuğu görülmüştür. Yük boşaltılıp kolon yakından incelendiğinde ise; kolon orta kısmında da LP sargının kopmuş olduğu gözlemlenmiştir. LP sargı el ile sıyrıldığında ise; sargının koptuğu bölgede makro çatlaklar, uzak bölgelerde mikro çatlaklar görülmüştür.



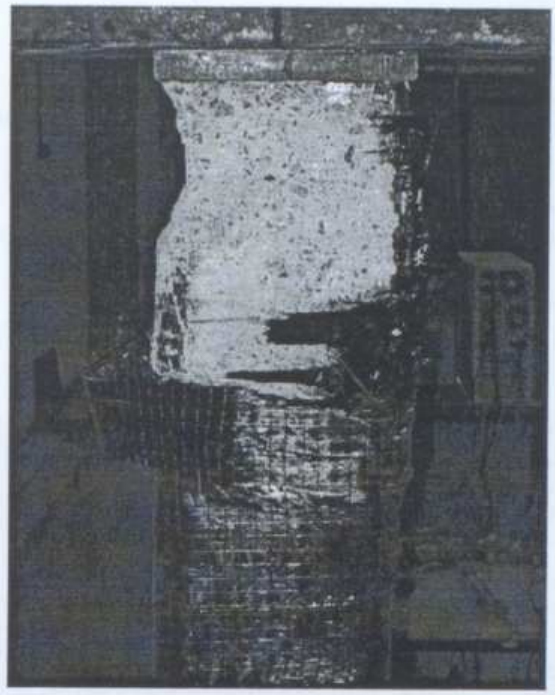
Şekil 3.81 C5L4S8 kolonu



Şekil 3.82 C5L4S8 kolonu, deney esnasında kolon orta bölgesinde LP sargı kopma



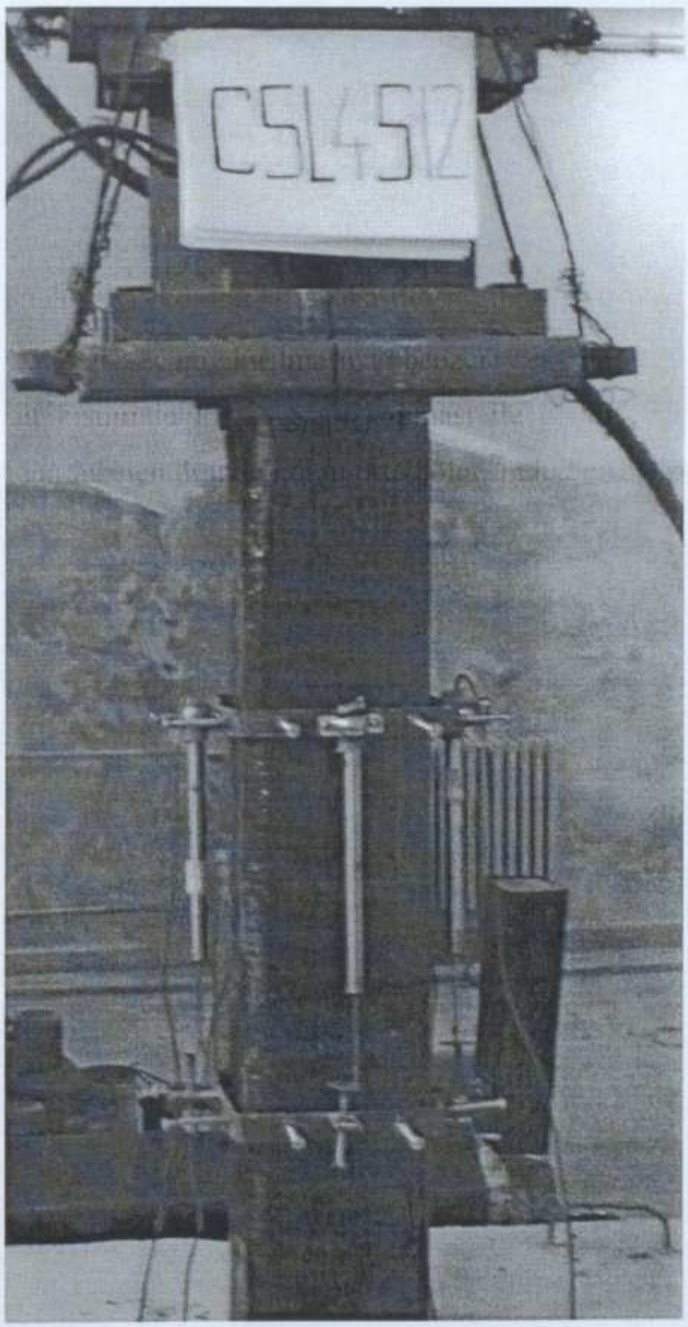
Şekil 3.83 C5L4S8 kolonu, deney sonrasında kolon üst başlık kısmından kopan LP sargının daha sonra el ile açılmasıyla ortaya çıkan betondaki hasar



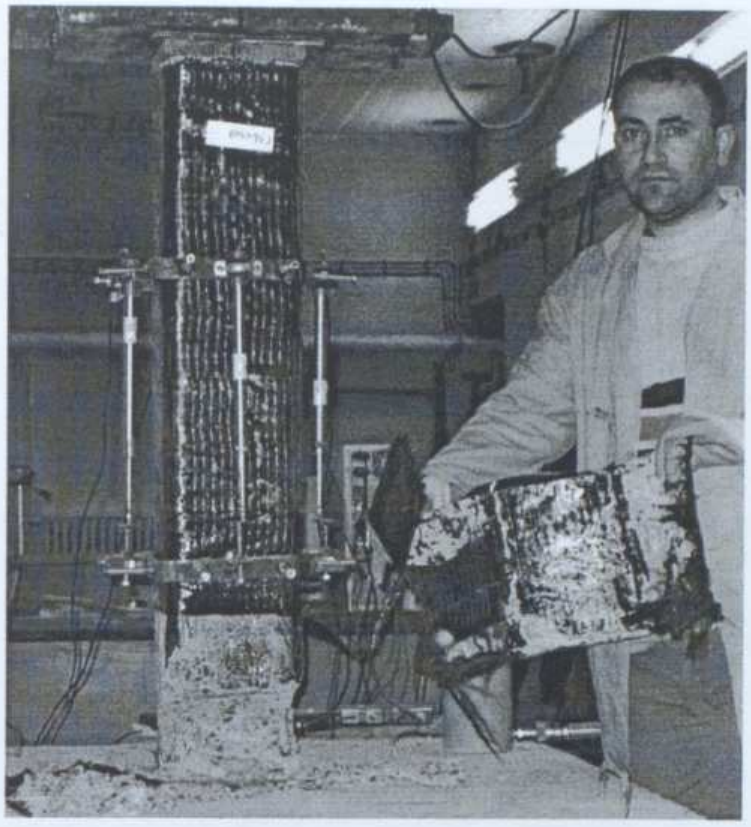
Şekil 3.84 C5L4S8 kolonunda deney sonrası oluşan hasarın değişik açılardan görünüşü
(Göçme yüküne yakın LP sargı yüzeyinde buruşmalar oluşmuştur)

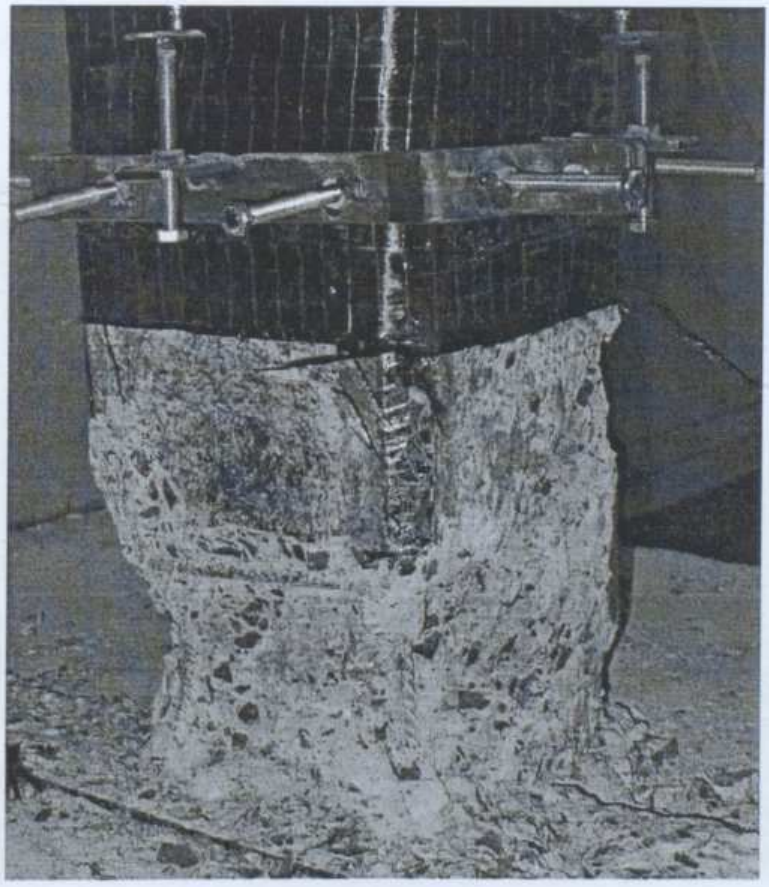
3.10.2 C5L4S12 Kolonu

Tamamen çift kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $4\phi 10$ boyuna ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. C5L4S12 cam kırılmasına benzer ses ile 1204 kN eksenel yük mertebesinde kolon alt kısmında LP sargının kopması ile göçme yüküne ulaşmıştır. Yük boşaltılıp kolon yakından incelendiğinde kolon orta bölgesinde de LP sargının açılmış olduğu gözlenmiştir.

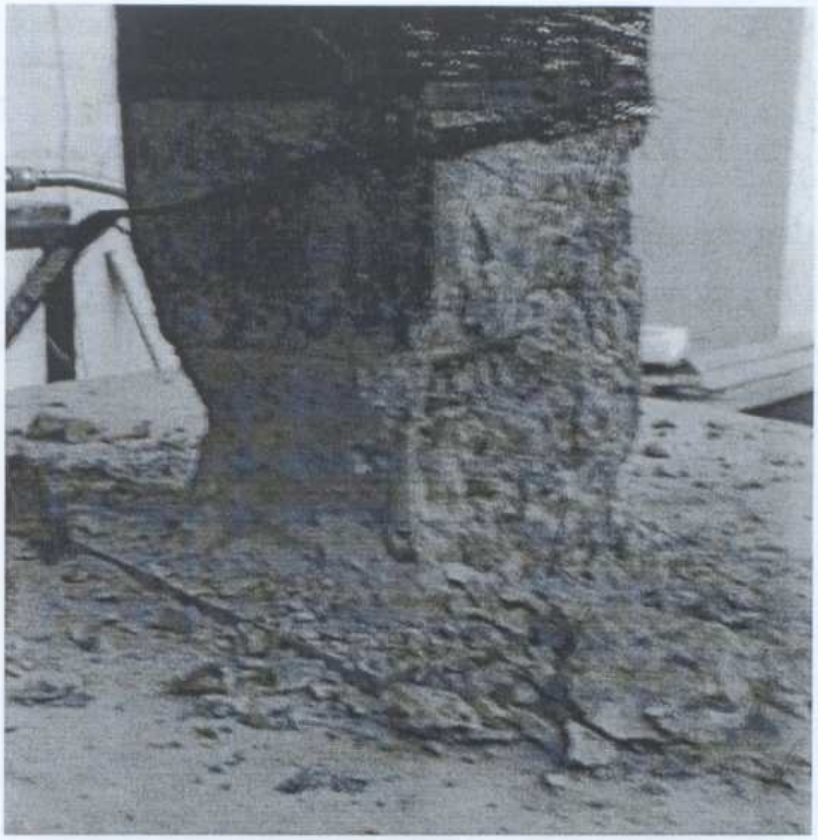


Şekil 3.85 C5L4S12 kolonu

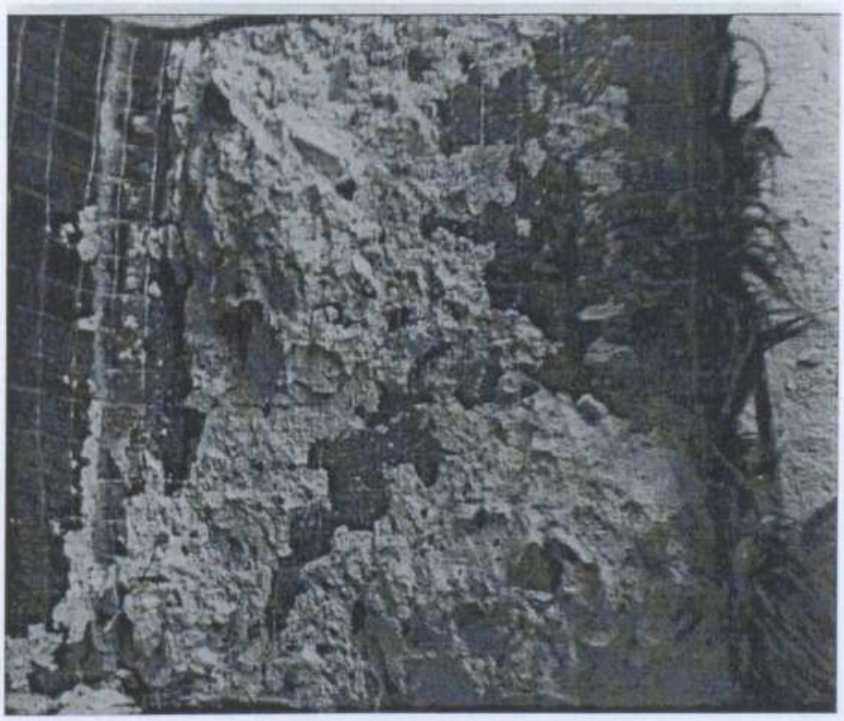




Şekil 3.86 C5L4S12 kolonu, deney sonrası oluşan hasar



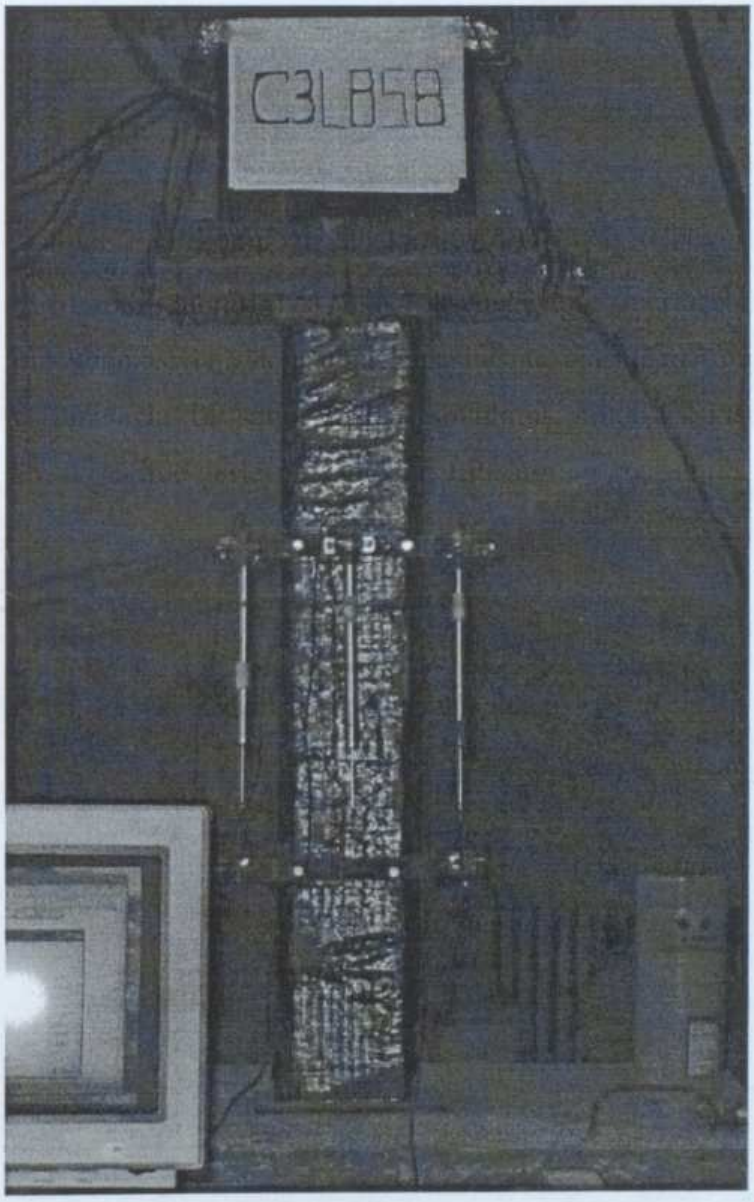
Şekil 3.87 C5L4S12 kolonu, deney sonrası alt kısımda LP sargının açılmasıyla görülebilen betondaki hasar



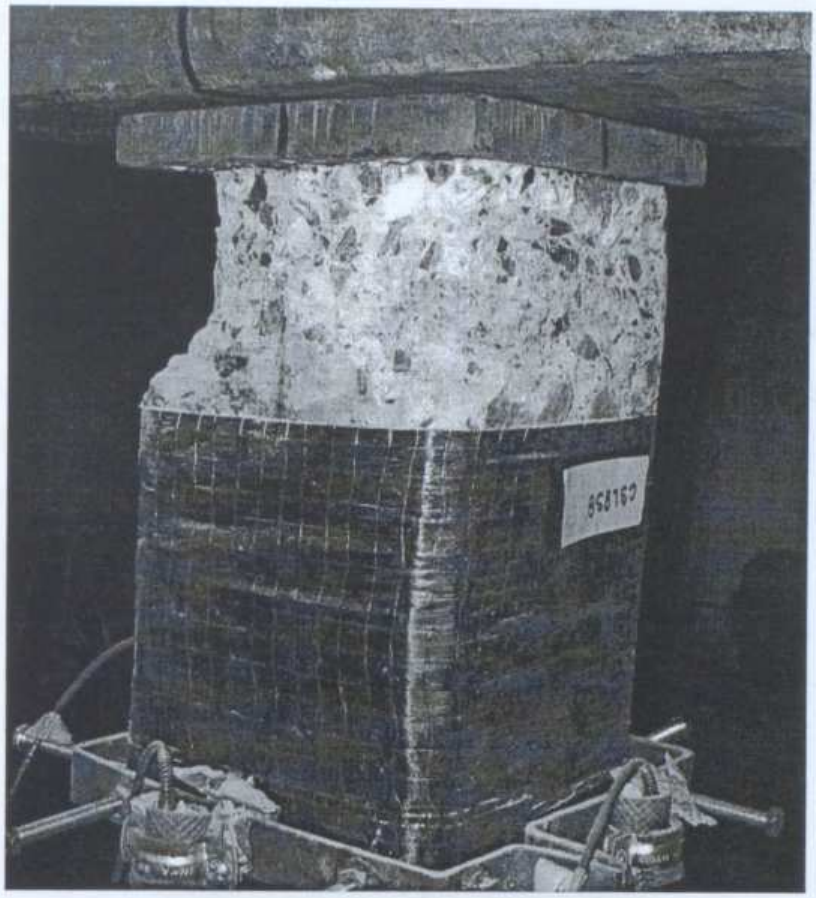
Şekil 3.88 C5L4S12 kolonu, deney sonrası LP sargının el ile sıyrıldıktan sonra beton ile temas eden yüzeyin görünüşü

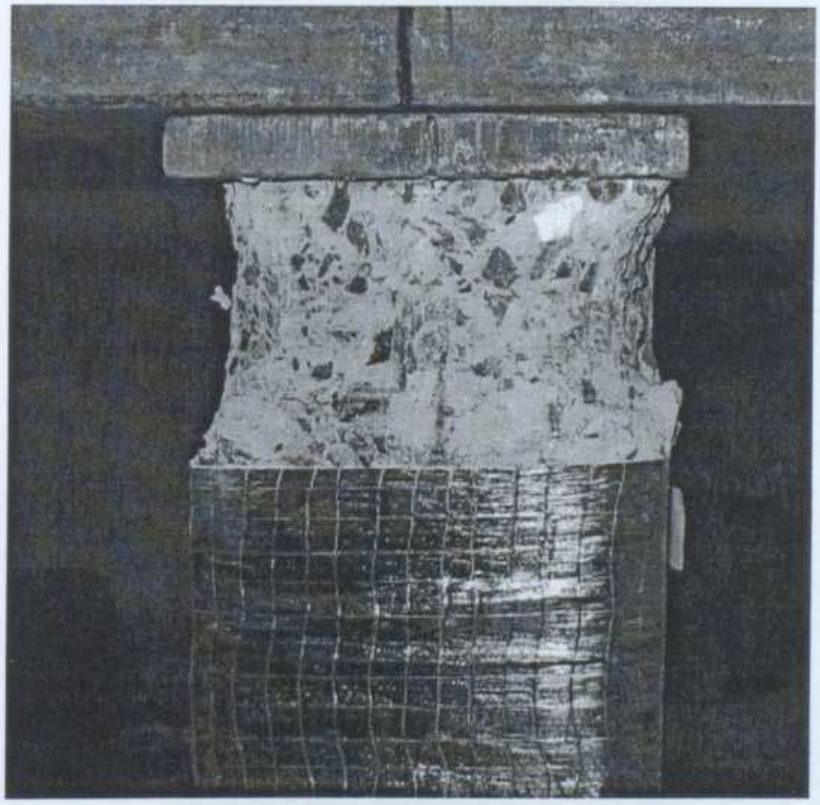
3.10.3 C5L8S8 Kolonu

Tamamen çift kat halinde FRP kompozit tabaka ile sargılı, $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 8/10$ enine donatılı kolondur. C5L8S8 kolonu, 1267 kN eksenel yük mertebesinde, kolonun baş kısmında LP sargının kopmasıyla yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Yük boşaltılıp kolon yakından incelenmek amacıyla, LP sargı tabakası soyulmuş; kolon üst kısmından başlayarak orta bölgeyi içine alacak şekilde ilerleyen çatlaklar, LP sargının koptuğu bölgede ise, betonda ezilme görülmüştür.



Şekil 3.89 C5L8S8 kolonu



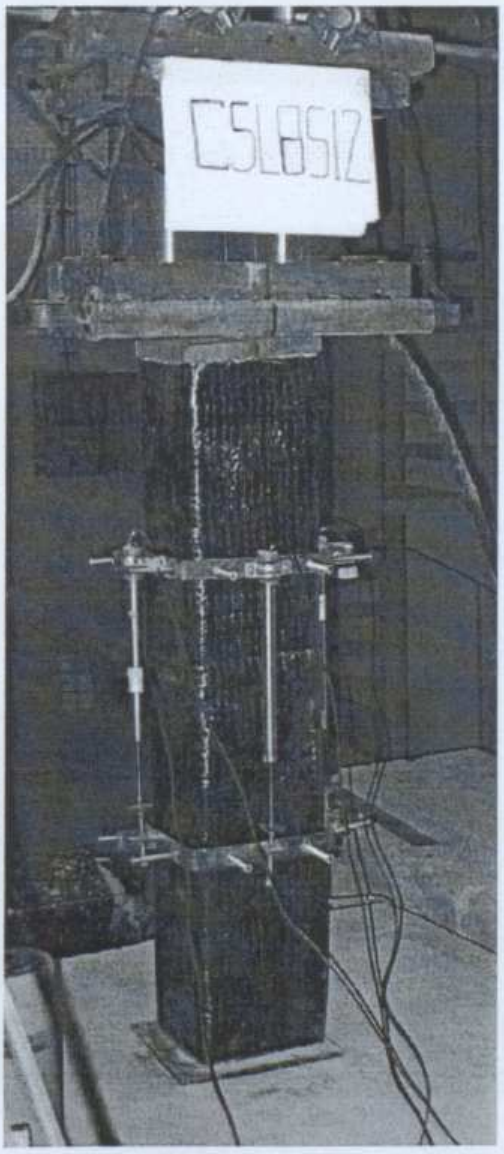


Şekil 3.90 C5L8S8 kolonu, deney sonunda LP sargının koptuktan sonra el ile sıyrıldığında betonda görülen hasar

3.10.4 C5L8S12 Kolonu

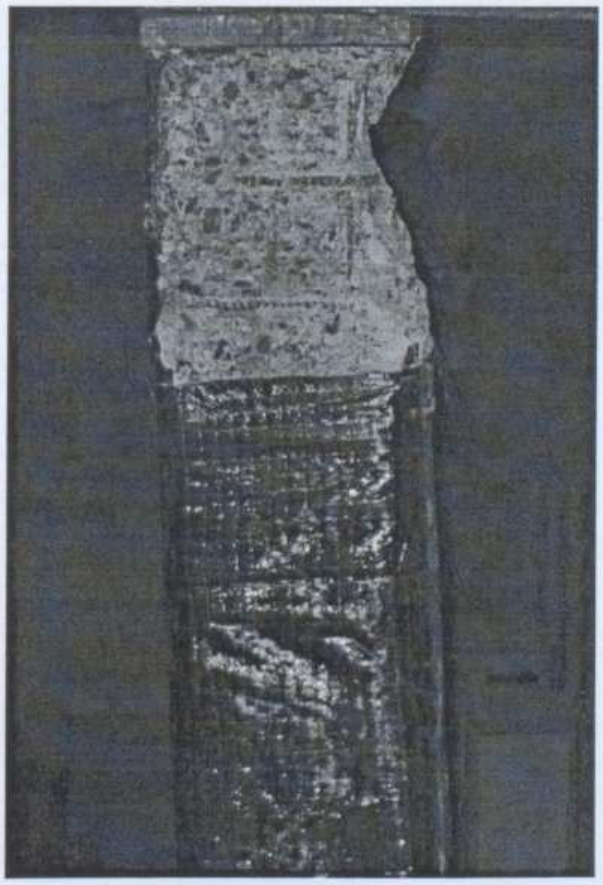
Tamamen çift kat halinde FRP kompozit malzemesi tabakası ile sarılmış, $8\phi 10$ boyuna ve $\phi 12/10$ enine donatılı kolondur. C5L8S12 kolonu 1415 kN eksenel yük mertebesinde kolon orta bölgesinin az üstünde LP sargının kopması ile göçme yüküne ulaşmıştır.

İki LP sargılı kolonlarda, kolon göçme yükünün yarı mertebesine ulaştığında, cam kırılmasına benzer sesler duyulmaya başlanması; tüm C5 serisi kolonlarında gözlemlenmiştir. C5 serisi kolonlarında LP sargının kopma yeri, kopma gerçekleşinceye dek kestirilememiştir. LP sargının kopmuş olduğu bölgede ise kolon iç çekirdeğine kadar kesik konik şeklinde, çatlama, kırılma ve ezilme gözlemlenmiştir.



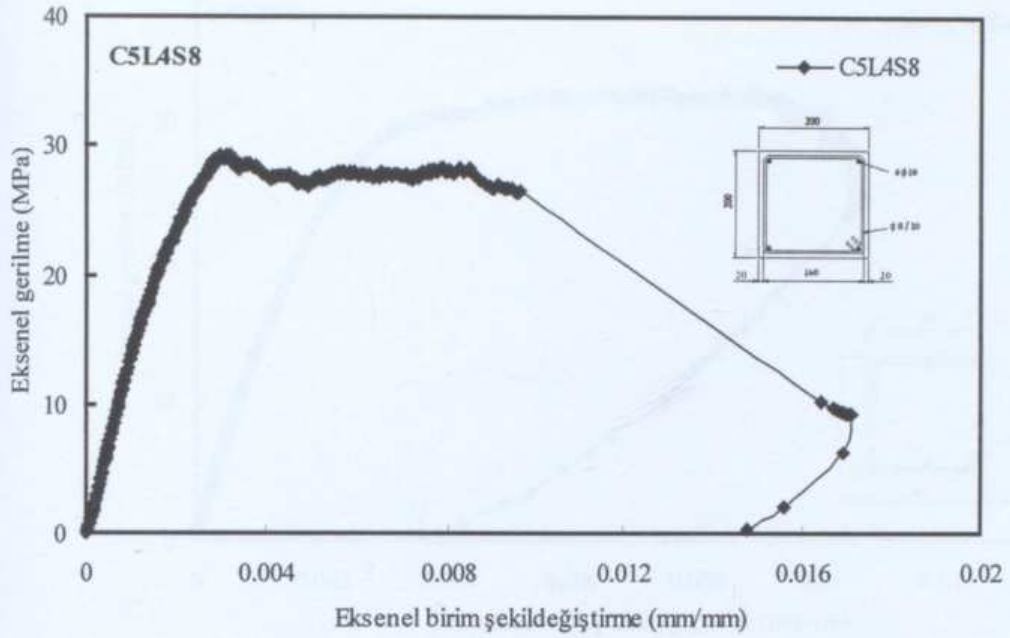
Şekil 3.91 C5L8S12 kolonu

Şekil 3.92 C5L8S12 kolonu, deney sonrası kolon orta kısmı üzerinde oluşan hasar

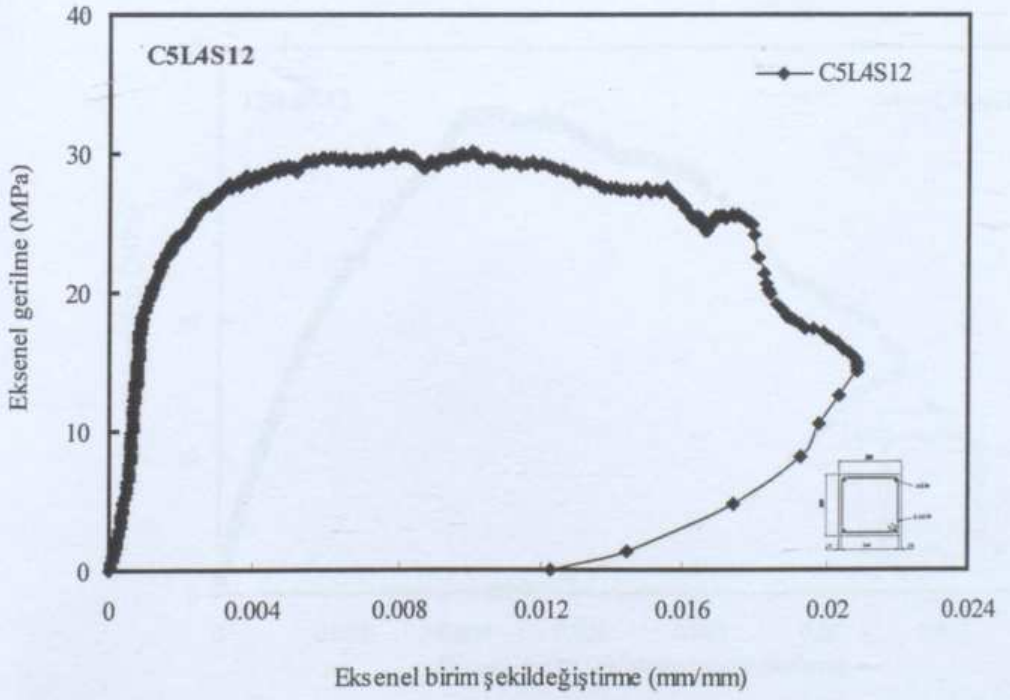


Şekil 3.93 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar

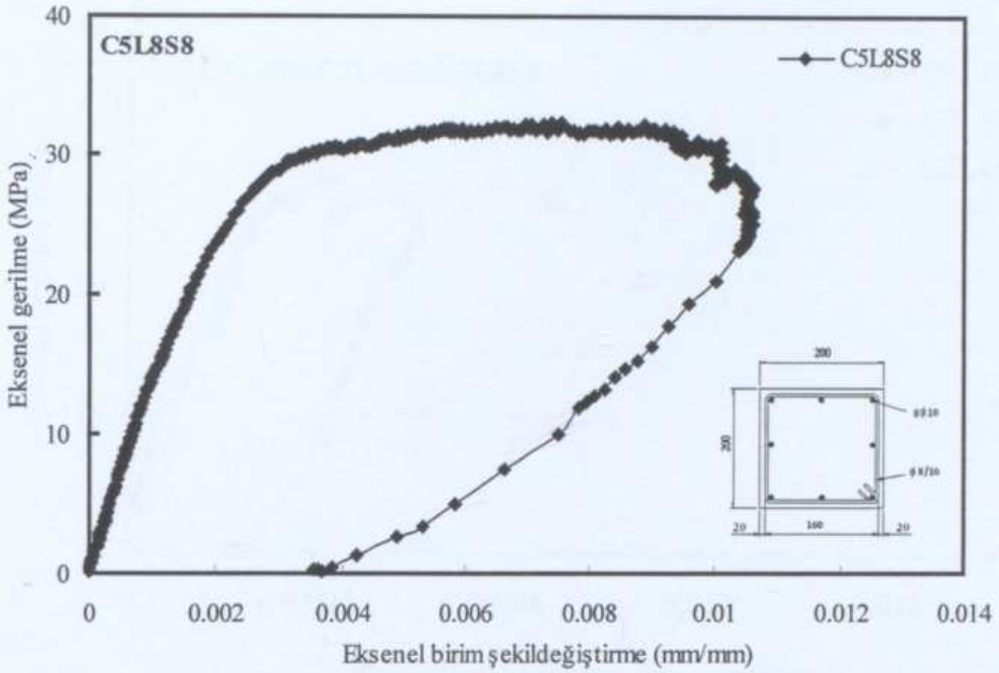
Şekil 3.94 C5L8S12 kolonu, deney sonrası LP sargısının el ile soyulması ile görülebilen betondaki hasar



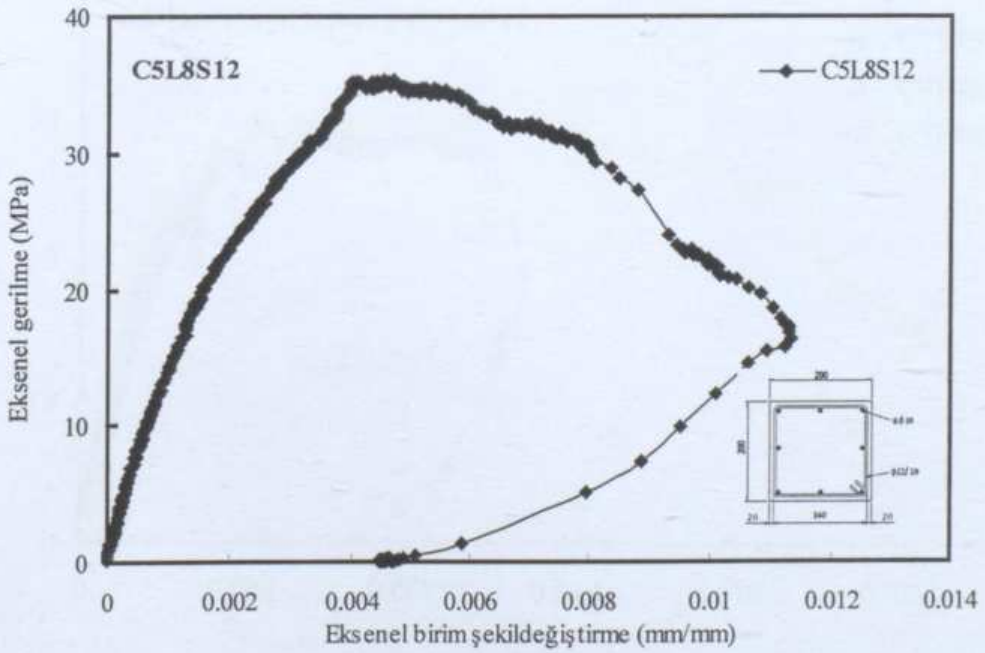
Şekil 3.95 C5L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



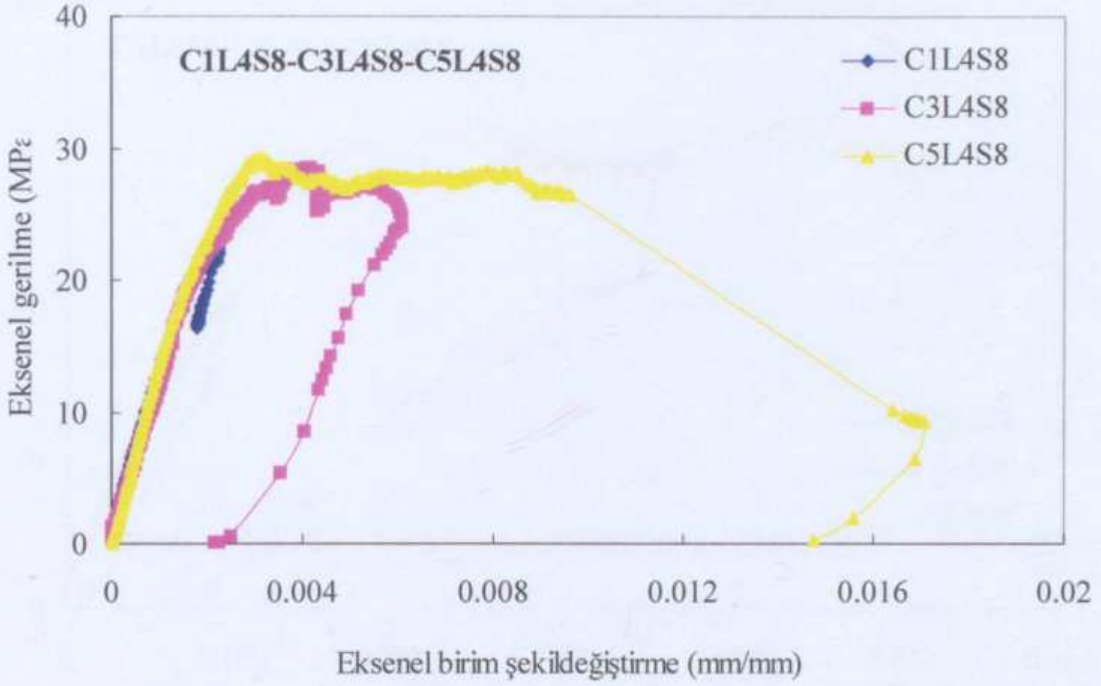
Şekil 3.96 C5L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



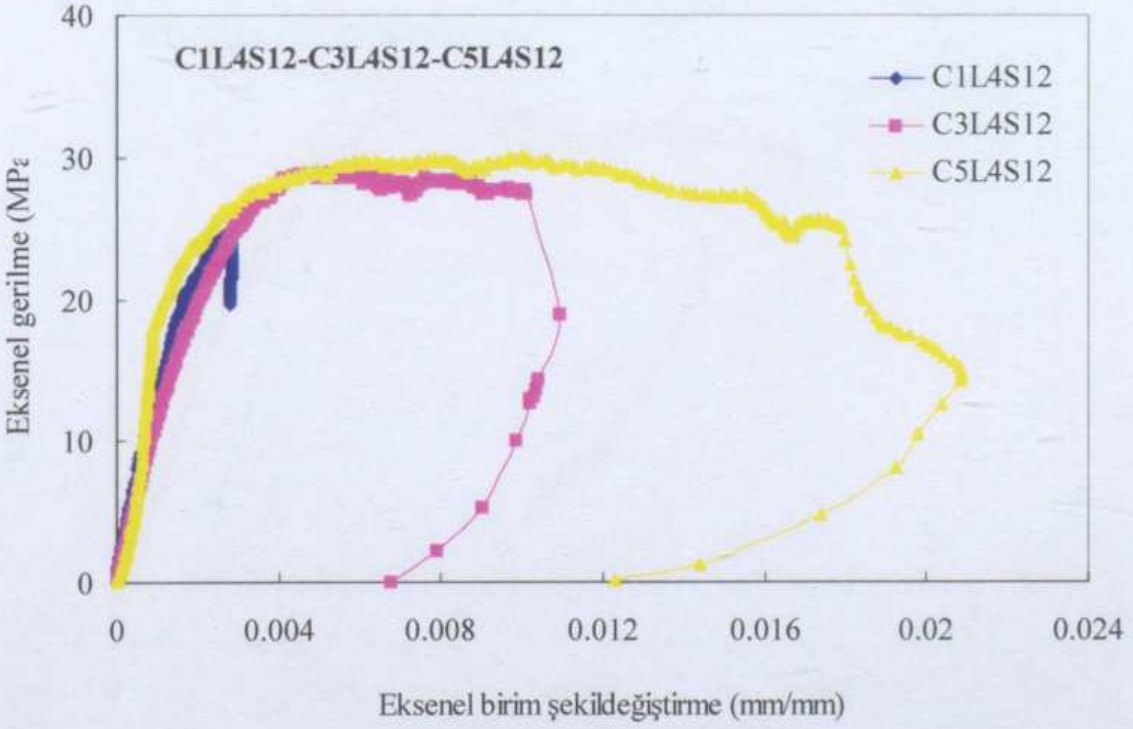
Şekil 3.97 C5L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



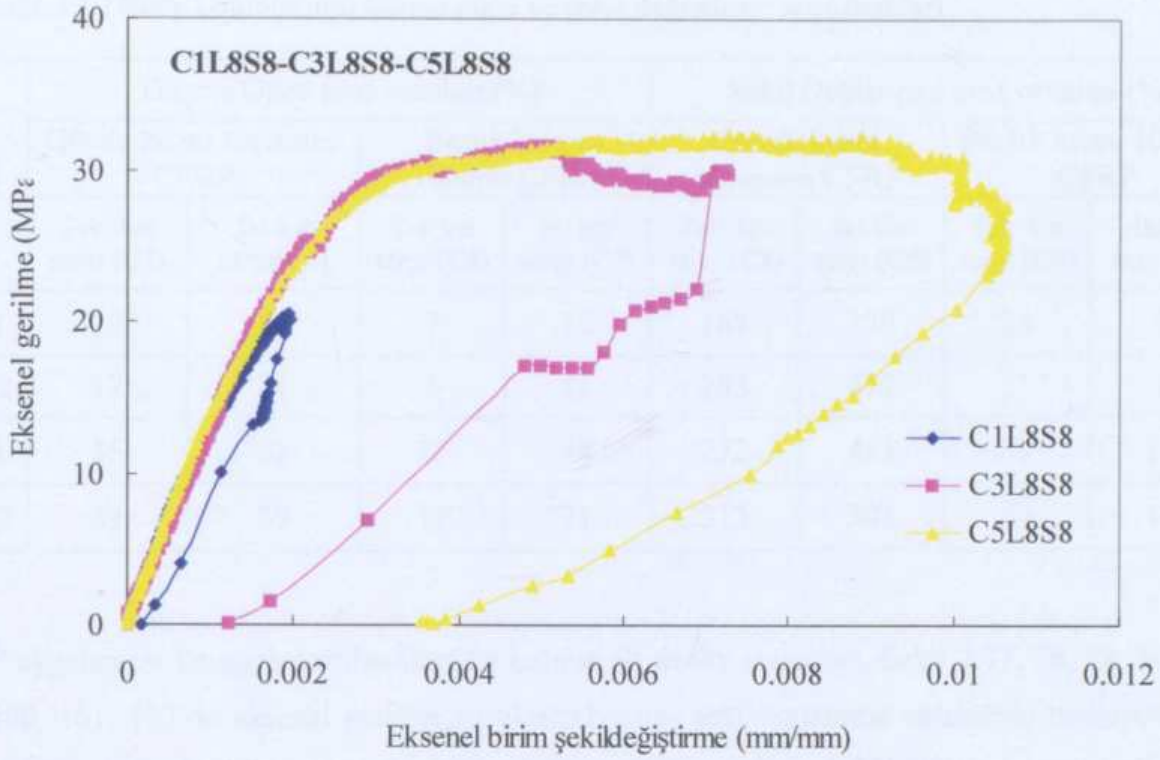
Şekil 3.98 C5L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi



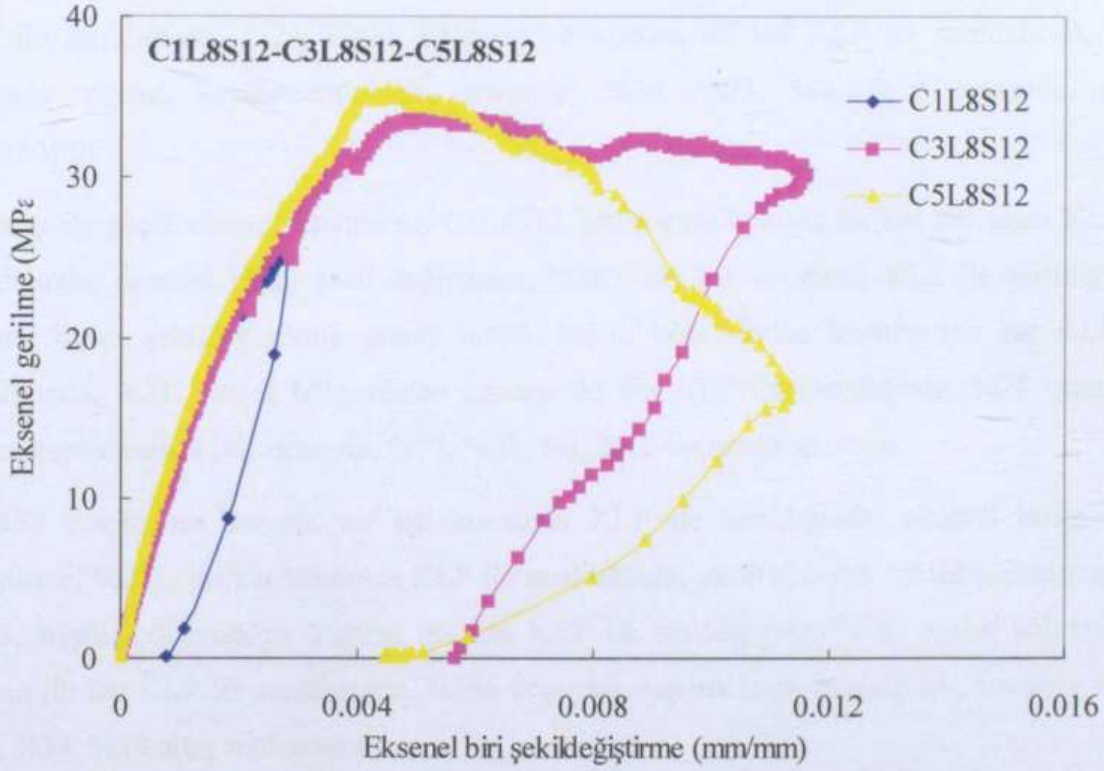
Şekil 3.99 C1,C3,C5 serisi L4S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.100 C1,C3,C5 serisi L4S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.101 C1,C3,C5 serisi L8S8 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 3.102 C1,C3,C5 serisi L8S12 kolonu eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

3.11 Deneysel Sonuçların İrdelenmesi:

Çizelge 3.1 Deney kolonlarının taşıma gücü ve şekil değiştirme artış oranları

	Taşıma Gücü artış oranları (%)				Şekil Değiştirme artış oranları (%)			
	Gövde kısmı tamamen CFRP		Başlık kısmı 100mm CFRP		Gövde kısmı tamamen CFRP		Başlık kısmı 100mm CFRP	
Yalın Kolon	Tek kat sargı **(C3)**	İki kat sargı**(C5)**	Tek kat sargı **(C4)**	İki kat sargı **(C2)**	Tek kat sargı **(C3)**	İki kat sargı **(C5)**	Tek kat sargı **(C4)**	İki kat sargı **(C2)**
C1L4S8	20	23	7	12	167	339	24	72
C1L4S12	17	21	4	15	283	479	21	78
C1L8S8	55	58	35	48	272	443	78	146
C1L8S12	33	39	17	21	313	302	52	149

FRP uygulaması ile güçlendirilen dört tip kolona ait deney sonuçları, Şekil 3.77, 78, 79, 80, 99,100, 101, 102'de eksenel gerilme ve eksenel birim şekildeğiştirme eğrileriyle mukayese edilmiştir. Aynı özellikte olup da güçlendirme yapılmamış olan C1L4S8 kolonu, bir kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekil değiştirme, %167, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekildeğiştirme oranı, %339, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %24, başlık bölgesinden kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %72 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %20, %23, %7, %12 oranında arttığı görülmüştür.

LP sargı ile güçlendirme yapılmamış C1L4S12 betonarme kolonu, bir kat tamamen KLP ile sarıldığında; eksenel birim şekil değiştirme, %283, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekildeğiştirme oranı, %479, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %21, başlık bölgesinden kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %78 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %17, %21, %4, %15 oranında artmıştır.

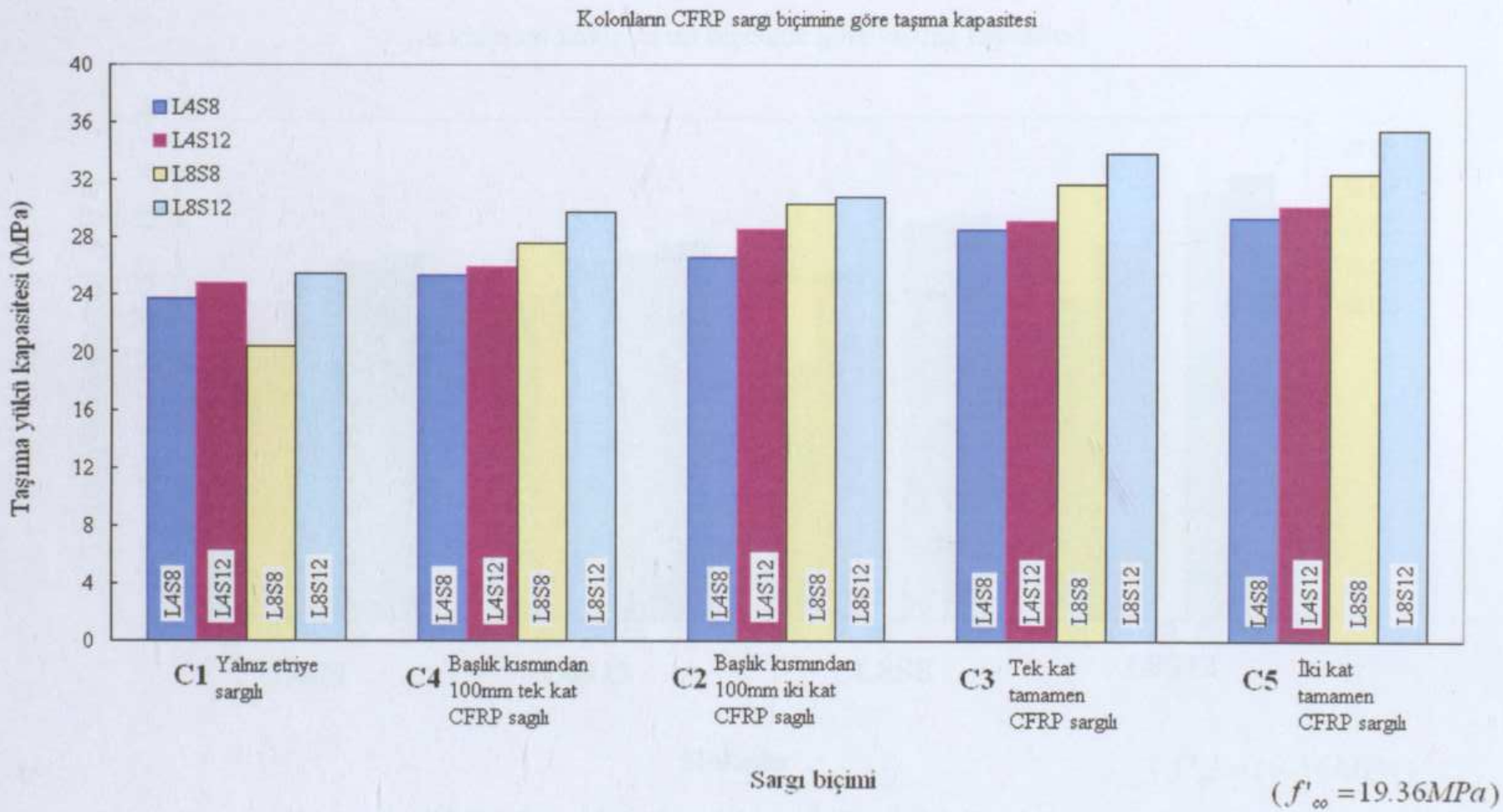
C1L8S8 betonarme kolonu, bir kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekil değiştirme, %272, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekildeğiştirme oranı, %443, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %78, başlık bölgesinden kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %146 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %54, %59, %34, %48 artış sağlamıştır.

LP sargı ile güçlendirme yapılmamış C1L8S12 betonarme kolonu ise; bir kat tamamen KLP ile sarıldığında, eksenel birim şekil değiştirme, %151, iki kat tamamen KLP ile sarıldığında, %302, başlık bölgesinden kısmen tek kat KLP ile sarıldığında, %52, başlık bölgesinden

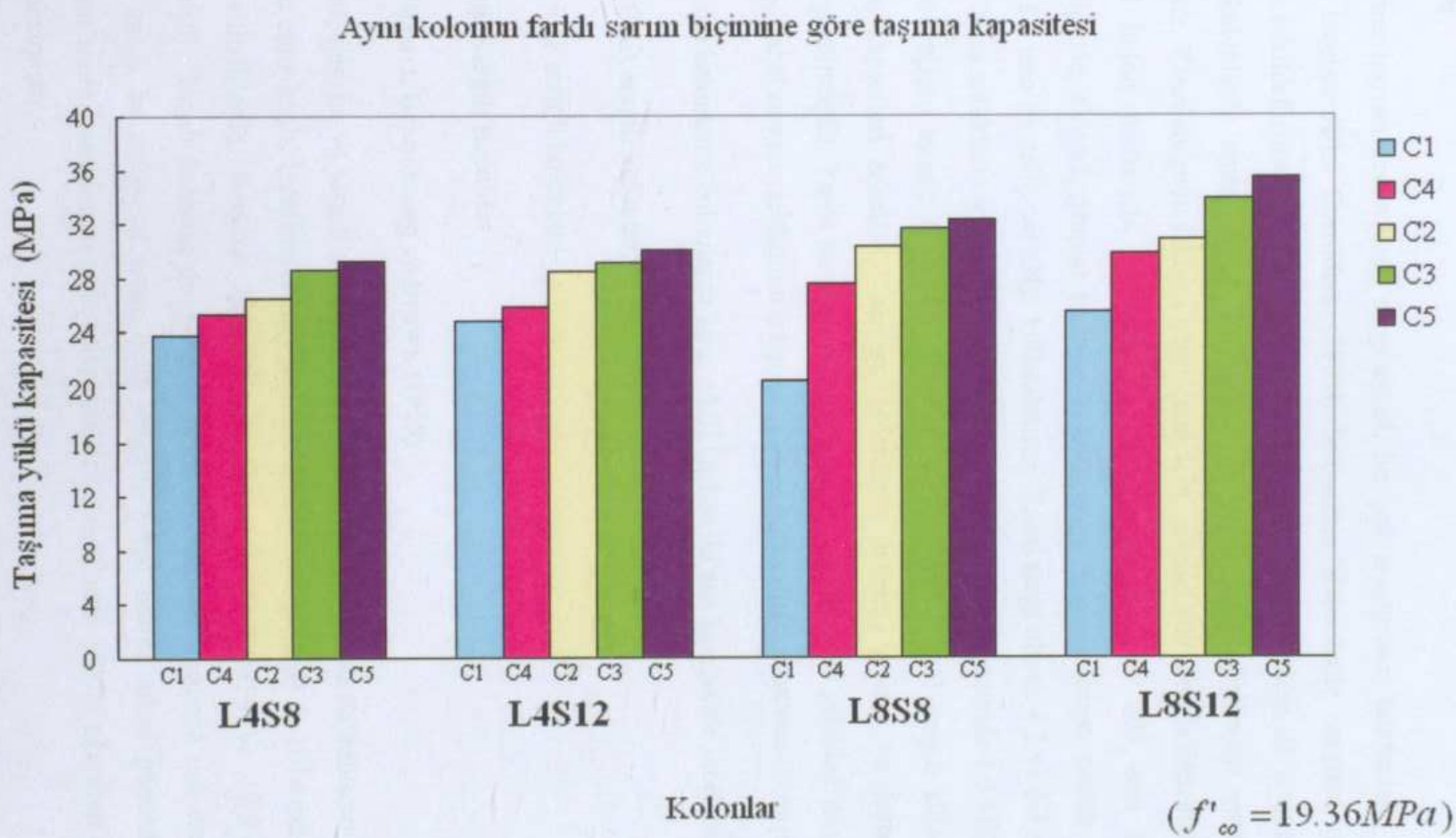
kısmen iki kat KLP ile sarıldığında, %149 oranında, taşıma kapasitesinin ise, sırasıyla; %33, %39, %17, %21 oranında arttığı görülmüştür.

C1L8S8 kolonu, C1L4S8 kolonuna göre %13.6 mertebesinde daha düşük bir yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Boyuna donatı sayısının iki katına çıkartılması beklendiğinin aksine taşıma gücüne olumlu yönde etki etmemiştir. Bunun nedeni betona göre daha kuvvetli bir malzeme olan çelik donatıların etrafında oluşan gerilme yığılmalarıdır. Böylelikle lokal olarak beton, çelik çubukların etrafında zayıflamakta ve bölgesel kırılmalara dolayısı ile kolonun taşıma gücünü yitirmesine neden olmaktadır. Özellikle bu durum sargı donatısının zayıf olduğu bölgede gerçekleşmesi beklenir.

Nitekim C1L8S12 kolonunda etriye çapı 12mm'ye çıktığında C1L8S12 kolonu C1L4S8 kolonuna göre %7.3'lük bir eksenel yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Buradan; kullanılan etriye çapı ile boyuna donatı sayısı ve çapı arasındaki ilişkinin kolonun taşıma gücünde etkili bir parametre olarak düşünülmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir (Chung vd., 2002, Köksal, 2006, Söylemez, 2006).



Şekil 3.103 Farklı sargı biçimlerine göre deney kolonlarının taşıma kapasitesi



Şekil 3.104 Benzer kolonların farklı sargı biçimleriyle kıyaslanması

4. BETONARME KOLONLARDA SARGILANMIŞ (KUŞATILMIŞ) BETON İÇİN BÜNYESEL MODELLER

4.1 Giriş

Betonarme taşıyıcı sistemlerde sargı etkisi, bir çok araştırmacı tarafından, 100 yılı aşkın süredir incelenmiştir. Considere (1903), betonarme sistemlerde sargının mukavemet ve betonun şekildeğiştirme özelliklerine olumlu etkisinin farkına varan ilk araştırmacılardandır. Beton kolonlarda enine donatı kullanımın da yanal şekildeğiştirmeyi yavaşlattığını öne sürmüştür. Yanal sargının etkisini görebilmek için, eksenel yük altında denemek üzere bir seri dairesel kolon üretmiştir. Numuneler 152 mm çapında ve 508 mm ila 1209 mm yüksekliğinde, altışarlı gruplar halinde hazırlanmıştır. Boyuna donatı olarak sekiz adet 6.4 mm ve 8.9 mm'lik çelik çubuklar kullanılmıştır. Yanal sargı olarak 4.3 ve 6.3 mm çapında ve 15 ila 30mm aralıklarla spiral sargı uygulanmıştır. Bu deney sonucunda 4.0 MPa ila 46.5 MPa arasında değişen basınç dayanımı değerleri görülmüştür. Yanal sargılı silindir kolonlarda dayanım kapasitesi artarken, sargısız kolonlarda davranış gevrek ve dayanımın yetersiz kaldığı görülmüştür. Yanal sargının basınç dayanımını ve eksenel şekildeğiştirme kapasitesini artırdığı, yanal sargının sıklığının artışıylada sünekliğin arttığı sonucuna varmıştır.

Bugün için betonarme kolonlarda sargı etkisi başlıca iki ana kategoride incelenebilir:

- Çelik sargılı kolonlar,
- FRP sargılı kolonlar.

4.2 Çelik Sargılı Kolonlar

4.2.1 Richart, Brandtzaeg ve Brown (1929)

Yazarlar, sargısız ve sargılı silindirlerin üç eksenli basınç altında davranışının incelenmesine öncülük etmişlerdir. İncelenen deney numuneleri 254 mm çapında ve 1016 mm yüksekliğinde beton silindirlerdir. Sargısız beton basınç dayanımı 16,7 MPa ve 19.9 MPa arasında değişmiştir. Sargılı betonun da, sargısız beton dayanımına ulaşılana dek muntazaman yük aldığı, ancak bu noktadan sonra çelik sargının yanal basınç etkisi gösterdiği, ayrıca; bu noktadan sonra, maksimum yüke ulaşılana dek uygulanan yükün eğiminin azalarak arttığı gözlemlenmiştir.

Yazarlar, sargılı beton basınç dayanımı f'_{cc} ve eksenel şekildeğiştirme ε'_{cc} için :

$$f_{cc} = f'_c + k_1 \sigma_3 \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + k_2 \frac{\sigma_3}{f'_c} \right) \tag{4.2}$$

bağıntılarını kullanmıştır. k_1, deney sonuçlarından bulunan etkili sargı katsayısıdır ve yaklaşık olarak değeri 4.1 ve

$$k_2 = 5k_1 \tag{4.3}$$

f'_c , sargısız beton basınç dayanımı,

ε_{cc}, sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim kısalma,

σ_3, sargının sağladığı yanal basınç gerilmesi,

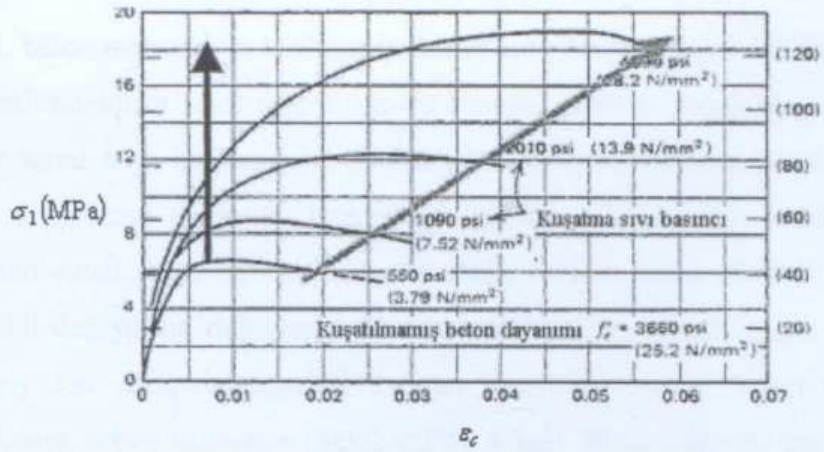
$$\sigma_3 = \frac{\rho_s f_s}{2}, \tag{4.4}$$

ρ_s , sargı donatısı hacimsel oranı,

f_s, sargı mukavemetidir.

4.2.2 Mander Beton Modeli (1988)

Mander beton modeli sargılı, dikdörtgen sargı donatılı, dairesel veya dikdörtgen kesitli yapı elemanların monotonik veya çevrimsel yükler altındaki davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilmiştir. Mander vd., (1988) 40 adet büyük ölçekli, dairesel, kare ve dikdörtgen betonarme kolonu eksenel yük altında denemişlerdir. Bu deneylerde kolonların statik ve dinamik yük etkileri altındaki davranışları araştırılmıştır.



Şekil 4.1 Silindir beton numuneler için üç eksenli basınç deneyi sonuçları (Whittaker A., 2000)

Sargılı beton için geliştirilecek eksenel gerilme–birim şekil değiştirme bağıntısının sargılanmış elemanları tarafından olşturulan iki eksenli basınç etkisini de dikkate alması gerekmektedir. Bu amaçla Mander vd., (1988), diğer birçok araştırmacının da başvurduğu gibi Richart vd., (1928)'in Illinois Üniversitesi'nde yapılan üç eksenli beton deneylerinin sonuçlarını esas almıştır. Araştırmacılar, söz konusu deney sonuçlarını temel alarak çok eksenli yük altında taşıma gücünü, f_{cc}, betonun tek eksenli basınç mukavemeti $f_c^{'}$ ve uygulanan yanal basınç, σ_3, değerlerini kullanarak;

$$f_{cc} = f_c^{'} + k_1 \sigma_3 \tag{4.5}$$

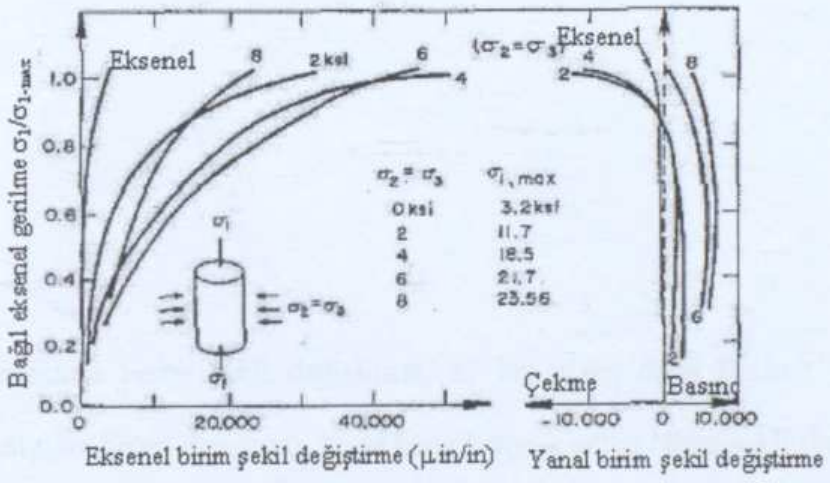
şeklinde ifade etmişlerdir. Benzer şekilde taşıma gücüne karşılık gelen birim şekil değiştirme değerini de

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c^{'}\left(1 + k_2 \frac{\sigma_3}{f_c^{'}}\right) \tag{4.6}$$

eşitliği ile dikkate almışlardır. Richart vd., (1928), $k_1 = 4.1$ ve $k_2 = 5k_1$ olarak bulurken Balmer vd., (1949) k_1 değerinin 4.5 ile 7 arasında değiştiğini ifade etmiştir. Richart vd., (1928), sargılı betonarme deney silindirlerinin sonuçlarını kullanarak k_1 için sabit bir 4.1 değerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir; ACI Yönetmeliği de uzun yıllardan beri bu önerileri dikkate almaktadır (Mander vd., 1988).

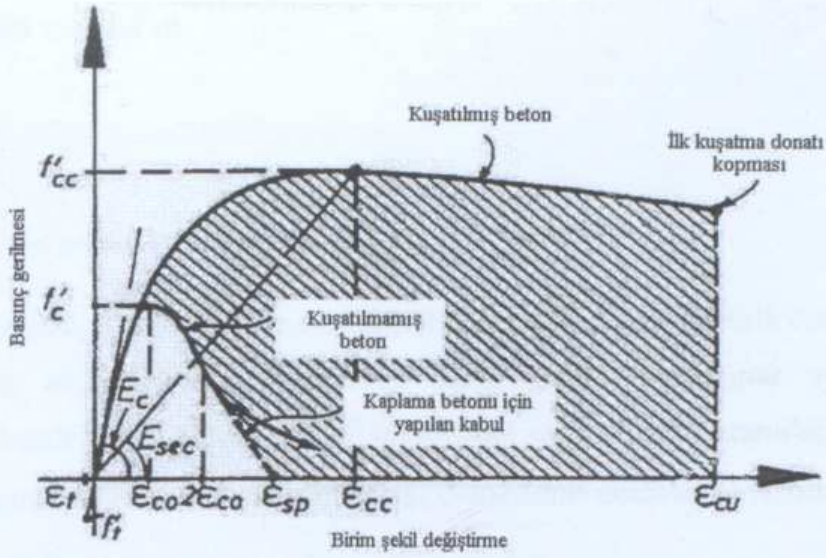
Betonun çok eksenli yükleme altındaki gerilme–birim şekil değiştirme davranışı Şekil 4.2'de

gösterilmişir. Silindirik beton numuneleri düzgün yanal basınca, $\sigma_2 = \sigma_3$, maruz bırakılmış ve eksenel yük, beton numunenin kırılmasına kadar arttırılmıştır. Şekil 4.2'den de anlaşılacağı gibi eksenel gerilme–birim şekil değiştirme ve eksenel gerilme–yanal birim şekil değiştirme eğrileri her bir yanal sargı basıncı için farklıdır. Bu deneyler sonunda yanal sargı basıncının betonun şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisinin çok önemli olduğu gözlenmiştir. Deneylerde artan yanal sargı basıncı ile numunenin kırılma anına tekabül eden eksenel ve yanal birim şekil değiştirme değerlerin de artış görülmüştür. Ancak, yanal sargı basıncının belirli bir seviyeden sonraki değerleri kırılma anındaki eksenel birim şekil değiştirme değerinde azalmaya sebep olmuştur (Şekil 4.2'de 4 ksi). Buna rağmen, çok eksenli gerilme altındaki betonun davranışı bir eksenli gerilme altındaki ile karşılaştırıldığında, bir eksenli duruma göre çok daha büyük eksenel birim şekil değiştirme değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bilindiği üzere, betonda yanal sargı basıncı mevcut iken eksenel basınç altındaki davranışı, büyük süneklik kazanır (Chen ve Han, 1988).



Şekil 4.2 Çok eksenli gerilme altında gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri (Chen ve Han, 1988)

Mander vd., (1988), sargılı veya etriyeli yanal donatıyı haiz sargılı beton kesitler için gerilme–birim şekildeğiştirme bağıntısı önermişler ve Şekil 4.3'deki gerilme–birim şekil değiştirme modeli geliştirirken Popovics (1973) tarafından önerilen bağıntıyı temel almışlardır.



Şekil 4.3 Mander beton modeli (1988)

Monotonik olarak yüklenen betonda oluşacak gerilme aşağıdaki bağıntılar ile bulunabilir.

$$\sigma_1 = \frac{f_{cc}\, x\, r}{r - 1 + x^r} \tag{4.7}$$

ve

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \tag{4.8}$$

(4.8)'de ε_c betondaki birim şekil değiştirme, ε_1 ise; daha önce Richart vd., (1928)'de önerildiği gibi sargısız beton dayanımı $f_c^{'}$ ve buna karşılık gelen birim şekil-değiştirme $\varepsilon_c^{'}$'ne bağlı olarak Mander vd., (1988) çalışmasında

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c^{'}\left[1 + 5\left(\frac{f_{cc}}{f_c^{'}} - 1\right)\right] \tag{4.9}$$

bağıntısı ile verilmiştir ($\varepsilon_c^{'}$ değeri genellikle 0.002 alınır).

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\sec}} \tag{4.10}$$

(4.10)'daki

$$E_c = 5000\sqrt{f_c^{'}}\ \text{(MPa)} \tag{4.11}$$

betonun elastisite modülü ve

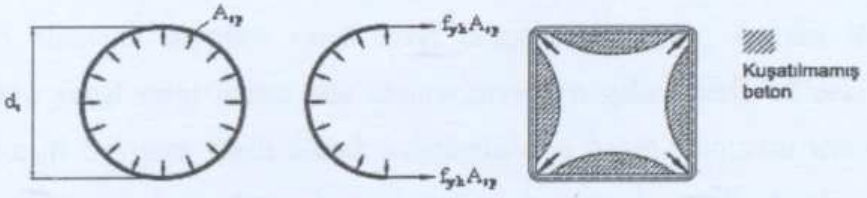
$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_1} \tag{4.12}$$

olarak ifade edilen sekant elastisite modülüdür.

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi spiraller ve dairesel halka etriyeler, geometrik özelliğinden dolayı eksenel basınç altında beton genişlerken çekme etkisinde kalırlar ve bu durumda çevreledikleri beton kesit üzerinde sürekli bir çizgisel sargı yükü oluştururlar. Betona etkiyen etkili yanal basınç σ_3 en büyük değerini, sargı donatısının akma mukavemeti f_{yh}'ye ulaştığı zaman alır. Bu değer

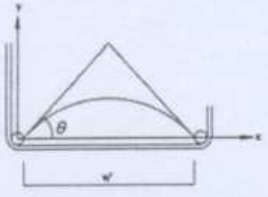
$$\sigma_3 = \frac{2 f_{yh} A_{sp}}{d_s s} \tag{4.13}$$

alınabilir. Burada d_s çekirdek çapı, A_{sp} sargı donatısı kesit alanı, s sargı adımıdır.



Şekil 4.4 Yanal sargı basıncı (Whittaker A., 2000)

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi etkili olarak çalışan/çalışmayan beton enkesit alanları tahmin edilebilir. Mander modelinde, Skeih ve Uzumeri (1983) modelindeki yaklaşıma benzer olarak, Şekil 4.5'den de görüldüğü gibi, boyuna donatı çubuklarından çizilen teğetler ve eğriler ile etkili ve etkili olmayan enkesit sınırları belirlenmiştir (Mander vd., 1988). Bu eğri bir üçgen ile başlangıç eğimi θ olan ikinci derece parabol arasında düşünülebilir. θ açısının 45°'ye yakın olduğu gözlenmiştir (Sheikh ve Uzumeri, 1983) (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Mander beton modelinde kuşatılmamış beton alanının elde edilişi için yapılan kabul

Sargı donatısı seviyesinde etkili olarak sargılanmamış beton çekirdek alanı, "taralı alan" için yapılan kabule bağlı olarak (4.14)'deki α_3 katsayısını, üçgen kabulü ve parabol kabulü için sırası ile 4 veya 6'ya eşit alınarak hesaplanabilir (Sheikh ve Uzumeri, 1983):

$$A_{et} = A_{co} - \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i^2}{\alpha_3} \tag{4.14}$$

Burada A_{co} en dış sargı donatısının kapadığı beton çekirdek alanı, n parabol veya üçgen sayısı ve C ise en dış sargı donatısı merkezleri arasındaki mesafedir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Eğer λ, etkili olarak sargılı beton enkesit alanı A_{et}'nin çekirdek beton alanı A_{co}'ya oranı olarak tanımlanır ise; bu katsayı

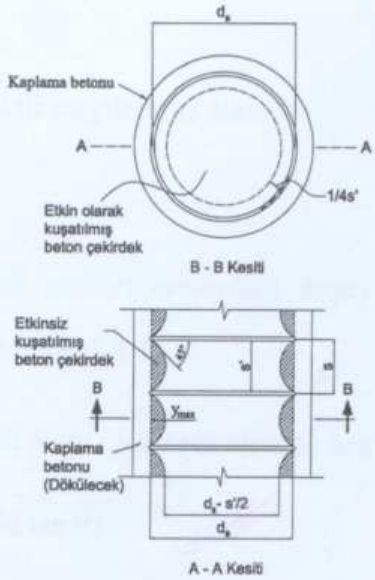
$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i^2}{\alpha_3 A_{co}} \tag{4.15}$$

olarak yazılabilir (Sheikh ve Uzumeri, 1983).

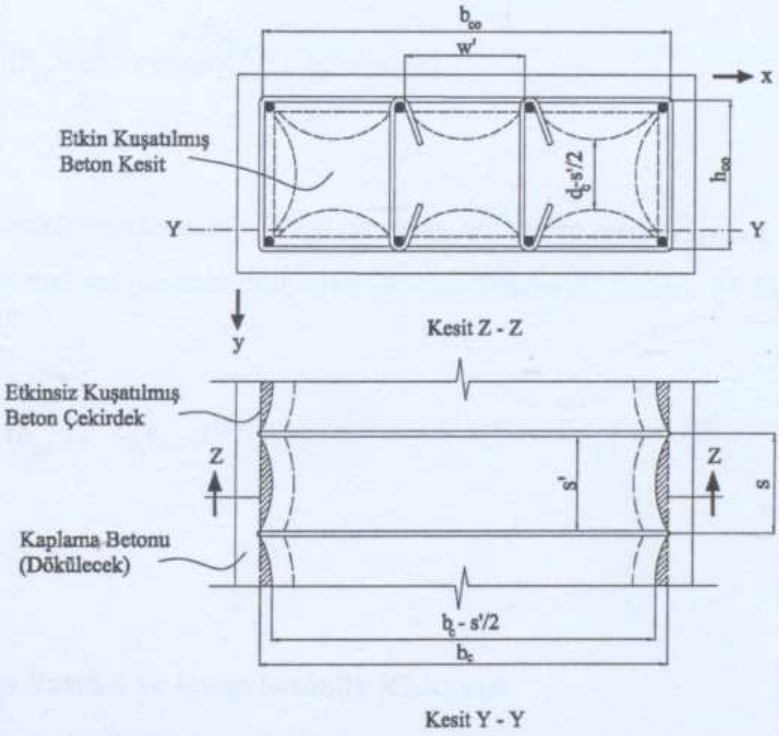
Ayrıca, kolon elemanı boyunca yanal sargı donatısı aralığının artması ile birlikte bu doğrultuda etkili yanal sargı basıncında azalma meydana gelir. Şekil 4.8'deki taralı alanlar düşey kolon kesiti boyunca etkili olarak sargılanmamış beton alanlarını temsil etmektedir. Kolon eleman boyunca hem düşey hem de yatay doğrultuda etkili olarak sargılanmış ve sargılanmamış beton alanlarının ikinci derece eğri ile birbirlerinden ayrıldığı kabul edilmiştir. Bu kabul için, seçilen eğrinin şeklinin pek bir önemi yoktur. Bir kolonun taşıma gücünü iki sargı donatısı arasında kalan en küçük beton enkesit alanı belirlemektedir. Kolon yüksekliği boyunca yerleştirilen yanal donatılar arası mesafenin artması daha küçük etkili beton enkesit alanları anlamına gelir. Bununla beraber, etkili olarak sargılanmış beton enkesit alanını tam olarak tahmin etmenin çok güç olduğu açıktır. Buna rağmen bu alan aşağıdaki basit alan bağıntısı ile dikkate alınabilir:

$$A_{co} = b_{co} h_{co} \tag{4.16}$$

$$A_{et} = \lambda A_{co} \tag{4.17}$$



Şekil 4.6 Sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış çekirdek enkesit alanı (Mander vd., 1988)



Şekil 4.7 Etriyeli/sargılı kolonlarda etkili kuşatılmış beton çekirdek enkesit alanı (Mander vd., 1988)

Şekil 4.7'de b_{co} ve h_{co} değerleri, dikdörtgen kesitli kolonlarda birbirine dik iki doğrultudaki en dış sargı donatısı eksenleri arasında kalan mesafelerdir. Sargı donatısı seviyesindeki çekirdek alanı A_{co}'da yapılacak azaltma ihmal edilerek iki sargı donatısı arasındaki etkili olarak sargılanmış enkesit alanı

$$(b_{co}-2y_m)(h_{co}-2y_m) \tag{4.18}$$

olarak ifade edilir ise; sonuçta etkili sargılanmış alan:

$$A_{et}=\lambda(b_{co}-2y_m)(h_{co}-2y_m) \tag{4.19}$$

olarak bulunur. y_m, sargı donatı sıraları arasındaki düşey mesafenin yarısında y'nin en büyük değeridir: $y_m=0.25s\tan\theta$ (Şekil 4.7).

Böylece etkili sargılı beton enkesit alanı, çekirdek alanına bağlı olarak:

$$A_{et}=\lambda\,(b_{co}-0.5s\tan\theta)(h_{co}-0.5s\tan\theta) \tag{4.20}$$

şeklinde elde edilir.(4.15) bağıntısı (4.20)'de yerine yazılır ise;

$$A_{et}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}C_i^2}{\alpha_3\,A_{co}}\right)(b_{co}-0.5s\tan\theta)(h_{co}-0.5s\tan\theta) \tag{4.21}$$

olarak bulunur (Sheikh ve Uzumeri, 1983). Boyuna donatı yerleşiminin her iki yönde de eşit olarak dağıtıldığı, yanal sargı basıncının birbirine eşit olduğu bir kesitte (4.21) bağıntısı

$$A_{et}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}C_i^2}{\alpha_3\,A_{co}}\right)(b_{co}-0.5s\tan\theta)^2 \tag{4.22}$$

haline gelir.

4.2.2.1 Etkili Sargı Basıncı ve Sargı Etkinlik Katsayısı

Mander vd., (1988) etkili yanal sargı basıncı $\sigma_3^{'}$'nü hesaplamak için Sheikh ve Uzumeri (1983)'nin kullandıkları yaklaşıma benzer bir yol izlemişlerdir. Sargı donatısından beton kesite etki edecek en büyük yanal basınç gerilmesi, yanal tutma etkisinin tam anlamı ile oluşacağı beton çekirdek alanında meydana geleceği vurgulanmış ve Şekil 4.7'de bu amaç için izlenen yol ve yapılan kabuller gösterilmiştir.

İki sargı donatısının orta kısımlarına gidildikçe etkili olmayan sargılanmış beton enkesit alanları artacak ve böylece iki sargı donatısı arasında orta seviyedeki etkili sarılmış beton

enkesit alanı, A_{et} giderek küçülecektir. Bu gerçeğin yansıtılabilmesi için etkili yanal sargı basıncı

$$\sigma_3^{'} = \sigma_3 k_e \tag{4.23}$$

olarak dikkate alınmıştır. Burada σ_3 sargılanmış beton çekirdeğe etkiyen düzgün yayılı yanal sargı basıncı, k_e

$$k_e = \frac{A_{et}}{A_{co}^{'}} \tag{4.24}$$

olarak etkili sargı katsayısı, A_{et} etkili sargılı beton enkesit alanı, $A_{co}^{'}$

$$A_{co}^{'} = A_{co}(1-\rho_{co}) \tag{4.25}$$

olarak net çekirdek beton enkesit alanı ve ρ_{co} boyuna donatı toplam enkesit alanının beton çekirdek alanına oranıdır.

4.2.2.2 Sipiral ya da Halka Enine Donatıyla Sargılanmış Kesitlerde Sargı Etkinlik Katsayısı

Mander vd., (1988) modellerinde sargı donatısının tutma etkisinin gelişimini Şekil 4.8'de görüleceği gibi başlangıç eğimi 45° olan ikinci derece bir eğri olarak kabul etmişler ve iki sargı donatısının orta seviyesindeki etkili sargılı beton enkesitin alanı A_{et}'yi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir:

$$A_{et} = \frac{\pi}{4}\left(d_s - \frac{s^{'}}{2}\right)^2 \tag{4.26}$$

Burada $s^{'}$ sargı donatıları arasındaki temiz mesafe ve d_s sargı donatısının merkezine göre beton çekirdeğinin çapıdır. Ayrıca, net beton çekirdek alanı

$$A_{co}^{'} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1-\rho_{co}) \tag{4.27}$$

dir. Böylece (4.24)'de, (4.26) ve (4.27)'de belirtilen değişkenler yerine yazılır ise, halka sargılı kesitler için etkili sargı katsayısı k_e

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{co}} \tag{4.28}$$

olarak bulunur. Benzer olarak spiral donatılı kesitler için ise;

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{co}} \tag{4.29}$$

bağıntısı ile elde edilebilir.

Yanal sargı basıncı (4.13) ile ifade edilmişti. ρ_s sargı donatısı hacminin sargılanmış beton çekirdek hacmine oranı olarak tanımlanır;

$$\rho_s = \frac{A_{sp}\,\pi\, d_s}{\frac{\pi}{4} d_s^2\, s} \tag{4.30}$$

ve (4.30), (4.13)'te yerine yazılır ise, yanal sargı basıncı

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}\rho_s\, f_{yh} \tag{4.31}$$

olarak elde edilir. Böylece sargılı betona etkiyecek etkili yanal basınç

$$\sigma_3' = \frac{1}{2} k_e\, \rho_s\, f_{yh} \tag{4.32}$$

olarak elde edilir. Bu bağıntıda k_e değişkeni (4.28) veya (4.29)'dan alınmalıdır.

4.2.2.3 Dikdörtgen Sargılı Kolonlar için Sargı Etkinlik Katsayısı

Şekil 4.21'den görüleceği üzere; sargı donatısı tutma etkisinin beton yüzey üzerindeki dağılımı, başlangıç eğimi 45° olan ikinci derece bir eğri ile ifade edilmiştir. Sargı donatısının tutma etkisi düşeyde yanal donatılar arasında ve yatayda da boyuna donatılar arasında oluşmaktadır. Yanal sargı donatı seviyesindeki etkili sargı enkesit alanı, ikinci derece eğriler ile ifade edilmiş olan etkili olmayan sargılanmış kesit alanlarının çıkartılması ile bulunur.

Etkili olarak çalışmayan beton enkesit alanlarının toplam değeri, betonarme kesitte buluna n adet boyuna donatı sayısına göre

$$A_{et}^{'} = \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i^2}{6} \tag{4.33}$$

olarak hesaplanır. Daha önce (3.21)'de ifade edilmiş olan iki sargı donatısının orta seviyesindeki etkili sargılı beton enkesit alanı, $\alpha_3 = 6$ (etkili olarak çalışmayan/kabuk olarak çalışan beton enkesit alanının sınır eğrisi ikinci derece eğri olması durumu için) ve $\theta = 45^o$ (eğrinin başlangıç eğimi) olarak kabul edilmesi ile,

$$A_{et} = \left(b_{co} h_{co} - \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}{6} \right) (b_{co} - 0.5 s')(h_{co} - 0.5 s') \tag{4.34}$$

olarak bulunur. Böylece (3.24) ile ifade edilmiş olan k_e etkili sargı donatı katsayısı, dikdörtgen yanal sargılı kesitli kolonlar için

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i^2}{6 b_{co} h_{co}} \right) (b_{co} - 0.5 s')(h_{co} - 0.5 s')}{(1 - \rho_{co})} \tag{4.35}$$

olarak elde edilir. Dikdörtgen betonarme kesitlerde her iki yönde farklı miktarda sargı donatısı olabilir. Bu durumda her iki yöndeki etkili yanal sargı basınçlarını ifade etmek için

$$\rho_{sx} = \frac{A_{shx}}{s h_{co}} \tag{4.36}$$

ve

$$\rho_{sy} = \frac{A_{shy}}{s b_{co}} \tag{4.37}$$

olarak x ve y yönlerindeki sargı oranları tanımlanarak bu yönlerdeki beton yüzeylerine etkiyecek sargı basınçları, sırasıyla; x yönünde

$$\sigma_{3x} = \frac{A_{shx}}{s h_{co}} f_{yh} = \rho_{sx} f_{yh} \tag{4.38}$$

ve y yönünde

$$\sigma_{3y} = \frac{A_{shy}}{s\, b_{co}} f_{yh} = \rho_{sy} f_{yh} \tag{4.39}$$

bağıntıları ile bulunur. Böylece; (3.23)'den her iki yöndeki etkili yanal sargı basınçları, sırası ile

$$\sigma_{3x}^{'} = k_e\, \rho_{sx}\, f_{yh} \tag{4.40}$$

ve

$$\sigma_{3y}^{'} = k_e\, \rho_{sy}\, f_{yh} \tag{4.41}$$

olarak elde edilir (Mander vd., 1988).

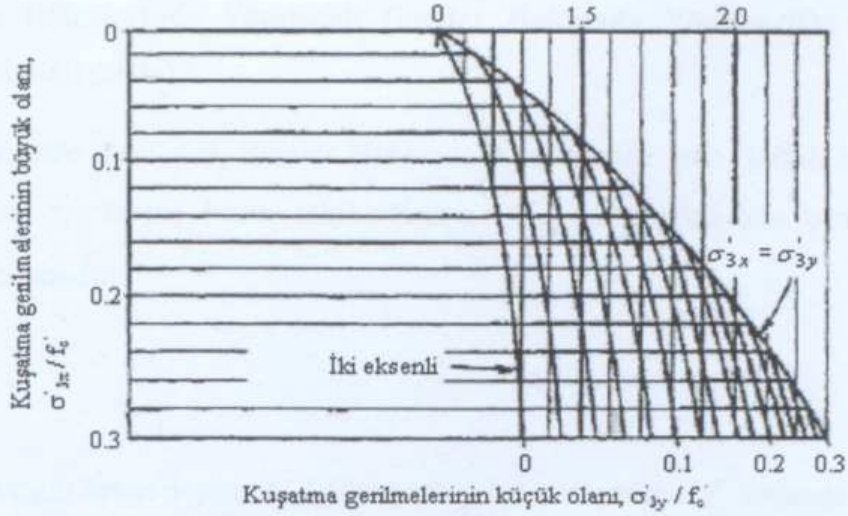
4.2.2.4 Sargılanmış Beton Taşıma Gücü

Mander vd., (1988), sargılanmış beton basınç dayanımı f_{cc}'yi hesaplayabilmek için, üç eksenli deney verileri ile iyi uyum sağlaması nedeni ile, William ve Warnke (1975) tarafından tanımlanmış beş değişkenli, çok eksenli kırılma yüzeyi modelini kullanmışlardır.

Şekil 4.8'de iki yöndeki yanal sargı basınçlarına bağlı çok eksenli kırılma kriterinin genel çözümü görülmektedir. Spiral veya halka enine donatıyla sargılanmış çekirdek beton bir kesitin eşit yanal basınçlar ile üç eksenli gerilmeye maruz kalması halinde; sargılanmış betonun dayanımı

$$f_{cc} = f_c^{'}\left(-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94\,\sigma_3^{'}}{f_c^{'}}} - 2\frac{\sigma_3^{'}}{f_c^{'}}\right) \tag{4.42}$$

olarak verilmiştir. Burada $f_c^{'}$ sargılanmamış beton basınç dayanımı, $\sigma_3^{'}$ ise (4.32) ile verilen etkili yanal sargı basıncıdır.



Şekil 4.8 Dikdörtgen kesitler için yanal sargı basınçları ile kuşatılmış beton dayanım hesabı (Mander vd., 1988)

4.2.2.5 Betondaki En Büyük Birim Kısalma

Eğilmeye çalışan betonarme elemanlarda meydana gelecek plastik mafsalların en büyük dönme kapasitelerini hesaplayabilmek için, betonun en büyük birim kısalması ε_{ccu} değerini tahmin etmek gerekir (Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., 1988). Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme değeri ε_{ccu}; enine donatıda oluşan ilk kopma anına tekabül eden değerdir.

Betondaki en büyük birim şekildeğiştirme ε_{ccu} için Priestley (2000), Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., (1988), tarafından yapılan, deneysel verilerden okunan ε_{ccu} değerleri ile de iyi bir uygunluk gösteren

$$\varepsilon_{ccu} = 0,004 + 1.4\frac{\rho_s f_{yh}\ \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.43}$$

bağıntısını önermiştir.

Burada,

ρ_s : Hacimsel enine donatı oranı,

f_{yh} : Yanal donatı akma gerilmesi,

ε_{su} : Donatıdaki mütekabil birim şekil değiştirmedir.

4.2.3 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre Sargılı Beton Modeli (2006)

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre, sargılı betonda beton basınç gerilmesi σ_l, basınç birim şekildeğiştirmesi ε_c'nin fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir:

$$\sigma_l = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \tag{4.44}$$

Bu bağıntıdaki sargılı beton dayanımı f_{cc} ile sargısız beton dayanımı f_{co} arasındaki ilişki:

$$f_{cc} = \lambda_c f'_c \; ; \; \lambda_c = 2.254\sqrt{1 + 7.94\frac{\sigma_3}{f'_c}} - 2\frac{\sigma_3}{f'_c} - 1.254 \tag{4.45}$$

dir.

σ_3, "etkili sargı basıncı"dır. Yönetmelikte kullanılan bağıntılarda, Mander vd. (1988) Modeli temel alınmıştır. σ_3, etkili sargı basıncı, dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için aşağıdaki bağıntının ortalaması alınmaktadır.

$$\sigma_{3x} = k_e \rho_x f_{yw} \; ; \; \sigma_{3y} = k_e \rho_y f_{yw} \tag{4.46}$$

f_{yw}, enine donatının akma dayanımı, ρ_x ve ρ_y, ilgili doğrultuda, enine donatıların hacimsel oranı, k_e, etkili sargılama katsayısıdır.

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6 b_0 h_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2b_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2h_0}\right)\left(1 - \frac{A_s}{b_0 h_0}\right)^{-1} \tag{4.47}$$

a_i, kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı, b_0 ve h_0, çekirdek alandaki betonu sargılayan etriyelerin eksenleri arsında kesit boyutlarını, s, düşey doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki aralığı, A_s, boyuna donatı enkesit alanını gösterir. x ile r değişkenine ilişkin bağıntı aşağıda verilmiştir.

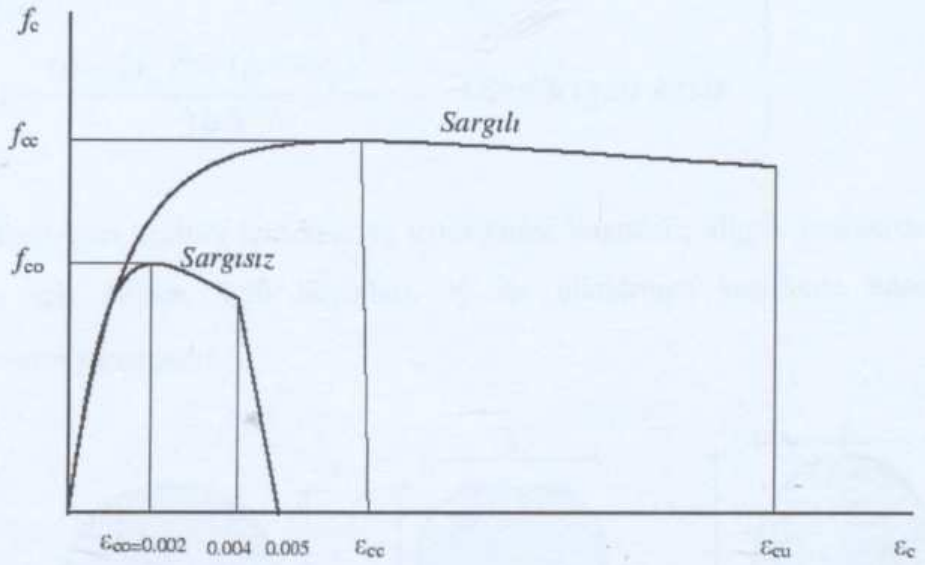
$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \; ; \; \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1 + 5(\lambda_c - 1)\right] \; ; \; \varepsilon_{co} \cong 0.002 \tag{4.48}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \; ; \; E_c \cong 5000\sqrt{f'_c} \; ; E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \tag{4.49}$$

Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi ε_{ccu} :

$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.50}$$

ρ_s, toplam enine donatının hacimsel oranı, ε_{su}, enine donatı çeliğinde maksimum gerilme altındaki birim uzamadır.



Şekil 4. 9 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2006)' a göre sargılı ve sargısız beton için gerilme şekildeğiştirme eğrileri

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe göre, LP sargılama ile kolonların eksenel basınç dayanımlarının arttırılabilmesi için, kolon kesitinin uzun boyutunun kısa boyutuna oranı ikiden fazla olmamalıdır. Kolonların en kesitleri dikdörtgenden elipse dönüştürülerek LP'nin etkililiği arttırılmalıdır. Elips kesitlerde uzun çapın kısa çapa oranı en fazla üç olabilir. LP ile sargılanmış bir kolonun eksenel yük dayanımı hesaplanırken beton basınç dayanımı için f_{cc}:

$$f'_{cc} = f'_c (1 + 2.4(\sigma_3 / f'_c)) \geq 1.2 f'_c \tag{4.51}$$

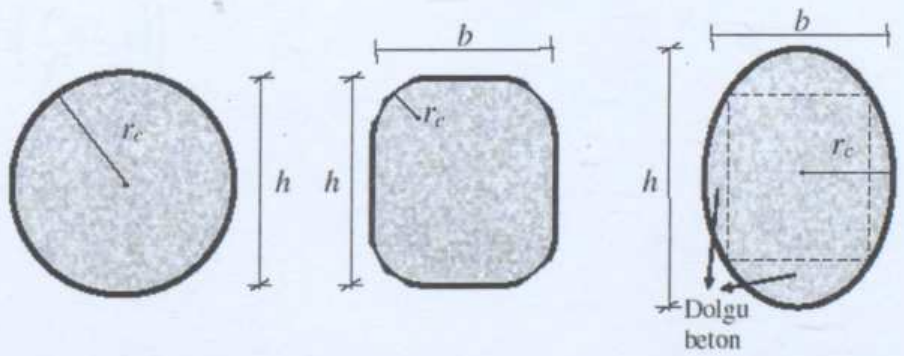
f'_c, sarılmamış betonun mevcut basınç dayanımı, σ_3, LP sargının sağladığı yanal basınç miktarıdır:

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}\kappa_a \rho_f \varepsilon_f E_f \tag{4.52}$$

κ_a, etkili kesit şekil katsayısı, ρ_f, LP hacimsel oranıdır. κ_a geometrik kesitlere göre farklılık gösterir.

$$\kappa_a = \begin{Bmatrix} 1 & \textit{Dairesel kesit} \\ \left(\dfrac{b}{h}\right) & \textit{Elips kesit} \\ 1 - \dfrac{(b-2r_c)^2 + (h-2r_c)^2}{3bh} & \textit{Dikdörtgen kesit} \end{Bmatrix} \tag{4.53}$$

b ve h dikdörtgen kesitler için kısa ve uzun kenar boyutları, eliptik kesitlerde kısa ve uzun yarıçaplar için elipsin ilgili boyutları, r_c ise dikdörtgen kesitlerde köselerde yapılan yuvarlatmanın yarıçapıdır.



a) Dairesel kesitli kolon b) Dörtgen kesitli kolon c) Eliptik kesitli kolon

Şekil 4.10 Kolon kesitlerinin köşelerde yapılan yuvarlatmalar (DBYBHY, 2006)

LP ile sargılanmıs bir kolonda sargılanmış beton basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma, ε_{cc}:

$$\varepsilon_{cc} = 0.002\left(1 + 15\left(\sigma_3 / f'_c\right)^{0.75}\right) \tag{4.54}$$

bağıntısı ile bulunabilir.

4.3 LP Sargılanmış Kolonlar

4.3.1 Saadatmanesh, Ehsani ve Li Sargı Modeli (1994)

Saadatmanesh vd.(1994), FRP sargılanmış beton kolonların monotonik yükler altında, davranışının belirlenmesini sağlayan ilk araştırmacılardandır. Modellerinde aşağıdaki parametreleri dikkate almışlardır:

i) Beton basınç dayanımı,

ii) FRP sargı kesiti,

iii) FRP sargı cinsi.

Daire ve dörtgen enkesitli FRP kompozit malzeme sargılı kolonların gerilme- şekildeğiştirme modeli, Popovics (1973)'i temel alan Mander vd.(1988) Modelini kullanmıştır. Monotonik yükleme ve yavaş birim şekildeğiştirme hızı için beton basınç gerilmesi σ_l:

$$\sigma_l = \frac{f'_{cc}\, xr}{r - 1 + x^r} \tag{4.55}$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \tag{4.56}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1 + 5\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right] \tag{4.57}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \tag{4.58}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \tag{4.59}$$

bağıntılarıyla bulunur. Sargılanmış beton basınç dayanımını, f'_{cc}, hesaplamak için William ve Warnke (1975) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılmıştır.

$$f'_{cc} = f'_c\left[-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94\sigma_3}{f'_c}} - 2\frac{\sigma_3}{f'_c}\right] \tag{4.60}$$

σ'_3, FRP sargı için etkili yanal sargı basıncıdır.

$$\sigma'_3 = \sigma_3 k_e \tag{4.61}$$

k_e, etkili sargı katsayısıdır. Dörtgen kolonlar için:

$$k_e = \frac{\left(1-\frac{s'}{2h}\right)\left(1-\frac{s'}{2b}\right)}{1-\rho_{cc}} \tag{4.62}$$

ρ_{cc}, boyuna donatının beton enkesitine oranı,

s', enine sargı donatısı temiz aralığı,

σ_3, kompozit FRP sargıdan ileri gelen yanal basınç,

$$\sigma_3 = \frac{2 f_{us} A_{st}}{d_s s} \tag{4.63}$$

f_{us}, kompozit sargı dayanımı, A_{st}, sargı kesit alanı, s, sargı genişliği,

d_s, kolon çapıdır.

Kolonun göçme yüküne ulaşmasının kompozit sargı gerilmesinin dayanıma ulaşmasıyla olmaktadır.

4.3.2 Samaan, Mirmiran ve Shahawy Sargı Modeli (1998)

Samaan vd. , FRP sargılı beton kolonlarda gerilme-şekildeğiştirme davranışını tahmin eden bir model sunmuşlardır. Sunulan modelde gerilme-birim şekildeğiştirme hem eksenel, hem yanal yönde bi-lineer olarak ifade edilmiştir. İlk eğimde gerilme, silindirik beton basınç dayanımının ulaştığı noktadır. İkinci eğim ise, eksenel yük almış betonarme eleman yanal doğrultuda bir birimşekil değiştirme davranışına gider; bu yanal şekildeğiştirme uzaması ikinci doğrultunun eğimini belirler. Bu modelde, betondaki genişleme oranı ve sargı rijitliği arasındaki korelasyon temel alınmıştır. Modeldeki parametreler FRP sargı ve çekirdek beton özelliklerine bağlıdır. FRP sargılı betonda bilineer davranışı göstermek için dört parametreli Richard ve Abbott(1975) modelinden yararlanılmıştır.

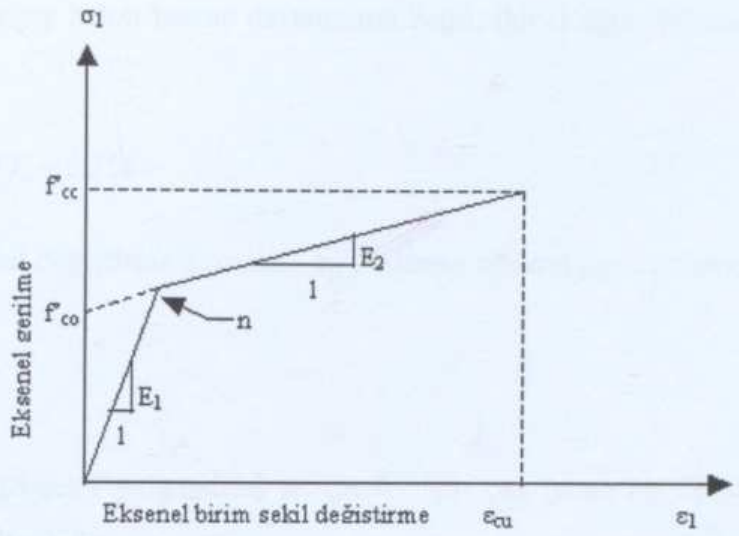
$$\sigma_l = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{\left[1+\left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}}} + E_2\varepsilon_c \tag{4.64}$$

σ_l ve ε_c, sırasıyla eksenel beton basınç gerilmesi, eksenel birim şekildeğiştirme,

E_1 ve E_2, birinci ve ikinci eğimler,

f_o, gerilme ekseniyle, ikinci eğimin kesiştiği plastik gerilme başlangıç noktası.

n, eğride geçiş bölgesini belirleyen eğri-şekil parametresidir.



Şekil 4.11 Samaan, Mirmiran ve Shahawy sargı modeli, (1998)

Sargılı beton dayanımı, f'_{cc}:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1\sigma_3 \tag{4.65}$$

f'_c, sargısız beton basınç dayanımı, f_r, sargı basıncıdır. k_1, sargı basıncına bağlı etkililik katsayısı:

$$k_1 = 6.0 f_r^{-0.3} \tag{4.66}$$

dır.

Normalde pasif olan FRP sargı etkisi sargısız betonun f'_c, gerilmesine ulaşmasıyla aktif hale geçer. Bu nedenle eğrinin ilk eğimi E_1, yalnızca beton özelliğine bağlıdır. E_1 değeri için Ahmad ve Shah (1982) önerdikleri denklem kullanılmıştır:

$$E_1 = 3.950\sqrt{f'_c} \tag{4.67}$$

Eğrinin ikinci eğimi, E_2, sargı malzemesinin rijitliğine ve kısmen sargısız beton çekirdeğinin genişlemesine bağlıdır.

$$E_2 = 245.61 f'^{0.2}_c + 1.3456 \frac{E_j t_j}{D} \tag{4.68}$$

E_j, sargı yönü doğrultusunda etkili elastisite modülü, t_j, kompozit malzeme sargı kalınlığı, D, kolon çapıdır.

Sargılı beton ve sargısız beton basınç dayanımına bağlı, ikinci eğim eğrisinin ekseni kestiği nokta gerilmesi f_0:

$$f_0 = 0.872 f'_c + 0.371 f_r + 6.258 \tag{4.69}$$

Maksimum birim şekil değiştirme davranışı ε_{cu}, bilineer eğrinin geometrisinden:

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cu} - f_o}{E_2} \tag{4.70}$$

şeklinde bulunur. Eğri-şekil parametresi n, model için çok hasas bir değer değildir ve 1.5 sabit sayısal değeri alınabilir.

Eksenel gerilme-birim şekil değiştirme modeli, aynı zamanda betondaki genişlemeye de bağlı olarak:

$$f_c = \frac{(E_{1r} - E_{2r})\varepsilon_r}{\left[1 + \left(\frac{(E_{1r} - E_{2r})\varepsilon_r}{f_{or}}\right)^{n_r}\right]^{\frac{1}{n^r}}} + E_{2r}\varepsilon_r \tag{4.71}$$

ile ifade edilir.

Gerilme şekildeğiştirme eğrisinde ilk eğim, E_{1r}, Ahmad, (1981)'in sunduğu bağıntıdan:

$$E_{1r} = \frac{E_1}{\nu} \tag{4.72}$$

bulunabilir. ν, betonda poisson oranı 0.15 ila 0.22 arasında değişiklik gösterir (Chen, 1982). Gerilme şekil değiştirme eğrisinde ikinci eğim E_{2r} ise, yanal şekil değiştirme genişlemesine bağlı olarak, aşağıdaki bağıntıyla:

$$E_{2r} = \frac{E_2}{\mu_u} \tag{4.73}$$

şeklinde bulunur:

$$\mu_u = -0.187 Ln\left(\frac{2E_j t_j}{f'_c D}\right) + 0.881 \tag{4.74}$$

$$n_r = \frac{n}{\mu_u} \tag{4.75}$$

$$f_{or} = 0.636 f'_c + 0.233 f_r + 4.561 \tag{4.76}$$

$$f_r = \frac{2 f_j t_j}{D} \tag{4.77}$$

$$\varepsilon_{ru} = \frac{f'_{cu} - f_{or}}{E_{2r}} \tag{4.78}$$

$$\mu_u = -0.187 \ln\left(\frac{2E_j t_j}{f'_c D}\right) + 0.881 \tag{4.79}$$

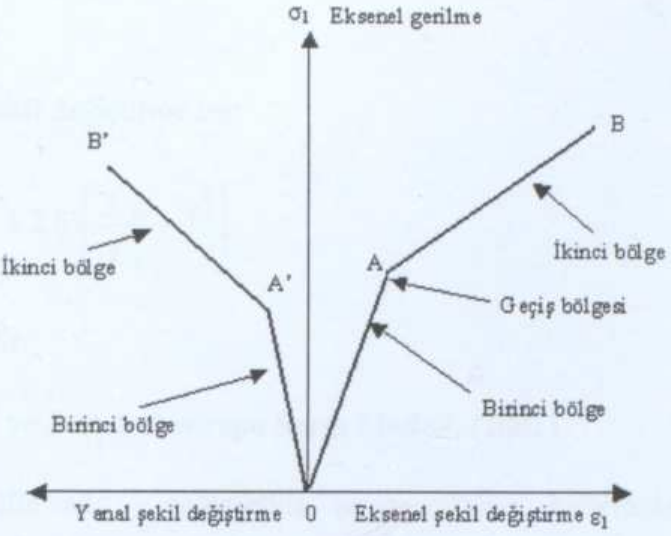
Analitik model, FRP kompozit sargılı kolonlarla yapılmış (Mirmiran, 1996, Picher, 1995, Nanni ve Bradford, 1995, Mastrapa, 1997) deneyler ile karşılaştırıldığında iyi bir korelasyon elde edilmiştir.

4.3.3 Saafi, Toutanji ve Li Sargı Modeli (1999)

Deneysel sonuçlar neticesinde, sargılı beton dayanımını hesaplayabilmek için çoğu araştırmacı Richart (1928)'ın öne sürdüğü bağıntıyı kullanmaktadırlar:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_l \tag{4.80}$$

Bu bağıntı, sargılı betonda dayanımı bulabilmek içindir. Ancak bu bağıntı, gerilme şekil değiştirme eğrisinde, her şekil değiştirme için, eksenel basınç dayanımını gösterememektedir.



Şekil 4.12 FRP sargılı beton için gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

FRP tüp sargılı numune için, gerilme şekil değiştirme davranışı şekil 4.12 görüldüğü gibidir. Sağ kısımdaki gerilme şekildeğiştirme eğrisi eksenel doğrultuya aittir. Sol kısımdaki eğri ise, sargı yanal genişlemesine ait gerilme şekildeğiştirme eğrisidir. Etkili sargı katsayısı k_1, sargı basıncına bağlı bir değişkendir.

$$k_1 = 2.2\left(\frac{\sigma_3}{f'_c}\right)^{-0.16} \tag{4.81}$$

4.79, 4.80'de yerine konulursa, ikinci bölgede her bir noktada basınç gerilmesi bulunur:

$$\sigma_3 = \frac{2t_{com}E_{com}\varepsilon_l}{d} \tag{4.82}$$

$$f(\varepsilon_l) = f'_c\left(1 + 2.2\left(\frac{\sigma_3}{f'_c}\right)^{0.84}\right) \tag{4.83}$$

$$f'_{cc} = f'_c\left(1 + 2.2\left(\frac{2tf_{com}}{df'_c}\right)^{0.84}\right) \tag{4.84}$$

İkinci bölgedeki her bir noktada birim şekil değiştirme:

$$\varepsilon = \varepsilon_{co}\left[1 + k_2\left(\frac{f(\varepsilon_l)}{f'_c} - 1\right)\right] \tag{4.85}$$

bağıntısıyla hesaplanabilir; k_2, etkili sargı katsayısı:

$$k_2 = 537\varepsilon_1 + 2.6 \tag{4.86}$$

Maksimum eksenel şekil değiştirme ise:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left(1 + (537\varepsilon_{com} + 2.6)\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right) \tag{4.87}$$

bağıntısı ile bulunabilir.

4.3.4 Yung C. Wang ve Jose I. Restrepo Sargı Modeli, (2001)

Mevcut sargı modellerinde çoğunlukla sargı etkileri birbirinden bağımsız olarak incelenirken, Yung vd. sargı modelinde, enine donatı sargı etkisi ve FRP sargı etkisi birlikte dikkate almıştır *(dual confinement* effect). Yung, Wang ve Restrepo (2001), yaptıkları çalışmada, FRP sargılı dikdörtgen ve kare kesitli betonarme basınç elemanlarını eksenel yükler altında incelemişlerdir. Deneylerinde 3 adet dikdörtgen ve 3 adet kare kolon numune kullanmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçlardan FRP sargısının boyuna donatıların burkulmalarını önlediğini görmüşler ve bu deneylerden elde ettikleri sonuçları temel alarak bir analitik bir model öne sürmüşlerdir. Betonarme kolon için eksenel kolon yükü P olarak verilmiştir.

$$P = P_c + P_s \tag{4.88}$$

P_c, beton tarafından taşınan eksenel basınç yükü,P_s, kolondaki boyuna donatı tarafından taşınan eksenel basınç yükü,

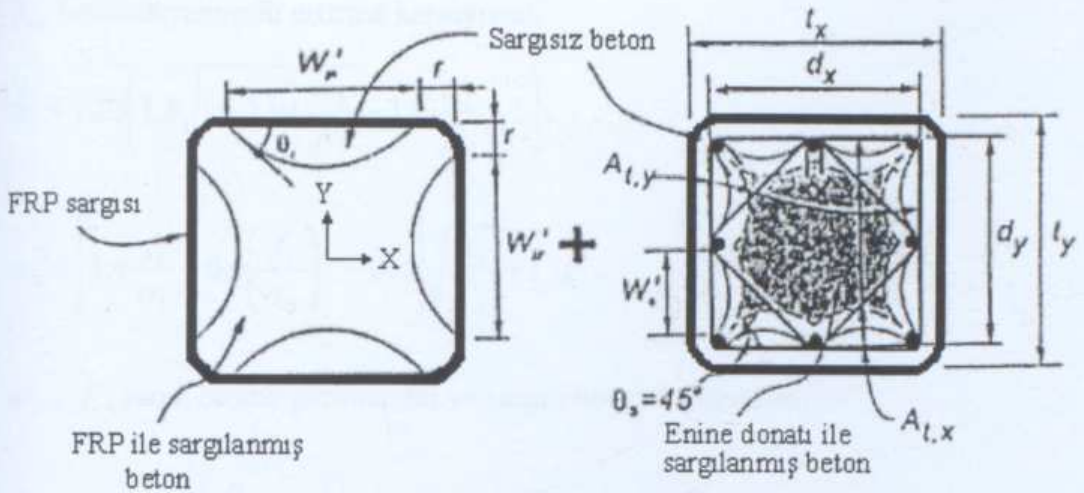
$$P_s = f_s A_s \tag{4.89}$$

şeklinde bulunmaktadır. Bu bağıntıda f_s boyuna donatıdaki basınç gerilmesidir, A_s, boyuna donatının enkesit alanıdır.

$$P_c = P_{co} + P_{cc,j} + P_{cc,js} \tag{4.90}$$

P_{co}, sargısız beton tarafından taşınan eksenel yük, $P_{cc,j}$, FRP sargı ile sarılmış, etkili kolon alanının taşıdığı eksenel basınç yükü, $P_{cc,js}$, FRP sargıya ve etriyeye bağlı olarak betonun taşıyabileceği eksenel basınç yükü olmak üzere (4.90) tekrar aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_c = f_{co}A_{cu} + f_{cc,j}A_{cj} + f_{cc,js}A_{cjs} \tag{4.91}$$



Şekil 4.13 Dörtgen kolonda FRP sargı ve enine donatı ile çift sargı etkisi

$A_{cu} = A_{cc,j} - A_{e,j}$, A_{cu}: sargısız beton enkesit alanını

(4.92)

$A_{cj} = A_{e,j} - A_{e,s}$, A_{cj} :FRP tabakası ile sarılmış etkili beton kesit alanını (4.93)

$A_{cjs} = A_{e,s}$, A_{cjs} hem FRP tabakası ile hem enine donatı ile sarılmış etkili beton kesit alanını

(4.94)

$A_{ccj} = t_x t_y - A_s - (4r^2 - \pi r^2)$, A_{ccj}: FRP tabakası ile sarılmış beton çekirdeği alanını

(4.95)

$$A_{e,j} = t_x t_y - \frac{w'^2_{jx} + w'^2_{jy}}{3} \tan\theta_j - A_s - (4r^2 - \pi r^2), \tag{4.96}$$

$A_{e,j}$, FRP kompozit ile sarılmış etkili beton kesit alanını,

$$A_{e,s} = \left(d_x d_y - \sum \frac{w'^2_s}{6} \right) \left(1 - 0.5 \frac{s'}{d_x} \right) \left(1 - 0.5 \frac{s'}{d_y} \right), \tag{4.97}$$

$A_{e,s}$, enine donatı ile sarılmış etkili beton kesit alanını,

$$f'_{cc} = k_c f'_c, \tag{4.98}$$

f'_{cc}, sargılı beton basınç dayanımını,

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 \tag{4.99}$$

k_c, beton dayanımını artırma katsayısını,

$$\alpha_1 = 1.25\left(1.8\sqrt{1+7.94\frac{\sigma_3}{f'_c}} - 1.6\frac{\sigma_3}{f'_c} - 1\right), \tag{4.100}$$

$$\alpha_2 = \left[1.4\frac{f_l}{\sigma_3} - 0.6\left(\frac{f_l}{\sigma_3}\right)^2 - 0.8\right]\sqrt{\frac{\sigma_3}{f'_c}} + 1 \ , \tag{4.101}$$

σ_3 , f_l, yanal basınç gerilmesini ve sargılı beton dayanımını

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1 + R\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right] \tag{4.102}$$

gösterir.

4.3.5 Lam ve Teng Sargı Modeli (2003)

Lam ve Teng'in FRP sargılı beton modeli, çok sayıda deney verilerin değerlendirmesini dikkate alır. Model aşağıdaki kabullere dayanır:

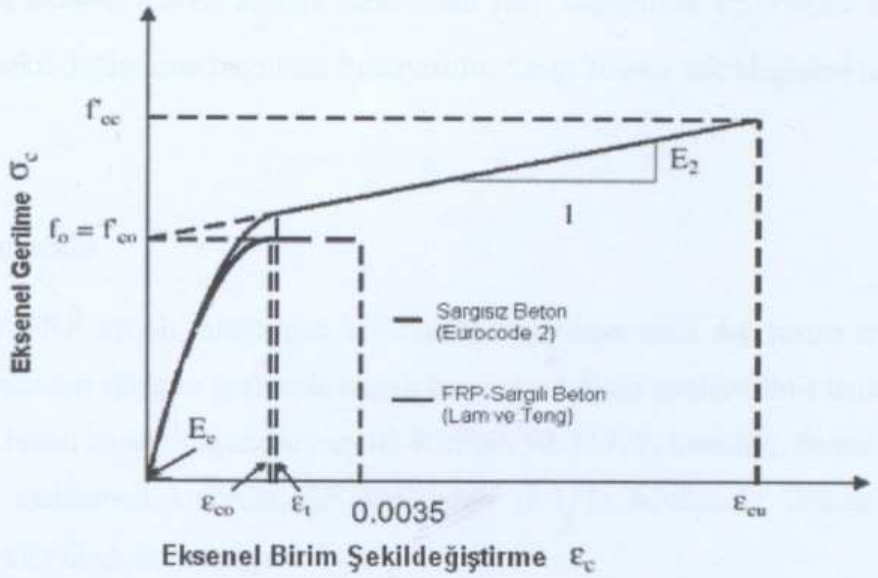
i) Gerilme-yerdeğiştirme eğrisindeki parabol ve doğrusal çizgi, Şekil 4.14'de verildiği gibidir;

ii) Parabolün ilk eğimi, sargısız betonun elastisite modülüyle aynı değeri taşır;

iii) İlk bölümdeki doğrusal olmayan kısım FRP sargı etkisinden ileri gelir;

iv) Parabolik olan ilk kısım, doğrusal olan ikinci kısımla teğet birleşir (bir başka deyişle, iki kısmın birleştiği yerdeki eğimler pratik olarak aynıdır;

v) Doğrusal olan ikinci kısım, sargılı betonun ulaştığı maksimum şekil değiştirme ε_{cu} ve dayanım kapasitesi f'_{cc} ile sona erer. Bu kabullere göre yapılan FRP sargı modeli Şekil 4.14'de açıklanmıştır.



Şekil 4.14 FRP sargılı betonda Lam ve Teng Modeli

Sonuç olarak, Lam ve Teng gerilme-birim şekildeğiştirme modelinde gerilme;

$$\sigma_c = \begin{pmatrix} E_c\varepsilon_c - \dfrac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}}\varepsilon_c^2 \\ f'_{co} + E_2\varepsilon_c \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} (0 \le \varepsilon_c \le \varepsilon_t) \\ (\varepsilon_t \le \varepsilon_c \le \varepsilon_{cu}) \end{matrix} \tag{4.103}$$

E_c, sargısız betonda elastisite modülü, ε_t, geçiş noktasında eksenel şekil değiştirme, E_2, ikinci kısımdaki doğrunun eğimidir.

$$\varepsilon_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \tag{4.104}$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{cu}} \tag{4.105}$$

Bu modelde, basınç dayanımı,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + k_1\frac{\sigma'_3}{f'_c} \tag{4.106}$$

denklemiyle bulunmaktadır. Sargılı betonda eksenel şekil değiştirme, aşağıdaki bağıntıyla verilmiştir;

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + k_2\frac{\sigma_3}{f'_c}\left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}\right)^{0.45} \tag{4.107}$$

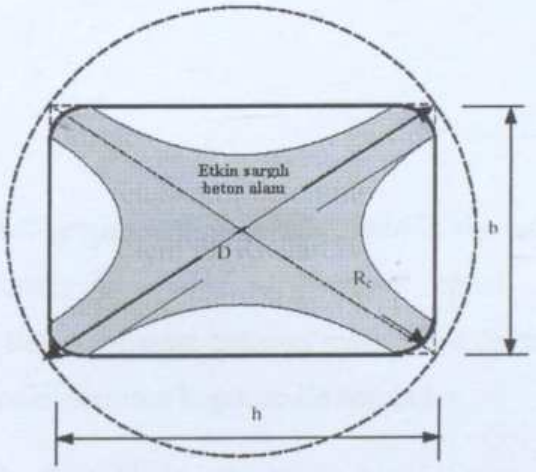
Sargısız betonda eksenel kuvvet altında maksimum şekil değiştirme $\varepsilon_{co} = 0.002$ olarak kabul edilmiştir. k_2, şekil değiştirme büyültme katsayısıdır. Sargı kopma şekildeğişimi ise;

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \tag{4.108}$$

bağıntısıyla bulunabilir.

Lam ve Teng'in FRP sargılı dikdörtgen kolonlar için gerilme şekil değiştirme modeli, daha önce sunmuş oldukları düzgün gerilmeli sargılı beton modelinin genişletilmiş halidir. Lam ve Teng'in, sargılı beton basınç dayanımı için ilk Richart, vd. (1929) önerdiği, Samaan'ın (1998) FRP kompozit malzemeli kolonlar için kullandığı (3.1)'in benzeridir. Ancak, kesit etki katsayısı k_{s1} farklı olarak sunulmuştur:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + k_1 k_{s1} \frac{\sigma_3}{f'_c} \tag{4.109}$$



Şekil 4.15 FRP Sargılı dikdörtgen kesit için etkili sargılanmış beton alanı

Eksenel şekil değiştirme değerinin bulunmasında ise, farklı bir kesit etki katsayısı, k_{s2}, kullanılmaktadır. Dikdörtgen kesitli kolonlarda, etkili sargılanmış beton alanı için kolon enkesiti düşünüldüğünde, boyuna donatı aralarında yaklaşık bir parobol oluşacak şekilde kemer olduğu, sonlu elemanlar yöntemiyle kanıtlanmıştır. Varolan tüm sargı modellerinde, etkili sargılı beton enkesit alanı, şekilde de görüldüğü üzere; köşelerden 45° lik açıyla parabol yaptığı görülür. Ancak bu açı değeri, dikdörtgen kesitli kolonlar için geçersizdir. Açı eğimi ancak kare kesitlerde "1" değerini alırken, dikdörtgen kesitlerde farklıdır. Bu yüzden, etkili sargılı beton enkesit oranı için, A_e / A_c ;

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1-((b/h)(h-2R_c)^2 + (h/b)(b-2R_c)^2/(3A_g)) - \rho_{sc}}{1-\rho_{sc}} \tag{4.110}$$

bağıntısını sunmuşlardır.

Bu araştırmalardaki deney numunelerinde, boyuna doğrultuda çelik donatı kullanılmış, sargı etkisi yalnızca FRP sarılarak oluşturulmuştur.

4.3.6 Xiao ve Wu Sargı Modeli (2000)

Deneysel parametreler, beton basınç dayanımı ve kompozit sargı kalınlığından oluşmaktadır. 152 mm çapında, 305 mm yüksekliğinde toplam 36 beton silindir üretilmiş ve eksenel basınç altında test edilmiştir. Düşük, orta ve yüksek dayanımda üç ayrı kalite beton kullanılmıştır. Beton malzemesinin özellikleri yanında, sargı uygulanmış betona etki eden iki faktörün daha; sargı modülü C_j, sargı dayanımı f_{ru} kullanılmıştır.

$$C_j = \frac{2t}{D} E_j \tag{4.111}$$

$$f_{ru} = \frac{2t}{D} f_{ju} \tag{4.112}$$

Deneysel sonuçlardan, eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme davranışının yaklaşık bilineer olduğu görülmüştür. Eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, önce sargısız beton davranışındaki gibi doğrusal ilerler, sargısız betonun maksimum dayanıma ulaşmasıyla eğride yumuşama olur ve FRP kompozit sargının kopması ile son bulur.

Sargılanmış beton mekanik özelliklerinden, basit bir bilineer eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme modeli sunulmuştur:

$$f_{cz} = E_c \varepsilon_{cz} + 2\nu_c f_r \tag{4.113}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\nu_c}{1 + \frac{c_j}{E_c}(1-\nu_c-2\nu_c^2)^2} \varepsilon_{cz} \tag{4.114}$$

$$f_r = C_j \varepsilon_r \tag{4.115}$$

$$E_c = 4733\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \tag{4.116}$$

ν_c, beton poisson oranı, 0.18 alınmıştır.

ε_r, betonda, çap doğrultusunda yanal birim şekil değiştirme,

f_r, sargı mukavemeti.

$$f_{cz} = \alpha f'_c + k f_r \tag{4.117}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_{ro} + \nu'_c \varepsilon_{cz} \tag{4.118}$$

α, deneysel değerlerden elde edilen sonuçlara göre 1.1 alınmaktadır.

k, son bölgedeki doğrusal çizgi eğimidir. Temelde regresyon analizi esas alınarak:

$$k = 4.1 - 0.75\frac{f'^2_c}{C_j} \tag{4.119}$$

$$\nu'_c = 7\left(\frac{f'_c}{C_j}\right)^{0.8} \tag{4.120}$$

bulunmuştur.

Bu modelde etkili sargı katsayısı, sargı modülü parametreleri ile FRP kompozit sargı dayanımı belirlenir. Sargılı betonda, beton dayanımı gibi malzeme özelliklerinin yanında, sargı modülü C_j, hesaplamalarda başta gelen parametredir. Sargılı betonda basınç dayanımı, FRP kompozit malzmesinin kopma şekildeğiştirme noktasına ulaşıncaya dek artar ve en yüksek dayanım kapasitesine ulaşır.

4.3.7 Köksal Modeli (2006) ve Köksal Modelinin LP Sargılı Betonarme Kolonlara Uygulanması

Bu çalışmada çelik sargılı betonarme kolonlar için önerilen Köksal Modeli (2006), KLP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

Gerçekte, sargılanmış betonun davranışı çok karmaşık ve bir çok faktöre bağlıdır. Çok eksenli gerilmeler altında beton dayanımı; çekme, basınç ve kesme gerilmelerinin birbirinden bağımsız olarak dikkate alınması ile ifade edilemez.

Betonda kırılma yükü, elemanın ya da deney numunesinin yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanır. Beton için önerilen kırılma kriterlerinde, akma, kırılma başlangıcı, yük taşıma

kapasitesi ve en büyük birim şekildeğiştirmeler dikkate alınmaktadır.

Betonarme kolonda enine donatı; eksenel basıç yükü altında yanal sargı etkisi oluşturur ve üç eksenli basınç gerilmeleri altında elemanın dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini artırır.

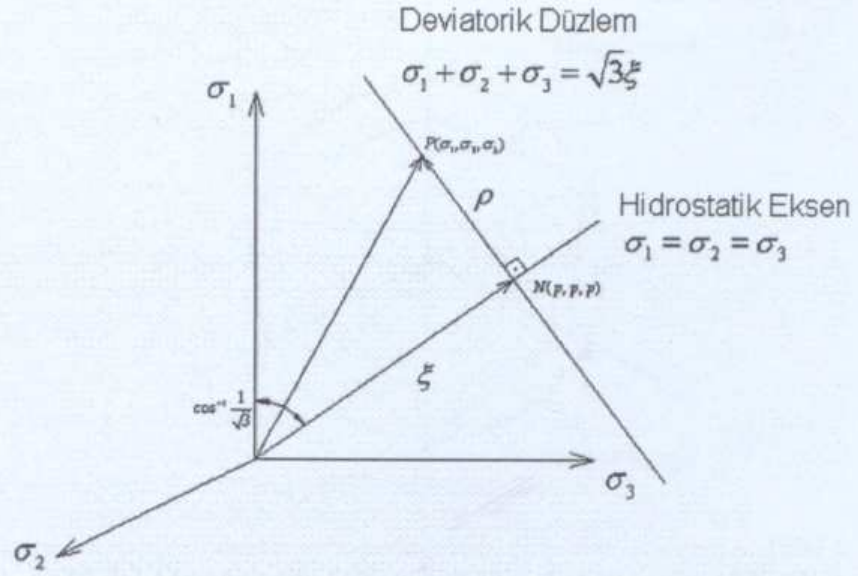
Sargılanmış betonarme eleman davranış modellerinde; bir boyutlu çubuk eleman için çubuk eksenine dik etkiyen yanal genişlemeyi engelleyen sargı tarafından oluşturulan basınç gerilmeleri dikkate alınır. Mander modeli (1988), taşıma gücü değerini belirliyebilmek için Haigh-Westergaard gerilme uzayında üç asal gerilme koordinatını alan William and Warnke (1975)'nin "eliptik kırılma fonksiyonu"nu kullanır (Şekil 4.16). William-Warnke (1975) tarafından geliştirilen beş parametreli model, eksenel olmayan basınç, eksenel olmayan çekme, eşit iki eksenli basınç ve çekme ile basınç meridyeni üzerindeki iki yüksek basınç gerilme noktalarının koordinatlarının bilinmesini gerektirir. Bu beş parametreden sadece basınç dayanımı deneysel olarak nispeten kolayca elde edilebilir. Eksenel çekme dayanımı için bile hassas deneyler yapılması gerekmektedir (Philips, 1993).

Beton için geliştirilen en karmaşık ve en fazla sayıda parametreye ihtiyaç duyan modelde betonun çekme ve basınç meridyenleri ikinci dereceden bir bağıntı ile ifade edilmektedir; bu parabol bağıntılar:

$$\sigma_m = a_0 + a_1 \rho_t + a_2 \rho_t^2 \tag{4.121}$$

$$\sigma_m = b_0 + b_1 \rho_c + b_2 \rho_c^2 \tag{4.122}$$

şeklindedir. Bu bağıntılarda $\sigma_m = \frac{I_1}{3}$ ortalama gerilme değerini, ρ_t ve ρ_c ise $\theta = 0°$ ile $\theta = 90°$'de hidrostatik eksene dik olarak bulunan deviatorik gerilmeleri göstermektedir. a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 ve b_2 malzeme sabitleridir. İki meridyen hidrostatik eksen üzerinde aynı noktada kesiştikleri için $a_0 = b_0$ alınabilir. Diğer beş parametre tek eksenli çekme, tek eksenli basınç, iki eksenli basınç, sargılanmış iki eksenli basınç ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) ve ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) deneyleri ile bulunabilir. Bu ise modelin uygulanabilirliğini güçleştirmektedir.



Şekil 4.16 Haigh-Westergaard asal gerilme uzayı

Çoğu model sayısal olarak karmaşık ve ihtiyaç duydukları malzeme parametreleri açısından gerçekçi değildir.

Gerilme kriterinin en pratik matematiksel formu; Von Mises kriterinin basit bir modifikasyonu olarak sunulan, metal ve granüler malzemelere uygulanabilen, en yüksek dayanımda hem hidrostatik basınç, hem deviatorik gerilme etkilerini dikkate alan Drucker Prager kriteridir.

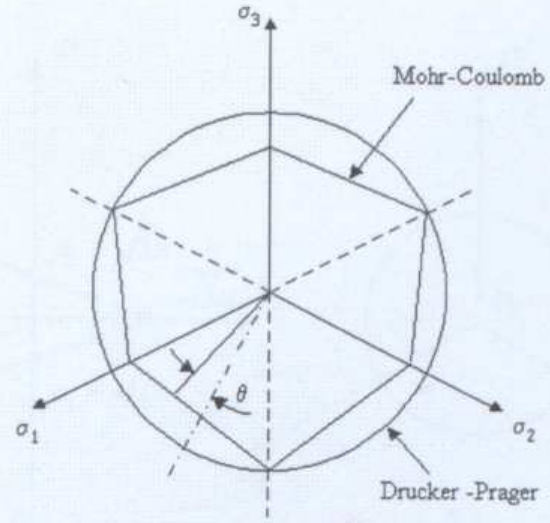
Drucker-Prager kriteri (1952), gerilmeyi temel alan bir hipotezdir ve Von Mises kriterinin basitleştirilmiş genel formu olduğu söylenebilir:

$$f(I_1,J_2)=\alpha I_1+\sqrt{J_2}-k=0 \tag{4.123}$$

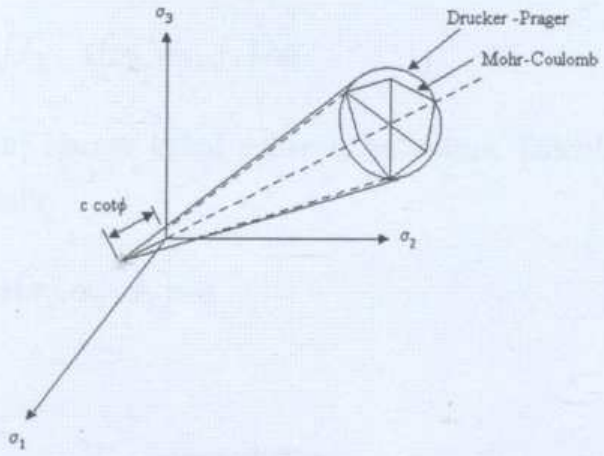
veya ξ,ρ değişkenleri cinsinden,

$$f(\xi,\rho)=\sqrt{6}\alpha\xi+\rho-\sqrt{2}k=0 \tag{4.124}$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada α ve k malzeme sabitleridir. (4.124)'ün gösterdiği akma yüzeyi asal gerilme uzayında bir dairesel konidir (Şekil 4.17 ve Şekil 4.20); meridyenleri ve π -düzlemindeki kesiti Şekil 4.19'da görülmektedir.

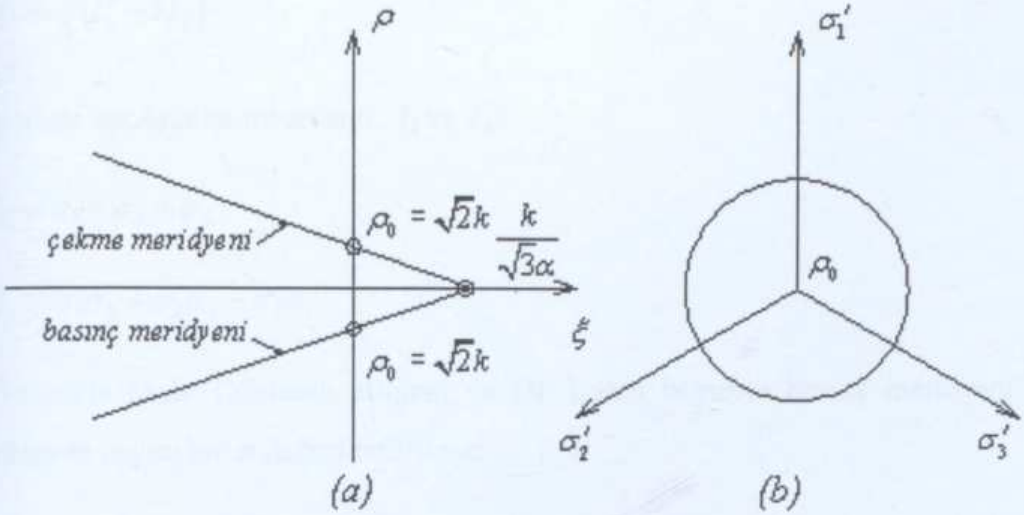


Şekil 4.17 Deviatorik düzlemde basınç durumu akma kriterleri



Şekil 4.18 Asal gerilmeler uzayında basınç durumu için akma kriterleri

Önceki çalışmalarda Drucker Prager kriteri (Karakoç and Köksal 1997, Polat vd., 2000, Köksal vd., 2003, Köksal vd., 2004, Doran 2004), yalın beton numunelere, betonarme kirişlere, yığma duvarlara, perdelere ve kolonlara başarılı bir şekilde tatbik edilmiştir. Hidrostatik basınç ve deviatorik gerilme etkilerini dikkate alan Drucker Prager kriteri, doğrusal olmayan beton davranışında gerçeğe yakın sonuç elde edilebilmesi için α ve k malzeme parametreleri Köksal Modeli (2006)'inde asal gerilmelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmişlerdir.

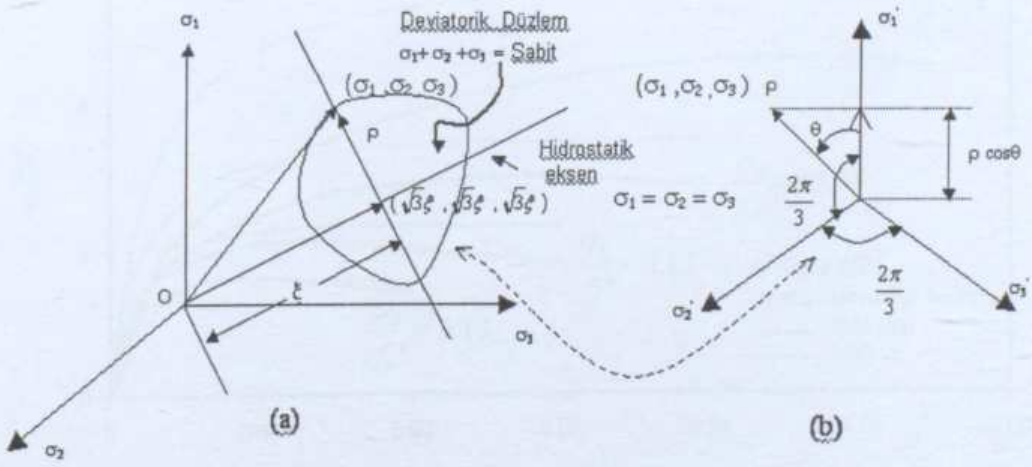


Şekil 4.19 Drucker-Prager kriteri: (a) Meridyenler (θ=0°), (b) π-düzlemi (Chen ve Han, 1988)

$$f = \alpha(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)I_1 + \sqrt{J_2} - k(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3) = 0 \tag{4.125}$$

Basınç gerilmeleri pozitif işaretli kabul edilerek, betonarme kolonlar için, kırılma yüzeyi farklı bir şekilde önerilebilir:

$$f = \sqrt{6}\,\alpha(\xi)\xi + \rho - \sqrt{2}\,k(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3) = 0 \tag{4.126}$$



Şekil 4.20 (a) Haigh-Westergaard gerilme uzayı, (b) gerilme durumu noktasının deviatorik düzlemde izdüşümü (Chen ve Han 1988).

Burada, $\rho(=\sqrt{2J_2})$ ve $\xi(=\frac{I_1}{\sqrt{3}})$; sırasıyla şekil 4.20'de görüldüğü üzere deviatorik ve hidrostatik uzunluktur. Burada gerilme deviyatörü tansörünün invaryantı, J_2 :

$$J_2 = \frac{1}{3}\left(I_1^2 - 3I_2\right) \tag{4.127}$$

gerilme tansörünün invaryantı, I_1 ve I_2:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{4.128}$$

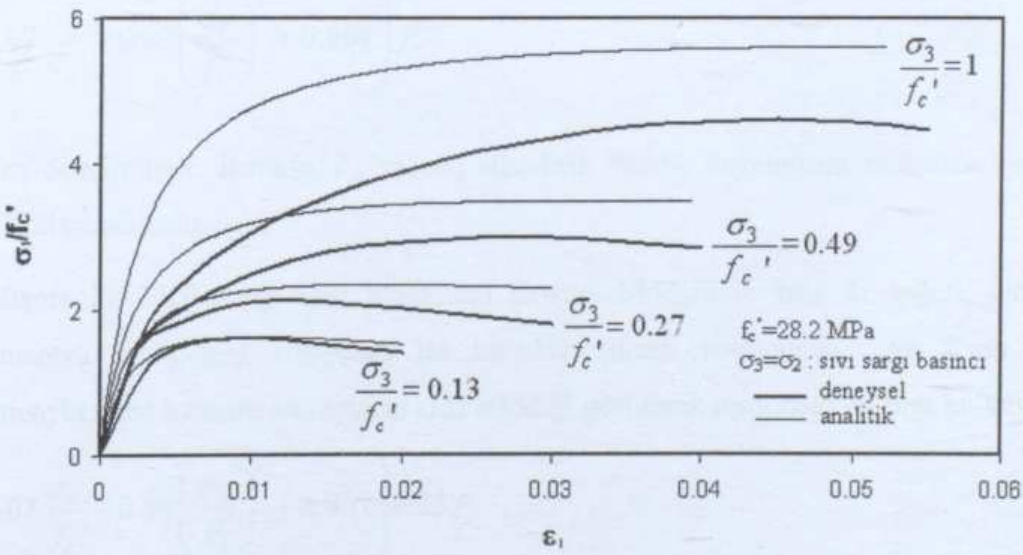
$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \tag{4.129}$$

Öncelikle Mohr Coulomb altıgeni ve DP konisi boyunca basınç meridyeni $\theta = 60^\circ$ için yüzeyde uygun bir α değeri belirlenir:

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}\left(3 - \sin\phi\right)} \tag{4.130}$$

$$k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}\left(3 - \sin\phi\right)} \tag{4.131}$$

İçsel sürtünme açısı, ϕ, ortalama olarak 30° alınırsa (Lubliner vd,. 1989, Karakoç ve Köksal 1997, Polat vd., 2001) α, 0.23. olarak bulunur. α, sabit değerini belirledikten sonra, Richart vd., (1928) deney sonuçları kullanılarak, Şekil 4.21'de görüldüğü



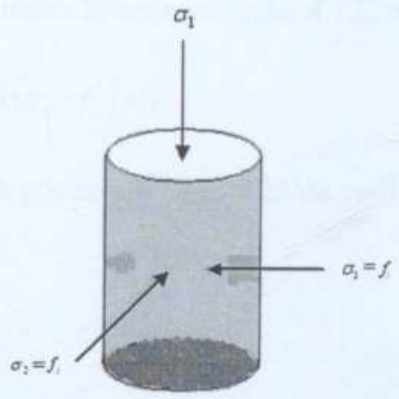
Şekil 4.21 Üç eksenli testler için eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Köksal, 2006)

üzere, k ,yanal sargı basıncı fonksiyonuna ve f'_c, silindir basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanır:

$$k = k\left(\sigma_{lt}, f_c^{'}\right) \tag{4.132}$$

σ_{lt}, eleman eksenine, iki ortogonal yönde etki eden, iki gerilmenin ortalamasıdır.

$$\sigma_{lt} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \qquad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \tag{4.133}$$



Şekil 4.22 Üç eksenli basınç gerilmesine maruz beton silindir

Köksal Modelinde, Richart vd., (1928) üç eksenli basınç dayanımı deney sonuçlarından hareketle betonarme kolonlar da k, değeri için

$$k = \left(4.07\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}} - 0.89\left(\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}}\right)^2 + 0.807\right) f_c^{'} \tag{4.134}$$

bağıntısı önerilmiştir. Burada k, sadece silindirik basınç dayanımını malzeme parametresi olarak kullanmaktadır.

Bu çalışma ile FRP sargı için uyarlanan Köksal Modelinde ise; k değeri, yirmi farklı araştırmacıya ait deney sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda ve k'nın ***0.85*** ile çarpılmısıyla daha uyumlu sonuçların elde edildiği görülerek aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$k = \left(4.07\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}} - 0.89\left(\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}}\right)^2 + 0.807\right) 0.85 f_c^{'} \tag{4.135}$$

Hidrostatik uzunluk cinsinden malzeme parametresi α ise

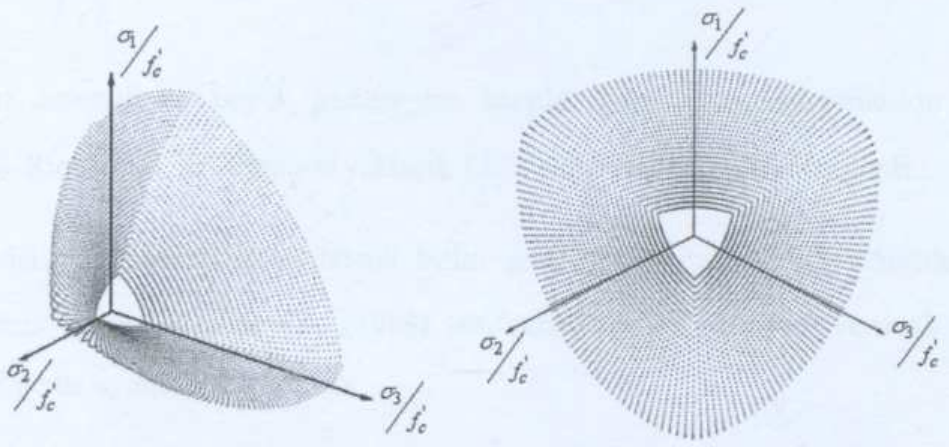
$$\alpha = \alpha(\xi) = 0.462\,\xi^{-0.2355} \qquad \frac{\xi}{f_c^{'}} \geq 0.58 \tag{4.136}$$

şeklinde, sabit 0.23 değeri yerine daha hassas bir bağıntı ile elde edilmektedir.

Deneyler esnasında en yüksek hidrostatik basıncın 20 MPa ve 60 MPa arasında olduğu gerçekleştiği görülmüştür. Basınç altında sargılı beton dayanımı, $\frac{\xi}{f_c'} \geq 0.58$, değeri ile makul bir üst değer oluşturmakla beraber, ortalama basınç gerilmesi, $3\sigma_m = \sqrt{3}\,\xi = f_c'$ dir. Bir önceki sabit değer α için kabul edilen 0.23 değeri, hidrostatik basıncı 20 MPa'dan büyük değerler için uygun olmaktadır. Sunulan kriterin son şekli 4.122'den elde edilmiştir:

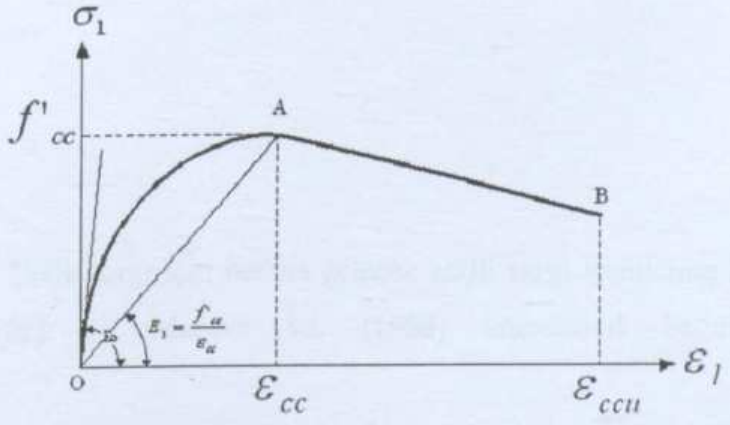
$$f = 1.132\,\xi^{0.7645} + \rho - \sqrt{2}\,k\left(\sigma_{ll}, f_c'\right) = 0 \qquad (4.137)$$

Sunulan kriterin geometrik gösterimi, Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23 Beton kırılma kriterinin gerilme uzayındaki geometrik gösterimi (Köksal, 2006)

Sargılanmış betonun gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Saenz (1964) tarafından tanımlanan bağıntı temel alınarak tanımlanmıştır:



Şekil 4.24 Sargılı beton için gerilme şekildeğiştirme ilişkisi (Saenz, 1964)

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_l E_0}{1+\left(\frac{E_0}{E_s}-2\right)\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}}+\left(\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \tag{4.138}$$

(4.137)'de $E_0 (= 4750\sqrt{f'_c})$; sargılanmış betonun başlangıç elastiklik modülü, E_s ise; sekant modülüdür, ε_{cc} sargılanmış betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirmedir. Sargılanmış beton dayanımı f'_{cc}'ye karşılık gelen birim şekildeğiştirme ε_{cc} (4.139) ile verilmiştir:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_c\left(1+k_2\frac{\sigma_3}{f'_c}\right) \tag{4.139}$$

ε'_c, sargısız betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen şekildeğiştirmesidir (genelde $\varepsilon'_c = 0.002$). Richart vd. k_2 değerinin yaklaşık $5k_1$'e eşit olduğunu göstermişlerdir.

Köksal Modelin'de betondaki en büyük birim şekil değiştirme ε_{cu} için; Priestley (2000) tarafından önerilen ve Mander vd., (1988) tarafından yapılan deneysel verilerden okunan ε_{cu} değerleri ile de uyumluluk gösteren;

$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + 1.4\frac{\rho_s f_{yh}\varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.140}$$

bağıntısı dikkate alınmıştır (Köksal, 2006).

FRP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modelinde ise beton numuneler için en büyük birim şekildeğiştirme, ε_{ccuFRP}:

$$\varepsilon_{ccuFRP} = 2\varepsilon_{ccu} \tag{4.141}$$

olarak önerilmiştir.

Köksal Modelinde, Çelik sargı için betona gelecek etkili sargı basıncının hesabı için Sheikh ve Uzümeri (1982) ve Mander vd. (1988) önerdikleri bağıntı kullanılmıştır.

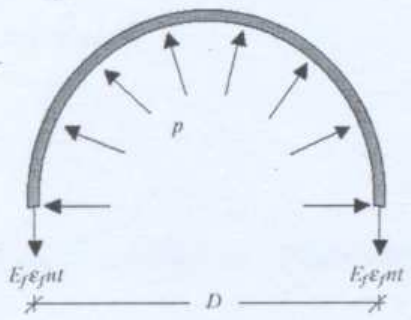
$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i^2}{\alpha_{uc} b_c d_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \tag{4.142}$$

$$\sigma_{l,i} = k_e \rho_i f_{yh} \qquad i = x, y$$
(4.143)

FRP sargılı kolonlara uyarlanan modelde yanal sargı etkisi, sargı donatısı ile FRP sargıdan gelen sargı etkisini beraber dikkate alır.

Yalnızca çelik sargılı kolonlar için önerilen Modelde sargı etkisi: **Sargı donatısı + FRP sargı** olarak uyarlanmıştır. Sargı donatısı Köksal Modelindeki gibi uygulanmış, FRP sargı etkisi ise dörtgen ve dairesel kolonlarda ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Önerilen modelde, LP sargılı dairesel kolonlarda, σ_l, yanal sargı basıncının bulunabilmesi için;



Şekil 4.25 LP kompozit sargıda gerilme

$$\sigma_l = \frac{2E_f \varepsilon_{fu} nt}{D} \tag{4.144}$$

bağıntısı kullanılmıştır. Dörtgen kesitli kolonlarda k_s geometrik kesit katsayısı kullanılmıştır.

$$\sigma_l = k_s \sigma'_l \tag{4.145}$$

σ'_l, LP sargılı dörtgen kolonlar için, eşdeğer dairesel $(=(b+h)/2)$ kolona dönüştürülerek bulunan sargı basıncıdır (Restrepol& De Vino, 1996, Harries vd. 1998, Chaallal& Shahawy, 2000 ve Lam& Teng, 2000). Kesit katsayısı, k_s:

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1-((b/h)(h-2R_c)^2 + (h/b)(b-2R_c)^2/(3A_g)) - \rho_{sc}}{1-\rho_{sc}} \tag{4.146}$$

olarak alınmıştır (Lam& Teng, 2000). FRP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal modeli, literatürde var olan deneyler ile ve kabul görmüş modeller ile karşılaştırılmıştır.

Silindirik basınç dayanımını malzeme parametresi olarak kullanılan Köksal modelinde, malzeme parametresi k'nın 0.85 katsayısı ile çarpılmasıyla, yanal betonarme sargı basıncına ek olarak FRP sargı etkisi ilave edildiğinde ve en büyük birim şekildeğiştirme için; sargılanmış beton dayanımına karşılık gelen birim şekildeğiştirmenin iki katı alınmasıyla, $\varepsilon_{ccu} = 2\varepsilon_{cc}$, FRP sargılı beton veya betonarme numuneler için oldukça uyumlu sonuçların elde edilebildiği görülmüştür.

FRP Sargılı Beton/Betonarme Kolonlar için Uygulanan Köksal Modeli özetlenirse;

FRP sargılı kolonlar için uygulan Köksal Modelin'de, kuşatılmış beton basınç dayanımı, σ_1 için, *Drucker-Prager* kriterinin değiştirilerek daha genel bir hale geliştirilmiş biçimi kullanılmıştır.

$$f = \sqrt{6}\,\alpha(\xi)\xi + \rho - \sqrt{2}\,k(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3) = 0 \tag{4.147}$$

$\rho(=\sqrt{2J_2})$ ve $\xi(=\frac{I_1}{\sqrt{3}})$,

sırasıyla deviatorik ve hidrostatik uzunluktur. Hidrostatik uzunluk cinsinden malzeme parametresi α :

$$\alpha = \alpha(\xi) = 0.462\,\xi^{-0.2355} \qquad \frac{\xi}{f_c'} \geq 0.58 \tag{4.148}$$

Gerilme tansörünün invaryantı, I_1 ve I_2:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{4.149}$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \tag{4.150}$$

Gerilme deviyatör tansörünün ikinci invaryantı:

$$J_2 = \frac{1}{3}\left(I_1^2 - 3I_2\right) \tag{4.151}$$

k,Yanal sargı basıncı fonksiyonuna ve f'_c, silindir basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanmıştır:

$$k = k\left(\sigma_{lt}, f_c^{'}\right) \tag{4.152}$$

σ_{lt}, eleman eksenine, iki ortogonal yönde etki eden iki basınç gerilmenin ortalamasıdır.

$$\sigma_{lt} = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \qquad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \tag{4.153}$$

Silindirik basınç dayanımı malzeme parametresi olarak kullanılan k, yukarıda açıklandığı üzere:

$$k = \left(4.07\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}} - 0.89\left(\frac{\sigma_{lt}}{f_c^{'}}\right)^2 + 0.807\right)0.85 f_c^{'} \tag{4.154}$$

bağıntısıyla dikkate alınmıştır. Yanal sargı basıncı, σ_{lt} , **Sargı donatısı + FRP sargı** etkisini birlikte gözetir.

$$\sigma_{lt} = \frac{2E_f \varepsilon_{fu} nt}{D}, \qquad \sigma_{lt} = k_s \sigma'_l \tag{4.155}$$

Kesit katsayısı, k_s:

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - ((b/h)(h-2R_c)^2 + (h/b)(b-2R_c)^2/(3A_g)) - \rho_{sc}}{1-\rho_{sc}} \tag{4.156}$$

Çelik sargıdan betona gelecek etkili sargı basıncı:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i^2}{\alpha_{uc} b_c d_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right)\left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1-\rho_{cc})} \tag{4.157}$$

$$\sigma_{l,i} = k_e \rho_i f_{yh} \qquad i = x, y \tag{4.158}$$

dır. Gerilme-şekildeğiştirme eğrisi için Saenz Denklemi (1964) modele uyarlanmıştır:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_l E_0}{1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2\right)\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}} + \left(\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{cc}}\right)^2} \tag{4.159}$$

$E_0 (= 4750\sqrt{f'_c})$; sargılanmış betonun başlangıç elastiklik modülü, E_s ise; sekant modülüdür, ε_{cc} sargılanmış betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirmedir. Sargılanmış beton dayanımı f'_{cc}'ye karşılık gelen birim şekildeğiştirme ε_{cc} ile verilmiştir:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_c \left(1 + k_2 \frac{\sigma_3}{f'_c}\right) \tag{4.160}$$

$$\varepsilon'_c = 0.002 \tag{4.161}$$

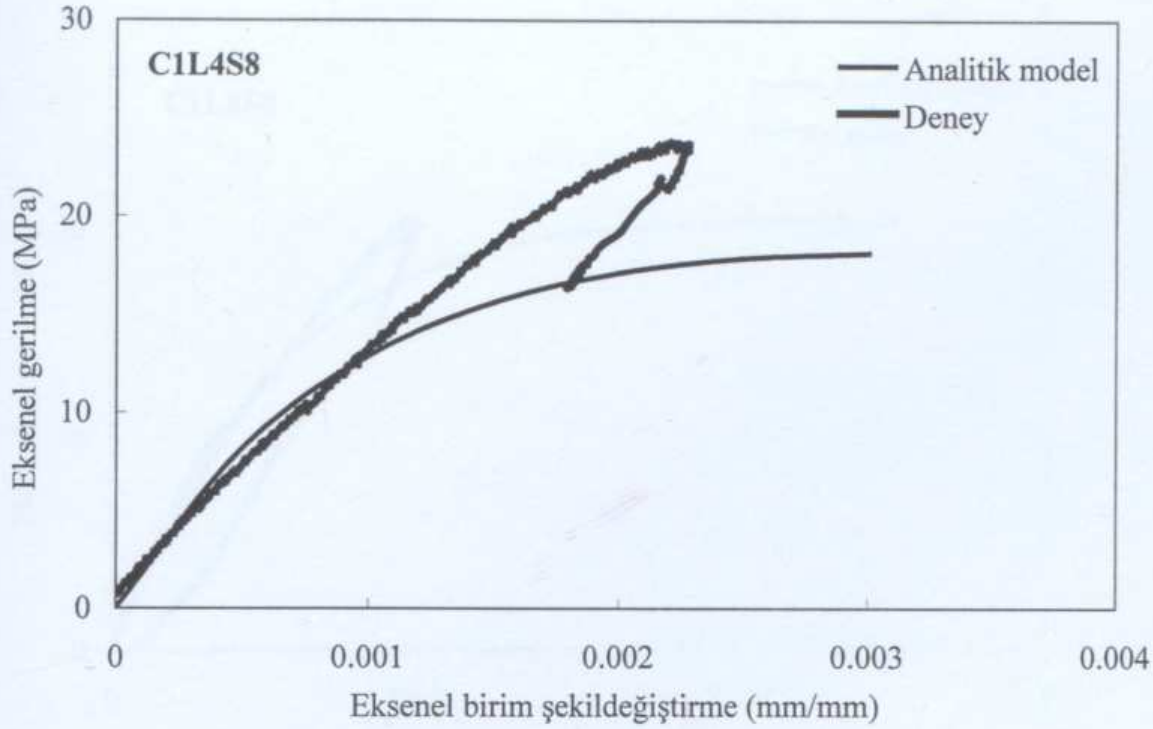
$$k_2 = 5\, k_1 \tag{4.162}$$

FRP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modelinde ise beton numuneler için en büyük birim şekildeğiştirme, ε_{ccuFRP} :

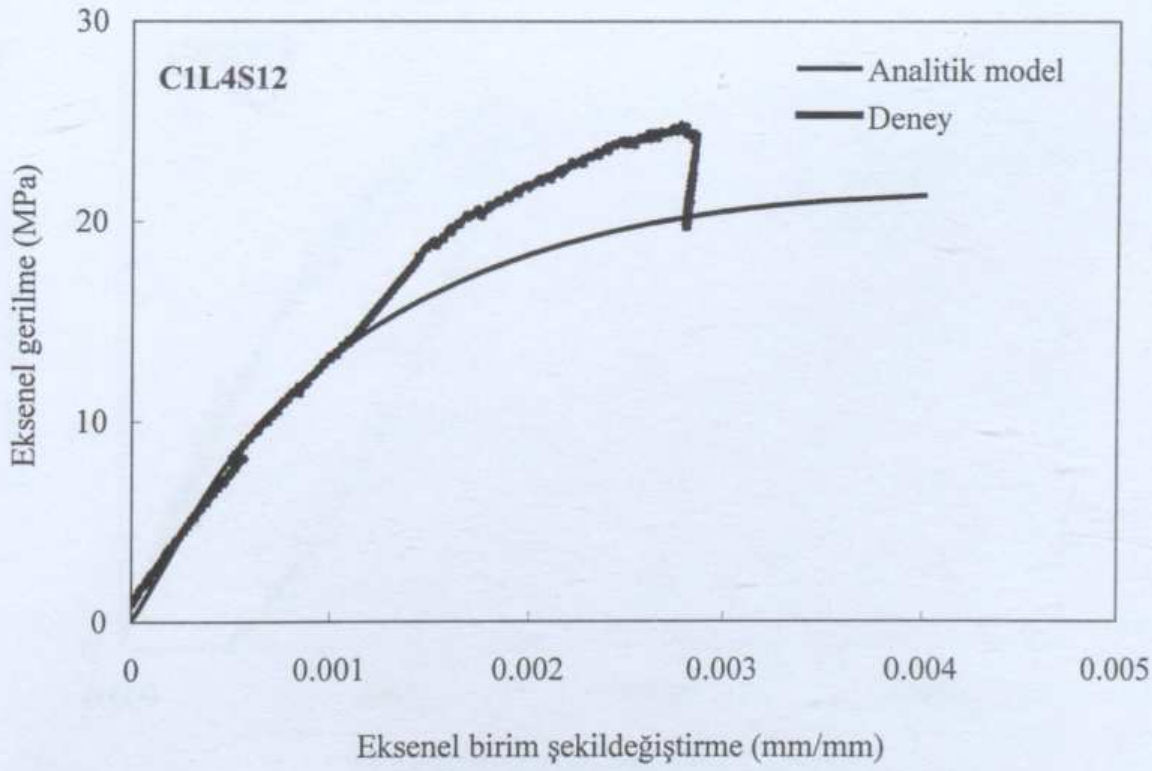
$$\varepsilon_{ccu} = 0.004 + 1.4 \frac{\rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \tag{4.163}$$

$$\varepsilon_{ccuFRP} = 2\varepsilon_{ccu} \tag{4.164}$$

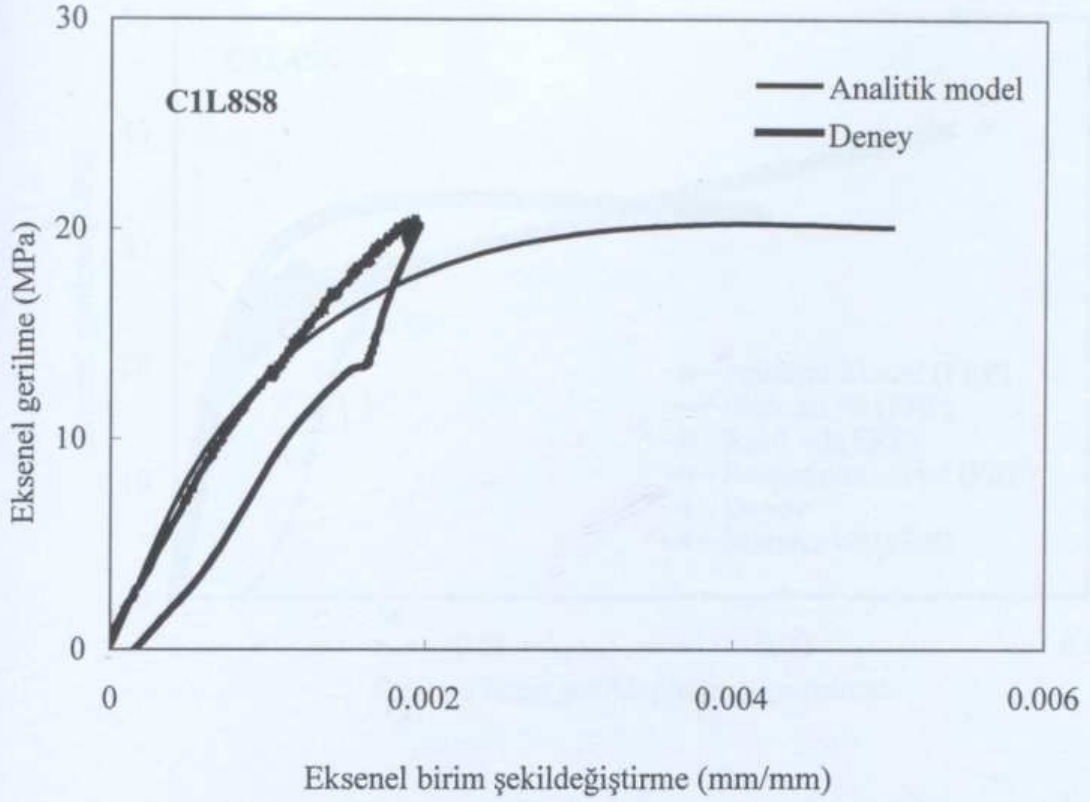
olarak hesaplanmıştır.



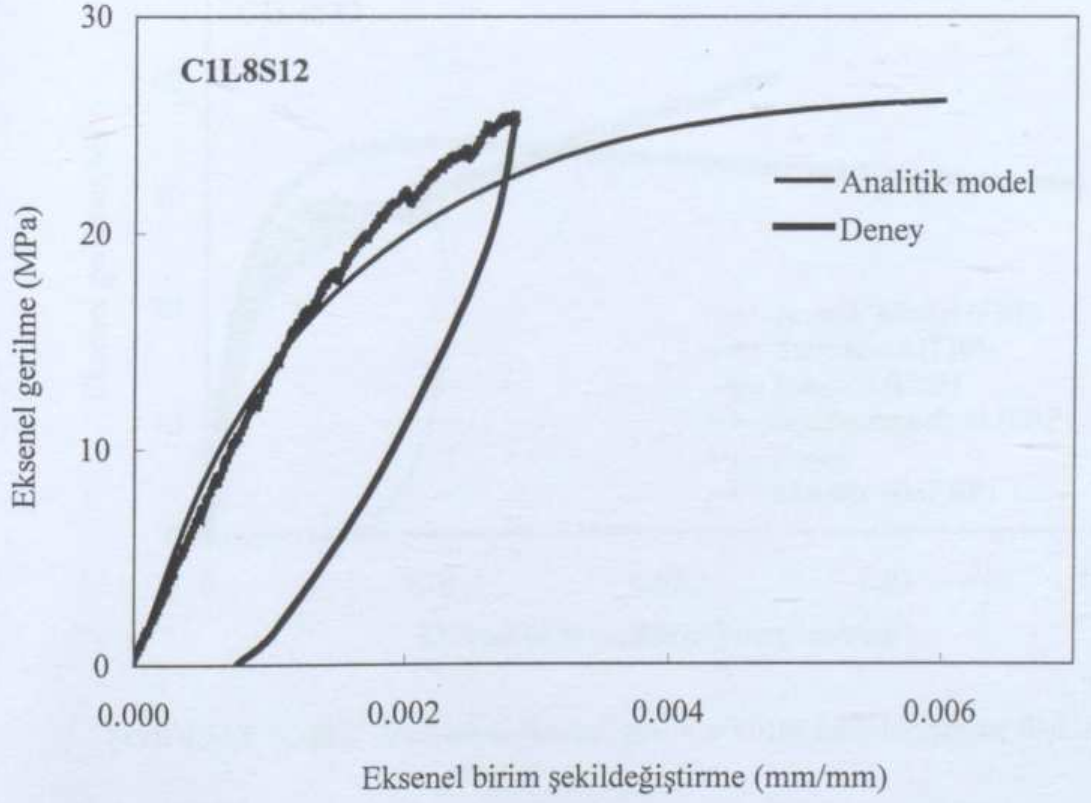
Şekil 4.26 C1L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



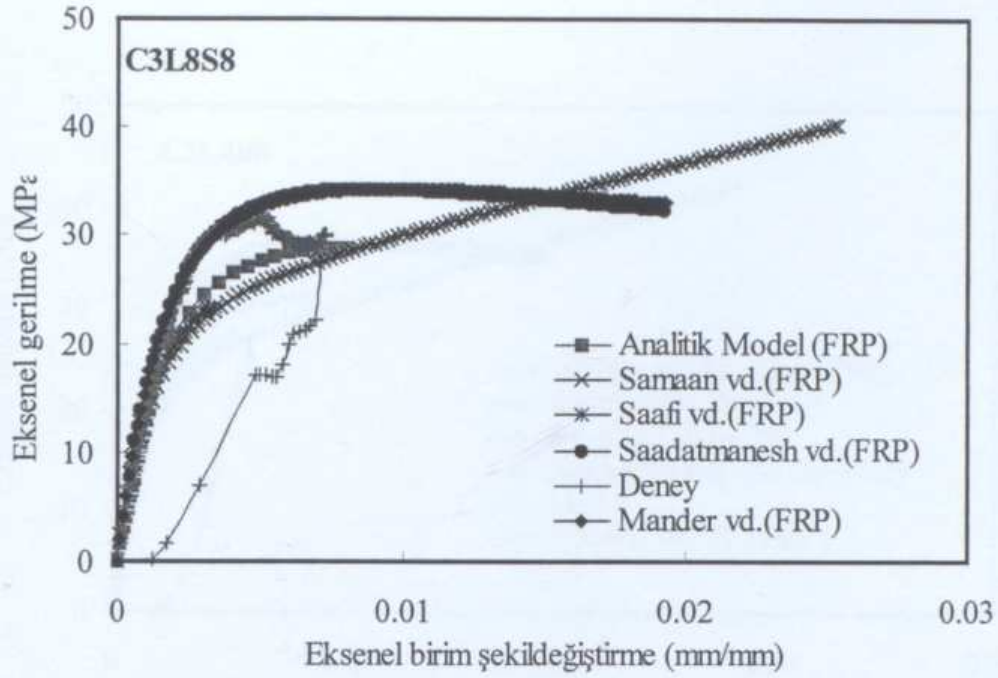
Şekil 4.27 C1L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



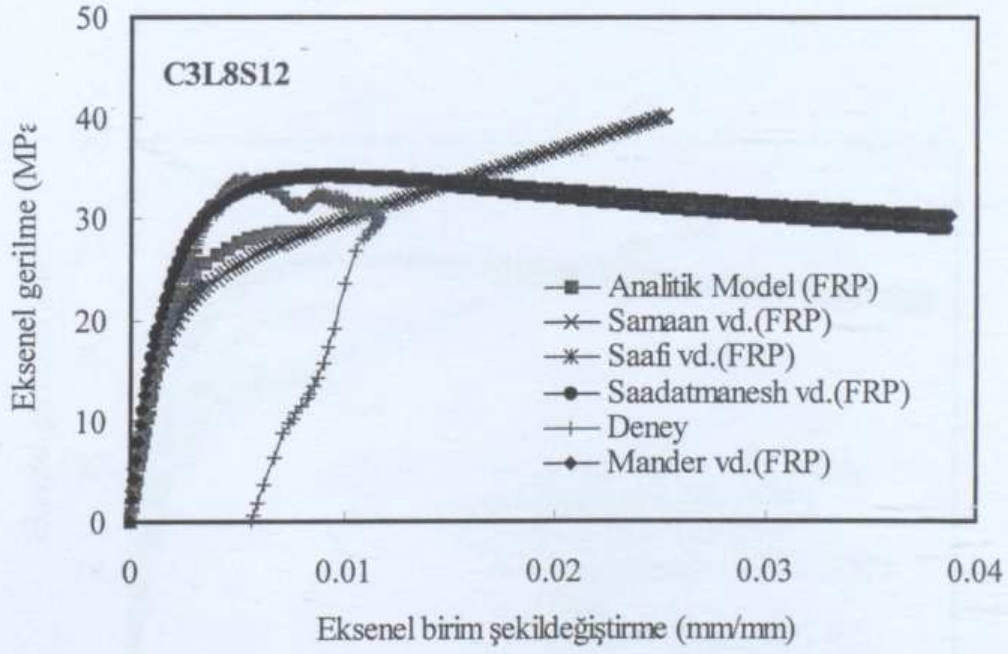
Şekil 4.28 C1L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



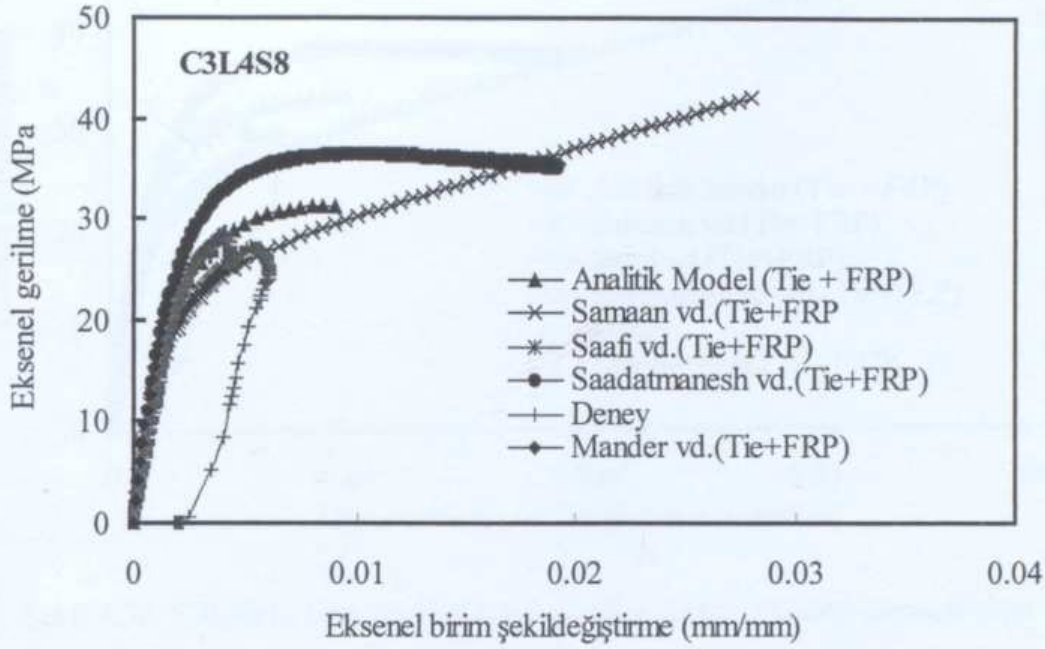
Şekil 4.29 C1L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirmelerinin deneysel sonuçlarının analitik modelle karşılaştırılması.



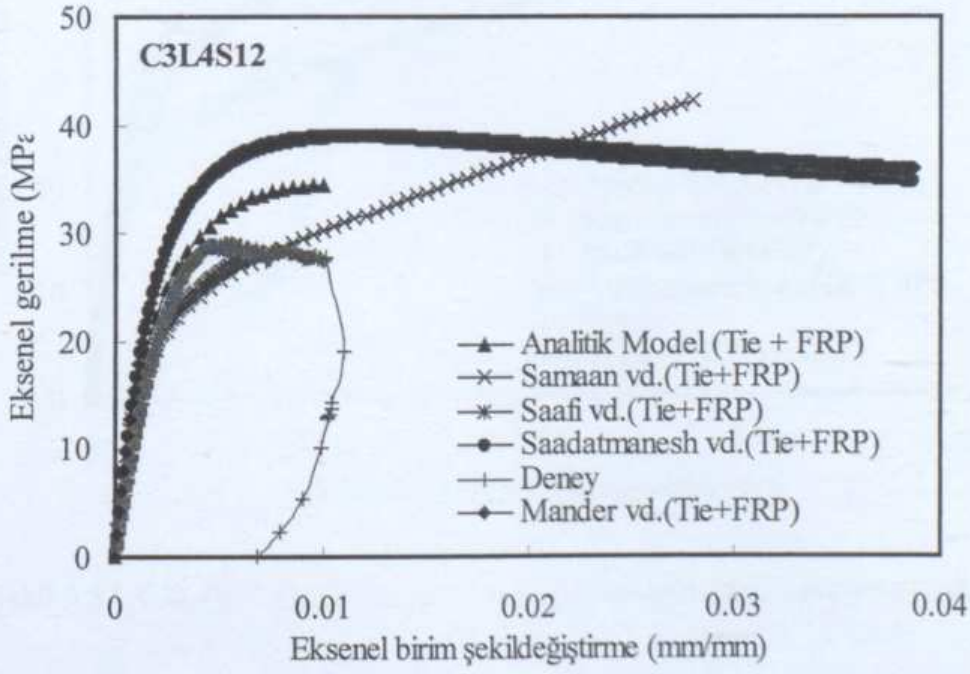
Şekil 4.32 C3L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



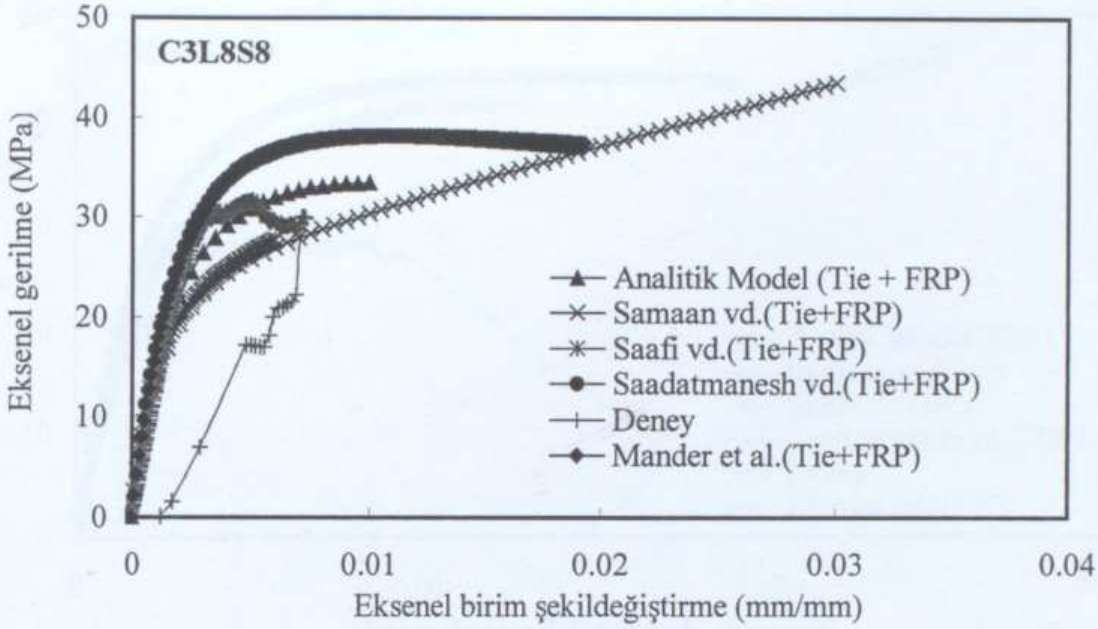
Şekil 4.33 C3L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



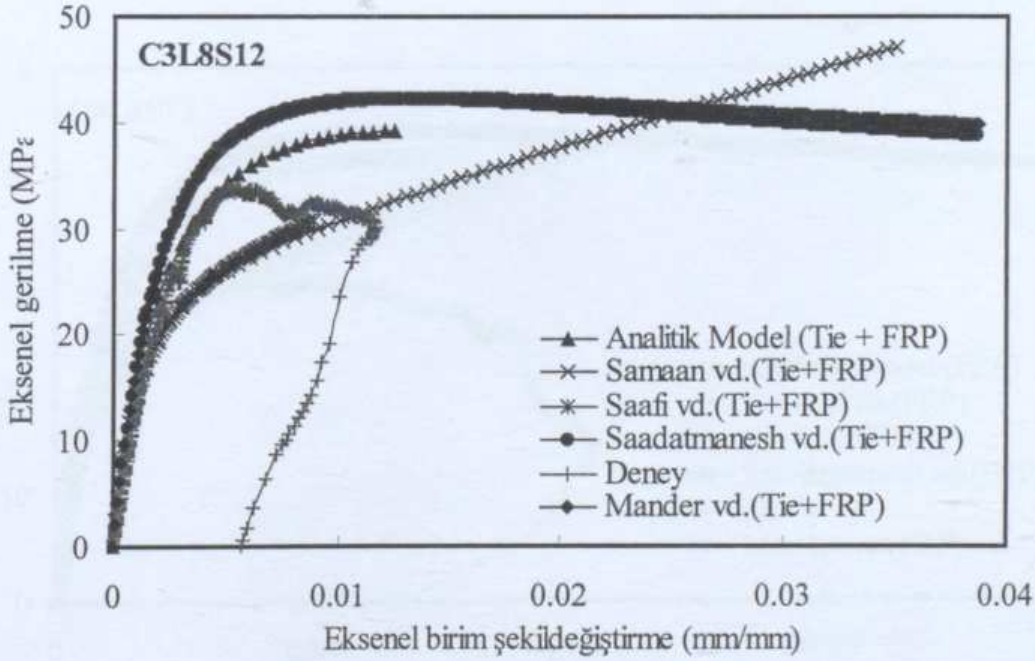
Şekil 4.34 C3L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



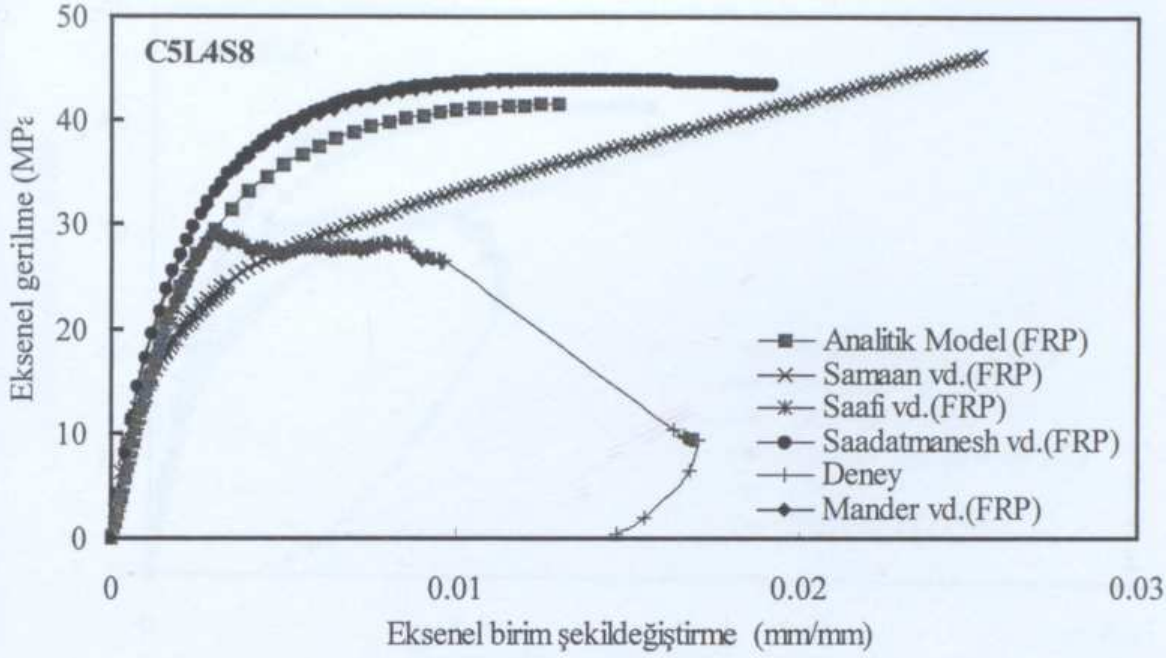
Şekil 4.35 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



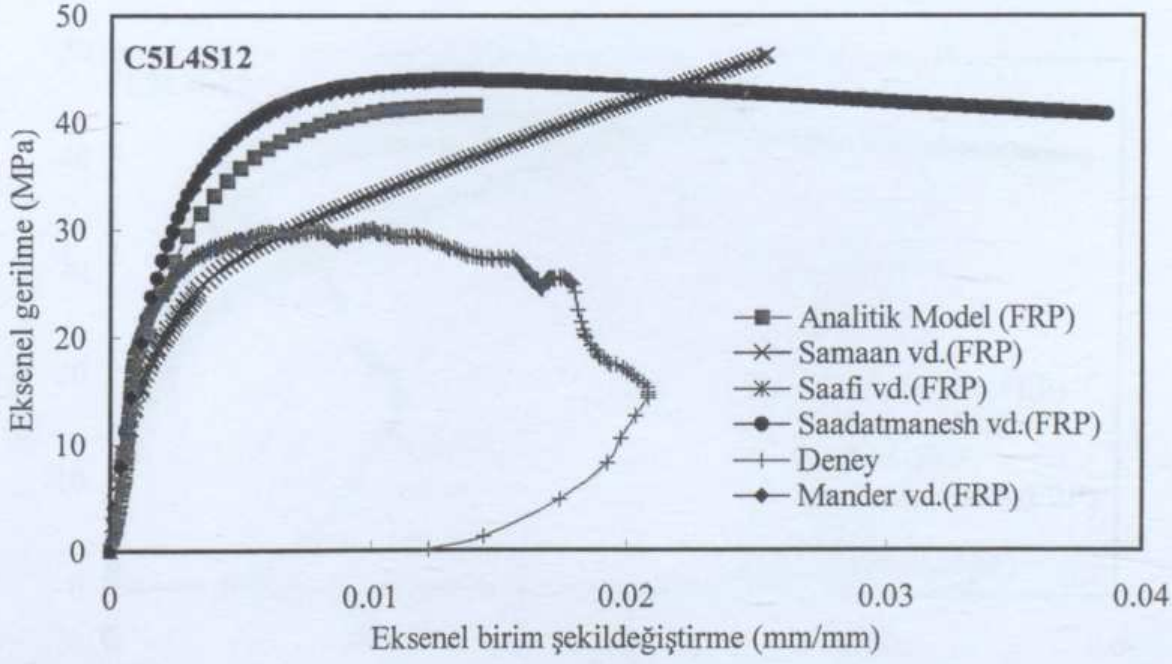
Şekil 4.36 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



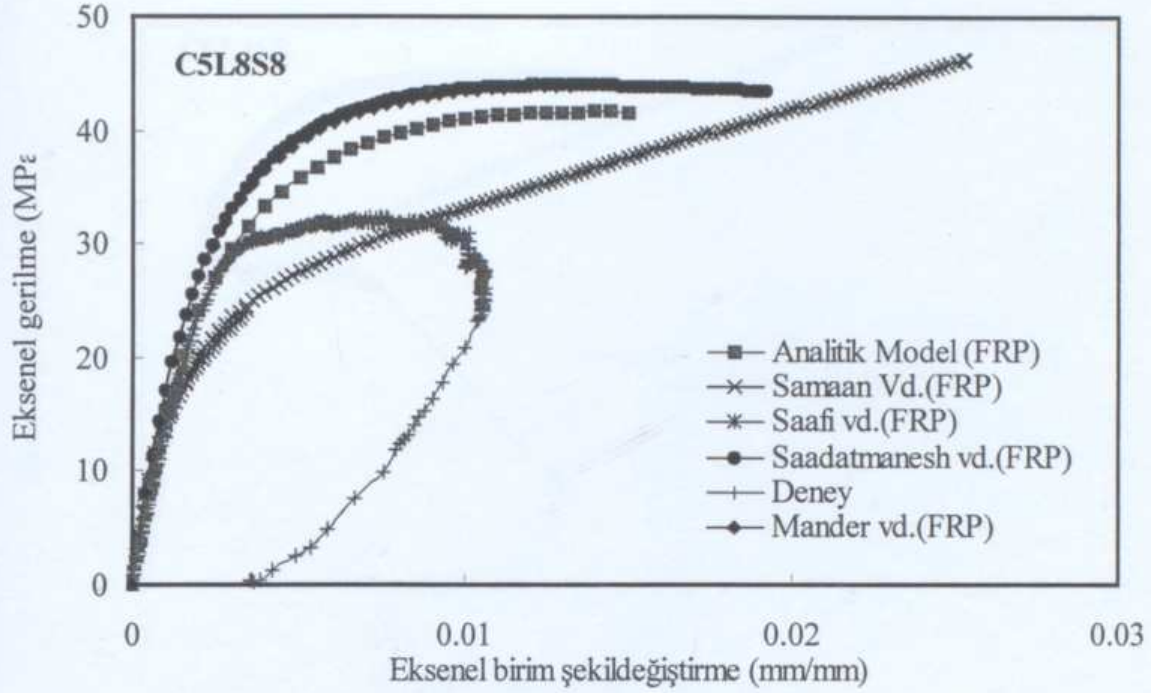
Şekil 4.37 C3L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



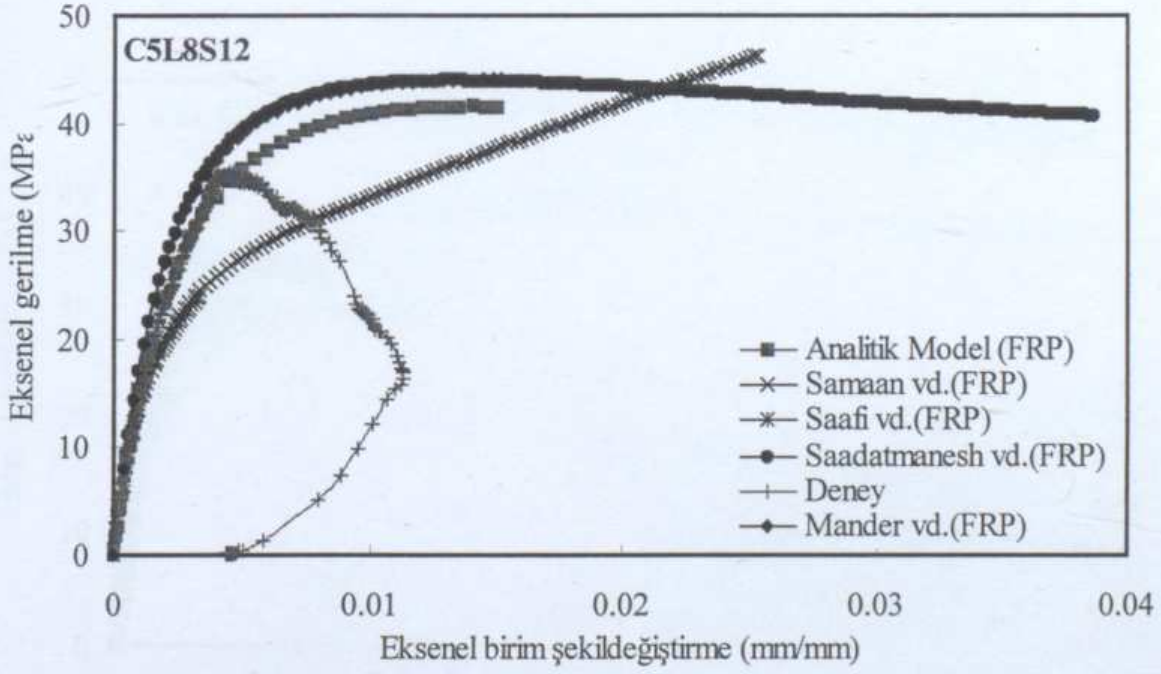
Şekil 4.38 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



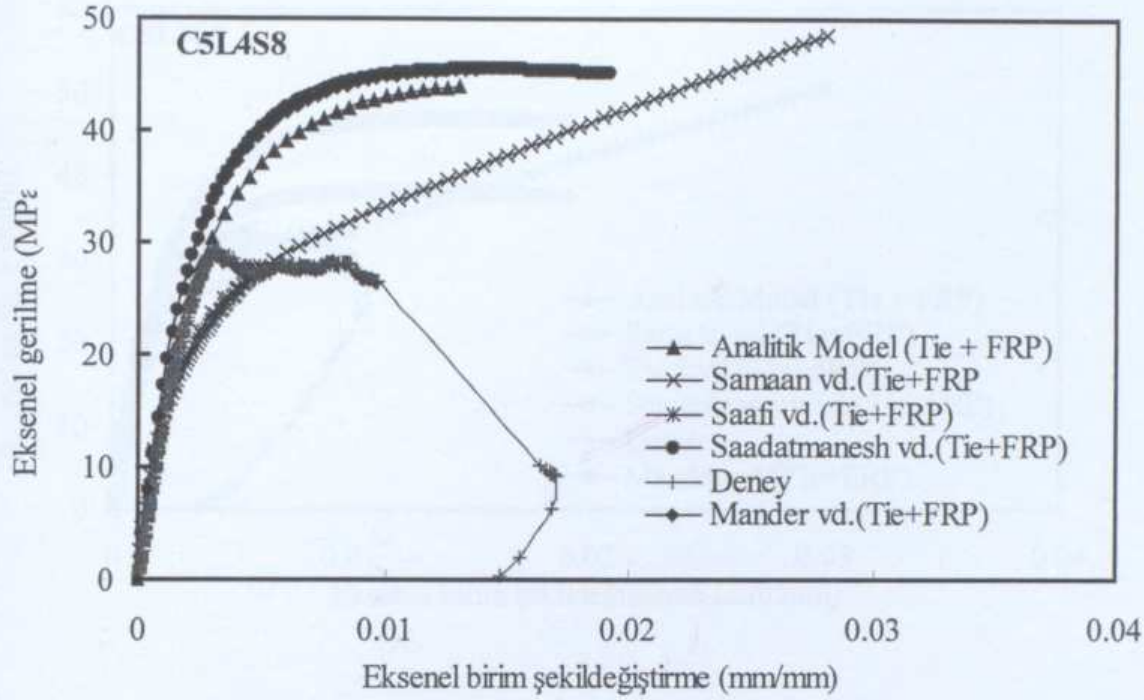
Şekil 4.39 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



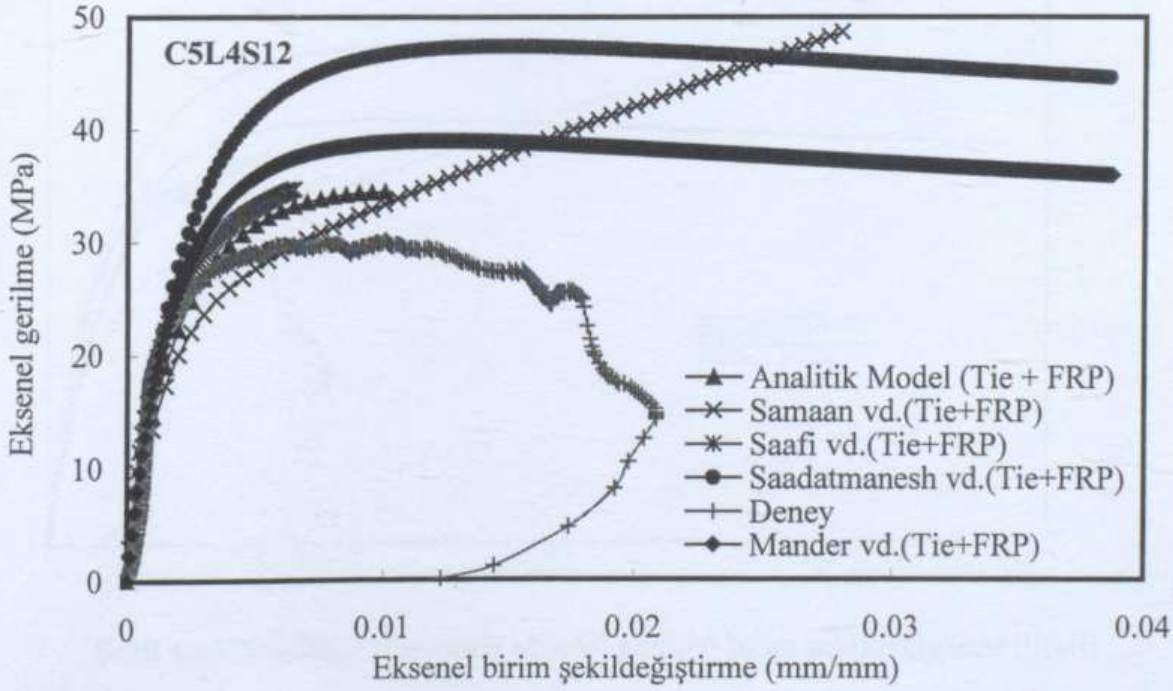
Şekil 4.40 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



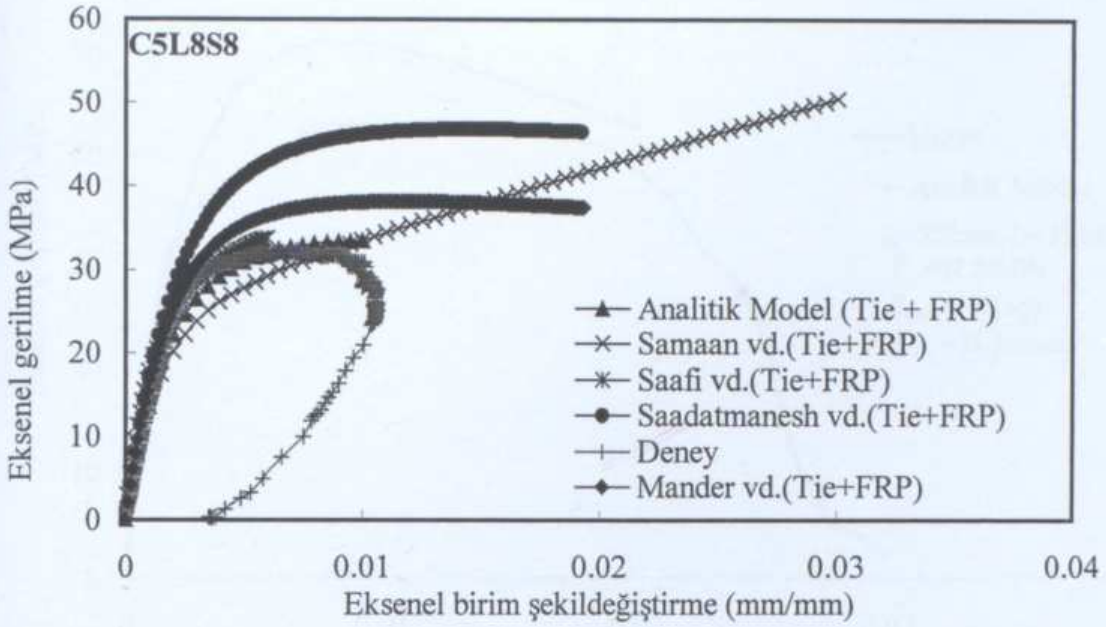
Şekil 4.41 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



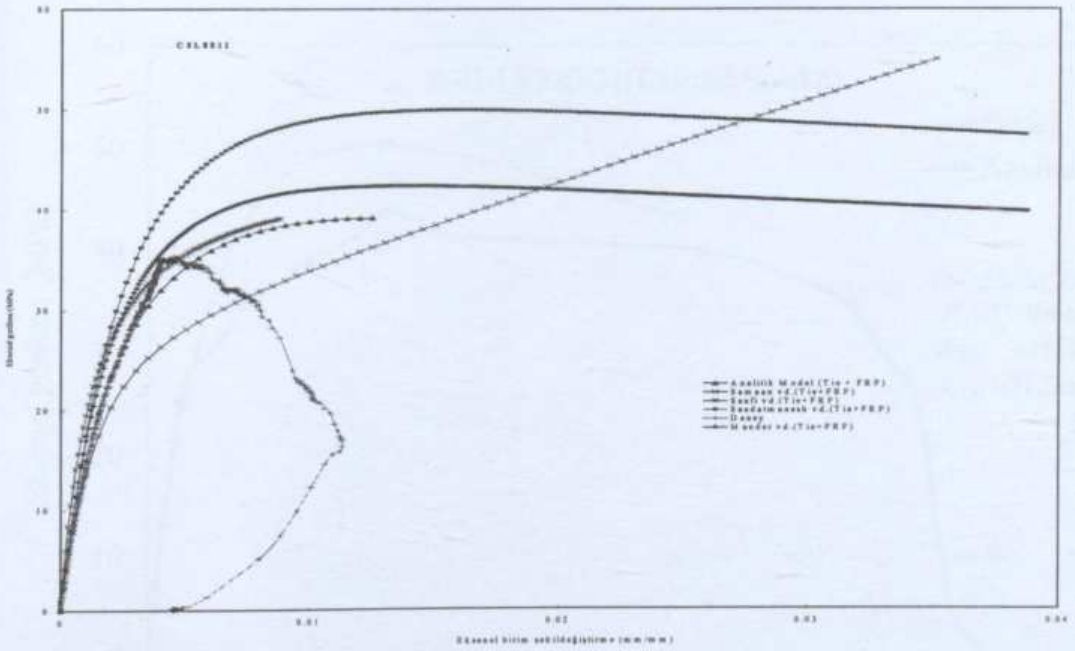
Şekil 4.42 C5L4S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



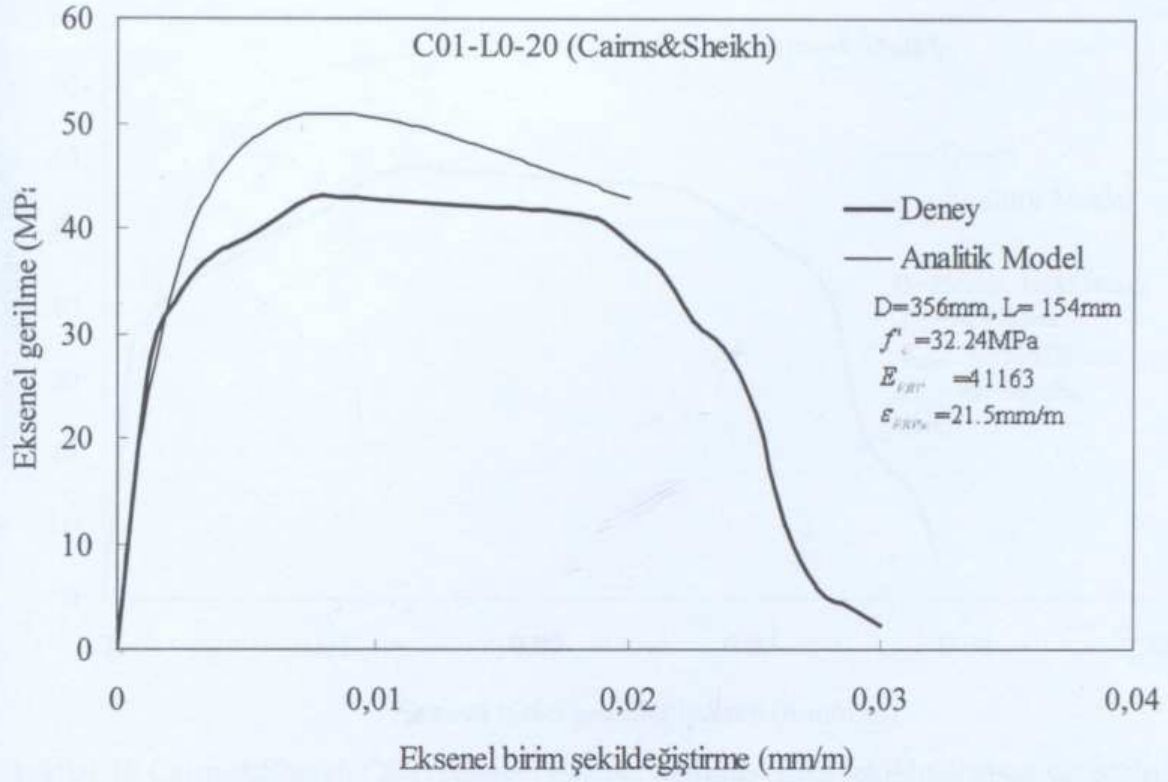
Şekil 4.43 C5L4S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



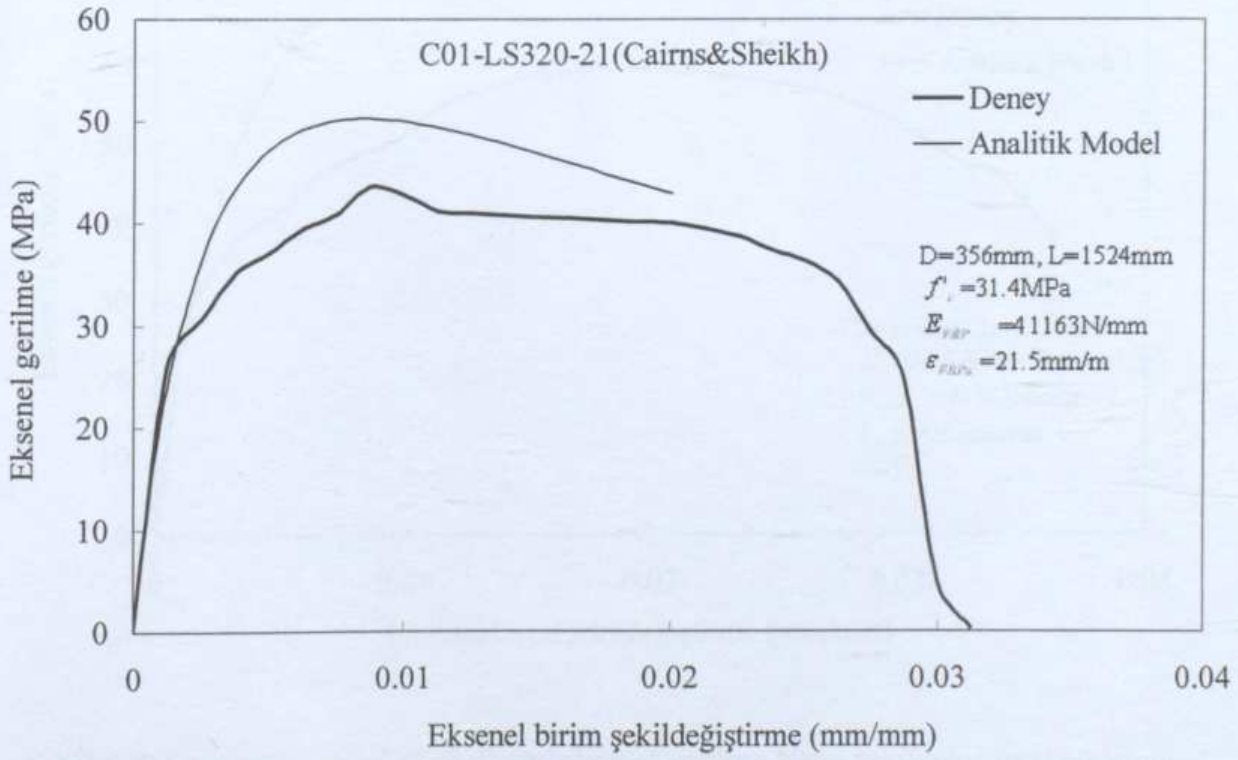
Şekil 4.44 C5L8S8 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



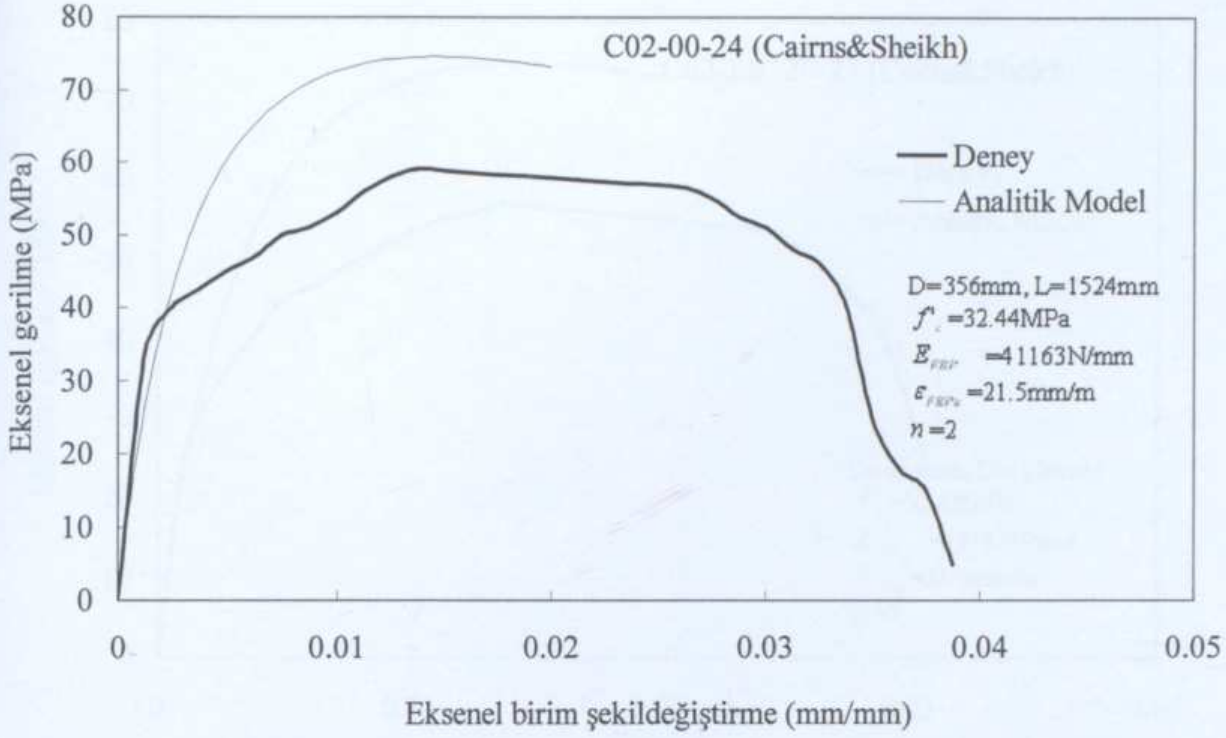
Şekil 4.45 C5L8S12 Numunesi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi



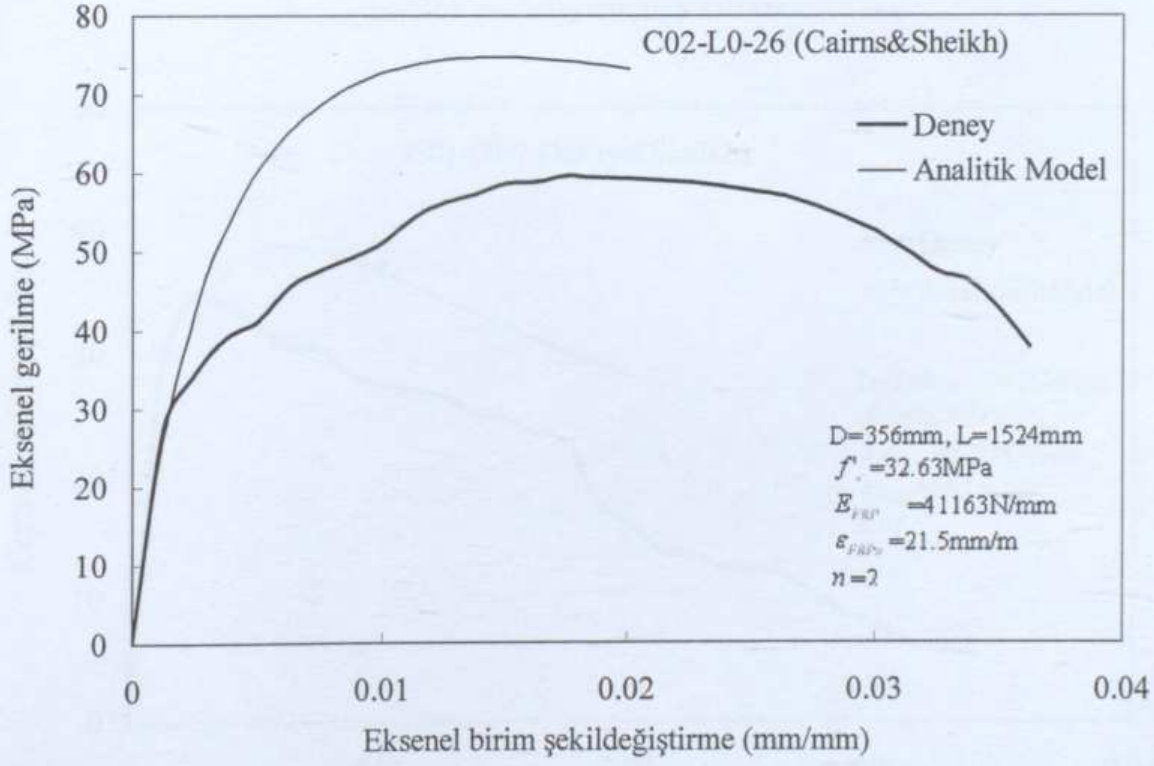
Şekil 4.46 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



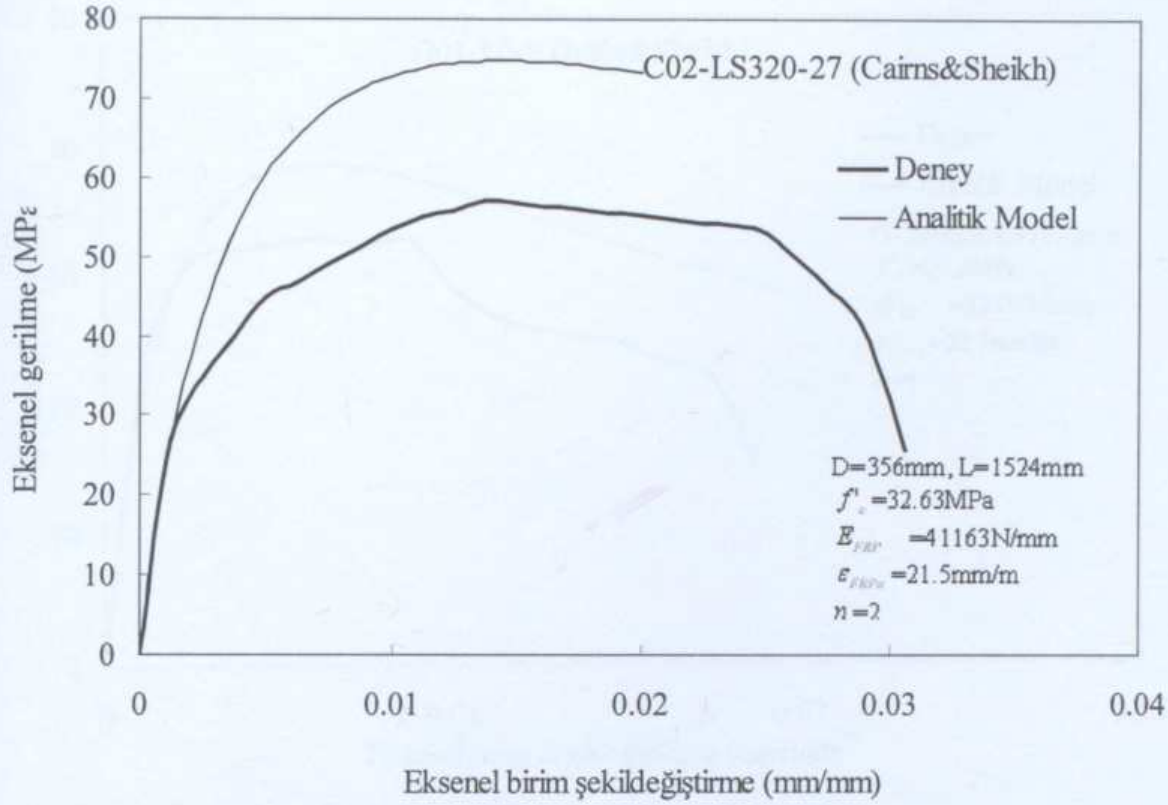
Şekil 4.47 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



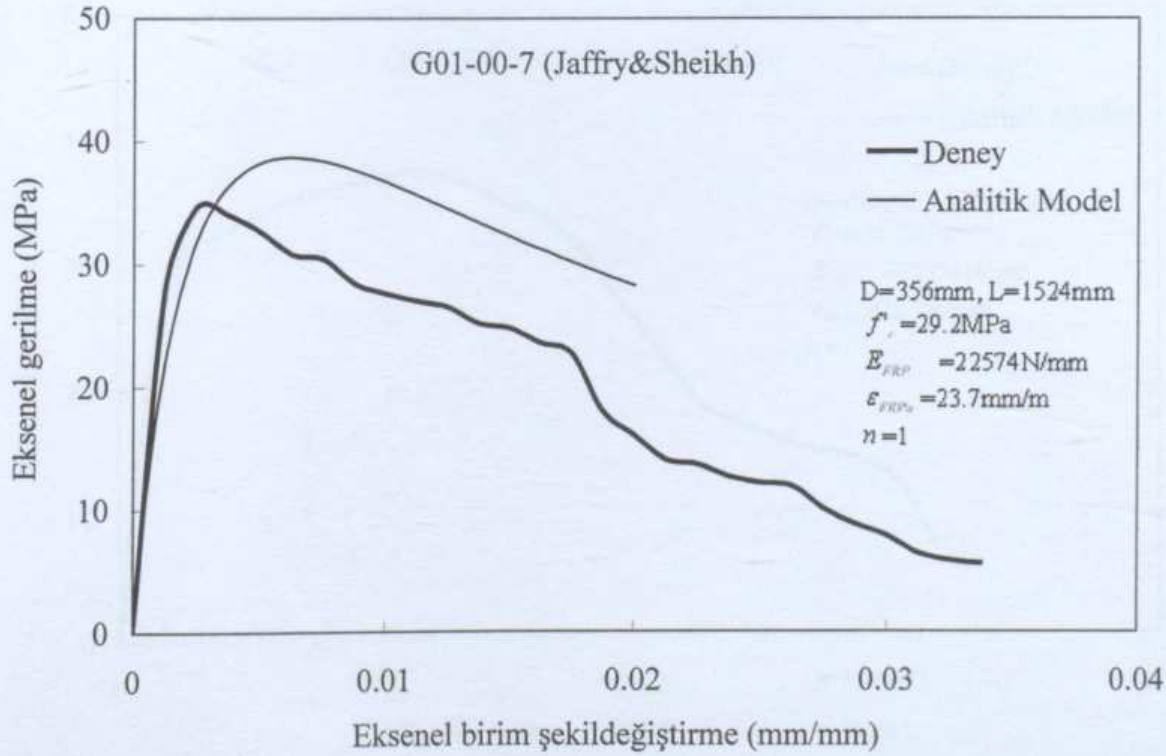
Şekil 4.48 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



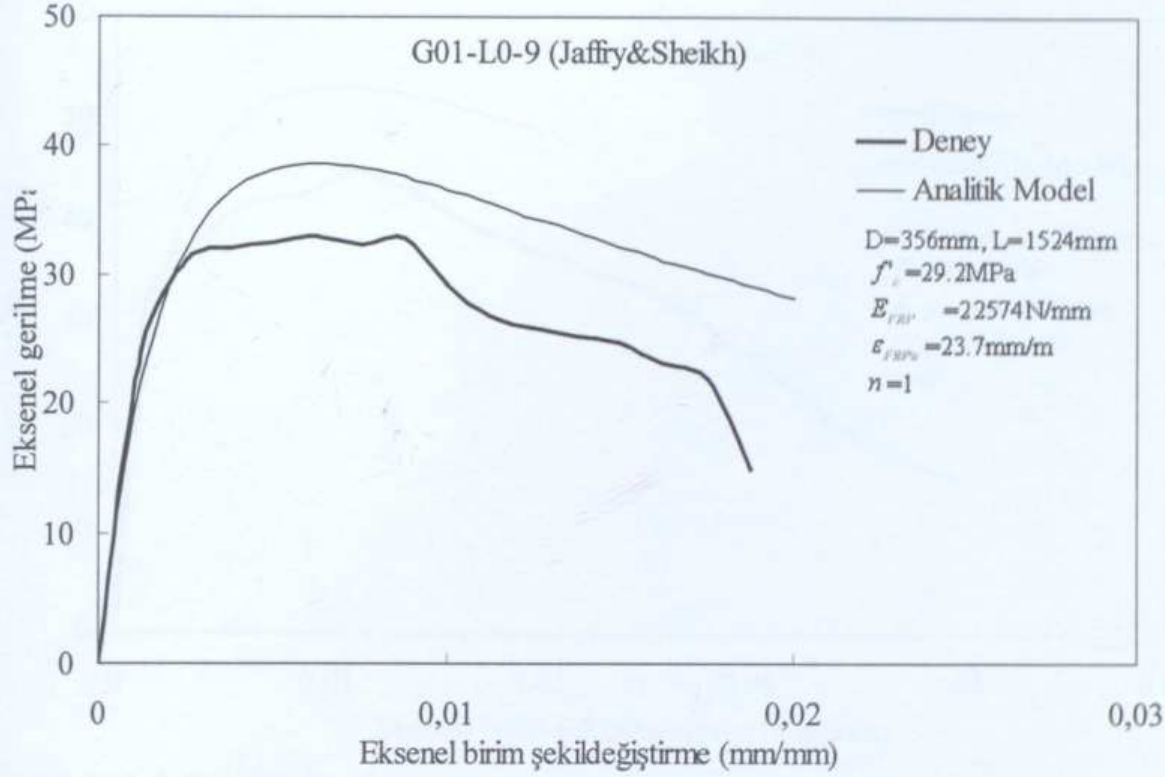
Şekil 4.49 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



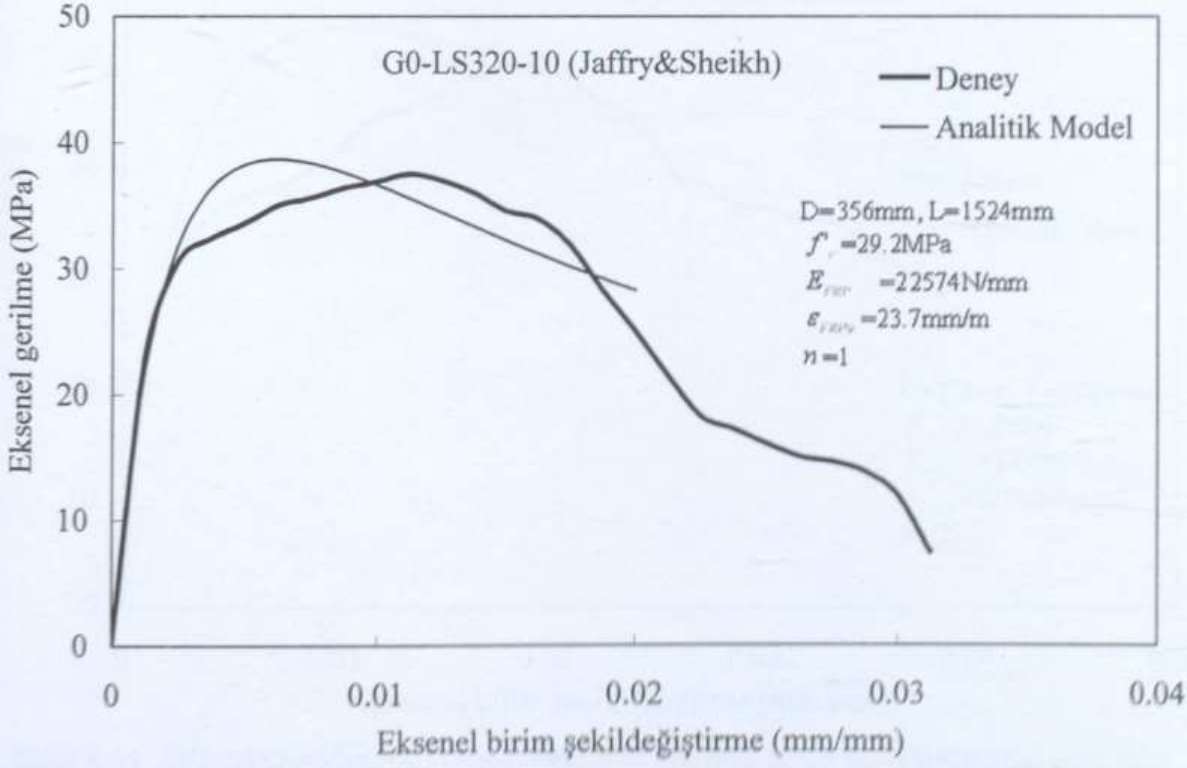
Şekil 4.50 Cairns&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



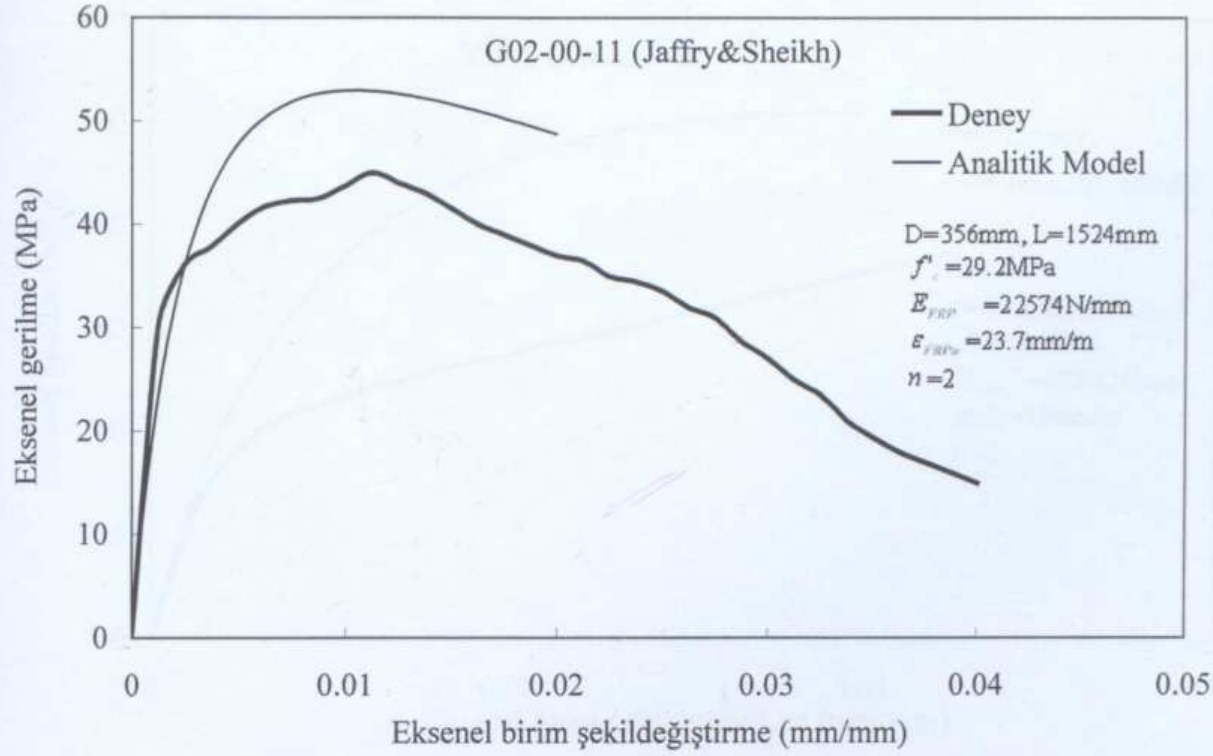
Şekil 4.51 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



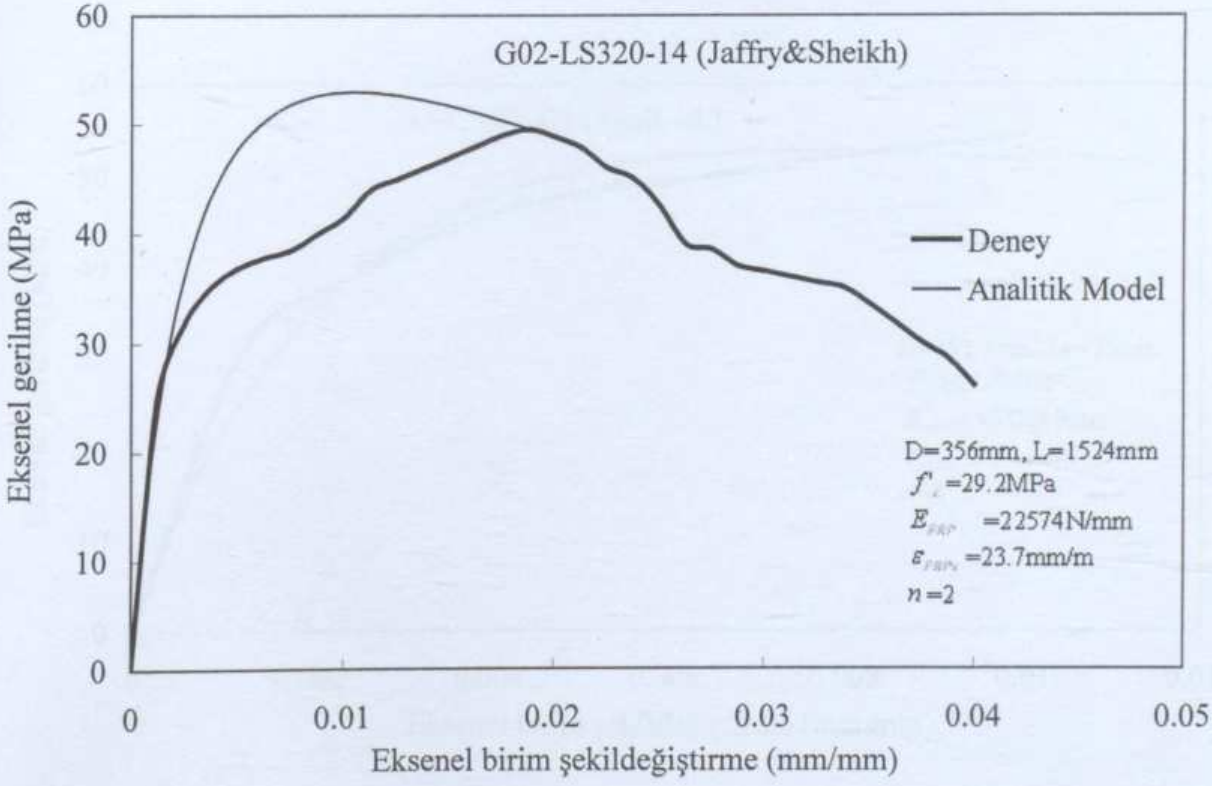
Şekil 4.52 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



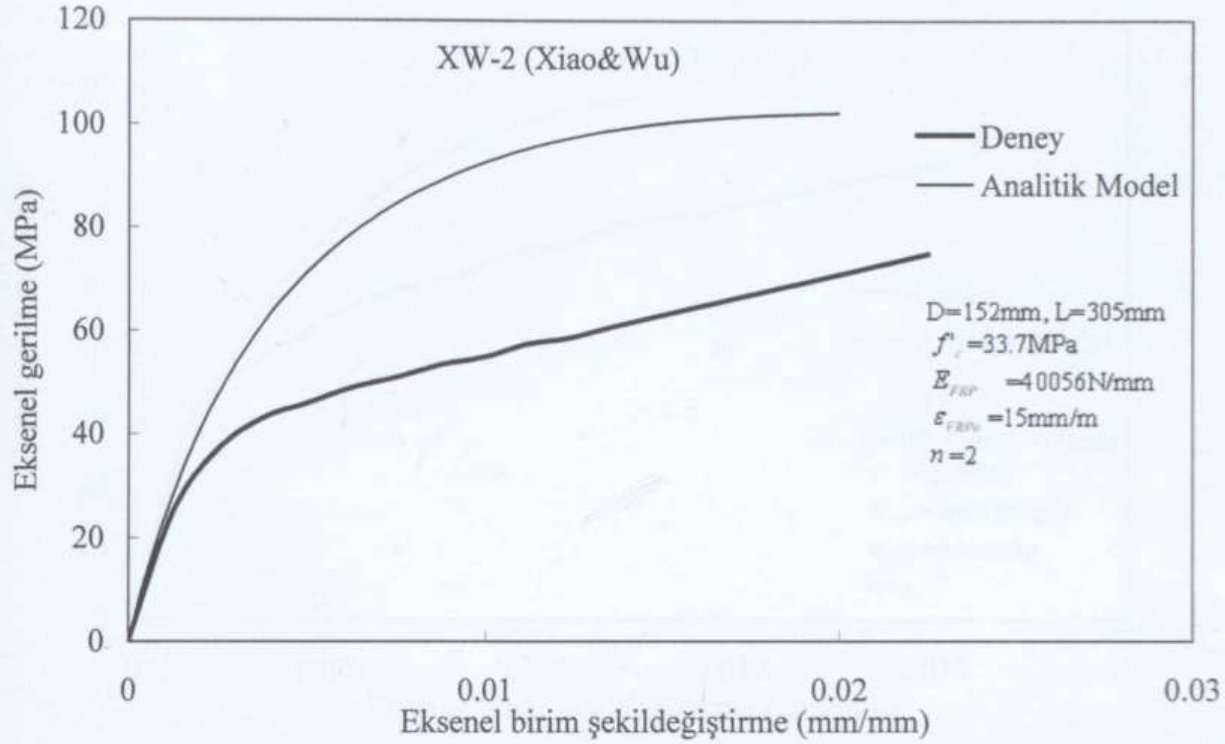
Şekil 4.53 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



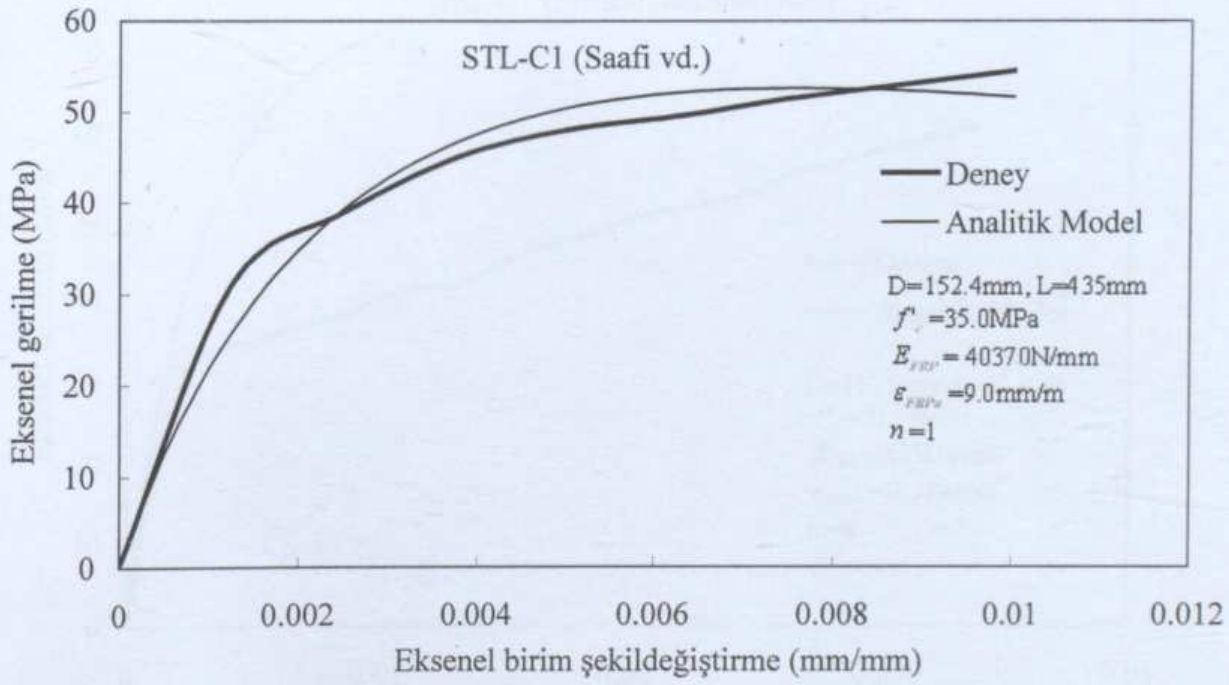
Şekil 4.54 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



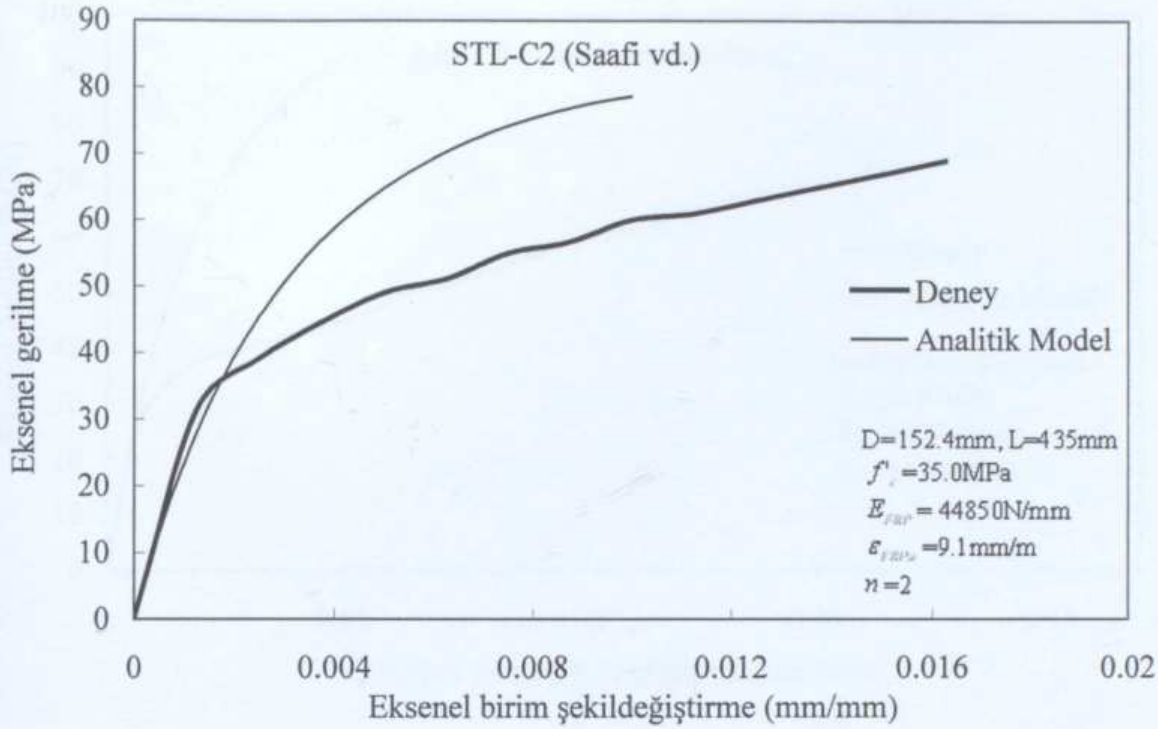
Şekil 4.55 Jaffry&Sheikh (2001) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



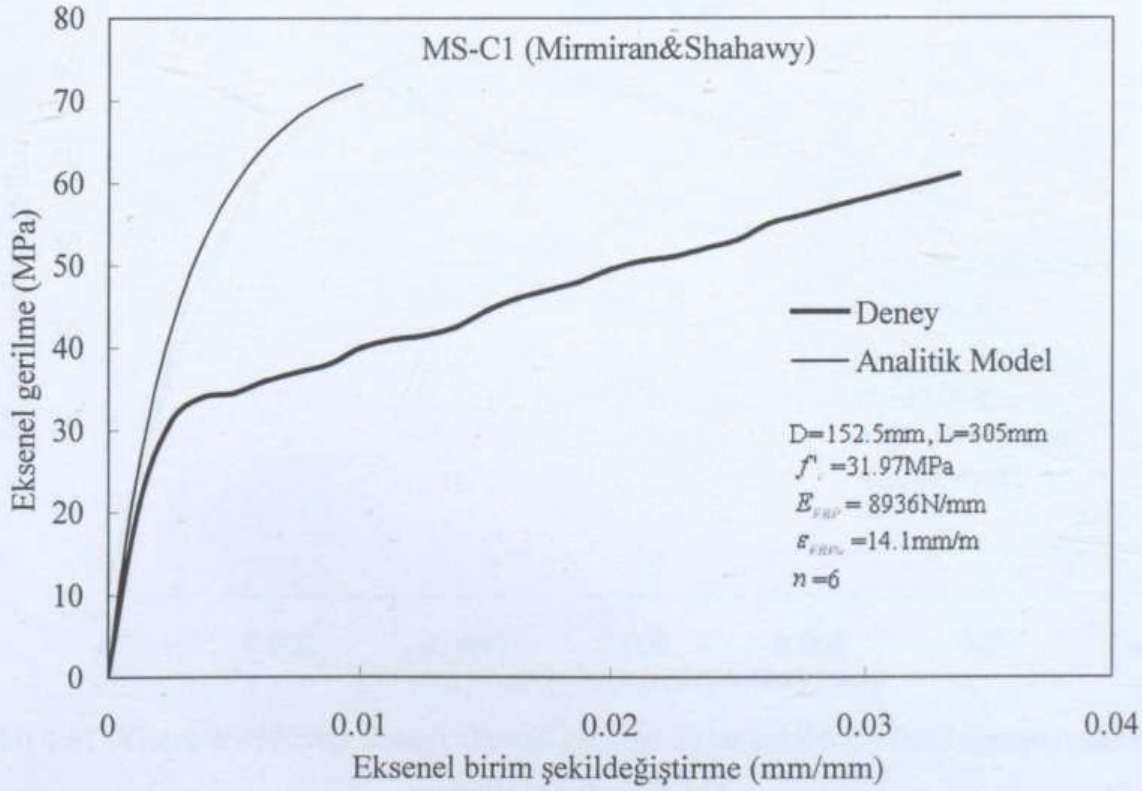
Şekil 4.56 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



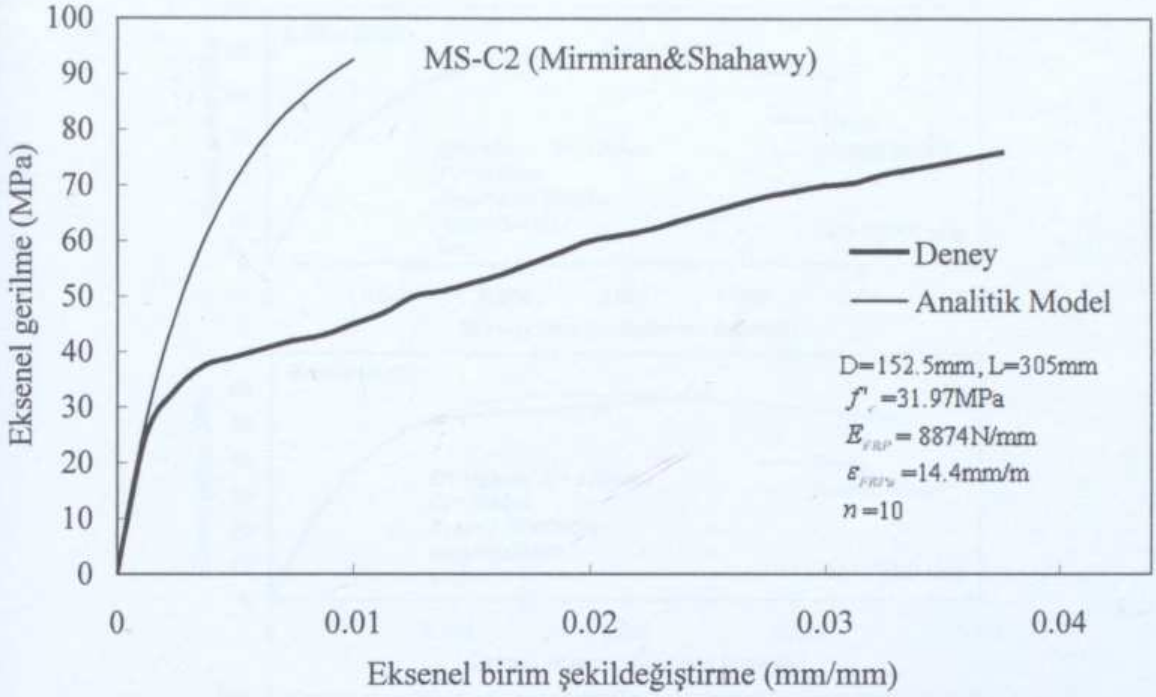
Şekil 4.57 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



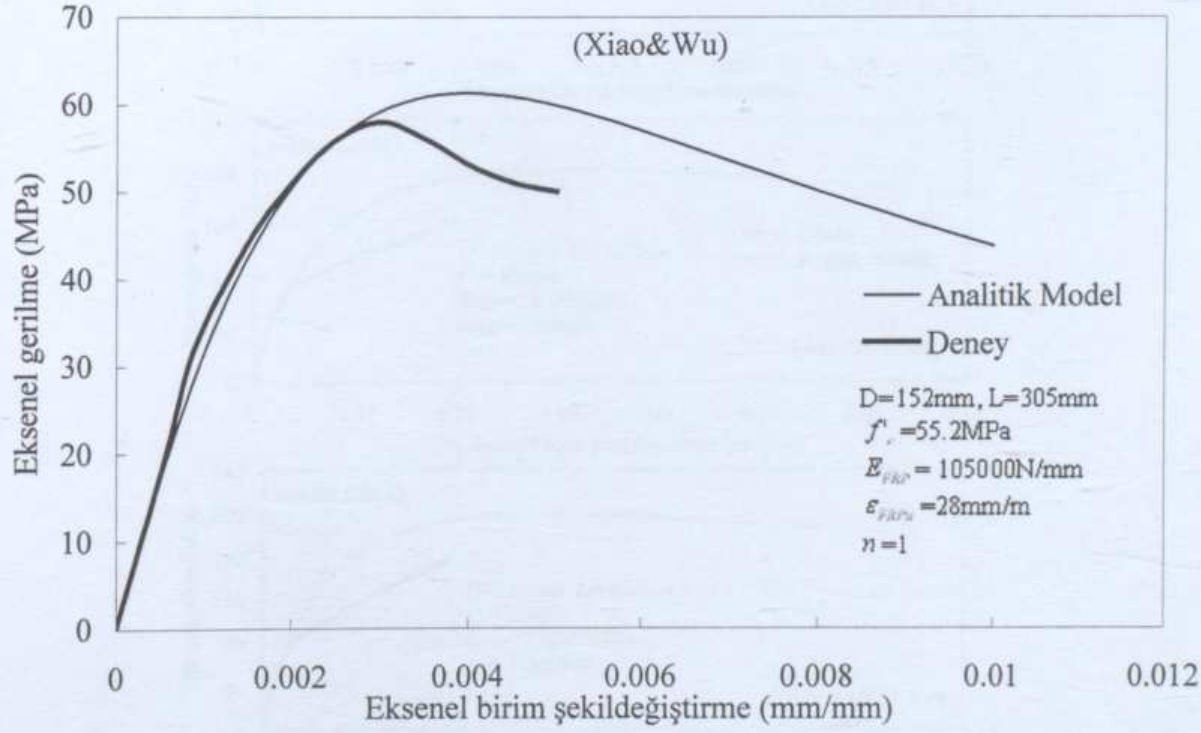
Şekil 4.58 Saafi vd. (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



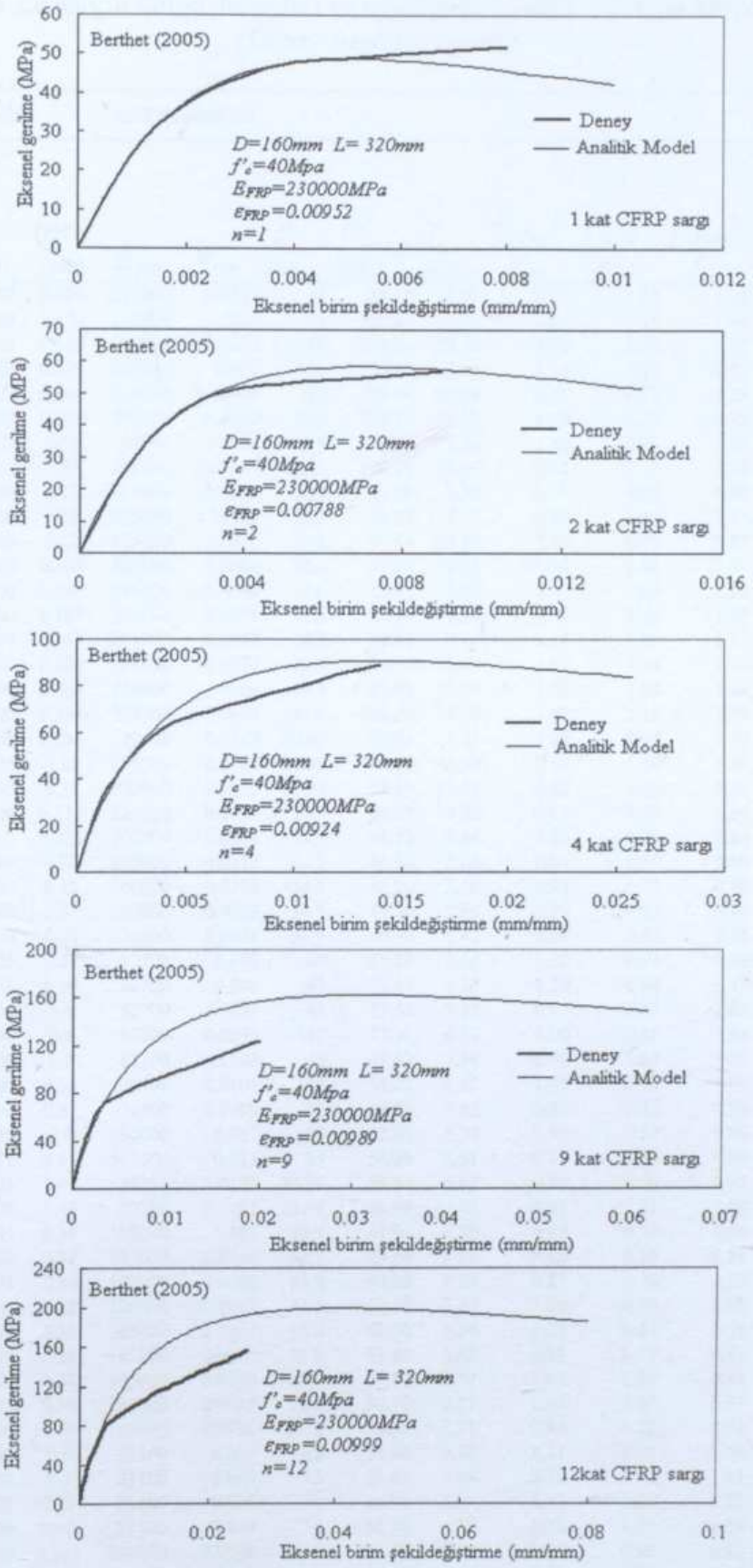
Şekil 4.59 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



Şekil 4.60 Mirmiran&Shahawy (1997) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



Şekil 4.61 Xiao&Wu (2000) deneyi eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması



Şekil 4.62 Berthet (2005) deneyleri eksenel gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisinin analitik modelle karşılaştırılması

Çizelge 4.1 LP sargılı kolon deneyleri ve uygulanan analitik modelin karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	h (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{A}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{B}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{C}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{D}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{E}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{F}$
HA1	51	102	0.089	235000	0.0113	41	86.10	9.27	1.07	1.02	1.24	1.29	1.04	1.45
HA2	51	102	0.179	235000	0.01	41	120.54	16.50	1.06	1.15	1.44	1.45	1.08	1.63
HA3	51	102	0.344	235000	0.0075	41	158.26	23.78	1.08	1.32	1.65	1.61	1.12	1.79
HA5	51	102	0.179	235000	0.002	103	130.81	3.30	1.18	1.05	1.12	1.13	1.04	1.19
HA6	51	102	0.344	235000	0.00725	103	193.64	22.98	0.91	0.92	1.23	1.16	0.95	1.30
HA7	51	102	0.689	235000	0.0055	103	303.85	34.92	1.12	1.23	1.73	1.56	1.22	1.76
PI1	153	305	0.36	83000	0.0084	39.7	55.98	3.28	1.12	0.95	1.05	1.11	0.98	1.21
WA1	100	200	0.67	223400	0.00667	30.2	104.49	19.97	0.91	1.13	1.32	1.35	0.91	1.49
WA2	100	200	0.14	611600	0.0025	30.2	41.68	4.28	0.91	0.79	0.89	0.97	0.82	1.08
WA3	100	200	0.28	611600	0.00167	30.2	55.87	5.72	1.06	0.96	1.11	1.20	0.99	1.34
WA4	100	200	0.42	611600	0.0021	30.2	63.42	10.79	0.83	0.86	1.02	1.09	0.82	1.22
KO1	100	200	0.167	235000	0.0084	34.3	57.28	6.59	0.94	0.86	1.01	1.08	0.89	1.21
KO2	100	200	0.167	235000	0.0092	34.3	64.83	7.22	1.02	0.94	1.11	1.19	0.97	1.33
KO3	100	200	0.167	235000	0.0096	32.3	61.69	7.54	0.98	0.92	1.08	1.16	0.93	1.30
KO4	100	200	0.167	235000	0.0063	32.3	57.82	4.94	1.14	1.00	1.14	1.23	1.04	1.37
KO5	100	200	0.334	235000	0.0077	32.3	86.89	12.09	1.03	1.08	1.30	1.37	1.03	1.54
KO6	100	200	0.334	235000	0.0066	34.8	82.82	10.36	1.05	1.04	1.26	1.33	1.03	1.49
KO7	100	200	0.334	235000	0.0091	34.8	103.36	14.29	1.07	1.15	1.41	1.45	1.07	1.63
T01	76	305	0.236	72600	0.0163	30.93	60.93	7.35	1.00	0.94	1.10	1.19	0.95	1.34
T02	76	305	0.22	230500	0.0125	30.93	94.96	16.68	0.93	1.08	1.28	1.33	0.93	1.48
T03	76	305	0.33	372800	0.0055	30.93	94.03	17.81	0.88	1.04	1.24	1.28	0.88	1.41
MA1	150	300	0.117	220000	0.0126	34.9	46.07	4.32	0.91	0.79	0.89	0.96	0.82	1.06
MA2	150	300	0.235	500000	0.0031	34.9	45.72	4.86	0.86	0.75	0.86	0.92	0.79	1.02
MA3	150	300	0.12	200000	0.0115	34.9	44.30	3.68	0.94	0.80	0.89	0.95	0.83	1.05
MA4	150	300	0.12	200000	0.0108	34.9	42.20	3.46	0.91	0.77	0.86	0.92	0.80	1.01
MA5	150	300	0.24	420000	0.0019	34.9	41.30	2.55	0.99	0.83	0.89	0.95	0.85	1.03
MA6	150	300	0.24	420000	0.0018	34.9	40.70	2.42	0.99	0.82	0.88	0.95	0.84	1.02
SH1	153	305	0.36	82700	0.006	49	59.29	2.34	1.10	0.93	0.99	1.03	0.94	1.10
SH2	153	305	0.66	82700	0.006	49	76.44	4.28	1.20	1.04	1.17	1.22	1.07	1.33
RL1	100	200	0.6	82700	0.0089	42	73.50	8.83	0.93	0.87	1.06	1.10	0.90	1.23
RL2	100	200	0.6	82700	0.0095	42	73.50	9.43	0.90	0.85	1.04	1.08	0.87	1.21
RL3	100	200	0.6	82700	0.008	42	67.62	7.94	0.90	0.83	1.00	1.04	0.86	1.17
MC1	100	200	0.35	72400	0.0101	32	54.08	5.12	1.05	0.93	1.06	1.15	0.97	1.28
MC2	100	200	0.35	72400	0.0099	32	48.00	5.02	0.94	0.83	0.95	1.02	0.86	1.14
SA1	152	435	0.8	32000	0.017	35	52.85	5.73	0.92	0.82	0.95	1.02	0.86	1.14
SA2	152	435	0.11	367000	0.013	35	54.95	6.91	0.87	0.80	0.94	1.00	0.83	1.13
MS1	153	305	1.44	37233	0.0123	30.86	53.70	8.62	0.80	0.78	0.93	0.99	0.78	1.12
MS2	153	305	1.44	37233	0.0177	29.64	66.99	12.41	0.81	0.87	1.04	1.10	0.81	1.23
XW1	152	305	0.38	105000	0.012	33.7	47.90	6.30	0.82	0.74	0.86	0.92	0.76	1.03
XW2	152	305	0.38	105000	0.0124	33.7	49.40	6.51	0.83	0.75	0.88	0.94	0.78	1.06
XW3	152	305	0.38	105000	0.0098	43.8	54.80	5.15	0.87	0.76	0.87	0.92	0.79	1.01
XW4	152	305	0.38	105000	0.0047	43.8	52.10	2.47	1.05	0.88	0.95	0.99	0.90	1.07
XW5	152	305	0.38	105000	0.0037	43.8	48.70	1.94	1.03	0.87	0.91	0.96	0.87	1.02
XW6	152	305	0.38	105000	0.0069	55.2	57.90	3.62	0.87	0.75	0.83	0.86	0.77	0.93
XW7	152	305	0.38	105000	0.0048	55.2	62.90	2.52	1.04	0.89	0.94	0.98	0.89	1.04
XW8	152	305	0.38	105000	0.0049	55.2	58.10	2.57	0.95	0.82	0.87	0.90	0.82	0.96
XW9	152	305	0.76	105000	0.0081	55.2	77.60	8.51	0.86	0.78	0.95	0.96	0.82	1.07
LO1	120	240	0.3	91100	0.007	43	58.50	3.19	1.11	0.95	1.04	1.09	0.97	1.18
LO2	120	240	0.3	91100	0.008	43	65.60	3.64	1.20	1.02	1.13	1.19	1.06	1.30
LO3	150	300	0.45	91100	0.008	38	62.00	4.37	1.16	1.00	1.13	1.20	1.04	1.33
LO4	150	300	0.45	91100	0.008	38	67.50	4.37	1.26	1.09	1.23	1.31	1.13	1.44
SS1	150	600	0.111	240000	0.0026	28.2	31.40	0.92	1.13	0.92	0.93	0.99	0.90	1.05
SS2	150	600	0.222	240000	0.0118	28.2	57.40	8.38	0.91	0.89	1.05	1.13	0.88	1.28
SS3	150	600	0.333	240000	0.0114	28.2	69.50	12.15	0.87	0.94	1.11	1.18	0.86	1.32
SS4	150	600	0.167	390000	0.0037	28.2	41.50	3.21	1.07	0.90	0.99	1.09	0.94	1.20
SS5	150	600	0.334	390000	0.0069	28.2	65.60	11.98	0.83	0.89	1.05	1.12	0.82	1.26
SS6	150	600	0.501	390000	0.0064	28.2	79.40	16.67	0.80	0.96	1.12	1.17	0.80	1.29

Çizelge 4.1 (devamı) LP sargılı kolon deneyleri ve uygulanan analitik modelin karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	h (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [A]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [B]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [C]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [D]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [E]	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}$ [F]
LL15	100	200	0.22	232000	0.010	23.04	80.35	10.34	1.22	1.31	1.49	1.64	1.19	1.84
LL16	150	300	0.33	232000	0.010	22.75	82.86	10.34	1.26	1.36	1.55	1.71	1.23	1.91
LL17	120	240	0.33	232000	0.010	22.73	89.44	12.92	1.17	1.36	1.52	1.66	1.15	1.84
LL18	100	200	0.33	232000	0.010	23.04	101.80	15.51	1.17	1.44	1.59	1.71	1.15	1.88
LL19	150	300	0.11	232000	0.010	24.99	48.09	3.45	1.31	1.11	1.22	1.36	1.16	1.51
LL20	120	240	0.11	232000	0.010	25.42	55.33	4.31	1.34	1.17	1.31	1.46	1.22	1.63
LL21	200	400	0.11	232000	0.010	25.01	61.08	5.17	1.36	1.22	1.39	1.54	1.26	1.73
LL22	150	300	0.22	232000	0.010	24.99	68.49	6.89	1.30	1.23	1.42	1.57	1.23	1.77
LL23	120	240	0.22	232000	0.010	25.42	79.75	8.52	1.31	1.31	1.52	1.67	1.27	1.88
LL24	100	200	0.33	232000	0.010	25.01	88.82	10.34	1.30	1.37	1.59	1.73	1.28	1.94
LL25	150	300	0.33	232000	0.010	24.99	87.04	10.34	1.28	1.35	1.56	1.70	1.25	1.91
LL26	120	240	0.33	232000	0.010	25.42	96.85	12.92	1.21	1.37	1.58	1.70	1.20	1.89
LL27	100	200	0.33	232000	0.010	25.01	107.40	15.51	1.19	1.44	1.63	1.74	1.18	1.92

[1] HA Harmon et al. (1992)
[2] PI Picher et al. (1996)
[3] WA Watanabe et al. (1997)
[4] KO Kono et al. (1998)
[5] TO Toutanji et al. (1999)
[6] MA Matthys et al. (1999)
[7] SH Shahawy et al. (2000)
[8] RL Rochette and Labossiere (2000)
[9] MC Micelli et al. (2001)
[10] SA Saafi et al. (1999)
[11] MS Mirmiran and Shahawy (1997)
[12] XW Xiao and Wu (2000)
[13] LO De Lorenzis et al. (2002)
[14] SS Dias da Silva ve Santos (2001)
[15] PE Pessiki et al. (2001)
[16] WC Wang and Cheong (2002)
[17] SH Shehata et al. (2002)
[18] KS Kshirsagar et al. (2000)
[19] BE Berthet (2005)
[20] LL Lin and Li (2003)

[A] FRP sargılı kolonlar için uygulanan Köksal Modeli
[B] Saadatmanesh vd. Modeli
[C] Samaan vd. Modeli
[D] Saafi vd. Modeli
[E] Xiao vd. Wu Modeli
[F] Lam ve Teng Modeli

Çizelge 4.2 128 Adet CFRP sargılı beton numunesi için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

(128 numune için)	Köksal	Saadatmanesh vd.	Samaan vd.	Saafi vd.	Xiao&Wu	Lam&Teng
Ortalama	1.03	1.00	1.15	1.22	0.97	1.36
Standart Sapma	0.17	0.20	0.22	0.25	0.15	0.29
Ortalama Mutlak Hata	13.38	16.64	15.66	17.56	14.44	23.60

Çizelge 4.3 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	b (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{A}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{B}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{C}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{D}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{E}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{F}$
C3L4S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	28.59	3.05	0.96	0.81	0.88	1.01	0.85	1.12
C3L4S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	29.15	3.74	0.89	0.77	0.85	0.97	0.80	1.09
C3L8S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	31.70	3.51	1.00	0.86	0.94	1.07	0.89	1.20
C3L8S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	33.88	4.78	0.90	0.82	0.91	1.04	0.83	1.17
C5L4S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	29.32	5.54	0.72	0.67	0.75	0.86	0.67	0.96
C5L4S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	30.12	6.22	0.68	0.66	0.74	0.84	0.64	0.95
C5L8S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	32.35	6.00	0.75	0.72	0.80	0.92	0.71	1.03
C5L8S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	35.40	7.26	0.73	0.73	0.82	0.93	0.69	1.04

Çizelge 4.4 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistiksel karşılaştırılması (Deney/Analitik model)

(8 betonarme numune için)	Köksal	Saadatmanesh vd.	Samaan vd.	Saafi vd.	Xiao&Wu	Lam&Teng
Ortalama	0.83	0.76	0.83	0.95	0.76	1.07
Standart Sapma	0.12	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09
Ortalama Mutlak Hata	22.95	33.13	20.72	8.37	33.35	8.37

Çizelge 4.5 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli betonarme kolon numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile karşılaştırılması (***Etriye katkısı ihmal edildiğinde***) (Deney/Analitik model)

	Geometri			*CFRP özellikleri*										
NUMUNE	d (mm)	b (mm)	(nxt) (mm)	E_{FRP}	ε_{rup}	f'_c (MPa)	$f'_{cc,exp}$ (MPa)	f_l (MPa)	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{A}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{B}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{C}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{D}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{E}$	$\frac{f'_{cc,exp}}{f'_{cc}}^{F}$
C3L4S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	28.59	2.49	1.06	0.87	0.93	1.06	0.91	1.17
C3L4S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	29.15	2.48	1.08	0.89	0.95	1.08	0.93	1.20
C3L8S8	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	31.70	2.49	1.17	0.97	1.03	1.18	1.01	1.30
C3L8S12	200	200	0.165	230000	0.015	19.36	33.88	2.48	1.25	1.03	1.10	1.26	1.08	1.39
C5L4S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	29.32	4.98	0.76	0.70	0.78	0.89	0.70	1.00
C5L4S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	30.12	4.96	0.79	0.72	0.80	0.91	0.72	1.03
C5L8S8	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	32.35	4.98	0.84	0.77	0.86	0.98	0.78	1.10
C5L8S12	200	200	0.330	230000	0.015	19.36	35.40	4.96	0.92	0.85	0.94	1.08	0.85	1.21

Çizelge 4.6 8 Adet CFRP sargılı betonarme kare kesitli numune için taşıma gücü tahminlerinin analitik modeller ile istatistisel karşılaştırılması (***Etriye katkısı ihmal edildiğinde***)(Deney/Analitik model)

(8 betonarme numune için)	Köksal	Saadatmanesh vd.	Samaan vd.	Saafi vd.	Xiao&Wu	Lam&Teng
Ortalama	0.98	0.85	0.92	1.05	0.87	1.18
Standart Sapma	0.18	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13
Ortalama Mutlak Hata	16.62	20.36	12.89	9.92	18.97	14.05

Çizelge 4.1'de Literatürde daha önce yapılmış toplam 128 adet CFRP sargılı silindirik beton numuneler ile uygulanan analitik model ve diğer bünyesel beton modelleri Deney/Analitik Model olarak karşılaştırıldığında; LP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modeli'nde ortalama, 1.03, standart sapma, 0.17, Saadatmanesh vd. Modeli'nde ortalama, 1.00, standart sapma, 0.20, Samaan vd. Modeli'nde ortalama, 1.15, standart sapma, 0.22, Saafi vd. Modeli'nde ortalama, 1.22, standart sapma0.25, Xiao ve Wu Modeli'nde ortalama, 0.97, standart sapma, 0.15, Lam ve Teng. Modeli'nde ortalama, 1.39, standart sapma, 0.29 olarak bulunmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda ise; deney yükü/analitik model tahmin oranı dikkate alındığında 1.03 ortalama ve 0.13 standart sapma değerleri ile Köksal Modelinin LP sargılı betona uygulanmış biçimi için deneylere oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çizelge 4.3 Deney Kolonları: uygulanan analitik model ve diğer bünyesel beton modellemeleri (Deney/Analitik Model) karşılaştırıldığında; LP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modeli'nde ortalama, 0.83, standart sapma, 0.12, Saadatmanesh vd. Modeli'nde ortalama, 0.76, standart sapma, 0.07, Samaan vd. Modeli'nde ortalama, 0.83, standart sapma, 0.07, Saafi vd. Modeli'nde ortalama, 0.95, standart sapma 0.08, Xiao ve Wu Modeli'nde ortalama, 0.76, standart sapma, 0.09, Lam ve Teng. Modeli'nde ortalama, 1.07, standart sapma, 0.09 değerleri bulunmuştur.

Çizelge 4.5'de görüldüğü üzere betonarme etriye katkısı düşünülmeden yalnızca CFRP sargı etkisi dikkate alınarak FRP sargılı beton/betonarme numuneler için uygulanan analitik model ve diğer bünyesel beton modelleri ile çözüm yapılmıştır. Bunun sonucunda; LP sargılı kolonlara uyarlanan Köksal Modeli'nde ortalama, 0.98, standart sapma, 0.18, Saadatmanesh vd. Modeli'nde ortalama, 0.85, standart sapma, 0.12, Samaan vd. Modeli'nde ortalama, 0.92, standart sapma, 0.11, Saafi vd. Modeli'nde ortalama, 1.05, standart sapma 0.12, Xiao ve Wu Modeli'nde ortalama, 0.87, standart sapma, 0.13, Lam ve Teng. Modeli'nde ortalama, 1.18, standart sapma, 0.13 değerleri bulunmuştur.

CFRP sargılı betonarme kolonlarda etriye etkisi dikkate alınarak ve etriye etkisi ihmal edilerek yapılan analizlerde; CFRP ile sargılamada sargı yanal basıncının, etriyelerce oluşturulan yanal basınca nispetle, beklenildiği gibi, çok yüksek olduğu görülmektedir; bunun pratik anlamı, betonarme etriyeler sargı etkisi oluşturacak mertebede sık ve yoğun olmadığı sürece, sargılama etkileri kabili ihmaldir.

5 SONUÇ ve ÖNERİLER

Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuarı'nda gerçekleşetirilen bu deneysel çalışmada; kare kesitli (a*a), yükseklik (h)/(a) oranı 5:1 olan klasik enine donatılı (etriyeli) betonarme kolonlarda LP'li sargının kolon davranışına etkisi incelenmiş, elde edilen sonuçlar ile literatürde bulunan çeşitli deneysel veriler temel alınarak LP sargılı betonarme kolon davranışı için önerilmiş başlıca bünyesel modeller karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1) Sargılı betonarme kolonlar için önerilen-r bünyesel modeller; bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen büyük ölçekli betonarme kolon deneylerinden elde edilen sonuçlar ile ve literatürde bulunan çoğunluğu küçük ölçekli beton silindirler numunelerde sargı (kuşatma) etkisini inceleyen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara paralel olarak, betonarme kolonlar için literatürde yer alan Köksal Beton Modeli (2006) LP sargılı kolonlara uyarlanmıştır.

2) Gerçekleştirilen bire bir ölçekli betonarme kolon deneylerinde; numunelerin dört yüzünden alınan LVDT okumalarında, beklenildiği gibi, ilk belirgin şekil değiştirmelerin ortaya çıktığı bölgeye bağlı olarak, bozulan geometrik ve mekanik simetrinin etkisiyle, farklılıkların belirginleştiği görülmüştür. Bu yüzden şekil-değiştirme ölçerlerin, şekil-değiştirmenin yoğunlaşacağı önceden tahmin edilen ve davranışı daha iyi bir şekilde karakterize edebilecek kritik bölgelere yerleştirilmesine özen gösterilmiş, LVDT'lerden aktarılan okumaların ortalamasının alınması yolu ile değerlendirmeler yapılması yoluna gidilmiştir. Bununla beraber bu husus ve ölçme tekniği modelleme açısından tartışmaya açıktır. Kolon orta bölgesine yerleştirilen LVDT okumalarının bünyesel davranışı gerçeğe yakın bir şekilde yansıttığı görülmüş ve FEA ile gösterilmiştir.

3) Betonarme enine donatıyla sargılı kolonlar, maksimum taşıma yüklerine ulaştıktan sonra, yükleme yapılmaya devam edilememiştir; bir başka anlatımla yükleme azalmaya başlayınca deneye son verilmiştir. Bu deneylerde beton kabuğun dökülmesi biçiminde taşıma gücüne ulaşma gözlenmiştir. Buna mukabil LP sargılı kolonlar, maksimum yük aşıldıktan sonra da yük almaya devam edebilmiştir. Bu numunelerde LP sargı bölgesel olarak kısmen yırtılsa da, diğer bölgelerdeki LP sargı çalışmaya devam ederek, göçmeyi belirgin şekilde geciktirmiştir.

KLP kompozit sargının betonarme kolonlarda taşıma gücünü artırarak ve beton ezilmesi ile donatı sıyrılmasından kaynaklanan erken dayanım düşmesini önleyerek önemli oranda sünek davranış sağladığı gözlenmiştir. KLP kompozit sargının betonarme kolonlar üzerinde oluşturduğu kuşatma etkisi ile klasik enine donatıların karşılamış olduğu yanal gerilme azalmakta ve beton bütünlüğü korunarak daha yüksek taşıma kapasitesine ve şekildeğiştirme kapasitesine ulaşılması sağlanmaktadır.

4) Literatürde kabul görmüş çoğu LP sargılı beton modelleri, genelde küçük boyutlu numuneler üzerinde yapılan deneylere dayanılarak geliştirilmiş modelerdir. Bu bağlamdaki önerilerin doğrudan yapı elemenları üzerinde yapılmış deneysel sonuçlarla zenginleştirilmesi arzu edilir. Bu çalışmada, sınırları yukarıda çizilmiş belirli bir alanda birebir ölçekli yapı elemanı deneyleri ile bu yapılmaya çalışılmıştır.

Mevcut LP sargılı kolonlar için geliştirilmiş bünyesel beton modelleri, bu deneylerdeki kolon numunelerine uygulandığında; gerilme-birim kısalma eğrilerine en yakın sonuçları, bu çalışmada **LP sargılı kolonlar için uyarlanan Köksal beton modeli** ile elde edilmiştir. Ayrıca, uyarlanan bu model, literatürde yer alan toplam 128 LP sargılı beton numunenin taşıma güçlerini tahmin etmede, diğer analitik modeller ile karşılaştırılmıştır. Deneyle tespit edilen taşıma güçleri önerilen analitik modelle bulunan taşıma gücüne bölünerek normalize edildiğinde; 1.03 ortalama ve 0.17 standart sapma değerleri ile "Köksal (2006) Modelinin LP sargılı betona uyarlanmış biçimi"nin iyi bir sonuç verdiği görülmüştür. Bu değerler, literatürdeki diğer modellerde; Saadatmanesh vd. (1994) için 1.00 ve 0.20, Samaan vd. (1998) için 1.15 ve 0.22, Saafi vd. (1999) için 1.22 ve 0.25, Xiao ve Wu (2003) için 0.97 ve 0.15, Lam ve Teng (2003) için 1.36 ve 0.29 dur.

Köksal Modeli (2006) kolon deneyleri için yaptığı tahminlerde 0.83ortalama ve 0.12 standart sapma göstermiştir. Farkın nedenlerinin; keskin köşelere sahip kolonlarda kuşatma etkisinin azalması ve yine etriye ve boyuna donatı ile birlikte çalıştırılan LP sargının davranışındaki değişiklikler olabileceği düşünülmüştür. Muhtemelen bu nedenlerle, elde edilen sonuçlar, 128 numune için elde edilenlere göre daha düşük taşıma gücü değerleri vermiştir.

5) Köksal Modeli (2006) FRP sargılı betonarme kolonlara uyarlanırken, sargı etkisi iki şekilde değerlendirilmiştir. İlk olarak etriye ve FRP sargı etkisi birlikte değerlendirilmiş, ikincisinde ise yanal sargılama (kuşatma) basıncı için sadece FRP sargı dikkate alınmıştır. Sonucun, beklenildiği gibi, sargılı kolon taşıma kapasitesi bakımından pratik olarak önemli bir fark

göstermediği görülmüştür; bunun pratik anlamı, FRP sargının oluşturduğu yanal basıncın betonarme eniye donatıca oluşturulan yanal basınca göre oldukça baskın olmasıdır. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.5'de yanal sargı basınçları özetlenmiştir.

6) C1L8S8 kolonu, C1L4S8 kolonuna göre %13.6 mertebesinde daha düşük bir yük taşıma kapasitesi göstermiştir. Boyuna donatı sayısının iki katına çıkartılmasının, beklendiğinin aksine taşıma gücüne olumlu yönde etki etmemiştir. Bunun; betona göre daha rijit bir malzeme olan çelik donatıların etrafında oluşan gerilme yığılmaları olabileceği düşünülmüştür. Böylelikle lokal olarak beton, çelik çubukların etrafında zayıflamakta ve bölgesel kırılmalara dolayısı ile kolonun taşıma gücüne erken ulaşmasına neden olmaktadır. Özellikle bu durumun sargı donatısının zayıf olduğu bölgede gerçekleşmesi beklenir. Buradan, kullanılan etriye çapı ile boyuna donatı sayısı ve çapı arasındaki ilişkinin kolonun taşıma gücünde etkili bir parametre olarak düşünülmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir

7) 5:1 (h/a) oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanların 2:1 oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanlara göre göçme yüküne ulaştıklarında kırılma biçimlerinde farklılık gösterdiği görülmüştür. Benzer sonuç, sonlu elemanlar ile modellenerek, doğrusal olmayan analiz yapıldığında; 5:1 oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanda üst çeyrek kısımda, 2:1 oranlı eksenel basınç etkisindeki elemanda ise orta kısımda maksimum gerilmeye zorlanarak göçme yüküne ulaştığı görülmüştür. Eksenel basınç altındaki betonarme çubukların davranışında ve kırılma biçiminde boyut (h/a) etkisinin önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

8) Çoğu araştırmacı, eksenel yük altındaki betonarme elemanlarda kırılma bölgesini kontrol altına alabilmek için, ya başlık kısımlarındaki sargıyı güçlendirmiş, ya da eleman orta bölgesindeki sargı etkisini zayıf tutmuştur. Ancak bu tarz bir yaklaşım, elemanın gerçek davranışının belirlenebilmesini mümkün kılmaktan öte, önceden belirli bir davranışa zorlar ki bu da betonarme üzerindeki belirsizliklerin ortadan kalkmasına yardımcı olamaz.

9) YTÜ Yapı Laboratuarı KLP sargılı kolon deneylerinde; duvar kağıdı gibi yüzeye sarılan KLP sargı üzerinden rulo ile geçerek aralarda hava boşluklarının kalması olabildiğince engellenmeye çalışıldı ise de, özellikle iki kat uygulanan KLP sargı işlemlerinde boşlukların kalmaması tam olarak sağlanamamıştır. Bazı araştırmacıların; sargı etkisini kısmen zayıflatan bu hava boşlukları bir ölçüde analitik modellerine yansıtmak amacıyla bir katsayı öngörmüş olsalar da, bu konuda yeterli çalışma olmadığı anlaşılmaktadır. Bu anlamda işçilik kusurlarını azaltmak amacıyla yeni teknikler geliştirilmesine ihtiyaç olduğu açıktır. Bununla beraber, bu

aşamada; birden çok katmanlı LP sargılı numunelerde oluşacak yanal kuşatma basıncının sargı katman sayısı ile orantılı olamayacağı söylenebilir.

10) KLP sargılı betonarme kolon deneylerinde; genel olarak sargının köşe noktalarda koparak yırtılması biçiminde taşıma gücüne ulaşma gözlenmiştir. Bu da göstermektedir ki; sargı işlemi öncesi dörtgen enkesitli kolonların kesit köşelerinin tavsiye edilen yarıçaplarda yuvarlatılmasına özen gösterilmesinin önemi açıktır.

KLP sargı işlemi; hızlı uygulanabilme avantajının yanında, işçilik bakımından titizlik ve teçrübe gerektirir. Uygulamalarda, gerekli verimi alabilmek için, uygulama tekniklerini bilen, ehil kişilere ihtiyaç vardır.

LP sargının sağladığı yukarıda işaret edilen dayanım ve süneklik artışı yanında, kolay ve hızlı uygulanabilirliği de göz önüne alındığında, yapı güçlendirmesinde belirgin bir etkinliğe sahip bir güçlendirme yöntemi olarak ilk sıralarda düşünülebileceği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.

ACI 440R-96 (1996) State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI) Committee 440, Farmington Hills, Michigan, USA.

ACI Committee 440 Report (2002). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" ACI Committee 440, Technical Committee Document 440.2R-02.

Ahmad, S.H., Khaloo, A.R., ve Irshaid, A. (1991), "Behaviour of Concrete Spirally Confined by Fiberglass filaments", Magazine of Concrete Research, v. 43, No. 156, pp. 143-148, Cement Concrete Assocation, London, UK.

Akgün, Ş., (2006), "Betonarme Kolonlarda Kuşatma Etkisi ve Sonlu Eleman Analizleri", YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Assa, B., Nishiyama, M., Watanabe F., (2001a), "New Approach for Modeling of Confinement I Circular Columns", ASCE Structural Journal, July.

Assa, B., Nishiyama, M., Watanabe F., (2001b), "New Approach for Modeling of Confinement I Square Columns", ASCE Structural Journal, July.

Bazănt, Z., P., Xiang., Y., (1997) "Size Effect in Compression Fracture: Splitting Crack and Band Band Propagation" J. Eng. Mech., Am. Soc. Civil Eng. 123:162-172

Berthet, J.F., Ferrier, E., Hamelin, P. (2005), "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study", Construction and Building Materials 19 ,pp. 223–232

Brocca. M., Bazănt, Z., P (2001) "Size Effect in Concrete Columns: Finite-Element Analysis with Microplane Model" J. Struct. Engrg., Volume 127, Issue 12, pp. 1382-1390

Campione, G., Miragia, N. (2003) "Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP", Cement and concrete Composites, 25: 31-41

Celep, Z (2000) "Mevcut Betonerme Binaların Deprem Güvenliğinin Belirlenmesi ve Güçlendirilmesi" TMMOB İnşaat mühendisleri odası, İstanbul şubesi

Chen, W.,F., Han D.J. (1988), "*Plasticity for Structural Engineers*" Springer-Verlag, New York.

Chung, H. S., Yang, K., Y., Lee., Y., H., ve Eun, H., C., (2002) "Strength and Ductility of Laterally Confined Concrete Columns" Can. J. Civ. Eng. 29: 820-830.

De Lorenzis L, Micelli F, La Tegola A. (2002), "Influence of specimen size and resin type on the behavior of FRP-confined concrete cylinders." In: Shenoi RA, Moy SSJ, Hollaway LC, editors, Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, Proceedings of the First International Conference, London, UK: Thomas Telford,:231 239

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2006), 26100 Sayılı Resmi Gazete

Dias da Silva V, Santos JMC.(2001). "Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites." In: Figueiras J, Juvandes L, Faria R, Marques AT, Ferreira A, Barros J, Appleton J, editors, Composites in Constructions, Proceedings of the International Conference, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, pp.257–262.

Doran, B., Köksal, H. O., Polat, Z. ve Karakoç, C. (1998), "Betonarme Elemanlarda Sonlu Eleman Uygulamalarında Drucker-Prager Akma Kriterinin Kullanılması" İMO Teknik Dergi, pp. 1617-1625, yazı 117.

Elmas, M., Çaglar, N. ve Mert, N. (1997), "Structural Behaviour of RC Beams Strengthened Glued with Epoxy of Thin Steel Plates", Proceedings of III. Technical Congress, Middle East Technical University, Vol. 3, pp. 763-772, 15-16 September 1997, Ankara.

İlki, A., Kumbasar, N.(2002), "Compressive Behaviour of Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets", Structural Engineering and Mechanics, Vol.13, No.1, pp.75-90

İlki, A., Kumbasar, N. (2003), "Compressive Behaviour of Carbon Fiber Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-Circular Cross-sections", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 381-406.

İlki, A., Kumbasar, N., Özdemir, P., Fukuta, T., (2004), "A Trilinear Stress-Strain Model for Confined Concrete", Str.Eng. and Mech., Vol. 18, No. 5, 2004, pp. 541-563

Fam, A.Z, Rizkalla, S.H. (2001), "Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes" ACI Struct J volume 98, no.4 , pp.451 –61.

Fardis, M. N. And Khalili, H. (1982), "Conrete encased in fiberglass-reinforced plastic", ACI Journal, vol.78, pp. 440-445.

Fardis, M.N. and Khalili, H. (1982), "FRP-encased Concrete as a Structural Material" Magazine of Concrete Research, 34(122): 191–202.

Harmon T.G., Slattery K.T. (1992), "Advanced Composite Confinement of Concrete" 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Sherbrooke, Québec, Canada. pp. 299-306.

Hognestad, E., (1951), "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", Bulletin Series No.399, University of Illinois Eng. Exp. Station, Urbana.

Karakoç, C., Polat, Z., Köksal, H.O., Turgay, T. ve Akgün, Ş. (2006), "Evaluation of Experimental Procedures for Confined Concrete Columns Using 3D Finite Element Analyses" Third International Conference on High Performance Structures and Materials, Wessex Institute of Technology Ostend: Belgium (to be printed in HPSM CMEM-2007)

Karamuk, E, (2005), "Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzeme ile Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların Eksenel Yükler Altında Davranışı" Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü

Karbhari, V. M. ve Gao, Y. (1997), "Composite jacketed concrete under unaxial compression-verification of simple design equations", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 185-193.

Kim, J., K. Ve Yi., S., T., (2002) "Application of Size Effect to Compressive Strength of Concrete Members", Sadhana Vol.27, Part 4 , August 2002, pp. 467-484. Printed in India.

Koç, V, (2004), "Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzemeler ile Güçlendirilmiş Düşük ve Normal Dayanımlı Beton Elemanların Davranışı", İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Kono S., Inazumi M., Kaku T.,(1998) Evaluation of Confining Effects of CFRP Sheets on Reinforced Concrete Members. Proceedings of the 2nd International Conference on composites in Infrastructure ICCI'98, 5-7 January . Tucson, Arizona. pp. 343-355

Köksal, H.O. (1998), "Modelling of Concrete Fracture" Doktora Tezi, Boğaziçi University, İstanbul.

Köksal, O., Doran, B., Polat, Z. ve Karakoç, C., (1998), "Betonarme Elemanlarda Yapılan Sonlu Elemanlar Uygulamalarında Drucker-Prager Akma Kriterinin Kullanılması", *Teknik Dergi (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayın Organı*, Vol. 9, No. 2, pp. 1617-1627, April.

Köksal, H. O. (2006), "A Failure Criterion for RC Members under Triaxial Compression, Structural Engineering and Mechanics", Techno Press 24(2): 137-154.

Kshirsagar, S., Lopez-Anido, R.A., Gupta, R,K., (2000), "Environmental aging of fiber-reinforced polymer-wrapped concrete cylinders." ACI Mater J;97(6):703 –12.

Kunduracı, L., (2004), "Betonarme Çerçeve Sistemlerin, Doğrusal Olmayan İtme Analizleri" YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,

Lam, L. And Teng, J. G. (2001a) "Strength models for FRP-confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Submitted.

Lam, L. and Teng, J.-G. (2002), "Strength Models for Fiber-Reinforced-Plastic-Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, 128 (5): 612–623.

Lam, L. and Teng, J.-G. (2003), "Design-oriented Stress-strain Models for FRP-confined Concrete" Construction and Building Materials, in press.

Lin, C.T., Li Y.F., (2003), "An effective peak stress formula for concrete confined with carbon fiber reinforced plastics", Canadian Journal of Civil Engineering, 30, pp.882-889

Lorenzis,L. (2001), "A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composite" Chalmers University.

Marques, S. P. C., Marques, D. C. S. C., Silva, J. L., and Cavalcante, M. A. A. (2004), "Model for Analysis of Short Columns of Concrete Confined by Fiber-Reinforced Polymer" Journal of Composites for Construction., Volume 8, No.4, pp. 332-340 (July/August)

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988), "Theoritical stress-strain model for confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988), "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, no. 8, pp. 1827-1849.

Masia., M.,J., Gale. T., N., Shrive., N., G., (2004) "Size Effect in Axially Loaded Square Section Concrete Prisms Strengthened Using Carbon Fibre Reinforced Polymer Wrapping" Can. J. Civ. Eng. 31: 1-13.

Matthys,S., Taerwe, L., Audenaert, K., (1999), "Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping" Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP-188, Farmington, Michigan, USA: American Concrete Institute, pp:217–229.

Matthys, S., Toutanji, H., Taerwe, L., (2006), "Stress–Strain Behavior of Large-Scale Circular Columns Confined with FRP Composites" J. Struct. Engrg., Volume 132, Issue 1, pp. 123-133

Micelli F, Myers JJ, Murthy S. , (2001), "Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP" Proceedings of CCC2001 International Conference on Composites in Construction, Porto, Portugal October 10-12.

Mirmiran, A. ve Shahawy, M. (1996), "A new concrete-Filled hollow FRP composite column", Composites: Part B, Vol. 27B, pp. 263-268

Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M. ve El Echary, H. (1998), "Effect of column parameters on FRP-confinede concrete", Joournal of Composites for Construction, ASCE, Vol.2, No. 4, pp.175-185.

Mirmiran, A., Shahawy, M. ve Samaan, M. (1999), "Strength and ductility of hybrid FRP-concrete beam-columns", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 1085-1093.

Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T. ve Kobayashi, A. (1999), "Strengthening Effects of Concrete Columns with Carbon Fiber Sheet" Transactions of The Japan Concrete Institute, 21: 143–150

Nanni, A. ve Bradford, N. M. (1995), "FRP Jacketed concrete under uniaxial compression" Construction and Building Materials, Vol.9, No.2, pp. 115-124, Elsevier Science Ltd., London, UK.

Nanni, A. ve Norris, M.S. (1995), "FRP Jacketed concrete under flexure and conbined flexure-compression", Construction and Building Materials, Vol. 9, No.5,pp. 273-281.

Ohno, S., Miyauchi, Y., Kei, T. ve Higashibata, Y. (1997), "Bond properties of CFRP plate joint", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Sapporo, Japan, pp.241-248.

Park, R. ve Paulay, T. (1975), "Reinforced Conrete Structures", John Wiley & sons, New York, USA.

Pessiki S, Harries KA, Kestner JT, Sause R, Ricles JM. (1997), "Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets" Journal of Composites in Constraction, ASCE Volume,5(4):237-45

Picher F., Rochette P., Labossiére P., (1996), "Confinement of Concrete Cylinders with CFRP" Proceedings of the 1st Composites in Infrastracture ICCI'96, 15-17 January. Tucson, Arizona. Pp.829-841.

Polat, Z., Doran, B., Köksal, H.O., (2000), "Drucker-Prager Akma Kriteri Kullanılarak Betonda Doğrusal Olmayan Davranışın İncelenmesi", YTÜD, Journal of Yıldız Technical Univercity, 2000-1, sf. 1-10. ISSN:1300-1220

Popovics, S. (1973), "A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 5, pp. 583-599.

Priestley, M. J. N., Seible, F. ve Calvi, G. M. (1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, New York, USA.

Purba, B.K. ve Mufti, A.A. (1999), "Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 26, pp. 560-596.

Restrepol, J.I. ve De Vino, B. (1996), "Enhancement of the Axial Load-capacity of Reinforced Concrete Columns by Means of Fiberglass-epoxy Jackets", In: El-Badry, M.M. (ed.), Proceedings, Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, pp. 547–690, Montreal, Canada.

Richart, F.E., Brandtzaeg, A. ve Brown, R.L. (1928), "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stress", University of Illinois, Engineering Experimental Station, Illinois, USA.

Richard, R M., ve Abbott, B. J. (1975), "Versatile elastic-plastic stress-strain formula" Journal of Engr. Mech., ASCE 101(4): 511-5.

Rochette, P. ve Labossiere, P. (2000), "Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites", Journal of Composites for Construction, ASCE, 4(3): 129–136.

Rousakis, T., (2001), "Experimental Investigation of Concrete Cylinders Confined by Carbon FRP Sheets, Under Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load." Research Report, Chalmers Univercity of Technology, Göteborg, Sweden.

Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. ve Li, M. W. (1994), "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 4, pp. 434-447.

Saafi, M., Toutanji, H. A. ve Li, Z. (1999), "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes", ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.

Saatçioğlu, M., Elnabelsy, G., (2001), "Seismic Retrofit of Bridge Columns with CFRP Jackets", Composites in Civil Engineering.No.1, pp.833-838.

Samaan, M., Mirmiran, A. ve Shahawy, M. (1998), "Model of Concrete Confined by Fiber Composites", Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(9): 1025–1031.

Saatçioğlu, M. (2002) "Yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde yeni yöntemler", Yapıların onarım ve güçlendirilmesi alanında yeni gelişmeler, İTÜ, 10 mayıs 2002:221-232

Samdani, S., (2003), "Analytical Study of FRP-confined Concrete Columns" A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of master of applied science in civil engineering (structures) Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Seible, F.,Priestley, M.J.N., Hegemier, G. A. ve Innamorato, D. (1997), "Seismic retrofit of RC columns with continous carbon fiber jackets", Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 1, No.2, pp. 52-62.

Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman, A.,(2000), "Test and modeling of carbon-wrapped concrete columns" Composites Part B, No. 31, pp.471 –80. Engineering, ASCE

Shehata, I.A.E.M, Carneiro, L.A.V., Shehata, L.C.D.,(2002), "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets" Mater Struct;35(1):50 –8.

Sheikh, Shamim A., Yau, Grace, (2002), "Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers", ACI Structural Journal, 99(1): 72-80.

Shrive,P.L., Azarnejad, A., Tadros, G., McWhinnie, C. ve Shrive, N.G. (2003), "Strengthening of concrete columns with carbon fibre reinforced polymer wrap". Can. J. Civ. Eng. 30(3): 543-554.

Söylemez, F., (2006), "Betonarme Kolonlarda Kuşatma Etkisi İçin Sonlu Eleman Modeli", YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Spoelstra, M.R. ve Monti, G. (1999), "FRP-confined Concrete Model" Journal of Composites for Construction, ASCE, 3(3): 143–150.

Tezcan, A., (2004), "Kolon Sarılma Bölgelerinin CFRP Kompozitler ile Güçlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Turgay, T., Köksal, H.O., Polat, Z., Karakoç, C. (2007), "Stress-strain Chracteristics of RC Columns Externally Confined with CFRP Jackets", International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-6, 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Catania, ITALY, June 17-22, 2007.

Toutanji, H.A. (1999), "Stress-strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", ACI Materials Journal, 96(3): 397–404.

Xiao, Y. ve Wu, H. (2000), "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 12(2): 139–146.

Watanabe, K.,Nakamura, H., Honda, Y., Toyoshima, M., Iso M., Fujinaki T., Kaneto M., Shirai, N. (1997), "Confinement Effect of FRP Sheet on Strengt h and Ductility of Concrete

Cylinders under Uni-axial Compression." In:Proceeding s of the Third International Symposium on Non-Metallic FRP for Concrete Structures, Japan,1997,pp.233-240

Wang, P., Cheong, K.K., (2001),"RC columns strengthened by FRP under uniaxial compression" In: Teng, JG, editor, FRP Composites in Civil Engineering, Proceedings of the International Conference, edited by Teng JG, Oxford, UK: Elsevier Science Ltd, pp.327–334.

Wang, Y.C. ve Restrepo, J. I. (2001), "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-reinforced Polymer Jackets", ACI Structural Journal, 98(3): 377–385.

William, K J., ve Warnke, E. P. (1975), "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete" Proc., International Association for Bridge and Struct. Engr., 19: 130.

Xiao, Y., Wu, H.., (2000), "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets" J Mater Civ Eng ASCE;12(2):139 –46.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.04.1974	
Doğum yeri	Bolu	
Lise	1985-1992	İzzet Baysal Anadolu Lisesi
Lisans	1993-1997	Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1997-2000	Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	2001- 2007	Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurumlar

1998-2001	Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Arş. Gör.
2001-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi, Arş. Gör.

0030754