

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**LP KOMPOZİTLER İLE KESİT BOY-EN ORANI ÜÇ OLAN
BETONARME DİKDÖRTGEN KOLONLARIN DEPREM DAVRANIŞININ
İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ŞENTÜRK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Ocak 2015

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**LP KOMPOZİTLER İLE KESİT BOY-EN ORANI ÜÇ OLAN
BETONARME DİKDÖRTGEN KOLONLARIN DEPREM DAVRANIŞININ
İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet ŞENTÜRK
802121025**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper İLKİ

Ocak 2015

İTÜ, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü'nün 802121025 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet ŞENTÜRK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**LP KOMPOZİTLER İLE KESİT BOY-EN ORANI ÜÇ OLAN BETONARME DİKDÖRTGEN KOLONLARIN DEPREM DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Alper İLKİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Şevket ÖZDEN**
Okan Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Ömer Tuğrul TURAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2015**





Tüm Sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimi en iyi şekilde gerçekleştirmeme ve bilime karşı doğru bir yaklaşımda bulunabilme özelliğini kazanmama yardımcı olan İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimde beni öğrencisi olarak kabul ederek son derece önemli projelerde yer almama olanak sağlayan, bilimi ve bilim dünyasını tanımama vesile olan danışman hocam Prof.Dr. Alper İlki'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden hiçbir konuda desteğini esirgemeyen İnş.Yük.Müh. Ali Osman Ateş, İnş.Yük.Müh. Hakan Saruhan ve Yrd.Doç.Dr. Hasan Özkaynak'a teşekkür ederim.

Deneyler süresince birlikte çalıştığımız, İnş.Yük.Müh. Mustafa Akbaba İnş.Yük.Müh. Ergün Binbir, İnş.Yük.Müh. Hamid Farrokh Ghatte'ye ve teknik ekibimiz Ahmet Şahin, Mahmut Şamlı, Ahmet Çakır'a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesini mümkün kılan TÜBİTAK'a, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine, numunelerin imalatı ve güçlendirilmesi sırasında önemli katkı sağlayan Akso, Akkim, Art-Yol, İston, Elvin firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatımca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, babama, anneme, ablalarım, ağabeyime, eşim Şeyma Şentürk ve ailesine sonsuz teşekkürler ederim.

Aralık 2014

Mehmet ŞENTÜRK
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SEMBOLLER.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması	5
2. NUMUNE VE MALZEME ÖZELLİKLERİ	9
2.1 Numune Tasarımı.....	9
2.2 Numune Üretimi.....	10
2.3 Şekil Değiştirme Ölçerlerin Yapıştırılması.....	13
2.4 Kalıp Hazırlanması ve Beton Dökümü.....	15
2.5 Numune Özellikleri	19
2.6 Karbon Lifli Polimer Uygulaması.....	24
2.7 Malzeme Özellikleri Ve Malzeme Deneyleri	26
2.7.1 Beton.....	26
2.7.2 Donatı	29
2.7.3 CFRP ile güçlendirmede kullanılan malzemeler.....	30
3. DENEY DÜZENEGİ	31
3.1 Yükleme Düzeneği ve Yükleme Adımları.....	31
3.2 Ölçüm Sistemi.....	34
4. DENEY SONUÇLARI.....	37
4.1 Deney Sonuçları	37
4.1.1 20x60_Ref numunesi.....	37
4.1.2 20x60_4N numunesi.....	43
4.1.3 20x60_4N_1A numunesi	51
4.1.4 20x60_4N_2A numunesi	59
4.2 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	67
5. ANALİTİK HESAPLAR	69
5.1 Malzeme Modelleme	69
5.1.1 20x60_Ref numunesi için malzeme modelleri.....	69
5.1.2 20x60_4N numunesi için malzeme modelleri	73
5.1.3 20x60_4N_1A numunesi için malzeme modelleri.....	76
5.1.4 20x60_4N_2A numunesi için malzeme modelleri.....	81
5.2 Moment – Eğrilik İlişkisi Karşılaştırılması	83
5.3 Plastik Mafsallı Modeli.....	85
5.4 Statik İtme Analizi Yaklaşımı İle Tepe Deplasmanı Hesabı	88
5.4.1 20x60_Ref numunesi için analitik hesaplar	90
5.4.2 20x60_4N numunesi için analitik hesaplar	90

5.4.3 20x60_4N_1A numunesi için analitik hesaplar.....	91
5.4.4 20x60_4N_2A numunesi için analitik hesaplar.....	91
6. SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	101



SEMBOLLER

A_e	: Etkili sargılanmış kesit alanı
A_v	: Bulon donatısı kesit alanı
b_c	: Kesit genişliği
d_c	: Kesit genişliği
d_b	: Boyuna donatı çapı
E_c	: Beton elastisite modülü
E_f	: Lifli polimer elastisite modülü
E_2	: Beton tanjant modülü
ϵ_{cc}	: Sargılı beton maksimum basınç dayanımındaki kısalma oranı
ϵ_{cu}	: Sargılı beton ezilme kısalması oranı
ϵ_f	: Lifli polimer kopma uzama oranı
ϵ_s	: Donatı çeliği şekil değiştirme oranı
$\epsilon_{s,Du}$	: Donatı çeliği basınç altındaki nihai kısalma oranı
ϵ_{yu}	: Bulon donatısı kopma uzama oranı
F	: Yatay yük
f'_{cc}	: Sargılı beton basınç dayanımı
f'_l	: Etkili yanal sargı basıncı
f_s	: Donatı çeliğinin gerilmesi
$f_{s,Du}$	: Donatı çeliğinin basınç altındaki nihai gerilmesi
f_y	: Donatı çeliğinin akma gerilmesi dayanımı
f_{yv}	: Bulon donatısı akma dayanımı
I_c	: Brüt betonarme kesitinin atalet momenti
κ_e	: Sargı etkinlik katsayısı
K_p	: Doğrusal limit sonrası eğrilik
L	: Kolon boyu
L_p	: Plastik mafsallık boyu
M	: Mesnet kesitinde oluşan moment
M_{sp}	: Kabuk dökülmesi anındaki moment
n_f	: Lifli polimer sarım sayısı
σ_{kabuk}	: Kabuk betonu gerilmesi
s	: Bulon donatıları arasındaki mesafe
s_b	: Boyuna donatı serbest boyu
s_f	: Lifli polimer şeritler arası mesafe
ρ_e	: Dönüştürülmüş etkili sargı bileşenleri
t_f	: Lifli polimer kumaş kalınlığı
U_y	: Doğrusal tepe yer değiştirmesi
U_p	: Doğrusal olmayan tepe yer değiştirmesi
w_f	: Lifli polimer şerit genişliği
ω'_i	: Dönüştürülmüş etkili sargı bileşenleri
V	: Taban kesme kuvveti



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Numune özelliklerini gösteren tablo.....	19
Çizelge 2.2 : Temel betonu karışım oranları.....	27
Çizelge 2.3 : Kolonlara ait beton karışım oranları.....	27
Çizelge 2.4 : Betonun farklı yaşlardaki mekanik özellikleri.....	29
Çizelge 2.5 : FRP özellikleri.....	30
Çizelge 4.1 : ± 0.0075 ve ± 0.01 adımları arasında çatlak gelişimleri.....	37
Çizelge 4.2 : ± 0.0075 ile ± 0.03 adımları arasında çatlak gelişimleri.....	44
Çizelge 4.3 : ± 0.005 ile ± 0.040 adımları arasında çatlak gelişimleri.....	52
Çizelge 4.4 : ± 0.06 ile ± 0.08 adımları arasında çatlak gelişimleri.....	52
Çizelge 4.5 : ± 0.005 ile ± 0.040 adımları arasında çatlak gelişimleri.....	60
Çizelge 4.6 : ± 0.06 ile ± 0.08 adımları arasında çatlak gelişimleri.....	60
Çizelge 5.1 : Lifli polimer şerit sargı ve bulonlu beton modeli sembolleri.....	79
Çizelge 5.2 : Numuneler için hesaplanan plastik mafsallık boyları.....	87
Çizelge 5.3 : Nihai göreceli ötelenmede plastik mafsallık bölgesi şekil değiştirmeler.....	87



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Etkin sargılanmış kesit alanları.	3
Şekil 2.1 : 20x60 cm en kesitli kolonlar için boyutlar ve donatı detayları.	11
Şekil 2.2 : Donatı iskeleti.	12
Şekil 2.3 : Donatıların üzerindeki pasın zımpara yardımı ile temizlenmesi.	13
Şekil 2.4 : Şekil değiştirme ölçerlerin yapıştırılması.	14
Şekil 2.5 : Şekil değiştirme ölçerlere N-1 sürülmesi ve VM bant yapıştırılması.	14
Şekil 2.6 : Temel kalıplarının çakılması ve donatı iskeletlerinin yerleştirilmesi.	15
Şekil 2.7 : Temel kalıplarının çakılması ve donatı iskeletlerinin yerleştirilmesi.	15
Şekil 2.8 : PVC boruların temel içerisine yerleştirilmesi.	16
Şekil 2.9 : Beton dökümü.	16
Şekil 2.10 : Deney numuneleri ile aynı ortamda saklanan beton numuneleri.	17
Şekil 2.11 : Deney numunesi kürlenmesi.	17
Şekil 2.12 : Kolon kalıplarının hazırlanması.	18
Şekil 2.13 : Kolon betonu dökümü.	18
Şekil 2.14 : Çift sıra uygulanmış bulonlar.	20
Şekil 2.15 : 20x60_4N numunesi için güçlendirme uygulaması detayı.	21
Şekil 2.16 : 20x60_4N_1A numunesi için güçlendirme uygulaması detayı.	22
Şekil 2.17 : 20x60_4N_2A numunesi için güçlendirme uygulaması detayı.	23
Şekil 2.18 : Karbon lifli polimer kompozit uygulaması.	25
Şekil 2.19 : Karbon lifli polimer kompozit uygulaması.	26
Şekil 2.20 : 28 günlük beton numuneleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.	28
Şekil 2.21 : 180 günlük beton numuneleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.	28
Şekil 2.22 : Çelik çekme deneyi.	29
Şekil 2.23 : 14 mm çapında donatıya ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı.	30
Şekil 3.1 : Deney düzeneği.	31
Şekil 3.2 : Deney düzeneğinin üç boyutlu görüntüsü.	32
Şekil 3.3 : Ölçüm aletlerinin yerleşimi.	34
Şekil 4.1 : ± 0.005 görelî ötelemede çatlak oluşumu.	38
Şekil 4.2 : ± 0.0075 görelî ötelemede çatlak oluşumu.	39
Şekil 4.3 : ± 0.01 görelî ötelemede çatlak oluşumu.	39
Şekil 4.4 : $+0.015$ görelî ötelemede çatlak oluşumu.	39
Şekil 4.5 : $+0.015$ görelî ötelemede çatlak oluşumu.	40
Şekil 4.6 : $+0.02$ görelî ötelemede çatlak genişlikleri ve hasar durumu.	40
Şekil 4.7 : $+0.02$ görelî ötelemede çatlak genişlikleri ve hasar durumu.	40
Şekil 4.8 : $+0.025$ görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.	41
Şekil 4.9 : -0.025 görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.	41
Şekil 4.10 : $+0.03$ görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.	41
Şekil 4.11 : -0.03 görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.	41
Şekil 4.12 : Yatay yük sıfırken kalıcı yer değiştirme 54.2 mm.	42
Şekil 4.13 : Yatay yük sıfırken hasar durumu.	42
Şekil 4.14 : Yük-yer değiştirme ilişkisi.	43
Şekil 4.15 : Numuneye ait genel görüntü.	45

Şekil 4.16 : ± 0.005 görelî ötelemede oluşan ilk çatlaklar.	46
Şekil 4.17 : $+0.015$ görelî ötelemede hasar durumu.	46
Şekil 4.18 : -0.015 görelî ötelemede hasar durumu ve ilk basınç çatlakları.....	46
Şekil 4.19 : $+0.03$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu....	47
Şekil 4.20 : -0.03 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu....	47
Şekil 4.21 : $+0.035$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	47
Şekil 4.22 : -0.035 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	48
Şekil 4.23 : ± 0.035 görelî ötelemede itme ve çekmede numunenin genel durumu. ...	48
Şekil 4.24 : $+0.04$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	48
Şekil 4.25 : -0.04 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	49
Şekil 4.26 : -91.6 mm(-0.044 görelî) yer değiştirmede hasar durumu.	49
Şekil 4.27 : Yatay yük sıfır, kalıcı yer değiştirme 69.3 mm.	50
Şekil 4.28 : Kalıcı yer değiştirmede hasar durumu.	50
Şekil 4.29 : Numuneye ait yük-yer değiştirme diyagramı.....	51
Şekil 4.30 : Numuneye ait genel görüntü.	53
Şekil 4.31 : ± 0.0025 görelî ötelemede oluşan ilk çatlaklar.	54
Şekil 4.32 : $+0.02$ görelî ötelemede hasar durumu.	54
Şekil 4.33 : -0.02 görelî ötelemede hasar durumu ve ilk basınç çatlakları.	54
Şekil 4.34 : $+0.040$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu. ...	55
Şekil 4.35 : -0.04 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu....	55
Şekil 4.36 : $+0.05$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu....	55
Şekil 4.37 : -0.05 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	56
Şekil 4.38 : $+0.07$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	56
Şekil 4.39 : -0.07 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	56
Şekil 4.40 : ± 0.08 görelî ötelemede itme ve çekmede genel görünüş.....	57
Şekil 4.41 : $+0.08$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	57
Şekil 4.42 : -0.08 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	57
Şekil 4.43 : Yatay yük sıfır, kalıcı yer değiştirme 80.4 mm.	58
Şekil 4.44 : Kalıcı yer değiştirmede hasar durumu.	58
Şekil 4.45 : Numuneye ait yük-yer değiştirme diyagramı.....	59
Şekil 4.46 : Numuneye ait genel görüntü.	61
Şekil 4.47 : ± 0.0025 görelî ötelemede oluşan ilk çatlaklar.	61
Şekil 4.48 : $+0.02$ görelî ötelemede hasar durumu.	62
Şekil 4.49 : -0.02 görelî ötelemede hasar durumu ve ilk basınç çatlakları.....	62
Şekil 4.50 : $+0.040$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu. ...	62
Şekil 4.51 : -0.04 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu....	63
Şekil 4.52 : $+0.05$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu....	63
Şekil 4.53 : -0.05 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	63
Şekil 4.54 : $+0.07$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	64
Şekil 4.55 : -0.07 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	64
Şekil 4.56 : $+0.08$ görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.	64
Şekil 4.57 : -0.08 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.	65
Şekil 4.58 : ± 0.08 görelî ötelemede itme ve çekmede genel görünüş.....	65
Şekil 4.59 : Kalıcı yer değiştirmede hasar durumu.	65
Şekil 4.60 : Yatay yük sıfır, kalıcı yer değiştirme 104 mm.	66
Şekil 4.61 : Numuneye ait yük-yer değiştirme diyagramı.....	67
Şekil 4.62 : Deneyisel yük–yer değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.	68
Şekil 5.1 : 20×60 _Ref numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.	70
Şekil 5.2 : Sargılı ve sargısız beton için Mander modeli.	70
Şekil 5.3 : Pekleşmeli elastoplastik çelik donatı modeli.	71

Şekil 5.4 : Burkulmalı donatı çeliği modeli.....	71
Şekil 5.5 : 20x60_Ref numunesi için donatı çeliği modeli.....	72
Şekil 5.6 : 20x60_Ref numunesi moment-eğrilik ilişkisi.....	72
Şekil 5.7 : 20x60_4N numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.....	73
Şekil 5.8 : Lifli polimer sargılı beton için İlki modeli.....	73
Şekil 5.9 : LP sargılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	74
Şekil 5.10 : İlkimodel programı ekran görüntüsü.....	74
Şekil 5.11 : 20x60_4N numunesi temsili plastik mafsallık bölgesi.....	75
Şekil 5.12 : 20x60_4N numunesi için donatı çeliği modeli.....	75
Şekil 5.13 : 20x60_4N numunesi moment-eğrilik ilişkisi.....	76
Şekil 5.14 : 20x60_4N_1A numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.....	76
Şekil 5.15 : Bulonlu kesit ile bulonsuz etkin sargılanma bölgeleri.....	77
Şekil 5.16 : Bulonsuz kesit etkin sargılanan beton hacimleri 3B görünümü.....	77
Şekil 5.17 : Bulonlu kesit etkin sargılanan beton hacimleri 3B görünümü.....	78
Şekil 5.18 : 20x60_4N_1A için sargılı beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	80
Şekil 5.19 : 20x60_4N_1A numunesi moment-eğrilik ilişkisi.....	80
Şekil 5.20 : Tek sıra ve çift sıra bulonlu numuneler için sargılanmış kesitler.....	81
Şekil 5.21 : 20x60_4N_2A numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.....	82
Şekil 5.22 : 20x60_4N_2A için sargılı beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	82
Şekil 5.23 : 20x60_4N_2A numunesi moment-eğrilik ilişkisi.....	83
Şekil 5.24 : Numuneler için moment-eğrilik ilişkisi karşılaştırılması.....	84
Şekil 5.25 : Tek sıra ve çift sıra bulonlu numunelerde tarafsız eksen değişimi.....	84
Şekil 5.26 : Plastik mafsallık oluşumu.....	85
Şekil 5.27 : Mesnet kesiti akma momentine ulaştığı andaki ideal durum.....	86
Şekil 5.28 : Potansiyel plastik mafsallık bölgesi ölçüm sistemi.....	88
Şekil 5.29 : Konsol elemanın doğrusal ve doğrusal olmayan davranışı.....	89
Şekil 5.30 : 20x60_Ref için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.....	90
Şekil 5.31 : 20x60_4N için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.....	90
Şekil 5.32 : 20x60_4N_1A için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.....	91
Şekil 5.33 : 20x60_4N_2A için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.....	91



LP KOMPOZİTLER İLE KESİT BOY-EN ORANI ÜÇ OLAN BETONARME DİKDÖRTGEN KOLONLARIN DEPREM DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Ülkemizdeki mevcut betonarme yapıların önemli bölümünün depreme dayanıklı şekilde inşa edilmemiş olduğu bilinmektedir. En önemli eksikliklerin başında, deprem etkileri altında yapıların en hayati taşıyıcı elemanları olan kolonlarında enine donatının yetersizliği olduğu daha önce yaşanmış olan depremlerde gözlemlenmiştir. Bu yetersizlik, deprem sırasında sünek davranış göstereceği öngörülmüş olan kolonların gevrek şekilde hasar görmesine neden olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında uzun kenarının kısa kenarına oranı 3 olan düşük dayanımlı ve düşük sünekliğe sahip dikdörtgen kolonların dıştan enine doğrultuda karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) ile sargılanarak ve/veya kısa kenar doğrultusunda dıştan düzenlenen çelik bulonlar ile sünekliğinin ve dayanımının artırılması yoluna gidilmiştir. Çalışma kapsamında 1 adet referans kolon, 1 adet karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) ile sargılanmış ve 2 adet karbon lifli polimer kompozitler (CRFP) ve enine bulonlar ile güçlendirilmiş kolon, sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında test edilmiştir.

Ülkemizdeki mevcut betonarme yapılar için ortalama beton basınç dayanımı 10 MPa düzeyinde olduğu için numunelerin beton basınç dayanımlarının da 10 MPa civarında olması hedeflenmiştir. Benzer şekilde mevcut yapı kolonlarında sıklıkla karşılaşılan yetersiz enine donatı bulunması durumu da numunelere yansıtılmıştır. Ülkemizde gerçekleştirilen yapı imalatlarında düz yüzeyli donatılar doksanlı yılların sonuna kadar yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Bu nedenle numune imalatında boyuna ve enine donatılar için düz yüzeyli donatıların kullanılmasının ülkemizdeki mevcut yapıların kolonlarını daha iyi temsil edeceği düşünülmüştür.

Sabit düşey kuvvet ile yön değiştiren tekrarlı yatay yer değiştirmeler altında gerçekleştirilen deneyler sonrasında kesit boy-en oranı 3 olan referans kolonun (güçlendirilmemiş) kritik kesitinde betonun ezilmesi ve boyuna donatıların burkulması sonucu erken dayanım kaybına uğradığı görülmüştür. Kolonlara uygulanan düşey yük düzeyi kolonların eksenel yük kapasitelerinin yaklaşık %40'ına ($0,4f'_{co}bh$) karşılık gelmektedir. Kolon eksenel yük kapasitesi, betonun karakteristik basınç dayanımı 10 MPa (beton için öngörülen karakteristik basınç dayanımı) kabul edilerek ve donatının katkısı ihmal edilerek hesaplanmıştır. Referans numunelerin bu zayıf performanslarına karşılık farklı detaylar ile karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) ve kısa doğrultu boyunca düzenlenen çelik bulonlar ile güçlendirilmiş numunelerin süneklik açısından belirgin şekilde daha iyi davranış sergilediği görülmüştür. Referans numune yaklaşık %2 yatay öteleme oranında büyük dayanım kayıpları yaşarken, güçlendirilmiş numuneler %4 ila %8 ötelenme oranlarına kadar dayanımlarını korumuştur. Çalışmanın teorik bölümünde, literatürde mevcut olan davranış modellerinin kullanılması ile gerçekleştirilen analitik hesaplarla gerek güçlendirilmemiş, gerekse

güçlendirilmiş kolonların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışı oldukça gerçekçi şekilde belirlenmiştir.

Sonuç olarak, gerek deneysel, gerekse teorik bulgular, şu an için ilgili yönetmeliklerin izin vermediği, uzun dikdörtgen kolonlarda da araştırılan güçlendirme yönteminin etkin olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Buna göre, bu çalışmada sunulan ve deneylerle desteklenmiş analitik yaklaşımlar ile lifli polimer kompozitler ve kolonun kısa doğrultusunda uygulanan çelik bulonlar ile güçlendirilmiş kolonlar için tasarımın yapılmasına olanak sağlanmış olmaktadır. Dikkat çekilmesi gereken iki nokta vardır. Birincisi, deneylerin ve teorik hesapların kolonların güçlü eksenleri doğrultusu için yapılmış olmasıdır. İkinci önemli nokta, elde edilmiş olan sonuçların en kesit boyut oranlarının 3'ün üzerinde olduğu durumlarda geçerli olmayabileceğidir.



SEISMIC RETROFIT OF RECTANGULAR RC COLUMNS WITH CROSS-SECTIONAL ASPECT RATIO OF THREE USING FRP SHEET

SUMMARY

It is believed that earthquake is the most damaging natural calamity in the world. It causes both loss of property and life due to structural collapse. High percentage of the territory of Turkey is at high earthquake risk. In 1999 Kocaeli earthquake, 17,127 people lost their lives, 43,953 people injured. In 1939 Great Erzincan earthquake, 32,962 people lost their lives. This shows that earthquake resistant buildings have to be designed and constructed and existing non-resistant old buildings have to be retrofitted or rebuilt in our country.

It is well known that a great majority of existing structures in Turkey has not been constructed properly. Insufficient transverse reinforcement is among most common weaknesses of columns, which are vital structural members, against earthquakes. This weakness causes brittle behavior of structural members during earthquakes.

There are limited number of research projects about 2, 3 or more than 3 aspect ratio columns' seismic performance. In particular, it could not be come across a research project that investigate seismic performance of columns with structural deficiencies like high aspect ratio, high axial load, low concrete quality, low volumetric ratio of transverse bars, 90° transverse hoop's hook angle etc. at the same time as the buildings of our country have.

In this study, reinforced concrete columns with cross-sectional aspect ratios of 3 which are retrofitted by using lateral carbon fiber reinforced polymers sheets and/or laterally applied external steel rods are tested under constant axial load and reversed cyclic lateral incremental displacements. Tests are taken place as displacement-controlled. Lateral displacements are performed by using hydraulic actuator. This loading system is for simulating seismic scenario of structural columns. Specimens are tested before and after retrofitting with carbon fiber reinforced polymer composites and/or lateral steel rods applied in the direction of short edge of the columns. A reference column and three retrofitted columns are tested within this study.

For representing the typical construction method for existing relatively old building in our country, poor concrete quality and plain round reinforcing bars are intentionally selected for design and construction of the specimens. Concrete compressive strength in this study is about 11 MPa at the times of tests. Reinforcing steel yield strength is 310 MPa and ultimate tensile stress is 430 MPa. 20 cm transverse bar spacing is selected to represent low confining of columns of existing old buildings. Hook length and hook angle of transverse hoops are 10 cm and 90°, respectively. All columns are subjected to high constant vertical load (approximately 40% of the axial load capacity of the columns, $0,4f'_{co}bh$) throughout application of reversed cyclic lateral displacements representative of seismic actions.

The reference specimens exhibited premature failure through crushing of concrete in compression zone followed by buckling of longitudinal bars in compression. On the other hand, the retrofitted columns exhibited a much superior seismic performance,

particularly in terms of ductility. While the reference column lost high percent of its strength at around the drift ratio of 2%, the retrofitted specimens could reach drift ratios between 4 to 8% depending on the application details of retrofitting. Even specimen retrofitted with FRP strips is more ductile than reference specimen. It should be noted that based on unavailability of sufficient experimental data, existing technical documents limit the use of external fiber reinforced polymer jacketing to columns with maximum cross-sectional aspect ratio of 1,5~2,0. This study clearly demonstrates that columns with cross-sectional aspect ratios of 3 can significantly benefit from external confinement with fiber reinforced polymer jacketing.

In order to compose a design algorithm, analytical studies were performed. For the analytical calculation, existing material model and a plastic hinge model proposed in this study. For reference specimen, which has no FRP jacket, unconfined and confined concrete model proposed by Mander et al. (1988) is used. In order to determine stress-strain relationship of column confined with FRP strips, compressive behavior of carbon fiber composite jacketed concrete model proposed by Ilki et al.(2004) is used. For modelling the behavior of specimens strengthened by using both fiber reinforced polymers and steel rods in the direction of short edge of the section, a confined concrete model suggested by Galala, Arafa ve Ghobarah (2005) is used. Because of the fact that this model takes contributions of both FRP and rods into account, it is preferred. Steel stress-strain model proposed by Yalcin and Saatcioglu (2000) which includes the effects of buckling for compressive behavior of steel is used for determining steel behavior of the specimens.

By using evaluated material models, cross-sectional analysis is performed with computer software called XTRACT. This software uses the fiber approach to solve equilibrium equations of the section and incremental parameter is moment. The software keep axial load constant and increase moment monotonically. By using this software, moment-curvature relationship of the sections are obtained to calculate plastic hinge lengths and hence top displacements of the specimens.

Plastic hinge model proposed in this study is based on yield moment capacity of the specimens. Under the assumption that longitudinal bars buckle at where cover concrete is crushed and plastic deformations are formed at that zone.

In order to calculate the top displacement-lateral force relationship, a method based on superposition of elastic and plastic top displacement is used. Gross concrete section inertia moment and elasticity modulus of the concrete are used for the calculations. Determining the elastic top displacements is performed under the assumptions that confinement effects is negligible, contribution of steel to inertia moment is neglected and elastic deformations are distributed to whole length of the column. Determining the plastic top displacement of the specimens is performed under the assumptions that plastic deformations are formed at only plastic hinge zone uniformly and rest of the column is not deformed.

Analytical studies showed that calculated results and test results are consistent in acceptable range. Therefore, calculation algorithm represented in this study can be executed by using some safety coefficients to design retrofitted structures. Furthermore, it is observed after analytical calculation that strength and ductility characteristics of reference and retrofitted by fiber reinforced polymers strips jacketed columns can be predicted quite accurately using available analytical models.

As a conclusion, experimental and analytical results show that there is necessity to research seismic performance of the columns which are subjected to high axial load.

Plus, it is clearly seen in this study that deformation limits for life safety state in relevant codes are quite conservative for not only non-retrofitted but also retrofitted columns. Detailed after studies may provide chance to revise codes, guides or other technical documents.

As another conclusion, the retrofit design of high aspect ratio rectangular columns using external jacketing with fiber reinforced polymer composites can be executed using the analytical approach presented in this study. It is important to emphasize that the obtained results are valid for the range of parameters tested within this study. Therefore, the conclusions may not be valid for columns with cross-sectional aspect ratios more than 3. Similarly, it is important to highlight that the tests and theoretical analyses are carried out for the seismic actions in the strong direction of the columns, which are normally expected to be subjected to higher seismic demands during earthquakes. Therefore, the examination of the behavior around weak axis is outside the scope of this study.





1. GİRİŞ

Tarih boyunca meydana gelen şiddetli depremlerde büyük can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Özellikle ülkemizdeki mevcut yapılar gözlemlendiğinde olası büyük depremlerde can ve mal kayıpları kaçınılmazdır. Öyle görünüyor ki ülkemizde mevcut yapıların büyük çoğunluğunda güçlendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizdeki mevcut yapılar incelendiğinde, bu yapıların çoğunun mühendislik hizmeti almadığı, gerekenden daha küçük boyutlu taşıyıcı elemanlarla kalitesiz ve standardı olmayan betonlarla üretildiği, donatılarının istenilen miktar ve nitelikte olmadığı, özellikle sıklaştırma bölgelerinde yeterli enine donatıya sahip olmadığı görülmektedir. Tüm bu eksikliklerden dolayı mevcut yapı elemanları ve dolayısıyla mevcut yapı sistemleri depremlerde oluşan tekrarlı yükler altında basınç bölgesinde betonun ezilmesi ve donatının burkulmasıyla gevrek davranış göstererek ani göçmelere sebep olmaktadır.

Yeniden yapım maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, büyük bir bölgeyi ve çok sayıda binayı etkileyen 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sonrasında ülkemizde güçlendirme uygulamaları daha yaygın hale gelmiştir. 2007’de yürürlüğe giren “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” ile güçlendirilecek binaların hesabında kullanılacak yöntemler yönetmeliğe dâhil edilerek bu güçlendirme çalışmaları daha sistematik bir hale getirilmiştir.

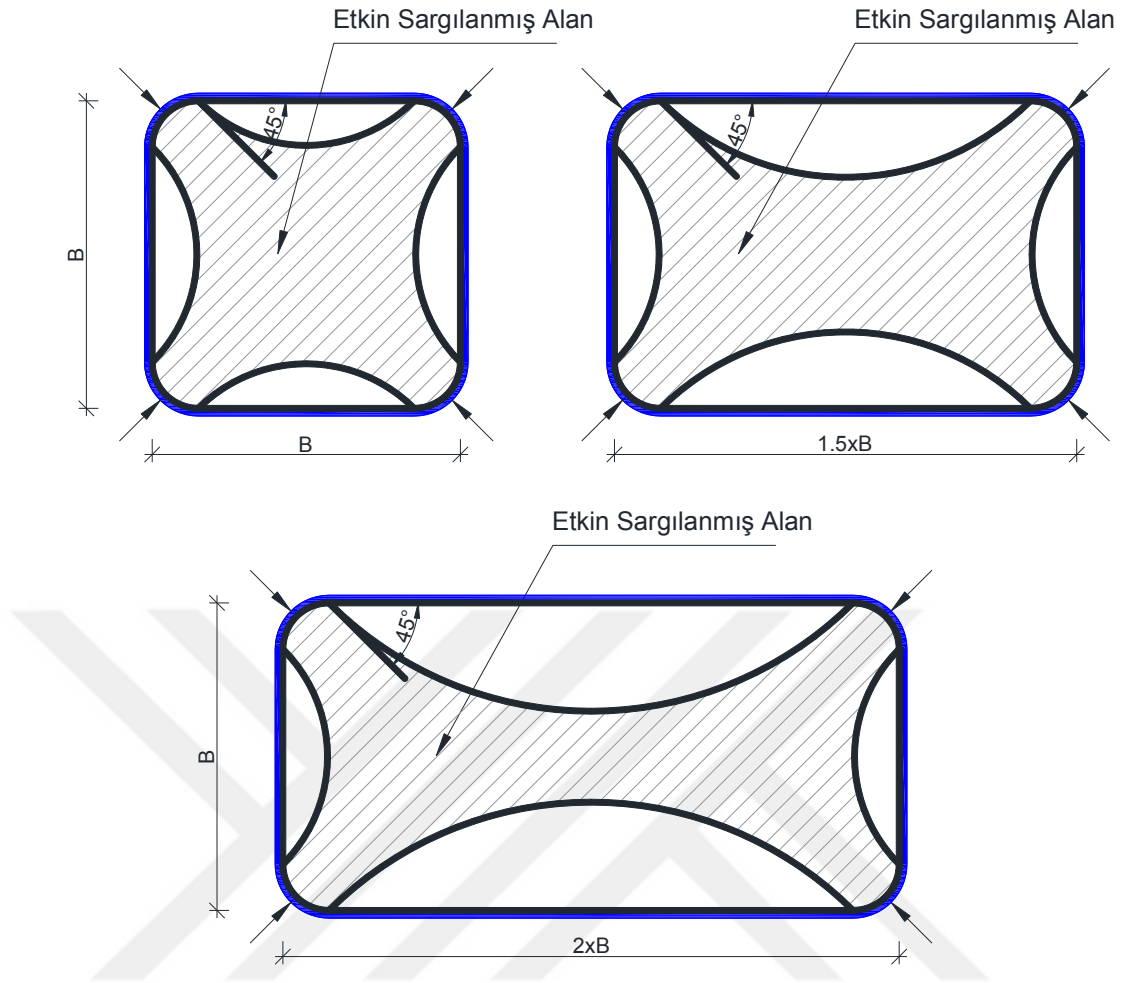
Depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkeleri göz önünde bulundurulduğunda binaların önemine göre belli oranda elastik ötesi hasar almasına müsaade edilir. Bu durumda can güvenliğini sağlamak için yapı elemanlarının ve yapının beklenen elastik ötesi davranışı yapabilmesi için sünek davranması ve elastik ötesi davranışın sınırlandırılması için yeterli yanal rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Yapının yanal rijitliğinin yeterli olmadığı durumlarda taşıyıcı sistem sünek davranırsa dahi ikinci mertebe etkilerden dolayı toptan göçme yaşanabilir. Bu sebeple taşıyıcı sistemin yanal rijitliğini arttırmak için taşıyıcı sistemde uygun yerlere rijit betonarme perdeler veya çelik çaprazlar eklenerek yer değiştirmeler kısıtlanabilir. Taşıyıcı sistemin yeterli yanal rijitliğine sahip olduğu durumlarda ya da sistemin yanal rijitliğini arttırmak üzere

yapılması gereken güçlendirilme ile birlikte ihtiyaç duyulan elemanlarda, eleman bazında güçlendirmeler yapılarak taşıyıcı sistem elemanlarının dayanımı, sünekliği ve rijitliği gibi özelliklerinden bir veya birkaç tanesi geliştirilebilir.

Geleneksel yöntemler olarak sınıflandırabileceğimiz betonarme manto ile güçlendirme ve çelik profillerle güçlendirme teknikleri uzun süredir yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlere göre daha yeni bir teknoloji olan karbon, cam veya aramid lif takviyeli polimer kompozitlerin onarım ve güçlendirme amaçlı kullanımı ise gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle kolonlarda dıştan sargılama yapmak için kullanılarak yetersiz enine donatı sonucu düşük olan kesme kuvveti dayanımı ve sünekliğin artırılmasında kullanılan lifli polimer kompozitler eleman bazında güçlendirme yapmak için basit, hızlı ve binanın kullanımını diğer yöntemlere göre daha az etkileyen bir yöntemdir. Önceki yıllarda, ekonomik olmayan karbon lifli polimer(LP) kompozitlerin uygulamaları günden güne daha yaygın kullanılması ve ülkemizde de üretilmeye başlamasından dolayı ekonomik açıdan diğer yöntemler ile rekabet edebilir düzeylere gelmiştir.

Kolonların sargılanarak, dayanım ve sünekliklerinin artırılması kesit geometrisi açısından değerlendirildiğinde, dairesel ve küçük kesitli kolonlarda daha etkili iken, kolon boyutları büyüdükçe bu etki azalmaktadır. Bunun yanı sıra, dikdörtgen kolonlarda kesit derinliğinin genişliğine oranı (h/b) arttıkça, kesitin etkin sargılanan bölgesinin kesit alanına oranı azalmaktadır(Şekil 1.1). Bu nedenle LP kompozitler ile güçlendirmeyi konu alan yönetmelikler kesit kenar oranlarının 1.5 ya da 2 değerini aşması durumunda dıştan LP kumaş sargılamasına izin vermemektedir. Kesit boy/en oranını sınır değerlerden fazla olması durumlarında yönetmelikler yapılacak sargılamanın etkinliğinin özel olarak araştırılıp, ispatlanarak uygulanmasını istemektedir. Genellikle, ülkemizdeki mimari tasarımlarda, kolonların bir kenarının duvar içinde kalması için, kolonun bir boyutu yaklaşık duvar kalınlığında sabit tutulup diğer boyutunun statikçe gerektiği kadar büyütülmesi yoluna gidilmektedir. Bu yaklaşım sonucu sıklıkla kullanılan, örneğin 25x60, 30x70, 30x90 cmxcm boyutlarında kolonlarda, kesit kenar oranlarının 1.5 ve/veya 2 sınırını aşması söz konusudur.

LP kumaş sargılamanın etkinliği geometrinin yanı sıra beton dayanımına da bağlıdır. Özellikle ülkemizdeki mevcut yapılarda olduğu gibi, beton kalitesinin düşük olduğu durumlarda, LP kompozitler ile yapılan sargılamanın etkinliği artmaktadır.



Şekil 1.1 : Etkin sargılanmış kesit alanları.

On yıldan fazla süredir İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda LP kompozitlerin yapıların güçlendirilmesinde kullanımı üzerine sadece aksel kuvvetlere maruz elemanlarda kenar oranlarının 1.5, 2 ve 3 olan durumlar incelenmiş, bu kesit oranlarında da özellikle süneklikte önemli gelişmeler sağlanabileceği görülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada kesit boyut oranları 3 (20x60) olan ve düşey yükler nedeni ile oluşan aksel yüklerin, ülkemizdeki pek çok mevcut yapıda olduğu gibi, yüksek olduğu (%40 x kolon aksel yük kapasitesi) betonarme kolonların dıştan LP kumaşlar ile sargılanması sonrasında düşey yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yer değiştirmeler altında deneye tabi tutulması ve kolonların davranışlarının incelenmesi, teorik olarak açıklanıp, güçlendirme tasarımı için hesap algoritmasının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Önerilen çalışmada, literatürde çok az görülen büyük ölçekli ve dikdörtgen kesitli kolon numunelerinin dıştan lifli polimer kumaş ile sargılanması ve bu sargılamanın betonarme kolonların eğilme performansına etkisi deneysel ve analitik olarak incelenecektir. Ayrıca, bu çalışmada ülkemizde sıklıkla rastlanılan kesit kenar oranları 3 olan kolonların davranışı incelenecektir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007) bölüm 7E.2 ve 7E.3'te lifli polimer kompozitlerle dıştan sargılama yaparak dairesel olmayan kolonların aksenal basınç dayanımı ve sünekliğinin arttırılmasında kesit boy-en oranını 2 ile sınırlandırmıştır. Aynı şekilde, Amerikan beton enstitüsünün ACI 440.2R-08 adlı yönetmeliğinde de dairesel olmayan kolonların kenar oranları 2 ile sınırlandırılmıştır. İtalyan ulusal araştırma konseyinin CNR-DT 200/2004 yönetmeliğinde ise, aksi deneylerle kanıtlanmadığı sürece, kenar oranları 2'nin üzerinde olan ve kesitin uzun kenarının 900 mm'den fazla olduğu durumlarda lifli polimer kompozitler ile dıştan sargılamanın katkısı ihmal edilmesi gerektiğini belirtiyor. Bu konu üzerinde yeterli çalışma bulunmadığı için, lifli polimer ile sargılama ile güçlendirme kenar oranları 1,5 veya 2'den küçük olan kolonlar ile sınırlamaktadır. Önerilen çalışma ile bazı basit ilave önlemler ile bu pratik güçlendirme uygulamasının kullanım alanının daha fazla genişletileceği beklenmektedir. Bu sayede, güçlendirme imalatındaki zorluklar nedeni ile gerçekleştirilemeyen bazı güçlendirme uygulamalarının gerçekleştirilmesine imkân sağlanabilecektir.

Önerilen çalışmanın daha önce yapılmış olan çalışmalara göre önemli bir farklılığı da, kolonlar üzerindeki aksenal gerilme düzeyidir. Ülkemizdeki mevcut yapılarda beton dayanımı projelendirme sırasında öngörülene göre bir hayli düşük olduğu için, kolonlar üzerindeki aksenal gerilmelerin, kolon aksenal kapasitesine oranı bir hayli yüksek olabilmektedir. Oysa literatürde gerçekleştirilmiş mevcut benzer çalışmalarda dikkate alınan aksenal gerilme düzeyleri genel olarak kolon aksenal kapasitesinin %25 ile %40'ı arasındadır (Bousias ve diğ. (2004), Özcan ve diğ. (2010a, 2010b)). Bu çalışmada ise, literatürde mevcut benzer konudaki çalışmalardan farklı olarak aksenal gerilmelerin, kolon aksenal kapasitesinin %50'si ve daha üzerinde olduğu durumlar da inceleme kapsamına alınmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Betonarme yapılardaki kolonların deprem yükleri altındaki davranışını incelemek üzere çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak beton kalitesinin düşük, donatıların düz yüzeyli olduğu durumlarda, eksenel yük ile birlikte yön değiştiren yükler altında güçlendirmenin etkisini sistematik olarak inceleyen çalışmalar çok sınırlıdır. Deneysel çalışmalarda ise genellikle tam ölçekli numuneler yerine, daha küçük ölçekli numuneler test edilmiştir. Yapılan bu kısıtlı çalışmalar incelendiğinde dikdörtgen kesitli kolonlar için (özellikle kenar oranları ikinin üzerinde olduğunda) güçlendirme amaçlı etkin bir dıştan sargılama metodunun araştırılmamış olduğu görülmektedir. Ayrıca, gerek kolonların davranışı, gerekse kolonların güçlendirilmesini konu alan çalışmalar genellikle yurt dışında yapıldığı için, pek çok çalışmada, Türkiye'deki yapılardaki kolonları temsil edecek yetersizliklere ve uygulama hatalarına sahip numuneler dikkate alınmamıştır. Bu nedenle yurtdışında yapılmış olan çalışmaların Türkiye'deki yapılar için geçerliliği şüphelidir. Burada beton/betonarme elemanlarda içten ve dıştan sargılanma etkisi ve kolonların güçlendirilmesi üzerine, özellikle son yıllarda yapılmış olan, deneysel çalışmalar kısaca açıklanmıştır.

Çeşitli araştırmacılar sargılanmış betonun eksenel yükler altında davranışını incelemiş, deney sonuçlarını da dikkate alarak gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için çeşitli modeller önermişlerdir (Kent ve Park (1971), Sheikh ve Üzümeri (1982), Mander ve diğ. (1988), Saatçioğlu ve Razvi (1992), İlki ve diğ. (2004)). Yapılmış olan bu çalışmalar betonun enine donatı ile uygun şekilde sargılanması sonucunda süneklik ve dayanım özelliklerinin kayda değer şekilde iyileştiğini göstermiştir. Daha önce Özcebe ve Saatçioğlu (1987) sargılanmış betonarme kolonların sismik yükler altındaki davranışını incelemek için tam ölçekli kolon numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kolonlar sabit düşey yük altında kademeli olarak artan ve yön değiştiren yanal yükler etkisinde incelenmiştir. Deneyler sonucunda beton çekirdeğinin uygun yanal donatı ile sargılanması sonucunda elastik ötesi davranışının ciddi şekilde geliştiği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlara Yalçın ve Saatçioğlu (2000) tarafından gerçekleştirilen ve sargılanmanın yatay yükler altındaki betonarme kolonların doğrusal elastik olmayan davranışının incelendiği çalışmada da ulaşılmıştır.

Mirmiran ve diğ. (1997), Nanni ve diğ. (1995), Samaan ve diğ. (1998), Toutanji (1999), Lam ve Teng (2001), Yuan ve diğ. (2001), Fam ve Rizkalla (2001), İlki ve Kumbasar (2003), Lam ve Teng (2003), İlki ve diğ. (2008), Özbakkaloğlu ve diğ.

(2008), Turgay ve diğ. (2010), ve Wang ve diğ. (2011) lifli polimer ile sargılanmış betonun davranışını deneysel olarak araştırmış, deney sonuçlarını dikkate alarak davranış için çeşitli modeller önermişlerdir.

Theriault ve diğ. (2004) ile Carey ve diğ. (2005) sargılamada boyut etkisini göstermek için farklı boyutta numuneleri farklı tip ve kalınlıkta FRP kullanarak sargılamış ve deney sonuçlarında sargılama etkisinin düşük dayanımlı ve küçük ölçekli numunelerde daha etkin olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu durum küçük ölçekli deneyler ile ulaşılan sonuçların gerçek boyutta elemanların davranışlarının modellenmesinde kullanılmasının doğru olmayacağını ve lifli polimer ile güçlendirilmiş betonarme elemanların davranışının daha gerçekçi şekilde ortaya koyulabilmesi için büyük ölçekli deneylere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Akgün ve diğ. (2010) kesit boyut oranları 3 olan lifli polimer kumaşlar ile dıştan sargılanmış dikdörtgen kesitli numuneler üzerinde basınç deneyleri yapmışlardır. Lifli polimer özellik ve kalınlıkları tüm numuneler için sabit tutulmuş, çiroz şeklinde kullanılan lifli polimer ruloların sayısı ve düzeni her numunede değiştirilmiştir. Deney sonuçları lifli polimer çirozların kullanımının dikdörtgen kesitli kolonlarda sargılama etkisini arttırdığını göstermiştir.

Chaallal ve Shahawy (2000), Harajli ve Rteil (2001), Fam ve diğ. (2003), Iacobucci ve diğ. (2003), Bousias ve diğ. (2004), Elnabelsy ve Saatçioğlu (2004), Memon ve Sheikh (2005), Rocca ve diğ. (2008), Yalçın ve diğ. (2008), İlki ve diğ. (2009), Özcan ve diğ. (2010a) ise eksenel yükler ile birlikte eğilme momentine maruz kesitlerin davranışını incelemişlerdir.

Saatçioğlu ve Grira (2001a) ve Saatçioğlu ve diğ. (2001b) lifli polimer ile sargılanmış betonun performansı ve tasarımı konusunda ve yeni binaların kolonlarının FRP kullanılarak güçlendirilmesi için çeşitli önerilerde bulunmuşlardır.

Özcan ve diğ. (2010b) çalışmalarında lifli polimer kumaş ile sargılamanın etkinliğini arttırmak üzere, Akgün ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmadakine benzer şekilde lifli polimer rulolardan yararlanılmışlar, ancak Akgün ve diğ. (2010) tarafından kullanılan dar kenar boyunca sürekli devam eden lifli polimer çirozlar yerine, dar kenarlara ankre edilmiş lifli polimer rulolar kullanmışlardır. Özcan ve diğ. (2010b) tarafından yapılan çalışmada kenar oranları iki olan dikdörtgen numuneler kullanılmıştır.

Galal K., Arafa A., Ghobarah A. (2005) tarafından yapılan çalışmada betonarme kısa kolonların onarımında lifli polimer sargı ve çelik bulonun birlikte kullanımı incelenmiş ve bu şekilde güçlendirilmiş numunelerin modellenmesi için bir yaklaşım yapılmıştır. Bu çalışmada lifli polimer ve çelik bulonlar ile sargılanmış betonun davranışını modellemek için Mander ve Diğ.(1988) tarafından geliştirilen sargılı beton davranış modeli lifli polimer etkisi donatı cinsine çevrilerek etkili sargılanma alanı ve etkin sargılanma katsayısı hesaplanarak sargılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilmiştir.

Yalcin C., Saatcioglu M. (2000) tarafından yapılan çalışmada geliştirilen yazılım ile sabit eksenel yük ve artımsal monotonik yatay yükler altındaki kolonların elastik ötesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme modellenmesinde betondaki sargı etkisi, çeliğin pekleşmesi ve burkulması ve ikinci mertebe deformasyonlar göz önüne alınmıştır. Kolonun kritik bölgesinde plastik mafsallık oluştuğu varsayımı yapılmıştır. Ayrıca, donatı sıyrılmasından dolayı oluşan etkiler de hesaba dikkate alınmıştır.



2. NUMUNE VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yürütülen proje kapsamında, mevcut yapılarda sıkça karşılaşılan düşük beton dayanımı ve yetersiz enine donatının süneklığe ve dayanıma etkilerinin yanı sıra bu yetersizliklerin karbon lifli polimer kompozitler kullanılarak giderilmesi incelenmiştir. Bu amaçla kolon sarılma bölgelerinin sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği ve Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler 4 adet 20x60 cm en kesitli ve 2.5 metre boyunda konsol kolonlardır.

2.1 Numune Tasarımı

Numunelerin tasarlanmasında ülkemizdeki yapılarda yaygın olarak karşılaşılan yetersizlikler, yönetmeliklerde verilen şartlar, yükleme sisteminin kapasitesi, ölçüm aletlerinin kapasite ve hassasiyeti, ulaşılmak istenen göçme biçimi, deney düzeneğinin kullanılabilirliği, numunelerin ve diğer imalatların ekonomik olması gibi konulara önem verilmiştir. Numune tasarımı yapılırken, mevcut yapılarda sıkça karşılaşılan donatı ve beton özellikleri dikkate alınmıştır. Bu sebeple boyuna ve enine donatılar için düz yüzeyli donatı kullanılmış, enine donatılar yeterli sargılama etkisini sağlayamayacak şekilde yerleştirilmiştir. Beton basınç dayanımının yaklaşık olarak 10 MPa olması hedeflenmiştir. Bu değer aynı zamanda mevcut yapılar için yaklaşık bir ortalama değer olarak da kabul edilebilir. Net beton örtüsü için TS 500(2000)'de verilen minimum değerler dikkate alınmış ve enine donatının merkezinden en dış beton lifine olan mesafe 25 mm bırakılmıştır.

Deney için üretilen yükleme çerçevesi, yatay verenin konumu ve kapasitesi numunenin boyutlarının belirlenmesinde önemli bir etken olmuştur. Yatay verenin numuneye tepe noktasına yakın bölgeden yük etkiyecek olması sebebiyle numunenin üst kısmında enine donatı oranı iki katına çıkarılmıştır. Kolon boyuna donatıları temel içerisinden sürekli olacak şekilde, filiz bırakılıp bindirme yapılmaksızın, kolon içerisine devam etmiş ve kolon tepe noktasından itibaren kenetlenme boyunu

sağlayacak şekilde kıvrılarak karşı kenarda devam ettirilmiştir. Ayrıca sıyrılmanın önlenmesi için donatı uçları 180 derece kanca şeklinde bükülmüştür. Donatının temel içerisinde kalan kısmı da temel üst yüzünden itibaren kenetlenme boyu kadar temel içerisinde devam ettirilmiş, temele alt yüzünde temel donatılarının altından geçecek şekilde 90 derece gönye bükülmüş ve uç kısmında 180 derece kanca bükülmüştür.

Tasarım aşamasında eksenel yük seviyesi beton basınç dayanımının yaklaşık 10 MPa olacağı düşünülerek kolon eksenel yük kapasitelerinin %40'i olarak hesaplanmıştır. Yapılan 28 günlük beton basınç deneyleri sonrası ortalama silindir dayanımının 8.8 MPa çıkmış, deneylerin yapıldığı günlere denk gelen 180 günlük beton basınç deneyleri sonrası ortalama silindir dayanımı 11.0 MPa çıkmıştır.

Tasarımda dikkat edilen bir başka konu ise eğilme etkisindeki davranış incelendiğinden kesitin kesme kuvveti kapasitesi (V_r), tasarım kesme kuvvetinden (V_d) büyük olmasıdır. Bu amaçla kesme kuvvetinin yalnızca beton tarafından bile güvenle taşınabileceği bir tasarım yapılarak kolon yüksekliği belirlenmiş, etriyenin kesme kuvvetine olan katkısıyla kesitte kesme kuvvetleri etkisi ile oluşacak gevrek bir hasarın önüne geçilmiştir.

2.2 Numune Üretimi

Çalışma kapsamında incelenmek üzere 4 adet 20x60 cm en kesitli kolon numunesi üretilmiştir.

20x60 cm en kesitli betonarme kolon ve bunların temellerine ait çizim ve detaylar Şekil 2.1'de görülmektedir. Numunelerde 8 adet 14 mm çapında düz donatı kullanılmıştır. Donatıların kesitteki yerleşimi en kesit çizimlerinde gösterilmektedir. Donatılar temel içerisinde ve kolonun karşı yüzünde kenetlenme boyu kadar uzatılmaktadır. Yatay donatı olarak 10 mm çapında düz donatı kullanılmış, kancaları 10cm boyunda ve 90 derece olarak kırılmış şekilde hazırlanmıştır. Her numunede test bölgesi olarak 140 cm yüksekliğince 20 cm arayla yatay donatılar kullanılmış, yatay yükün etkiyeceği üst kesitte herhangi bir hasar oluşmasının önüne geçmek için 140 cm den sonra yatay donatı aralığı 10 cm'ye indirilmiştir. Beton örtüsü olarak enine donatı ortasından 25 mm beton tabakası bırakılmıştır.



Şekil 2.2 : Donatı iskeleti.

2.3 Şekil Değiştirme Ölçerlerin Yapıştırılması

Donatı iskeletinin hazırlanmasından sonra hasarın en yoğun olmasının beklendiği potansiyel plastik mafsallarda boyuna ve enine donatılar üzerine şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Ayrıca boyuna donatıların temel içerisinde kalan kısımlarına da kontrol amacıyla belirli kotlarda şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmıştır.

Şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmadan önce donatılar üzerinde belirlenen noktalar zımpara yardımı ile pastan arındırılmış sonra pamuk ve aseton yardımı ile tozlu temizlenmiştir. Tam olarak temizlenmiş bu yüzeylere şekil değiştirme ölçerler cyanoacrylat esaslı bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve ardından su ve nem yalıtımı ile mekanik koruma sağlamak için iki kat kimyasal yalıtım malzemesi (N-1, water proofing material), bir kat bitüm esaslı bant (VM Tape, a vinyl/mastic for insulating and moisture sealing) ve bunun üzerine izole bant sarılmıştır. Tüm şekil değiştirme ölçerlerin kablolarının ucuna konumunu, cinsini belirtmek üzere numaralar ve notlar yazılmıştır. Kablolar en kısa mesafeden beton yüzeyine çıkacak şekilde demetlenmiştir. Şekil değiştirme ölçerlerin yapıştırılması ile ilgili bazı aşamalar Şekil 2.3; Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Donatıların üzerindeki pasın zımpara yardımı ile temizlenmesi.



Şekil 2.4 : Şekil değiştirme ۆlerlerin yapıştırılması.



Şekil 2.5 : Şekil değiştirme ۆlerlere N-1 sürülmesi ve VM bant yapıştırılması.

2.4 Kalıp Hazırlanması ve Beton Dökümü

Numunelerin demir iskelet bağlantı işleri bitirildikten sonra beton dökümü için 20 mm kalınlıkta iki yüzü film tabakası kaplı kalıp tahtaları ile kalıplar hazırlanmıştır. Temelde kullanılan beton sınıfı ve kolonlarda kullanılan beton sınıfı birbirinden farklı olduğu için beton döküm işlemi iki aşamada yapılmıştır.

Öncelikle döküm sahasının tamamının üzeri kalıp tahtalarıyla kapatılmış ve demir iskeletler vinç yardımıyla bu alan üzerine taşınmıştır. Daha sonra temel yan kalıp tahtaları kapatılarak temeller beton dökümü için hazır hale getirilmiştir. Beton dökümü öncesi kalıp tahtalarının iç yüzleri kolay sökülmesi için kalıp yağıyla yağlanmıştır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de bu işlemlere ait resimler gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Temel kalıplarının çakılması ve donatı iskeletlerinin yerleştirilmesi.



Şekil 2.7 : Temel kalıplarının çakılması ve donatı iskeletlerinin yerleştirilmesi.

Temel kalıplarının akılmasının ardından beton döküm işlemi yapılmıştır. Temelerde hazır beton kullanılmıştır ve betonun iyi yerleşmesi için beton dökümü sırasında vibratör kullanılmıştır. Beton dökümü öncesinde numunelerin reaksiyon temeline bağlanabilmesi için temel içinde boşluklar oluşturulması amacıyla donatılar arasına 100 mm çaplı PVC borular yerleştirilmiştir. Beton dökümü sırasında temelin kolon ile ara kesitinin bulunduğu bölge soğuk derzin ektilerini azaltmak adına przlendirilerek bırakılmıştır. şekil 2.8 ve şekil 2.9’da temel betonu dökümüyle ilgili detaylar gösterilmiştir.



şekil 2.8 : PVC boruların temel içerisine yerleştirilmesi.



şekil 2.9 : Beton dökümü.

Temel betonun prizini alması süresince ilk gün birkaç saatte bir sonraki günler günde iki kere su ile ıslatarak betona kür işlemi uygulanmıştır. Ayrıca betonun üzeri nemli bezle örtülerek periyodik olarak bez ıslatılmış böylece yüzeyden buharlaşma sonucu su kaybı dolayısıyla oluşabilecek rötre çatlaklarının önüne geçilmiştir. Betondan alınan numuneler de aynı ortamda ve aynı kürleme şartlarında saklanmıştır. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de kür işlemi ve numunelere ait resimler görülmektedir.



Şekil 2.10 : Deney numuneleri ile aynı ortamda saklanan beton numuneleri.



Şekil 2.11 : Deney numunesi kürlenmesi.

Temel betonunu ilk prizini tamamlaması ve kalıbın sökülmesine hazır hale gelmesi için 7 gün beklenmiş daha sonra temel kalıpları sökülerek kolon kalıplarının hazırlanmasına başlanmıştır. Kolonlar için de düşük dayanımlı hazır beton kullanılmış, temeller için uygulanan kür şartları uygulanmıştır. Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’de kolon kalıplarının hazırlanması ve beton dökümü işlemi görülmektedir.



Şekil 2.12 : Kolon kalıplarının hazırlanması.



Şekil 2.13 : Kolon betonu dökümü.

2.5 Numune Özellikleri

Bu çalışma kapsamında 4 adet 20x60 cm en kesitli betonarme kolon numunesi incelenmiştir. Bu kolon numunelerinden 1 adet referans numunesi olarak kullanılırken kalan 3 adedi karbon lifli polimer kompozit malzemeyle şerit şeklinde sargılanarak güçlendirilmiştir. Şerit genişlikleri 10 cm, şerit merkezinden bir sonraki şerit merkezine mesafe ise 18 cm olarak bırakılmıştır.

Ayrıca bazı numunelerde sünekliğin arttırılması amacıyla, iki karbon şerit arasında kalan 8 cm genişlikli beton kısımda olacak şekilde, St420 donatı çeliğinden bulonlar kullanılarak kısa kenara paralel bulonlar uygulanmıştır. Şekil 2.14’ de gösterilen bulonlar her iki ucuna dış açılmış inşaat çeliğinin beton içerisinde açılan bulon deliklerinden geçirilmesi ve beton dışında kalan her iki ucuna da 10 mm kalınlığında 100x100 mm boyutlu pullar yerleştirilmesi, daha sonra bu pulların somunlar vasıtasıyla ve belli bir tork uygulanarak (yaklaşık 40 kgm) sıkıştırılması şeklinde uygulanmıştır.

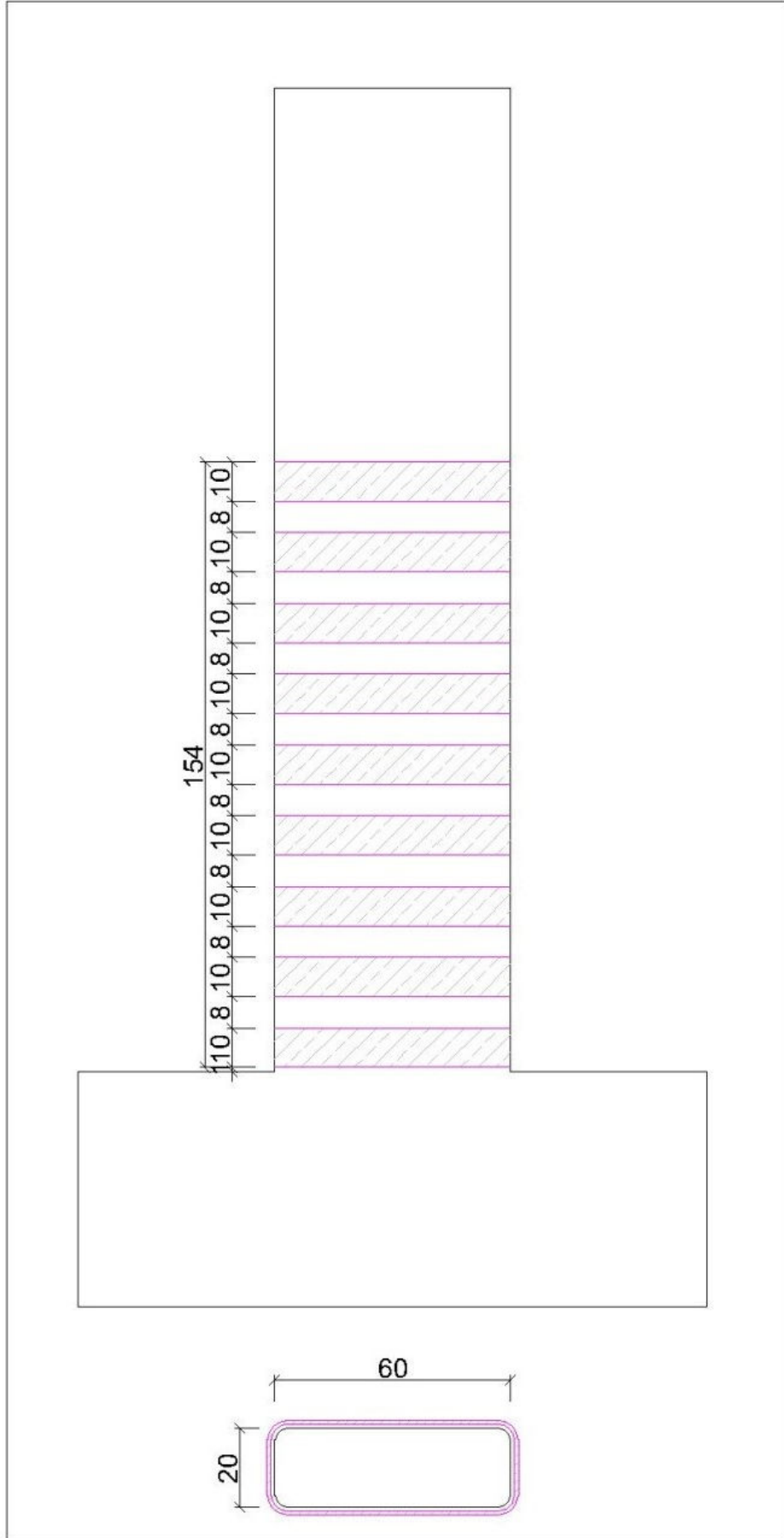
Numuneler isimlendirilirken kolon boyutları, uygulanan LP sargının kat adedi ve en kesitte bulunan bulon adedi dikkate alınarak isimlendirilmiştir. Örneğin 20x60_4N_2A isimli numune 20cm genişlikli, 60 cm derinlikli kolon numunesinin 4 kat şerit şeklinde karbon kumaş ile sargılandığını ve en kesitte 2 adet bulon donatısı kullanıldığını ifade etmektedir. Ayrıca 20x60_Ref bu numune için referans numunesi olduğunu ifade etmektedir. Numunelerin tamamına ilişkin bilgiler Çizelge 2.1’de sunulmuştur. Ayrıca karbon lifli polimer uygulama detayları da Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Numune özelliklerini gösteren tablo.

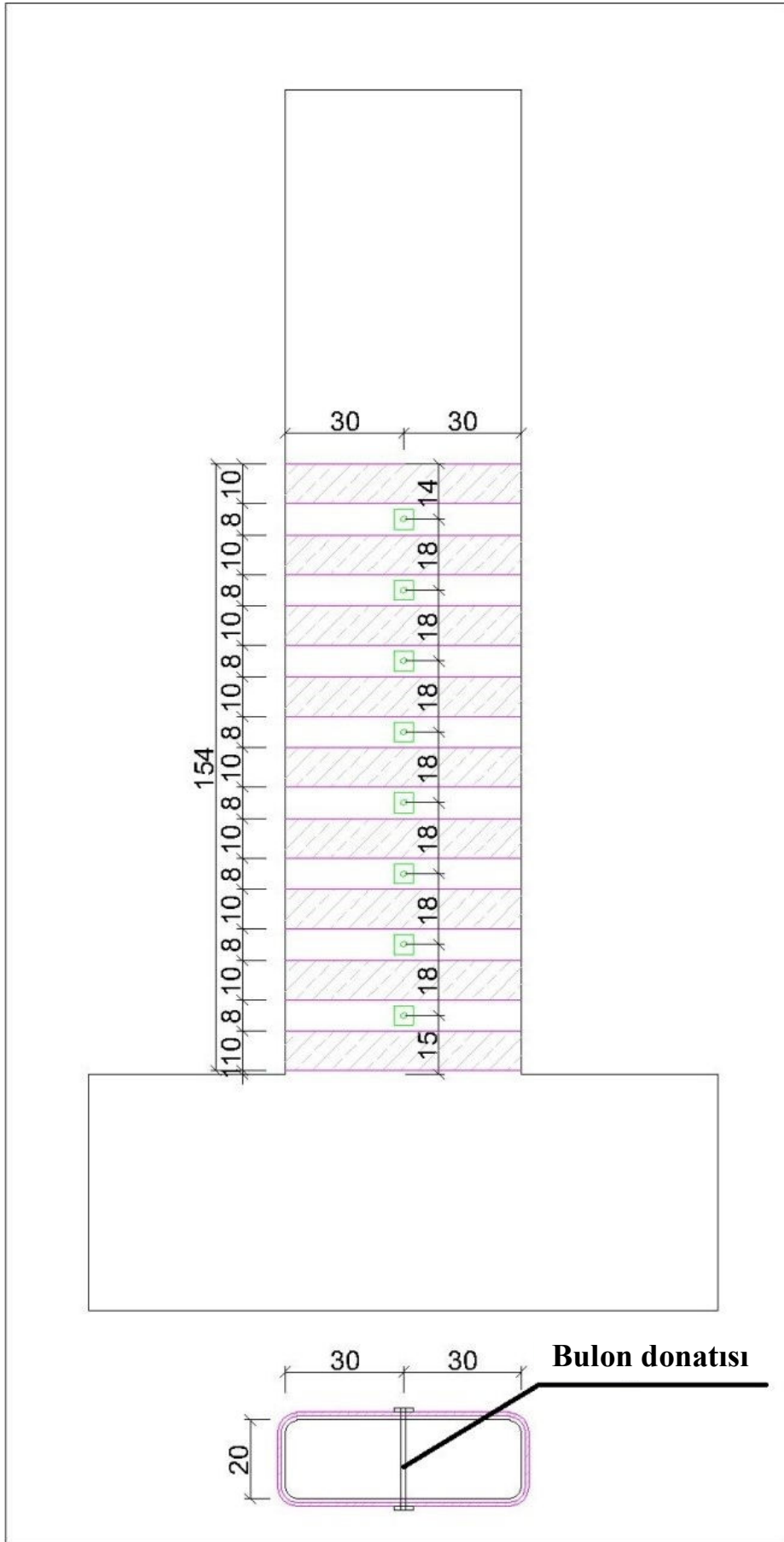
Numune Adı	b (mm)	h (mm)	Bulon Adedi	n_{frp}	ρ_{as}	ρ_{frp}	FRP Şerit	
							Genişliği	Aralığı
20x60_Ref	200	600	-	-	0.0103	-	---	---
20x60_4N	200	600	-	4	0.0103	0.0049	10	18
20x60_4N_1A	200	600	1	4	0.0103	0.0049	10	18
20x60_4N_2A	200	600	2	4	0.0103	0.0049	10	18



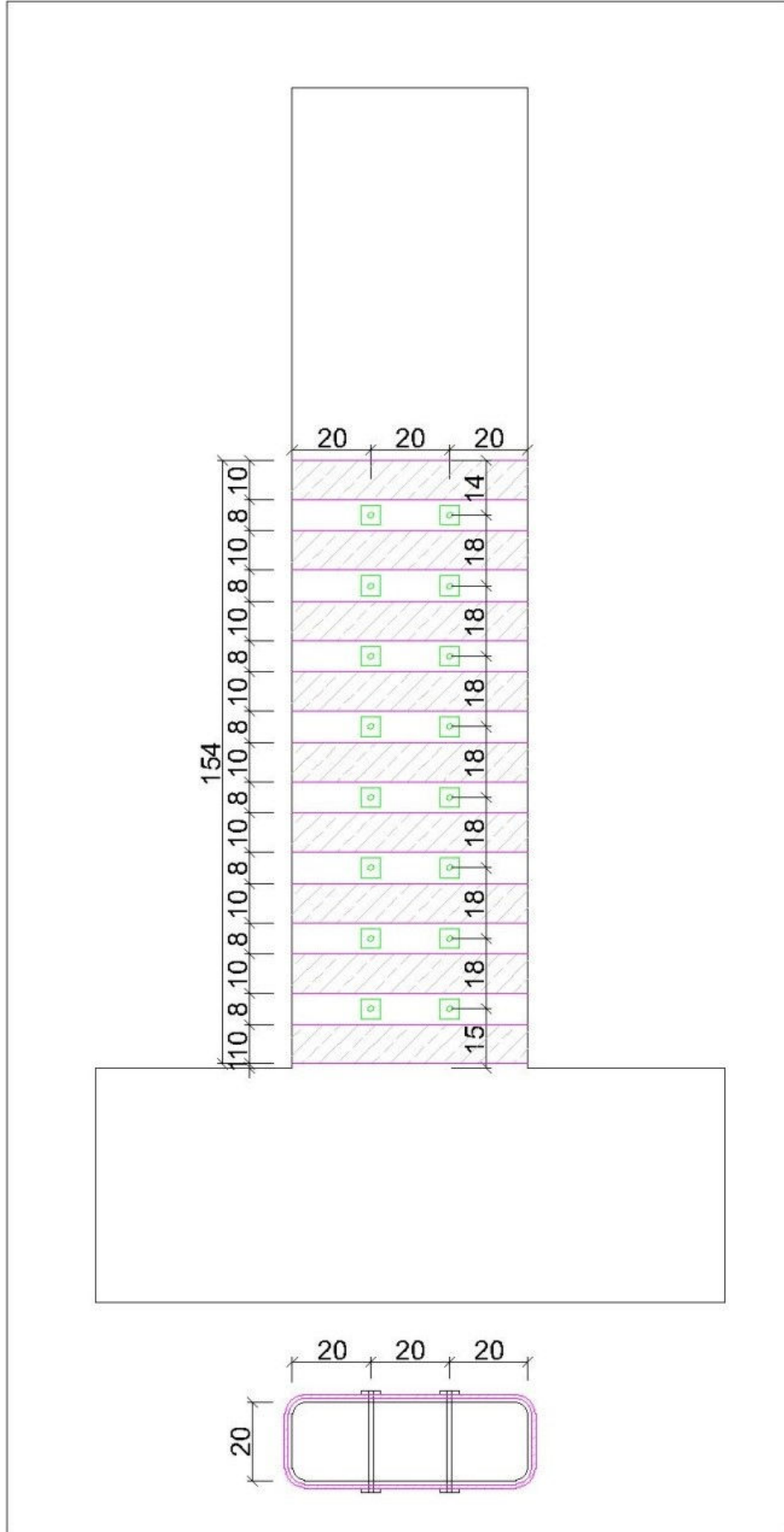
Şekil 2.14 : Çift sıra uygulanmış bulonlar.



Şekil 2.15 : 20x60_4N numunesi için güçlendirme uygulaması detayı.



Şekil 2.16 : 20x60_4N_1A numunesi için güçlendirme uygulaması detayı.



Şekil 2.17 : 20x60_4N_2A numunesi için güçlendirme uygulaması detayı.

2.6 Karbon Lifli Polimer Uygulaması

Karbon lifli polimer uygulaması Bölüm 2.5'te sunulan detaylar doğrultusunda yapılmıştır. CFRP kompozit temel yüzünden yaklaşık 10 mm mesafe bırakılarak uygulanmaya başlanmıştır. Bu sayede kolon-temel birleşme bölgesinde oluşabilecek ilave etkiler engellenmiştir. Numunelerin ilk önce yüzey hazırlıkları yapılmıştır. Dikdörtgen en kesitli kolonlarda gerilmelerin düzgün dağılmadığı, köşelerde gerilme yığılmalarının olduğu bilinmektedir. Bu sebeple köşeler 30 mm yarıçaplı bir çeyrek daire şeklinde yuvarlatılmıştır. Yuvarlatma işleminden sonra yüzeyler kir, toz, yağ ve benzeri maddelerden arındırılmıştır.

Karbon uygulamasına geçilmeden önce yüzey hazırlığı için karbonun uygulanacağı şerit bölgeleri kağıt bant çekilerek sınırlandırılmış, bu bölgelerde karbonun altında düz bir yüzey elde edilmesi ve aderansın artırılması için AKKİM AKRESİN AS 400 epoksi esaslı, çift bileşenli, solventsiz astar malzemesi A ve B bileşeninden 0.8 ve 0.2 oranlarında karıştırılarak hazırlanmış ve bir spatula yardımıyla 10 cm genişliğinde, yaklaşık 1 mm kalınlığında olacak şekilde uygulanmıştır.

Astar malzemesinin priz alması için 24-48 saat beklendikten sonra karbon uygulamasına geçilmiştir. Numunelere 4 kat uygulanacak kumaş halindeki malzeme 20 cm bindirme boyu da göz önünde bulundurularak kesilmiş, daha sonra 10 cm genişlikli şeritler halinde boyuna doğrultuda kesilen kumaş rulo halinde kendi etrafında sarılarak uygulamaya hazırlanmıştır. Uygulama öncesi yüzeye çift bileşenli, solventsiz, epoksi esaslı reçine yapıştırıcı olan AKKİM AKRESİN EP 250 bir kat uygulanmış, daha sonra 10 cm'lik şeritler uzun kenarın orta kısmında 20 cm şaşırtmalı bindirme olacak şekilde hep aynı yönde sarılmıştır. Her katta yapıştırıcı sürülmesi işlemine devam edilmiş ve kumaşın yapıştırıcıya doymasını sağlamak amacıyla rulo ile bastırarak kumaş altındaki hava kabarcıkları sürüklenmiştir. Son kat karbon kumaş sarıldıktan sonra yüzeye yapıştırıcı rulo yardımıyla tekrar sürülerek uygulama bitirilmiştir. Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da karbon uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 2.18 : Karbon lifli polimer kompozit uygulaması.



Şekil 2.19 : Karbon lifli polimer kompozit uygulaması.

2.7 Malzeme Özellikleri Ve Malzeme Deneyleri

2.7.1 Beton

Bu çalışmada temel betonu ve kolon betonları ayrı ayrı dökülmüş, temelde herhangi bir hasar oluşması istenmediğinden C30 sınıfı hazır beton kullanılmıştır. Kullanılan betona ait karışım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Temel betonu karışım oranları.

Çimento (c)	(kg/m ³)	385.00
Su (w)	(kg/m ³)	232.00
Kum	(kg/m ³)	688.00
Taş Tozu	(kg/m ³)	262.00
Mıcır I No	(kg/m ³)	776.00
Akışkanlaştırıcı	(kg/m ³)	3.85
w/c	-	0.60

Çalışma kapsamında kolonlarda ülkemizdeki mevcut yapılarda sıkça karşılaşılan ortalama beton basınç dayanımını temsil etmesi açısından düşük dayanımlı beton kullanılmıştır. Karışıma ait 28 günlük beton basınç dayanımı ortalama 8.8 Mpa olarak elde edilmiştir. Karışıma ait oranlar Çizelge 2.3’de verilmiştir.

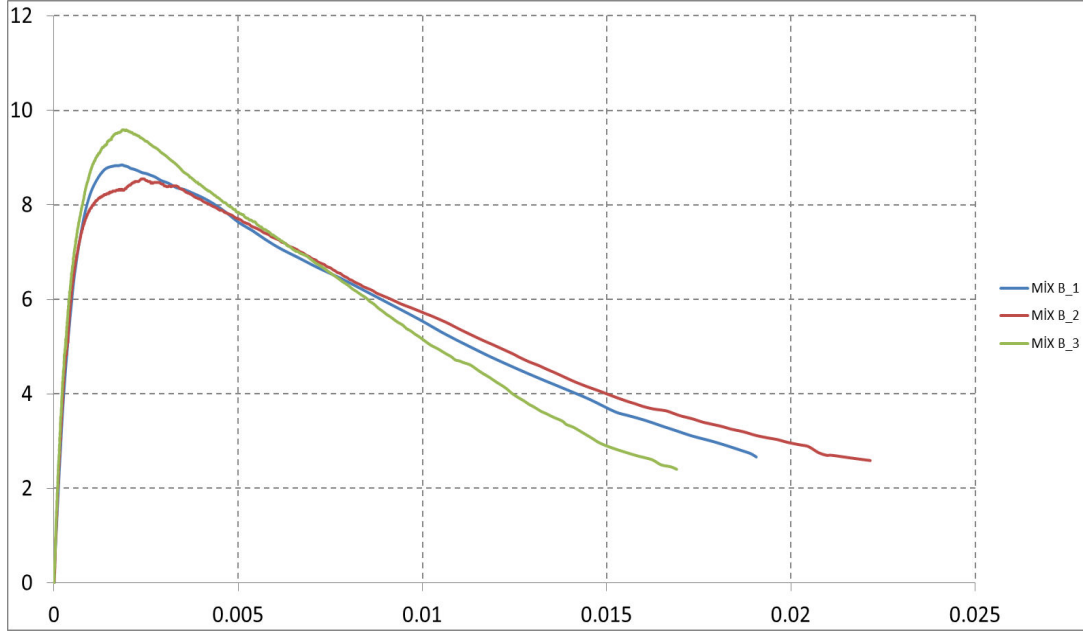
Karışımında çimento olarak Akçansa’nın PÇ 42.5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Karışımında kullanılan 1 No’lu ve 2 No’lu mıcır Has Beton Cebeci Ocağı’ndan elde edilen mıcırdır. Kum olarak Doruk Maden Milten Sahasında elde edilen 0-4 mm dane çaplı kum kullanılmıştır. Karışım içerisinde kullanılan taş tozu yine Has Beton Cebeci Ocağı’ndan elde edilmiştir ve dane çapı maksimum 0.7 mm’dir. Bu karışımında kimyasal katkı olarak EPO 515 K Süper Akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 2.3 : Kolonlara ait beton karışım oranları.

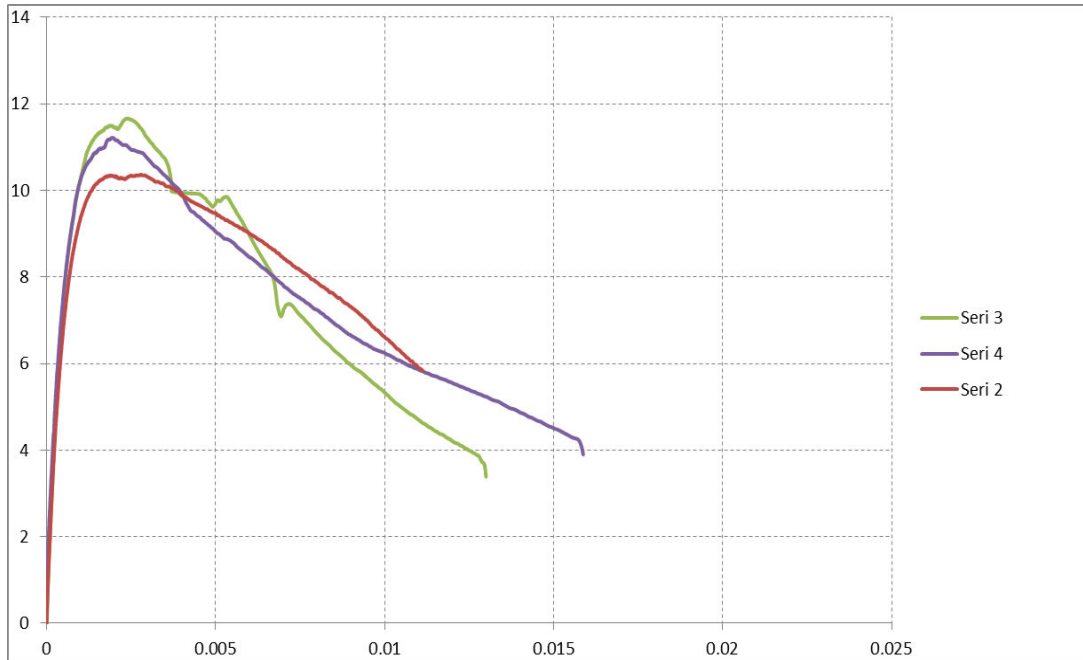
Çimento (c)	(kg/m ³)	155.00
Su (w)	(kg/m ³)	155.00
Kum	(kg/m ³)	437.00
Taş Tozu	(kg/m ³)	647.00
Mıcır I No	(kg/m ³)	477.00
Mıcır II No	(kg/m ³)	581.00
Akışkanlaştırıcı	(kg/m ³)	2,22
w/c	-	1.00

Farklı yaşlarda beton basınç dayanımının belirlenmesi amacı ile 15 adet 150 mm x 300 mm boyutlarında standart silindir numunesi alınmıştır. Standart silindir numuneler 5000 kN kapasiteli Amsler yükleme cihazı kullanılarak eksenel basınç deneyine tabi tutulmuştur. Şekil değiştirmelerin belirlenmesi amacı ile TML CM-15 ölçüm çerçevesi ve 2 adet yer değiştirme ölçerler (CDP25) kullanılmıştır. Bu çerçeve üzerinde bulunan hassas yer değiştirme ölçerler (TML CDP5) ile standart silindir numunenin ortasında 150 mm yüksekliğindeki bölgede oluşan ortalama şekil değiştirmeler belirlenebilmektedir. Silindir numunenin iki yanına yerleştirilen diğer yer değiştirme ölçerler ile toplam boyda oluşan yer değiştirmeler ölçülüp, bu ölçümlerden yararlanılarak tüm boydaki ortalama şekil değiştirmeler belirlenmektedir. Yer

değiştirme ve şekil değiştirme verileri TML TDS-303 veri toplayıcı kullanılarak saklanmış, daha sonra elle kaydedilen yük değerleri ile birlikte bilgisayarda işlenerek beton gerilme-şekil değiştirme ilişkileri elde edilmiştir. 28 ve 180 günlük standart silindirlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri sırasıyla Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de verilmiştir. Farklı yaşlarda test edilen betona ait mekanik özellikler Çizelge 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.20 : 28 günlük beton numuneleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.



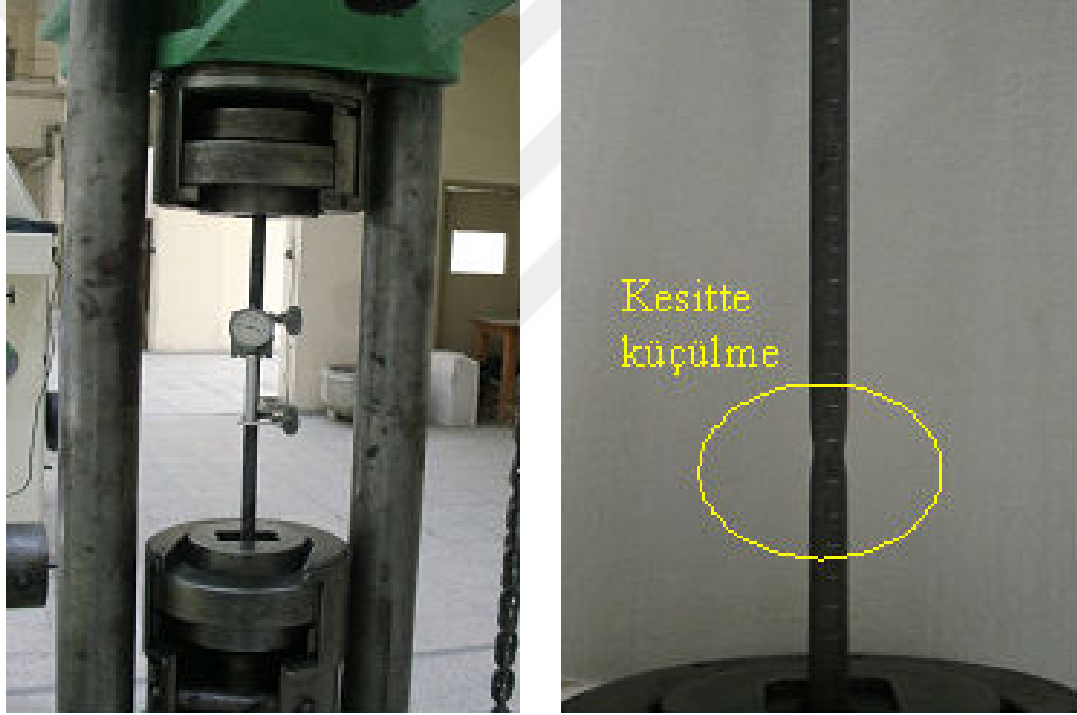
Şekil 2.21 : 180 günlük beton numuneleri için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

Çizelge 2.4 : Betonun farklı yaşlardaki mekanik özellikleri.

Numune yaşı (gün)	f'_{co} (MPa)	E_c (MPa)
28	8,8	15000
180	11,0	15000

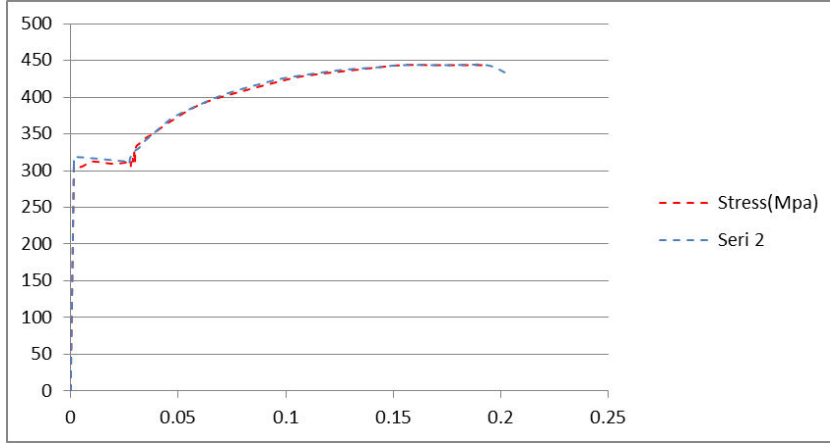
2.7.2 Donatı

Çalışmanın amacına uygun olması bakımından tüm numunelerde hem boyuna, hem de enine donatı için St220 kalitesinde düz yüzeyli donatı çeliği kullanılması tasarlanmıştır. Tasarım ve numune üretimi öncesinde kullanılacak çeliğin beklenen dayanıma sahip olup olmadığını anlamak üzere standartlara uygun olarak (TS 708 (1985), Beton Çelik Çubukları) çelik çekme deneyi yapılmıştır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 : Çelik çekme deneyi.

Yapılan çelik çekme deneyleri sonucunda kullanılan donatının dayanım değerlerinin TS 500(2000) tarafından verilen değerlerin üstünde olduğu görülmüştür. Bu sonucun ardından yapılan ön tasarım yenilenmiş ve deneysel olarak elde edilen dayanım değerleri kullanılmıştır. Çalışmada eğilme etkisinde göçme oluşması istendiğinden numune tasarımında gerekli düzenlemeler yapılarak oluşabilecek farklı bir göçme durumunun önüne geçilmiştir. Çekme deneylerinde 200 kN kapasiteli Alfred J.Amsler marka mekanik çekme cihazı kullanılmıştır. 14 mm çaplı donatılar için elde edilen gerilme – şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23 : 14 mm çapında donatıya ait gerilme- şekil değiştirme diyagramı.

Donatıya ait akma dayanımı $f_y = 310 \text{ MPa}$. çekme dayanımı $f_u = 430 \text{ MPa}$, Elastisite modülü $E_s = 205000 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir.

2.7.3 CFRP ile güçlendirmede kullanılan malzemeler

CFRP malzemesinin betona aderansını artırmak ve CFRP altında düz bir satıh elde etmek için AKKİM AKRESİN AS 400 epoksi esaslı, çift bileşenli, solventsiz astar malzemesi kullanılmıştır. Karışım oranları A Bileşeni (epoksi reçine) %80 B Bileşeni %20 oranındadır. İki bileşenin mekanik yollarla karıştırılması sonucu uygulamaya hazır hale getirilen astar malzemesinin özgül ağırlığı 1.5 kg/lt, uygulama sarfiyatı 0.7-1.5 kg/m² dir.

Karbon liflerin yapıştırılması için kullanılan AKKİM AKRESİN EP 250 epoksi esaslı, çift bileşenli, solventsiz yapıştırıcıdır. Karışım oranı A bileşeni (epoksi reçine) %66 B Bileşeni %34 oranındadır. İki bileşenin mekanik yollarla karıştırılması sonucu uygulamaya hazır hale getirilen astar malzemesinin özgül ağırlığı 1.05 kg/lt, uygulama sarfiyatı 1.7-2.5 kg/m² dir.

Güçlendirme için CFRP malzemesi olarak AKFİBRE DKM 42 12 K tek doğrultulu karbon lifli kumaş kullanılmıştır. Üretici firma tarafından verilen karbon lifli kumaşa ait değerler Çizelge 2.5’de verilmiştir.

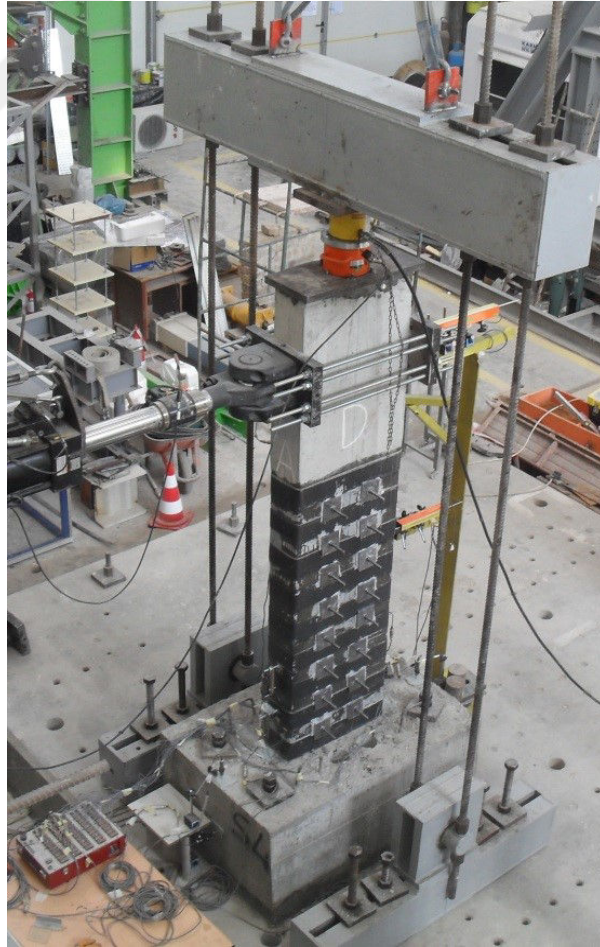
Çizelge 2.5 : FRP özellikleri.

Ürün Tanımı	Birim Ağırlığı	Lif Yoğunluğu	Dokuma Kalınlığı	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü	Kopmada Uzama
Örgülü tek doğrultulu karbon lifli kumaş malzeme	300+10 gr/cm ²	1.76 gr/cm ³	0.166 mm	4200 Mpa	240 Gpa	%1.8

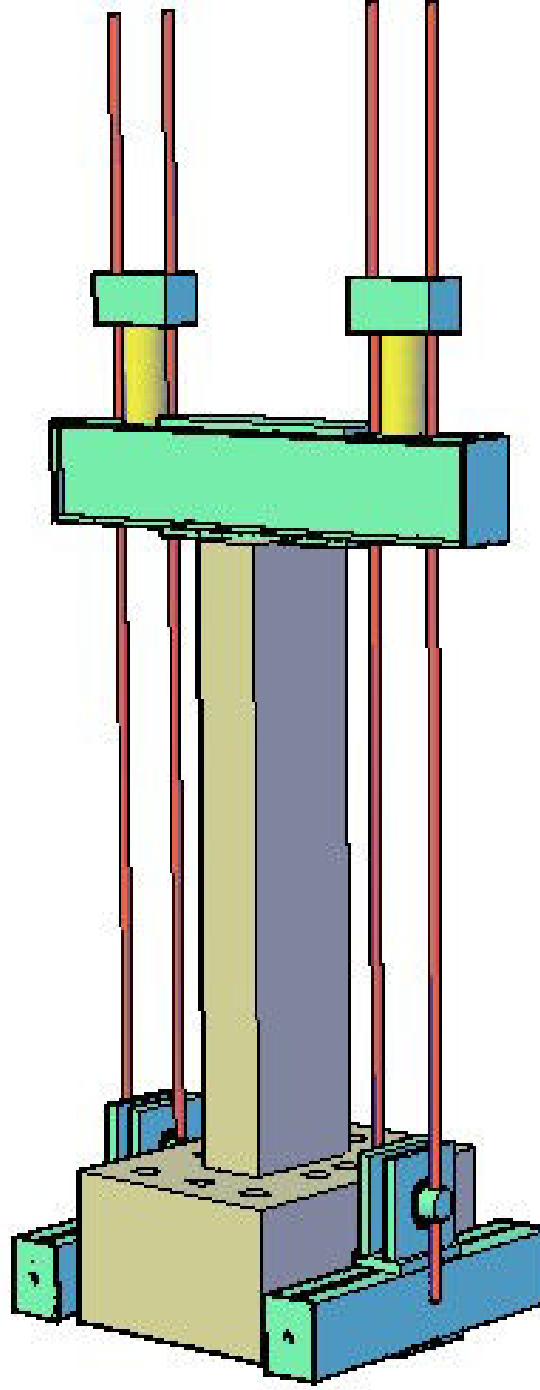
3. DENEY DÜZENEGİ

3.1 Yükleme Düzenegi ve Yükleme Adımları

Deney düzeneği reaksiyon temeline bağlı iki adet serbest dönebilen mafsallı, numune üzerine yerleştirilen rijit bir çelik kiriş, kolon başlık bölgesinde yükün homojen dağılmasını sağlamak için kullanılan çelik plakalar, mafsalları üst başlık kirişine bağlayan 4 adet ön germe halatı ve yüksek mukavemetli bulonlar ile oluşturulmuştur. Numuneler beton dökümü sırasında temeller içerisinde bırakılan boşluklardan geçirilen yüksek mukavemetli bulonlar ile reaksiyon temeline bağlanarak sabit düşey yük altında yön değiştiren tekrarlı yatay yer değiştirmeler etkisinde denenmişlerdir. Şekil 3.1’ de bir numunenin deney sırasındaki görünüşü, Şekil 3.2’de deney düzeneğinin üç boyutlu çizimi görülmektedir.



Şekil 3.1 : Deney düzeneği.



Şekil 3.2 : Deney düzeneğinin üç boyutlu görüntüsü.

Deprem esnasında yapı elemanları dinamik yön değiştiren tekrarlı eğilme ve kesme kuvvetlerinin yanı sıra değişken eksenel kuvvetlerin etkisindedir. Ancak bu durumun laboratuvar ortamında modellenmesi oldukça zor olduğundan yükler statik olarak etkitilmiştir. Statik yüklemeli deneylerin en büyük avantajı yüklemenin adım adım ve geniş bir zaman aralığında gerçekleşmesi nedeniyle eleman davranışının ve hasar durumunun çok daha sağlıklı ve detaylı bir şekilde gözlenebilmesidir.

Yükleme adımı olarak her numune için aynı görelî ötelenme oranı kullanılmıştır. Buna göre her numune için Δ/L olarak tanımlanan görelî ötelenme oranları itme ve çekmede simetrik olacak şekilde; $\Delta/L = \pm 0.001, \pm 0.0025, \pm 0.005, \pm 0.0075, \pm 0.01, \pm 0.015, \pm 0.02, \pm 0.025, \pm 0.03, \pm 0.035, \pm 0.04, \pm 0.05, \pm 0.06, \pm 0.07$ ve ± 0.08 olarak belirlenmiştir. Numuneler her adımda önce hedef görelî öteleme oranına kadar itilmiş sonra çekilmiş ve bir sonraki adımda bir üst hedefe kadar itme-çekme işlemine devam edilmiştir. Numunenin yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %20 mertebelerinde bir kayıp oluştuğunda ya da basınç bölgesindeki donatının burkulması sonucu taşıma kapasitesinde ani kayıplar oluştuğunda bir sonraki adıma devam edilmeyerek deney sonlandırılmıştır.

Eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşturmak üzere uygulanan yatay yer değiştirmeler bilgisayar kontrollü MTS hidrolik veren kullanılarak uygulanmıştır. Tekrarlı ve yön değiştiren yatay yer değiştirme numuneye tepe noktasına yakın bir bölgeden ve temel üst seviyesinden yaklaşık 200 cm mesafeden uygulanmıştır. Tüm deneyler yer değiştirme kontrollü olarak yapılmış ve pik noktalarda yatay yükler okunup kaydedilmiştir.

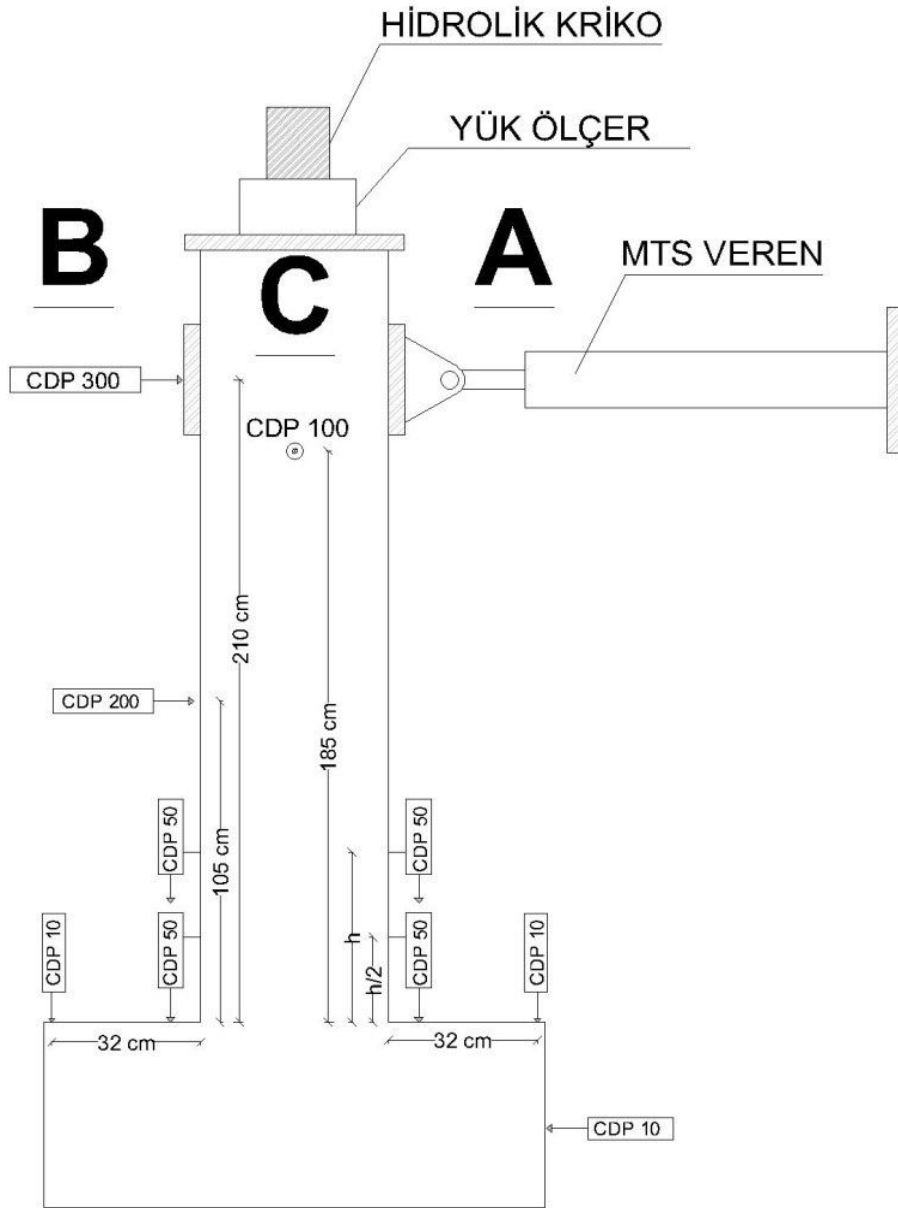
Eksenel yükün uygulanması için numune üzerine 50 mm kalınlıkta bir çelik plaka yerleştirilmiş, çelik plaka üzerine yerleştirilen yük ölçer ve hidrolik kriko deney düzeneğinin üst başlık kirişinin hemen altına yerleştirilmiştir. 4 Adet yüksek dayanımlı çelik halat ile reaksiyon temeline sabitlenmiş sağ ve sol mafsal parçalarına bağlanan rijit üst başlık hidrolik kriko yardımıyla itilerek etki-tepki prensibiyle kolona sabit düşey yük uygulanmıştır.

Eksenel kuvvet 1000 kN kapasiteli Enerpac hidrolik kriko kullanılarak uygulanmıştır. Deneyler sırasında kolonlara 480 kN eksenel yük uygulanmıştır.

Deney boyunca numune ile kriko arasına yerleştirilen 1000 kN kapasiteli TML (CLP-100CMP) yük ölçer aracılığı ile eksenel yük seviyesi kontrol edilmiş ve gerektiğinde kriko kullanılarak eksenel yükün sabit kalması sağlanmıştır. Eksenel yük dağılımının üniform olmasını sağlamak amacıyla kolon numunelerinin üstüne 50 mm kalınlıklı rijit plakalar yerleştirilmiş, deneye başlamadan önce üst başlığın dengesi düzeye yardımıyla kontrol edilmiş ve somunlar eşit şekilde sıkıldıktan sonra düşey yükün yüklenmesine geçilmiştir.

3.2 Ölçüm Sistemi

Deney esnasında uygulanan yük ve bu yük değerine karşı gelen yer değiştirme, kolon sarılma bölgesindeki ortalama şekil değiştirmeler, boyuna ve enine donatılarda şekil değiştirme değerleri, karbon lifli polimer kompozit şeritlerde ölçülen şekil değiştirme değerleri her bir yükleme adımında ölçülmüş ve veri çoğaltma kutusuna aktararak verilerin işlendiği bilgisayara kaydedilmiştir. Tüm numunelerde aynı ölçüm sistemi kullanılmıştır, Şekil 3.3. Deney esnasında her bir hedef yükleme adımında oluşan çatlak ve hasarlar çizelgelere işlenmiş, fotoğraf ve video kayıtlarıyla belgelenmiştir.



Şekil 3.3 : Ölçüm aletlerinin yerleşimi.

Her numunede hedef yer değiştirme veren kolonun merkezine yerleştirilen bir adet CDP 300 yer değiştirme ölçer aracılığıyla ölçölmüştür. Ayrıca kolon numunesinin orta noktasına yerleştirilen bir adet CDP 200 yer değiştirme ölçer ile orta noktanın yer değiştirmesi ölçölmüştür. Numunenin düzlem dışı hareketini ölçmek için temel üzerinden 185 cm yükseklikte yan yüzlerden birine bir adet CDP100 yer değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenebilmesi için kolonun her iki yüzüne yaklaşık olarak kolon derinliği (h) ve kolon derinliğinin yarısı (h/2) mesafede ikişer adet CDP 50 yer değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Bu yer değiştirme ölçerler temel üst yüzünden 27.5 cm ve 55 cm mesafededir. Kullanılan diğer yer değiştirme ölçerler temelde dönme ve ötelemelerin kaydedilmesi içindir.

Boyuna donatılardaki şekil değiştirmeleri ölçmek için numunelerde temel üst yüzünden aşağıya doğru 0, -10, -20, -30 cm mesafede ve temel üst yüzünden yukarıya doğru 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 cm mesafede 12 adet TML marka YFLA-5 tipi şekil değiştirme ölçer donatılara yapıştırılmıştır. Bunun yanında etriyelerdeki şekil değiştirmelerin ölçölmesi için her kolon numunesinde 20, 40 ve 60 cm de bulunan etriyelerin bir yüzdeki kısa kollarının üzerinde de üçer adet YFLA-5 tipi şekil değiştirme ölçer bulunmaktadır.

Ayrıca deney sırasında potansiyel plastik mafsall bölgesinde betonda ve CFRP liflerde oluşacak şekil değiştirmelerin ölçölebilmesi için her kolonda 12 adet PL60 tipi şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır.



4. DENEY SONUÇLARI

Deprem etkisindeki yapı elemanlarında yön değiştiren tekrarlı yükler etkisinde elastik ötesi şekil değiştirmelerin artması sonucu dayanımda ciddi azalmalar olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen 4 adet betonarme kolon numunesi sabit düşey yük altında yön değiştiren tekrarlı yatay yer değiştirmelere maruz bırakılmış ve oluşan hasar her itme çekme adımında ölçülerek kaydedilmiştir.

4.1 Deney Sonuçları

4.1.1 20x60_Ref numunesi

20x60 cm en kesitli ilk numune 480 kN sabit düşey yük etkisinde artan yer değiştirme adımları uygulanarak incelenmiştir. İlk yükleme adımları olan ± 0.001 ve ± 0.0025 görelî öteleme hedeflerinde numunede her hangi bir çatlak oluşmamıştır.

± 0.005 görelî öteleme oranı hedef adımında ilk kılcal çatlaklar oluşurken bu çatlakların genişlikleri 0.1 mm ile sınırlı kalmıştır. Bu adımda yatay yük itme için 69 kN, çekme için ise -73 kN olarak kaydedilmiştir. Bu adıma ait çatlakların gösterildiği resim Şekil 4.1’de verilmiştir.

İleri adımlardan ± 0.0075 ve ± 0.01 hedef adımlarına gelindiğinde numunenin her iki yüzünde de yeni çatlaklar oluşmuş ve çatlak dağılımı mesnet bölgesinde yaklaşık 0-80 cm’lik bir alana dağılmıştır. Bu adımlarda oluşan çatlaklar ve yatay yüklere ait değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu adımlara ait çatlaklar şekil 4.2 ve şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : ± 0.0075 ve ± 0.01 adımları arasında çatlak gelişimleri.

Çatlak No	+0.0075 adımı		-0.0075 adımı		+0.01 adımı		-0.01 adımı	
	Çat. G. (mm)	Yük (kN)	Çat. G. (mm)	Yük (kN)	Çat. G. (mm)	Yük (kN)	Çat. G. (mm)	Yük (kN)
1	0.2	81	0.6	82	0.4	87	1.5	82
2	0.1	81	0.4	82	0.3	87	0.7	82
3	-	81	0.2	82	0.7	87	0.4	82
4	-	81	0.2	82	0.2	87	0.4	82
5	-	81	-	82	0.1	87	0.1	82

Bir sonraki adım olan ± 0.015 görelî öteleme oranında her iki yüzde de kabukta ilk basınç çatlakları başlamıştır. Bu adımda maksimum çatlak genişlikleri itmede 1.2 mm, çekmede 2.5 mm olarak ölçülmüştür. İtmede oluşan kaydedilen maksimum yük 89 kN, çekmede ise 82 kN'dur. Hasar durumları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'da verilmiştir.

± 0.02 görelî öteleme oranına giderken her iki yüzde de pas payı dökülmüş hasar ise mesnet bölgesinin yaklaşık 0-20 cm'lik kısmında bulunan iki çatlakta yoğunlaşmıştır. Bu adımda ölçülen çatlak genişlikleri itme için 2.5 ve 1.5 mm, çekme için ise 3.5 ve 3.0 mm'dir. Yatay yük itme ve çekmede bir miktar azalarak 84 ve 75 kN'a gerilemiştir. Hasar durumu Şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.

± 0.025 adımında itme ve çekme bölgesinde donatılar burkulmuş, kesitin yatay yük kapasitesi belirgin biçimde azalmıştır. Bu adımda çatlak genişlikleri bir miktar daha artmıştır ancak dağılan beton örtüsü sebebiyle sağlıklı bir ölçüm yapılamamıştır. Kaydedilen yatay yük seviyeleri itme için 68 kN, çekme için ise 58 kN dur. Kolonun hasar durumuna ait resimler Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

± 0.03 adımında kolon yatay yük taşıma kapasitesini tamamen kaybetmiş ve yatay yük itmede 57 kN, çekmede ise 16 kN olarak kaydedilmiştir. Bu adıma ait hasar durumu ve genel görüntü Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'te verilmiştir. Yatay yük sıfırlandığında kalıcı yer değiştirme 54.2 mm olarak kaydedilmiş, yaklaşık çatlak genişlikleri 4 mm'den büyük olarak ölçülmüştür. Kalıcı yer değiştirme ve hasar durumunu gösteren resimler Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir.

Bu numuneye ait yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.14'de gösterilmektedir.



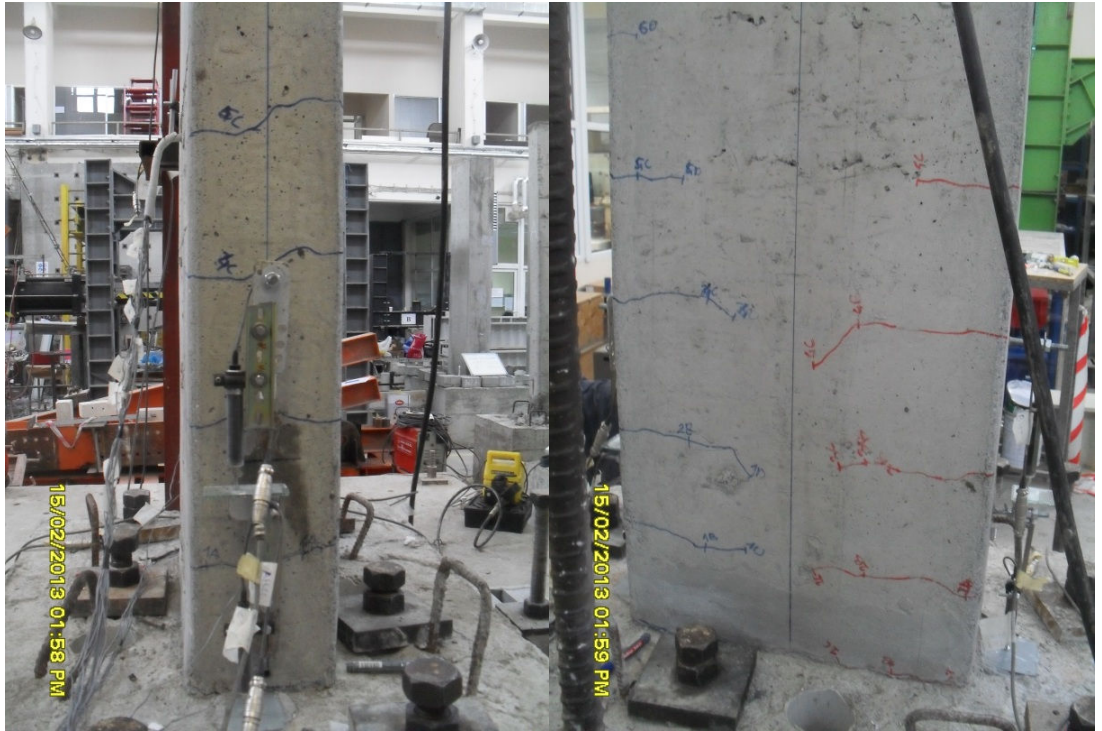
Şekil 4.1 : ± 0.005 görelî ötelemede çatlak oluşumu.



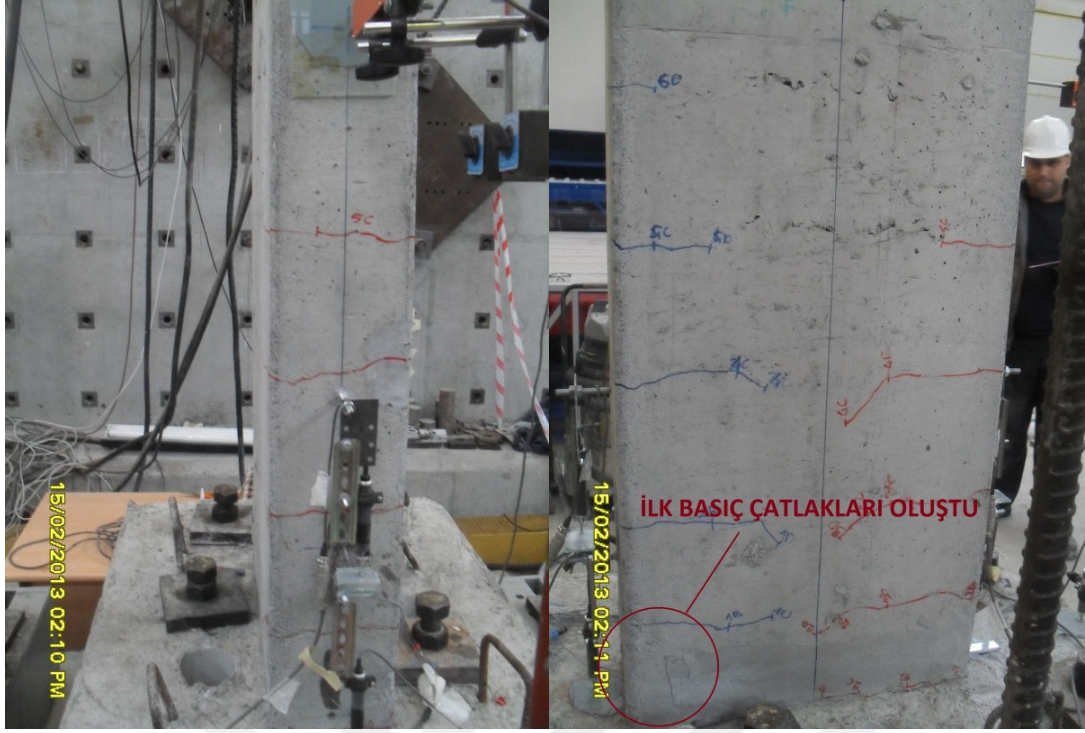
Şekil 4.2 : ± 0.0075 görelî ötelemede çatlak oluşumu.



Şekil 4.3 : ± 0.01 görelî ötelemede çatlak oluşumu.



Şekil 4.4 : $+0.015$ görelî ötelemede çatlak oluşumu.



Şekil 4.5 : +0.015 görelî ötelemede çatlak oluşumu.



Şekil 4.6 : +0.02 görelî ötelemede çatlak genişlikleri ve hasar durumu.



Şekil 4.7 : +0.02 görelî ötelemede çatlak genişlikleri ve hasar durumu.



Şekil 4.8 : +0.025 görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.



Şekil 4.9 : -0.025 görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.



Şekil 4.10 : +0.03 görelî ötelenmede hasar durumu ve donatı burkulması.



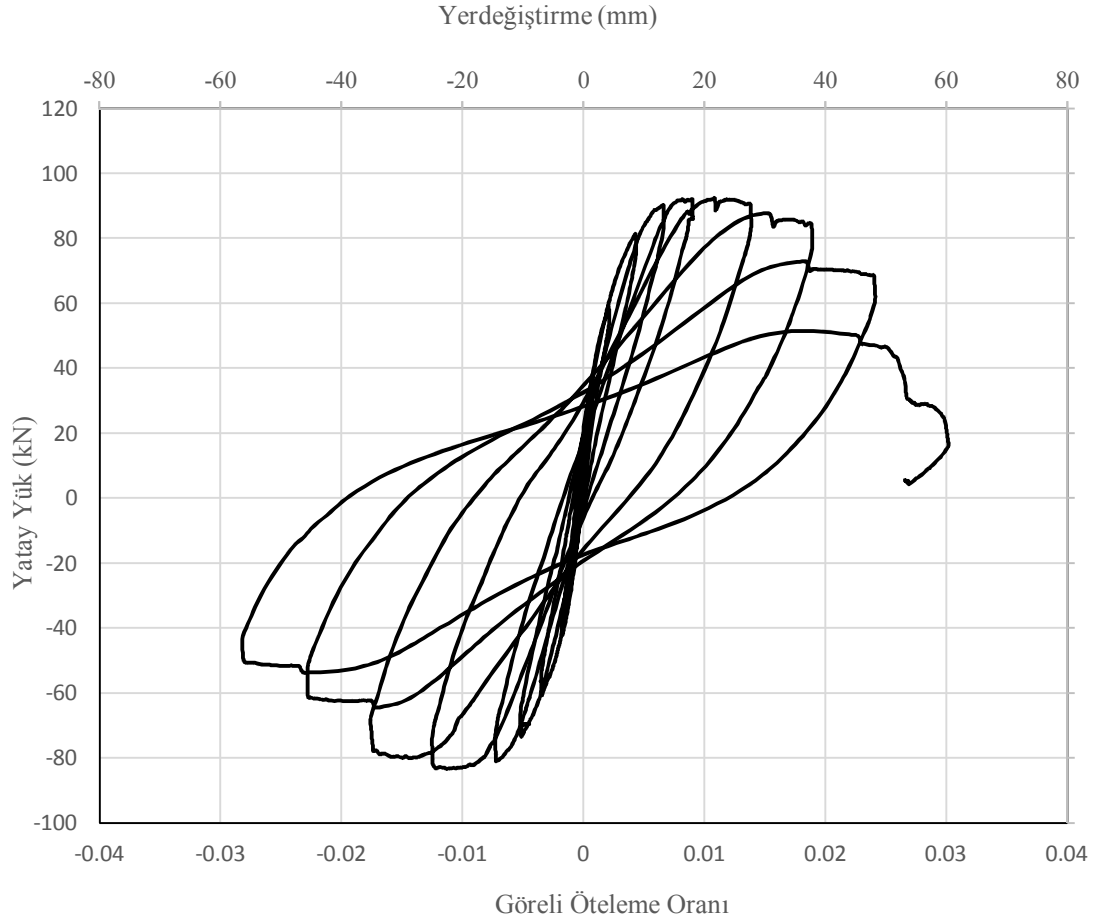
Şekil 4.11 : -0.03 görelî ötelenmede hasar durumu ve donatı burkulması.



Şekil 4.12 : Yatay yük sıfırken kalıcı yer değiştirme 54.2 mm.



Şekil 4.13 : Yatay yük sıfırken hasar durumu.



Şekil 4.14 : Yük-yer değıştirme ilişkisi.

4.1.2 20x60_4N numunesi

İkinci numune 4 kat şerit sargılı ve bulonsuz kolon numunesidir. Bu numunede de ilk kılcal eğilme çatlakları ± 0.005 görelî öteleme oranında oluşmuş ve bu adımda en büyük çatlak genişlikleri itmede 0.2 mm, çekmede 0.3 mm olarak kaydedilmiştir. Numuneye ait genel görüntü Şekil 4.15’de, oluşan ilk çatlaklara ait resimler Şekil 4.16’da verilmiştir.

İlerleyen adımlarda bütün hasar mesnet bölgesinde yaklaşık 0-20 cm aralıkta itme ve çekmede oluşan 1 ve 2 numaralı çatlaklarda toplanmıştır. 1 numaralı çatlaklar kolon-temel ara kesitinde, 2 numaralı çatlaklar ise yaklaşık 18 cm’de ikinci karbon şeridinin hemen altında oluşmuştur. ± 0.015 görelî öteleme oranı adımına gelindiğinde basınç bölgesinde kabukta ilk kılcal basınç çatlakları oluşmuştur. ± 0.0075 ile ± 0.03 görelî öteleme oranı adımları arasında çatlak gelişimleri ve yatay yükler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu adımlara ait hasar durumlarının gösterildiği fotoğraflar Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : ± 0.0075 ile ± 0.03 adımları arasında çatlak gelişimleri.

Adımlar	1 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	2 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	Yatay Yük (kN)
+0.0075	0.9	0.4	84
-0.0075	1.1	0.4	75
+0.01	2.4	0.8	86
-0.01	2.1	0.8	77
+0.015	5.0	1.0	91
-0.015	4.0	1.2	78
+0.02	7.0	2.4	90
-0.02	6.0	1.8	80
+0.025	10.0	5.0	92
-0.025	9.0	4.0	82
+0.03	10.0	10.0	92
-0.03	10.0	6.0	82

± 0.035 görelî öteleme oranı adımına gelindiğinde itme çekme durumu için basınç bölgelerinde beton kabuk atmaya başlamıştır. Bu adımda kaydedilen en büyük çatlak genişlikler itme için 1 ve 2 no'lu çatlaklarda 10.0 mm; çekme için ise 1 no'lu çatlakta 10.0 mm, 2 no'lu çatlakta 7.0 mm'dir. Kaydedilen yatay yüklerde ise belirgin bir azalma olmamıştır. Buna göre itmede yük 92 kN, çekmede 81 kN'dur. Bu adımda itme ve çekmede numunede oluşan hasar durumu Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de, numunenin genel durumu Şekil 4.23'te gösterilmiştir.

± 0.04 görelî öteleme oranı hedefinde çatlak genişlikleri bir miktar artarak itme ve çekmede maksimum 12 mm civarına ulaşmıştır. Bu adımda yatay küçük bir azalma oluşmuş, yatay yük itmede 90 kN çekmede ise 76 kN olarak kaydedilmiştir. Bu adıma ait hasar durumu Şekil 4.24 ve 4.25'de gösterilmiştir. Bu adımda düzlem dışı yer değiştirme yaklaşık 4 cm'ye kadar çıkmıştır.

Bir sonraki adımda +0.05 görelî öteleme oranı noktasına yaklaşılrken basınç bölgesinde donatının burkulması ve düzlem dışı yer değiştirmede ani artış ile yük 80 kN mertebelerinden 40 kN'a kadar düşmüştür. Bu aşamadan sonra güvenlik gerekçesiyle deneye son verilmiştir. Bu adımda ölçülen en büyük çatlak genişlikleri 12 mm ve 10 mm dir. Yatay yük sıfırlandığında kalıcı yer değiştirme 69.3 mm olarak ölçülmüştür. Bu adıma ait numune genel durumunu gösteren resimler ve hasar durumları Şekil 4.26'da, kalıcı yer değiştirme durumu için resimler Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.

Numuneye ait yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.29'da verilmiştir. Çekmede 0.044 görelî ötelenme oranına gelindiğinde kesit yük taşıma kapasitesi %50 azaldı.



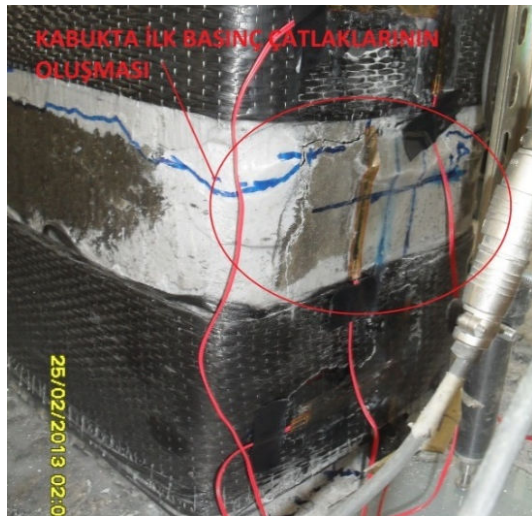
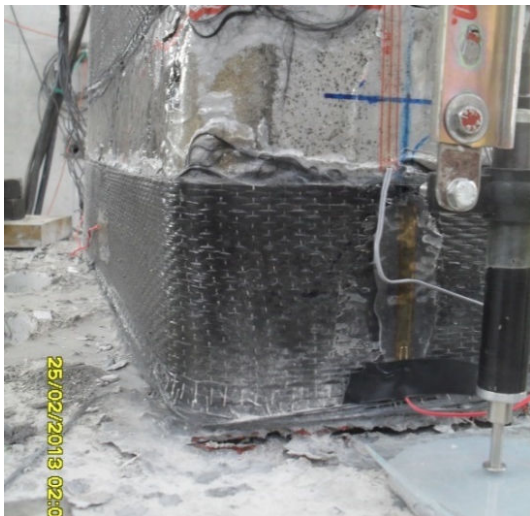
Şekil 4.15 : Numuneye ait genel görüntü.



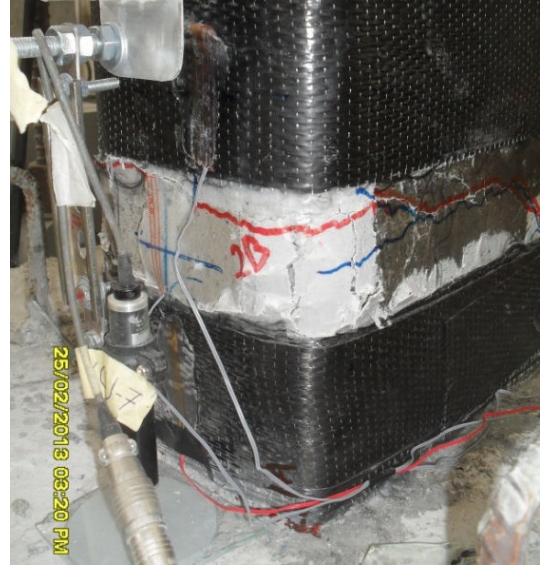
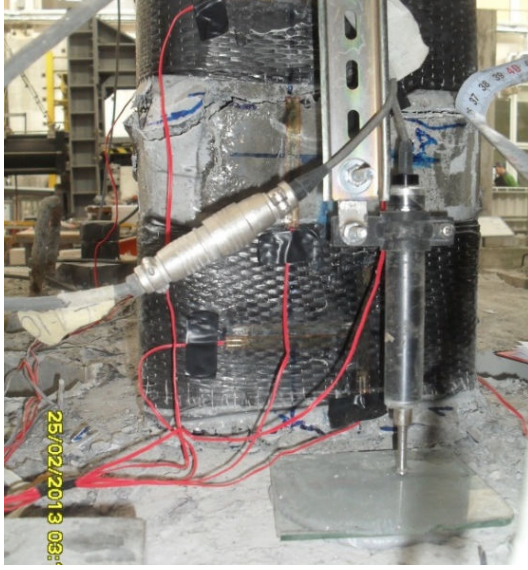
Şekil 4.16 : ± 0.005 görelî ötelemede oluşan ilk çatlaklar.



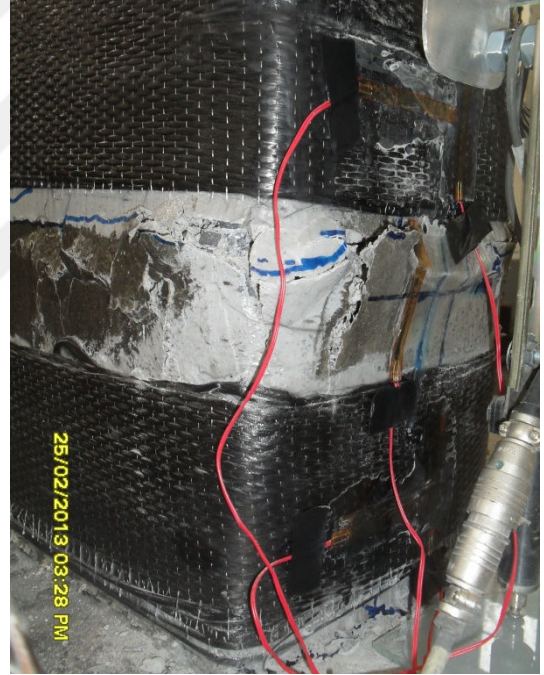
Şekil 4.17 : $+0.015$ görelî ötelemede hasar durumu.



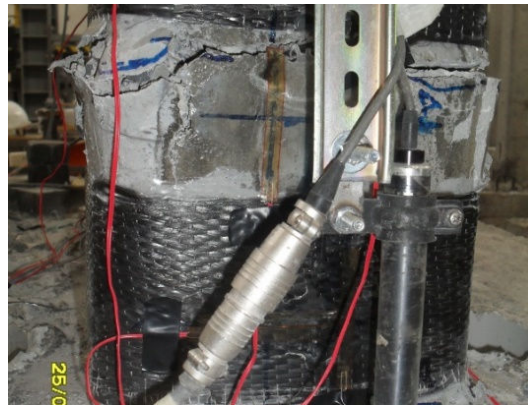
Şekil 4.18 : -0.015 görelî ötelemede hasar durumu ve ilk basınç çatlakları.



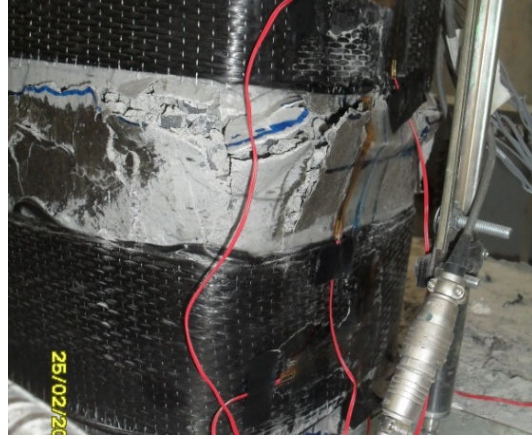
Şekil 4.19 : +0.03 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



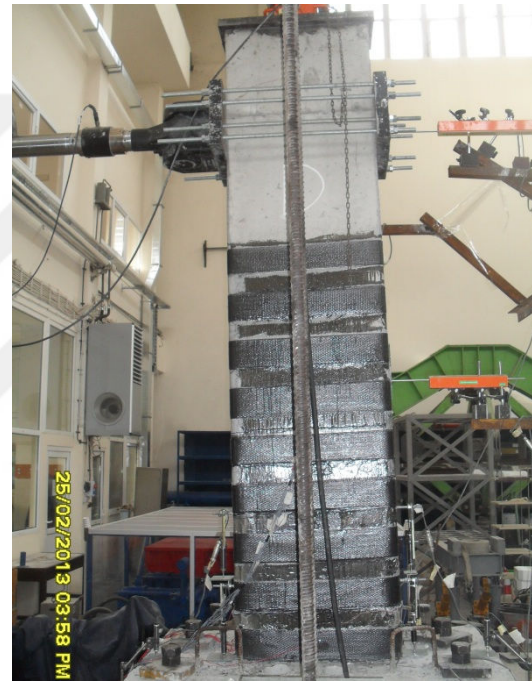
Şekil 4.20 : -0.03 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



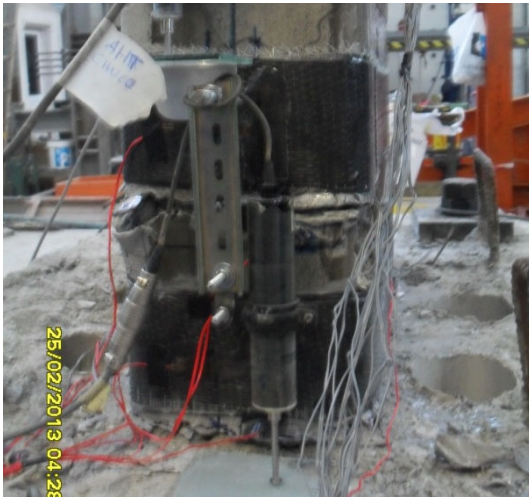
Şekil 4.21 : +0.035 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



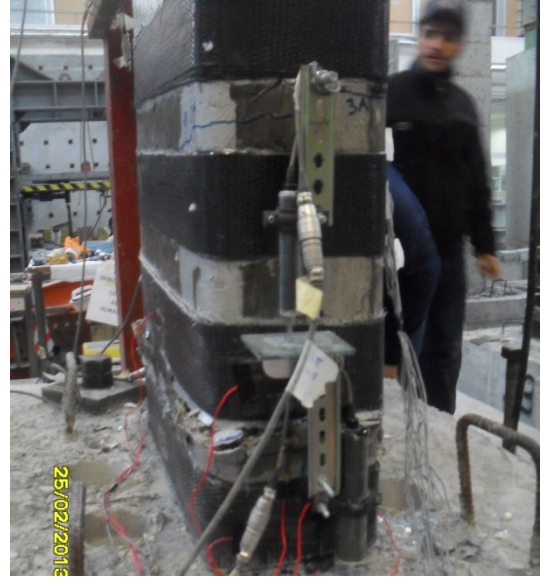
Şekil 4.22 : -0.035 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.23 : ± 0.035 görelî ötelemede itme ve çekmede numunenin genel durumu.



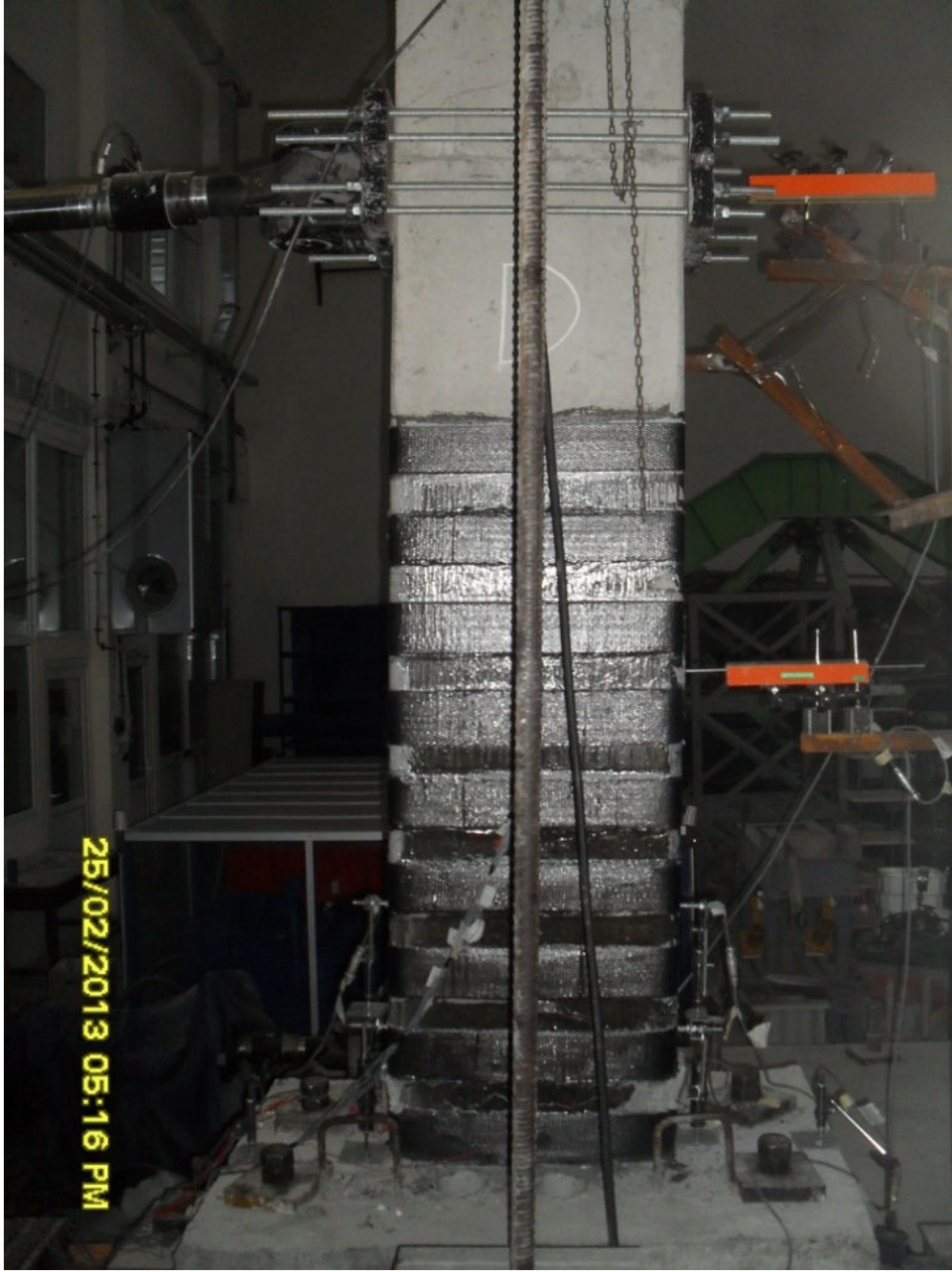
Şekil 4.24 : +0.04 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



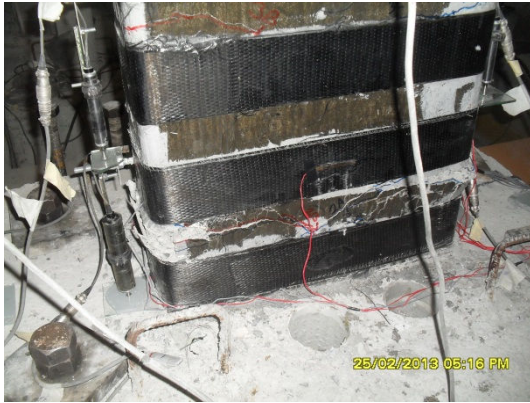
Şekil 4.25 : -0.04 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



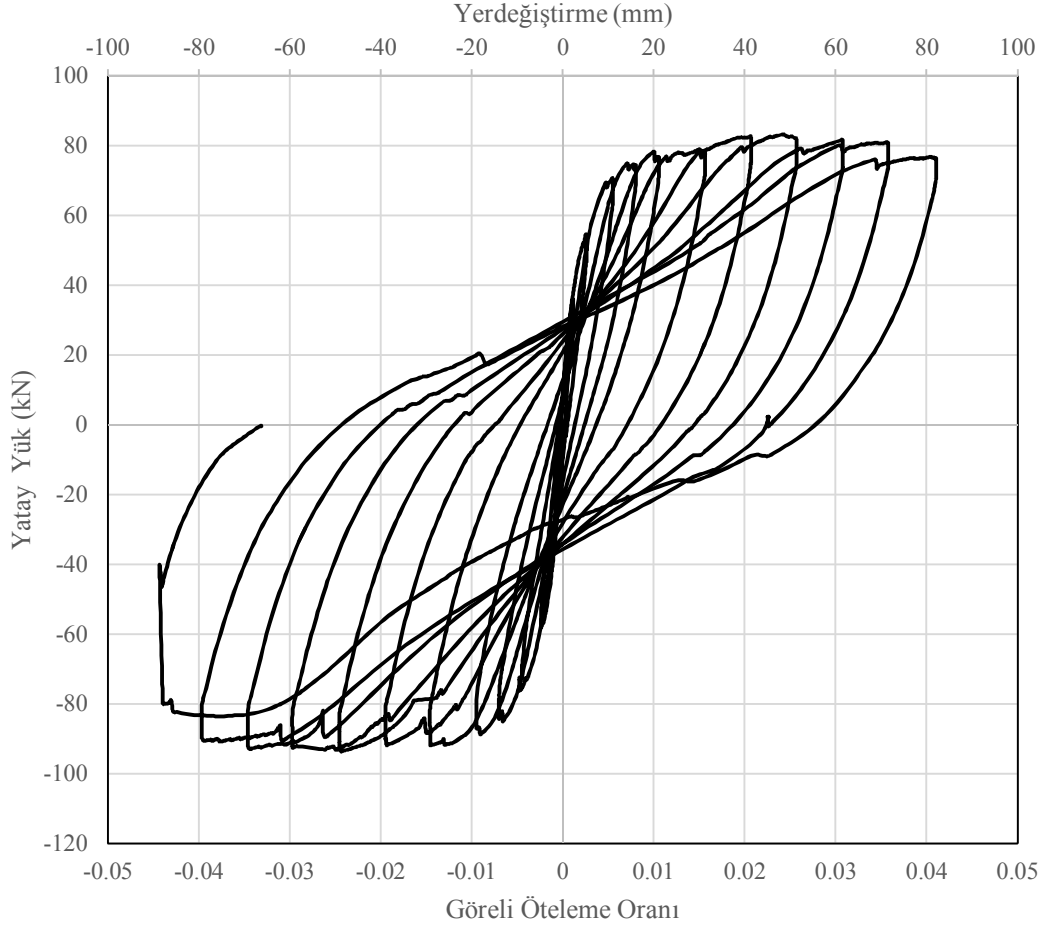
Şekil 4.26 : -91.6 mm(-0.044 görelî) yer değıştirmede hasar durumu.



Şekil 4.27 : Yatay yük sıfır, kalıcı yer değiştirme 69.3 mm.



Şekil 4.28 : Kalıcı yer değiştirmede hasar durumu.



Şekil 4.29 : Numuneye ait yük-yer değiştirme diyagramı.

4.1.3 20x60_4N_1A numunesi

Üçüncü numune 4 kat şerit sargılı ve tek sıra bulonlu kolon numunesidir. Eksenel yük seviyesi diğer tüm 20x60 cm en kesitli kolonlarda olduğu gibi 480 kN'dur. Deney sırasında ilk kılcal eğilme çatlakları ± 0.025 hedef görelî öteleme oranında oluşmuş ve ilk oluşan çatlak genişlikleri 0.1 mm olarak kaydedilmiştir. Bu adımda yatay yük itme için 64 kN, çekme için 67 kN olarak kaydedilmiştir. Numuneye ait genel görüntü Şekil 4.30'de oluşan ilk çatlaklara ait resimler Şekil 4.31'de verilmiştir.

İlerleyen adımlarda bütün hasar mesnet bölgesinde yaklaşık 0-20 cm aralıkta itme ve çekmede oluşan 1 ve 3 numaralı çatlaklarda toplanmıştır. 1 numaralı çatlaklar kolon-t temel ara kesitinde, 3 numaralı çatlaklar ise yaklaşık 15 cm'de oluşmuştur. ± 0.02 adımına gelindiğinde basınç bölgesinde kabukta ilk kılcal basınç çatlakları oluşmuştur. ± 0.005 ile ± 0.040 adımları arasında çatlak gelişimleri ve yatay yükler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu adımlara ait hasar durumlarının gösterildiği fotoğraflar Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : ± 0.005 ile ± 0.040 adımları arasında çatlak gelişimleri.

Adımlar	1 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	3 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	Yatay Yük (kN)
+0.005	0.2	0.3	82
-0.005	0.2	0.3	86
+0.0075	0.4	0.9	88
-0.0075	0.5	0.9	92
+0.01	0.7	2.0	90
-0.01	0.7	2.0	94
+0.015	1.5	3.5	94
-0.015	1.4	3.7	94
+0.02	2.2	8.0	92
-0.02	2.7	7.0	95
+0.025	3.3	10.0	91
-0.025	3.7	10.0	94
+0.03	5.0	10.0	91
-0.03	8.0	10.0	96
+0.035	9.0	10.0	90.5
-0.035	9.0	10.0	95
+0.040	10.0	13.0	89
-0.040	10.0	10.0	92.5

± 0.05 adımına gelindiğinde itme çekme durumu için basınç bölgelerinde betonda ezilme belirgin şekilde artmıştır. En alt sırada kullanılan karbon lifli polimer kompozit şerit köşe noktalarında gözle görülür şekilde bombe yapmış, orta noktada ise kullanılan bulon ve pul bombe yapmasına izin vermemiştir. Bu adımda kaydedilen en büyük çatlak genişlikler itme için 1 no'lu çatlak için ölçülemezken 3 no'lu çatlak için 18.0 mm; çekme için ise 1 no'lu çatlakta 15.0 mm, 2 no'lu çatlakta 15.0 mm'dir. Kaydedilen yatay yüklerde ise belirgin bir azalma olmamıştır. Buna göre itmede yük 89 kN, çekmede 93 kN'dur. Bu adımda itme ve çekmede numunede oluşan hasar durumu Şekil 4.36 ve 4.37'de gösterilmiştir.

± 0.06 ve ± 0.08 görelî öteleme oranı hedefleri arasında çatlak genişliklerindeki ilerleme ve yatay yük Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bir önceki adımlarda basınç yükleri altında kolonun her iki kenarında da kabukta belirgin ezilme-dağılmalar olduğundan bu adımlarda okunan çatlak genişlikleri çok sağlıklı değildir.

Çizelge 4.4 : ± 0.06 ile ± 0.08 adımları arasında çatlak gelişimleri.

Adımlar	1 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	3 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	Yatay Yük (kN)
+0.06	20 mm civarı	20 mm	87
-0.06	20 mm civarı	20 mm	92
+0.07	20 mm civarı	25 mm	84
-0.07	20 mm civarı	20 mm	90
+0.08	20 mm civarı	25 mm	78
-0.08	20 mm civarı	20 mm	87

± 0.08 adımımda çekmede yük kaybı yaklaşık %10 mertebelerine kadar ulaşmıştır. Referans numuneye göre süneklik mertebesinin neredeyse 2-3 kat arttığı göz önünden bulundurulurak ve yük %10 yük kabının ileriki adımlarda artacağı düşünülerek deneye daha fazla devam edilmemiştir. Bu adıma ait numunenin genel halini ve hasar durumunu gösterir resimler Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de gösterilmiştir.

Yatay yük sıfırlandığında okunan kalıcı yer değiştirme 80.4 mm’dir. Kalıcı yer değiştirmeye ait genel durum ve hasar durumu Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de verilmiştir.

Numuneye ait yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.45’de verilmiştir.



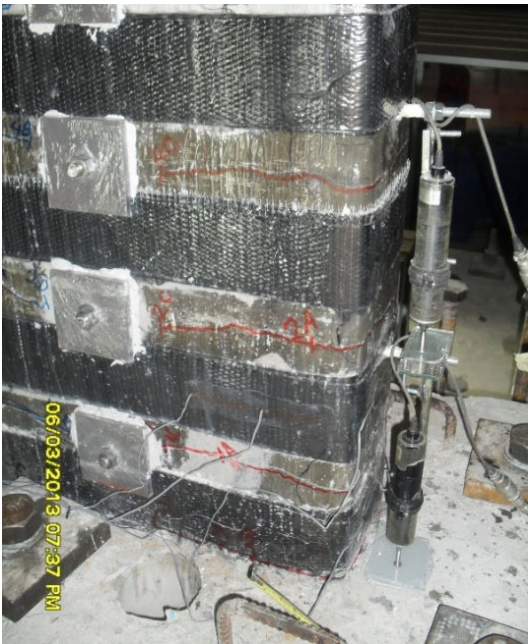
Şekil 4.30 : Numuneye ait genel görüntü.



Şekil 4.31 : ± 0.0025 görelî ötelemede oluşan ilk çatlaklar.



Şekil 4.32 : $+0.02$ görelî ötelemede hasar durumu.



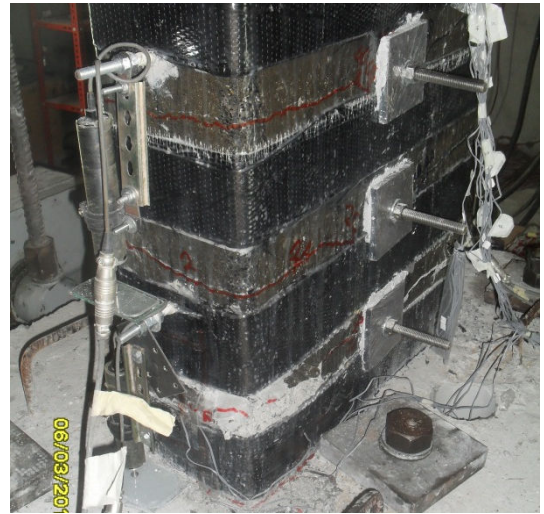
Şekil 4.33 : -0.02 görelî ötelemede hasar durumu ve ilk basınç çatlakları.



Şekil 4.34 : +0.040 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



Şekil 4.35 : -0.04 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



Şekil 4.36 : +0.05 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



Şekil 4.37 : -0.05 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.38 : +0.07 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.39 : -0.07 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.40 : ± 0.08 görelî ötelemede itme ve çekmede genel görünüş.



Şekil 4.41 : $+0.08$ görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



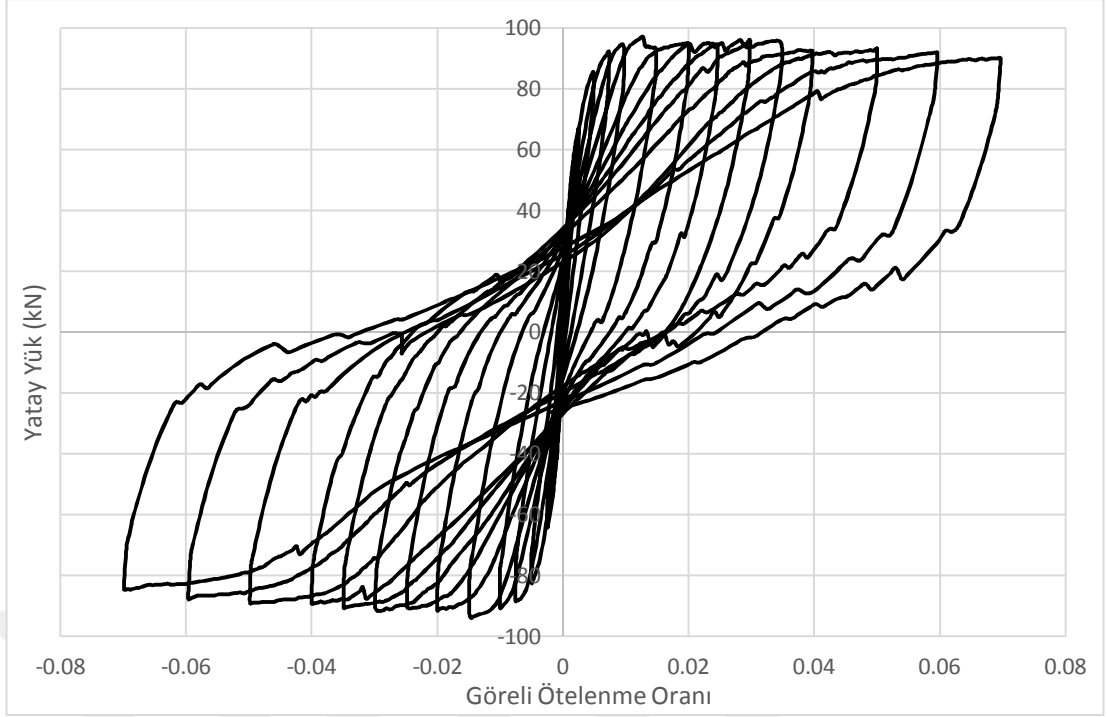
Şekil 4.42 : -0.08 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.43 : Yatay yük sıfır, kalıcı yer değiştirme 80.4 mm.



Şekil 4.44 : Kalıcı yer değiştirmede hasar durumu.



Şekil 4.45 : Numuneye ait yük-yer değıştirme diyagramı.

4.1.4 20x60_4N_2A numunesi

Dördüncü numune 4 kat şerit sargılı ve çift sıra bulonlu kolon numunesidir. Eksenel yük seviyesi diğer tüm 20x60 cm en kesitli kolonlarda olduğu gibi 480 kN'dur. Deney sırasında ilk kılcal eğilme çatlakları ± 0.025 hedef görelî öteleme oranında oluşmuş ve ilk oluşan çatlak genişlikleri 0.1 mm'den küçük olarak kaydedilmiştir. Bu adımda yatay yük itme için 57 kN, çekme için 68.5 kN olarak kaydedilmiştir. Numuneye ait genel görüntü Şekil 4.46'da oluşan ilk çatlaklara ait resimler Şekil 4.47'de verilmiştir.

İlerleyen adımlarda bütün hasar mesnet bölgesinde yaklaşık 0-35 cm aralıkta itme yönünde 1, 2 ve 3 no'lu çatlaklarda, çekme yönünde ise 1,2 ve 4 numaralı çatlaklarda toplanmıştır. İtme yönü için 1 numaralı çatlak kolon-temel ara kesitinde, 2 numaralı çatlak yaklaşık 18 cm'de ikinci karbon şeridinin hemen altında, 3 numaralı çatlak ise yaklaşık 35 cm'de üçüncü karbon şeridinin hemen altında oluşmuştur. Çekme yönü için ise 4 numaralı çatlak kolon-temel ara kesitinde, 1 numaralı çatlak yaklaşık 17 cm'de ikinci karbon şeridinin hemen altında 2 Numaralı çatlak ise yaklaşık 36 cm'de üçüncü karbon şeridinin hemen altında oluşmuştur. ± 0.015 adımına gelindiğinde basınç bölgesinde kabukta ilk kılcal basınç çatlakları oluşmuştur. ± 0.005 ile ± 0.040 adımları arasında çatlak gelişimleri ve yatay yükler Çizelge 4.5'de verilmiştir. Bu adımlara ait hasar durumlarının gösterildiği fotoğraflar Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50 ve Şekil 4.51 arasında gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : ± 0.005 ile ± 0.040 adımları arasında çatlak gelişimleri.

Adımlar	1 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	2 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	3 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	4 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	Yatay Yük (kN)
+0.005	0.3	0.1	0.1	---	76
-0.005	0.2	0.2	---	0.4	85
+0.0075	1.1	0.5	0.2	---	82
-0.0075	0.3	0.2	---	0.8	94
+0.01	1.3	0.4	0.3	---	85.5
-0.01	0.5	0.3	---	1.3	97
+0.015	2.5	0.5	0.3	---	88
-0.015	1.0	0.4	---	3.5	97
+0.02	7.0	1.1	0.4	---	92
-0.02	2.5	0.4	---	15.0	98
+0.025	16.0	1.4	0.4	---	90
-0.025	2.6	0.5	---	17.0	98
+0.03	16.0	3.2	0.2	---	90
-0.03	3.0	0.5	---	17.0	96.5
+0.035	15.0	6.0	0.3	---	89
-0.035	6.0	0.5	---	18.0	97.5
+0.040	16.0	7.0	0.4	---	90
-0.040	8.0	0.7	---	20	98

± 0.05 adımına gelindiğinde itme çekme durumu için basınç bölgelerinde beton örtü tabakası kısmen dökülmeye başlamıştır. Bu adımda kaydedilen en büyük çatlak genişlikler itme adımımda 1 no'lu çatlak için 15 mm, 2 no'lu çatlak için 11.0 mm, 3 no'lu çatlak için 0.6 mm'dir; çekme için ise 1 no'lu çatlakta 10.0 mm, 2 no'lu çatlakta 0.7 mm, 4 no'lu çatlakta 22 mm'dir. Kaydedilen yatay yük itmede yük 90.7 kN, çekmede 100 kN'dur. Bu adımda itme ve çekmede numunede oluşan hasar durumu Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'de gösterilmiştir.

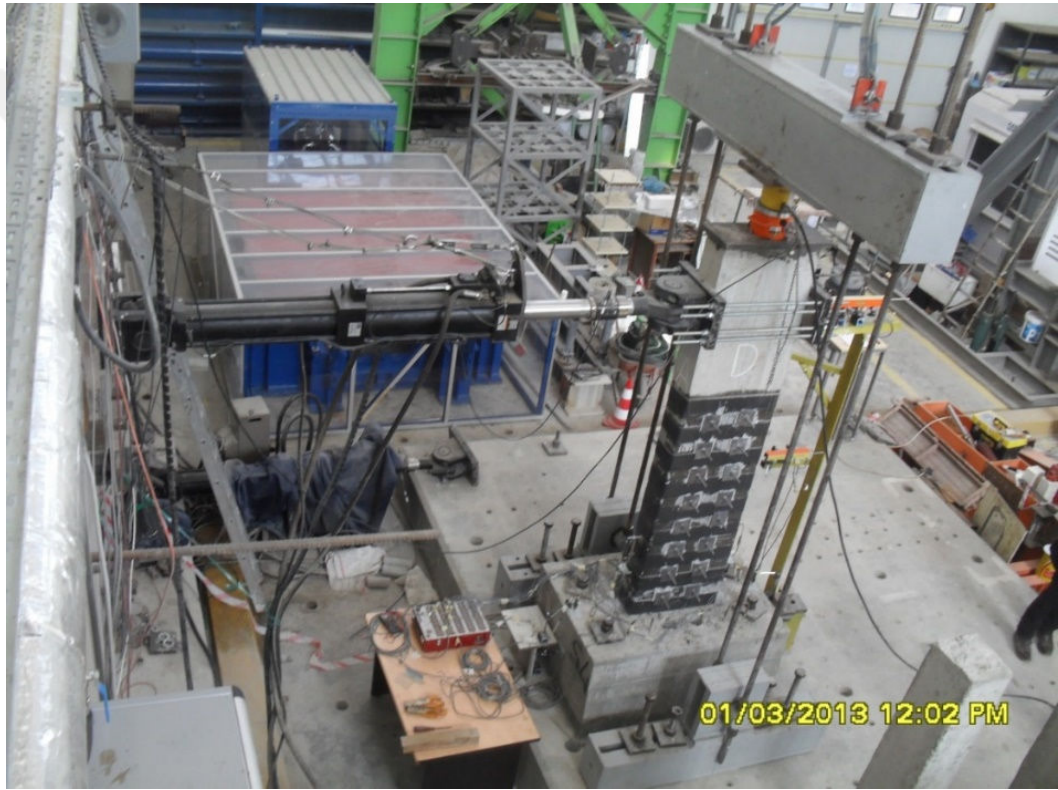
± 0.06 ve ± 0.08 görelî öteleme oranı hedefleri arasında çatlak genişliklerindeki ilerleme ve yatay yük Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bir önceki adımlarda basınç yükleri altında kolonun her iki kenarında da kabukta belirgin ezilme-dağılmalar olduğundan bu adımlarda okunan çatlak genişlikleri çok sağlıklı değildir.

Çizelge 4.6 : ± 0.06 ile ± 0.08 adımları arasında çatlak gelişimleri.

Adımlar	1 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	2 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	3 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	4 No'lu Çatlak Genişliği (mm)	Yatay Yük (kN)
+0.06	20.0	15.0	0.6	---	88
-0.06	13.0	0.7	---	20.0	99
+0.07	20.0	20.0	0.6	---	81.5
-0.07	20.0	0.9	---	22.0	91
+0.08	15.0	30.0	0.7	---	72
-0.08	35.0	0.8	---	15.0	82

± 0.08 adımımda çekmede yük kaybı yaklaşık %20 mertebelerine kadar ulaşmıştır. Basınç bölgesinde donatı ciddi şekilde burkularak S şeklini almıştır. Referans numuneye göre süneklik mertebesinin neredeyse 2-3 kat arttığı göz önünden bulundurulur ve %20 yük kabının ileriki adımlarda artacağı düşünülerek deneye daha fazla devam edilmemiştir. Bu adıma ait numunenin hasar durumunu ve genel halini gösterir resimler Şekil 4.56, Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’de gösterilmiştir.

Yatay yük sıfırlandığında okunan kalıcı yer değiştirme 104 mm’dir. Kalıcı yer değiştirmeye ait genel durum ve hasar durumu Şekil 4.59 ve Şekil 4.60’da verilmiştir. Numuneye ait yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 4.61’te verilmiştir.



Şekil 4.46 : Numuneye ait genel görüntü.



Şekil 4.47 : ± 0.0025 görelî ötelemede oluşan ilk çatlaklar.



Şekil 4.48 : +0.02 görelî ötelemede hasar durumu.



Şekil 4.49 : -0.02 görelî ötelemede hasar durumu ve ilk basınç çatlakları.



Şekil 4.50 : +0.040 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



Şekil 4.51 : -0.04 görelî ötelemde çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



Şekil 4.52 : +0.05 görelî ötelemde çekme ve basınç bölgelerinde hasar durumu.



Şekil 4.53 : -0.05 görelî ötelemde çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.54 : +0.07 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



Şekil 4.55 : -0.07 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



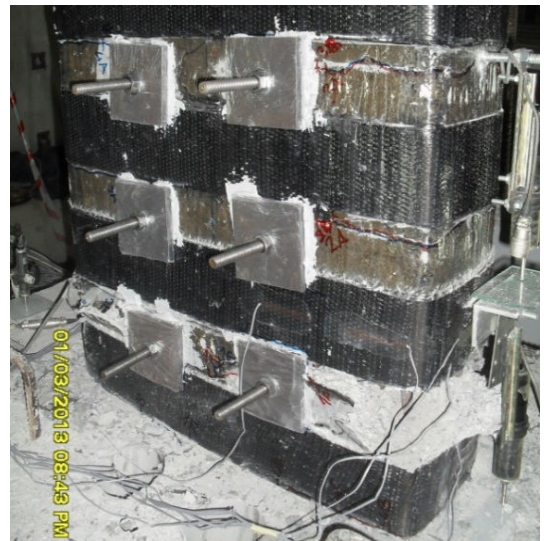
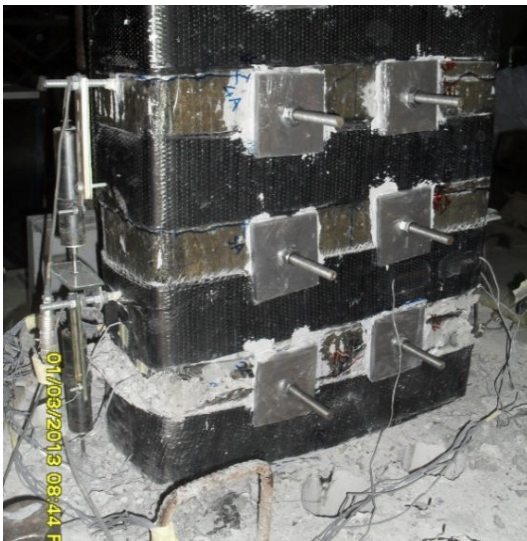
Şekil 4.56 : +0.08 görelî ötelemede hasar durumu ve donatı burkulması.



Şekil 4.57 : -0,08 görelî ötelemede çekme ve basınç bölgesinde hasar durumu.



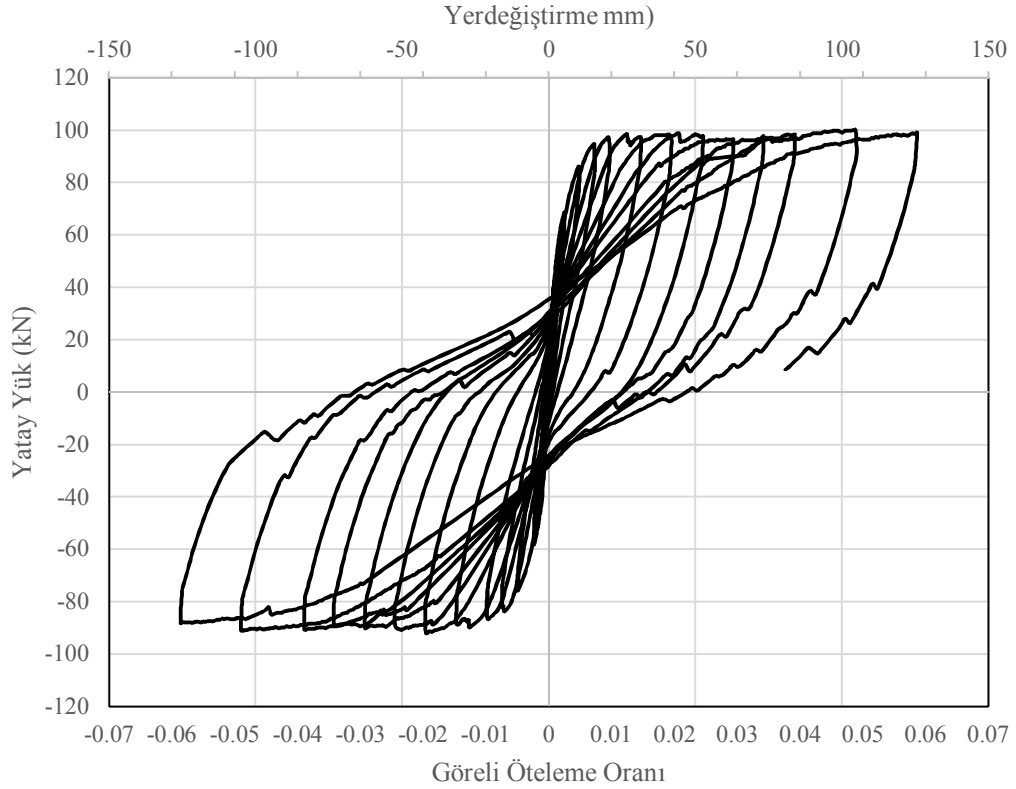
Şekil 4.58 : ± 0.08 görelî ötelemede itme ve çekmede genel görünüş.



Şekil 4.59 : Kalıcı yer değıştirmede hasar durumu.



Şekil 4.60 : Yatay yük sıfır, kalıcı yer değıştirme 104 mm.

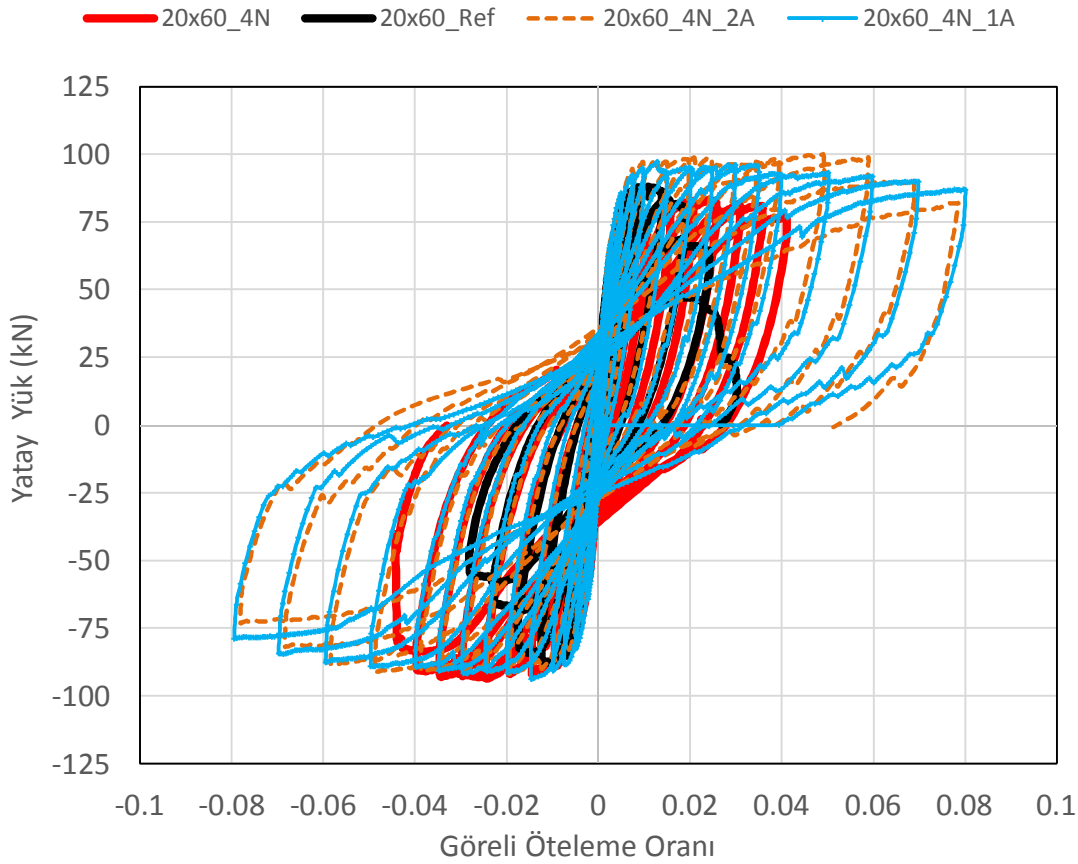


Şekil 4.61 : Numuneye ait yük-yer değiştirme diyagramı.

4.2 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yukarıda detaylı şekilde açıklanmış olan deney sonuçları karşılaştırma amacı ile bu bölümde bir arada verilmiştir. Numunelerin yük-yer değiştirme ilişkileri Şekil 4.62’de verilmiştir. Şekilde görülebileceği gibi, referans numunesi gevrek davranış sergilemiş, %2 öteleme oranının üzerindeki yer değiştirmelerde dayanımlarını koruyamamıştır. Numunelerin üzerindeki düşey yükler yüksek olduğu için numunelerin istenen düzeyde sünek davranış göstermemesi beklenen bir sonuçtur. Bu numunede dayanım kaybı kabuk betonun ezilmesi ve dökülmesi sonrası boyuna donatıların burkulması ile gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, mevcut yapıların değerlendirmesine yönelik çeşitli teknik dokümanlarda bu düzeyde eksenel kuvvetlere maruz kolonlar için can güvenliği ya da göçme öncesi performans seviyeleri için öngörülen öteleme oranları daha da küçük değerlerdedir. Bir başka ifade ile referans numune için elde edilmiş olan sonuçlar, dünyanın çeşitli bölgelerinde kullanılmakta olan performans dayalı değerlendirme yöntemlerinde yüksek düşey kuvvetlere maruz kolonlar için verilen yer değiştirme sınırlarının yeterince konservatif olduğunu göstermektedir. Hatta deney sayısının daha da arttırılması durumunda söz konusu performans düzeyleri için teknik

dokümanlarda verilen yer değiştirme sınırlarının bir miktar esnetilmesine imkan sağlanabileceği düşünölmektedir. Lifli polimer kompozitler ile sargılanmış olan kolonlarda ise dayanım kaybının çok daha ileri yer değiştirme düzeylerinde ortaya çıktığı görünmektedir. Uygulanan lifli polimer kompozit detayına ve çelik bulonların düzenine göre güçlendirilmiş elemanların performansı bir miktar değişebilmekle birlikte, genel olarak tüm güçlendirilmiş numunelerde kolonların yeterli süneklile ulaştığını belirtmek mümkündür. şeritler şeklinde sargılama ile yapılan güçlendirmelerde bu şeritler arasında betonun ezilmesi ve sonrasında donatının burkulması ile dayanım kayıpları gözlemlenmiştir.



şekil 4.62 : Deneysel yük–yer değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

5. ANALİTİK HESAPLAR

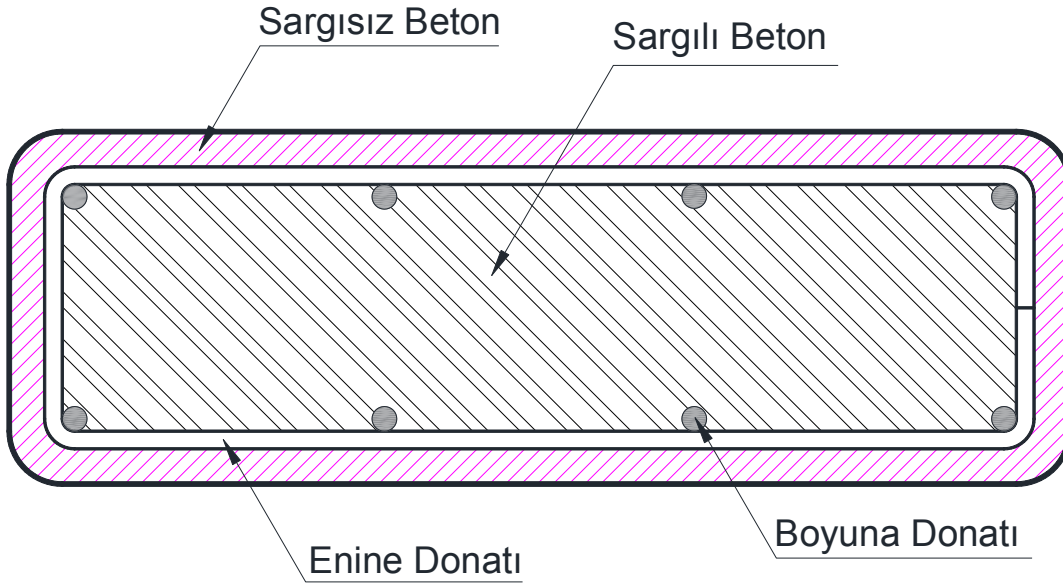
Analitik hesaplar yapılırken XTRACT ve bu çalışma kapsamında MATLAB programlama dili kullanılarak geliştirilen ilkimodel adı verilen bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Analitik olarak tespit edilen yük-yer değiştirme ilişkileri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

5.1 Malzeme Modelleme

Analitik hesaplar için yapılacak yaklaşımlar kesit davranışını esas almaktadır. Bu sebeple kesitlerde yer alan sargısız beton(kabuk betonu), enine donatı ile sargılı beton, lifli polimer ve/veya çelik bulonlarla sargılanmış beton ve donatı çeliği için malzeme davranışını belirlemek adına bazı yaklaşımlarda bulunulmuştur. Malzeme modelleme aşamasında sargılı ve sargısız modelleri üretilirken betonun karakteristik basınç dayanımı olarak deneylerin yapıldığı tarihte (180 günlük beton) 150 mm x 300 mm standart silindir numune deneylerinden elde edilen 11 MPa değeri, şekil ve boyut etkisi göz önünde bulundurulduğunda dönüşüme gerek kalmadan kullanılmıştır. Beton elastisite modülü olarak yine standart silindir numune deneylerinden elde edilen 15000 MPa değeri kullanılmıştır. Boyuna donatı, enine donatı ve bulon için çelik çekme deneylerinden elde edilen elastisite modülü, akma dayanımı, kopma dayanımı, pekleşme uzama oranı ve kopma uzama oranı kullanılmıştır.

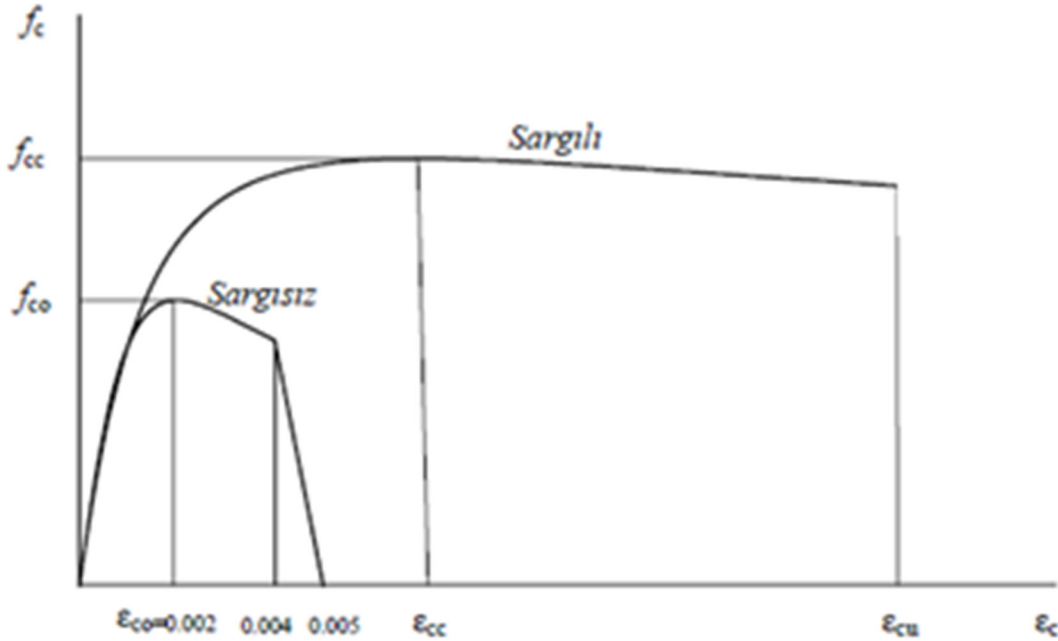
5.1.1 20x60_Ref numunesi için malzeme modelleri

Referans numunesi kesitinin malzeme özellikleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Lifli polimer sargı bulunmadığı için sadece kesitin enine donatı ile sargılanmış olan çekirdek betonunun sargılı beton davranışı göstermesi beklenmektedir. Çekirdek alanının dışında kalan kabuk betonunun sargısız beton davranışı göstermesi beklenmektedir. Bu sebeple 20x60_Ref numunesi için sargısız beton, sargılı beton ve donatı çeliği modeli belirlenmiştir.



Şekil 5.1 : 20x60_Ref numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.

Sargılı ve sargısız beton için Mander ve Diğ. (1988) çalışmasında önerilen sargılı ve sargısız beton modeli kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Sargılı ve sargısız beton için Mander modeli.

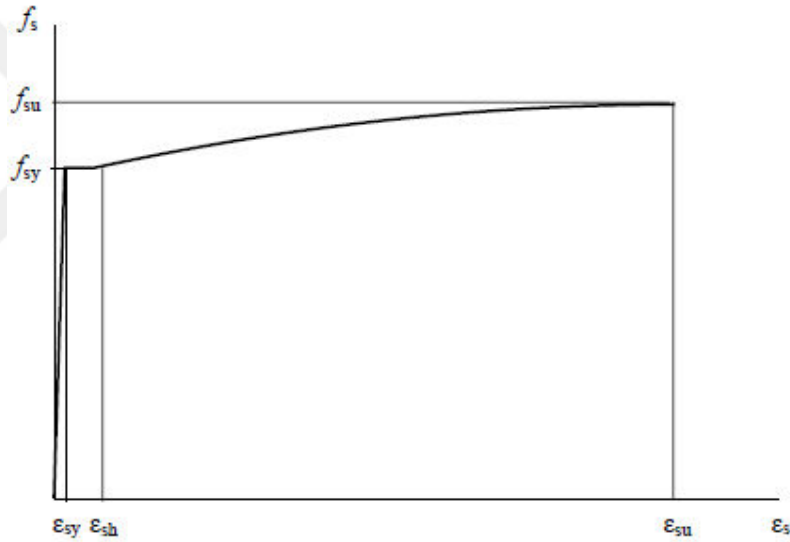
Donatı çeliğinin çekme etkisi altındaki davranışı için pekleşmeli elastoplastik çelik donatı modeli kullanılmıştır (Şekil 5.3). Donatı çeliğinin basınç etkisindeki davranışı için Yalcin ve Saatcioglu (2000) çalışmasında önerilen boyuna donatının burkulmasını da içeren basınç gerilmesi etkisindeki çelik modeli kullanılmıştır (Şekil 5.4). Önerilen modelde boyuna donatının serbest boyu(etriye aralığı) ve boyuna donatı çapının

birbirine oranına göre donatı çeliğinin basınç etkisi altındaki davranışı belirlenmiştir. Donatı boy-en oranı 8'den büyük olan durum için basınç gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi ile ilgili hesaplamalar $\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{s,Du}$ aralığı için Denklem (5.1), Denklem (5.2) ve Denklem (5.3)'de verilmiştir. Burada f_s donatı çeliğinin basınç dayanımını, f_y akma dayanımını, $f_{s,Du}$ basınçta nihai gerilmeyi, ϵ_s kısıalma oranını, ϵ_y akma kısıalma oranını, $\epsilon_{s,Du}$ basınçta nihai kısıalma oranı göstermektedir. s_b boyuna donatı serbest boyunu, d_b boyuna donatı çapını göstermektedir. 14 mm boyuna donatı ve 200 mm etriye aralığı için belirlenen donatı çeliği modeli Şekil 5.5'de verilmiştir.

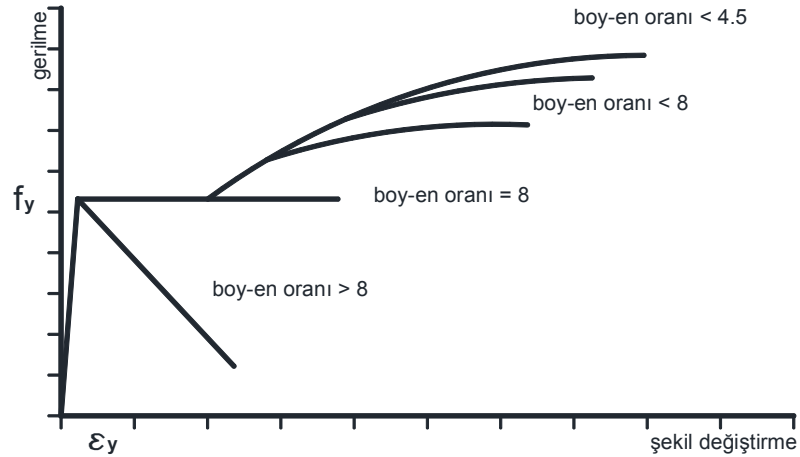
$$f_s = f_y - (\epsilon_s - \epsilon_y) \cdot [-23000 + 11000 \ln(s_b/d_b)] \quad (5.1)$$

$$f_{s,Du} = 28 \cdot (s_b/d_b)^{-1.7} \cdot f_y \quad (5.2)$$

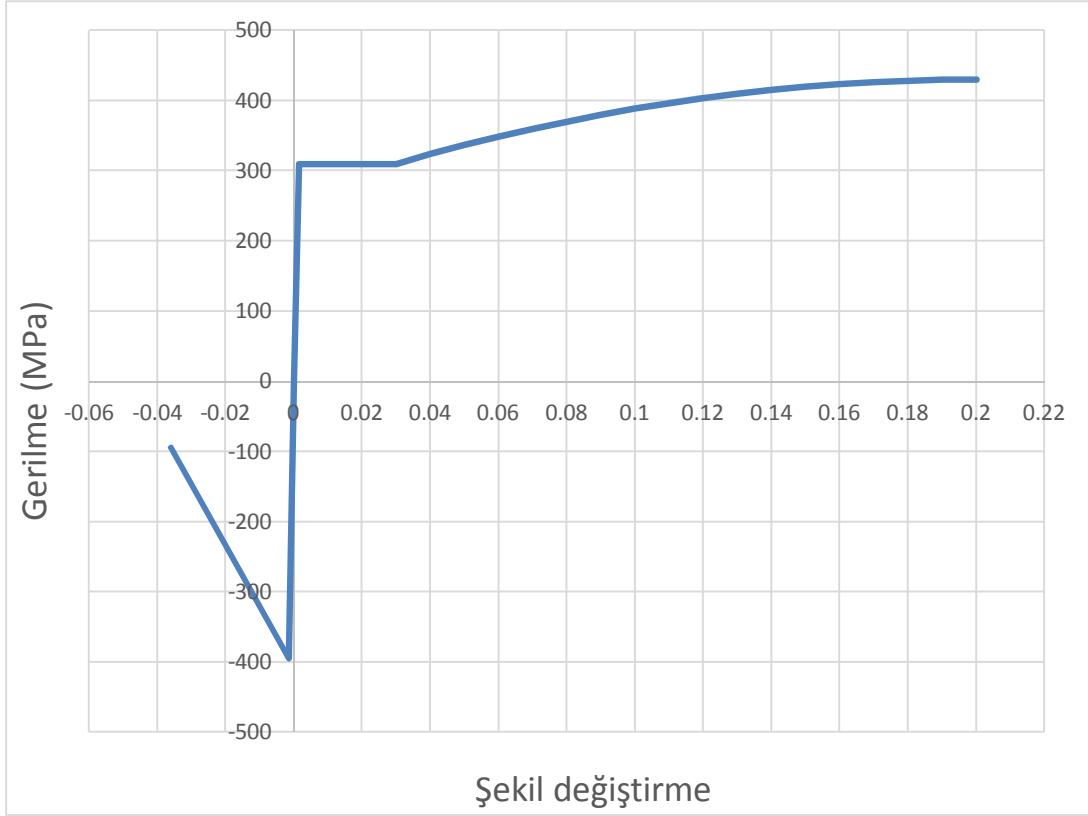
$$\epsilon_{s,Du} = [40 - 6 \ln(s_b/d_b)] \cdot \epsilon_y \quad (5.3)$$



Şekil 5.3 : Pekleşmeli elastoplastik çelik donatı modeli.

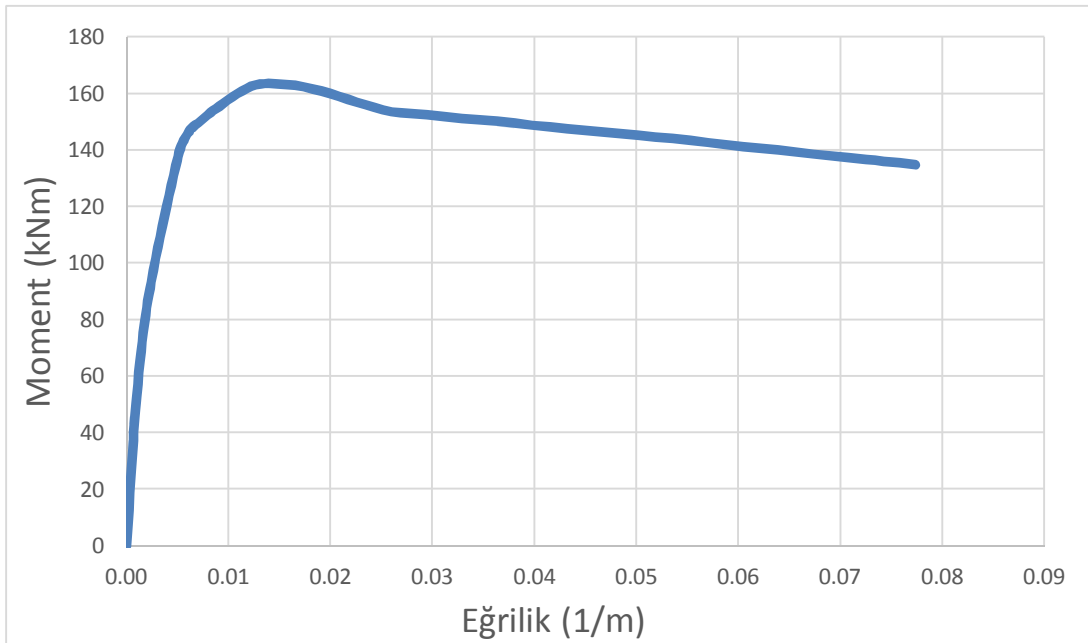


Şekil 5.4 : Burkulmalı donatı çeliği modeli.



Şekil 5.5 : 20x60_Ref numunesi için donatı çeliği modeli.

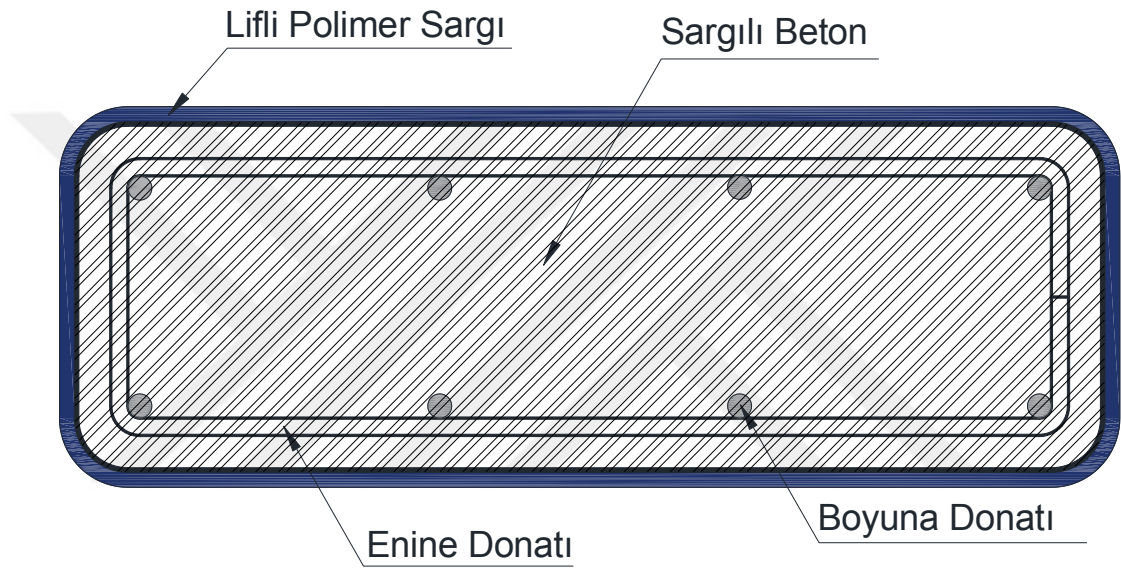
Belirlenen malzeme modelleri kullanılarak XTRACT yazılımı yardımıyla yapılan kesit analizinde 20x60_Ref numunesi için elde edilen moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.6’te verilmiştir.



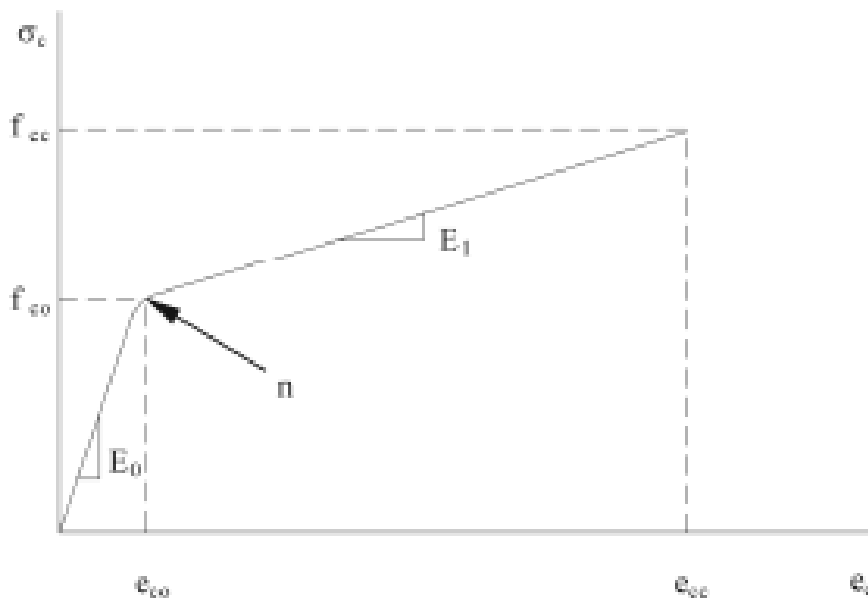
Şekil 5.6 : 20x60_Ref numunesi moment-eğrilik ilişkisi.

5.1.2 20x60_4N numunesi için malzeme modelleri

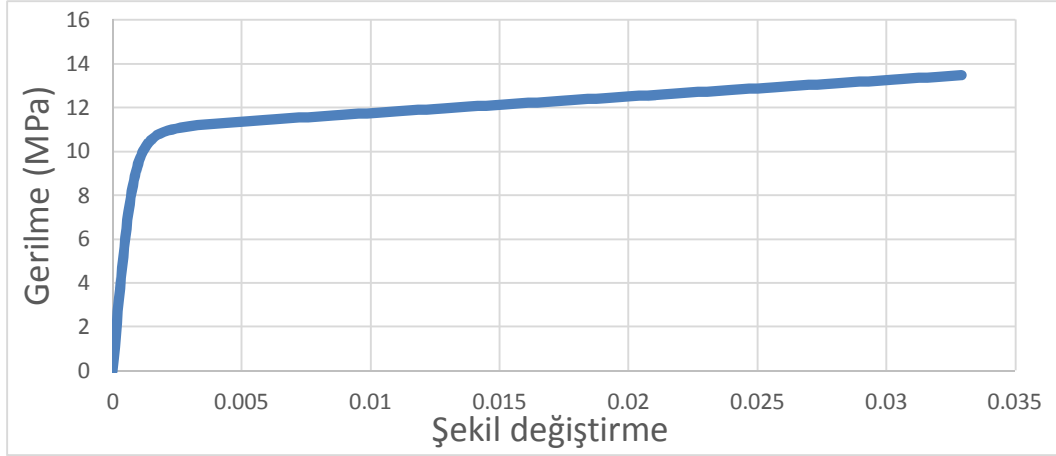
20x60_4N numunesi kesitinin malzeme özellikleri Şekil 5.7’te verilmiştir. Lifli polimer şerit sargılı olan numune için malzeme modeli olarak İlki ve Diğ. (2004) çalışmasında önerilen lifli polimer sargılı beton modeli kullanılmıştır (Şekil 5.8). Bu çalışma kapsamında MATLAB programlama dilinde geliştirilen ilkimodel yazılımı kullanılarak lifli polimer şerit sargılı beton davranışı elde edilmiştir. 20x60_4N numunesi için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve ilkimodel yazılımı ekran görüntüsü Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’te sırayla verilmiştir.



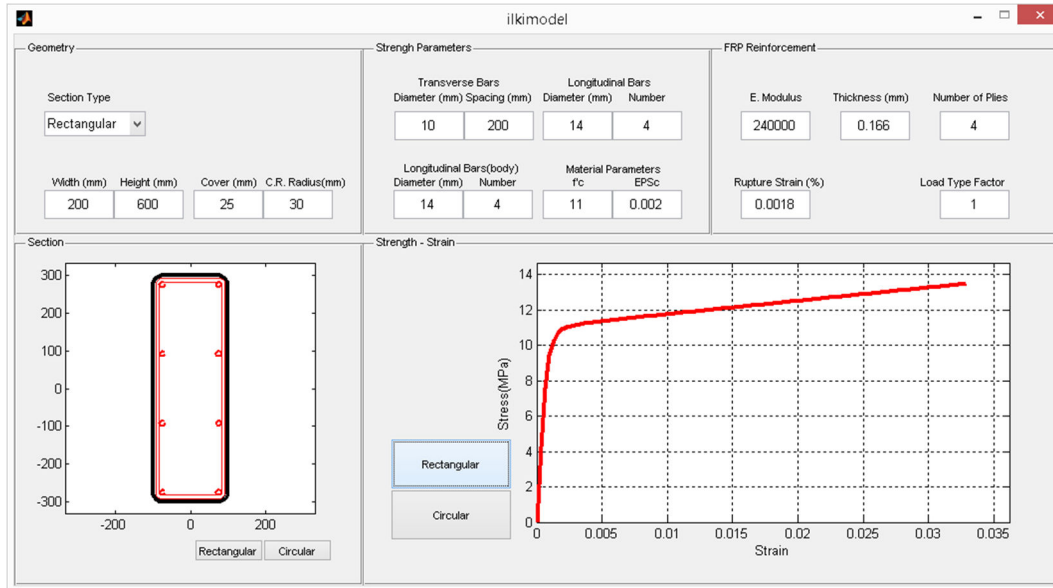
Şekil 5.7 : 20x60_4N numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.



Şekil 5.8 : Lifli polimer sargılı beton için İlki modeli.



Şekil 5.9 : LP sargılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 5.10 : İlkimodel programı ekran görüntüsü.

Donatının çekmede davranışı değişmeyeceği için referans numunesi için kullanılan donatı modeli kullanılmıştır. Çeliğin basınç altındaki davranışını boyuna donatıların serbest boyuna göre değiştiği için, referans numunesinden farklı olarak lifli polimer şerit sargılı numunelerde sargılı kısımlarda donatının burkulmasının önlenmesi ve boyuna donatı serbest boyu şeritler arası mesafeyle sınırlanması beklenmektedir (Şekil 5.11). Donatının burkulmalı basınç altındaki davranışı Yalcin ve Saatcioglu (2000) çalışmasında önerilen modele göre elde edilmiştir. Donatı boy-en oranı 8'den küçük olan durum için basınç gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi ile ilgili hesaplamalar $\epsilon_{sh} < \epsilon_s \leq \epsilon_{s,Du}$ aralığı için Denklem (5.4), Denklem (5.5) ve Denklem (5.6)'da verilmiştir. Burada f_s donatı çeliğinin basınç dayanımını, f_y akma dayanımını, $f_{s,Du}$ basınçta nihai gerilmeyi, ϵ_s kısalma oranını, ϵ_y akma kısalma oranını, $\epsilon_{s,Du}$ basınçta

nihai kısalma oranı göstermektedir. s_b boyuna donatı serbest boyunu, d_b boyuna donatı çapını göstermektedir. 20x60_4N numunesi için elde edilen pekleşmeli ve burkulmalı donatı modeli Şekil 5.12’de verilmiştir.

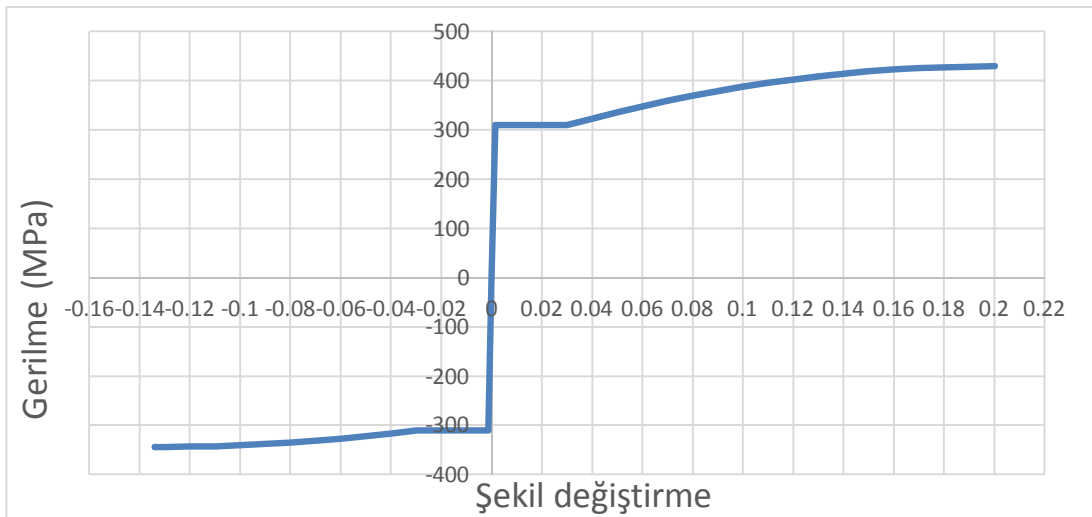
$$f_s = f_y + (f_{s,Du} - f_{sh}) \cdot \left[2 \cdot \frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{\epsilon_{s,Du} - \epsilon_{sh}} + \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{\epsilon_{s,Du} - \epsilon_{sh}} \right)^2 \right] \quad (5.4)$$

$$f_{s,Du} = f_{sh} + (f_u - f_{sh}) \cdot [48 \cdot e^{-0,9 \cdot (s_b/d_b)}] \quad (5.5)$$

$$\epsilon_{s,Du} = \epsilon_{sh} + (\epsilon_u - \epsilon_{sh}) \cdot [6 \cdot e^{-0,4 \cdot (s_b/d_b)}] \quad (5.6)$$

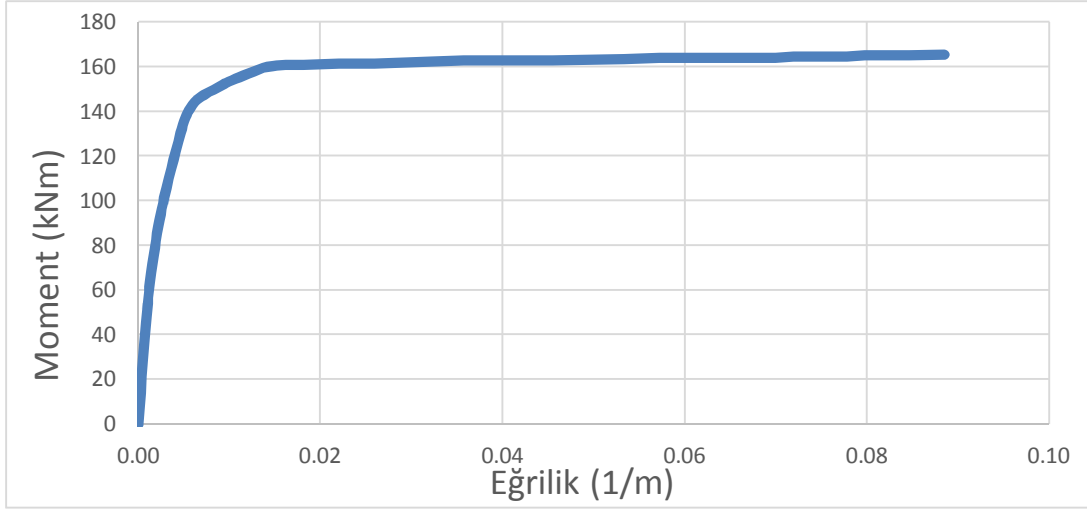


Şekil 5.11 : 20x60_4N numunesi temsili plastik mafsall bölgesi.



Şekil 5.12 : 20x60_4N numunesi için donatı çeliği modeli.

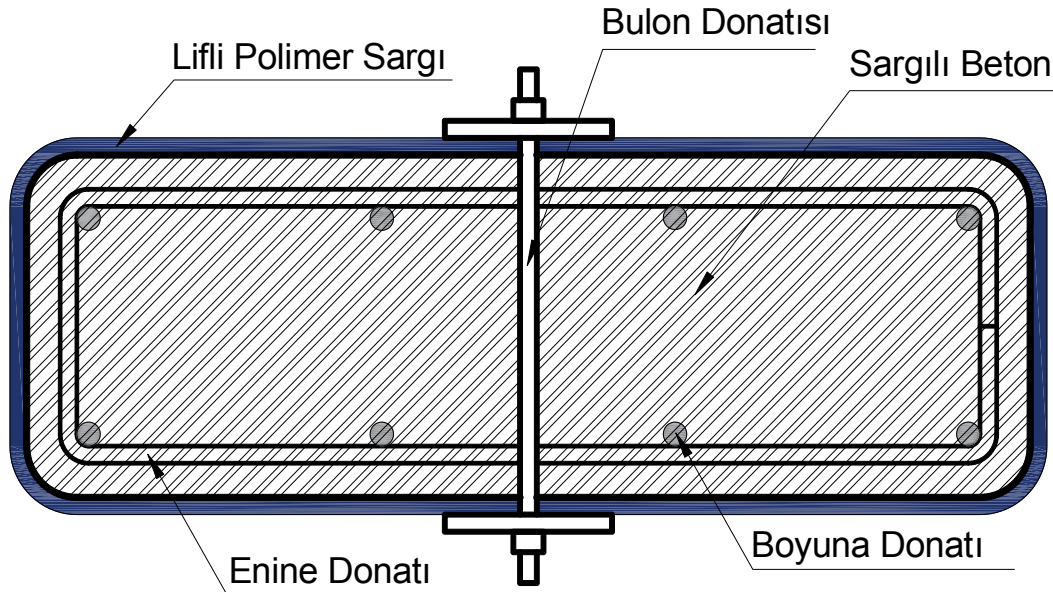
Belirlenen malzeme modelleri kullanılarak XTRACT yazılımı yardımıyla yapılan kesit analizinde 20x60_4N numunesi için elde edilen moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.13’te verilmiştir.



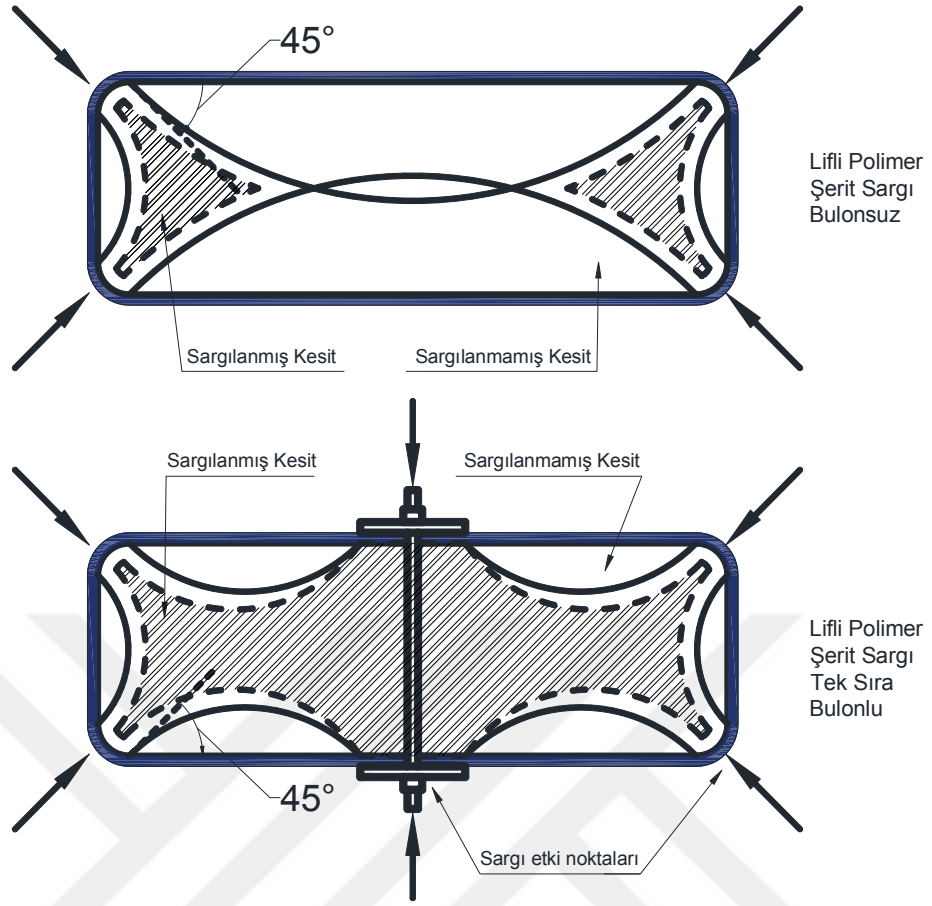
Şekil 5.13 : 20x60_4N numunesi moment-eğrilik ilişkisi.

5.1.3 20x60_4N_1A numunesi için malzeme modelleri

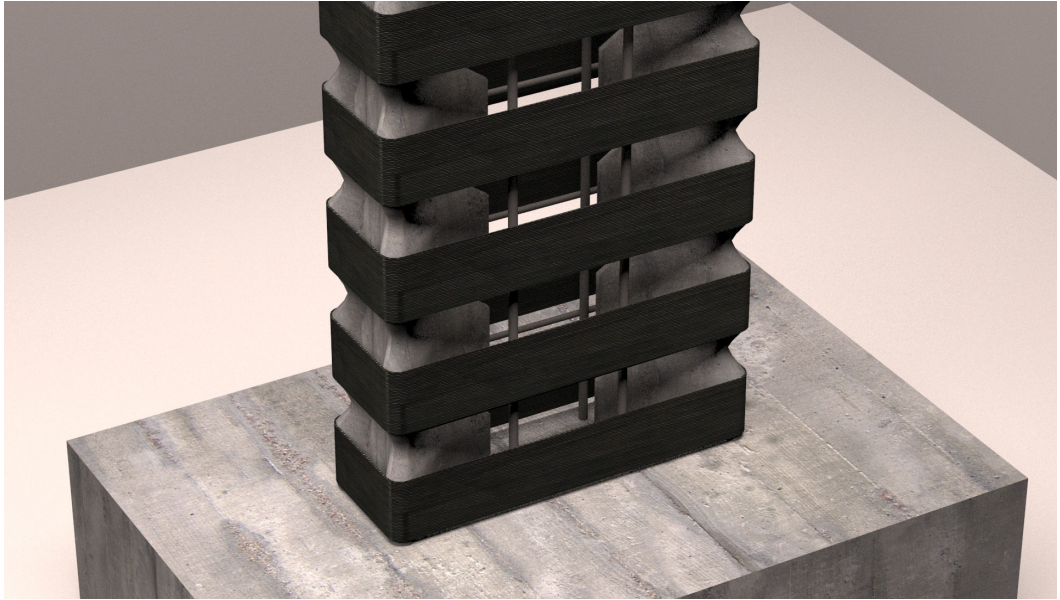
20x60_4N_1A lifli polimer şerit sargılı ve tek sıra bulonlu numune kesitinin malzeme özellikleri Şekil 5.14’te verilmiştir. Bu kesitteki sargı etkisinin bulonsuz kesite göre çok daha farklı olacağı düşünülmektedir. Lifli polimer sargılı bulonlu ve bulonsuz kesit etkin sargılanan kesit alanları ile ilgili 2 boyutlu ve 3 boyutlu temsili çizimler Şekil 5.15, Şekil 5.16 Şekil 5.17’de verilmiştir. Bu sebeple lifli polimer ve bulon ile sargılanmış kesitlerin hesabında hem lifli polimeri hem de bulonu dikkate alan bir model kullanılmalıdır. Çelik davranışı 20x60_4N numunesi ile aynı olacağı düşünülmektedir.



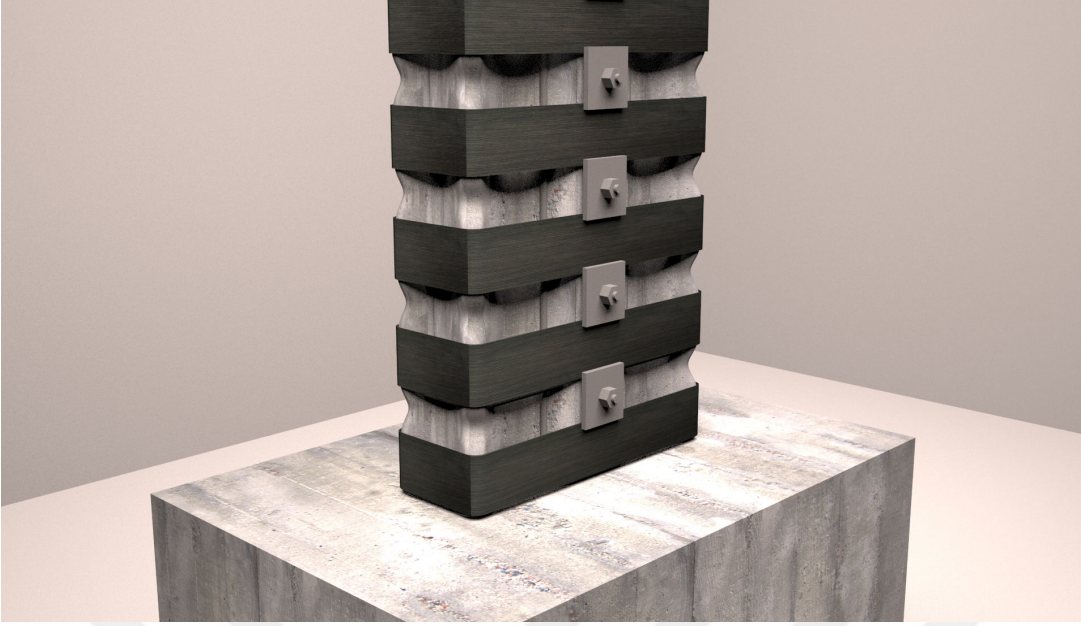
Şekil 5.14 : 20x60_4N_1A numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.



Şekil 5.15 : Bulonlu kesit ile bulonsuz etkin sargılanma bölgeleri.



Şekil 5.16 : Bulonsuz kesit etkin sargılanan beton hacimleri 3B görünümü.



Şekil 5.17 : Bulonlu kesit etkin sargılanan beton hacimleri 3B görünümü.

Lifli polimer şerit sargı ve bulon ile sargılanmış olan 20x60_4N_1A numunesi için sargılı beton davranışını tespit etmek amacıyla Galala, Arafa ve Ghobarah (2005) çalışmasında önerilen ve Mander ve Diğ. (1988) çalışmasında önerilen sargılı beton modelinden yola çıkarak bu çalışmadaki numunelere uyarlanmış bir sargılı beton davranış modeli önerilmiştir. Önerilen model lifli polimer sargının şeritler halinde olmasını ve bulonun uzun kenarının sargılanmasına olan ciddi katkısını göz önüne almaktadır. Önerilen yöntem ile ilgili hesap detayları Denklem (5.7) ve Denklem (5.17) arasında verilmiştir. Hesaplarda kullanılan semboller Çizelge 5.1’de verilmiştir.

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (5.7)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[2,254 \cdot \sqrt{1 + 7,94 \frac{f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} - 1,254 \right] \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \cdot \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (5.9)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1,4 \cdot \rho_e \cdot f_{yv} \cdot \varepsilon_{yu}}{f'_{cc}} \quad (5.10)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (5.11)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_2} \quad (5.12)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (5.13)$$

$$f'_l = \kappa_e \rho_e f_{yv} \quad (5.14)$$

$$\kappa_e = \frac{A_e / (b_c \cdot d_c)}{\left(1 - \frac{A_v}{b_c \cdot d_c}\right)} \quad (5.15)$$

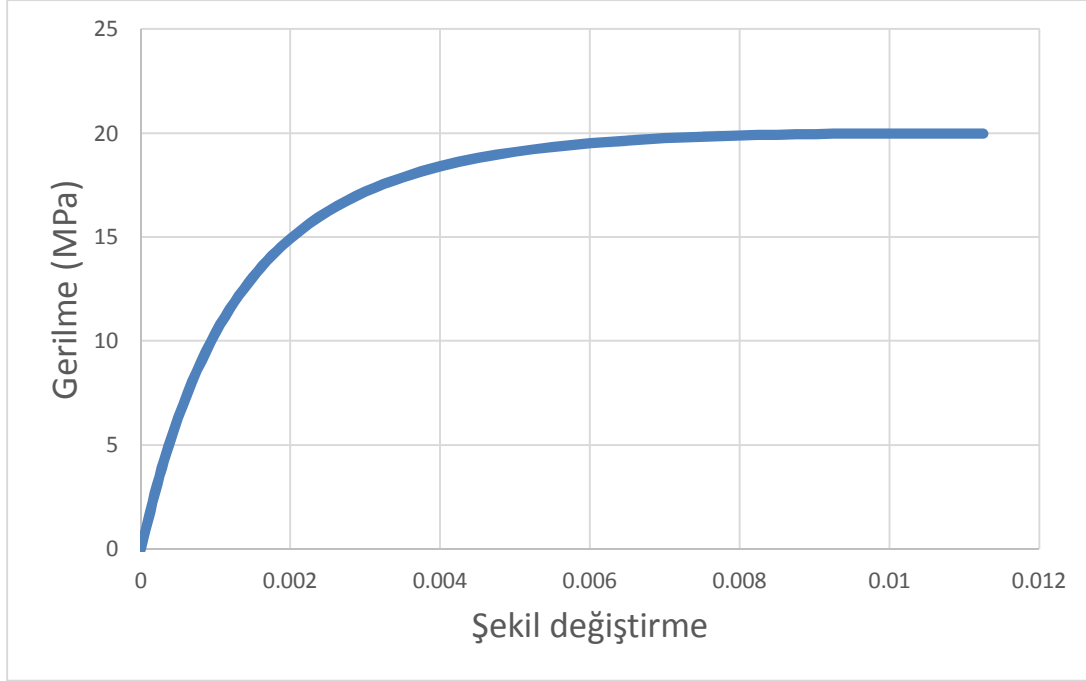
$$A_e = \left(b_c \cdot d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(\omega'_i)^2}{6}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot d_c}\right) \quad (5.16)$$

$$\rho_e = \frac{A_v}{s \cdot d_c} + \frac{2 \cdot n_f \cdot w_f \cdot t_f \cdot \epsilon_f \cdot E_f}{s_f \cdot d_c \cdot f_{yv}} \quad (5.17)$$

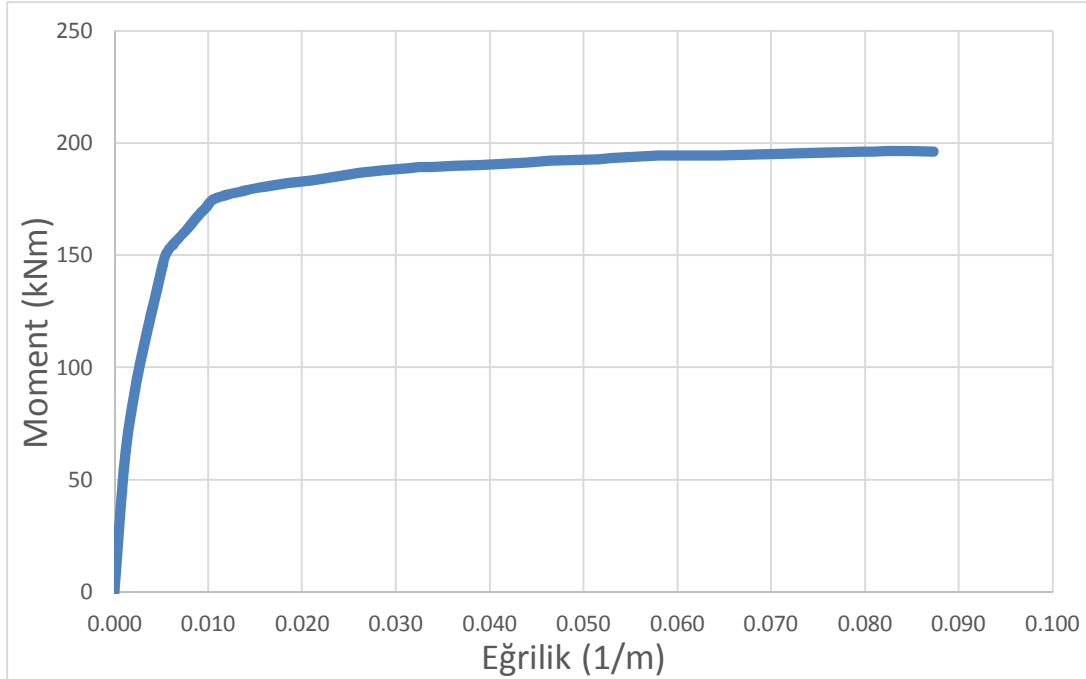
Çizelge 5.1 : Lifli polimer şerit sargı ve bulonlu beton modeli sembolleri.

Sembol	Açıklama
f'_{cc}	Sargılı beton basınç dayanımı
ϵ_{cc}	Sargılı beton maksimum basınç dayanımındaki kısalma oranı
ϵ_{cu}	Sargılı beton ezilme kısalması oranı
E_c	Beton elastisite modülü
E_2	Beton tanjant modülü
f'_l	Etkili yanal sargı basıncı
b_c	Kesit genişliği
d_c	Kesit derinliği
κ_e	Sargı etkinlik katsayısı
A_e	Etkili sargılanan kesit alanı
ω'_i	Sargı etki noktaları arası i'inci açıklık
ρ_e	Dönüştürülmüş etkili sargı bileşenleri
A_v	Bulon donatısı kesit alanı
f_{yv}	Bulon donatısı akma dayanımı
ϵ_{yu}	Bulon donatısı kopma uzama oranı
s	Bulon donatıları arası mesafe
s_f	Lifli polimer şeritler arası mesafe
n_f	Lifli polimer sarım sayısı
t_f	Lifli polimer kumaş kalınlığı
w_f	Lifli polimer şerit genişliği
ϵ_f	Lifli polimer kopma uzama oranı
E_f	Lifli polimer elastisite modülü

Önerilen yöntemle göre 20x60_4N_1A numunesi için belirlenen sargılı beton davranışı Şekil 5.18’de verilmiştir. Belirlenen malzeme modelleri kullanılarak XTRACT yazılımı ile yapılan kesit analizinde 20x60_4N_1A numunesi için elde edilen moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.19’da verilmiştir.



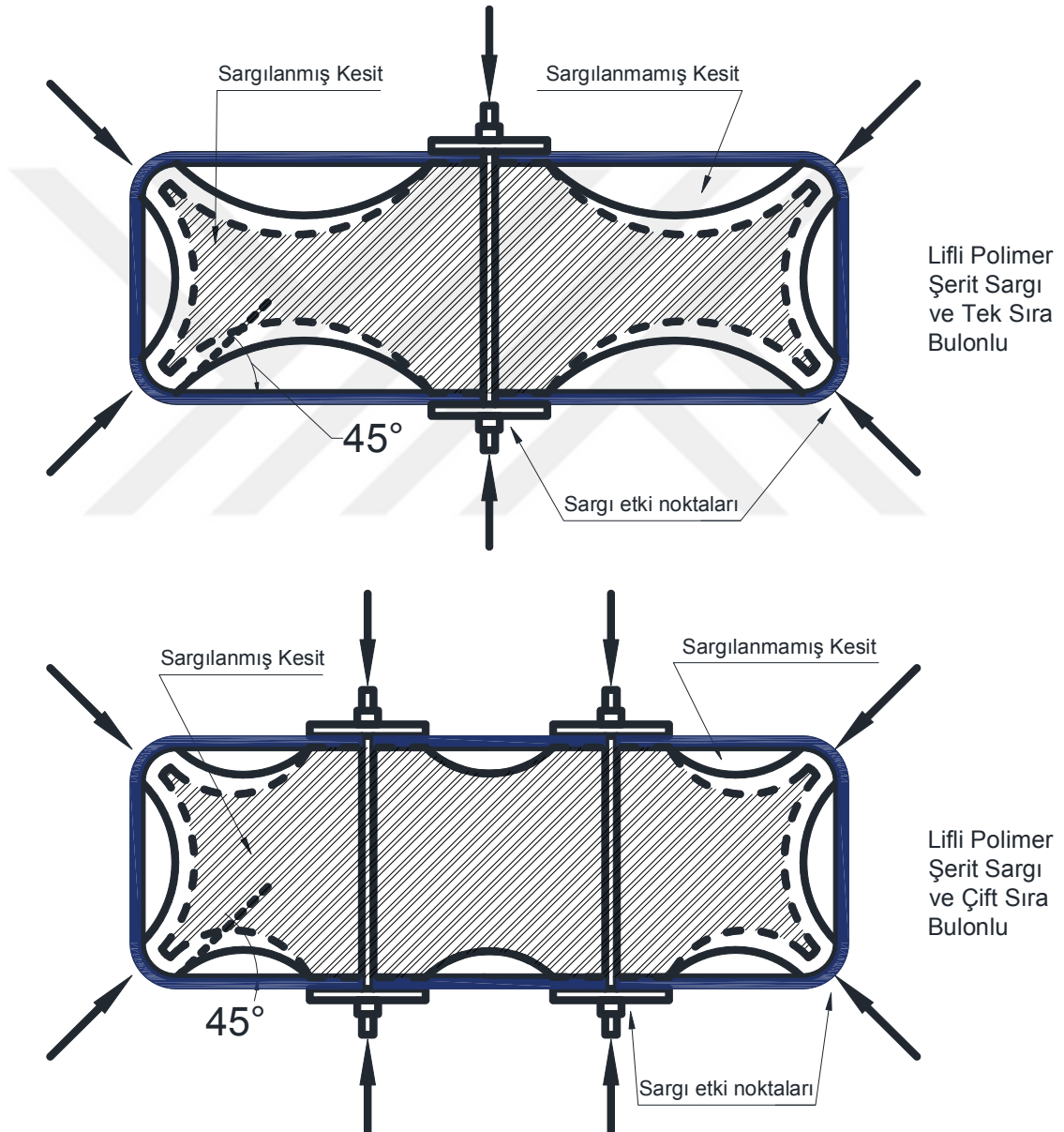
Şekil 5.18 : 20x60_4N_1A için sargılı beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



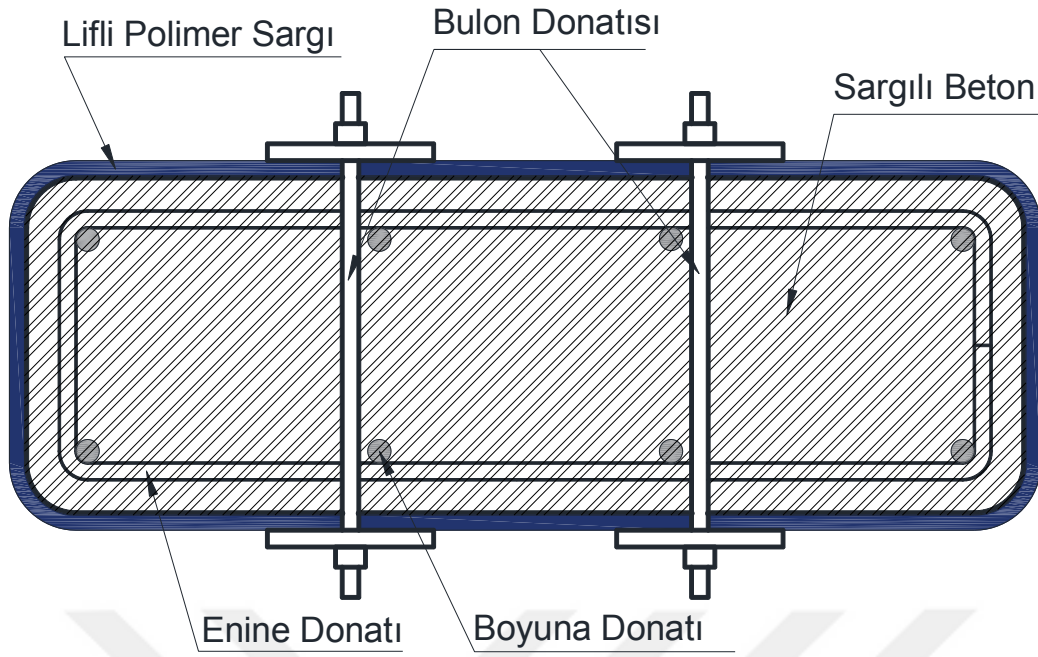
Şekil 5.19 : 20x60_4N_1A numunesi moment-eğrilik ilişkisi.

5.1.4 20x60_4N_2A numunesi için malzeme modelleri

20x60_4N_2A lifli polimer şerit sargılı ve çift sıra bulonlu numune kesitinin malzeme özellikleri Şekil 5.21’de verilmiştir. Tek sıra bulonlu ve çift sıra bulonlu numuneler arasındaki fark Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Tek sıra bulonlu numune için kullanılan sargılı beton modelinin çift sıra bulonlu numune için de uygun olacağı düşünülmektedir. Çelik davranışı 20x60_4N numunesi ile aynı olacağı düşünülmektedir.



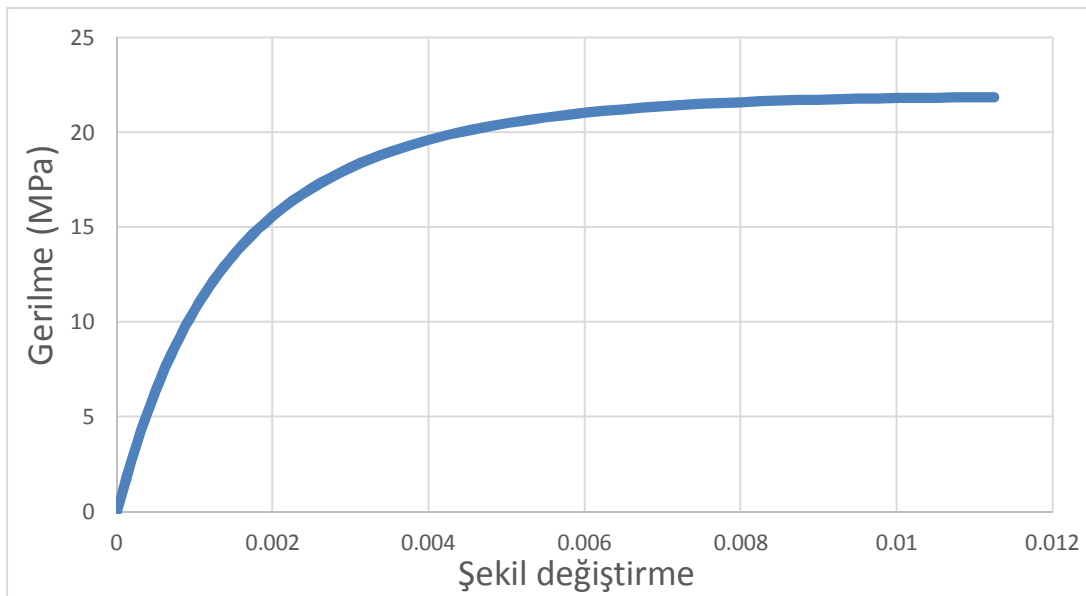
Şekil 5.20 : Tek sıra ve çift sıra bulonlu numuneler için sargılanmış kesitler.



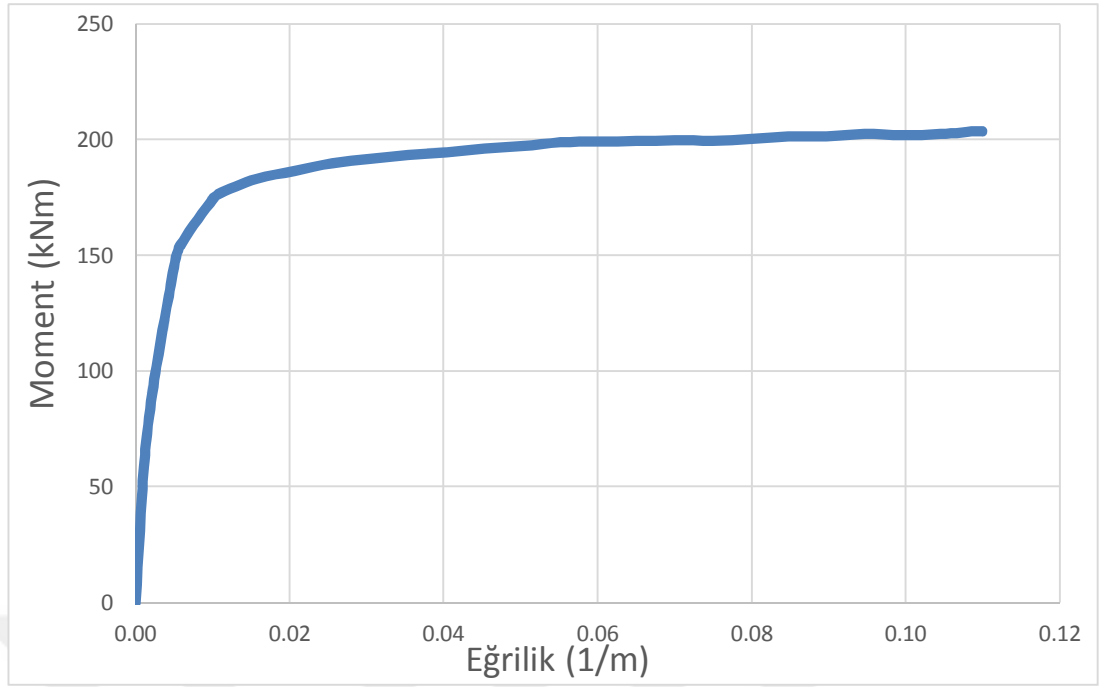
Şekil 5.21 : 20x60_4N_2A numunesinin kesitinde bulunan malzemeler.

Lifli polimer şerit sargı ve çift sıra bulon ile sargılanmış olan 20x60_4N_2A numunesi için sargılı beton davranışını tespit etmek için tek sıra bulonlu 20x60_4N_1A numunesi için kullanılan model kullanılmıştır.

20x60_4N_2A numunesi için elde edilen sargılı beton davranışı Şekil 5.22’de verilmiştir. Belirlenen malzeme özelliklerine göre XTRACT yazılımı ile yapılan kesit analizinde elde edilen moment eğrilik ilişkisi Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.22 : 20x60_4N_2A için sargılı beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



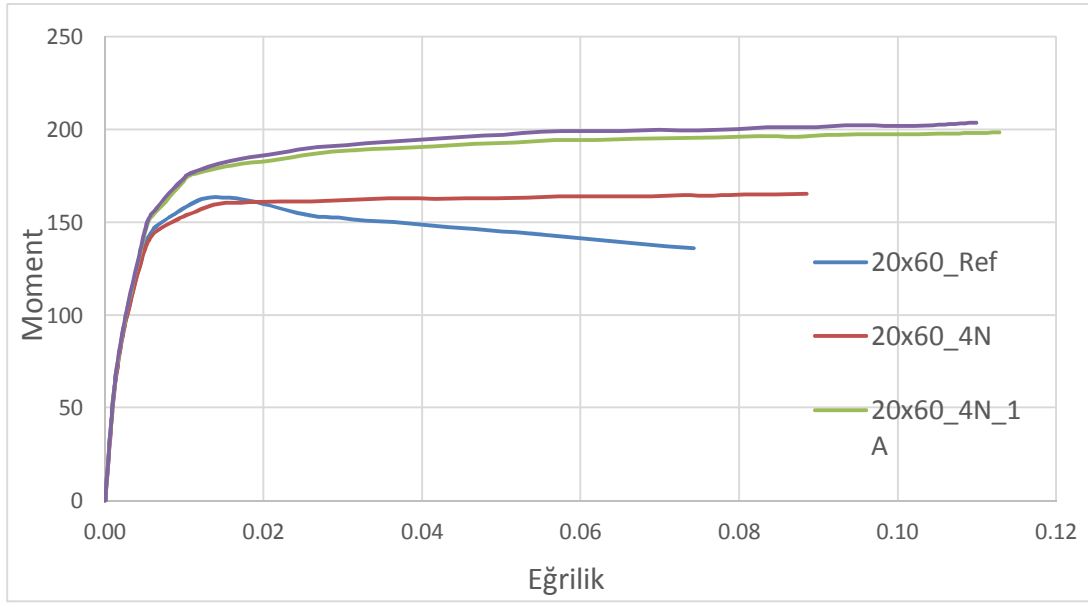
Şekil 5.23 : 20x60_4N_2A numunesi moment-eğrilik ilişkisi.

5.2 Moment – Eğrilik İlişkisi Karşılaştırılması

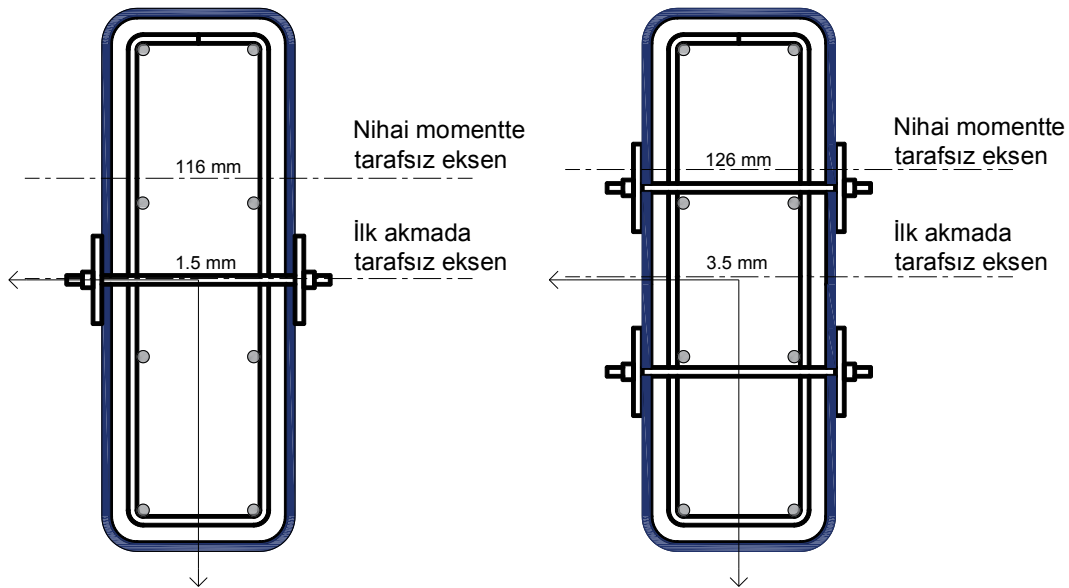
Her bir numune kesiti için hesaplanmış olan moment-eğrilik ilişkileri Şekil 5.26’te bir arada verilmiştir. Sadece karbon lifli polimer ile güçlendirilmiş numunede referans numunesine göre moment kapasitesinde artış gözlemlenmezken, eğrinin akmadan sonraki kısmının yataya yaklaştığı ve sünekliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Karbon lifli polimerlere ek olarak enine bulonlarla güçlendirilen numunelerde ciddi dayanım ve süneklik artışı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, kolonların etriye veya sadece lifli polimer ile dıştan sargılanarak uzun kenarda yeterli sargı basıncı sağlanamaması olduğu düşünülmektedir. Bulonlar, uzun kenara dik doğrultuda sargı basıncı uygulayarak hem yanal sargı basıncı oranını arttıran hem de etkin sargılanan kesit alanını arttırmaktadır.

Tek sıra bulonlu ve çift sıra bulonlu numuneler arasında hem deney hem de analitik hesap sonuçlarında dayanım ve süneklik farkının çok az olmasının sebebi, yatay yük arttıkça tarafsız eksenin merkezden uzaklaşması (basınç bloğunun küçülmesi) ile basınç bloğunun bulonlardan uzaklaşması ve kesitin göçme modunda betonun etkinliğinin azalması olduğu düşünülmektedir. XTRACT yazılımı ile tek sıra ve çift sıra bulonlu numuneler için yapılan kesit hesabına göre tarafsız eksen yeri değişimi Şekil 5.25’te verilmiştir.

Bulonlu ve bulonsuz numunelerin analitik hesaplarda elde edilen göçme modları açısından karşılaştırıldığında, bulonsuz sadece karbon lifli polimerlerle güçlendirilen 20x60_4N numunesi betonun 0.032 birim kısalması ile dayanımını yitirirken, lifli polimer ve bulonla güçlendirilmiş 20x60_4N_1A ve 20x60_4N_2A numuneleri betonun 0.046 birim kısalmasında dayanımlarını yitirmişlerdir. Bunun sebebi, bulon ve lifli polimer ile sargılı betonun sadece lifli polimer ile sargılı betondan daha yüksek dayanıma ve daha büyük birim kısalma kapasitesine sahip olmasıdır. Ayrıca, bu farklılık bulonla sargılanmış kesitlerin daha sünek davranmasını sağlamıştır.



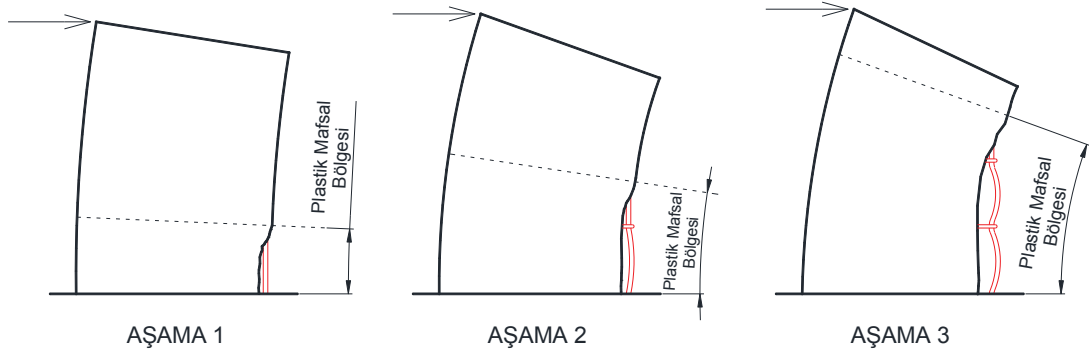
Şekil 5.24 : Numuneler için moment-eğrilik ilişkisi karşılaştırılması.



Şekil 5.25 : Tek sıra ve çift sıra bulonlu numunelerde tarafsız eksen değişimi.

5.3 Plastik Mafsal Modeli

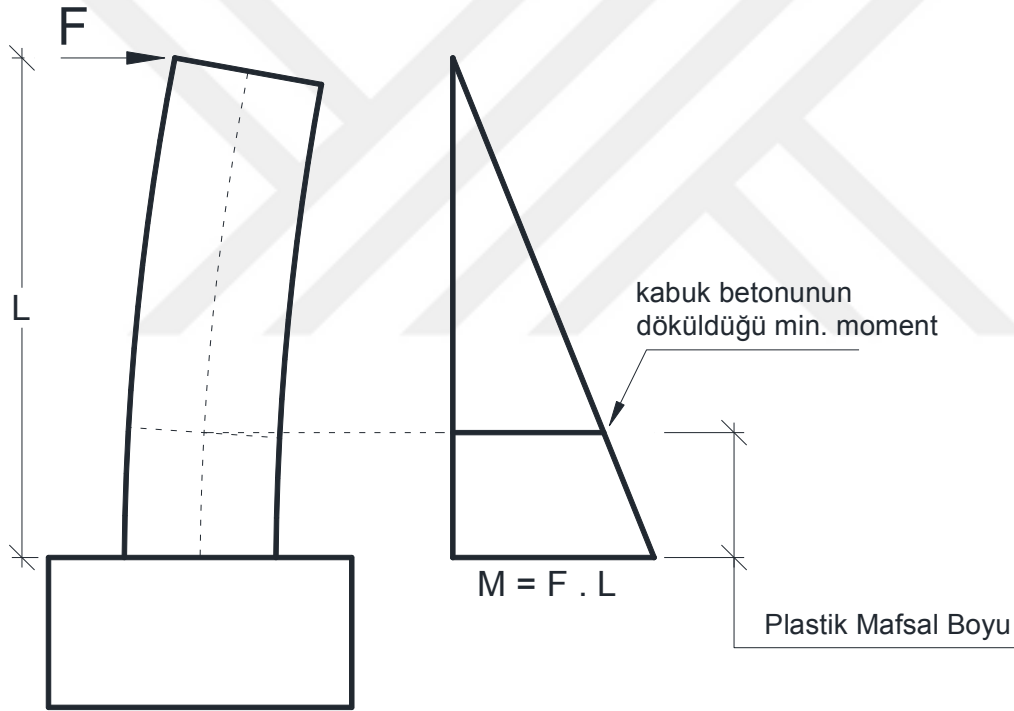
Plastik mafsal, eğilme etkisi altındaki yapısal elemanlarda eğilmeden dolayı olayı oluşan plastik hasarın yığıldığı bölgelere denir. Eğilme momenti arttıkça momentin maksimum olduğu kesitte(mesnet kesiti) moment taşıma kapasitesine ulaşılır ve plastik deformasyonlar başlar. Boyuna donatı oranının düşük olduğu kesitlerde, basınç bölgesinde kabuk atması ve devamında boyuna donatı burkulması olduğu anda betonarme eleman taşıma kapasitesine ulaşır. Taşıma gücü kaybına erişilinceye kadar plastik deformasyonlar mesnetten açıklığa doğru belli bir uzunluğa yayılırlar (Şekil 5.26). Plastik deformasyonların yayıldığı bu uzunluk analitik hesaplarda plastik mafsal uzunluğu olarak kullanılabilir. Plastik mafsal boyu; beton basınç dayanımı, çelik çekme dayanımı, eksenel yük oranı, moment-kesme kuvvet oranı, kesit derinliği, boyuna donatı oranı, etriye aralığı, kanca boyu, kanca açısı, sargı tipi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişir. Literatürde yer alan plastik mafsal modelleri deneylere dayanan ampirik ifadelerdir. DBYBHY-2007 yönetmeliğinde önerilen $L_p=0.5h$ plastik mafsal boyu bazı durumlar için davranışı yeterli hassasiyette belirlense de, genel olarak tüm kesitlere uygulanması sonuçları gerçek eleman ve/veya yapı davranışından uzaklaştıracaktır.



Şekil 5.26 : Plastik mafsal oluşumu.

Plastik mafsal boyu sargı tipine göre ciddi farklılık göstermektedir. Taşıma gücüne donatı burkulması ile ulaşan betonarme kesitlerde dıştan sargılama kabuk betonunun dökülmesini ve donatı burkulmasını geciktirdiği için lineer ötesi hasarın eleman boyuna yayılışını ciddi ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada önerilen plastik mafsal modeli hesabında sargılanmanın plastik mafsal boyu üzerine etkisi sargılanmanın kesitin moment-eğrilik ilişkisine etkisi üzerinden dolaylı olarak hesaba katılmıştır.

Bu çalışmada plastik mafsal hesabı için önerilen model kesitin basınç bölgesindeki kabul betonun dökülmesi ve ardından boyuna donatının burkulması ile taşıma gücü kaybına uğrayan elemanlar için uygundur. Bu modelde, kabul betonun döküleceği kesitler tespit edilerek sonrasında plastik hasarın bu kesitlerde devam edeceği varsayımı yapılmıştır. Plastik hasarın bu kesitlerde devam edeceğini varsayımının dayanak noktası, kabuk betonunun döküldüğü kesitlerdeki boyuna donatıların kesit dışına doğru serbestçe eğilme hareketi yapmaya başlayacak olmasıdır. Plastik mafsal bölgesindeki dönme arttıkça basınç bölgesindeki boyuna donatılarda kısaltmalar artacak ve burkulma gerçekleşecektir. Bu durum, betonun çekme bölgesindeki ilk çatlağın büyümeye devam etmesi ile benzeştirilebilir. Zayıflayan kesitler zayıflamaya devam eder ve hasar o bölgede yoğunlaşır.



Şekil 5.27 : Mesnet kesiti akma momentine ulaştığı andaki ideal durum.

Plastik mafsal uzunluğu hesabı Denklem (5.18) ve Denklem (5.19) ile verilmiştir. Burada, σ_{kabuk} kesitin kabuk betonunun gerilmesi, M_{sp} kabuk dökülmesi anındaki kesitteki moment değeri, I_c brüt beton kesitinin atalet momenti, d_b kesit derinliği, L kolon boyu, L_p plastik mafsal boyudur. Kabuk betonun gerilmesi sargısız beton basınç dayanımına eşitlenerek kabuk dökülme anındaki moment değeri hesaplanır. Kesite ait akma momenti kesitin moment-eğrilik ilişkisinden alınır. Şekil 5.27’te verilen moment dağılımına göre, plastik mafsal boyu hesaplanır.

$$\sigma_{kabuk} = \frac{M_{sp}}{I_c} \cdot \frac{d_b}{2} \quad (5.18)$$

$$L_p = L \cdot \left(1 - \frac{M_{sp}}{M_y} \right) \quad (5.19)$$

Önerilen modele göre her bir numune için hesaplanan plastik mafsalları ve ilgili değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

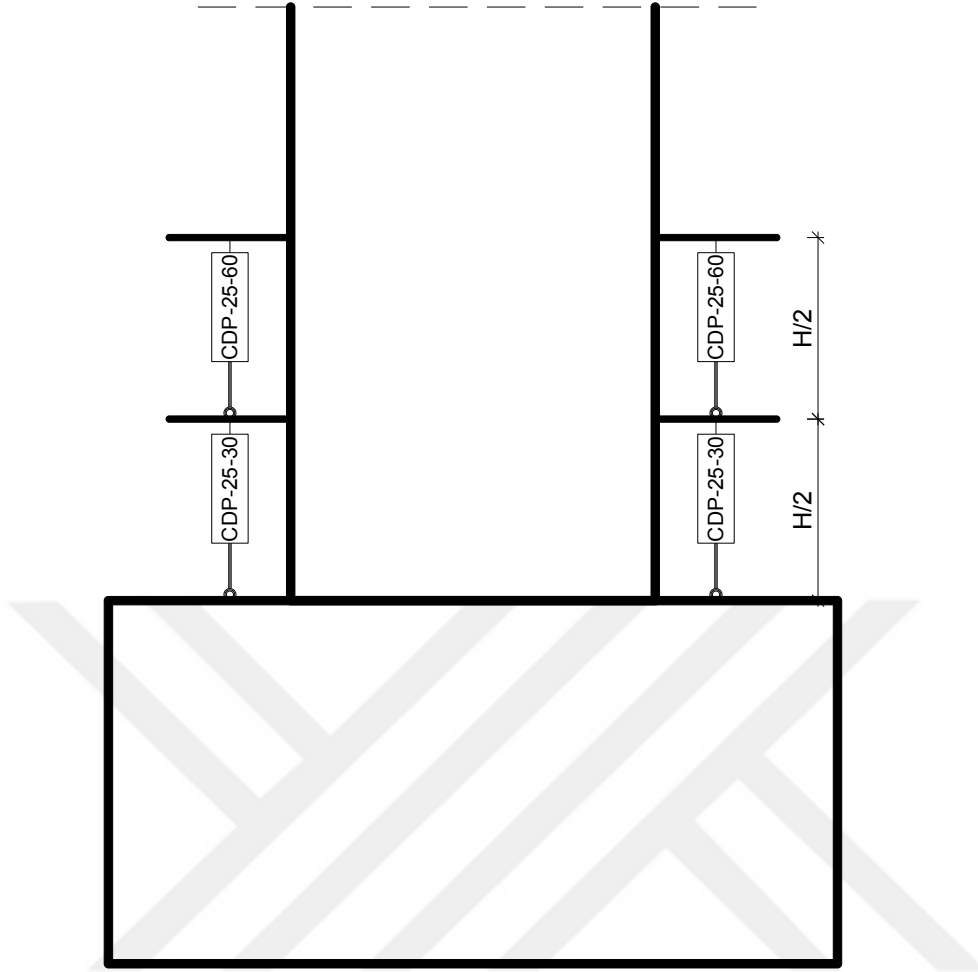
Çizelge 5.2 : Numuneler için hesaplanan plastik mafsalları.

Numune Adı	M_{sp} (kNm)	M_y (kNm)	L_p/d_b	L_p (mm)
20x60_Ref	132	162,6	0,627	376
20x60_4N	132	160,0	0,583	350
20x60_4N_1A	132	171,4	0,767	460
20x60_4N_2A	132	172,7	0,785	471

Deneyleerde potansiyel plastik mafsalları bölgesindeki ölçümler Çizelge 5.3’te verilmiştir. Şekil değıştirme ölçerlerin konumları Şekil 5.28’de verilmiştir. Ölçülen değere göre, plastik deformasyonların çoğunlukla temel yüzeyinden 0.5h yüksekliğe yayıldığı söylenebilir. 0.5h ile 1.0h aralığında ölçülen değere bakıldığında bu bölgede de dönme olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, plastik mafsalları boyu için bu çalışmada önerilen yaklaşım yerine DBYBHY-2007 yönetmeliğinde önerilen $L_p = 0.5h$ yaklaşımı kullanılarak da yeterince yaklaşık sonuçlar elde edileceği düşünülebilir.

Çizelge 5.3 : Nihai görelî ötelenmede plastik mafsalları bölgesi şekil değıştirmeler.

Numune Adı	0 – 300 mm arası		300 – 600 mm arası	
	Basınç Bölgesi	Çekme Bölgesi	Basınç Bölgesi	Çekme Bölgesi
20x60_Ref	-13.32	7.6	-0.74	-0.26
20x60_4N	-22.25	21.91	-1.08	0.10
20x60_4N_1A	-17.10	22.58	-1.22	-0.39
20x60_4N_2A	-17.70	25.40	-0.99	0.36



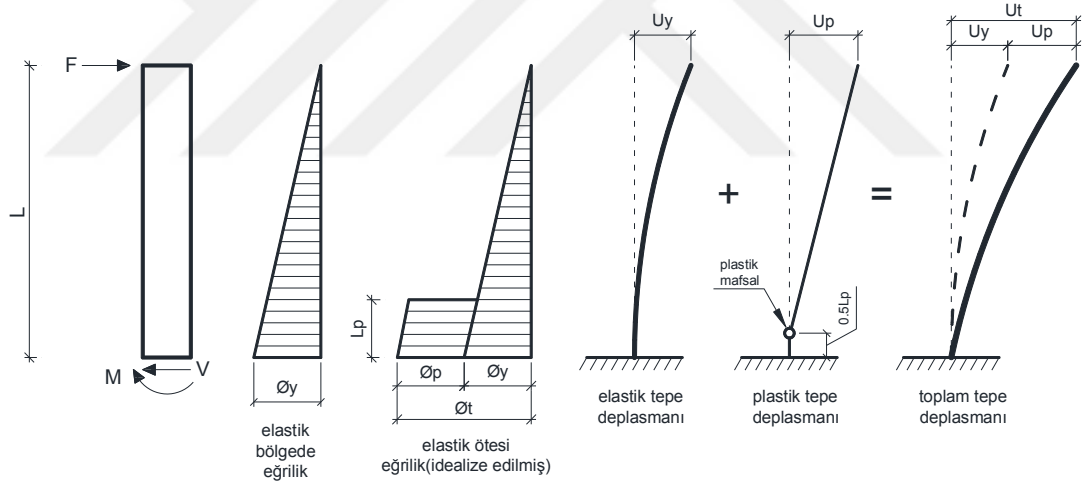
Şekil 5.28 : Potansiyel plastik mafsall bölgesi ölçüm sistemi.

5.4 Statik İtme Analizi Yaklaşımı İle Tepe Deplasmanı Hesabı

Bu yaklaşımda, konsol kolon olarak çalışan deney numunelerinin tepe deplasmanlarını elde etmek için elemanın doğrusal davranışından oluşan tepe deplasmanı ile plastik mafsall dönmesinden oluşan tepe deplasmanı süperpoze edilmiştir. Elastik deformasyonların eleman boyunca dağıldığı ve doğrusal sınır içerisinde sargı etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu sebeple elastik yer değiştirmelerin hesabında betonarme kesitinin atalet momenti ve malzeme deneylerinden elde edilen beton elastisite modülü kullanılmıştır. Donatının atalet momentine katkısı ihmal edilmiştir. Plastik dönmelerin hesabında dönmelerin plastik mafsalda toplandığı varsayımı yapılmıştır.

Malzeme özellikleri tanımlanan her bir numune kesiti için moment-eğrilik ilişkileri XTRACT yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıda verilen bağıntılar yardımı ile yük-yer değiştirme ilişkileri analitik olarak elde edilmiştir.

Konsol elemanların plastik ötesi dönmelerine ilişkin idealleştirilmiş ve süperpoze edilmiş davranışı Şekil 5.29’da verilmiştir. Analitik olarak elde edilen yük- yer değiştirme ilişkileri için aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır. Yatay yük ile moment arasındaki ilişki Denklem (5.20)’de tanımlanmıştır. Bu denklemde F yük, V taban kesitindeki kesme kuvveti, M taban kesitindeki moment, E betonun elastisite modülü, I_c kesitin kuvvetli eksen eğilme atalet momenti, L kolonun yüksekliğidir. Hesaplarda kolon yüksekliği olarak yatay hidrolik verenin merkezi dikkate alınmıştır. Doğrusal tepe yer değiştirmesi hesabı Denklem (5.21)’de verilmiştir. Bu denklemde U_y doğrusal tepe yer değiştirmesidir. Doğrusal limit sonrası yer değiştirmesi Denklem (5.22)’de verilmiştir. Bu denklemde U_p doğrusal limit sonrası yer, K_p doğrusal limit sonrası eğrilik, L_p ise plastik mafsallardır. Hesaplarda plastik mafsalları boyu olarak bu çalışma kapsamında önerilen plastik mafsalları modeline göre hesaplanan değerler kullanılmıştır. Elastisite modülü malzeme testlerinden elde edilen değer olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.29 : Konsol elemanın doğrusal ve doğrusal olmayan davranışı.

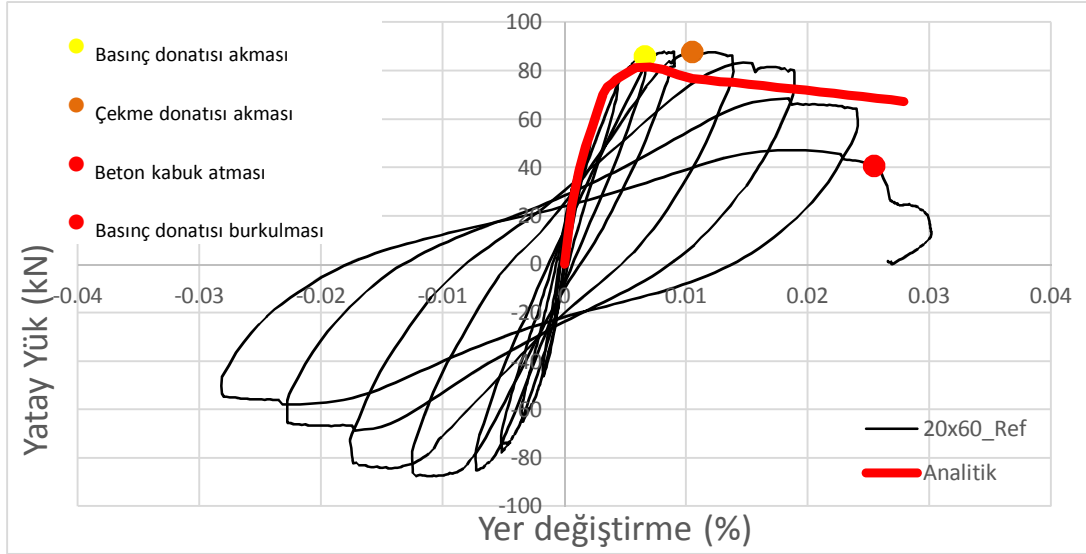
$$M = F \cdot L \quad (5.20)$$

$$U_y = \frac{V \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_c} \quad (5.21)$$

$$U_p = K_p \cdot L_p \cdot \left(L - \frac{L_p}{2} \right) \quad (5.22)$$

5.4.1 20x60_Ref numunesi için analitik hesaplar

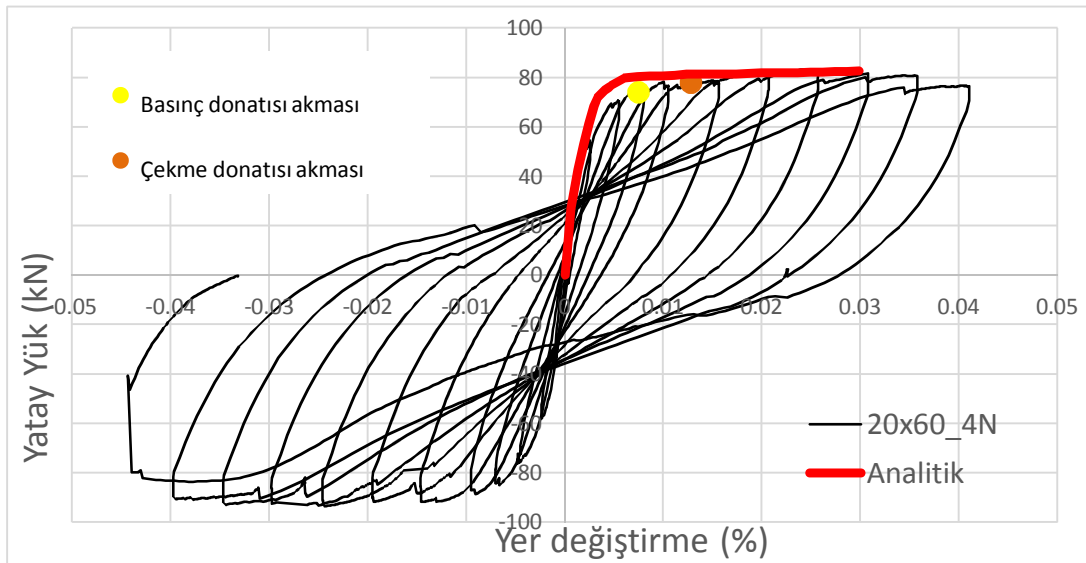
Yukarıda tanımlanan esaslara göre 20x60_Ref numunesi için elde edilen yatay yük ve tepe yer değiştirme ilişkisi ile deneylerden elde edilen veriler Şekil 5.30’de verilmiştir.



Şekil 5.30 : 20x60_Ref için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.

5.4.2 20x60_4N numunesi için analitik hesaplar

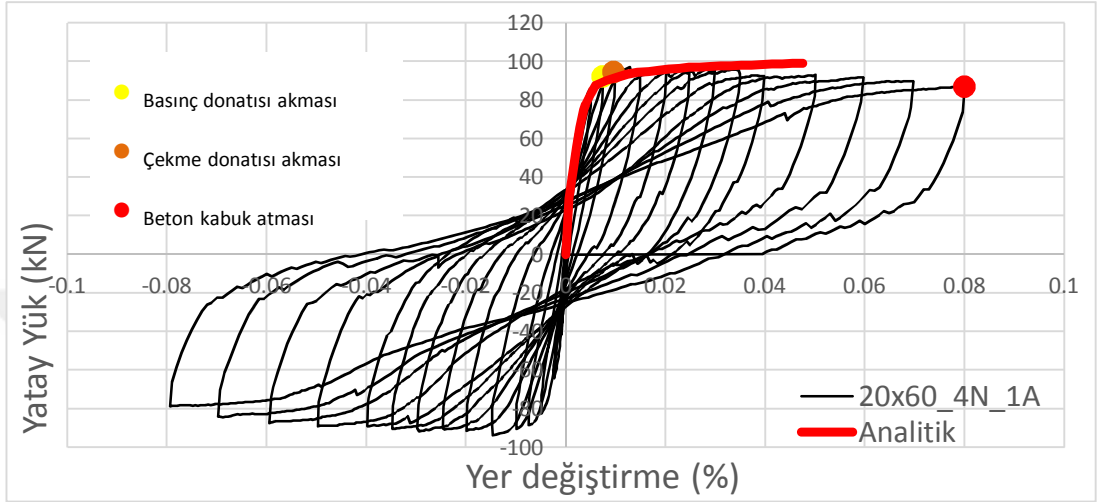
20x60_4N numunesi için elde edilen yatay yük - tepe yer değiştirme ilişkisi ile deneylerden elde edilen veriler Şekil 5.31’de verilmiştir. Analitik hesaplarda % 0.3 göreceli ötelenmede basınç ve çekme donatısı akmıştır. % 3 göreceli ötelenme oranında beton maksimum kısalma oranına(0.032) ulaşarak kesit kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 5.31 : 20x60_4N için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.

5.4.3 20x60_4N_1A numunesi için analitik hesaplar

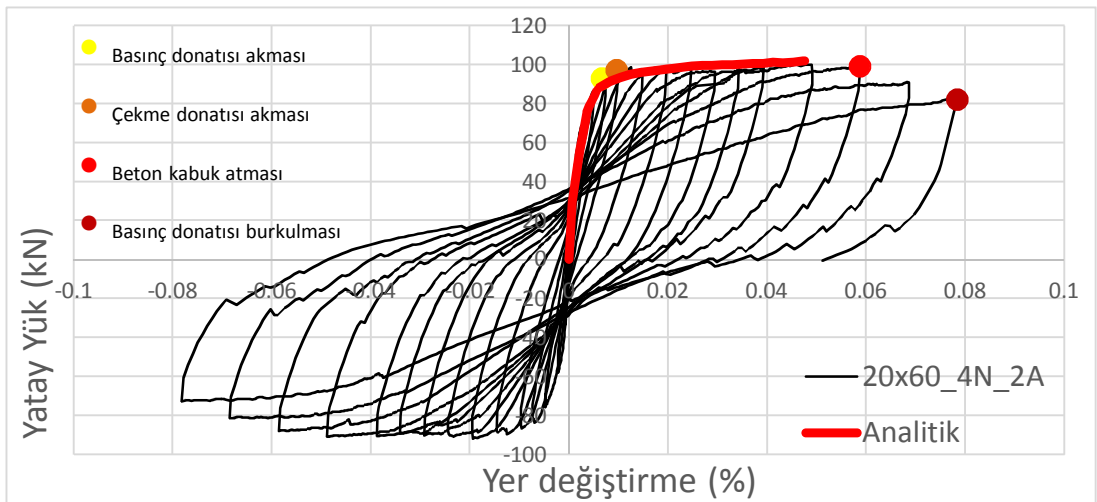
20x60_4N_1A numunesi için elde edilen yatay yük ve tepe yer değiştirme ilişkisi ile deneylerden elde edilen veriler Şekil 5.32’de verilmiştir. Analitik hesaplarda % 0.35 görelî ötelenmede basınç ve çekme donatısı akmıştır. % 4.8 görelî ötelenme oranında beton maksimum kısalma oranına (0.046) ulaşarak kesit kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 5.32 : 20x60_4N_1A için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.

5.4.4 20x60_4N_2A numunesi için analitik hesaplar

20x60_4N_1A numunesi için elde edilen yatay yük ve tepe yer değiştirme ilişkisi ile deneylerden elde edilen veriler Şekil 5.33’de verilmiştir. Analitik hesaplarda % 0.35 görelî ötelenmede basınç ve çekme donatısı akmıştır. % 4.8 görelî ötelenme oranında beton maksimum kısalma oranına (0.046) ulaşarak kesit kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 5.33 : 20x60_4N_2A için analitik ve deneysel yük-yer değiştirme ilişkisi.

6. SONUÇLAR

Kesit boy-en oranlarının iki, üç ya da daha büyük olduğu betonarme kolonlarda deprem etkisini benzeştiren yükler altındaki davranışın incelenmesine yönelik araştırma sayısı son derece sınırlıdır. Bu tür, bir kenarı diğerine göre oldukça uzun olan kolonlarda, ülkemizdeki mevcut yapıların kolonlarını temsil eden zayıflıkların bulunması ve aynı zamanda kolonların yüksek eksenel yük etkilerine maruz olma durumu ile ilgili araştırmalara rastlanılmamıştır. Bu çalışmada ülkemizdeki mevcut yapılarda sıkça karşılaşılan, ancak daha önce üzerinde yeterince araştırma yapılmamış bu tür kolonların sabit düşey yükler ile deprem etkilerini temsil eden yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında güçlendirme öncesi ve sonrası davranışları deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Güçlendirme için kolonlar enine doğrultuda dışarıdan şeritler halinde karbon lifli polimer kompozitler uygulanarak sargılanmıştır. Bir başka deney değişkeni olan güçlendirme uygulama detayı ise sargılamaya ek olarak sargı etkinliğini arttırmak üzere kolon kısa doğrultusunda çirozlara benzer şekilde dıştan uygulanmış olan çelik bulonların sayısı ile ilgilidir.

Yüksek eksenel yük etkisi altındaki kesit boy-en oranları 3 olan güçlendirilmemiş betonarme kolon (referans numune) gevrek davranış sergilemiş, %2 öteleme oranının üzerindeki yer değiştirmelerde dayanımını koruyamamıştır. Numunelerin eksenel yük kapasiteleri, boyuna donatının etkisi ihmal edilerek ve 28 günlük beton numunelerinin malzeme deneylerinden elde edilen değerlere göre yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Deneyler sırasında numunelere etki ettirilecek eksenel yük miktarı ise ön görülen beton dayanımına (10 MPa) göre donatının katkısı ihmal edilerek hesaplanan düşey yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %40'ı kadar olacak şekilde belirlenmiştir. Numunelerin üzerindeki düşey yük oranı yüksek olduğu için numunelerin istenen düzeyde sünek davranış göstermemesi beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte, ülkemizdeki mevcut yapılarda pek çok yapının kolonlarındaki eksenel yük seviyesinin bu düzeyde veya daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu numunede dayanım kaybı kabuk betonun ezilmesi ve dökülmesi sonrası boyuna donatıların burkulması ile gerçekleşmiştir. Mevcut yapıların deprem güvenliklerinin değerlendirmesine yönelik

çeşitli teknik dokümanlarda bu düzeyde eksenel kuvvetlere maruz ve iyi sargılanmamış kolonlar için can güvenliği ya da göçme öncesi performans seviyeleri için öngörülen öteleme oranları %2 ötelenme oranından daha da küçük değerlerdedir. Bir başka ifade ile güçlendirilmemiş referans numunesi için elde edilmiş olan sonuçlar, dünyanın çeşitli bölgelerinde kullanılmakta olan deprem performansı değerlendirme yöntemlerinde yüksek eksenel kuvvetlere maruz kolonlar için verilen yer değiştirme sınırlarının yeterince güvenli tarafta olduğunu göstermektedir. Hatta deney sayısının daha da arttırılması ve elde edilen sonuçlara duyulacak güvenin daha da artması durumunda söz konusu performans düzeyleri için teknik dokümanlarda verilen yer değiştirme sınırlarının bir miktar esnetilebilmesine imkan sağlanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, az etriyeye veya 90° kancalı etriyelere sahip kolonların “sargılanmamış” kabul edilmesinin “fazla konservatif” olabileceği ifade edilebilir. DBYBHY-2007’de betonarme elemanlarda göçme hasar sınırı, çekirdek betonu en dış basınç lifinde betonda birim kısalma maksimum 0.018, donatı çeliğinde 0.06 olarak verilmiştir. Güçlendirilmemiş referans numunesinde 0.019 görelî ötelenme oranında basınç bölgesindeki betonda birim kısalma 0.015, çekmedeki donatıda birim uzama oranı 0.024 olduğu durumda kolon yatay yük taşıma kapasitesinin %92’sini muhafaza etmiştir. Görelî ötelenmenin 0.24 olduğu durumda betondaki kısalma oranı 0.023, çelikte uzama oranı 0.031 iken numune yatay yük kapasitesinin %73’ünü muhafaza ettiği gözlemlenmiştir. Buna göre, deprem yönetmeliğinin hasar sınırlarının da yapılacak araştırmalara bağılı olarak arttırılabileceği söylenebilir.

Lifli polimer kompozitler ile enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilen kolonlarda ise dayanım kaybının çok daha ileri yer değiştirme düzeylerinde ortaya çıktığı görülmektedir (%4 ~ %8). Uygulanan lifli polimer kompozit detayına ve çelik bulonların düzenine göre güçlendirilmiş kolonların performansı bir miktar değişebilmekle birlikte, genel olarak tüm güçlendirilmiş kolonların yeterli sünekliğe ulaştığını belirtmek mümkündür. Bu da dünyadaki ilgili yönetmelikler tarafından lifli polimer kompozitler ile güçlendirilmesi sınırlanmış olan bir kenarı uzun dikdörtgen kesitli kolonlarda (ilgili teknik dokümana göre değişmekle birlikte genelde kesit boy-en oranları 1.5 ya da 2.0 den büyük olan elemanlarda bu tür güçlendirmeye izin verilmemektedir) uygulanacak güçlendirme ile deprem performansının önemli ölçüde geliştirilebileceği gösterilmiştir. Bu iyileşme özellikle süneklik açısından sağlanmaktadır. Süneklik, betonarme kolonların deprem performansı açısından son

derece önemlidir ve çoğu durumda sadece sünekliğin arttırılması dahi depreme karşı can güvenliğinin sağlanmasın için yeterli bir müdahale olabilmektedir. Şeritler halinde sargılama ile yapılan güçlendirmelerde bu şeritler arasında betonun ezilmesi ve sonrasında donatının burkulması ile dayanım kayıpları gözlemlenmiştir. Sargılamanın sürekli olması durumunda betonun ezilmesi ve donatı burkulmasının gecikmesi ve daha ileri yatay ötelenme oranlarına kadar taşıma gücünün korunması beklenmektedir.

Elde edilen deneysel sonuçları genelledebilmek üzere ve söz konusu güçlendirme yöntemi için teorik tasarım algoritmalarının önerilmesine yönelik olarak analitik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Lif yaklaşımı ile gerçekleştirilen bu çalışmada, sargısız kabuk betonu, etriye içinde kalan çekirdek sargılı beton, lifli polimer kompozitler ve çelik enine bulonlar ile sargılanmış beton ve donatı çeliği için ayrı malzeme modelleri kullanılmıştır. Lif yaklaşımı ile hesap yapan bilgisayar yazılımları yardımı ile moment-eğrilik ilişkileri hesaplanmıştır. Belli kabuller ile bu moment-eğrilik ilişkilerinden analitik yük-yer değiştirme ilişkilerine geçilen bir analitik hesap yaklaşımı önerilmiştir. Elde edilen analitik yük-yer değiştirme ilişkileri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, güçlendirilmiş kolonlardaki süneklik artışı teorik hesaplarda da tespit edilmiştir. Deney ve teorik hesap sonuçlarındaki süneklik farkının malzeme modellerinin gerçeği yeterince yansıtamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna rağmen, deneysel ve teorik olarak belirlenmiş kolon eğilme moment kapasitelerinin ve yük – yer değiştirme ilişkilerinin yüksek oranda uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel verilerle analitik sonuçlar arasındaki ufak farklara rağmen, analitik olarak elde edilmiş olan global davranışın deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olması ve deney sonuçlarına göre güvenli tarafta olması bu çalışmada önerilen teorik algoritmanın, belli güvenlik faktörleri dikkate alınarak, lifli polimer kompozitler ile dıştan sargılanarak ve/veya kısa kolon doğrultusunda çelik bulonlarla güçlendirilmiş uzun dikdörtgen kolonların güçlendirme tasarımında kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Yapılmış olan deneysel ve analitik çalışmaların, kolonların depremde daha çok zorlanmaları beklenen, güçlü eksenleri doğrultusunda etkiyen deprem etkileri için gerçekleştirilmiş olduğu not edilmelidir. Kolon zayıf eksenini doğrultusunda söz konusu olabilecek etkiler karşısında, dıştan lifli polimer kompozitler ile yapılacak sargılamanın etkinliği bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Ayrıca, bu çalışmada

deneysel ve teorik olarak incelenen dikdörtgen kolonlarda kesitte maksimum uzun kenar/kısa kenar oranı üçtür. Bu oranın daha büyük olduğu kolonlarda, bu çalışmada elde edilmiş olan sonuçların geçerli olamayabileceği unutulmamalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, yüksek düşey yüklere maruz kolonların deprem etkisi altındaki performanslarının daha detaylı incelenmesi gerektirdiğini göstermektedir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre gerek güçlendirilmemiş, gerekse güçlendirilmiş kolonlar için can güvenliği performans düzeyi için değerlendirme dokümanlarında verilen yer değiştirme sınırları yeterince (belki de fazlasıyla) güvenli tarafta görünmektedir.



KAYNAKLAR

- Akgun D., Demir C., Ilki A. (2010).** Axial behavior of FRP jacketed extended rectangular members constructed with low strength concrete, 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, pp: 622-625.
- Bousias, S., Triantafillou, T., Fardis, M., Spathis, L., O'Regan, B. (2014).** Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without corrosion, *ACI Struc. J.*, 101, 4, 512-5120.
- Carey, S.A., Harries, K.A. (2005).** Axial behavior and modeling of confined small-, medium-, and large-scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets, *ACI Struc. J.*, 102, 4, 596-604.
- Chaallal, O., Shahawy, M. (2000).** Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading, *ACI Struc. J.*, 97, 4, 659-668.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007).** Bayındırlık Bakanlığı.
- Elnabelsy, G., Saatcioglu, M. (2004).** Seismic retrofit of circular and square bridge columns with CFRP jackets, *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, Alberta.
- Fam, A. Z., and Rizkalla, S. H. (2001).** Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes., *ACI Struct. J.*, 98, 4, 451-461.
- Fam, A., Bart, F., Rizkalla, S. (2003).** Experimental and analytical modeling of concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes subjected to combined bending and axial loads, *ACI Struc. J.*, 100, 4, 499-509.
- Harajli, M., Rteil, A. (2004).** Effect of confinement using fiber-reinforced polymer or fiber-reinforced concrete on seismic performance of gravity load-designed columns, *ACI Struc. J.*, 101, 1, 47-56.
- Iacobucci, R., Sheikh, S., Bayrak, O. (2003).** Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance, *ACI Struc. J.*, 100, 6, 785-794.
- Ilki, A., Kumbasar, N. (2003).** Compressive behaviour of carbon fiber composite jacketed concrete with circular and non-circular cross-sections, *J. Earthq. Eng.*, 7, 3, 381-406.
- Ilki A., Kumbasar N. and Koc V. (2004).** Low strength concrete members externally confined with FRP Sheets, *Structural Engineering and Mechanics*, 18, 1-28.

- Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., Kumbasar, N. (2008).** FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns, *ASCE J. Mat. Civ. Eng.*, 20, 2, 169-188.
- Ilki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I., Kumbasar, N. (2009).** Seismic retrofit of brittle and low strength RC columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites, *Advances in Structural Engineering*, 12, 3, 325-347.
- Galal K., Arafa A., Ghobarah A. (2005).** Retrofit of RC square short columns, *Engineering Structures*, 27, 5, 801-813.
- Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (2008).** American Concrete Institute
- Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures (2004).** Italian National Research Council
- Kent, D.C. and Park, R. (1971).** Flexural members with confined concrete, *ASCE Journal of the Structural Division*, 97, ST7, 1969-1990.
- Lam, L., Teng, J.G.(2001).** Compressive strength of FRP-confined concrete in rectangular columns, *International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, pp: 335-343.
- Lam, L., Teng, J.G. (2003).** Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete, *Construction and Building Materials*, 17, 471-489.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988).** Theoretical stress-strain model for confined concrete., *J. Struct. Eng.*, 114,8, 1804–1826.
- Memon, M., Sheikh, S. (2005).** Seismic resistance of square concrete columns retrofitted with glass fiber-reinforced polymer, *ACI Struc. J.*, 102, 5, 774-783.
- Mirmiran, A., Shahawy, R. (1997).** Behavior of concrete columns confined by fiber composites, *J. Struct. Eng.*, 123, 5, 583-590.
- Nanni, A., Norris, M.S. (1995).** FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression, *Construction and Building Materials*, 9, 5, 273-281.
- Ozbakkaloglu, T., Oehlers, D.J. (2008).** Concrete-filled square and rectangular FRP tubes under axial compression, *Journal Of Composites For Construction*, 12, 4, 469-477.
- Ozcan, O., Binici, B., Canbay, E., Ozcebe, G. (2010a).** Repair and strengthening of reinforced concrete columns with CFRPs, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 22, 3411-3424.
- Ozcan, O., Binici, B., Ozcebe, G. (2010b).** Seismic strengthening of rectangular reinforced concrete columns using fiber reinforced polymers, *Engineering Structures*, 32, 4, 964-973.
- Ozcebe, G., Saatçioğlu, M. (1987).** Confinement of concrete columns for seismic loading, *ACI Struc. J.*, 84, 4, 308-315.

- Rocca, S., Galati, N., Nanni, A. (2008).** Review of design guidelines for FRP confinement of reinforced concrete columns of noncircular cross sections, *Journal Of Composites For Construction*, 12, 1, 80-92.
- Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy M. (1998).** Model of concrete confined by fiber composites, *J. Struct. Eng.*, 124, 9, 1025-1031.
- Saatcioglu, M. and Razvi, S.R. (1992).** Strength and ductility of confined concrete, *ASCE Structural Journal*, 118, 6, 1590-1607.
- Saatcioglu, M., Grira, M. (2001a).** Seismic performance and design of concrete columns confined with CFRP grids, *International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, pp: 1227-1234.
- Saatcioglu, M., Sharbatdar K. (2001b).** Use of FRP reinforcement in columns of new structures, *International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, pp: 1219-1226.
- Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M. (1982).** Analytical model for concrete confinement in tied columns, *ASCE Journal of the Structural Division*, 108, ST12, 2703-2722.
- Theriault, M., Neale, K.W., Claude, S. (2004).** Fiber-reinforced polymer-confined circular concrete columns: Investigation of size and slenderness effects, *Journal Of Composites For Construction*, 8, 4, 323-331.
- Toutanji, H.A. (1999).** Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets, *Acı Materials Journal*, 96, 3, 397-404.
- Turgay, T., Polat, Z., Koksai, H.O., Doran, B., and Karakoç, C. (2010).** Compressive behavior of large-scale square reinforced concrete columns confined with carbon fiber reinforced polymer jackets, *Materials & Design*, 31, 1, 357-364.
- Wang Z.Y., Wang D.Y., Lu D.G. (2011).** Behavior of large-scale circular and square RC columns confined with carbon fiber-reinforced polymer under uniaxial compression, *International Conference on Structures and Building Materials*, Guangzhou, pp: 3686-3693.
- Xiao, Y., Wu, H. (2000).** Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets, *ASCE J. Mat. Civ. Eng.*, 12, 2, 139-146.
- Yalcin, C., Saatcioglu, M. (2000).** Inelastic analysis of reinforced concrete columns, *Computers and Structures*, 77, 539-555.
- Yalcin, C., Kaya, O., Sinangil, M. (2008).** Seismic retrofitting of R/C columns having plain rebars using CFRP sheets for improved strength and ductility, *Construction and Building Materials*, 22, 3, 295-307.
- Yuan, X.F., Lam, L., Teng, J.G., Smith, S.T. (2001).** FRP-confined RC columns under combined bending and compression: A comparative study of concrete stress-strain models, *International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, pp: 749-758.



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Mehmet Şentürk

Doğum Yeri ve Tarihi : Samsun 1987

E-Posta : senturkmeh@gmail.com, senturkmeh@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

Beykent Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, Eylül 2014 - ...