

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KOLONLARIN DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİNDE
ARAMİD LİFLİ POLİMER GÜÇLENDİRME DONATILARININ KOLON
TEMELİNE ANKRAJİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet UZUNHASANOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KOLONLARIN DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİNDE
ARAMİD LİFLİ POLİMER GÜÇLENDİRME DONATILARININ KOLON
TEMELİNE ANKRAJİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet UZUNHASANOĞLU
(501111004)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper İLKİ

EYLÜL 2012

İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet UZUNHASANOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BETONARME KOLONLARIN DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİNDE ARAMİD LİFLİ POLİMER GÜÇLENDİRME DONATILARININ KOLON TEMELİNE ANKRAJİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Alper İLKİ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Yrd.Doç.Dr. Mecit ÇELİK**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Zekai CELEP**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Oğuz Cem ÇELİK

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Şevket ÖZDEN

Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2012**

Savunma Tarihi : **18 Eylül 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan Sayın Prof.Dr. Alper İLKİ ve Yrd.Doç.Dr. Mecit ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecimde değerli katkıları için Dr.İnş.Müh. Çağlar GÖKSU'ya, İnş.Yük.Müh. C. Engin SEYHAN'a, İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı personeline, BASF'e, Artyol Mühendisliğe, Betonsa A.Ş.'ye ve İ.T.Ü. BAP Birimine teşekkür ederim.

Bu tez çalışması İnş.Yük.Müh. C. Engin Seyhan'ın doktora tez çalışmasının deneysel bölümünün bir parçasını oluşturmaktadır.

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

Eylül 2012

Ahmet Uzunhasanoğlu
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ...	1
1.1 Amaç	4
1.2 Literatür Özeti	5
2. NUMUNELERİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENEYSEL PROGRAM	13
2.1 Deney Programının Amacı.....	13
2.2 Numunelerin Tanımı ve Özellikleri	13
2.3 Malzeme Özellikleri.....	16
2.3.1 Lifli polimer ve harç	16
2.3.2 Beton	17
2.3.3 Donatı.....	17
2.4 Numunelerin Tasarımı.....	18
2.5 Numunelerin Üretimi	21
2.5.1 Temeller	21
2.5.2 Kolonlar	22
2.5.3 Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması	23
3. NUMUNELERİN TEORİK HESABI VE GÜÇLENDİRİLMESİ	25
3.1 Sargılı ve Sargısız Tamir Harcı ve Çekirdek Beton Basınç Dayanımı Hesabı	26
3.1.1 Sargılı çekirdek beton basınç dayanımı	28
3.1.2 Sargılı tamir harcı basınç dayanımı	29
3.2 LAM ve LAM-PB Numuneleri İçin Teorik Hesap	30
3.3 LAM-LAM Numunesi İçin Teorik Hesap	35
3.4 Güçlendirme Öncesi ve Sonrası Kesme Kuvveti Hesabı	40
3.5 Güçlendirme Uygulaması.....	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
4.1 Giriş.....	47
4.2 Deney Düzeneği	48
4.3 Yükleme Patronu.....	50
4.4 Deneyler	51
4.4.1 REF numunesi.....	51
4.4.2 LAM numunesi	54
4.4.3 LAM-LAM numunesi	58
4.4.4 LAM-PB numunesi	61
4.5 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	64

4.5.1 Yük-yerdeğiştirme ilişkisi	65
4.5.2 elik donatı ve AFRP şerit şekildeğiştirmeleri	68
4.5.3 Enerji yutma kapasitesi	70
4.5.4 Moment-eğrilik ilişkisi	71
4.5.5 Kalıcı yerdeğiştirme	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	85
ZGEMİş.....	99

KISALTMALAR

$AFRP$	: Aramid lifli polimer
a	: Kesitte dikdörtgene dönüştürülmüş basınç gerilmesi bloğu derinliği
A_0	: Etriye donatısı enkesit alanı
A_{core}	: Sargılanmış bölge beton kesit alanı
A_{frp}	: Lifli polimer şerit enkesit alanı
A_S	: Çekme donatısı alanı
A'_S	: Basınç donatısı alanı
A_{sw}	: Enine donatı kesit alanı
b	: Kolon enkesit genişliği
$CFRP$	: Karbon lifli polimer
c_c	: Net beton örtüsü
C_E	: Çevresel etki katsayısı
d	: Kolon enkesiti faydalı yükseklik
d'	: Beton örtüsü (paspayı)
d''	: Donatılar arası mesafe (eksenden eksene)
d'''	: Lifli polimer faydalı yükseklik
E_{frp}	: Lifli polimer elastisite modülü
E_S	: Donatı elastisite modülü
f_{cc}	: Sargılı çekirdek beton basınç dayanımı
$f'_{cc,p}$	: Sargılı tamir harcı basınç dayanımı (Prizma 4 mm×4 mm×16 mm için)
$f'_{cc,ss}$	: Sargılı tamir harcı basınç dayanımı (Silindir)
f'_{cc}	: Sargılı beton basınç dayanımı
f_{ccm}	: Sargılı tamir harcı basınç dayanımı
f'_{ck}	: 28 günlük silindir beton basınç dayanımı
f'_{co}	: Sargısız çekirdek beton basınç dayanımı
$f'_{co,p}$	: Sargısız tamir harcı basınç dayanımı (Prizma 4 mm×4 mm×16 mm için)
$f'_{co,ss}$	: Sargısız tamir harcı basınç dayanımı (Silindir)
f'_l	: Efektif sargılama dayanımı
f_{maks}	: Donatı maksimum akma dayanımı
f_u	: Donatı kopma dayanımı
f_y	: Donatı akma dayanımı
f_{yk}	: Boyuna donatı akma dayanımı

f_{ywd}	: Enine donatı akma dayanımı
H	: Kolon yüksekliği
h	: Kolon enkesit yüksekliği
ITR	: Etriye donatısı (Internal transverse reinforcement)
k_1	: Betondaki doğrusal olmayan gerilme dağılımına eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun tanımlanmasında kullanılan katsayı
k_a	: Etkinlik faktörü
kk	: CFRP kumaş kalınlığı
kks	: CFRP kumaş sargı adedi
LP	: Lifli polimer
LTF	: Çevrim sayısı
M_r	: Moment kapasitesi
N	: Eksenel yük
N_b	: Dengeli kırılmada eksenel yük
n	: Etriye kol sayısı
n_f	: Lifli polimer adedi
NSM	: Near surface mounted
r_e	: Enine donatı çapı
r_b	: Boyuna donatı çapı
r_c	: Köşe çapları
s	: Etriye aralığı
s_f	: Sargı aralığı
SRM	: Yapısal tamir harcı
TRM	: Transportation repair mortar
t_f	: Lifli polimer kalınlığı
u	: Tasarım eksenel kuvvet oranı
V_c	: Beton kesme kuvveti kapasitesi
V_{cr}	: Eğik çatlamayı oluşturan kesme kuvveti
V_d	: Tasarım kesme kuvveti
V_{frp}	: AFRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısı
V_{mak}	: Kesme kuvveti üst sınırı
V_r	: Toplam kesme kuvveti kapasitesi
V_{r-frp}	: Güçlendirilmiş numune kesme kuvveti kapasitesi
V_w	: Etriye kesme kuvveti kapasitesi
y	: ε_{co} 'ın tarafsız eksene olan uzaklığı
w_f	: Lifli polimer genişliği
x	: Tarafsız eksen yüksekliği
x_b	: Denge kırılmasında tarafsız eksen yüksekliği
δ_{res}	: Kalıcı yerdeğiştirme
δ_{un}	: Hedef yerdeğiştirme

ε_{cc}	: Sargılı beton şekildeğiştirme
ε'_{cc}	: Çekirdek beton en dış lifindeki en büyük birim kısalma
$\varepsilon_{cc,p}$	: Sargılı beton şekildeğiştirme (Prizma 4 mm×4 mm×16 mm için)
ε'_{ccm}	: En dış lifteki en büyük birim kısalma
ε_{co}	: Çekirdek beton sargı etkisinin başladığı birim kısalma
ε_{cu}	: Betonda en büyük birim kısalma
ε_{frpeff}	: Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi
ε'_{frpeff}	: Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi
ε_{frpult}	: Lifli polimer malzeme tasarım kopma şekildeğiştirmesi
ε^*_{frpult}	: Lifli polimer malzeme kopma şekildeğiştirmesi
$\varepsilon_{frpulteff}$	: Lifli polimer malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesi
$\varepsilon_{h,rup}$	: Lifli polimer kumaşın kopma şekildeğiştirmesi
ε_{maks}	: Donatı maksimum şekildeğiştirmesi
ε'_s	: Çekme donatısı birim uzaması
ε_s	: Basınç donatısı birim uzaması
ε_u	: Nihai kopma şekildeğiştirmesi
ε_y	: Donatı akma şekildeğiştirmesi
κ_m	: Lifli polimer aderans katsayısı (deney öncesi)
ρ_f	: Lifli polimer donatı oranı
ϑ	: LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörü
φ_c	: Basınç donatısının akması için sınır durum
φ	: Lifli polimer ek dayanım azaltma faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Deney kolon numunelerinin özellikleri.....	15
Çizelge 2.2 : LP malzeme özellikleri.....	16
Çizelge 2.3 : Kullanılan harç ve yapıştırıcı madde basınç dayanımları.	17
Çizelge 2.4 : 1m ³ betonda bulunan malzeme miktarları.....	17
Çizelge 2.5 : Donatı özellikleri.....	18
Çizelge 2.6 : Kolon boyuna donatısı ve etriyesinde şekil değiştirmeölçer yapıştırılma mesafeleri.....	24
Çizelge 3.1 : Sargılı çekirdek beton basınç dayanımlar tablosu.	28
Çizelge 3.2 : Sargılı tamir harcı basınç dayanımları tablosu.	29
Çizelge 3.3 : Tüm numunelerin teorik hesap özeti.	40
Çizelge 3.4 : Boyuna güçlendirme elemanları şekil değiştirmeölçer yerleşim planı.....	46
Çizelge 3.5 : Güçlendirme uygulama şeması.	46
Çizelge 4.1 : Kolonlarda hasar mekanizmaları (Sayılar öteleme oranıdır %).	65
Çizelge 4.2 : Yük-yerdeğiştirme deney özeti.	66
Çizelge 4.3 : Kolonların göçme modları ve teorik ve deneysel yatay yük kapasiteleri.....	66
Çizelge 4.4 : Hasar boyutları özeti.....	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : (a) Numune plan görünümü, (b) A-A kesiti, (c) B-B kesiti	14
Şekil 2.2 : (a) Boyuna AFRP şerit, (b) enine CFRP kumaş görünümü	16
Şekil 2.3 : Kolon gerilme – şekil değiştirme dağılımı	19
Şekil 2.4 : (a) Ahşap kalıp imalatı, (b) Temel donatısı, (c) Plastik boru yerleşimi ...	21
Şekil 2.5 : Ahşap kalıplar ve temel donatısı	22
Şekil 2.6 : (a) Kolon kalıp hazırlanışı , (b) Kolon kalıp hazırlanışı, (c) Çökme deneyi.....	23
Şekil 2.7 : Kolon donatıları üzerine yapıştırılan şekil değiştirmeölçerler	23
Şekil 2.8 : Kolon donatısı şekil değiştirmeölçer yerleşimi	24
Şekil 3.1 : (LAM ve LAM-PB numunelerinde şekil değiştirme-gerilme dağılışı.....	30
Şekil 3.2 : LAM-LAM numunesinde şekil değiştirme-gerilme dağılışı.....	35
Şekil 3.3 : Numunelere ait güçlendirme planları.....	43
Şekil 3.4 : (a) Paspayı sıyrılmış kolon, (b) Düz yüzey sağlamak amacı ile yapısal tamir harcı (SRM) uygulaması, (c) AFRP şeritlerin yapıştırılması, (d) AFRP şerit koli bandı uygulaması (sadece LAM-PB numunesi için), (e) İlave AFRP şerit uygulaması (sadece LAM-LAM numunesi için), (f) Yapısal tamir harcının (SRM) son kat uygulaması, (g) Enine doğrultuda CFRP kumaş sargılaması.....	44
Şekil 3.5 : (a) AFRP şerit, (b) AFRP ek şerit üzerindeki şekil değiştirmeölçer yerleşimi.....	45
Şekil 4.1 : Temsili deney düzeneği (Demirtaş, 2008)	48
Şekil 4.2 : Yer değiştirmeölçer yerleşim planı	50
Şekil 4.3 : Yükleme patronu	51
Şekil 4.4 : REF numunesinin deney başlangıcında görünümü	51
Şekil 4.5 : REF numunesine ait yatay yük-yer değiştirme ilişkisi.....	54
Şekil 4.6 : LAM numunesinin deney başlangıcında görünümü	54
Şekil 4.7 : LAM numunesi % 8 öteleme oranı ile itme sonrası	55
Şekil 4.8 : LAM numunesi % 8 öteleme oranı sonrası itmede kolon tabanı ile temel yüzeyi.....	56
Şekil 4.9 : LAM numunesi deney sonrası ($P= 0$ kN, $\delta= -82,60$ mm)	56
Şekil 4.10 : LAM numunesi deney sonrası kolon tabanı ile temel yüzeyi	56
Şekil 4.11 : LAM numunesine ait yatay yük-şekil değiştirme ilişkisi.....	57
Şekil 4.12 : LAM-LAM numunesinin deney başlangıcında görünümü	58
Şekil 4.13 : LAM-LAM numunesi % 8 itme öteleme oranı sonrası kolon-temel birleşimi.....	59
Şekil 4.14 : LAM-LAM numunesi deney sonrası ($P= 0$ kN, $\delta = -59,50$ mm)	59
Şekil 4.15 : LAM-LAM numunesi deney sonrası kolon-temel birleşimi.....	60
Şekil 4.16 : LAM-LAM numunesine ait yatay yük-yer değiştirme ilişkisi.....	61

Şekil 4.17 : LAM-PB numunesinin deney başlangıcında görünümü	61
Şekil 4.18 : LAM-PB numunesi % 8 öteleme oranı sonrası itmede kolon- temel birleşimi.....	62
Şekil 4.19 : LAM-PB numunesi deney sonrası ($P=0$ kN, $\delta = -83,10$ mm)	63
Şekil 4.20 : LAM-PB numunesi deney sonrası kolon tabanı ile temel yüzeyi	63
Şekil 4.21 : LAM-PB numunesine ait yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi	64
Şekil 4.22 : Kolon numunelerinin zarf eğrileri	65
Şekil 4.23 : Deney sırasında AFRP şeritin (a) % 3 öteleme oranında LAM numunesi, (b) % 3 öteleme oranında LAM-LAM numunesi, (c) % 3 öteleme oranında LAM-PB numunesi.....	67
Şekil 4.24 : Boyuna çelik donatıların şekildeğiştirme dağılımı (a) % 1 öteleme oranında, (b) AFRP şerit kopmadan önce, (c) AFRP şerit koptuktan sonra, ve AFRP şeritlerin şekildeğiştirme dağılımı (d) % 1 öteleme oranında, (e) AFRP şerit kopmadan önce, (f) AFRP şerit koptuktan sonra (anc*: LAM-LAM numunesine ait ilave AFRP şeridin şekildeğiştirme ölçümleri)	69
Şekil 4.25 : Enerji yutma kapasiteleri.....	71
Şekil 4.26 : Moment-eğrilik ilişkileri (a) 0-20 mm, (b) 20-150 mm temelden yukarı.....	72
Şekil 4.27 : Numunelerin kalıcı hasar-öteleme oranı ilişkisi.....	73
Şekil A.1 : REF numunesinin % 1 itme öteleme oranında görünümü.....	86
Şekil A.2 : REF numunesi % 2 çekme öteleme oranında görünümü	86
Şekil A.3 : REF numunesi % 3 itme öteleme oranında görünümü.....	87
Şekil A.4 : REF numunesi % 4 itme öteleme oranında görünümü.....	87
Şekil A.5 : REF numunesi % 6 itme öteleme oranında görünümü.....	88
Şekil A.6 : REF numunesi % 6 çekme öteleme oranında görünümü	88
Şekil A.7 : REF numunesi % 8 itme öteleme oranında görünümü.....	89
Şekil A.8 : REF numunesi % 8 itme öteleme oranında temel-kolon ayrılması görünümü.....	89
Şekil A.9 : REF numunesi % 8 çekme öteleme oranında (a) kısa kenar, (b) uzun kenar görünümü.....	90
Şekil A.10 : REF numunesi deney sonrası kalıcı yerdeğiştirme görünümü ($P=0$ kN, $\delta = -120$ mm).....	91
Şekil A.11 : REF numunesi deney sonrası kolon tabanında hasar durumu.....	91
Şekil A.12 : LAM numunesi deney sonrası çatlak kontrolü-deney sonrası.....	92
Şekil A.13 : LAM numunesi deney sonrası ankraj kontrolü-deney sonrası	92
Şekil A.14 : LAM-LAM numunesi deney sonrası çatlak kontrolü-deney sonrası	93
Şekil A.15 : LAM-LAM numunesi deney sonrası ankraj kontrolü-deney sonrası	93
Şekil A.16 : LAM-PB numunesi deney sonrası çatlak kontrolü- deney sonrası	94
Şekil A.17 : LAM-PB numunesi deney sonrası ankraj kontrolü- deney sonrası	94
Şekil B.1 : REF numunesi teorik moment-eğrilik grafiği	95
Şekil B.2 : LAM numunesi teorik moment-eğrilik grafiği.....	95
Şekil B.3 : LAM-LAM numunesi teorik moment-eğrilik grafiği	96
Şekil B.4 : LAM-PB numunesi teorik moment-eğrilik grafiği	96
Şekil B.5 : Numunelerin teorik moment-eğrilik grafiği	97

BETONARME KOLONLARIN DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİNDE ARAMİD LİFLİ POLİMER GÜÇLENDİRME DONATILARININ KOLON TEMELİNE ANKRAJİ

ÖZET

Türkiye, dünyadaki en aktif fay hatlarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Geçtiğimiz yüzyılda yıkıcı büyük depremler meydana gelmiştir ve bu depremlerde çok sayıda can kaybı yaşanmıştır. Mevcut yapıların, düşük beton basınç dayanımına, yetersiz etriye aralığına, düz donatıya ve bindirme boyuna sahip olması bu kayıpların asıl nedeni olarak tespit edilmiştir. Betonarme kolonların yeterli eğilme dayanımına sahip olmaması nedeniyle binalarda ciddi hasarlar yaşanabildiği için depreme karşı betonarme kolonların eğilme dayanımlarının arttırılması, mevcut binaların deprem performanslarının iyileştirilmesi için önem kazanmaktadır. Bu amaçla, tez çalışması kapsamında, betonarme kolonların deprem etkilerini temsil eden eksenel yük ve tersinir tekrarlanan yatay yükler altında eğilme dayanımlarının arttırılması amaçlanmaktadır. Eksenel yük betonarme kolonların eksenel yük kapasitesinin yaklaşık % 20'si mertebesinde uygulanmıştır. Tersinir tekrarlanan yatay yükleme durumu için betonarme kolonların aramid lifli polimer şeritler kullanarak eğilme dayanımlarının arttırılması bugün itibarıyla dünya üzerinde hiç bir ulusal/uluslararası yönetmelikte yer almamaktadır. Bu tez kapsamında yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda ilgili yönetmeliklerin güncellenmesinde kullanılabilecek mühendislik parametrelerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada, dikdörtgen enkesitli (200 mm×300 mm) dört adet betonarme kolon numunesi imal edilmiştir. Numuneler ülkemizdeki güçlendirme gereksinimi duyulan yapıların çoğunluğunu yansıtmaları açısından düşük beton dayanımına sahip, düz donatılı olacak şekilde ve sargılanma bölgesinde etriye sıklaştırması yapılmadan üretilmiştir. Güçlendirme aşamasına kadar aynı tipte imal edilen dört adet betonarme kolon numunesinden bir tanesi referans numunesi olarak kullanılmak amacıyla güçlendirilmemiştir. Diğer üç adet betonarme kolon numunesine (LAM, LAM-LAM, LAM-PB) güçlendirme uygulaması yapılmıştır. LAM ve LAM-PB numunelerinde aramid lifli polimer şeritler kolon kısa yüzeyine yerleştirilmiş ve doğrudan temele ankre edilmiştir. Kolon ve temelin birleştiği yüzeyde aramid lifli polimer şeritlerin potansiyel kusurlarından kaçınarak, daha iyi bir performans elde etmek için LAM-LAM numunesi için ilave aramid lifli polimer şerit kullanılmıştır. LAM ve LAM-LAM numunelerinde boyuna aramid lifli polimer şeritler yüzeye tamamen yapışmış olmasına karşılık, LAM-PB numunesinde kritik bölgede (kolon-temel birleşim bölgesi) şekil değiştirme birikimini azaltmak ve aramid lifli polimer şeridinin lokalize hasarını önlemek için ankraj bölgesinde aramid lifli polimer şeridinin bir kısmı koli bandı ile sarılarak yapışma doğrultusunda kısmi süreksizlik sağlanmıştır. Güçlendirilen numunelerin üçü de paspayı sıyrılarak ilk kez İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda uygulanmış olan bir metod kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu anlamda, beton örtüsü kaldırılan

numunelerin üzerine, boyuna doğrultuda aramid lifli polimer şerit yapıştırılmış, daha sonra boyuna doğrultuda güçlendirilen üç adet betonarme kolon numunesinin üzerine iki kat karbon lifli polimer kumaş sargı yapılmıştır. Deney değişkeninin aramid lifli polimer şeritlerin temele ankrajı olduğu bu çalışmada sonuçlar dayanım, süneklik, enerji yutma kapasitesi, rijitlik, kalıcı deformasyonlar ve göçme modları bakımından değerlendirilmiştir.

ANCHORAGE OF ARAMID FIBER LAMINATES USED FOR SEISMIC FLEXURAL STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

SUMMARY

Turkey has been located on one of the most active earthquake zones in the world and has experienced several major destructive earthquakes in the last century. There were many of casualties left behind these earthquakes, resulting from substandard detailing and material characteristics of existing buildings. Insufficient flexural capacity of reinforced concrete columns may cause severe damages during earthquakes. Therefore, enhancing the flexural behaviour of the columns against seismic actions is critical to prevent potential heavy damages or collapses. Many existing reinforced concrete structures were constructed with substandard characteristics. Low quality concrete, insufficient transverse reinforcement and insufficient flexural strength are among the most common deficiencies. As it is well known, concrete cover is generally deteriorated due to corrosion of internal steel reinforcing bars of substandard structures constructed with low strength concrete. While substandard structures are in need of retrofitting, particularly in seismic areas, problems such as financial constraints, disturbance to occupants and functions of the structures are among major obstacles for retrofit interventions. Fiber reinforced polymers can provide feasible retrofit solutions with minimum disturbance to occupants. In recent years, use of fiber reinforced polymers in construction industry have become quite common. They offer feasible and innovative solutions for seismic retrofitting due to their lightweight, high tensile strength and noncorrosive character. In this study, the main aim is to investigate the flexural seismic performance of substandard reinforced concrete columns retrofitted with embedded longitudinal fiber reinforced polymer reinforcement. In this study, four cantilever reinforced concrete columns were constructed using low strength concrete and plain reinforcing bars for representing relatively old substandard structures, and then were tested under reversed cyclic lateral and constant axial loads in a quasi-static displacement-controlled manner before and after retrofitting. While lateral loads were applied through displacement cycles in pushing and pulling directions with increasing amplitudes, axial load was kept constant at approximately 20% of the axial load capacity of the columns. Three different anchorage details were designed for embedding aramid fiber reinforced polymer laminates to the existing footing, which constitutes main test variable. The reference specimen, denoted as REF, was tested without any retrofit, and the other columns (LAM, LAM-LAM and LAM-PB) were tested after they were retrofitted with aramid fiber reinforced polymer reinforcement in longitudinal and carbon fiber reinforced polymer reinforcement in transverse directions. The longitudinal aramid fiber reinforced polymer reinforcement embedded in the columns was anchored directly to the footing in case of LAM and

LAM-PB specimens, while additional aramid fiber reinforced polymer anchorage reinforcements were used for the specimen LAM-LAM to achieve a better performance by avoiding potential failures of fiber reinforced polymer reinforcement at the interface of the column and the footing. Contrary to the fully bonded anchorages of longitudinal fiber reinforced polymer reinforcement in case of the specimens LAM and LAM-LAM, the anchorage of the fiber reinforced polymer reinforcement in case of specimen LAM-PB was intentionally partly debonded from concrete by using insulating tape. Partial debonding of aramid fiber reinforced polymer reinforcement in the anchorage zone was for preventing the localized damage of the aramid fiber reinforced polymer reinforcement at the interface of column and footing by avoiding localization of stresses at this critical zone. The applied retrofitting technique was introduced by Goksu et al. (2012). The aim of the applied retrofitting technique is the enhancement of column flexural capacity using aramid fiber reinforced polymer reinforcement under cyclic lateral loading in the presence of constant axial load without a significant sacrifice from deformation capacity. On the other hand, like many existing substandard RC columns, the spacing of the transverse reinforcement of the specimens was also insufficient, which might cause deficiencies in terms of ductility and shear strength after fiber reinforced polymer retrofitting. Therefore, after the intervention made for flexural strength enhancement through longitudinal aramid fiber reinforced polymer reinforcement, the specimens were also jacketed externally with carbon fiber reinforced polymer sheets in transverse direction. As known, while external fiber reinforced polymer confinement has a remarkable contribution to deformability and shear strength, its contribution to flexural strength (which is the main issue investigated in this study) is marginal with respect to the contribution of longitudinal aramid fiber reinforced polymer reinforcement. Nevertheless, both contributions were taken into account in the analytical calculations in this paper. Test results, supported by the analytical calculations, revealed that the cyclic flexural capacity of the substandard reinforced concrete members can be enhanced significantly by the use of aramid fiber reinforced polymer pultruded laminates through the applied retrofitting method. Current technical guidelines/documents do not allow use of longitudinal fiber reinforced polymer reinforcement for flexural retrofit under cyclic loading in potential plastic hinge regions of reinforced concrete members. This is basically due to concerns related with ductility. A significant enhancement was obtained in lateral flexural strength through the proposed retrofitting method. Furthermore, it was seen that the cyclic lateral drift capacities of the retrofitted columns was as high as 3%, which can be deemed as quite satisfactory against seismic actions. The comparison of the experimental data with analytical calculations revealed that a conventional design approach assuming composite action between concrete and fiber reinforced polymer reinforcement can be used for flexural retrofit design. As a summary, the higher strength of the specimen LAM-LAM is due to the contribution of additional AFRP anchorage reinforcement to the flexural capacity. The specimen LAM-PB behaved similar to the specimen LAM in terms of maximum lateral load and fracture of AFRP reinforcement at 3% drift. The sudden remarkable loss of strength upon exceeding the drift ratio of 3% was due to the fracture of one of the AFRP reinforcement within the isolated section. It was observed that the other AFRP reinforcement was decomposed locally just above the isolated height, while most of the individual fibers did not fracture at the decomposed section. This behavior allowed the column to remain in the elastic range with increasing drift ratios. When compared with the specimen LAM, it was observed that the partially bonded AFRP

reinforcement (in case of specimen LAM-PB) did not affect the lateral load capacity, however, affected the seismic behavior after reaching the ultimate lateral load by presenting more pinched hysteresis curves with limited plastic deformations even up to large drift ratios (8% drift ratio). Therefore, this type of anchorage system can be utilized to limit the residual displacement (residual damage). It is important to note that all significant damage was accumulated at the base of the columns, since the columns were wrapped with CFRP sheets in transverse direction along the full height. Consequently, the crack width reached several centimeters at the intersection of the column and the footing. This type of damage may be quite disadvantageous in case of earthquakes since the distribution of plastic deformations through the potential plastic hinge length is prevented due to presence of a rigid transverse CFRP jacket. The accumulation of a remarkable portion of plastic deformations only at the interface of the column and the footing may significantly reduce the overall drift capacity of the column. Since drift capacity is essentially important for a satisfactory seismic performance, this kind of reduction in drift capacity should be avoided. Strip type external CFRP confinement may allow better distribution of plastic deformations along the height of the column.

1. GİRİŞ

Deprem, yer kabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yeryüzeyini sarsma olayına denilmektedir.

Yapılar, depreme karşı, lineer elastik bölgede veya elastik ötesi davranışları da içerecek şekilde tasarlanabilir. Fakat, lineer elastik bölgede yapılacak tasarımların ekonomik olmamasından dolayı genellikle elastik ötesi davranışı da içerecek şekilde tasarlanmaktadır. Nükleer enerji santralleri gibi özel yapılar haricinde yapılar deprem etkisi altında can güvenliğini sağlamak koşuluyla kalıcı hasar görebilir. Yapı, deprem etkisinden sonra tekrar kullanılmayacak konumda olsa da, deprem esnasında, yapı içinde bulunanların güvenli bir şekilde tahliyesine de imkan sağlamalıdır. Yapıların sünek davranmasını sağlayabilmek için sargılama yapılmalıdır. Böylelikle, süneklik kapasitesi artırılarak, yapı, dayanım kaybına uğramadan büyük plastik yerdeğiştirmeler yapabilir.

Bir yapının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini veya bunlardan bazılarını önceki veya mevcut durumun üzerine çıkarmak amacıyla yapılan değişikliklere güçlendirme denilmektedir. Güçlendirmede yapının hasar görmüş olması şart değildir. Hasar görmemiş yapılarda da güçlendirme yapılabilir. Güçlendirmede amaç, ileride beklenen olası en şiddetli depremde can kaybına yol açmayacak bir dayanım ve/veya süneklik düzeyi sağlamaktır. Güçlendirme, yapılarda genel olarak eleman bazında güçlendirme ve sistem bazında güçlendirme şeklinde yapılmaktadır. Uygulamada ise, genellikle, taşıyıcı sistem elemanlarının kesitlerinin büyütülmesi ve taşıyıcı sisteme perde eklenmesi şeklinde olmaktadır. Günümüz teknolojilerinin gelmiş olduğu noktada güçlendirmede kullanılan malzemeler çok daha çeşitli ve kalitelidir. Bu malzemelerin en başında lifli polimer (LP) malzemeler yer almaktadır.

LP malzemeler birçok deneysel numunelerde kullanılmış ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Bu sebep ile onarım ve güçlendirmede etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yapı elemanlarına kumaş halinde dıştan sarılacağı gibi, şerit veya donatı halindeki LP ile de uygulanabilmektedir. Bu elemanlar çekme etkilerine karşı oldukça etkin iken basınç etkilerinde aynı etkinliği gösterememektedirler.

Birçok düşük beton basınç dayanımına sahip betonarme yapı, sismik hareketlere karşı kendi yetersizliklerini azaltmak için depreme karşı güçlendirilmesi gerekmektedir. Mevcut düşük beton basınç dayanımına sahip betonarme yapıların uygun depreme karşı güçlendirilmeleri için başlıca engeller; finansal kısıtlar, ev sahiplerinin rahatsızlıkları ve binaların işlevleridir. Son yıllarda, inşaat sektöründe güçlendirilmiş LP kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. LP, hafif, yüksek çekme dayanımı ve paslanmaz olması özelliği ile depreme karşı güçlendirme için uygulanabilir (CEB-FIB 2001, Ye ve diğ. 2001, Bakis ve diğ. 2002, Lam ve Teng 2003, ACI440-2R-08 2008, Bank 2013).

Kolonların veya birleşim noktalarının sargılanmasına (Seible ve diğ. 1997, Sheikh ve Yau 2002, Antonopoulos ve Triantafillou 2003, Iacobucci ve diğ. 2003, Xiao 2004, Prota ve diğ. 2004, Bousias ve diğ. 2004, Chang ve diğ. 2004, Memon ve Sheikh 2005, Tsonos 2007, İlki ve diğ. 2009, Garcia ve diğ. 2010, İlki ve diğ. 2011, Wang ve diğ. 2011, Jirawattanasomkul ve diğ. 2013) ve monoton yükleme koşulları altında yüzeye yakın olarak monte (NSM-Near Surface Mounted) edilmiş LP çubuk veya şeritlerin eğilme güçlendirmelerine (Nanni ve diğ. 1999, De Lorenzis ve Nanni 2002, De Lorenzis ve diğ. 2004, Hassan ve Rizkalla 2004, El-Hacha ve Rizkalla 2004, Barros ve diğ. 2006, Nordin ve Täljsten 2006, Liu ve diğ. 2006, Teng ve diğ. 2006, De Lorenzis ve Teng 2007, Seracino ve diğ. 2007, Castro ve diğ. 2007, Chikh ve diğ. 2008, El-Maaddawy ve El-Dieb 2011, Sharaky ve diğ. 2013) ait bir çok çalışma olmasına rağmen, tersinir tekrarlanan yatay yükleme koşulları altında LP kullanılarak eğilme güçlendirmesi yapılmış olan, sadece birkaç çalışma mevcuttur. (Sena Cruz ve diğ. 2006, Badawi ve Soudki 2009, Ceroni 2010). İlki ve Kumbasar tarafından 2002 yılında yapılan boyuna LP ile güçlendirilmiş betonarme kolon numunelerinde tersinir tekrarlanan eğilme davranışı ilk defa incelenmiştir. Yakın zamanlarda, Bournas ve Triantafillou (2009), Göksu ve diğ. (2012), Fahmy ve Wu (2012), Vrettos ve diğ. (2013) ve Li ve diğ. (2013) de bu konu üzerinde çalışma yapmışlardır.

Göksu ve diğ. (2012) çalışmasında, tersinir tekrarlanan yatay yükleme koşulları altında düşük beton basınç dayanımına sahip betonarme kolon numunelerinin eğilme dayanımına karşı güçlendirme için karbon lifli polimer (CFRP) boyuna (çubuk, şerit, levha) ve enine (kumaş) güçlendirme uygulamasının olasılığı araştırılmıştır. Boyuna doğrultuda LP şerit kullanarak eğilme güçlendirmesinin amacı, tersinir tekrarlanan yatay yükler altında eğilme dayanımını arttırmaktır. Çünkü, mevcut birçok yapı, diğer eksikliklerinin yanı sıra deprem durumunda yetersiz eğilme dayanımına sahiptir. Ayrıca, öteleme oranı deprem durumunda dayanım kadar önemli olduğundan, öteleme oranını da azaltmamak önemlidir.

Göksu ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, LP güçlendirme ile ileri öteleme oranlarına (yaklaşık % 6 öteleme oranı) kadar eğilme kapasitesinde gelişme gözlenmiştir. Ayrıca, bir temel üzerinde LP şerit bağlantısı için çeşitli ankraj türlerinin performansı test edildikten sonra, elde edilmiş olan en etkili ankraj detayı bu çalışmada da kullanılmıştır. Göksu ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışma ile bu tez çalışması arasındaki en büyük farklılıklar;

- Eksenel yükün varlığı, (herhangi bir eksenel yük Göksu ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada yok iken, bu çalışmada betonarme kolonların eksenel yük kapasitesinin % 20'si uygulanmıştır),
- Bu çalışmada kullanılan LP şeridin türünün farklı olması, “Aramid lifli polimer (AFRP) şerit”
- Bu çalışmada AFRP şeridin belirli bir kısmında kısmi süreksizlik sağlanarak, kolon ve temel kritik birleşiminde LP'in daha fazla şekil değiştirme yapmasına izin verilmiştir.

Mevcut çalışmada CFRP ya da cam FRP (GFRP) yerine AFRP şerit kullanılmasının nedeni AFRP'nin dayanımının daha iyi olmasıdır (CNR-DT 200/2004).

Bu çalışmada, dört konsol betonarme kolon düşük basınç dayanımına sahip beton ve eski yapıları temsil etmek için düz donatı kullanılarak inşa edilmiştir ve tersinir tekrarlanan yatay ve sabit eksenel yük altında test edilmiştir. Ana test değişkeni olan üç farklı ankraj detayı, mevcut temele AFRP şeritlerin ankrajı için tasarlanmıştır.

Uygulanan güçlendirme tekniğinde, öncelikle beton örtü kaldırılmıştır. İkinci olarak, AFRP şeridin yapışması için yüksek dayanıma sahip yapısal tamir harcı (SRM-Structural Repair Mortar) ile düz bir yüzey elde edilmiştir. SRM'nin sertleşmesinden

sonra, AFRP boyuna şeritleri epoksi yapıştırıcı kullanılarak alt tabakaya yapıştırılmıştır. Daha sonra, yeni beton örtüsü oluşturmak için ikinci tabaka SRM uygulanmıştır. Güçlendirme için son aşama olarak kolon dışarıdan CFRP kumaş ile kaplanmıştır. Düşük dayanımlı betonarme kolon numunelerinin eğilme kapasitelerinin, uygulanan güçlendirme yönteminde AFRP şeritlerin kullanılması ile önemli ölçüde arttığı ortaya konmuştur. Mevcut teknik dökümanlar, betonarme kolonların tersinir tekrarlanan yatay yükler altında potansiyel plastik mafsallık bölgelerinde eğilme güçlendirmesi için boyuna LP donatıların kullanımına izin vermemektedir. Ayrıca, bu çalışmada, güçlendirilmiş kolonların şekildeğiştirme kapasitelerinin aynı zamanda deprem esnasındaki performansları için kabul edilebilir olduğu gözlenmiştir. Tersinir tekrarlanan yatay yüklere maruz kalan AFRP şeridin kopma değerinin, üretici tarafından verilen değerinin yaklaşık olarak % 45 civarında olduğu görülmüştür. Monoton yükleme koşulları altında NSM uygulamalarında, ACI440-2R-08 (2008) LP takviyelerinin nihai kopma değerinin % 70'inin düşünülmesi gerektiğini önermektedir. Bu çalışmada, tersinir tekrarlanan yatay yükleme koşulları durumunda, boyuna LP güçlendirme için izin verilen şekildeğiştirme sınırı gösterilmiştir. Ayrıca arttırılmış eğilme kapasitesinin yanı sıra, güçlendirme sonrası kolonların doğrusal ve elastik olmayan deplasman tepkileri, geleneksel betonarme kolon teorisi kullanılarak kabul edilebilir olduğu gösterilmiştir. Yapılan çalışma İnş.Yük.Müh. C. Engin Seyhan'ın doktora tezinin 4 numunesinden oluşmakta olup, bu çalışmalar sonucundaki veriler doğrultusunda kalan numuneler de tasarlanmıştır.

1.1 Amaç

Bu çalışmada, LP malzemeler kullanılarak betonarme kolonların eğilme dayanımlarının arttırılması hedeflenmiştir. Hazırlanan betonarme konsol kolon numuneleri deprem etkilerini temsil etmesi amacıyla tersinir tekrarlanan yatay yükler ve sabit eksenel yük altında test edilmiştir. Ülkemizdeki mevcut yapıların durumu gözönünde bulundurulduğunda betonarme kolon numunelerinde beton olarak düşük dayanımlı, donatı olarak nervürsüz ve sargılama açısından etriye sıklaştırılmasının yapılmamış olduğu numuneler tasarlanmıştır. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, güçlendirilen kolon numunelerinin eğilme dayanımları boyuna doğrultuda yapıştırılan AFRP şerit ile arttırılmıştır. Enine doğrultuda kesme dayanımının

arttırılması ve sargılama oluşturmak için CFRP kumaş kullanılmıştır. Deneysel parametre güçlendirme uygulamasının detayları olup, çalışmanın amaçları arasında teorik hesaplar ile numunelerin eğilme dayanımlarının gerçekçi şekilde belirlenmesi de yer almaktadır.

1.2 Literatür Özeti

Özellikle son 15 yılda betonarme yapıların LP kullanılarak güçlendirilmesi üzerine çok kapsamlı araştırma projeleri yapılmış ve aynı zamanda geliştirilen bu teknoloji gerçek hayatta çok sayıda projede uygulanmıştır. LP malzemelerin betonarme kolonların deprem performanslarının arttırılmasında kullanılabileceği çok sayıda deneysel çalışmayla ortaya konulmuştur.

Sieble ve diğ. (1997) tarafından yapılan çalışmada, mevcut köprü kolonları ve bunların LP malzeme ile güçlendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadan önce teorik bir çalışma yürüterek güçlendirme için gerekli LP malzeme kalınlığı üzerine bir takım bağıntılar geliştirilmiştir. Farklı göçme şekilleri (kesme, eğilme, aderans kaybı) oluşacak şekilde kolonlarda yapılacak güçlendirme işlemi için farklı kalınlıkta LP malzemeye ihtiyaç duyulduğunu belirtilmiştir. Her farklı durum için de uygulanacak LP malzeme kalınlığı kolon boyunca değişiklik göstermektedir. Güçlendirilen kolonların performansı önemli oranda artmıştır. Teorik olarak hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesinden daha yüksek yatay yük seviyesi elde edilmiş, yer değiştirme sünekliği büyük ölçüde artmış ve sıyrılma önlenmiştir.

Alkhrdaji ve Nanni (1999) tarafından yapılan çalışmada, betonarme köprü ayaklarının (NSM metoduyla) CFRP çubuklar ve sargılama kullanılarak eğilme kapasitesinin arttırılmasını amaçlayan bir çalışma yapılmıştır. Deneye tabi tutulan köprü 1930’lu yıllarda Amerika’da inşa edilen “Bridge J857” isimli köprüdür. Dikdörtgen kesitli köprü ayaklarının yapılan incelemesinde kesmeye karşı yeterli, eğilmeye karşı yetersiz dayanımda olduğu anlaşılmıştır ve güçlendirme detayları buna göre belirlenmiştir. Köprünün denenen 4 ayağından 3 tanesi farklı detayda güçlendirilmiştir. Köprü ayaklarından bir tanesine 14 adet $\phi 11$ CFRP çubuk iki yüzüne 7’şer tane gelecek şekilde NSM metoduyla 14 mm genişlik ve 19 mm derinlikteki oluklara yerleştirilmiş ve LP çubuk temele 380 mm derinliğinde ankrajlanmıştır. Bunun üzerine ise 4 kat CFRP sargılama yapılmıştır. Diğer bir köprü

ayağına da 6 adet $\phi 11$ CFRP çubuk iki yüzüne 3'er tane gelecek şekilde NSM metoduyla 14 mm genişlik ve 19 mm derinlikteki oluklara yerleştirilmiş ve LP çubuk temele 380 mm derinliğinde ankrajlanmıştır. Bunun üzerine de 4 kat CFRP sargılama yapılmıştır. Güçlendirilen son köprü ayağına ise doğrudan yüzeye uygulanan güçlendirme metoduyla 6 kat GFRP sargılama yapılmıştır. Sargılama işlemi yapılan köprü ayaklarının köşeleri 13 mm çapında olacak şekilde yuvarlatılmıştır. 4. köprü ayağına ise referans olması için herhangi bir güçlendirme detayı uygulanmamıştır. Güçlendirme işlemi tamamlanan köprü ayakları ve referans olarak kullanılan köprü ayağına tersinir tekrarlanan yatay yük etkilmiştir. Aynı zamanda sistem, köprü ayaklarının taşıdıkları döşeme ve kirişlerden gelen statik eksenel yükünde etkisindedir. Deney verileri ve göçme modları değerlendirildiğinde güçlendirilmemiş köprü ayağının temelinde zemin davranışına bağlı olarak dönme meydana gelmiştir. Bunun yanında köprü ayağının üstten 1/3 yüksekliğinde büyük bir çatlak görülmüştür. 14 adet CFRP çubuk kullanılarak ve sargılanarak güçlendirilen köprü ayağında ise köprü ayağı ilk olarak rijit cisim dönmesi yapmış ve bunun sonucunda üst bölgesinde büyük bir çatlak meydana gelmiştir. Bu çatlak meydana geldikten sonra donatı akmaya başlamış ve plastik mafsalları oluşumu gerçekleşmiştir. Plastik mafsalları oluşumundan sonra sisteme gelen momentler sonucu köprü ayağı ve temelinde zeminde yeterince engelleyememesi sonucu dönme meydana gelmiş ve yük taşıyamaz hale gelmiştir. 6 adet CFRP çubuk kullanılarak ve sargılanarak güçlendirilen köprü ayağında ise ilk olarak en üst ve en alt bölgede iki büyük çatlak meydana gelmiştir. Bu köprü ayağının temeli sağlam zemine oturduğu için temelde dönme görülmemiştir. Bunun sonucu olarak temele gelen momente karşı dönme rijitliği çok fazla olduğundan köprü ayağının temele birleştiği nokta çok daha fazla momente maruz kalmıştır. 6 kat GFRP sargılama yapılan köprü ayağı ise temelinin oturduğu zeminin yeterince sağlam olmaması nedeniyle rijit cisim dönmesi yaparak göçmüştür. Deney sonuçlarına göre önerilen güçlendirme yöntemi, köprü ayakları gibi düşey elemanların eğilme dayanımını artırma da verimli olmuştur. Ancak, sistemin eğilme kapasitesini arttırırken diğer sınır değerlerinde tahkiki iyi bir şekilde yapılarak sistemin istenen eğilme kapasitesine ulaşması sağlanabildiği belirtilmiştir.

Hassan ve Rizkalla (2003, 2004) tarafından yapılan çalışmalarda, betonarme kirişlerde NSM tekniğini kullanarak farklı ankraj boylarında CFRP çubuklar ve şeritler kullanarak eğilme testleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde, CFRP donatılar ile

güçlendirilen kirişlerin, paspayının dökülmesi ve ardından donatıların aderanslarını kaybetmeleri ile göçtüğü belirtilmiştir. Yazarlar tarafından, LP donatıların ankraj boyundan bağımsız olarak kopma dayanımına ulaşmadığı ve kullanılabilir şekilde değiştirilmelerinin % 0,70–0,80 ile sınırlandırılması gerektiği, bununla beraber ankraj boyunun 800 mm'den az olmaması gerektiği belirtilmiştir. Şeritlerin kullanıldığı kiriş numunelerinde ise 850 mm'den büyük ankraj boylarında şeritler kopma dayanımlarına ulaşmıştır.

Teng ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada, NSM tekniğiyle uygulanmış farklı ankraj boylarındaki LP şeritlerle betonarme kirişler güçlendirilmiş ve eğilme testleri yapılmıştır. Ankraj boyu arttıkça göçme şeklinin ankraj bölgesinde paspayının çekirdekten ayrılması, açıklıkta betonun ezilmesi ve ardından paspayının ayrılmasına doğru değiştiği gözlenmiştir.

El Hacha ve Rizkalla (2004) tarafından yapılan çalışmada, eşit miktardaki LP donatı ve şerit, NSM tekniği ile özdeş numunelerde uygulanmış ve karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, LP şeritlerin daha yüksek performans gösterdiği ve aderans kaybına uğrayarak sıyrılan donatılardan farklı olarak kopma dayanımlarına ulaştıkları gözlenmiştir. Bu davranış, şeritlerin donatılara oranla birim alanlarına karşı daha büyük yüzey alanlarının olması ile açıklanmıştır. NSM tekniği uygulanmış LP çubuklarla güçlendirilen betonarme kirişlerde iki farklı göçme şekline rastlanmaktadır. Bunlardan ilki betonun ezilmesi ile ikincisi ise mevcut donatılar aktıktan sonra LP'in kopması şeklinde gerçekleşmektedir. LP'in kopmasıyla oluşan göçmelerde son ana kadar betonarme kiriş ile LP malzeme arasındaki kompozit yapı korunmakta, ancak LP'in kopmasıyla birlikte ani bir sıyrılma oluşmakta ve dolayısıyla kompozit yapı aniden kaybolmaktadır. Buna rağmen yüzeyden yapıştırılan LP malzemelere oranla NSM tekniği ile uygulanan LP malzemelerde sıyrılma problemi çok daha seyrek görülmektedir. Sıyrılma nedeniyle oluşan göçme şekli, mevcut donatı oranı, LP donatı oranı, eleman kesitinin geometrik özellikleri ve beton ve epoksi yapıştırıcının çekme dayanımlarına bağlıdır.

Taljsten (2003) ve Lorenzis (2002) tarafından yapılan çalışmalarda, NSM tekniği ile uygulanan LP malzemeler kiriş mesnetlerine kadar uzatılarak gerçek örneklerdeki gibi komşu elemanlara ankraj yapılmış etkisi yaratılmak istenmiştir. Bu ankraj yönteminde, Lorenzis (2002) tarafından yapılan çalışmada LP malzemede sıyrılmaya rastlanırken, Taljsten (2003) tarafından yapılan çalışmada, LP donatıların kopması

şeklinde bir göçme şekli gerçekleşmiştir. Buna karşın, LP donatıların mesnetlere kadar uzatılmadığı özdeş bir numunede ise sıyrılma oluşmuştur.

Barros ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonların NSM metoduyla CFRP çubuklar ve şerit plakalar kullanılarak güçlendirilmesi sonucu elemanın davranışındaki değişimi gözlenmiştir. Bu amaçla, NSM metodunun verimliliğini kanıtlayan bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma için ortalama beton basınç dayanımı 16,70 MPa (28 günlük) olan 12 adet dikdörtgen kesitli betonarme kolon numunesi üretilmiştir. Güçlendirme işleminde ise, ilk olarak kolonun her iki yüzüne boyuna doğrultuda 3'er adet 4-5 mm genişlik ve 12-15 mm derinlikte oluklar açılmıştır. Daha sonra bu oluklar basınçlı hava ile temizlenip epoksi ile doldurulmuştur. Epoksi ile doldurulan bu oluklara CFRP şerit plakalar boyuna doğrultuda gömülmüştür. Bu işlem sırasında kolonun temele birleştiği bölgede CFRP şerit plakalar temele 100 mm derinliğinde ankrajlanmıştır. Güçlendirmesi de bu şekilde yapılan numunelere 150 kN statik eksenel yük ve tersinir tekrarlanan yatay yük etkililerek deneye tabi tutulmuştur. Deney verileri değerlendirildiğinde, güçlendirilen numunelerin güçlendirilmeyen numunelere göre yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Güçlendirilen tüm numunelerde LP donatı oranı aynı fakat çelik donatı oranı 4φ10 ve 4φ12 için 2 farklı tiptedir. Bu durum gözönüne alındığında çelik donatı oranı düşük olan numunelerin yük taşıma kapasitesinin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, eğilme etkisinde göçen betonarme kolonların NSM metoduyla LP şerit plaka kullanılarak güçlendirilmesi sonucu elemanın yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış olduğu belirtilmiştir.

Szabo ve Balazs (2007) tarafından yapılan çalışmada, NSM metodu değerlendirilmiş ve LP çubuklar kullanılarak NSM metoduyla yapılan güçlendirmenin faydalarından birisi, LP malzemenin yüksek dayanıma sahip ve korozyona karşı dirençli olmasından dolayı uygulama için açılacak deliğin çok küçük boyutlarda olabilmesidir. Sonuç olarak, doğrudan yüzeye uygulanan güçlendirme metoduna göre daha yeni bir yöntem olan NSM metodunda, aynı oranda güçlendirme yapıldığında doğrudan yüzeye uygulanan güçlendirme metoduna göre yük taşıma ve şekildeğiştirme kapasitesinde daha büyük artışlar olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda NSM metodunda doğrudan yüzeye uygulanan güçlendirmeye göre LP malzemenin daha fazla yapışma yüzeyi ve daha büyük ankraj kapasitesine sahip olduğu ve bunun istenmeyen bazı göçme tiplerini de engellediği belirtilmiştir.

Sato ve Ko (2007) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonlarda kullanılan kesme donatısının ve LP malzeme sargısının kolon boyuna donatısının burkulma davranışına olan etkisi tersinir tekrarlanan yatay yükler altında incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada, LP sargılama yapılmayan betonarme kolonlarda, boyuna donatıların basınç taşıma kapasitesinin burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0,30 mm'den az olduğu durumlarda azalmaya başladığı görülmüştür. Boyuna donatının yüklemenin yarısına gelindiğinde en fazla basınç gerilmesine ulaştığı ve burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0,60 mm'den fazla olduğu durumlarda sabitlendiği ve artmadığı görülmüştür. Bu yüzden, boyuna donatıların burkulma boyu ve burkulma şeklinin burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0,30 mm ile 0,60 mm arasında olduğu durumlarda daha dengeli olduğu görülmüştür. CFRP sargılı betonarme kolonlarda, boyuna donatıların basınç gerilmelerinin çok daha büyük burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafelerinde bile artmaya devam ettiği gözlenmiştir. Kesme donatılarının rijitliğini veya yüksek elastisiteli LP malzemenin sınır gerilmesini arttırarak burkulmada normal eksen merkezinden sapma hareketinin sınırlanabileceği görülmüştür. Bu deneyde kullanılan numuneler için, boyuna donatının burkulması sırasında kesme donatısının (etrierlerin) uzayarak akmaya başladığı bölgenin uzunluğunun burkulma boyuna oranının 0,45 ile 0,76 aralığında olduğu görülmüştür.

Barros ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada, eğilme ve eksenel yük altındaki kolonların eğilme dayanımı, NSM tekniği ile arttırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada iki farklı seri kullanılmış olup, ilk seride kolon çelik donatısı 4 ϕ 10 iken, diğer seride kolon çelik donatısı 4 ϕ 12'dir. İki farklı seride betonarme kolonların sabit eksenel yük ve tersinir tekrarlanan yatay yükler altında test edildiğini ve yük taşıma kapasitelerinin ciddi şekilde arttırıldığı belirtilmiştir. Güçlendirme amacıyla kullanılan LP donatıların miktarı her iki serideki kolonlar için aynı olsa da mevcut donatı oranı (4 ϕ 10) daha düşük olan kolonlarda yüksek olan (4 ϕ 12) kolonlara göre eğilme kapasitesindeki artış % 92'ye karşı % 34 ile daha fazla olmuştur. Bu çalışmada, LP donatı miktarları, sıyrılma tehlikesini ortadan kaldırmak ve LP'in tam kapasitelerini kullanabilmek amacıyla sınırlandırılmıştır. Diğer taraftan kolonların enerji yutma kapasitelerinde ise herhangi bir artış kaydedilmemiştir.

Triantafillou ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada, NSM metoduyla eğilmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kolonların deprem yükü etkisindeki davranışını

incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan farklı güçlendirme malzemelerinin kapasite, yatay yerdeğiştirme, enerji yutma ve rijitlik gibi parametreler açısından karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sırasındaki değişkenler, CFRP veya GFRP ile paslanmaz çelik donatılar, NSM uygulama şekli, ankraj dolgu malzemesi ve sargılama malzemesi ile kullanımı olarak belirlenmiştir. Aynı geometriye sahip 11 adet konsol kolon numunesi (250 mm×250 mm×1600 mm) tersinir tekrarlanan yatay yük ve sabit eksenel yük etkisinde test edilmişlerdir. Numunelerde eski tip yapıları yansıtması açısından düz donatı kullanılmıştır. Boyuna donatılar bir numune hariç 4 ϕ 14 (diğer numune 4 ϕ 12), enine donatılar ϕ 8/200 seçilmiştir. Beton dayanımı ise ortalama 25,80 MPa'dır. Güçlendirmede kullanılacak boyuna elemanların temele ankraj boyu 300 mm hesaplanmıştır. NSM uygulamasında donatı olarak, CFRP şerit plaka, GFRP çubuk ve paslanmaz çelik donatı kullanılmıştır (CFRP şerit plakalar kolon eksenine dik ve paralel olacak şekilde iki farklı tipte uygulanmıştır). Ayrıca, güçlendirmede kullanılan donatı oranında değişken tutulmuştur. Ankraj dolgu malzemesi olarak epoksi reçinesi veya çimento bazlı harç kullanılmıştır. Son değişken ise kolon alt bölgesinin (kritik bölge) TRM ile sargılanmış veya sargılanmamış olmasıdır. Deney sonuçlarına göre, güçlendirilen numunelerin eğilme dayanımı referans numunesine oranla % 25 ile % 100 arasında artmıştır. Güçlendirilen numuneler itme ve çekmede simetrik hareket etmemişlerdir. Boyuna donatılar temel tabanına ulaştıktan sonra gönye yapılmadan kancayla sonlandırıldığı için donatılarda sıyrılma meydana gelmiştir. Referans numunesi boyuna donatıların burkulması ile göçmüştür. Güçlendirilen numuneler ise, CFRP şerit plakaların kırılması veya sıyrılması, GFRP çubukların burkulması, paslanmaz çelik donatıların burkulması veya kopması, ankrajların sıyrılması gibi farklı şekillerde göçmüşlerdir. Yapılan değerlendirmede, rijitlik ve enerji yutma miktarları paslanmaz çelik ile güçlendirilen numunede diğerlerine oranla daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. NSM'de güçlendirme için kullanılan donatı oranı arttıkça dayanımda artış olduğu gözlenmiştir. Mevcut kolon donatı oranının azalması NSM donatısının verimini arttırmaktadır. CFRP şerit plakaların doğrultusu, kolon eksenine dik olanlar paralel olanlara oranla daha verimli olmuştur. TRM ile sargılama yapılan kolonların da yapılmayanlardan daha verimli olduğu gözlenmiştir. Paslanmaz çelik donatılarda ankraj dolgu malzemesi olarak kullanılan iki farklı tip malzemeden epoksi reçinesinin çimento bazlı harca göre daha verimli olduğu

görülmüştür. Sonuç olarak, NSM metoduyla LP malzeme veya paslanmaz çelik donatılar kullanılarak güçlendirilen betonarme kolonların deprem yükleri etkisinde eğilme kapasitesinin ciddi şekilde arttığı gözlenmiştir.

Perrone ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada, NSM metoduyla boyuna doğrultuda güçlendirilen düşük dayanımlı betonarme kolonların sabit eksenel yük ve tersinir tekrarlanan yatay yükler etkisinde eğilme ve enerji yutma kapasitelerindeki değişimi incelenmiştir. Boyuna güçlendirme malzemesi olarak kullanılan CFRP şerit plakalarla kolonun eğilme dayanımı, üzerine uygulanan CFRP sargılama ile de betonun dayanımı ve plastik mafsallardaki boyuna donatıların ve şerit plakaların burkulma ve sıyrılma dirençlerini arttırmak amaçlanmıştır. Çalışmada, güçlendirilmiş, güçlendirilmemiş ve test edilip hasar oluştuktan sonra güçlendirilmiş kolonların, farklı boyuna donatı oranına sahip kolonların, farklı beton basınç dayanımına sahip kolonların, farklı miktarda CFRP sargılama yapılan kolonların ve farklı sayıda CFRP şerit plaka kullanılan kolonların kapasite, enerji yutma ve rijitlik bakımından karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Aynı geometriye sahip 8 adet konsol kolon numunesi (250 mm×250 mm×1500 mm) üretilmiştir. Numunelerde eski tip yapıları yansıtmaması açısından kolon boyuna donatıları 260 mm bindirmeli olarak, beton dayanımı da bir numune hariç 8 MPa olacak şekilde imal edilmiştir (diğer numune 29 MPa). Enine donatı oranı $\phi 6/250$ olarak seçilmiştir. Boyuna donatı oranı ise değişkenlerden birisi olduğundan 4 $\phi 10$, 4 $\phi 12$ ve 4 $\phi 16$ olarak seçilmiştir. Güçlendirme aşamasında ise itme ve çekme yüzlerine 2, 3 ve 4'er adet CFRP şerit plaka konulmuştur. CFRP şerit plakaların temele ankraj boyu da 120 mm ile 150 mm aralığı olarak belirlenmiştir. Son olarak CFRP sargılama kat sayısı 2 veya 3 olarak seçilmiştir. Deney verilerine göre, hasar gördükten sonra güçlendirilen kolon numunelerinin yük taşıma kapasitelerinin % 38 ile % 55 aralığında arttığı görülmüştür. CFRP şerit plakaların ankraj bölgesi çevresindeki betonun yarım koni şeklinde çatladığı ve bunun yükü düşürdüğü gözlenmiştir. Bunun bir sonucu olarak düşük beton dayanımının güçlendirmenin verimini düşürdüğü belirtilmiştir. Daha büyük yerdeğiştirmelere gidildikçe CFRP'nin katkısının arttığı ve kolonun rijitliğinin referans numunesine oranla arttığı gözlenmiştir (başlangıç rijitliği referans numunesinden düşük olan numuneler için geçerlidir). Betonarme imalattan sonra güçlendirilen kolon numunelerinin ise yük taşıma kapasitelerinin % 63 ile % 70 aralığında arttığı gözlenmiştir. Daha ileri öteleme oranlarına gidildikçe enerji yutma

kapasitesi referans numunesine oranla % 40 ile % 87 aralığında artmıştır. Bu numunede boyuna donatı oranı arttıkça enerji yutma kapasitesinin de arttığı gözlenmiştir. Hasar gördükten sonra güçlendirilen numunelerle benzer şekilde daha ileri öteleme oranlarına gidildikçe kolonun rijitliğinin referans numunesine oranla arttığı görülmüştür (bu durum da başlangıç rijitliği referans numunesinden düşük olan numuneler için geçerli). Genel olarak yapılan değerlendirmelerde ise CFRP sargılama kat sayısının artması kolonun yük taşıma kapasitesini fazla etkilemezken, enerji yutma kapasitesinde ciddi bir artış sağlamıştır. Beton dayanımı yüksek olan numunenin ise yük taşıma kapasitesinde % 39, enerji yutma kapasitesinde de % 109'luk artış sağlanmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışma, deprem etkilerine karşı bu metodla sağlanan güçlendirmenin betonarme kolonların eğilme ve enerji yutma kapasitesini arttırmada uygun bir çözüm olduğunu göstermiştir.

İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda (YDML) gerçekleştirilen **Göksu ve diğ. (2012)** tarafından yapılan çalışmada, tersinir tekrarlanan yatay yükleme koşulları altında düşük basınç dayanımına sahip betonarme kolon numunelerinin eğilme deprem güçlendirme için CFRP boyuna (çubuk, şerit, levha) ve enine (CFRP kumaş kullanılarak) güçlendirme uygulanması araştırılmıştır. Esas olarak boyuna doğrultuda, LP şerit kullanarak eğilme güçlendirmesinin amacı, tersinir tekrarlanan yükler altında eğilme dayanımını arttırmaktır. Ayrıca, öteleme oranı deprem durumunda dayanım kadar önemli olduğundan, öteleme oranını da azaltmamak önemlidir. Referans ve güçlendirilmiş numunelerin eğilme dayanımları analitik olarak irdelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, LP güçlendirme ile ileri öteleme oranlarına (yaklaşık % 6 öteleme oranı) kadar eğilme kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca, bir temel üzerinde LP şerit ankrajı için çeşitli ankraj türleri denendikten sonra, en etkili ankraj detayı elde edilmiş ve ayrıca bu çalışmada kullanılmıştır. Göksu ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara dayanarak önerilen, projede kullanılacak olan güçlendirme metotlarına karar verilmiştir.

Sonuç olarak, NSM tekniği veya YDML'de uygulanan SRM uygulaması ile uygulanan LP şeritlerin betonarme kolonların tersinir tekrarlanan yatay yükler altında eğilme dayanımlarının arttırılmasında etkili olabileceği yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur.

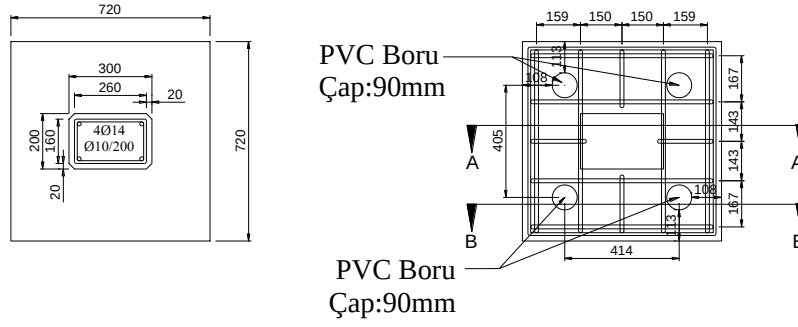
2. NUMUNELERİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENEYSEL PROGRAM

2.1 Deney Programının Amacı

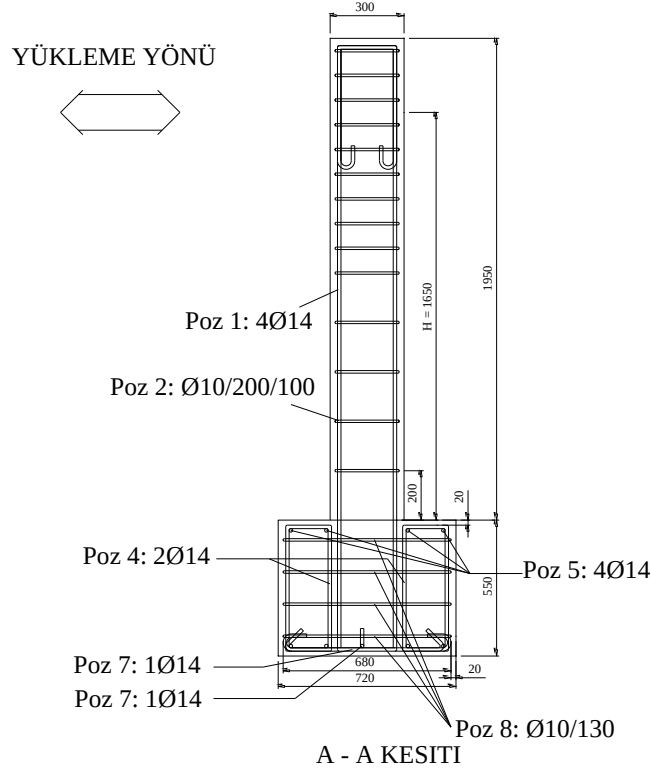
Uygulanan güçlendirme tekniğinin amacı, deformasyon kapasitesinden önemli ölçüde ödün vermeden tersinir tekrarlanan yatay yükleme ve sabit eksenel yük altında AFRP şerit kullanılarak, betonarme kolon eğilme kapasitesinin artırılmasıdır. Numuneler birçok mevcut düşük beton basınç dayanımına sahip betonarme kolonlar gibi enine donatı aralığı yetersiz olduğundan, LP güçlendirme sonrasında süneklik ve çekme dayanımı açısından eksikliklere neden olabilir. Bu nedenle, boyuna AFRP şerit ile eğilme dayanımını arttırmak için yapılan işlemin ardından, numuneler enine yönde CFRP kumaş ile dışarıdan sargılanmıştır. Bilindiği üzere, betonarme kolonun CFRP kumaş ile sargılanması betonarme kolonun deformasyon kapasitesine ve kesme dayanımına katkı sağlamaktadır. CFRP kumaş sargılamasının eğilme dayanımına etkisi, boyuna AFRP şeritlerin katkısı kadar yüksek değildir. Bununla birlikte, tez kapsamında her ikisinin de katkıları analitik hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

2.2 Numunelerin Tanımı ve Özellikleri

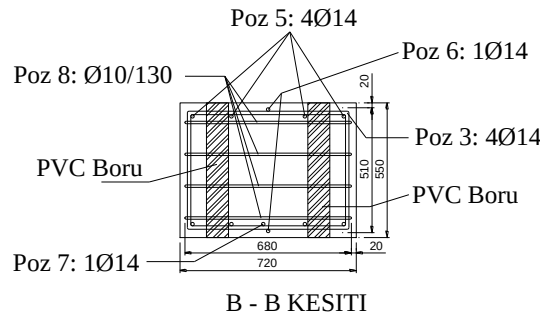
4 adet düşük beton basınç dayanımına sahip konsol betonarme kolon sabit eksenel yük altında ve tersinir tekrarlanan yatay yükler etkisinde test edilmiştir. Betonarme kolon numunelerine, yatay yük etkisinde uygulanan yer değiştirme adımları her çevrimden sonra arttırılmıştır. Eksenel yük betonarme kolonların eksenel yük kapasitesinin yaklaşık % 20'si mertebesinde uygulanmıştır. Tüm betonarme kolonlar özdeş (güçlendirme öncesi) ve eğilme etkisinde geçecek şekilde üretilmiştir. Kolonların plan görünüm, boykesit detayları sırasıyla Şekil 2.1a, Şekil 2.1b ve Şekil 2.1c'de sunulmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.1 : (a) Numune plan görünümü, (b) A-A kesiti, (c) B-B kesiti.

Şekil 2.1’den görüleceği üzere, numunelerde kolon boyuna donatıları (4Ø14) sürekli dir. Bir başka ifade ile donatılarda bindirmeli ek söz konusu değildir. Enine

donatılar, test bölgesinde 200 mm aralık ile düzenlenmiştir ($\phi 10/200$). Yüksekliği 1950 mm (yatay yükleme 1650 mm'den uygulanmıştır) ve boyutları 200 mm×300 mm olan betonarme konsol kolonlar, 700 mm×700 mm×500 mm boyutlarına sahip temel üzerine oturtulmuştur. Temelde S420 (BÇ III) nervürlü donatı ve düşük beton basınç dayanımına sahip beton kullanılmakla beraber, kolon kısmında donatı olarak S220 (BÇ I) ve beton olarak ortalama (f'_{ck}) 10,32 MPa basınç dayanımına sahip düşük dayanımlı beton kullanılmıştır. Ayrıca kolon sargılama bölgesinde sıklaştırılma yapılmamıştır. Kolon numune özellikleri aşağıda sıralanmaktadır;

- REF olarak ifade edilen bir referans numunesi, herhangi bir ilave donanım olmadan test edilmiştir. Diğer kolon numuneleri (LAM, LAM-LAM ve LAM-PB) boyuna yönde AFRP şerit uygulaması ve enine yönde CFRP kumaş sargılaması yapıldıktan sonra test edilmiştir,
- LAM ve LAM-PB numunelerinde AFRP şeritler kolon kısa yüzeyine yerleştirilmiş ve doğrudan temele ankre edilmiştir. Kolon ve temelin birleştiği yüzeyde AFRP şeritlerin potansiyel kusurlarından kaçınarak, daha iyi bir performans elde etmek için LAM-LAM numunesi için ilave AFRP şerit kullanılmıştır,
- LAM ve LAM-LAM numunelerinde boyuna AFRP şeritler yüzeye tamamen yapışmış olmasına karşılık, LAM-PB numunesinde kritik bölgede (kolon-temel birleşim bölgesi) şekildeğiştirme birikimini azaltmak ve AFRP şeridinin lokalize hasarını önlemek için ankraj bölgesinde AFRP şeridinin bir kısmı koli bandı ile sarılarak yapışma doğrultusunda kısmi süreksizlik sağlanmıştır.

Çizelge 2.1'de betonarme kolon numunelerine ait özelliklerin özet tablosu sunulmuştur.

Çizelge 2.1 : Deney kolon numunelerinin özellikleri.

Numune adı	Kolon beton basınç dayanımı (MPa)	Temel beton basınç dayanımı (MPa)	Temel donatıları	Kolon donatıları	Güçlendirme tipi
REF	10	10	S420	S220	Yok
LAM	10	10	S420	S220	Şerit+Kumaş
LAM-LAM	10	10	S420	S220	Şerit+Kumaş
LAM-PB	10	10	S420	S220	Şerit+Kumaş

2.3 Malzeme Özellikleri

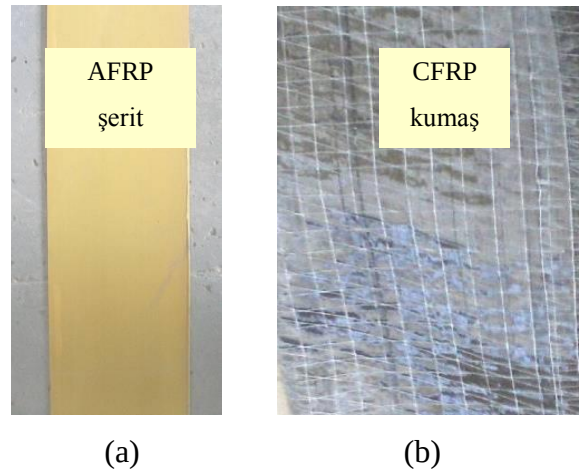
2.3.1 Lifli polimer ve harç

LP güçlendirme işlemi için 2 farklı tip LP malzeme;

- Boyuna yönde AFRP şerit,
- Enine yönde CFRP kumaş,

kullanılmıştır.

Kullanılan LP görünümü ve LP özellikleri sırasıyla Şekil 2.2 ve Çizelge 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2 : (a) Boyuna AFRP şerit, (b) enine CFRP kumaş görünümü.

Çizelge 2.2 : LP malzeme özellikleri.

LP	E_{frp} (MPa)	t_f (mm)	w_f (mm)	ε_{frpult}^*
Şerit (Aramid)	70000	1,400	42	0,023
Kumaş (Karbon)	230000	0,166	500	0,015

Çizelge 2.2’de, E_{frp} , t_f , w_f ve ε_{frpult}^* sırasıyla elastisite modülü, etkin kalınlığı, etkin genişliği ve üretici (BASF Şirketi) tarafından verilen nihai kopma şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedir.

Kullanılan harç ve yapıştırıcı madde basınç dayanımları (7 günlük 40 mm×40 mm×160 mm prizma test sonuçları) Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Kullanılan harç ve yapıştırıcı madde basınç dayanımları.

Yeni beton yüzeyi oluşturmak için kullanılan SRM (MPa)	Kolon yüzeyine AFRP şerit yapıştırılması için kullanılan epoksi yapıştırıcı madde (MPa)	Kolon yüzeyine enine yönde CFRP kumaş yapıştırılması için epoksi yapıştırıcı (MPa)	AFRP şerit ankrajı için kullanılan epoksi harç (MPa)
50	75	60	80

Malzemelerin özellikleri TS-EN 196-1 (2009) 'e göre belirlenmiş olup, CFRP kumaş mekanik özellikleri ASTM D3039 (1993)' e göre belirlenmiştir.

2.3.2 Beton

Beton basınç dayanımı beton dökümü sırasında alınmış olan 150 mm×300 mm standart silindir numunelerin eksenel basınç altındaki deney sonuçları esas alınarak belirlenmiştir. Gerilme değeri, uygulanan yükün numune kesit alanına bölünmesi sonucunda elde edilmiştir. 10 MPa değerinin elde edilebilmesi için beton karışımın hazırlanmasında kullanılan agrega miktarları Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4 : 1m³ betonda bulunan malzeme miktarları.

	Miktar (kg)	Tolerans (±% 3)	
		Maks.	Min.
Çimento miktarı (SDÇ 32,5)	185,0	190,6	179,5
Doğal Kum	408,0	420,2	395,8
0 no agrega	705,0	726,2	683,9
1 no agrega	870,0	896,1	843,9
Su	180,0	185,4	174,6
Toplam	2348,0	2178,7	2051,7

Beton dökümü sırasında alınan standart silindir numunelerden elde edilen veriler ile ortalama 28 günlük silindir basınç dayanımı (f'_{ck}) 10,32 MPa bulunmuştur.

2.3.3 Donatı

Tez çalışması amacına uygun olmasından dolayı betonarme kolon numunelerde gerek enine gerekse boyuna donatılarda düz yüzeyli S220, temellerde boyuna ve enine donatı için S420 kalitesinde nervürlü donatı kullanılmıştır. Numunelerde kullanılacak donatıların istenilen dayanıma sahip olup olmadığı ilgili standartlarca (TS 708, 1996 ve TS-EN 12390-3, 2003) belirlenen deneyler yapılmak suretiyle 01.12.2011 tarihinde test edilmiştir. Çekme deneylerinde 200 kN kapasiteli Alfred J. Amsler marka mekanik çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyinde 50 cm boyunda 8 adet, 10 mm ve 14 mm çapında düz yüzeyli donatılar kullanılmıştır. Donatıların her birinin çap değeri kumpas ile en az üç farklı noktasından 90 derecelik

açı ile her noktada iki kez ölçülmüştür. Şekildeğiştirmeölçerin kullanıldığı deneylerde yerdeğiştirmeler bilgisayarca kaydedilip bu şekildeğiştirmelere karşı gelen yük değerleri deney boyunca kaydedilmiştir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 : Donatı özellikleri.

Donatı	f_y (MPa)	ε_y	f_{maks} (MPa)	ε_{maks}	f_u (MPa)	ε_u	E_s (MPa)
$\phi 10$	270,78	0,0014	400,15	0,2170	270,78	0,3163	201273,45
$\phi 14$	296,41	0,0015	398,76	0,2092	250,51	0,3066	198560,58

Çizelge 2.5’de, f_y , ε_y , f_{maks} , ε_{maks} , f_u , ε_u ve E_s sırasıyla donatı akma dayanımı, donatı birim akma şekildeğiştirmesi, donatı maksimum akma dayanımı, donatı maksimum şekildeğiştirmesi, donatı kopma dayanımı, donatı kopma şekildeğiştirmesi, donatı elastisite modülü değerlerini ifade etmektedir. $\phi 10$ enine donatı akma dayanımı f_{ywd} , $\phi 14$ boyuna donatı akma dayanımı f_{yk} olarak ifade edilmektedir.

Kopma uzaması ve uniform bölge uzamasının belirlenmesinde kolaylık sağlaması açısından deneyden önce her donatı üzerine 1’er cm ara ile çentikler atılmıştır. Bu çentikler deney sonrasında uniform bölge uzaması hesaplanırken, donatı çapının 10 katı uzunluğundaki mesafe, donatının ortasından ölçülmüş ve bu bölge dışında kalan kısımdaki şekildeğiştirmelerin ortalaması alınmıştır. Kopma uzaması ise, aşırı uzamanın meydana geldiği kopma bölgesinde hesaplanan şekildeğiştirme değeri olarak alınmıştır. Donatıların elastise modülü hesaplanırken, akma dayanımının % 20’si ile % 60’ı arasında kalan noktalardan geçirilen doğrusal çizginin eğimi, elastisite modülü olarak alınmıştır.

2.4 Numunelerin Tasarımı

Deneyssel çalışmada aşağıda teknik özellikleri belirtilen betonarme kolon numuneleri, 700 mm×700 mm×500 mm ebatlarındaki temel üzerine konsol olarak tasarlanmıştır. Ülkemizdeki mevcut yapıların durumu gözönünde bulundurulduğunda betonarme kolon numunelerinde beton olarak düşük basınç dayanımına sahip, donatı olarak nervürsüz ve sargılama açısından etriye sıklaştırılmasının yapılmamış olduğu bir numune tasarlanmıştır. Şekil 2.3’de gösterilen kolon kesiti gerilme-şekildeğiştirme dağılımına göre numune tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Çekme donatısı alanı (A_S) Denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır. Denklem 2.1’de r_b , boyuna donatı çapını (14 mm) ifade etmektedir.

$$A_S = 2 \cdot \pi \cdot r_b^2 / 4 = 307,88 \text{ mm}^2 \quad (2.1)$$

Basınç donatısı alanı (A'_S) Denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

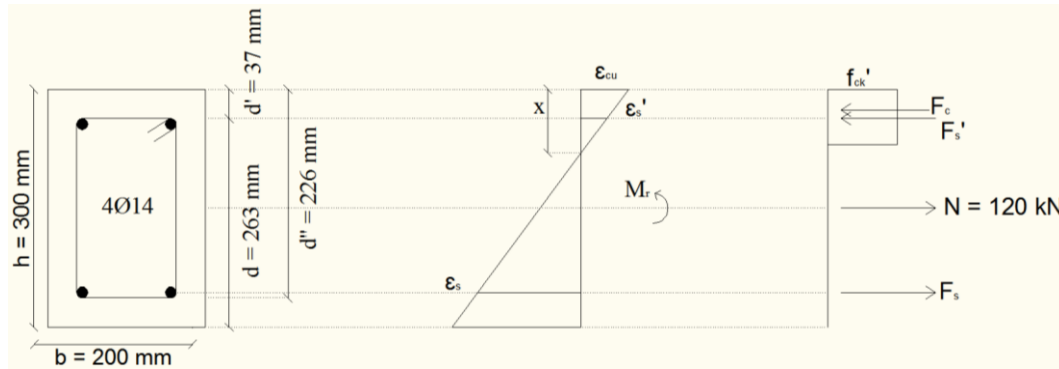
$$A'_S = 2 \cdot \pi \cdot r_b^2 / 4 = 307,88 \text{ mm}^2 \quad (2.2)$$

Donatıda akma birim uzama ve kısalması (ε_y) Denklem 2.3 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_y = f_{yk} / E_s = 0,0015 \quad (2.3)$$

Kesitte dikdörtgene dönüştürülmüş basınç gerilmesi bloğunun derinliği (a) Denklem 2.4 ile hesaplanmaktadır. Denklem 2.4’te k_1 , betondaki doğrusal olmayan gerilme dağılımına eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun tanımlanmasında kullanılan katsayı (0,85), x , tarafsız eksen yüksekliğini ifade etmektedir.

$$a = k_1 \cdot x \quad (2.4)$$



Şekil 2.3 : Kolon gerilme – şekildeğiştirme dağılımı.

Moment kapasitesini (M_r) hesaplayabilmek için “ x ” değerinin hesaplanması gerekmektedir. Tarafsız eksen yüksekliği “ x ” hesabı için çekme kırılması kontrolü Denklem 2.5-2.7 ile hesaplanmaktadır.

Denge kırılmasında tarafsız eksen yüksekliği (x_b) Denklem 2.5 ile hesaplanmaktadır. Denklem 2.5’te ε_{cu} , betonda en büyük birim kısalma (0,003), d , kolon enkesiti faydalı yüksekliğini ifade etmektedir.

$$x_b = (\varepsilon_{cu} \cdot E_s) / (\varepsilon_{cu} \cdot E_s + f_{yk}) \cdot d = 176 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Denge kırılmasında eşdeğer dikdörtgen yüksekliği Denklem 2.6 ile hesaplanmaktadır.

$$k_1 \cdot x_b = 150 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Eksenel yük kapasitesi (N) Denklem 2.7 ile hesaplanmaktadır. Denklem 2.7’de u , tasarım eksenel kuvvet oranı (0,2), b , kolon enkesit genişliğini, h kolon enkesit yüksekliğini ifade etmektedir.

$$N = u \cdot f'_{ck} \cdot b \cdot h = 120 \text{ kN} \quad (2.7)$$

Dengeli kırılmada eksenel yük (N_b) Denklem 2.8 ile hesaplanmaktadır.

$$N_b = 0,85 \cdot f'_{ck} \cdot k_1 \cdot x_b = 262436 \text{ N} \quad (2.8)$$

Çekme kırılması kontrolü;

$$N_b > N \rightarrow \text{çekme kırılması}$$

$$N_b < N \rightarrow \text{basınç kırılması}$$

$$N_b = 262436 \text{ N} < N = 120000 \text{ N olduğundan çekme kırılması olacaktır.}$$

Basınç donatısı akma kontrolü;

Basınç donatısının akması için sınır durum (φ_c) Denklem 2.9 ile hesaplanmaktadır.

Denklem 2.9’da d' , beton örtüsünü ifade etmektedir.

$$\varphi_c = 0,85 \cdot k_1 \cdot (d'/h) \cdot [\varepsilon_{cu} \cdot E_s / (\varepsilon_{cu} \cdot E_s - f_{yk})] = 0,18 \quad (2.9)$$

Basınç donatısının akma kontrolü Denklem 2.10 ile hesaplanmaktadır.

$$N / (b \cdot h \cdot f'_{ck}) = 0,19 \quad (2.10)$$

$$\varphi_c = 0,18 < 0,19 olduğundan basınç donatısı akmıştır.$$

Çekme kırılması için M_r ’nin hesabı Denklem 2.11-2.14 ile hesaplanmaktadır.

$$N = 0,85 \cdot f'_{ck} \cdot k_1 \cdot x \cdot b \quad (2.11)$$

$$a = k_1 \cdot x = N / (0,85 \cdot f'_{ck} \cdot b) = 68,42 \text{ mm} \quad (2.12)$$

Tarafsız eksen yüksekliği (x) Denklem 2.13 ile hesaplanmaktadır.

$$x = k_1 / a = 80,49 \text{ mm} \quad (2.13)$$

Alt donatıya göre moment alınıp moment kapasite hesabı yapılarak Denklem 2.14’te M_r hesaplanmaktadır. Denklem 2.14’te d'' , donatılar arası eksenden eksene mesafeyi ifade etmektedir.

$$M_r = N \times \left[\frac{h}{2} - k_1 \cdot \frac{x}{2} \right] + \frac{A_s}{2} \cdot f_{yk} \cdot d'' = 34,52 \text{ kNm} \quad (2.14)$$

Moment kapasitesine karşı gelen tasarım kesme kuvvetinin (V_d) hesaplanması aşamasında betonarme kolon boyunu temsilen yatay yükün etkitildiği nokta merkezinin temel yüzünden yüksekliği ($H = 1,65 \text{ mt}$) esas alınmıştır. V_d , Denklem 2.15 ile hesaplanmaktadır.

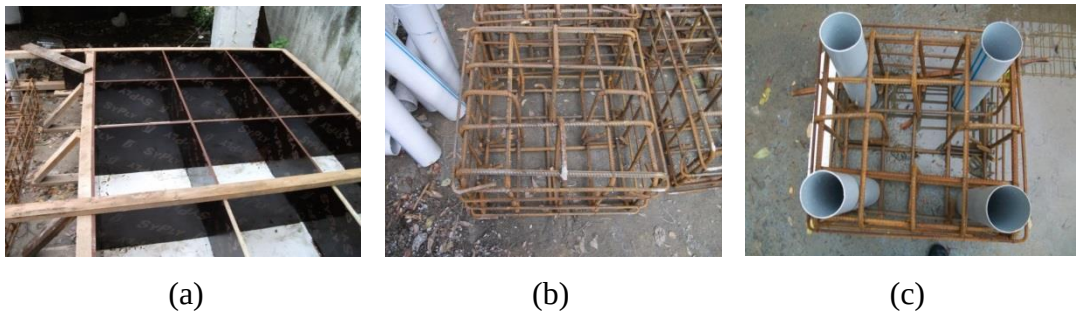
$$V_d = M_r / H = 20,92 \text{ kN} \quad (2.15)$$

2.5 Numunelerin Üretimi

Numuneler 08.10.2011 tarihinde İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında üretilmeye başlanmıştır. 02.11.2011 tarihine kadar hem kolon imalatı hem de şekildeğiştirmeölçer yapıştırma işlemi tamamlanmış ve aynı gün içerisinde temel ve kolon betonu dökülerek üretim sona ermiştir.

2.5.1 Temeller

Numune temelleri için öncelikle ahşap kalıplar (Şekil 2.4a) ve donatı iskeletleri (Şekil 2.4b) hazırlanmıştır. Temeli, deneyin yapıldığı adaptör temele monte etmek ve deneyin daha elverişli bir ortamda yapılmasını sağlayabilmek amacıyla temel betonu dökülmeden önce temel içerisine köşelere gelecek şekilde 100 mm çapında borular konmuştur (Şekil 2.4c).



Şekil 2.4 : (a) Ahşap kalıp imalatı, (b) Temel donatısı, (c) Plastik boru yerleşimi.

Numuneleri taşımak için temel yan yüzlerine kancalar yapılmıştır (Şekil 2.4c). Kancaların alt uzantıları tüm donatıların altında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekildeğiştirmeölçerler, her bir numunenin kolon donatıları üzerinde bulunmak üzere temel kotundan itibaren -10 ve -20 cm kotlarında mevcuttur (Şekil 2.5).

Numunelerin temel betonu, Betonsa A.Ş. tarafından imal edilip 02.11.2011 tarihinde dökülmüştür. Beton yerleşiminin iyi olmasını sağlamak amacıyla vibrasyon uygulanmıştır. Beton dökümü esnasında 28 günlük beton basınç dayanımı testini yapabilmek için dört adet standart silindir numune alınmıştır. Temel beton dökümünden sonra yedi gün süre ile kür uygulanmıştır. Bunun için numuneler musluk suyu ile sabah ve akşam sulanmıştır.



Şekil 2.5 : Ahşap kalıplar ve temel donatısı.

2.5.2 Kolonlar

Kolon kalıbı olarak 20 mm kalınlığında plywood malzemesi kullanılmıştır (Şekil 2.6a), beton dökümü öncesinde bu kalıplar yağlanmıştır. Numunelerin kolon ve temel kısmı bir bütün halinde 02.11.2011 tarihinde tek seferde dökülmüştür. Beton yerleşiminin homojenliğini sağlamak amacıyla vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Daha sonra yapılacak olan basınç dayanım deneylerinde kullanılmak üzere 20 adet silindir numune alınmıştır (Şekil 2.6b). Beton dökümü sırasında yapılan altı adet çökme ve yayılma deneyine göre beton çökme değeri 12,50 cm olarak bulunmuştur (Şekil 2.6c). Yedi gün süresince kür işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2.6 : (a) Kolon kalıp hazırlanışı , (b) Kolon kalıp hazırlanışı, (c) Çökme deneyi.

2.5.3 Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması

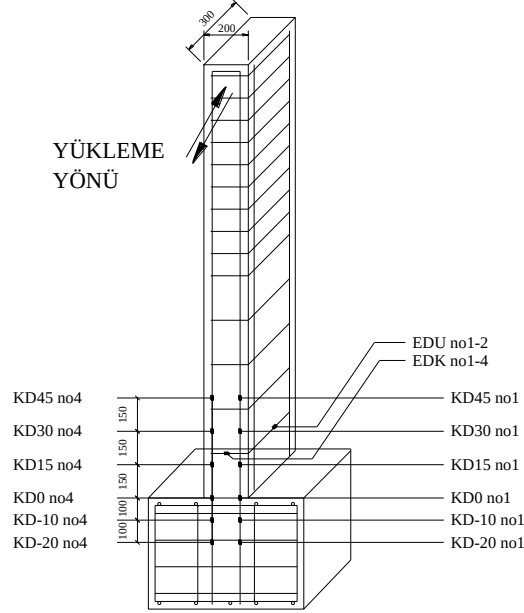
Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırma işlemine kot farkına sebebiyet vermemek için temel ve kolon donatı iskeletinin yapımından sonra başlanmıştır. Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılmasından önce donatı yüzeyi önce kalın sonra ince zımpara ile zımparalanmış ve donatı üzerinde oluşan toz, aseton ile temizlenmiştir. Temizleme işleminin ardından şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılma işleminde, cyanoacrylate esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır. Mekanik koruma sağlamak amacıyla iki kat kimyasal yalıtım malzemesi (N-1, su geçirmez malzeme), bir kat bitüm esaslı bant (VM Tape, nem ve diğer dış etkilere karşı yalıtım sağlayan malzeme) ve üzerine 2-3 kat izole bant sarılarak su ve neme karşı tedbir alınmıştır. Şekildeğiştirmeölçer kablolarının ucuna numaralandırma yapılmış ve gerekli notlar alınmıştır(Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Kolon donatıları üzerine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerler.

Tüm numunelerde, 4 adet ilk kolon etriyesinin üzerine ve 6 şar adet yatay yükün uygulandığı taraftaki kolon donatısının yüzeylerine olmak üzere toplam 16 adet şekildeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.8). KD; kolon donatısı üzerine

yapıştırılan, ED ise; enine doğrultuda bulunan donatı üzerine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçeri, U; etriyenin uzun kenarına, K ise; etriyenin kısa kenarına yapıştırıldığını ifade etmektedir.



Şekil 2.8 : Kolon donatısı şekildeğiştirmeölçer yerleşimi.

Şekildeğiştirmeölçerlerin kolon boyuna donatısında ve etriyesinde yapıştırılma mesafeleri Çizelge 2.6’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 : Kolon boyuna donatısı ve etriyesinde şekildeğiştirmeölçer yapıştırılma mesafeleri.

Kolon boyuna donatısı ve etriyesi üzerinde şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı		
Şekildeğiştirmeölçer adı (YFLA-5)	Yapıştırılma mesafesi(mm)	
KD45 no1	450	
KD30 no1	300	
KD15 no1	150	
KD0 no1	0	
KD-10 no1	-100	
KD-20 no1	-200	
KD45 no4	450	
KD30 no4	300	
KD15 no4	150	
KD0 no4	0	
KD-10 no4	-100	
KD-20 no4	-200	
EDU1-2	200	
EDU4-3	200	
EDK1-4	200	
EDK2-3	200	

3. NUMUNELERİN TEORİK HESABI VE GÜÇLENDİRİLMESİ

Yapılan tasarımda, eğilme kapasitesinin arttırılması kadar farklı göçme modlarının (kesme göçmesi, ankraj göçmesi, boyuna donatı burkulması veya sıyrılması, LP malzemenin ayrılması veya sıyrılması) engellenmesine de önem verilmiştir. Böylelikle, boyuna doğrultuda kullanılan AFRP şeritlerin betonarme kolonun eğilme kapasitesine olan katkısının daha açık bir şekilde incelenmesi öngörülmüştür. Numunelerin kesit boyunca gerilme dağılımları ve yatay yük kapasitelerinin gözlenmesi için, LP ile güçlendirilmiş kirişler için ACI 440-2R-08 (2008) tarafından önerilen geleneksel betonarme kesit hesabı yapılmıştır.

AFRP şeritlerin SRM ve enine CFRP kumaş sargılaması sebebi ile tersinir tekrarlanan yatay yüklemeler sırasında burkulma ve yüzeyden kopması önlenmiştir. Bu nedenle, boyuna AFRP şeritlerin şekildeğiştirmeleri doğrusal elastik malzeme olarak dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, basınç durumunda AFRP şerit katkıları gözönüne alınmamıştır. Çevre azaltma faktörü (C_E), deney laboratuvar koşullarında gerçekleştiğinden dolayı 1 olarak alınmıştır. Fakat, ACI 440-2R-08 (2008)'de dış etkenlere maruz kalma durumunda AFRP uygulamalarında bu katsayının 0,85 alınması önerilmektedir. LP için ek dayanım azaltma faktörü (ϕ), dış LP güçlendirmeden betonarme kolonun nominal eğilme dayanımı hesaplandığı düşünüldüğünden dolayı 1 olarak alınmıştır. Ancak, ACI 440-2R-08 (2008)'de bu değer 0,85 alınması önerilmektedir. CFRP kumaş ile sargılanmış betonun şekildeğiştirme-dayanım ilişkisi oluşturulurken İlki ve diğ. (2008) ve Mander (1988) modelleri kullanılmıştır. CFRP kumaş ile sargılanmış betonun şekildeğiştirme-dayanım ilişkisi sargılanmış kesitin 2 farklı parçası (10 MPa çekirdek beton ve 50 MPa SRM beton tabakası) için incelenmiştir. Daha sonra, çekirdek betonu ve SRM uygulanmış beton tabakanın en dış lif şekildeğiştirmeleri geleneksel betonarme kolon teorisi ile elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Denge denklemleri ve kesit boyunca hesaplanan gerilmeler kullanılarak, eğilme kapasiteleri hesaplanmıştır.

3.1 Sargılı ve Sargısız Tamir Harcı ve Çekirdek Beton Basınç Dayanımı Hesabı

İlki ve diğ. (2008) ve Mander (1988) çalışmalarında önerildiği şekilde sargılı tamir harcı beton basınç dayanımı hesaplanmıştır.

LP şerit enkesit alanı (A_{frp}) Denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.1’de kk , CFRP kumaş kalınlığını (0,166 mm), kks , CFRP kumaş sargı adedini (2 adet) ifade etmektedir.

$$A_{frp} = 2 \cdot (b + h) \cdot kk \cdot kks = 332 \text{ mm}^2 \quad (3.1)$$

Sargılanmış bölge beton kesit alanı (A_{core}) Denklem 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$A_{core} = b \cdot h = 60000 \text{ mm}^2 \quad (3.2)$$

LP kumaşın kopma şekildeğiştirmesi ($\varepsilon_{h,rup}$) Denklem 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{h,rup} = 0,85 \cdot \varepsilon_{frpult}^* = 0,013 \quad (3.3)$$

Sargısız çekirdek beton basınç dayanımı (f'_{co}) Denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır.

$$f'_{co} = 0,85 \cdot f'_{ck} = 8,77 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

Etkinlik faktörü (k_a) (ACI 440) Denklem 3.5 ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.5’te r_c , köşe çaplarını (33 mm) ifade etmektedir.

$$k_a = 1 - \frac{(b - 2 \cdot r_c)^2 + (h - 2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot b \cdot h} = 0,596 \quad (3.5)$$

LP donatı oranı (ρ_f) Denklem 3.6 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_f = A_{frp} / A_{core} = 0,006 \quad (3.6)$$

Efektif sargılama dayanımı (f'_l) Denklem 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$f'_l = k_a \cdot \rho_f \cdot \varepsilon_{h,rup} \cdot E_{frp} / 2 = 4,84 \text{ MPa} \quad (3.7)$$

Sargılı beton dayanımı (f'_{cc}) (CFRP katkısı ile) Denklem 3.8 ile hesaplanmaktadır.

$$\left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} \right]_{CFRP} = [1 + 2,54 \cdot (f'_l / f'_{co})] \quad (3.8)$$

$$f'_{cc} = 21,06 \text{ MPa}$$

Sargılı betonun şekildeğiştirme değeri (ε_{cc}) (CFRP katkısı ile) Denklem 3.9 ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.9’da ε_{co} , çekirdek beton sargı etkisinin başladığı birim kısalmasını (0,002), LTF , çevrim sayısını (2 adet) ifade etmektedir.

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} \right]_{CFRP} = [1 + \frac{h}{b} \cdot (LTF) \cdot 19,27 \cdot (f'_l / f'_{co})^{0,53}] \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,08633$$

Sargılı beton dayanımı (f'_{cc}) (ITR-Etriye katkısı ile) Denklem 3.10 ile hesaplanmaktadır.

$$\left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} \right]_{ITR} = [1 + 4,54 \cdot (f'_l / f'_{co})] \quad (3.10)$$

$$f'_{cc} = 9,47 \text{ MPa}$$

Sargılı betonun şekildeğiştirme değeri (ε_{cc}) (ITR katkısı ile) Denklem 3.11 ile hesaplanmaktadır.

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} \right]_{ITR} = [1 + 5 \cdot (f'_{cc} / f'_{co} - 1)] \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,0028$$

İlki ve diğ. (2008)'e göre artış miktarını hesaplamak için Denklem 3.12-3.13 kullanılmaktadır.

$$\left[\frac{f'_{cc} - f'_{co}}{f'_{co}} \right]_{TOTAL} = \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right]_{CFRP} + \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right]_{ITR} \quad (3.12)$$

$$(f'_{cc} - f'_{co}) = 12,98 \text{ MPa}$$

$$f'_{cc} = 21,76 \text{ MPa}$$

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{co}} \right]_{TOTAL} = \left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} - 1 \right]_{CFRP} + \left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} - 1 \right]_{ITR} \quad (3.13)$$

$$(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}) = 0,0851$$

$$\varepsilon_{cc} = 0,0871$$

Silindir numune için sargısız tamir harcı basınç dayanımı ($f'_{co,ss}$) Denklem 3.14 ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.14'te $f'_{co,p}$, prizma numuneler (4 mm×4 mm×16 mm) için sargısız tamir harcı basınç dayanımını (50,00 MPa) ifade etmektedir. Silindir numune için sargısız tamir harcı basınç dayanımını ($f'_{co,ss}$) elde etmek için, $f'_{co,p}$ öncelikle 0,85 ile çarpılarak küp numunenin basınç dayanımına çevrilir. Ardından, küp numunenin basınç dayanımı da 35/45 ile çarpılarak $f'_{co,ss}$ elde edilir.

$$f'_{co,ss} = 0,85 \cdot f'_{co,p} \cdot 0,85 \cdot 35/45 = 28,10 \text{ MPa} \quad (3.14)$$

Prizma olduğu kabul ederek dayanım ($f'_{cc,p}$) ve şekildeğiştirme ($\varepsilon_{cc,p}$) hesabı Denklem 3.15-3.16 ile hesaplanmaktadır.

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc,p}}{\varepsilon_{co}} \right]_{CFRP} = \left[1 + \frac{h}{b} \cdot (LTF) \cdot 19,27 \cdot (f'_l / f'_{co,p})^{0,53} \right] \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{cc,p} = 0,03552$$

$$\left[\frac{f'_{cc,p}}{f'_{co,p}} \right]_{CFRP} = [1 + 2,54 \cdot (f'_l / f'_{co,p})] \quad (3.16)$$

$$f'_{cc,p} = 62,28 \text{ MPa}$$

$$f'_{cc,ss} = 0,85 \cdot f'_{cc,p} \cdot 0,85 \cdot 35/45 = 35,00 \text{ MPa}$$

3.1.1 Sargılı çekirdek beton basınç dayanımı

Bölüm 3.1'de f'_{co} , f'_{cc} , ε_{co} , ε_{cc} değerleri verilmiştir. Sargılı çekirdek beton basınç dayanım (f_{cc}) değeri, ε'_{cc} (çekirdek beton en dış lifindeki en büyük birim kısalma) değeri gözönünde bulundurularak, Denklem 3.17-3.20 ile hesaplanmış ve her bir numune için Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Denklem 3.17-3.18 ile ε'_{cc} hesaplanmaktadır. Denklem 3.17'de, $\varepsilon_{frpulteff}$, LP malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesini, ϑ , LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörünü (0,432), ε_{frpult} , LP malzeme tasarım kopma şekildeğiştirmesini ifade etmektedir.

$$\varepsilon_{frpult} = \varepsilon_{frpult}^* \cdot C_E \cdot \vartheta = 0,0099 \quad (3.17)$$

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot \frac{(x - d')}{(d''' - x)} \quad (3.18)$$

Denklem 3.19'dan ε'_{cc} değeri, LAM ve LAM-PB numunesi için 0,0008, LAM-LAM numunesi için 0,0026 olarak bulunmaktadır.

$$f_{cc} = f'_{co} + \frac{(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}) \cdot (f'_{cc} - f'_{co})}{(\varepsilon'_{cc} - \varepsilon_{co})} \quad (3.19)$$

Denklem 3.19'da hesaplanan f_{cc} değerinin f'_{co} değerinden küçük olması durumunda Denklem 3.20 kullanılır.

$$f_{cc,t} < f'_{co} \text{ ise } f_{cc} = f'_{co} \quad (3.20)$$

Çizelge 3.1 : Sargılı çekirdek beton basınç dayanımlar tablosu.

Numune Türü	Sargısız Çekirdek Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Sargılı Çekirdek Beton Basınç Dayanımı (MPa)
	f'_{co}	f_{cc}
LAM	8,77	8,77
LAM-LAM	8,77	8,86
LAM-PB	8,77	8,77

3.1.2 Sargılı tamir harcı basınç dayanımı

Bölüm 3.1’de $f'_{co,ss}$, $f'_{cc,ss}$, ε_{co} , $\varepsilon_{cc,p}$ değerleri verilmiştir. Sargılı tamir harcı basınç dayanım (f_{ccm}) değeri, ε'_{ccm} (en dış lıfteki en büyük birim kısalma) değeri gözönünde bulundurularak, Denklem 3.21-3.25 ile hesaplanmış ve her bir numune için Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Denklem 3.21-3.23 ile ε'_{ccm} değeri hesaplanmaktadır. Denklem 3.22’de, ε_{co} , çekirdek beton sargı etkisinin başladığı birim kısalmayı (0,002), y , ε_{co} ın tarafsız eksene olan uzaklığını, d''' , LP faydalı yüksekliğini ifade etmektedir. Denklem 3.22’de hesaplanan ε'_{ccm} değerinin ε'_{cc} değerinden büyük olması durumunda Denklem 3.23 kullanılır.

$$y = \varepsilon_{co} \cdot (d''' - x) / \varepsilon_{frpulteff} \quad (3.21)$$

Denklem 3.21’den y değeri, LAM ve LAM-PB numunesi için 46,630, LAM-LAM numunesi için 40,053 olarak bulunmaktadır.

$$\varepsilon'_{ccm} = \varepsilon_{co} \cdot x / y \quad (3.22)$$

$$\varepsilon'_{ccm} > \varepsilon'_{cc} \text{ ise } \varepsilon'_{ccm} = \varepsilon'_{cc} \quad (3.23)$$

Denklem 3.22’den ε'_{ccm} değeri, LAM ve LAM-PB numunesi için 0,0024, LAM-LAM numunesi için 0,0044 olarak bulunmaktadır.

$$f_{ccm} = f'_{co,ss} + \frac{(\varepsilon'_{ccm} - \varepsilon_{co}) \cdot (f'_{cc,ss} - f'_{co,ss})}{(\varepsilon_{cc,p} - \varepsilon_{co})} \quad (3.24)$$

Denklem 3.24’de hesaplanan f_{ccm} değerinin $f'_{cc,ss}$ değerinden büyük olması durumunda Denklem 3.25 kullanılır.

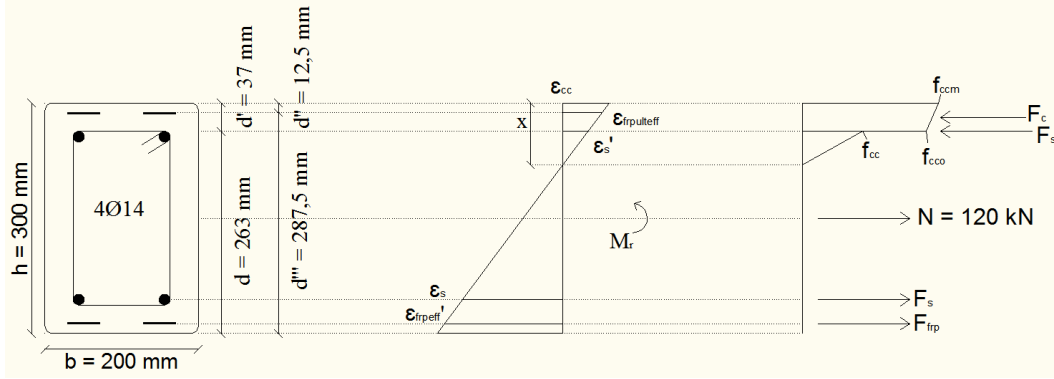
$$f_{ccm} \geq f'_{cc,ss} \text{ ise } f_{ccm} = f'_{cc,ss} \quad (3.25)$$

Çizelge 3.2 : Sargılı tamir harcı basınç dayanımları tablosu.

Numune Türü	Sargısız Tamir Harcı Basınç Dayanımı (MPa)	Sargılı Tamir Harcı Basınç Dayanımı (MPa)
	$f'_{co,ss}$	f_{ccm}
LAM	28,10	28,18
LAM-LAM	28,10	28,60
LAM-PB	28,10	28,18

3.2 LAM ve LAM-PB Numuneleri İçin Teorik Hesap

AFRP şerit ile güçlendirilen kolonda moment kapasitesi hesabı Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : LAM ve LAM-PB numunelerinde şekildeğiştirme-gerilme dağılışı.

Çekme bölgesindeki lifli polimer şerit enkesit alanı (A_{frp}) Denklem 3.26 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.26’da n_f , şerit LP adedini (2 adet) ifade etmektedir.

$$A_{frp} = n_f \cdot t_f \cdot w_f = 117,6 \text{ mm}^2 \quad (3.26)$$

Denklem 3.27 ile ε_{co} ’ın tarafsız eksene olan uzaklığı (y) hesaplanmıştır. Denklem 3.27’de d''' , LP faydalı yüksekliği, $\varepsilon_{frpulteff}$, LP malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesini ifade etmektedir.

$$y = \varepsilon_{co} \cdot (d''' - x) / \varepsilon_{frpulteff} = 26,713 \text{ mm} \quad (3.27)$$

LP malzeme tasarım kopma şekildeğiştirmesi (ε_{frpult}) Denklem 3.28 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.28’de, ϑ , LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörünü (0,70) ifade etmektedir. ACI 440-2R-08 (2008)’e göre monoton eğilme yüklemesi (ki bu çalışmada monoton yükleme durumu söz konusu değildir) altındaki NSM yöntemi ile LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörünün (ϑ) 0,70 olarak kullanılması önerilmektedir.

$$\varepsilon_{frpult} = \varepsilon_{frpult}^* \cdot C_E \cdot \vartheta = 0,0161 \quad (3.28)$$

LP malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesi ($\varepsilon_{frpulteff}$) Denklem 3.29 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.29’da, κ_m , deney öncesi LP aderans katsayısını (1) ifade etmektedir.

$$\varepsilon_{frpulteff} = \kappa_m \cdot \varepsilon_{frpult} = 0,0161 \quad (3.29)$$

En dış lifteki en büyük birim kısalma (ε'_{ccm}) Denklem 3.30 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.30'da, ε_{co} , çekirdek beton sargı etkisinin başladığı birim kısalmayı (0,002) ifade etmektedir.

$$\varepsilon'_{ccm} = \varepsilon_{co} \cdot x/y = 0,0054 \quad (3.30)$$

Çekirdek beton en dış lifindeki en büyük birim kısalma (ε'_{cc}) Denklem 3.31 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d')/(d''' - x) = 0,0027 \quad (3.31)$$

Çekme donatısındaki birim uzama (ε'_s) Denklem 3.32 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (h - x - d')/(d''' - x) = 0,0143 \quad (3.32)$$

Basınç donatısındaki birim uzama (ε_s) Denklem 3.33 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d')/(d''' - x) = 0,0027 \quad (3.33)$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif şekildegıştirmesi (ε'_{frpeff}) Denklem 3.34 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{frpeff} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d'')/(d''' - x) = 0,0045 \quad (3.34)$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif şekildegıştirmesi (ε_{frpeff}) Denklem 3.35 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frpult} = 0,161 \quad (3.35)$$

Şekil 3.1'de bulunan şekilde iç kuvvet yatay denge denklemi Denklem 3.36 ile hesaplanmıştır.

$$F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp} \quad (3.36)$$

İç kuvvetler Denklem 3.37-3.45 ile hesaplanmıştır.

$$F_{c1} = \frac{f'_{co} \cdot 0,85 \cdot b \cdot y}{2} \quad (3.37)$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' \leq 0,85 \cdot y \text{ ise } F_{c2} = 0$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' > 0,85 \cdot y \text{ ise}$$

$$F_{c2} = f'_{co} \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b/1000 \quad (3.38)$$

$$F_{c3} = \frac{(f_{cc} - f'_{co}) \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b}{2} \quad (3.39)$$

$$F_{c4} = f_{cmo} \cdot d' \cdot b / 1000 \quad (3.40)$$

$$F_{c5} = (f_{ccm} - f_{cmo}) \cdot \frac{d'}{2} \cdot b / 1000 \quad (3.41)$$

$$\varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E_s / 1000 \quad (3.42)$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot f_y / 1000$$

$$E_s < E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot \varepsilon'_s \cdot \varepsilon'_s / 1000 \quad (3.43)$$

$$E_s > E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot f_y / 1000$$

$$F_{frp} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot A_{frp} \cdot E_{frp} / 1000 \quad (3.44)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \cdot A_s \quad (3.45)$$

İç kuvvet yatay denge denklemlerine ($F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp}$) göre Denklem 3.37-3.45'de bulunan değerler yerine konulup çözüldüğünde, tarafsız eksen yüksekliği $x = 72$ mm olarak bulunmuştur.

Eksenel kuvvetin bulunduğu noktaya göre moment alındığında, güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi bulunur (Denklem 3.46).

$$\begin{aligned} M_r = & F_{c1} \cdot \left[\frac{h}{2} - k_1 \cdot x + \left(\frac{2}{3} \cdot 0,85 \cdot y \right) \right] + F_{c2} \\ & \cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{2} \right) \right] + F_{c3} \\ & \cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{3} \right) \right] + F_{c4} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{2} \right) \\ & + F_{c5} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{3} \right) + F'_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) + F_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\ & + F_{frp_{eff}} \cdot \left(\frac{h}{2} - d'' \right) \\ M_r = & 70743 \text{ Nm} = 70,74 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Deney sırasında AFRP şerit üzerinde bulunan şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen en fazla AFRP şerit şekildeğiştirme değeri, AFRP şerit kopmadan önce, 0,01 olduğu görülmüştür. Yapılan ölçüm, üreticinin beyan ettiği nihai şekildeğiştirme değerinin yaklaşık % 43'üne karşılık gelmektedir.

Bu sebeple, Denklem 3.26-3.46 arasındaki adımlar ϑ değerinin 0,432 olduğu durum için tekrar edilmiştir.

Denklem 3.47 ile ε_{co} 'ın tarafsız eksene olan uzaklığı (y) hesaplanmıştır.

$$y = \varepsilon_{co} \cdot (d''' - x) / \varepsilon_{frpulteff} = 46,630 \text{ mm} \quad (3.47)$$

LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörü (ϑ) Denklem 3.48 ile hesaplanmıştır.

$$\vartheta = \varepsilon_{frpult} / \varepsilon_{frpult}^* = 0,432 \quad (3.48)$$

Lifli polimer malzeme tasarım kopma şekildeğiştirmesi (ε_{frpult}) Denklem 3.49 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpult} = \varepsilon_{frpult}^* \cdot C_E \cdot \vartheta = 0,0099 \quad (3.49)$$

Lifli polimer malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesi ($\varepsilon_{frpulteff}$) Denklem 3.50 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpulteff} = \kappa_m \cdot \varepsilon_{frpult} = 0,0099 \quad (3.50)$$

En dış lifteki en büyük birim kısalma (ε'_{ccm}) Denklem 3.51 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{ccm} = \varepsilon_{co} \cdot x / y = 0,0024 \quad (3.51)$$

Çekirdek beton en dış lifindeki en büyük birim kısalma (ε'_{cc}) Denklem 3.52 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d') / (d''' - x) = 0,0008 \quad (3.52)$$

Çekme donatısındaki birim uzama (ε'_s) Denklem 3.53 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (h - x - d') / (d''' - x) = 0,0089 \quad (3.53)$$

Basınç donatısındaki birim uzama (ε_s) Denklem 3.54 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d') / (d''' - x) = 0,0008 \quad (3.54)$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi (ε'_{frpeff}) Denklem 3.55 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{frpeff} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d'') / (d''' - x) = 0,0019 \quad (3.55)$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi (ε_{frpeff}) Denklem 3.56 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frpult} = 0,0099 \quad (3.56)$$

Şekil 3.1’de bulunan şekilde iç kuvvet yatay denge denklemi Denklem 3.57 ile hesaplanmıştır.

$$F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp} \quad (3.57)$$

İç kuvvetler Denklem 3.58-3.66 ile hesaplanmıştır.

$$F_{c1} = \frac{f'_{co} \cdot 0,85 \cdot b \cdot y}{2} \quad (3.58)$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' \leq 0,85 \cdot y \text{ ise } F_{c2} = 0$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' > 0,85 \cdot y \text{ ise}$$

$$F_{c2} = f'_{co} \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b / 1000 \quad (3.59)$$

$$F_{c3} = \frac{(f_{cc} - f'_{co}) \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b}{2} \quad (3.60)$$

$$F_{c4} = f_{cmo} \cdot d' \cdot b / 1000 \quad (3.61)$$

$$F_{c5} = (f_{ccm} - f_{cmo}) \cdot \frac{d'}{2} \cdot b / 1000 \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E_s / 1000 \quad (3.63)$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot f_y / 1000$$

$$E_s < E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E'_s / 1000 \quad (3.64)$$

$$E_s > E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot f_y / 1000$$

$$F_{frp} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot A_{frp} \cdot E_{frp} / 1000 \quad (3.65)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \cdot A_s \quad (3.66)$$

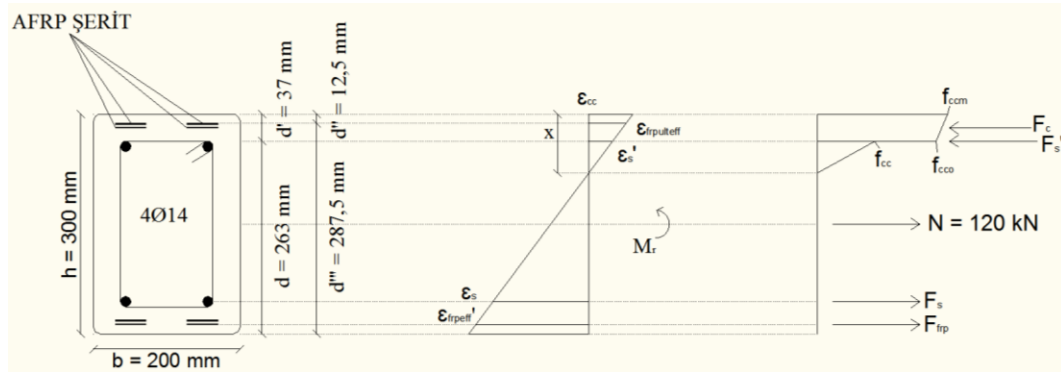
İç kuvvet yatay denge denklemlerine ($F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp}$) göre Denklem 3.58-3.66’da bulunan değerler yerine konulup çözüldüğünde tarafsız eksen yüksekliği $x = 56$ mm olarak bulunmuştur.

Eksenel kuvvetin bulunduğu noktaya göre moment alındığında, güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi bulunur (Denklem 3.67).

$$\begin{aligned}
M_r = & F_{c1} \cdot \left[\frac{h}{2} - k_1 \cdot x + \left(\frac{2}{3} \cdot 0,85 \cdot y \right) \right] + F_{c2} \\
& \cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{2} \right) \right] + F_{c3} \\
& \cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{3} \right) \right] + F_{c4} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{2} \right) \\
& + F_{c5} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{3} \right) + F_s' \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) + F_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\
& + F_{frpeff} \cdot \left(\frac{h}{2} - d'' \right) \\
M_r = & 59050 \text{ Nm} = 59,05 \text{ kNm}
\end{aligned}
\tag{3.67}$$

3.3 LAM-LAM Numunesi İçin Teorik Hesap

AFRP şerit ile güçlendirilen kolonda moment kapasitesi hesabı Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : LAM-LAM numunesinde şekildeğiştirme-gerilme dağılışı.

LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörünün (ϑ) 0,70 olduğu durum için yapılan teorik hesap Denklem 3.68-3.87 ile hesaplanmaktadır.

Çekme bölgesindeki lifli polimer şerit enkesit alanı (A_{frp}) Denklem 3.64 ile hesaplanmıştır. Denklem 3.68’te n_f , şerit LP adedini (4 adet) ifade etmektedir.

$$A_{frp} = n_f \cdot t_f \cdot w_f = 235,20 \text{ mm}^2 \tag{3.68}$$

Denklem 3.69 ile ε_{co} in tarafsız eksene olan uzaklığı (y) hesaplanmıştır.

$$y = \varepsilon_{co} \cdot (d''' - x) / \varepsilon_{frpulteff} = 25,957 \text{ mm} \quad (3.69)$$

LP malzeme tasarım kopma şekildeğiştirmesi (ε_{frpult}) Denklem 3.70 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpult} = \varepsilon_{frpult}^* \cdot C_E \cdot \vartheta = 0,0161 \quad (3.70)$$

LP malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesi ($\varepsilon_{frpulteff}$) Denklem 3.71 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpulteff} = \kappa_m \cdot \varepsilon_{frpult} = 0,0161 \quad (3.71)$$

En dış lifteki en büyük birim kısalma (ε'_{ccm}) Denklem 3.72 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{ccm} = \varepsilon_{co} \cdot x / y = 0,0061 \quad (3.72)$$

Çekirdek beton en dış lifindeki en büyük birim kısalma (ε'_{cc}) Denklem 3.73 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d') / (d''' - x) = 0,0032 \quad (3.73)$$

Çekme donatısındaki birim uzama (ε'_s) Denklem 3.74 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (h - x - d') / (d''' - x) = 0,0142 \quad (3.74)$$

Basınç donatısındaki birim uzama (ε_s) Denklem 3.75 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d') / (d''' - x) = 0,0032 \quad (3.75)$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi (ε'_{frpeff}) Denklem 3.76 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{frpeff} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d'') / (d''' - x) = 0,0051 \quad (3.76)$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi (ε_{frpeff}) Denklem 3.77 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frpult} = 0,161 \quad (3.77)$$

Şekil 3.2'de bulunan şekilde iç kuvvet yatay denge denklemi Denklem 3.78 ile hesaplanmıştır.

$$F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp} \quad (3.78)$$

İç kuvvetler Denklem 3.79-3.87 ile hesaplanmıştır.

$$F_{c1} = \frac{f'_{co} \cdot 0,85 \cdot b \cdot y}{2} \quad (3.79)$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' \leq 0,85 \cdot y \text{ ise } F_{c2} = 0$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' > 0,85 \cdot y \text{ ise}$$

$$F_{c2} = f'_{co} \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b / 1000 \quad (3.80)$$

$$F_{c3} = \frac{(f_{cc} - f'_{co}) \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b}{2} \quad (3.81)$$

$$F_{c4} = f_{cmo} \cdot d' \cdot b / 1000 \quad (3.82)$$

$$F_{c5} = (f_{ccm} - f_{cmo}) \cdot \frac{d'}{2} \cdot b / 1000 \quad (3.83)$$

$$\varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E_s / 1000 \quad (3.84)$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot f_y / 1000$$

$$E_s < E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot \varepsilon'_s \cdot \varepsilon'_s / 1000 \quad (3.85)$$

$$E_s > E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot f_y / 1000$$

$$F_{frp} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot A_{frp} \cdot E_{frp} / 1000 \quad (3.86)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \cdot A_s \quad (3.87)$$

İç kuvvet yatay denge denklemlerine ($F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp}$) göre Denklem 3.79-3.87'de bulunan değerler yerine konulup çözüldüğünde, tarafsız eksen yüksekliği $x = 79$ mm olarak bulunmuştur. Eksenel kuvvetin bulunduğu noktaya göre moment alındığında, güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi bulunur (Denklem 3.88).

$$M_r = F_{c1} \cdot \left[\frac{h}{2} - k_1 \cdot x + \left(\frac{2}{3} \cdot 0,85 \cdot y \right) \right] + F_{c2} \quad (3.88)$$

$$\cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{2} \right) \right] + F_{c3}$$

$$\cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{3} \right) \right] + F_{c4} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{2} \right)$$

$$+ F_{c5} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{3} \right) + F'_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) + F_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right)$$

$$+ F_{frpeff} \cdot \left(\frac{h}{2} - d'' \right)$$

$$M_r = 100798 \text{ Nm} = 100,80 \text{ kNm}$$

Denklem 3.68-3.88 arasındaki adımlar ϑ değerinin 0,432 olduğu durum için tekrar edilmiştir.

Denklem 3.89 ile ε_{co} in tarafsız eksene olan uzaklığı (y) hesaplanmıştır.

$$y = \varepsilon_{co} \cdot (d''' - x) / \varepsilon_{frpulteff} = 40,053 \text{ mm} \quad (3.89)$$

LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörü (ϑ) Denklem 3.90 ile hesaplanmıştır.

$$\vartheta = \varepsilon_{frpult} / \varepsilon_{frpult}^* = 0,432 \quad (3.90)$$

Lifli polimer malzeme tasarım kopma şekildeğiştirmesi (ε_{frpult}) Denklem 3.91 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpult} = \varepsilon_{frpult}^* \cdot C_E \cdot \vartheta = 0,0099 \quad (3.91)$$

Lifli polimer malzeme efektif kopma şekildeğiştirmesi ($\varepsilon_{frpulteff}$) Denklem 3.92 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpulteff} = \kappa_m \cdot \varepsilon_{frpult} = 0,0099 \quad (3.92)$$

En dış lifteki en büyük birim kısalma (ε'_{ccm}) Denklem 3.93 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{ccm} = \varepsilon_{co} \cdot x / y = 0,0044 \quad (3.93)$$

Çekirdek beton en dış lifindeki en büyük birim kısalma (ε'_{cc}) Denklem 3.94 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d') / (d''' - x) = 0,0026 \quad (3.94)$$

Çekme donatısındaki birim uzama (ε'_s) Denklem 3.95 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (h - x - d') / (d''' - x) = 0,0087 \quad (3.95)$$

Basınç donatısındaki birim uzama (ε_s) Denklem 3.96 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d') / (d''' - x) = 0,0026 \quad (3.96)$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirmesi (ε'_{frpeff}) Denklem 3.97 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_{frpeff} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot (x - d'') / (d''' - x) = 0,0038 \quad (3.97)$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif şekildegıştirmesi (ε_{frpeff}) Denklem 3.98 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frpult} = 0,0099 \quad (3.98)$$

Şekil 3.1’de bulunan şekilde iç kuvvet yatay denge denklemi Denklem 3.99 ile hesaplanmıştır.

$$F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp} \quad (3.99)$$

İç kuvvetler Denklem 3.100-3.108 ile hesaplanmıştır.

$$F_{c1} = \frac{f'_{co} \cdot 0,85 \cdot b \cdot y}{2} \quad (3.100)$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' \leq 0,85 \cdot y \text{ ise } F_{c2} = 0$$

$$F_{c2} = k_1 \cdot x \cdot d' > 0,85 \cdot y \text{ ise}$$

$$F_{c2} = f'_{co} \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b / 1000 \quad (3.101)$$

$$F_{c3} = \frac{(f_{cc} - f'_{co}) \cdot (k_1 \cdot x - 0,85 \cdot y - d') \cdot b}{2} \quad (3.102)$$

$$F_{c4} = f_{cmo} \cdot d' \cdot b / 1000 \quad (3.103)$$

$$F_{c5} = (f_{ccm} - f_{cmo}) \cdot \frac{d'}{2} \cdot b / 1000 \quad (3.104)$$

$$\varepsilon_s < \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E_s / 1000 \quad (3.105)$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_y \text{ ise } F'_s = A'_s \cdot f_y / 1000$$

$$E_s < E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot \varepsilon'_s \cdot E'_s / 1000 \quad (3.106)$$

$$E_s > E_y \text{ ise } F_s = A_s \cdot f_y / 1000$$

$$F_{frp} = \varepsilon_{frpulteff} \cdot A_{frp} \cdot E_{frp} / 1000 \quad (3.107)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \cdot A_s \quad (3.108)$$

İç kuvvet yatay denge denklemlerine ($F_c + F'_s = N + F_s + F_{frp}$) göre Denklem 3.100-3.108’de bulunan değerler yerine konulup çözüldüğünde, tarafsız eksen yüksekliği $x = 89$ mm olarak bulunmuştur.

Eksenel kuvvetin bulunduğu noktaya göre moment alındığında, güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi bulunur (Denklem 3.109).

$$\begin{aligned}
M_r = & F_{c1} \cdot \left[\frac{h}{2} - k_1 \cdot x + \left(\frac{2}{3} \cdot 0,85 \cdot y \right) \right] + F_{c2} \\
& \cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{2} \right) \right] + F_{c3} \\
& \cdot \left[\frac{h}{2} - d' - \left(k_1 \cdot x - d' - 0,85 \cdot \frac{y}{3} \right) \right] + F_{c4} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{2} \right) \\
& + F_{c5} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{d'}{3} \right) + F_s' \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) + F_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) \\
& + F_{frpeff} \cdot \left(\frac{h}{2} - d'' \right)
\end{aligned} \tag{3.109}$$

$$M_r = 77450 \text{ Nm} = 77,45 \text{ kNm}$$

Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş betonarme kolon numunlerine ait hesaplanan teorik kapasiteler Çizelge 3.3’de sunulmuştur.

Çizelge 3.3 : Tüm numunelerin teorik hesap özeti.

Numune adı	Teorik Moment	Teorik Yatay Yük	Teorik Moment	Teorik Yatay Yük
	Kapasitesi	Kapasitesi	Kapasitesi	Kapasitesi
	$\vartheta = 0,70$ M_r (kNm)	$\vartheta = 0,70$ P_r (kN)	$\vartheta = 0,432$ M_r (kNm)	$\vartheta = 0,432$ P_r (kN)
REF	34,52	20,92	34,52	20,92
LAM	59,05	35,79	70,74	42,87
LAM-LAM	77,45	46,94	100,80	61,09
LAM-PB	59,05	35,79	70,74	42,87

3.4 Güçlendirme Öncesi ve Sonrası Kesme Kuvveti Hesabı

TS-500 (2000)’e göre güçlendirme öncesi beton ve enine donatı katkısını içeren kesme kuvveti kapasitesi Denklem 3.110-3.128 ile hesaplanmaktadır.

Eğik çatlamayı oluşturan kesme kuvveti (V_{cr}) Denklem 3.110 ile hesaplanmaktadır.

Denklem 3.110’da γ , TS 500’de eksenel basınç durumunda 0,07 alınmaktadır.

$$V_{cr} = 0,65 \cdot 0,35 \cdot \sqrt{f'_{ck}} \cdot b \cdot d \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{N}{b \cdot h} \right) = 43824 \text{ N} \tag{3.110}$$

Beton kesme kuvveti kapasitesi (V_c) Denklem 3.111 ile hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0,8 \cdot V_{cr} = 35059 \text{ N} \tag{3.111}$$

Etriye kesme kuvveti kapasitesi (V_w) Denklem 3.112-3.113 ile hesaplanmaktadır.

Denklem 3.112’de A_{sw} , enine donatı kesit alanını, s , etriye aralığını (200 mm), c_c , net beton örtüsünü (20 mm), r_e , enine donatı çapını (10 mm) ifade etmektedir.

$$A_{sw} = \pi \cdot r_e^2 / 4 = 157,08 \text{ mm}^2 \quad (3.112)$$

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot (h - c_c - 0,5 \cdot r_e) = 65066 \text{ N} \quad (3.113)$$

Toplam kesme kuvveti kapasitesi (V_r) Denklem 3.114 ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_w + V_c = 100125 \text{ N} \quad (3.114)$$

Kesme kuvveti üst sınırı (V_{mak}) Denklem 3.115-3.116 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{mak} = 0,22 \cdot f'_{ck} \cdot b \cdot d = 119423 \text{ N} \quad (3.115)$$

$$V_r = 100125 \text{ N} \geq V_d = 20921 \text{ N} \quad (3.116)$$

ACI-440-2R-08 (2008)'e göre güçlendirme sonrası AFRP şeritlerin kesme kuvvetine direnci ve beton katkısını içeren kesme kuvveti Denklem 3.117-3.129 kullanılarak elde edilebilir.

Etriye donatısı enkesit alanı (A_0) Denklem 3.116 ile hesaplanmaktadır.

$$A_0 = \pi \cdot r_e^2 / 4 = 78,54 \text{ mm}^2 \quad (3.117)$$

AFRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısı (V_{frp}) Denklem 3.117 ile hesaplanmaktadır.

Denklem 3.117'de s_f , sargı aralığını (300 mm) ifade etmektedir.

$$V_{frp} = (A_{frp} \cdot d \cdot \varepsilon_{frpeff} \cdot E_{frp} / s_f) = 160661 \text{ N} \quad (3.118)$$

Etriye kesme kuvveti kapasitesi (V_w) Denklem 3.118 ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.118'de n , etriye kol sayısını (2 adet) ifade etmektedir.

$$V_w = (n \cdot A_0 \cdot d \cdot f_{ywd}) / s = 55932 \text{ N} \quad (3.119)$$

Beton kesme kuvveti kapasitesi (V_c) Denklem 3.119 ile hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0,8 \cdot V_{cr} = 35059 \text{ N} \quad (3.120)$$

Güçlendirilmiş numune kesme kuvveti kapasitesi (V_{r-frp}) Denklem 3.120 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{r-frp} = V_w + V_{frp} + V_c = 251652 \text{ N} \quad (3.121)$$

LAM ve LAM-PB numunelerinin kesme kuvveti kontrolü, $\vartheta=0,70$ için Denklem 3.121-3.122 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{ret} = M_{ret} / H = 42875 \text{ N} \quad (3.122)$$

$$V_{r-frp} = 260786 \text{ N} \geq P_{ret} = 42875 \text{ N} \quad (3.123)$$

LAM ve LAM-PB numunelerinin kesme kuvveti kontrolü, $\vartheta=0,432$ için Denklem 3.123-3.124 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{ret} = M_{ret}/H = 35787 \text{ N} \quad (3.124)$$

$$V_{r-frp} = 260786 \text{ N} \geq P_{ret} = 35787 \text{ N} \quad (3.125)$$

LAM-LAM numunesi kesme kuvveti kontrolü, $\vartheta=0,70$ için Denklem 3.125-3.126 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{ret} = M_{ret}/H = 61090 \text{ N} \quad (3.126)$$

$$V_{r-frp} = 260786 \text{ N} \geq P_{ret} = 61090 \text{ N} \quad (3.127)$$

LAM-LAM numunesi kesme kuvveti kontrolü $\vartheta=0,432$ için Denklem 3.127-3.128 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{ret} = M_{ret}/H = 46939 \text{ N} \quad (3.128)$$

$$V_{r-frp} = 260786 \text{ N} \geq P_{ret} = 46939 \text{ N} \quad (3.129)$$

Kolonların güçlendirmeden önce ve sonrasındaki kesme kuvvetleri eğilme dayanımlarından oldukça yüksek olması nedeni ile numunelerin davranışlarında eğilme etkisi hakimdir.

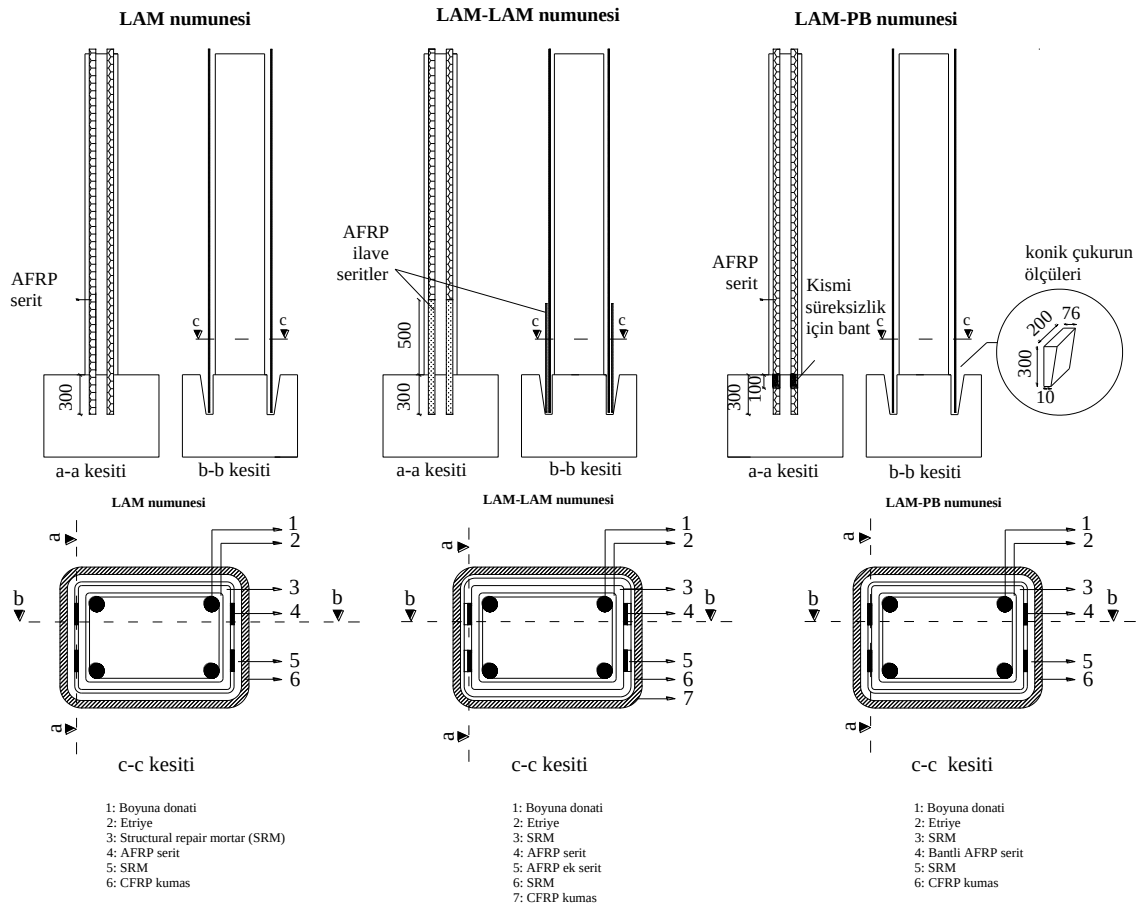
3.5 Güçlendirme Uygulaması

Güçlendirme tasarımı yapılan 3 adet betonarme kolon numunesinin (LAM, LAM-LAM, LAM-PB) İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda aşama aşama güçlendirme çalışmaları yapılmıştır.

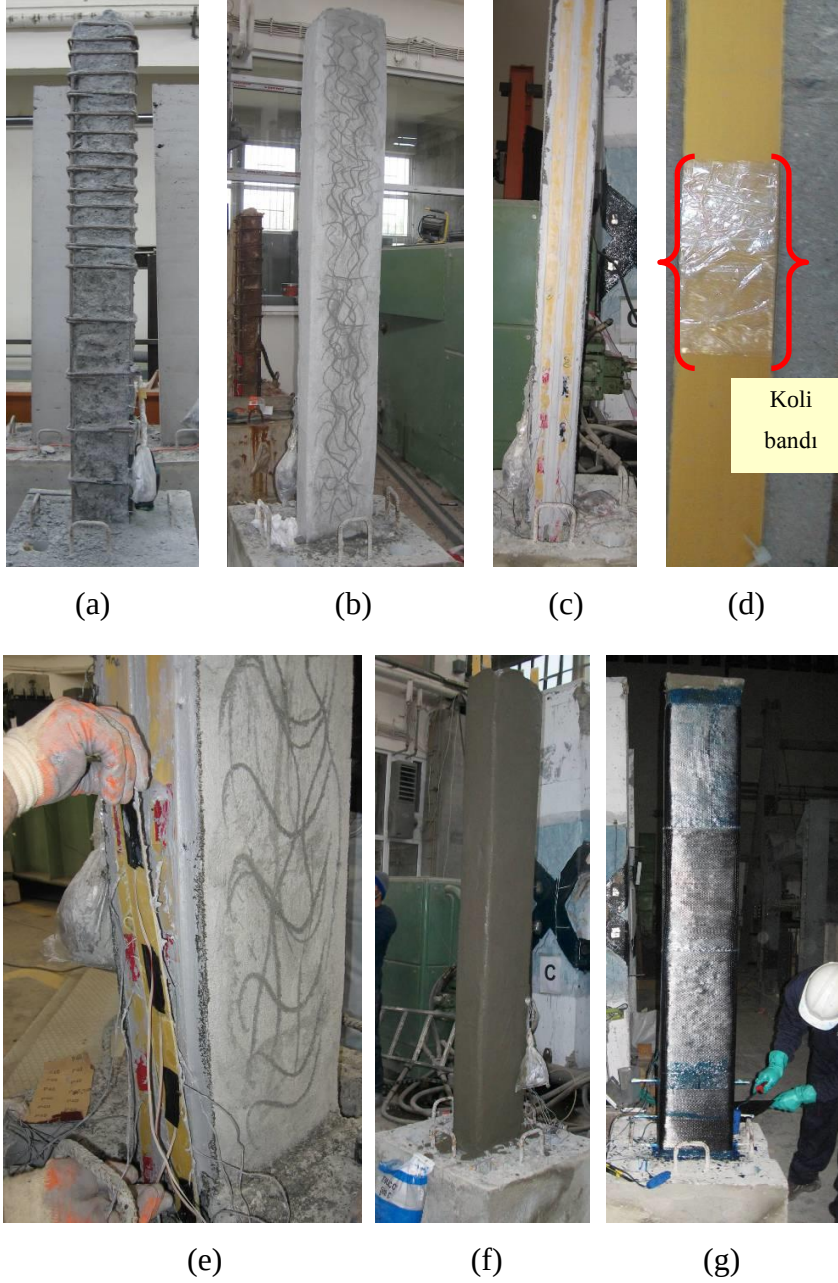
Kolon eğilme kapasitelerini arttırmak için üç numune (zayıf beton örtüsü söküldükten sonra) boyuna AFRP şeritleri kolon yüzeyine yapıştırılmış ve mevcut temele ankre edilmiştir. Güçlendirme detayları ve uygulama aşamaları Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmektedir.

Güçlendirilecek betonarme kolon numunelerinde ilk adım olarak LP malzemenin tamir harcı ile daha iyi yapışabilmesi için kolon yüzeyleri, etriye ve boyuna donatıların iç yüzeylerine kadar sıyrılmıştır (Şekil 3.4a). Yapılan uygulama AFRP şeridin beton yüzeyi içinde kalmasına olanak sağlamaktadır. Bu tip uygulamalar, aynı zamanda, düşük dayanımlı beton ile inşa edilmiş eski binaların genellikle rehabilitasyonu için gerekli olan temel korozyon onarım prosedürünü de temsil

etmektedir. Daha sonra, pürüzsüz yüzey için ince bir tabaka SRM boyuna donatıların dış yüzeyine kadar uygulanmıştır (Şekil 3.4b). Daha sonra, AFRP şerit ile SRM arasındaki aderansı arttırmak için SRM üzerine epoksi bazlı astar uygulanmıştır. Boyuna AFRP şeritlerin temele ankrajı için konik delikler temele kazılmıştır (Şekil 3.3). Toplam 4 adet, 1,40 mm kalınlığında ve 42 mm genişliğinde iki adet AFRP şerit, 300 mm (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4c) ankraj uzunluğu ile kolonların güçlü yönünde her iki tarafında simetrik olarak epoksi yapıştırıcı kullanılarak yüzeye yapıştırılmıştır. LAM-PB numunesinde, kısmi yapışma süreksizliği için konik deliğin temel yüzeyinde başladığı yerden itibaren AFRP şeridin 100 mm'lik kısmı koli bandı ile sarılmıştır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4d). Bu nedenle LAM-PB numunesi için, temel içerisine AFRP şeridin toplam bağlanmış uzunluğu 200 mm (300 mm yerine) olmuştur. LAM-LAM numunesinin kolon temel birleşiminde 800 mm uzunluğunda ilave AFRP şerit kullanılmıştır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4e).



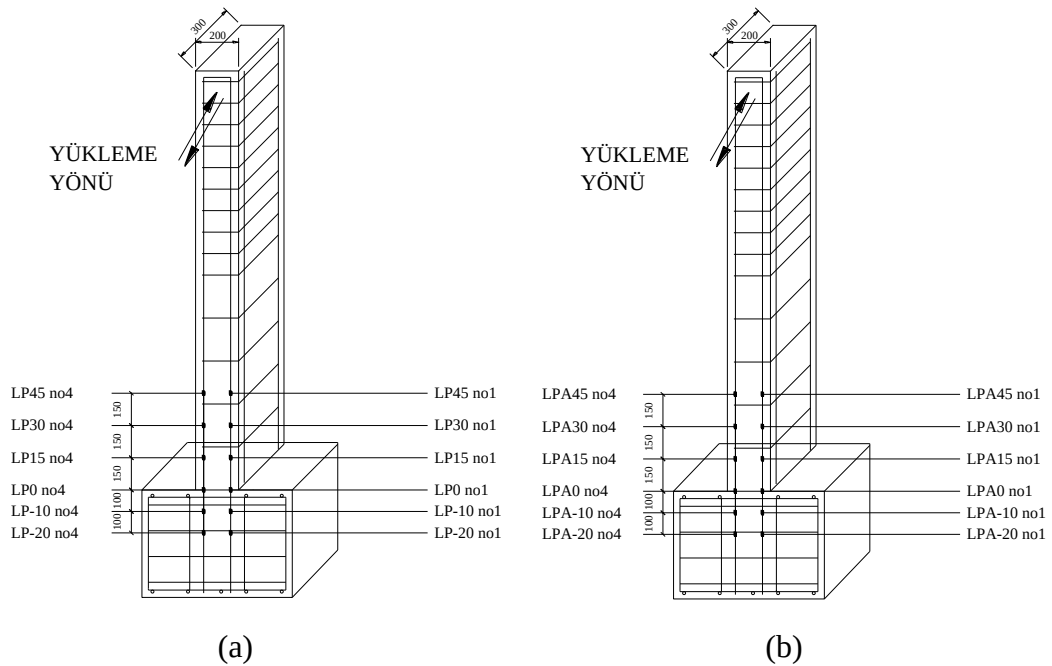
Şekil 3.3 : Numunelere ait güçlendirme planları.



Şekil 3.4 : (a) Paspayı sıyrılmış kolon, (b) Düz yüzey sağlamak amacı ile yapısal tamir harcı (SRM) uygulaması, (c) AFRP şeritlerin yapıştırılması, (d) AFRP şerit koli bandı uygulaması (sadece LAM-PB numunesi için), (e) İlave AFRP şerit uygulaması (sadece LAM-LAM numunesi için), (f) Yapısal tamir harcının (SRM) son kat uygulaması, (g) Enine doğrultuda CFRP kumaş sargılaması.

Ankraj için diğer güçlendirme numunelerinde olduğu gibi ilave AFRP şeridin 300 mm uzunluğundaki parçası konik delik içine yerleştirilmiştir. İlave AFRP şerit ve ana AFRP şerit epoksi ile birbirine yapıştırılmış ve birlikte epoksi harç kullanılarak önceden kazılmış konik delik içine yerleştirilmiştir. LAM ve LAM-PB numunelerinin de 300 mm'lik kısımlarının temele ankrajı sırasında aynı epoksi harç

konik delikleri doldurmak için kullanılmıştır. Daha sonra, betonarme kolonu orijinal boyutlarına getirmek için tekrar SRM tabakası uygulanmıştır (Şekil 3.4f). Bournas ve Triantafillou (2009) tarafından gerçekleştirilen ve NSM yöntemi kullanılarak güçlendirilen kolonların tersinir ve çevrimsel yükleme altında yapılan deneylerinde LP donatılarının burkulduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmadaki sonuç gözönünde bulundurularak, bu tezde kolonlar boyuna AFRP ile güçlendirilen ve kolon kesitleri SRM ile orijinal boyutlarına getirildikten sonra, son adım olarak, CFRP kumaşın sargılama etkisi aracılığıyla betonarme kolonların deformasyon yeteneğini arttırmak ve artan dayanım nedeniyle potansiyel kesme hasarlarını önlemek için betonarme kolonlar CFRP kumaş ile sarılmıştır (Şekil 3.4g). Buna ek olarak, CFRP kumaş sargılamasının SRM ve AFRP şerit arasındaki yapışmayı arttırdığına ve boyuna donatının burkulmasının önlenmesine katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, referans ve güçlendirilmiş numunelerin dış boyutları orijinal boyutuna (200 mm×300 mm) getirilmiştir. Diğer bir deyişle, her güçlendirme uygulaması numune kesit boyutları içinde gerçekleştirilmiştir. Şekildeğiştirmeölçerlerin numune üzerindeki yerleşimi Şekil 3.5 ve Çizelge 3.4’de verilmiştir. Yapılan uygulama sırası ve kullanılan malzemeler Çizelge 3.5’de özetlenmiştir. LP; AFRP şerit üzerine yapıştırılan, LPA ise; AFRP ek şerit üzerine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçeri ifade etmektedir.



Şekil 3.5 : (a) AFRP şerit, (b) AFRP ek şerit üzerindeki şekildeğiştirmeölçer yerleşimi.

Çizelge 3.4 : Boyuna güçlendirme elemanları şekil değiştirme ölçer yerleşim planı.

Kolon boyuna AFRP şerit üzerinde şekil değiştirme ölçer yerleşim planı		Bulunduğu kolon			
Şekil değiştirme ölçer adı (YFLA-5)	Yapıştırılma mesafesi(mm)	REF	LAM	LAM-LAM	LAM-PB
LP45 no1	450	-	+	+	+
LP30 no1	300	-	+	+	+
LP15 no1	150	-	+	+	+
LP0 no1	0	-	+	+	+
LP-10 no1	-100	-	+	+	+
LP-20 no1	-200	-	+	+	+
LP45 no4	450	-	+	+	+
LP30 no4	300	-	+	+	+
LP15 no4	150	-	+	+	+
LP0 no4	0	-	+	+	+
LP-10 no4	-100	-	+	+	+
LP-20 no4	-200	-	+	+	+
LPA45 no1	450	-	-	+	-
LPA30 no1	300	-	-	+	-
LPA15 no1	150	-	-	+	-
LPA0 no1	0	-	-	+	-
LPA-10 no1	-100	-	-	+	-
LPA-20 no1	-200	-	-	+	-
LPA45 no4	450	-	-	+	-
LPA30 no4	300	-	-	+	-
LPA15 no4	150	-	-	+	-
LPA0 no4	0	-	-	+	-
LPA-10 no4	-100	-	-	+	-
LPA-20 no4	-200	-	-	+	-

+: VAR / -: YOK

Çizelge 3.5 : Güçlendirme uygulama şeması.

No	Yapılan Uygulama	Kullanılan Malzeme LAM / LAM-LAM / LAMPB
1	Paspayının sıyrılması	+
2	Paspayı sıyrılan kolonun sulanması	+
3	Astar uygulaması	Masterseal300T
4	İlk kat yapısal tamir harcı uygulaması	Emaco S88 C
5	Yapısal tamir harcı uygulaması sonrası kolonun sulanması	+
6	Temele ankraj deliklerinin açılması	+
7	Ankraj deliklerinin kompresör ile temizlenmesi	+
8	Astar uygulaması	M-Brace Primer
9	AFRP şeritlerin yapıştırılması	M-Brace Laminate Adesivo
10	Ankraj deliklerinin kapatılması	Masterflow402C
11	Son kat yapısal tamir harcı uygulaması	Emaco S88 C
12	Astar uygulaması	M-Brace Primer
13	Bulon deliklerinin açılması	+
14	CFRP kumaş kullanılarak enine doğrultuda iki kat sargılama yapılması	M-Brace Fiber C1-23+M-Brace Adesivo(Saturant)

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Giriş

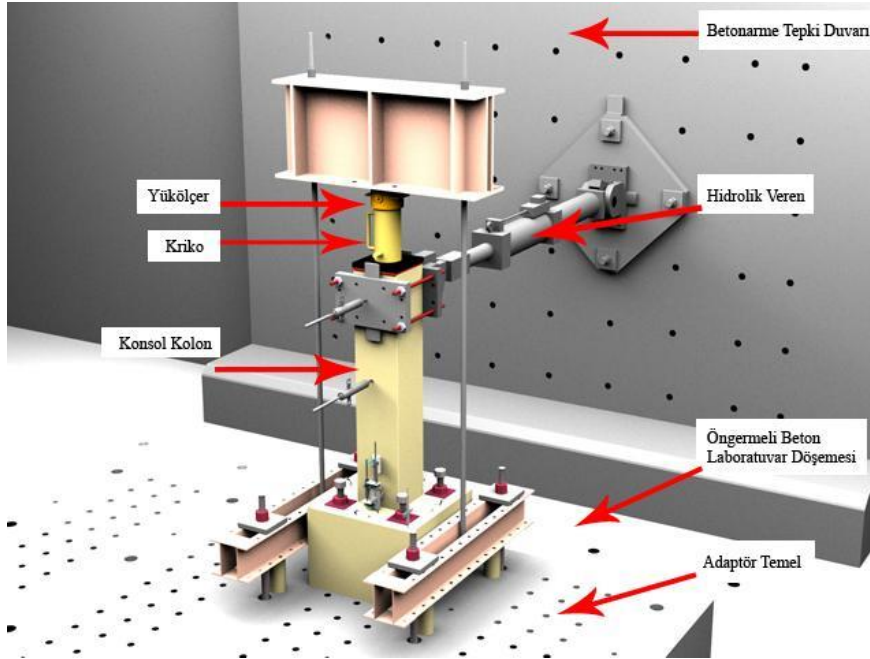
Bilindiği gibi, yapı elemanları deprem etkisinde tersinir tekrarlanan etkilere maruz kalmaktadır. Depremi yapı üzerinde oluşturacağı bu etkilerin daha etkin bir şekilde incelenebilmesi ve betonarme yapı elemanlarının bu yüklemeler altındaki davranışının tayin edilebilmesi için tersinir tekrarlanan yatay yükler altında incelenmesi gerekmektedir. Söz konusu elemanların elastik ötesi şekildeğiştirmelere sebebiyet veren yüklemeler altında rijitlik ve dayanımlarında ciddi kayıplara uğradıkları bilinmektedir. “Betonarme Kolonların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde Aramid Lifli Polimer Güçlendirme Donatılarının Kolon Temeline Ankraji” konusunun araştırılması için İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada yeralan dört adet betonarme kolonun, bir tanesi referans numunesidir. Diğer numuneler ise boyuna doğrultuda AFRP şerit kombinasyonları, enine doğrultuda ise CFRP kumaşla güçlendirilmiş ve tersinir tekrarlanan yatay yük etkisi altında performansları incelenmiştir.

Başlangıç olarak numune tasarımları yapılmış, ardından betonarme kolonlar imal edilmiştir. Tasarımı yapılan betonarme kolon numunelerinin her biri çerçeve sistemde bulunan kolonun alt yarısını temsil etmektedir. Numune imalatında kullanılan gerek beton gerekse çelik donatı malzemesinden, dayanımlarını belirlemek amacıyla örnekler alınarak deneyleri yapılmış ve deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında teorik hesap tamamlanarak güçlendirme uygulaması yapılmıştır.

Çalışmanın gerçeğe yakınlığını sağlamak üzere kolon numunelerine tersinir tekrarlanan yatay yüklemeler etkisiyle beraber gerçek yapılarda olduğu gibi eksenel yük de etkilmiştir.

4.2 Deney Düzeneği

Numuneler, sabit eksenel yük ve tersinir tekrarlanan yatay yükleme altında denenmiştir. İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bunun için tasarlanmış bir sistem bulunmaktadır. Temsili deney düzeneği şematik olarak Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Temsili deney düzeneği (Demirtaş, 2008).

Deney düzeneği rijit bir yükleme duvarı önünde ve laboratuvar döşemesine yüksek dayanıma sahip bulonlarla sabitlenmiş, çelik profiller ve levhalardan oluşturulmuştur. Krenle numune yerine yerleştirilerek bulonlarla adaptör temele sabitlenmiştir. Numunenin adaptör temele sabitlenmesinden sonra eksenel yükleme düzeneği hazırlanmıştır. Bunun için betonarme kolon üzerine ağırlığı bilinen çelik bir profil yerleştirilmiştir. Bu profil, numune kenarlarından birbirine kaynaklanmış iki ters U çelik profille, laboratuvar döşemesine çelik halatlarla sabitlenmiştir.

Numune yerine yerleştirildikten sonra çatlak krokisinin oluşturulması için kolon yüzüne 5 cm aralıklarla yatay çizgiler çizilmiş ve deney sırasında oluşan mevcut çatlaklar gösterilmiştir.

Güçlendirilmiş numunelerde CFRP kumaş sargılaması olması nedeni ile sadece REF numunesinde çatlak krokileri oluşturulabilmiştir. Moment-eğrilik grafiklerinin çiziminde yardımcı olacak yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirilmesi için temel üst

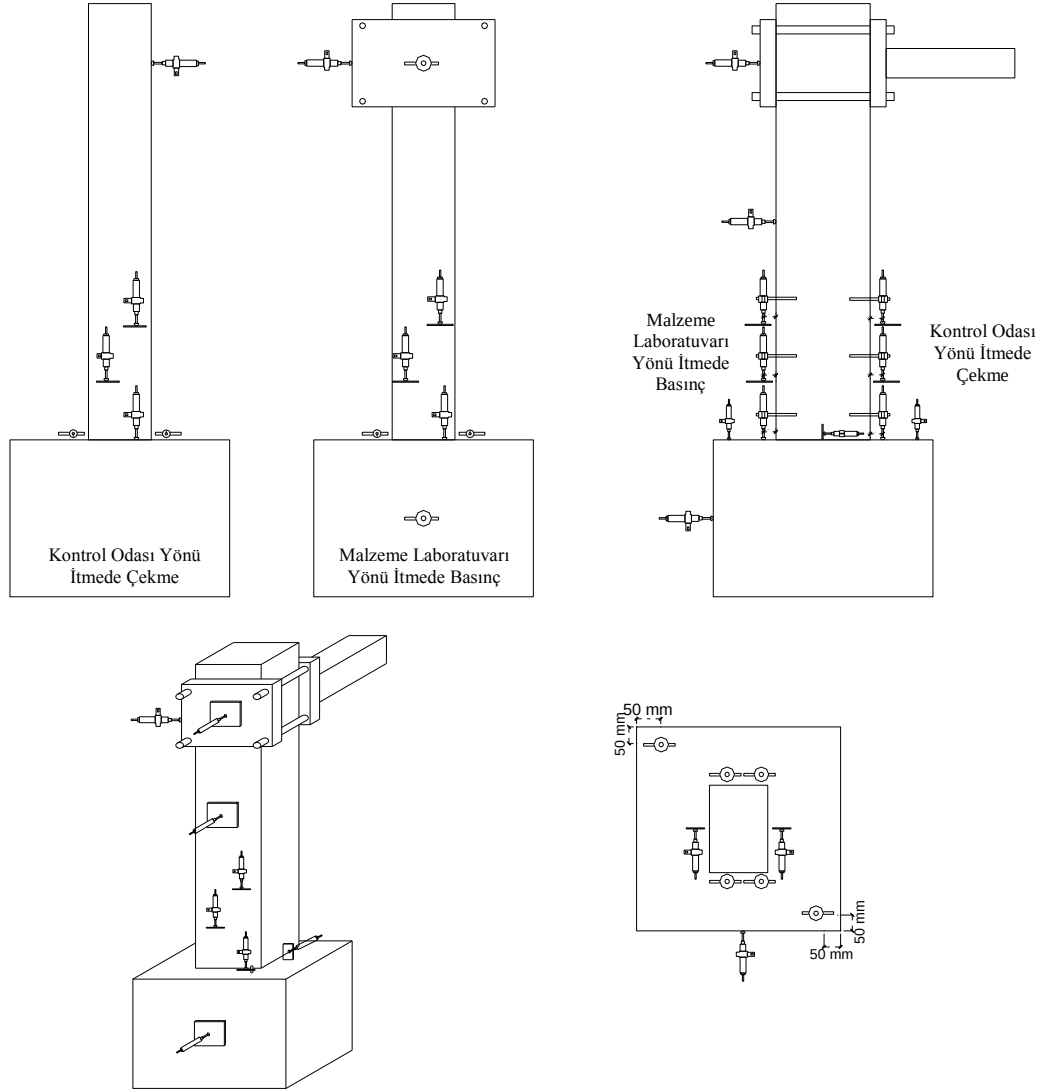
kotundan 20, 150 ve 300 mm aralıklarla, kolon orta noktalarından $\phi 10$ delici uca sahip matkap ile bulon delikleri delinmiştir.

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 çevrimleri numuneye adım adım uygulanan yerdeğiştirmeler ile gerçekleştirilmiştir. Eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşturmak üzere uygulanan yatay yükler, bilgisayar kontrollü MTS hidrolik yükveren kullanılarak etkitilmiştir. Tersinir tekrarlanan (itme ve çekme) yatay yük 200 mm×300 mm enkesitli kolon parçasının kısa kenarından etkitilmiştir. Hidrolik yükveren itme ve çekmede 250 kN yük kapasitesine ve toplam 600 mm yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Betonarme kolon testleri sırasında benzer yükleme düzeneği Matamoros ve Sozen (2003), Iacobucci ve diğ. (2003), İlki ve diğ. (2009), Bournas ve Triantafillou (2011), ve Göksu ve diğ. (2012) tarafından kullanılmıştır. Tüm deneyler yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Yerdeğiştirme aralığı ± 132 mm'dir.

Kolonların eksenel yük kapasitesinin yaklaşık % 20'si kadar eksenel yük 120 kN (donatı kapasitesi dikkate alınmamıştır), iki adet 7-telli germe halatı, bir adet hidrolik krika ve sert bir çelik kiriş ile uygulanmıştır (Şekil 4.1).

Ölçüm sistemi TML yerdeğiştirmeölçerler, FLA-5-11, YFLA-5 tipi şekildeğiştirmeölçerler ve 1000 kN kapasiteli TML yükölçer ile MTS verinin dahili yükölçeri ve yerdeğiştirmeölçerinden oluşmaktadır. Bu ölçme cihazlarından gelen veriler TML ASW-50C veri çoğaltma kutusuna, ardından TML TDS 303 veri toplayıcıya ulaşmaktadır. Toplanan veriler daha sonra işlenmek üzere bilgisayara aktarılmaktadır. Kolonun ortalama kesit eğriliklerini belirleyebilmek üzere 25 mm, 150 mm ve 300 mm ölçüm boylarında iki adet CDP50 ve dört adet CDP25 tipi olmak üzere toplam altı adet yerdeğiştirmeölçer kolona paralel düşey yönde yerleştirilmiştir. Kolonun yatay yerdeğiştirmesini ölçmek için kolon orta noktasından ve hidrolik yükverenin başlığının orta noktasından yatay yönde bir adet CDP100 ve bir adet CDP200 tipi yerdeğiştirmeölçer, kolona dik olarak yerleştirilmiştir bunun yanı sıra eksen dışı hareketi gözleyebilmek içinde bir adet CDP100 ve bir adet

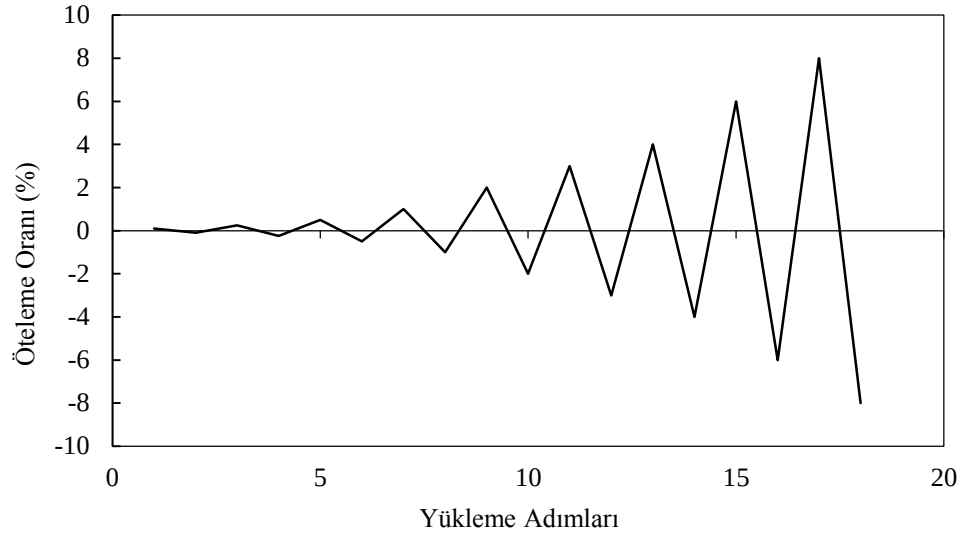
CDP25 tipi yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. Ayrıca temelde meydana gelebilecek olası dönmeler ve ötelemeler için iki adet CDP5 ve bir adet CDP10 tipi yerdeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Kolon ve temeldeki yerdeğiştirmeleri ölçmek için yerleştirilen yerdeğiştirmeölçer yerleşim planı şekil 4.2’de gösterilmiştir.



şekil 4.2 : Yerdeğiştirmeölçer yerleşim planı.

4.3 Yükleme Patronu

Deneylerin tamamında deprem etkisini gerçekçi şekilde yansıtmak için yüklemeler itme ve çekme yönünde yerdeğiştirmeler kontrol edilerek yapılmıştır. Yükleme adımları deney yapımından önce belirlenmiş olan öteleme oranlarına bağlı kalınarak yapılmış ve bu adımların arasında numunenin hasar durumu tespit edilmiştir. Yükleme patronu şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 : Yüklemeye patronu.

4.4 Deneyler

4.4.1 REF numunesi

Deneye beton 57 günlük ve silindir numunenin beton basınç dayanımı 10,32 MPa iken 29.12.2011 tarihinde başlanmıştır. Hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4 : REF numunesinin deney başlangıcında görünümü.

Deney esnasında ilk olarak hedeflenen % 0,10 öteleme oranı ile itme uygulandığında numunenin herhangi bir yerinde herhangi bir çatlak oluşmadığı gözlenmiştir. Deneyde itme uygulamasında ikinci olarak hedeflenen % 0,25 öteleme oranı ile itme uygulandığında temel kotunun üzerinde 20 cm etriye (1. etriye) hizasında ve kolon tabanında çekme bölgesinde ilk eğilme çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. % 0,25 öteleme oranı ile itme uygulamasından sonra % 0,25 öteleme oranı ile çekme uygulandığında çekme bölgesinde de benzer eğilme çatlakları gözlenmiştir. Deneyin ilerleyen adımlarında kolon tabanından 100 cm yüksekliğe kadar tüm etriye hizalarında yeni eğilme çatlakları oluştuğu, önceki adımlarda oluşmuş olan çatlak genişliklerinde de artışlar olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca % 2 öteleme oranı ile çekme uygulaması ile % 3 öteleme oranı ile itme uygulaması aralığında boyuna donatıların tamamında akmanın başladığı gözlenmiştir. Enine donatılarda ise akma gözlenmemiştir.

Numuneye % 1 öteleme oranı ile itme uygulandığında, oluşan taban çatlağının yaklaşık olarak 0,60 mm boyutlarında olduğu tespit edilmiştir. REF numunesinin % 1 itme öteleme oranında görünümü Şekil A.1’de verilmiştir.

Numuneye % 2 itme öteleme oranı uygulanmasıyla oluşan taban çatlağının yaklaşık olarak 2 mm boyutlarında olduğu tespit edilmiştir. REF numunesinin % 2 öteleme oranı ile çekme uygulanması sonrası görünümü Şekil A.2’de verilmiştir.

Numuneye % 3 itme öteleme oranı uygulanması sonucu betonda ezilme tespit edilmiştir. REF numunesi % 3 öteleme oranı ile itme uygulanması sonrası görünümü Şekil A.3’de verilmiştir.

Her itme ve çekme adımı neticesinde çatlak genişliklerinde artışlar kolon tabanında toplanmakta olup, bu adımda numuneye % 4 öteleme oranı ile itme uygulanmasıyla kolon tabanı ile temel yüzeyi arasında 5 mm’lik bir ayrılma olduğu tespit edilmiştir. REF numunesinin % 4 öteleme oranı ile itme uygulanması sonrası görünümü Şekil A.4’de verilmiştir.

Numuneye % 6 öteleme oranı ile itme uygulanmasıyla oluşan taban çatlağının yaklaşık olarak 12 mm boyutlarında olduğu tespit edilmekle beraber, yine aynı bölgede paspayının da döküldüğü gözlenmiştir. REF numunesinin % 6 öteleme oranı ile itme uygulanması sonrası görünümü Şekil A.5’de verilmiştir.

Numuneye % 6 öteleme oranı ile çekme uygulanmasıyla kolon-taban birleşim bölgesindeki betonda dağılmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. REF numunesi % 6 öteleme oranı ile çekme uygulanması sonrası görünümü Şekil A.6'de verilmiştir.

Numuneye % 8 öteleme oranı ile itme uygulanmasıyla kolon-taban birleşim bölgesindeki betondaki dağılmaların artarak devam ettiği gözlenmiştir. REF numunesinin % 8 öteleme oranı ile itme uygulanması sonrası görünümü Şekil A.7'de verilmiştir. REF numunesinin % 8 öteleme oranı ile itme uygulama sonrası temel ayrılması görünümü Şekil A.8'de verilmiştir.

Numuneye % 8 öteleme oranı ile çekme uygulanmasıyla kolon-taban birleşim bölgesindeki beton yüzeyinin tamamen dağıldığı gözlenmiştir. REF numunesi % 8 öteleme oranı ile çekme uygulama sonrası beton dağılması görünümü Şekil A.9'da verilmiştir.

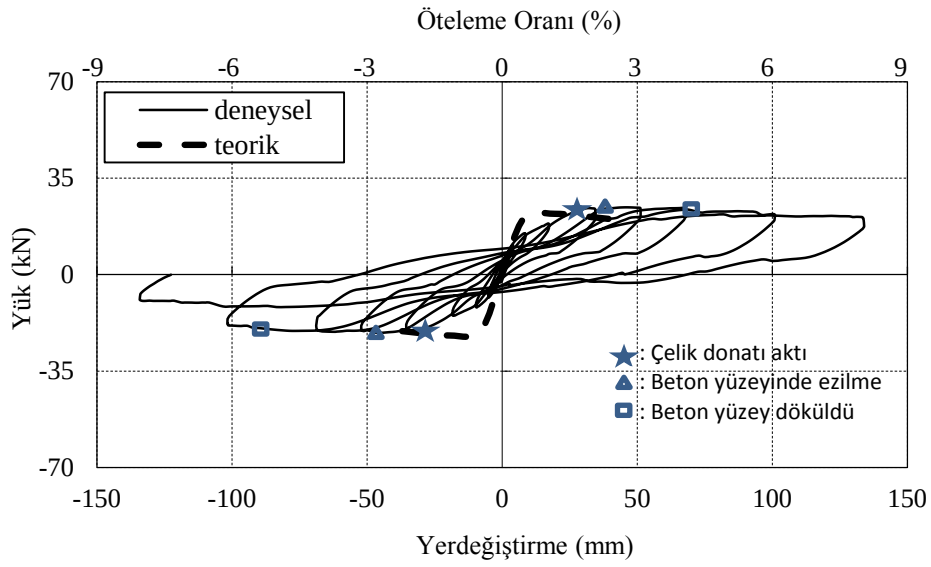
Numuneye % 8 öteleme oranı ile çekme uygulanması sonrasında numune üzerinde kalıcı yerdeğiştirme olduğu görülmüş ve yerdeğiştirme değeri yük 0 kN olduğu anda 120 mm olarak ölçülmüştür (Şekil A.10). REF numunesi deney sonrası kolon tabanında hasar durumu Şekil A.11'de verilmiştir.

Deney süresince, REF numunesinde eğilme etkilerinin baskın olduğu gözlenmekle beraber, kesme kuvvetinin oluşan hasarlar üzerinde herhangi bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Deneyin ilerleyen öteleme oranlarında basınç bölgesinde meydana gelen çatlaklara sebebiyet veren etkiler;

- itme ve çekme adımlarında kalıcı deformasyonların aynı donatı üzerinde oluşmasından dolayı yapay bir burkulma yaratmış olması,
- kolon tabanı ve temel yüzeyinin tamamı ile birbirinden ayrılmış olması,
- numunelerin düz donatı kullanılarak imal edilmiş olması,

sayılabilir.

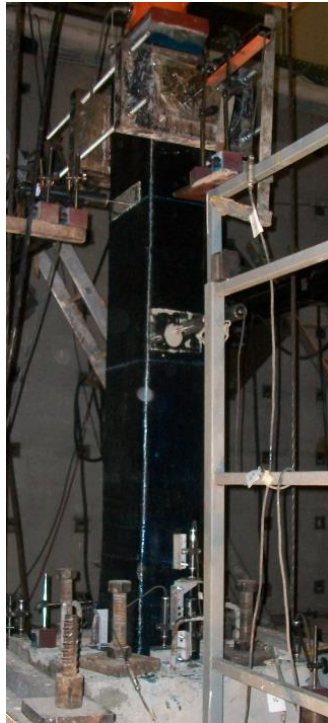
Hidrolik yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 : REF numunesine ait yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi.

4.4.2 LAM numunesi

Deney, 02.01.2012 tarihinde beton 61 günlük ve silindirik beton basınç dayanımı 10,32 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi durumu Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6 : LAM numunesinin deney başlangıcında görünümü.

Deney esnasında ilk olarak hedeflenen % 0,10 öteleme oranı ile itme uygulandığında numunenin herhangi bir yerinde herhangi bir çatlak oluşmadığı gözlenmiştir. Numuneye % 0,50 öteleme oranı ile itme uygulandığında çekme alan bölgede kolon tabanında eğilme çatlağı gözlenmiştir.

Ayrıca % 2 öteleme oranı ile çekme uygulaması ile % 3 öteleme oranı ile itme uygulaması aralığında boyuna donatıların tamamında akmanın başladığı gözlenmiştir. Enine donatılarda ise akma meydana gelmemiştir.

Numuneye % 3 öteleme oranı ile itme uygulandığında kolon tabanındaki ayrılma haricinde herhangi bir deformasyon tespit edilmemiştir. Fakat % 3 öteleme oranı ile itme uygulamasına giderken kolon numunesinden şiddetli bir ses duyulmuş ve bu ses ile birlikte yükte ani bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sesin meydana gelme sebebi, itme sırasında çekmeye maruz temele ankre edilmiş AFRP şeritlerin kopması olarak belirlenmiştir. % 3 öteleme oranı ile çekme uygulamasına gidilirken de aynı şekilde şiddetli bir ses duyulmuş ve yük değerinde azalma meydana gelmiştir. Bundan sonraki öteleme oranlarında ise AFRP şeritler ile eğilme dayanımı arttırılan numune, şeritlerin kopması ile REF numunesine benzer bir davranış göstermiştir. % 8 öteleme oranı ile itme uygulaması sonrası numune görünümü Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 : LAM numunesi % 8 öteleme oranı ile itme sonrası.



Şekil 4.8 : LAM numunesi % 8 öteleme oranı sonrası itmede kolon tabanı ile temel yüzeyi.

Numuneye % 8 öteleme oranı ile çekme uygulanması sonrasında numune üzerinde kalıcı yatay yerdeğiştirme olduğu görülmüş ve ölçümler sonucu bu deformasyon değeri yük 0 kN olduğu anda -82,60 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).



Şekil 4.9 : LAM numunesi deney sonrası ($P= 0$ kN, $\delta= -82,60$ mm).



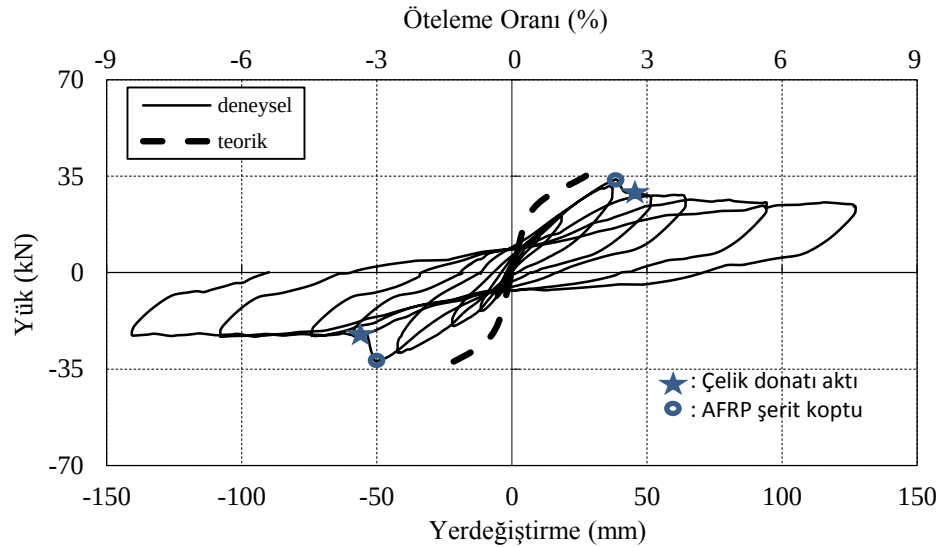
Şekil 4.10 : LAM numunesi deney sonrası kolon tabanı ile temel yüzeyi.

LAM numunesinde % 3 öteleme oranına kadar AFRP şeritte deformasyon meydana gelmiş ve % 3 öteleme oranına giderken AFRP şeritlerin kopması ile birlikte çelik donatılardaki şekildeğiştirme değerinde artış gözlenmiştir. LAM numunesinin, REF numunesine göre taşıdığı yük oranı % 38 kadar artmıştır. Ancak, bu artış ankre

edilmiş bulunan AFRP şeritlerin % 3 öteleme oranına giderken kopması ile birlikte numunenin bu davranışı devam ettirmesini engellemiş ve bu noktadan sonra yükün düşmesi ile beraber REF numunesi gibi davranmasına neden olmuştur. AFRP şeritler şekildeğiştirmelerin en fazla olduğu kolon-temel birleşiminden kopmuştur.

Deney devam ederken kolon numunesine uygulanmış olan CFRP kumaş nedeni ile kolon üzerinde oluşan eğilme çatlakları tespit edilememiştir. Bundan dolayı deneyden sonra kenara ayrılmış olan kolon numunelerinin taban yüzeyinden itibaren 60 cm'lik yüzeyi spiral ile kesilip açılarak bu bölgede meydana gelen ve deney sırasında gözlenemeyen eğilme çatlaklarının kontrolü yapılmıştır ve çok belirgin bir çatlak tespit edilememiştir. Bu gözlemler sonucunda kolon numunesinde oluşan bütün hasarın kolon tabanında olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil A.12). Bu hasar tespit incelemesinden sonra, numunelerde yük artışının AFRP şerit ile sağlandığı tespit edilmiştir. Ankre edilmiş olan AFRP şerit kopmasının daha detaylı incelenebilmesi için temele açılmış olan ankraj delikleri kırıcı yardımı ile açılmıştır (Şekil A.13). Herhangi bir sıyrılmanın meydana gelmediği, AFRP şeritlerin şekildeğiştirmelerin toplandığı kolon-temel birleşiminden koptuğu gözlenmiştir.

Hidrolik yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 : LAM numunesine ait yatay yük-şekildeğiştirme ilişkisi.

4.4.3 LAM-LAM numunesi

Deney, 04.01.2012 tarihinde beton 63 günlük ve silindir beton basınç dayanımı 10,32 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi durumu Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12 : LAM-LAM numunesinin deney başlangıcında görünümü.

Deney esnasında ilk olarak hedeflenen % 0,10 öteleme oranı ile itme uygulandığında LAM numunesine benzer şekilde herhangi bir çatlak oluşmadığı gözlenmiştir. % 0,50 öteleme oranı ile itme uygulandığında çekme alan bölgede kolon tabanında eğilme çatlakları gözlenmiştir.

Ayrıca % 2 öteleme oranı ile çekme uygulaması ile % 3 öteleme oranı ile itme uygulaması aralığında boyuna donatıların tamamında akmanın başladığı gözlenmiştir. Enine donatılarda ise akma meydana gelmemiştir.

LAM numunesinde olduğu gibi numuneye % 3 öteleme oranı ile itme uygulandığında kolon tabanındaki ayrılma haricinde herhangi bir deformasyon tespit edilmemiştir. LAM numunesine benzer şekilde % 3 öteleme oranı ile itme uygulamasına giderken kolon numunesinden şiddetli olarak duyulan ses duyulmuş ve bu ses ile birlikte yükte ani düşme meydana gelmiştir. Bu sesin meydana gelme sebebi, itme sırasında çekmeye maruz kalan temele ankre edilmiş AFRP şeritlerin kopması olarak belirlenmiştir. Fakat LAM numunesinden farkı AFRP şeritlerin kopma anına kadar daha fazla yük taşıması olmuştur. % 3 öteleme oranı ile itme uygulamasından, % 3 öteleme oranı ile çekme uygulamasına gidilirken aynı

şekilde şiddetli bir ses duyulmuş ve yükte düşme meydana gelmiştir. Bundan sonraki öteleme oranlarında ise AFRP şeritler ile eğilme dayanımı arttırılan numune, şeritlerin kopması ile REF numunesine benzer bir davranış göstermiştir. % 8 öteleme oranı ile itme uygulaması sonrası numune görünümü Şekil 4.13’de sunulmuştur.



Şekil 4.13 : LAM-LAM numunesi % 8 itme öteleme oranı sonrası kolon-temel birleşimi.

Numuneye % 8 öteleme oranı ile çekme uygulanması sonrasında numune üzerinde kalıcı yerdeğiştirme olduğu görülmüş ve ölçümler sonucu bu deformasyon değeri yük 0 kN olduğu anda -59,50 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15).



Şekil 4.14 : LAM-LAM numunesi deney sonrası ($P= 0$ kN, $\delta = -59,50$ mm).

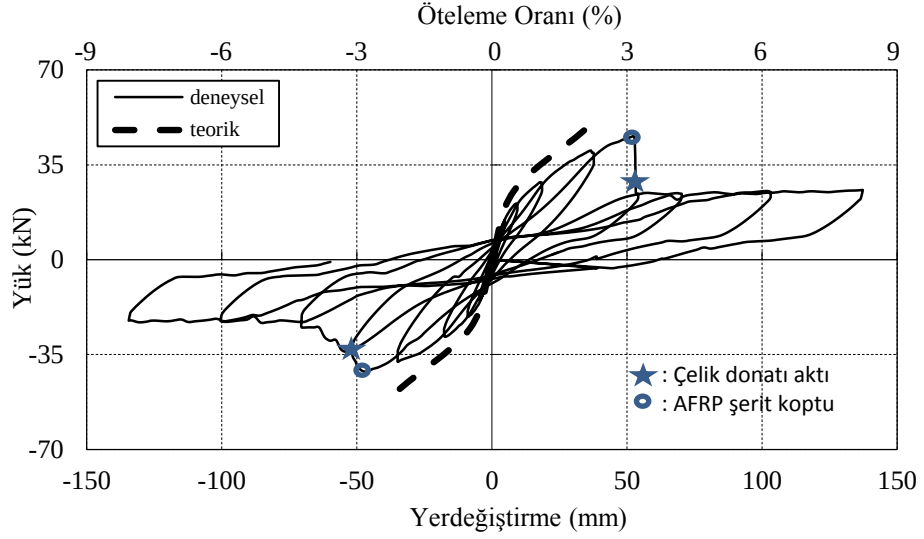


Şekil 4.15 : LAM-LAM numunesi deney sonrası kolon-temel birleşimi.

LAM-LAM numunesinde % 3 öteleme oranına kadar AFRP şeritte deformasyon meydana gelmiş ve % 3 öteleme oranına giderken AFRP şeritlerin kopması ile birlikte çelik donatılardaki şekildeğiştirme değerinde artış gözlenmiştir. LAM-LAM numunesinin, REF numunesine göre taşıdığı yük oranı % 84 kadar artmıştır. Ancak bu artış ankre edilmiş bulunan AFRP şeritlerin % 3 öteleme oranına giderken kopması ile birlikte numunenin bu davranışını devam ettirmesini engellemiş ve bu noktadan sonra yükün düşmesi ile beraber REF numunesi gibi davranmasına neden olmuştur. AFRP şeritler, şekildeğiştirmelerin en fazla olduğu kolon-temel birleşiminden kopmuştur.

Deney devam ederken kolon numunesine uygulanmış olan CFRP kumaş nedeni ile kolon üzerinde oluşan eğilme çatlakları tespit edilememiştir. Bundan dolayı deneyden sonra kenara ayrılmış olan kolon numunelerinin taban yüzeyinden itibaren 60 cm'lik yüzeyi spiral ile kesilip açılarak bu bölgede meydana gelen ve deney sırasında gözlenemeyen eğilme çatlaklarının kontrolü yapılmıştır ve çok belirgin bir çatlak tespit edilememiştir. Bu gözlemler sonucunda kolon numunesinde oluşan bütün hasarın kolon tabanında olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil A.14). Bu hasar tespit incelemesinden sonra, numunelerde yük artışına AFRP şeritlerin sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Ankre edilmiş olan AFRP şerit kopmasının daha detaylı incelenebilmesi için temele açılmış olan ankraj delikleri kırıcı yardımı ile açılmıştır (Şekil A.15). Herhangi bir sıyrılmanın meydana gelmediği, AFRP şeritlerin şekildeğiştirmelerin toplandığı kolon-temel birleşiminden koptuğu gözlenmiştir.

Hidrolik yükveren ve aynı eksenindeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 : LAM-LAM numunesine ait yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi.

4.4.4 LAM-PB numunesi

Deney, 06.01.2012 tarihinde beton 65 günlük ve silindir beton basınç dayanımı 10,32 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi son hali Şekil 4.17’da görülmektedir.

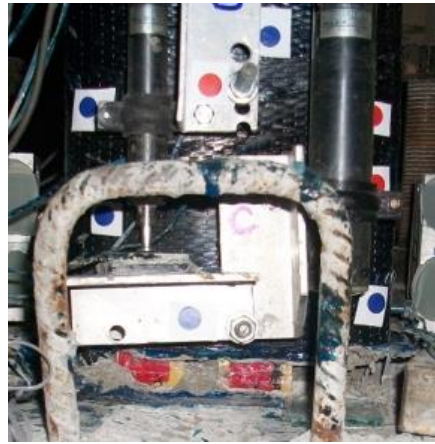


Şekil 4.17 : LAM-PB numunesinin deney başlangıcında görünümü.

Deney esnasında ilk olarak hedeflenen % 0,10 öteleme oranı ile itme uygulandığında LAM numunesine benzer şekilde herhangi bir çatlak oluşmadığı gözlenmiştir. %

0,25 öteleme oranı ile itme uygulandığında çekme alan bölgede kolon tabanında eğilme çatlağı gözlenmiştir.

Ayrıca % 2 öteleme oranı ile çekme uygulaması ile % 3 öteleme oranı ile itme uygulaması aralığında boyuna donatıların tamamında akmanın başladığı gözlenmiştir. Enine donatılarda ise akma meydana gelmemiştir. LAM numunesinde olduğu gibi numuneye % 3 itme öteleme oranına kadar kolon tabanındaki ayrılma haricinde herhangi bir deformasyon tespit edilmemiştir. % 3 itme ve çekme öteleme oranlarına gidilirken şiddetli bir ses duyulmuş ve yükte düşme meydana gelmiştir. Bundan sonraki öteleme oranlarında ise yük her seferinde dahada azalmaya devam etmiştir. Bu sesin meydana gelme sebebi, itme sırasında çekmeye maruz kalan temele ankre edilmiş AFRP şeritlerin kopması olarak belirlenmiştir. Bundan sonraki öteleme oranlarında ise AFRP şeritler ile eğilme dayanımı arttırılan numune, şeritlerin kopması ile REF numunesine benzer bir davranış göstermiştir. % 8 öteleme oranı ile itme uygulanması sonrası numune görünümü Şekil 4.18’de sunulmuştur.



Şekil 4.18 : LAM-PB numunesi % 8 öteleme oranı sonrası itmede kolon-temel birleşimi.

Numuneye % 8 öteleme oranı ile çekme uygulanması sonrasında numune üzerinde kalıcı yerdeğiştirme olduğu görülmüş ve ölçümler sonucu bu deformasyon değeri yük 0 kN olduğu anda -83,10 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).



Şekil 4.19 : LAM-PB numunesi deney sonrası ($P=0$ kN, $\delta = -83,10$ mm).



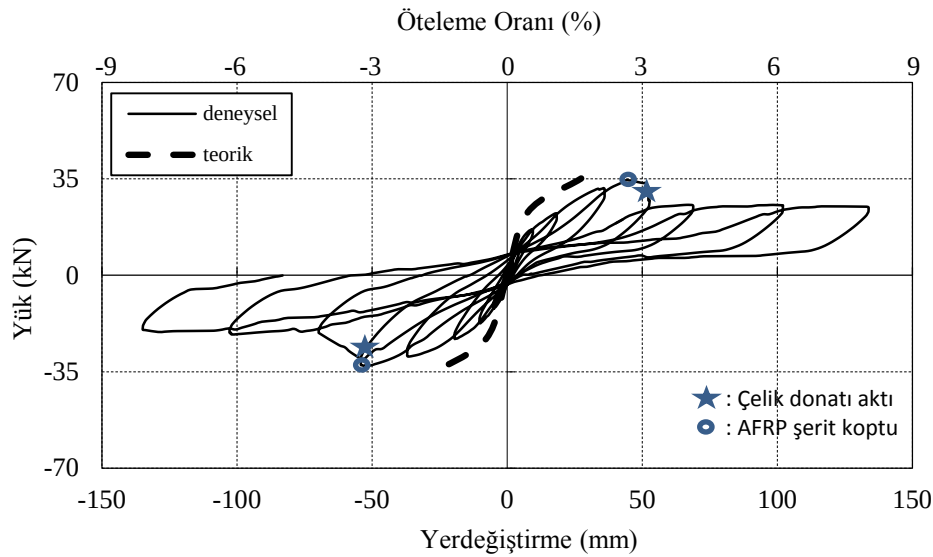
Şekil 4.20 : LAM-PB numunesi deney sonrası kolon tabanı ile temel yüzeyi.

LAM-PB numunesinde % 3 öteleme oranına kadar AFRP şeritte deformasyon meydana gelmiş ve % 3 öteleme oranına giderken AFRP şeritlerin kopması ile birlikte çelik donatılardaki şekildeğiştirme değerinde artış gözlenmiştir. LAM-PB numunesinin, REF numunesine göre taşıdığı yük oranı % 41 kadar artmıştır. Ancak bu artış ankre edilmiş bulunan AFRP şeritlerin % 3 öteleme oranına giderken kopması ile birlikte numunenin bu davranışını devam ettirmesini engellemiş ve bu noktadan sonra yükün düşmesi ile beraber REF numunesi gibi davranmasına neden olmuştur. AFRP şeritler şekildeğiştirmelerin en fazla olduğu kolon-temel birleşiminden kopmuştur.

Deney devam ederken kolon numunesine uygulanmış olan CFRP kumaş nedeni ile kolon üzerinde oluşan eğilme çatlakları tespit edilememiştir. Bundan dolayı

deneyden sonra kenara ayrılmış olan kolon numunelerinin taban yüzeyinden itibaren 60 cm'lik yüzeyi spiral ile kesilip açılarak bu bölge meydana gelen ve deney sırasında gözlenemeyen eğilme çatlaklarının kontrolü yapılmıştır ve çok belirgin bir çatlak tespit edilmemiştir. Bu gözlemler sonucunda kolon numunesinde oluşan bütün hasarın kolon tabanında olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil A.16). Bu hasar tespit incelemesinden sonra, numunelerde yük artışının AFRP şerit ile sağlandığı tespit edilmiştir. Ankre edilmiş olan AFRP şerit kopmasının daha detaylı incelenebilmesi için temele açılmış olan ankraj delikleri kırıcı yardımı ile açılmıştır (Şekil A.17). Herhangi bir sıyrılmanın meydana gelmediği, AFRP şeritlerin şekildeğiştirmelerin toplandığı kolon-temel birleşiminden koptuğu gözlenmiştir.

Hidrolik yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.21'de verilmiştir.



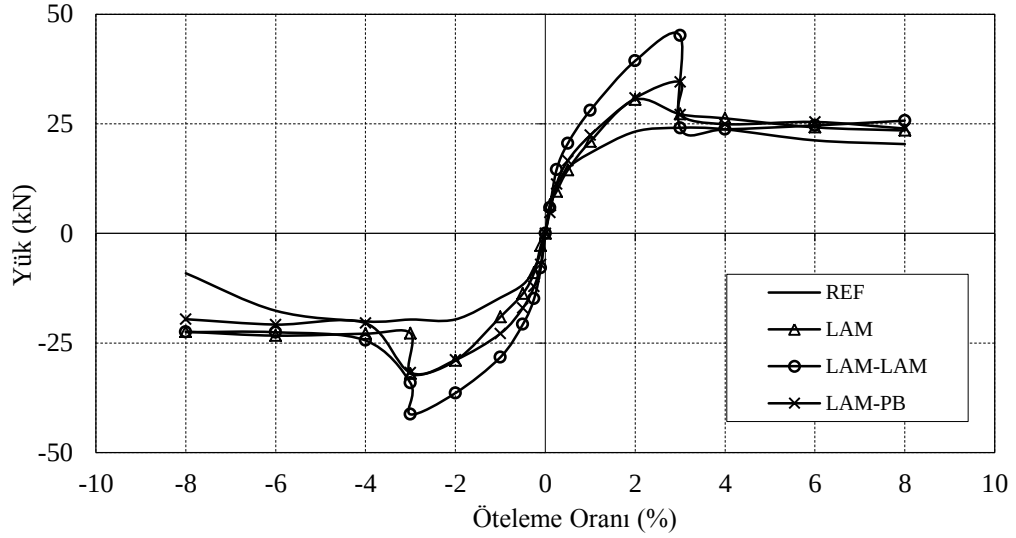
Şekil 4.21 : LAM-PB numunesine ait yatay yük-yerdeğiştirme ilişkisi.

4.5 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deney sonuçları histeretik yük-yerdeğiştirme ilişkisi, çelik donatı ve AFRP şerit şekildeğiştirme ilişkileri, enerji yutma kapasiteleri, moment-eğrilik ilişkileri, hasar ilerlemesi ve dağılımları ve kalıcı yerdeğiştirme değerleri açısından incelenmiştir.

4.5.1 Yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Numunelerin zarf eğrileri şekil 4.22’de sunulmuştur.



şekil 4.22 : Kolon numunelerinin zarf eğrileri.

Kolonlarda görülen hasarların meydana geldiği öteleme oranları izelge 4.1’de verilmiştir (+ itme uygulanmasını, - ise çekme uygulanmasını ifade etmektedir.).

Çizelge 4.1 : Kolonlarda hasar mekanizmaları (Sayılar teleme oranıdır %).

Hasar Mekanizması	Numuneler			
	REF	LAM	LAM-LAM	LAM-PB
Boyuna elik donatıların akması	2	3	3	3
Beton yüzeyin ezilmesi	3	-	-	-
Beton yüzeyin dökülmesi	-6	-	-	-
AFRP şeridin kopması	-	3	3	3

REF, LAM, LAM-LAM, LAM-PB numunelerine uygulanan öteleme oranı sonrasında hedef yerdeğiştirme değerleri ve ulaşılan kuvvet değerleri izelge 4.2’de sunulmuştur (+ itme uygulanmasını, - ise çekme uygulanmasını ifade etmektedir.).

Çizelge 4.2 : Yük-yerdeğiştirme deney özeti.

Numeneler		REF	LAM	LAM-LAM	LAM-PB
Öteleme oranı	δ (mm)	P (kN)	P (kN)	P (kN)	P (kN)
% 0,10	1,650	5,14	6,33	5,84	4,58
-% 0,10	-1,650	-3,99	-2,61	-7,72	-6,91
% 0,25	4,125	10,35	8,79	14,16	10,92
-% 0,25	-4,125	-7,83	-8,52	-14,57	-11,75
% 0,50	8,250	14,24	13,69	19,82	15,99
-% 0,50	-8,250	-10,98	-12,90	-20,06	-16,25
% 1,00	16,500	17,01	19,56	26,69	21,02
-% 1,00	-16,500	-13,31	-15,74	-24,54	-21,34
% 2,00	33,000	20,38	27,53	36,49	28,47
-% 2,00	-33,000	-16,90	-25,79	-35,05	-25,85
% 3,00	49,500	17,35	20,27	19,71	23,18
-% 3,00	-49,500	-15,66	-17,83	-29,86	-27,26
% 4,00	66,000	17,81	20,42	18,29	19,19
-% 4,00	-66,000	-14,96	-16,81	-17,92	-14,52
% 6,00	99,000	13,52	16,80	16,28	16,74
-% 6,00	-99,000	-9,95	-14,10	-14,46	-11,96
% 8,00	132,000	7,68	13,60	14,71	13,13
-% 8,00	-132,000	-0,44	-11,12	-12,27	-9,37

Şekil 4.22 ve Çizelge 4.3’de görüleceği üzere, REF numunesi teorik eğilme kapasitesine ulaşmıştır ve sünek bir davranış sergilemiştir. Çizelge 4.3’de gözlenen göçme modları, teorik öngörüler doğrultusunda tespit edilen göçme modlarını içermektedir.

Çizelge 4.3 : Kolonların göçme modları ve teorik ve deneysel yatay yük kapasiteleri.

Numuneler	REF	LAM ve LAM-PB	LAM-LAM
Teorik yatay yük kapasitesi (kN)	20,92	35,79	46,94
Deneysel yatay yük kapasitesi (kN)	24,50	33,80 (LAM numunesi) 34,60 (LAM-PB numunesi)	45,10
Teorik göçme modu	A, sonra E	A, Ç	A, önce Ç
Gerçekleşen göçme modu	A, sonra E	A, K	A, KA
Kesme kuvveti (kN)	100,1 (V_r)	260,8 (V_{r-frp})	

A : Donatının akması

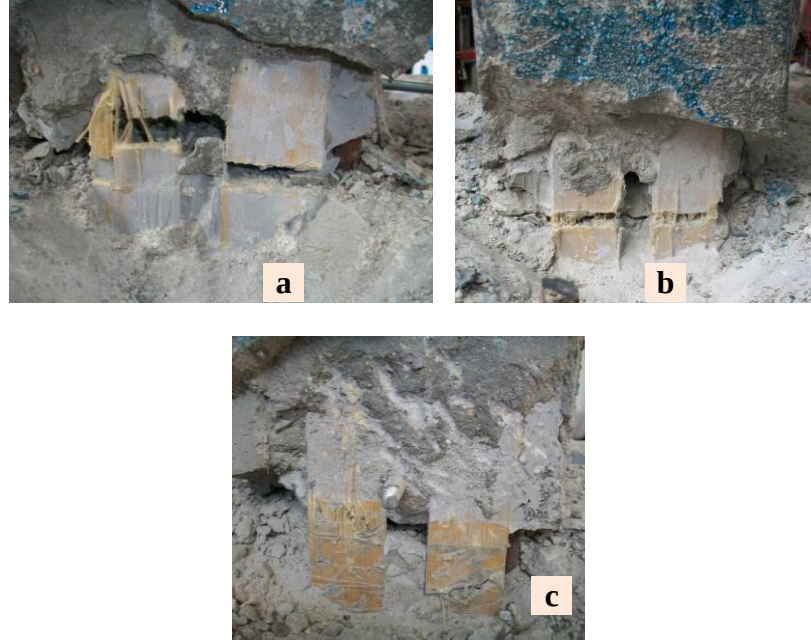
E : Beton yüzeyi ezilmesi

Ç : AFRP şeritin maksimum çekme kapasitesine ulaşması

K : AFRP şeritin kopması

KA : AFRP şerit ve ilave şeridin ikisinde kopması

AFRP şerit ile güçlendirilmiş LAM numunesinde % 3 ve üzeri öteleme oranlarına kadar yatay kuvvet artmıştır. Bu öteleme oranında dayanım artışı REF numunesine göre % 38 civarlarındadır. Temel ve kolonun birleşimindeki AFRP şeritlerin kopmasından dolayı % 3 ve üzeri öteleme oranlarında ani dayanım kaybı olmuştur (Şekil 4.23a).



Şekil 4.23 : Deney sırasında AFRP şeritin (a) % 3 öteleme oranında LAM numunesi, (b) % 3 öteleme oranında LAM-LAM numunesi, (c) % 3 öteleme oranında LAM-PB numunesi.

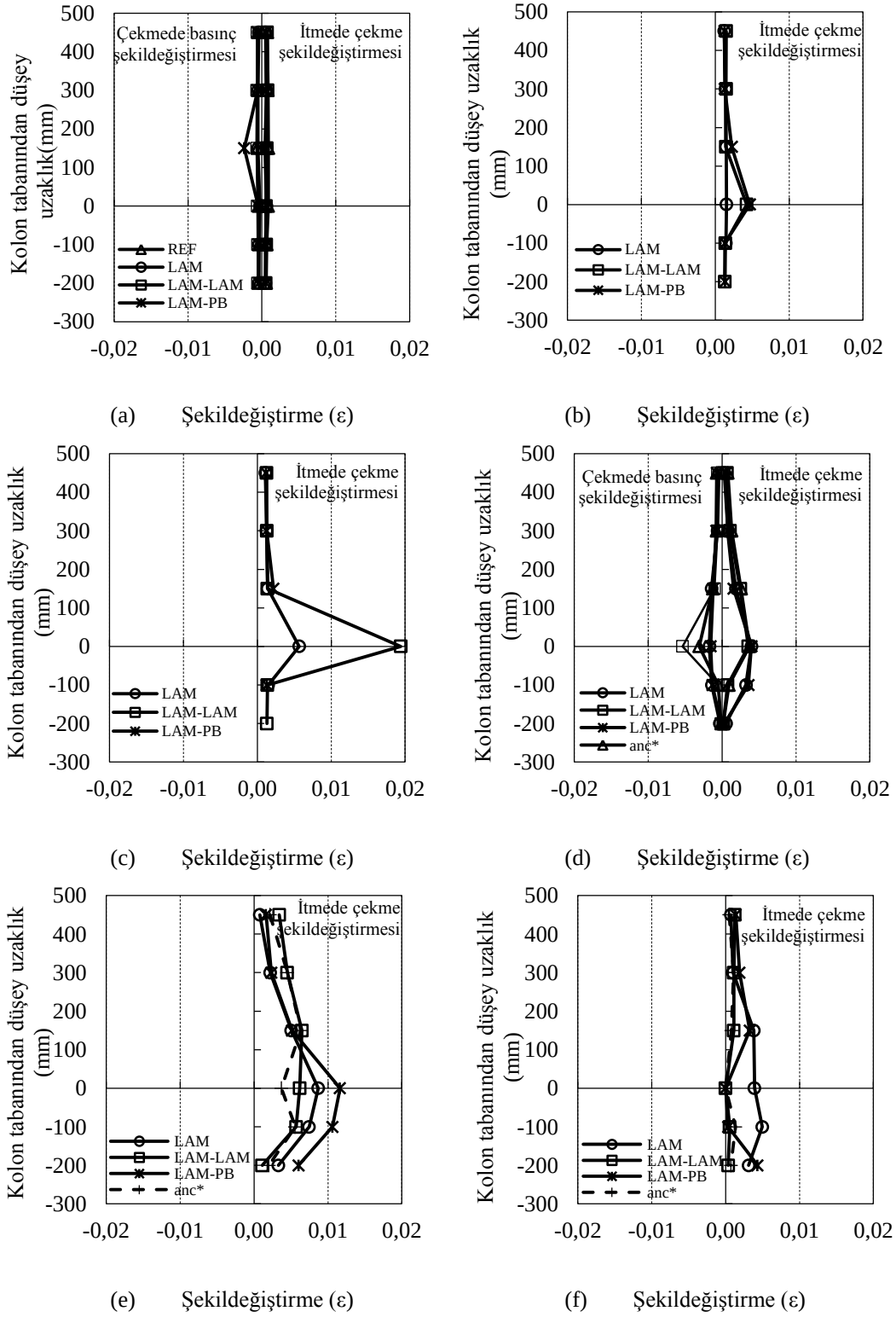
Şekil 4.22’de görüleceği üzere, LAM-LAM numunesi REF ve diğer güçlendirilmiş numunelere göre daha iyi bir performans sergilemiştir. LAM-LAM numunesi, REF LAM ve LAM-PB numunelerine göre yaklaşık olarak sırasıyla 1,84, 1,33 ve 1,30 kat daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. AFRP şerit ve ilave AFRP şerit aynı düzlemde kopmuştur (Şekil 4.23b). LAM-LAM numunesinin diğer numunelere oranla yüksek dayanıma sahip olmasının sebebi ilave AFRP şerit kullanılmasıdır. LAM-PB numunesinin taşıyabileceği en fazla yatay yük kapasitesi LAM numunesine benzemekte olup, % 3 öteleme oranına giderken AFRP şeritler kopmuştur. Bu öteleme oranında dayanım artışı REF numunesine göre yaklaşık olarak % 41’dir. Temel ve kolonun birleşimindeki AFRP şeritlerin kopmasından dolayı % 3 ve üzeri öteleme oranlarında ani dayanım kaybı meydana gelmiştir (Şekil 4.23c). LAM-PB numunesi ile LAM numunesi karşılaştırıldığında kısmi süreksizlik uygulamasının yatay yük kapasitesine etki etmediği gözlenmiştir. Ancak, LAM-PB numunesi ileri öteleme oranlarına kadar (% 8 öteleme oranı) sınırlı plastik deformasyonu ile daha sıkışmış histeri eğrileri sunarak, deprem performansını etkilemiştir. Bu nedenle, bu tip ankraj sistemi kalıcı yer değiştirmeyi (kalıcı hasarı) sınırlamak için kullanılabilir.

Çekme ve itmede yaklaşık % 3 öteleme oranına gidildikten sonra, güçlendirilmiş kolon dayanımı giderek azalmakta olup, % 3 öteleme oranından sonra güçlendirilmiş numuneler REF numunesi gibi davranmıştır.

İlki ve Kumbasar (2001), Bournas ve Triantafillou (2009), ve Vrettos ve diğ. (2013) tarafından yapılan deneylerde LP'nin kopmasından sonra, güçlendirilmiş kolonlar dayanım azalması açısından aynı davranışı göstermekte olup LP kopma öteleme oranları sırası ile % 2, % 4 ve % 2,50'dir. Kolonların, tüm yüksekliği boyunca enine yönde CFRP kumaş ile sargılanmış olması sebebi ile tüm hasar kolon temel birleşim bölgesinde yığılmış, çatlak genişliği kolon ve temelin birleştiği yerde birkaç santimetreye ulaşmıştır. CFRP kumaş ile enine doğrultuda yapılan sargılama sonucunda plastik deformasyon dağılımı potansiyel plastik mafsallarda boyuna önlenmektedir. Bu sebeple, deprem durumunda bu tip hasarlar avantajlı olmayabilir. Plastik deformasyonların temel ile kolon birleşim bölgesinde birikimi kolonun ötelenme kapasitesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sebeple, bu tür öteleme oranı kapasitesini azaltan durumlardan kaçınılmalıdır. Kolon boyunca enine doğrultuda CFRP kumaş sargılama yöntemi ile plastik deformasyonların daha iyi dağılımı sağlanabilir.

4.5.2 Çelik donatı ve AFRP şerit şekildeğiştirmeleri

Şekildeğiştirme ölçümleri, enine ve boyuna çelik donatı ile boyuna AFRP şeritler üzerindeki şekildeğiştirmeölçerler ile yapılmıştır. AFRP şeritlerin numuneye sağlamış olduğu eğilme kapasitesi artışı , AFRP şeritlerinin üzerinden ölçülen şekildeğiştirmeler ile görülebilmektedir (Şekil 4.24). Deney sırasında AFRP şerit üzerinde bulunan şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen en fazla AFRP şerit şekildeğiştirme değeri, AFRP şerit kopmadan önce % 1 öteleme oranında iken elde edilmiştir. Yapılan ölçüm üreticinin beyan ettiği nihai şekildeğiştirme değerinin yaklaşık % 43'üne karşılık gelmektedir. ACI 440-2R-08 (2008)'e göre monoton eğilme yükleme (ki bu çalışmada monoton yükleme durumu söz konusu değildir) altındaki NSM yöntemi ile LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörünün % 70 olarak kullanılması önerilmektedir.



Şekil 4.24 : Boyuna çelik donatıların şekildeğiştirme dağılımı (a) % 1 öteleme oranında, (b) AFRP şerit kopmadan önce, (c) AFRP şerit koptuktan sonra, ve AFRP şeritlerin şekildeğiştirme dağılımı (d) % 1 öteleme oranında, (e) AFRP şerit kopmadan önce, (f) AFRP şerit koptuktan sonra (anc*: LAM-LAM numunesine ait ilave AFRP şeridin şekildeğiştirme ölçümleri).

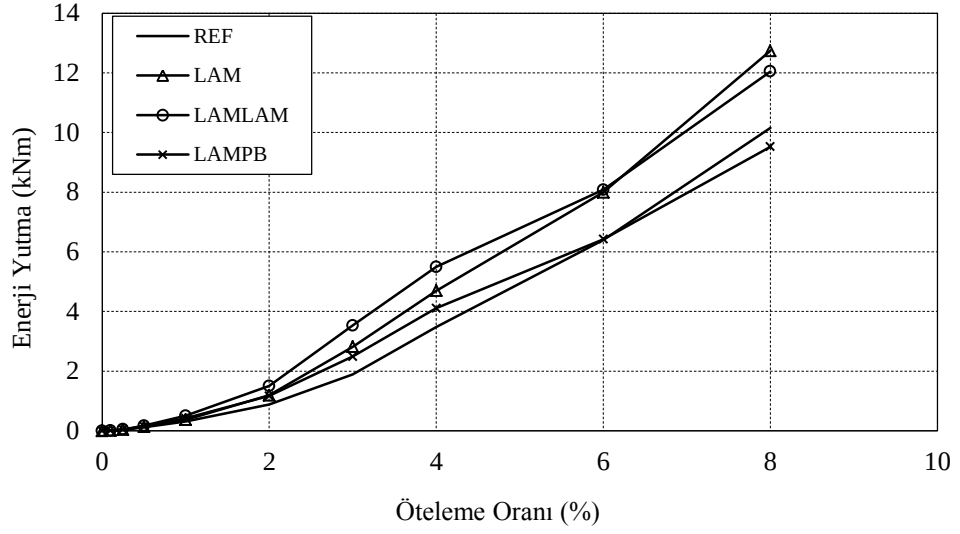
Vrettos ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonların eğilmeye karşı güçlendirilmesinde boyuna donatı olarak CFRP kumaş kullanılmıştır. Yapılan deney sonucunda elde edilen şekildeğiştirmeler (üretici tarafından önerilen nihai şekildeğiştirme değerinin yaklaşık % 30'una karşılık gelmektedir) ACI 440-2R-08 (2008) tarafından önerilen şekildeğiştirme azaltma faktörü değerinin oldukça altında elde edilmiştir. Vrettos ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel betonarme kesit teorisinden kuvvet denge, şekildeğiştirme uyumluluğu ve malzeme bünye ilişkileri kullanılarak kolon tabanındaki kesitin analizi ile şekildeğiştirmeler elde edilmiştir.

AFRP şerit koştuktan sonra AFRP şerit şekildeğiştirmelerinin azaldığı ve şekildeğiştirmelerin boyuna çelik donatılara aktarıldığı gözlenmiştir. Çelik donatıların şekildeğiştirmeleri yüksekliği boyunca belirgin bir artış göstermektedir (Şekil 4.24c ve Şekil 4.24f). AFRP şeritlerin % 3 öteleme oranında kopması sebebi ile kolonların dayanımları azalmadan önce tüm çelik donatılar öteleme oranı % 2-3 arasında iken akmıştır. Bu gözlem sonucunda, çekme durumunda çelik donatıların akma değerine ulaşması nedeni ile gevrek kırılma durumu olmamıştır. Kalıcı hasar yaklaşık % 3 öteleme oranı ve devamında ortaya çıkmıştır. Düşük beton basınç dayanımına sahip betonarme kolonlu yapıların sadece şiddetli depremlere maruz kaldığında, % 3 ve üzeri öteleme oranlarına denk gelen yerdeğiştirme yapabilme durumunun gerçekleşeceği bilinmelidir. AFRP şeritler yaklaşık % 3 öteleme oranına giderken koştuktan sonra, kolon donatı etkisi ile % 6-8 öteleme oranlarına kadar yatay yükleri taşıyabildiği gözlenmiştir. AFRP şeritlerin kopmasından sonra yük-yerdeğiştirme ilişkileri neredeyse yatay olarak devam etmiştir. Öte yandan hiçbir enine çelik donatı akmamıştır (şekildeğiştirme değerleri 0,00004 ile 0,0006 arasındadır) ve uygulanan eksenel yük (kolonun % 20 eksenel yük kapasitesi kadar) ve kesme kuvvetlerinin nispeten daha düşük seviyede olmaları nedeni ile enine doğrultuda sarılan CFRP kumaşda herhangi bir hasar gözlenmemiştir.

4.5.3 Enerji yutma kapasitesi

Yük-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde her iki adım arasında kalan bölgenin alanı hesaplanarak o adımdaki enerji yutma miktarındaki artış bulunmuştur. Bu şekilde her adım için hesaplanan enerji yutma miktarlarının deneyin ilk adımından son adımına kadar kümülatifi alınarak istenilen öteleme oranına denk gelen enerji yutma

kapasitesi hesaplanmıştır. Her öteleme oranı için hesaplanan kümülatif enerji yutması Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25 : Enerji yutma kapasiteleri.

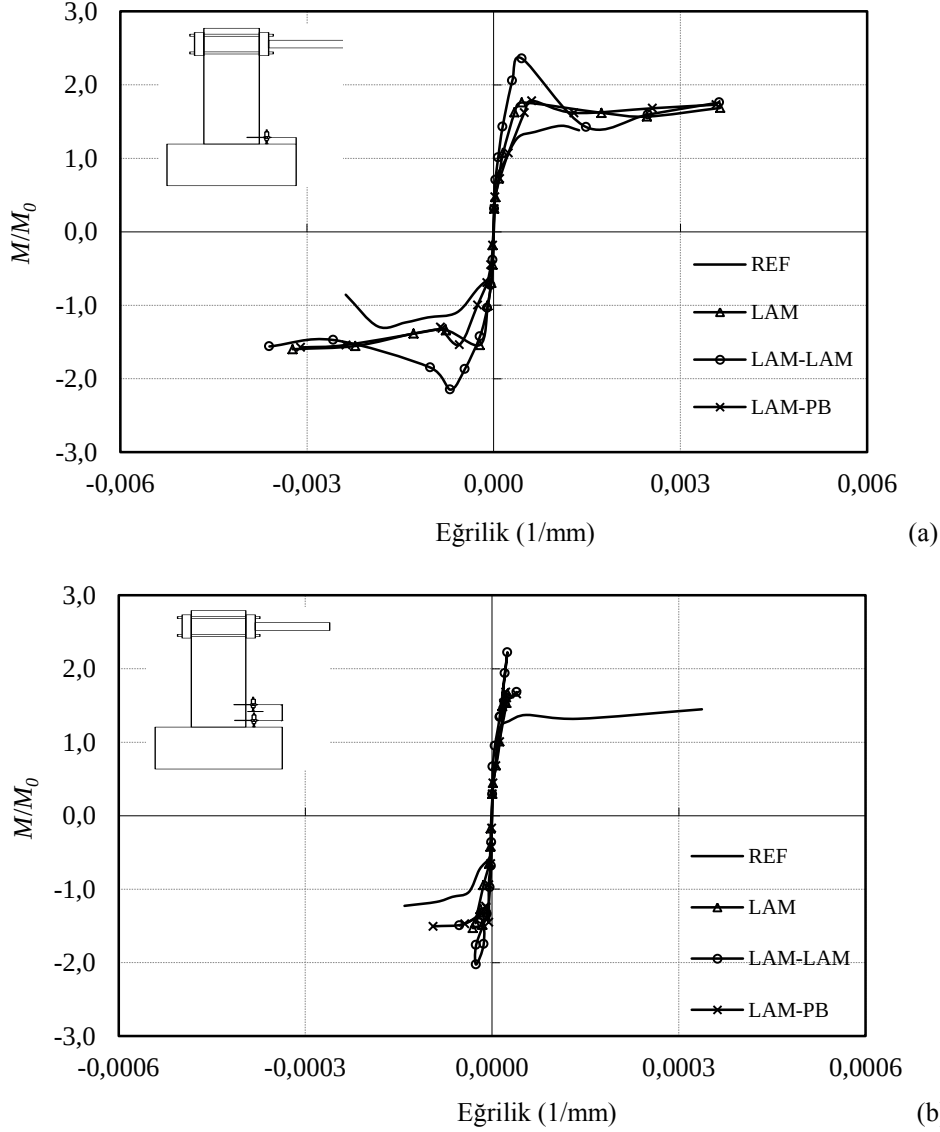
Şekilde görüldüğü gibi, LAM-LAM numunesi AFRP şeritler kopana kadar yüksek yatay yük taşıma kapasitesi nedeni ile en yüksek enerji yutma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, LAM-PB numunesinde yapışmanın olmadığı bölgede daha büyük elastik deformasyondan kaynaklanan daha az toplam yerdeğiştirme yaptığı için LAM numunesinin enerji yutma kapasitesi LAM-PB numunesinden daha fazladır. AFRP şerit koptuktan sonra, yatay yük kapasitesi açısından LAM ve LAM-LAM numuneleri REF numunesi gibi davrandıklarından LAM ve LAM-LAM numunelerinin enerji yutma kapasiteleri yaklaşık olarak birbiri ile aynıdır.

Şekil 4.25’te görüldüğü üzere, AFRP şerit koptuktan sonraki numune davranışları incelendiğinde, LAM-PB numunesinin sıkışmış histerisis eğrisi sebebi ile REF numunesine benzer enerji miktarı dağılımına sahip olduğu gözlenmiştir.

4.5.4 Moment-eğrilik ilişkisi

XTRACT programında temsili olarak tasarlanan REF, LAM, LAM-LAM ve LAM-PB numunelerine ait moment-eğrilik ilişkileri sırasıyla Şekil B.1, Şekil B.2, Şekil B.3 ve Şekil B.4’te verilmiştir.

Yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerler sayesinde bütün betonarme kolonların kritik kesitleri için elde edilen ortalama moment-eğrilik ilişkileri Şekil 4.26’da sunulmaktadır.



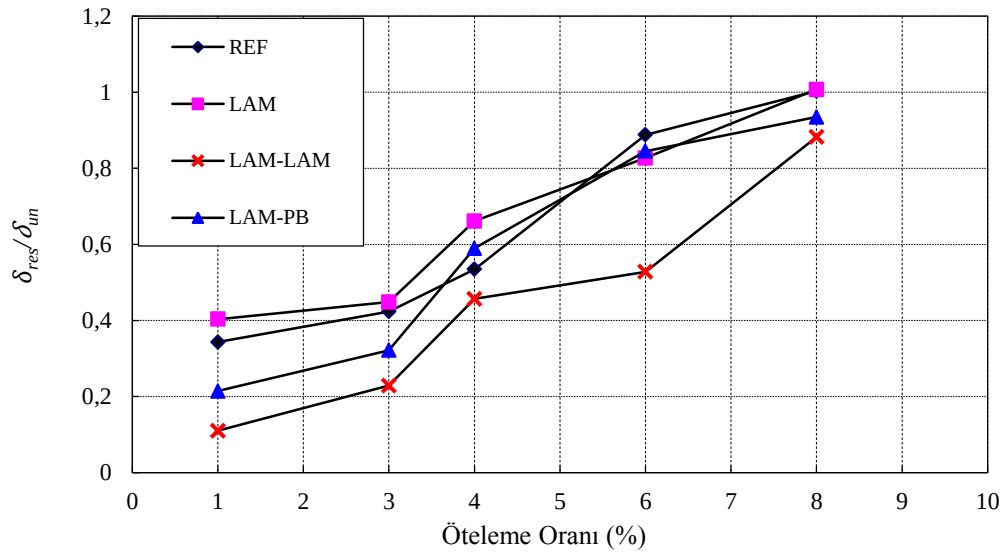
Şekil 4.26 : Moment-eğrilik ilişkileri (a) 0-20 mm, (b) 20-150 mm temelden yukarı.

Numunede oluşan hasarın daha detaylı olarak tespit edilebilmesi ve numunenin elastik ötesi şekildeğiştirme yeteneği olarak ifade edilen süneklik kapasiteleri açısından karşılaştırılması amacı ile deneysel moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Deneysel moment-eğrilik ilişkilerinin hesaplanması için, temelden yukarıda 0-20 mm, 20-150 mm, ve 150-300 mm boyunca elde edilen ortalama eğrilik değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 4.26’da görüldüğü üzere, güçlendirilmiş numuneler için 20-150 mm deki yerdeğiştirmeölçerlerden alınan veriler sonucunda ortalama

eğrilik $5,10^{-5}$ (1/mm) iken, 0-20 mm deki yerdeğiştirmeölçerlerden alınan veriler sonucunda ortalama eğrilik $5,10^{-3}$ (1/mm) dir. 150-300 mm'deki yerdeğiştirmeölçerlerden alınan veriler sonucunda kolonun eğrilik değeri çok küçük olduğundan şekilde gösterilmemiştir. Güçlendirilmiş kolonların moment-eğrilik ilişkilerine göre hasar özellikle temel üst kotunun 0-20 mm üzerinde toplanmıştır. Öte yandan, REF numunesinde deformasyonlar temel yüzeyi üzerinden kolon yüksekliğinin yaklaşık üçte biri boyunca dağılmıştır. Güçlendirilmiş numunelerde deney sonrasında yapılan incelemelerde, beton ezilmesi ve çatlak (temel ve kolon birleşimindeki ana çatlak dışında) gözlenmemiştir. Moment-eğrilik ilişkileri incelendiğinde REF numunesinin güçlendirilmiş olan numunelere göre daha sünek olduğu ancak, bunun yanı sıra moment kapasitesinin de güçlendirilmiş numunelere göre daha az olduğu görülmektedir.

4.5.5 Kalıcı yerdeğiştirme

Numunelerin kalıcı yerdeğiştirme öteleme oranı ilişkileri Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.27'de kalıcı yerdeğiştirme (δ_{res}) hedef yerdeğiştirme adımı ile (δ_{un}) normalize edilmiştir. Kalıcı yerdeğiştirme, itme hedef yerdeğiştirmesi değerinden çekme hedef yerdeğiştirmesi değerine gidilirken yatay yükün sıfır olduğu andaki yerdeğiştirme değerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.27 : Numunelerin kalıcı hasar-öteleme oranı ilişkisi.

Deney boyunca öteleme oranı ile doğru orantılı olarak numuneler üzerindeki kalıcı yerdeğiştirmelerin arttığı gözlenmektedir. Başlangıç öteleme oranlarında kalıcı yerdeğiştirme oranının az olma sebebi olarak kolonların elastik davranış yaptıklarından kaynaklanmaktadır. Ancak, ileri öteleme oranlarına gidildikçe numune elastik davranış bölgesi dışına çıkarak numunede plastik şekildeğiştirmeler artmaya başlamaktadır.

şekil 4.27’de görüleceği üzere, REF numunesi kalıcı yerdeğiştirme oranı güçlendirilmiş numunelerin kalıcı yerdeğiştirme oranından daha fazladır. Buna ek olarak, ilk adımlarda güçlendirilmiş numuneler üzerinde çok daha küçük kalıcı yerdeğiştirmeler olduğu tespit edilmiştir.

Numunelere ait öteleme oranlarındaki hasar (çatlak) boyutlarını özetleyen tablo Çizelge 4.4’de sunulmaktadır (+ itme uygulanmasını, - ise çekme uygulanmasını ifade etmektedir).

Çizelge 4.4 : Hasar boyutları özeti.

Öteleme oranı	δ (mm)	Hasar Boyutları			
		REF	LAM	LAM-LAM	LAM-PB
% 0,10	1,650	-	-	-	-
-% 0,10	-1,650	-	-	-	-
% 0,25	4,125	<0,1 mm	-	-	-
-% 0,25	-4,125	<0,1 mm	-	-	-
% 0,50	8,250	0,20 mm	<0,1 mm	-	-
-% 0,50	-8,250	0,30 mm	<0,1 mm	0,30 mm	0,30 mm
% 1,00	16,500	0,60 mm	0,20 mm	0,10 mm	0,30 mm
-% 1,00	-16,500	0,70 mm	0,10 mm	0,40 mm	0,40 mm
% 2,00	33,000	2,60 mm	0,80 mm	0,10 mm	0,70 mm
-% 2,00	-33,000	2,30 mm	0,60 mm	0,40 mm	0,70 mm
% 3,00	49,500	3,70 mm	3,70 mm	3,00 mm	3,00 mm
-% 3,00	-49,500	3,50 mm	3,50 mm	1,70 mm	2,20 mm
% 4,00	66,000	5,00 mm	7,50 mm	8,00 mm	7,00 mm
-% 4,00	-66,000	3,70 mm	6,00 mm	18,00 mm	6,00 mm
% 6,00	99,000	12,00 mm	15,00 mm	17,00 mm	15,00 mm
-% 6,00	-99,000	3,80 mm	20,00 mm	20,00 mm	17,00 mm
% 8,00	132,000	Dağıldı	20,00 mm	26,00 mm	18,00 mm
-% 8,00	-132,000	Dağıldı	20,00 mm	25,00 mm	21,00 mm

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, sabit eksenel yük ve tersinir tekrarlanan yatay yükler altında düşük beton basınç dayanımına sahip betonarme kolonların eğilmeye karşı güçlendirilmeleri için ankrajlı AFRP şeritlerin etkileri incelenmiştir. AFRP şeritlerin temele ankraj yöntemi Göksu ve diğ. (2012) tarafından önerilmiştir. AFRP şeritler ile güçlendirilmiş kolonlar dışarıdan enine yönde CFRP kumaş ile sargılanmıştır. Numuneler üzerine yerleştirilen şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen veriler ışığında numune davranışları etkin bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır. Deneysel ve teorik çalışmalara dayanarak, sonuçlar/gözlemler şöyle sıralanabilir;

- REF numunesi teorik eğilme kapasitesine ulaşmış ve sünek bir davranış sergilemiştir. AFRP şerit ankre edilerek güçlendirilmiş numunelerde, %3 öteleme oranına kadar dayanım artışı sağlanmıştır. %3 öteleme oranından sonra, AFRP şeritlerin kopması ile dayanımda ani düşme meydana gelmiş ve numuneler yatay yük kapasitesi açısından REF numunesine benzer davranış sergilemiştir. LAM-PB numunesinde uygulanan ankraj tipi, yatay yük kapasitesini olumsuz etkilememiş, fakat numunede sınırlı plastik deformasyona sahip olmuştur.
- AFRP şeridin ölçülen deneysel kopma şekildeğiştirmesi, üretici tarafından verilen nihai şekildeğiştirmenin yaklaşık % 43'üne karşılık gelmektedir. ACI 440-2R-08 (2008)'de monoton yükleme koşulları altında NSM LP uygulamaları için şekildeğiştirme azaltma faktörünün % 70 alınması önerilmektedir. ACI 440-2R-08 (2008)'deki şekildeğiştirme azaltma faktörü için yapılan öneriler tersinir tekrarlanan yatay yükler altındaki davranışı da kapsayacak şekilde genişletilebilir.

Sonuç olarak, düşük beton basınç dayanımına sahip kolonlar için önerilen güçlendirme yöntemi umut vericidir.

KAYNAKLAR

- ACI 440**, 2008. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI Committee 440.
- ACI 318**, 1999. "Building code requirements for reinforced concrete and commentary", ACI Committee 318.
- Alkhardji, T. and Nanni, A.**, 1999. "Flexural strengthening of bridge piers using FRP composites", Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES), University of Missouri-Rolla.
- Antonopoulos, C. P., and Triantafillou, T. C.**, 2003. Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints. ASCE, Journal of Composites for Construction", Cilt 7, sayı. 1, Sf. 39-49.
- ASTM D3039**, 1993. "Standard test method tensile properties of polymer matrix composite materials", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- Badawi, M., and Soudki, K.**, 2009. "Fatigue behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP rods", ASCE, Journal of Composites for Construction 2009, Cilt 13, sayı. 5, Sf. 415-421.
- Bakis, C. E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E, Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., and Triantafillou, T.C.**, 2002. "Fiber-reinforced polymer composites for construction-State-of-the-Art Review", ASCE, Journal of Composites for Construction, Cilt 6, sayı. 2, Sf. 73-87.
- Barros, J.A.O. and Dias, S.J.E.**, 2006. "Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams", Cement & Concrete Composites 2006, Cilt 28, Sf. 276-292.

- Barros, J.A.O., Varmaa, R.K., Sena-Cruz, J.M., and Azevedob, A.F.M.,** 2008. “Near Surface Mounted CFRP Strips for the Flexural Strengthening of RC Columns: Experimental and Numerical Research”, *Engineering Structures*, Cilt **30**, Sf. 3412-3425.
- Barros, J.A.O., Ferreira, D.R.S.M., Fortes, A.S. and Dias, S.J.E.,** 2006. “Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening”, *Construction and Building Materials*, Cilt **20**, Sf. 478-491.
- BASF Construction Chemicals,** 2007. Product Manual, Building Systems, Sf. 60-75.
- Bournas, D.A., Triantafillou, T.C.,** 2009. “Flexural strengthening of reinforced concrete columns with near surface mounted FRP or stainless steel”, *ACI Structural Journal*, Cilt **106**, sayı. 4, Sf. 495-505.
- Bournas, D.A., Triantafillou, T.C.,** 2011. “Bond strength of lap spliced bars in concrete confined with composite jackets”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **15**, sayı. 2, Sf. 156-167.
- Bousias S.N., Triantafillou T.C., Fardis M.N., Spathis L., and O'Regan B.A.,** 2004. “Fibre-Reinforced Polymer Retrofitting of Rectangular Reinforced Concrete Columns with or without Corrosion,” *ACI Structural Journal*, Cilt **101**, sayı. 4, Sf. 512-520.
- Castro, E.K., Melo, G.S., and Nagato, Y.,** 2007. “Flexural strengthening of RC “t” beams with near surface mounted (NSM) FRP reinforcements”, *Proc. Int. Symposium on FRP Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Greece, 16-18 July 2007*.
- Ceroni, F.,** 2010. “Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials”, *Construction and Building Materials*, Cilt **24**, sayı. 9, Sf. 1547-1559.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N.,** 2004. “Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı”, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Profesörleri, İstanbul.

- Celep, Z. ve Kumbasar, N.,** 2005. “Betonarme Yapılar”, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Profesörleri, İstanbul.
- Chang, S., Li, Y., and Loh, C.,** 2004. “Experimental study of seismic behaviors of as-built and carbon fiber reinforced plastics repaired reinforced concrete bridge columns”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **9**, sayı. 4, Sf. 391-402.
- Chikh, N., Foret, G., Bousalem, B. and Firas, S.,** 2008. “Analysis of reinforced concrete members strengthened with near-surface-mounted CFRP”, *11DBMC Proc. Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components, Istanbul-Turkey, 11-14 May 2008*.
- DBYBHY,** 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara*.
- De Lorenzis, L.,** 2002. “Strengthening of RC Structures with Near Surface Mounted FRP Rods”, *ACI Structural Journal*, Cilt **99**, sayı. 2, Sf. 123-132.
- De Lorenzis, L., Lundgren, K., and Rizzo, A.,** 2004. “Anchorage length of near-surface mounted fiber reinforced polymer bars for concrete strengthening-experimental investigation and numerical modelling”, *ACI Structural Journal*, Cilt **101**, sayı. 2, Sf. 269-278.
- De Lorenzis, L. and Teng, J.G.,** 2007. “Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures”, *Composites Part B*, Cilt **38**, Sf. 119-143.
- El-Hacha R., and Rizkalla S.H.,** 2004. “Near-Surface-Mounted Fibre-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures”, *ACI Structural Journal*, Cilt **101**, sayı. 5, Sf. 717-26.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G.,** 2004. “Betonarme”, Evrim Yayınları, İstanbul.
- Göksu, C., Polat, A., and İlki, A.,** 2012. “Attempt for seismic retrofit of existing sub-standard RC members under reversed cyclic flexural effects”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Cilt **16**, sayı. 3, Sf. 286-299.

- Hassan, T., and Rizkalla, S.,** 2003. "Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *ASCE Journal of Composites for Construction*, Cilt 7, sayı. 3, Sf. 248–257.
- Hassan, T, and Rizkalla, S.,** 2004. "Bond Mechanism of Near-Surface-Mounted Fibre-Reinforced Polymer Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures". *ACI Structural Journal*, Cilt **101**, sayı. 6, Sf. 830-839.
- Iacobucci, R. D., Sheikh A.S., Bayrak O.,** 2003. "Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance". *ACI Structural Journal*, Cilt **100**, sayı. 6, Sf. 785-794.
- İlki, A., and Kumbasar, N.,** 2001. "Strengthening of Damaged Concrete Members by Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, Cilt **1**, Sf. 781-788.
- İlki, A., Peker O., Karamuk E., Demir, C., and Kumbasar, N.,** 2008. "FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns", *ASCE Journal of Composites for Construction*, Cilt **20**, sayı. 2, Sf. 169-188.
- İlki, A., Demir C., Bedirhanoglu I., and Kumbasar, N.,** 2009. "Seismic retrofit of brittle and low-strength RC columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites", . *Advances in Structural Engineering*, Cilt **12**, sayı. 3, Sf. 325-347.
- İlki, A., Bedirhanoglu I., and Kumbasar, N.,** 2011. "Behavior of FRP retrofitted joints built with plain bars and low-strength concrete", *ASCE Journal of Composites for Construction*, Cilt **15**, sayı. 3, Sf. 312-326.
- Lam, L., and Teng, J. G.,** 2003. ". Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", *Construction in Building Materials*, Cilt **17**, sayı. 6-7, Sf. 471-489.

- Li, X., Lv, H.L., Zhang, G.C., Sha, S.Y., and Zhou, S.C.,** 2013. “Seismic retrofitting of rectangular reinforced concrete columns using fiber composites for enhanced flexural strength”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt **32**, sayı. 9, Sf. 619-630.
- Liu, I. S. T., Oehlers, D. J., and Seracino, R.,** 2006. “Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **10**, sayı. 2, Sf. 106-114.
- Mander, J.B., Priestley, J.N., Park, R.,** 1988. “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **114**, sayı. 8, Sf. 1804-1825.
- Matamoros, A.B. and Sozen, M.A.,** 2003. “Drift limits of high-strength concrete columns subjected to load reversals”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **129**, sayı. 3, Sf. 297-313.
- Memon M.S. and Sheikh, S.A.,** 2005. “Seismic resistance of square concrete columns retrofitted with glass fiber-reinforced polymer”, *ACI Structural Journal*, Cilt **102**, sayı. 5, Sf. 774-783.
- Nanni, A., Alkhardji, T., Chen, G., Barker, M., Xinbao, Y. and Mayo, R.,** 1999. “Overview of testing to failure program of a highway bridge strengthened with FRP composites”, Selected Presentation Proc., 4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS4), Baltimore, MD, Sf. 69-80.
- Nordin, H., and Täljsten, B.,** 2006. “Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **10**, sayı. 1, Sf. 60-68.
- Perrone, M., Barros, J.A.O. and Aprile, A.,** 2009. “A CFRP based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns”, *Journal of Composites for Construction*.
- Prota, A., Nanni, A., Manfredi, G., Cosenza, E.,** 2004. “Selective Upgrade of Under Designed RC Beam–Column Joints Using CFRP”, *ACI Structural Journal*, Cilt **101**, sayı. 5, Sf. 699–707.

- Sato, Y. and Ko, H.,** 2007. “Experimental investigation of conditions of lateral shear reinforcements in RC columns accompanied by buckling of longitudinal bars”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Cilt **36**, Sf. 1685-1699.
- Sena Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Gettu, R., and Azevedo, A.F.M.,** 2006. “Bond behavior of near surface mounted CFRP laminate strips under monotonic and cyclic loading”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **10**, sayı. 4, Sf. 295-303.
- Seible, F., Priestley, M.J.N., Hegemier, G.A. and Innamorato, D.,** 1997. “Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **1**, sayı. 2, Sf. 52-62.
- Seracino, R., Raizal Saifulnaz, M. R., and Oehlers, D. J.,** 2007. “Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Cilt **11**, sayı. 1, Sf. 62-70.
- Sheikh, S. and Yau, G.,** 2002. “Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers”, *ACI Structural Journal*, Cilt **99**, sayı. 1, Sf. 72-80.
- Szabo, Z.K. and Balasz, G.L.,** 2007. “Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures”, *Civil Engineering, Periodica Polytechnica*.
- Taljsten, B., Carolin, A., Nordin, H.,** 2003. “Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Reinforcement of CFRP”, *Advances in Structural Engineering*, Cilt **6**, sayı. 3, Sf. 201–13.
- Teng, J.G., De Lorenzis, L., Wang, B., Rong, L., Wong, T.N., Lam, L.,** 2006. “De-bonding Failures of RC Beams Strengthened with Near-Surface Mounted CFRP strips”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Cilt **10**, sayı. 2, Sf. 92–105.
- TSDC,** 2007. Regulations for buildings to be constructed in earthquake prone areas, *Turkish Seismic Design Code*, Ankara.
- TS-500,** 1984. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

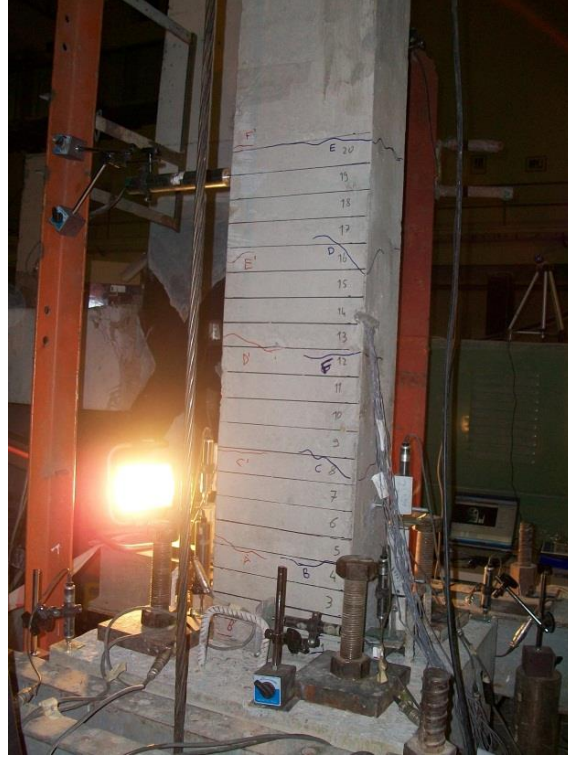
- TS-500**, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-708**, 1996. Beton çelik çubukları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Vrettos, I., Kefela, E., and Triantafillou, T.C.**, 2013. “Innovative flexural strengthening of reinforced concrete columns using carbon-fiber anchors”, *ACI Structural Journal*, Cilt **110**, sayı. 1, Sf. 63-70.
- XTRACT**, 2007. “Cross-sectional structural analysis of components”, *Berkeley, California, US*.
- Wang, Z., Wang, D., Smith, S.T., and Lu, D.**, 2011. “CFRP-confined square RC columns. I: Experimental investigation”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Cilt **16**, sayı. 2, Sf. 150-160.
- Ye, L. P., Zhao, S. H., Zhang, K., and Feng, P.**, 2001. “Experimental Study on Seismic Strengthening of RC Columns with Wrapped CFRP Sheets”, *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, Cilt **1**, Sf. 885-892.

EKLER

EK A: Numunelere ait öteleme oranlarındaki görünüm

EK B: Numunelerin teorik moment-eğrilik grafikleri

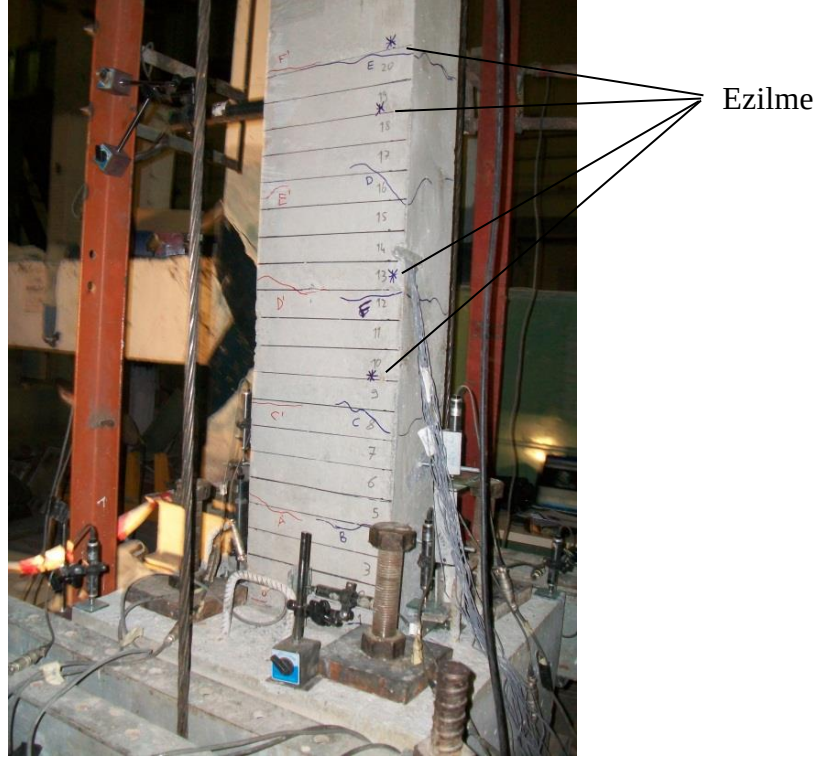
EK A



Şekil A.1 : REF numunesinin % 1 itme öteleme oranında görünümü.



Şekil A.2 : REF numunesi % 2 çekme öteleme oranında görünümü.



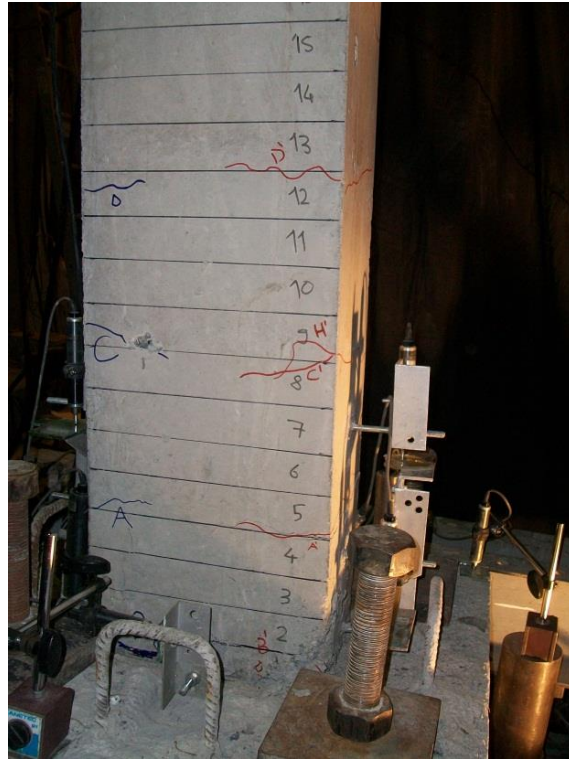
Şekil A.3 : REF numunesi % 3 itme öteleme oranında görünümü.



Şekil A.4 : REF numunesi % 4 itme öteleme oranında görünümü.



Şekil A.5 : REF numunesi % 6 itme öteleme oranında görünümü.



Şekil A.6 : REF numunesi % 6 çekme öteleme oranında görünümü.



Şekil A.7 : REF numunesi % 8 itme öteleme oranında görünümü.



Şekil A.8 : REF numunesi % 8 itme öteleme oranında temel-kolon ayrılması görünümü.

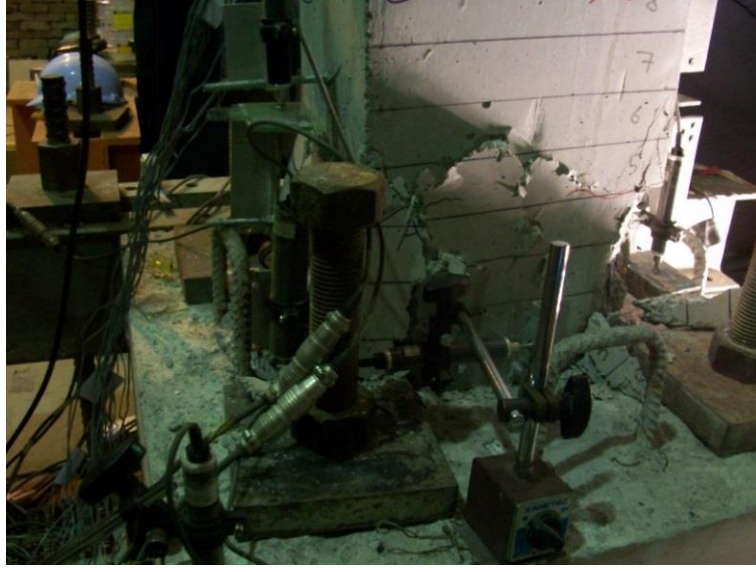


(a)



(b)

Şekil A.9 : REF numunesi % 8 çekme öteleme oranında (a) kısa kenar, (b) uzun kenar görünümü.



Şekil A.10 : REF numunesi deney sonrası kalıcı yerdeğiştirme görünümü
($P = 0 \text{ kN}$, $\delta = -120 \text{ mm}$).



Şekil A.11 : REF numunesi deney sonrası kolon tabanında hasar durumu.



Şekil A.12 : LAM numunesi deney sonrası çatlak kontrolü-deney sonrası.



Şekil A.13 : LAM numunesi deney sonrası ankraj kontrolü-deney sonrası.



Şekil A.14 : LAM-LAM numunesi deney sonrası çatlak kontrolü-deney sonrası.



Şekil A.15 : LAM-LAM numunesi deney sonrası ankraj kontrolü-deney sonrası.

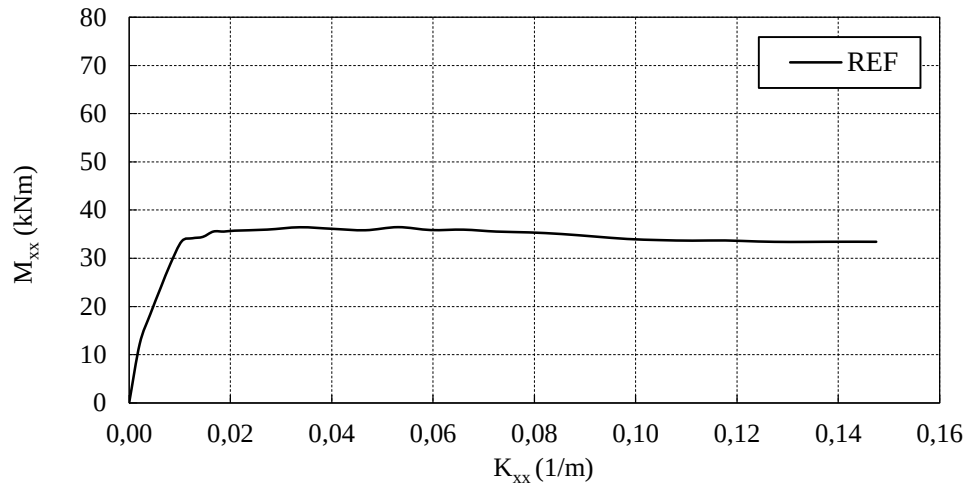


Şekil A.16 : LAM-PB numunesi deney sonrası çatlak kontrolü- deney sonrası.

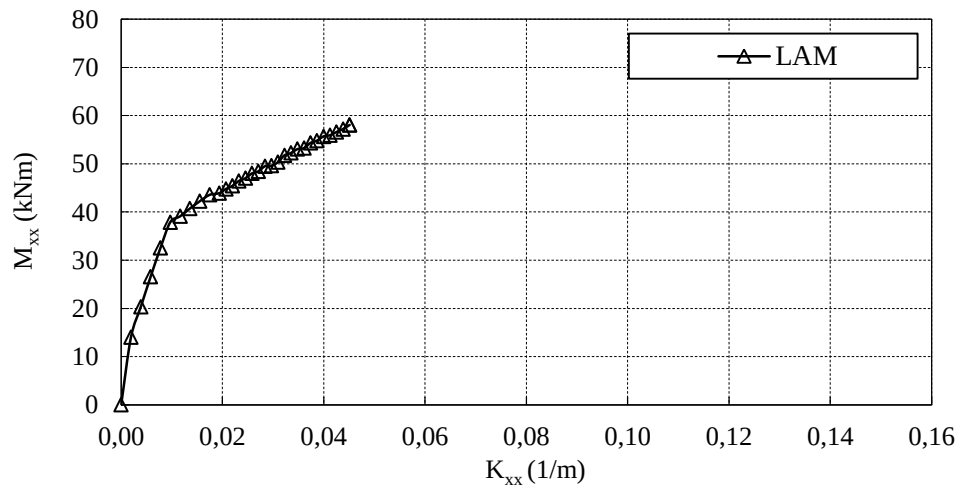


Şekil A.17 : LAM-PB numunesi deney sonrası ankraj kontrolü- deney sonrası.

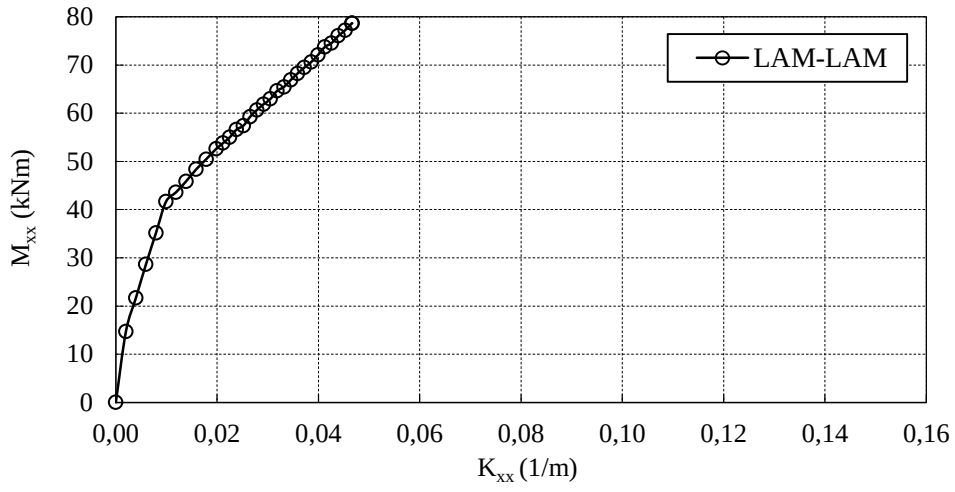
EK B



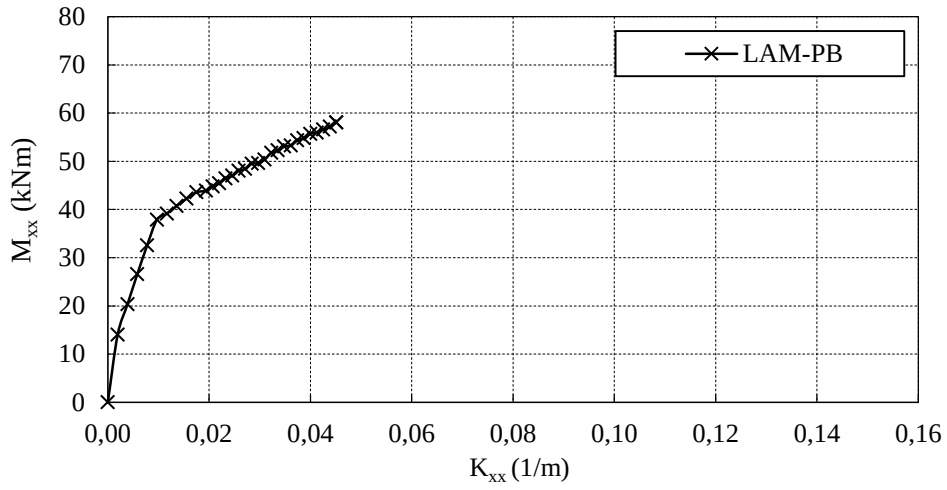
Şekil B.1 : REF numunesi teorik moment-eğrilik grafiği.



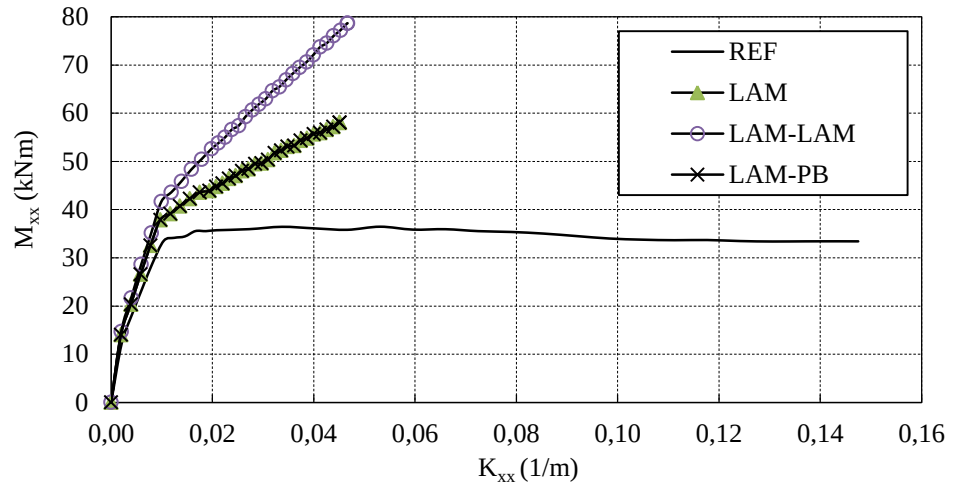
Şekil B.2 : LAM numunesi teorik moment-eğrilik grafiği.



Şekil B.3 : LAM-LAM numunesi teorik moment-eğrilik grafiği.

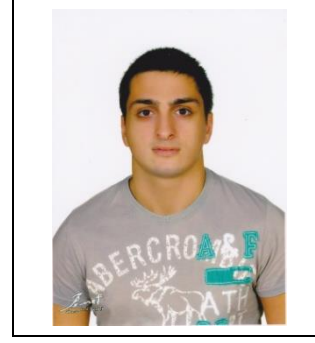


Şekil B.4 : LAM-PB numunesi teorik moment-eğrilik grafiği.



Şekil B.5 : Numunelerin teorik moment-eğrilik grafiği.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet UZUNHASANOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 25.03.1989

E-Posta: ahmetuzunhasanoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü