KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YETERSİZ DONATI BİNDİRME BOYU BULUNAN KOLONLARIN AKTİF FRP SARGISI İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Erkan AKPINAR

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YETERSİZ DONATI BİNDİRME BOYU BULUNAN KOLONLARIN AKTİF FRP SARGISI İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Erkan AKPINAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01 Haziran 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 18 Haziran 2010

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

(.....)

Üye

Prof. Dr. Serap KAHRAMAN

(.....)

Üye

Doç. Dr. Alper İLKİ

(.....)

Üye

Doç. Dr. Cem YALÇIN

(.....)

Üye

Yrd. Doç. Dr. Fuad OKAY

(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ

Yetersiz Donatı Bindirme Boyu Bulunan Kolonların Aktif FRP Sargısı ile Güçlendirilmesi konulu bu doktora çalışması, Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadaki önemli destek ve katkılarından dolayı, tez danışmanım sayın Doç. Dr. Şevket ÖZDEN'e, içten teşekkürlerimi ve derin saygılarımı sunarım.

Hayatımın en güzel parçası olan aileme, çalışmam boyunca bana huzur dolu bir ortam sunduğu için teşekkürü bir borç bilirim.

Deneylerin ilerlemesinde katkıları bulunan laboratuar çalışanlarına, yardımcı olan iş arkadaşları ve lisans öğrencilerimize içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
SİMGELER x
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 8
2.1. Giriş 8
2.2. Aderans, Donatıların Kenetlenmesi ve Bindirmeli Ekler 8
2.2.1. Donatı-beton arasında aderans oluşum mekanizması ve aderans göçmesi 12
2.2.2. Aderans dayanımını etkileyen faktörler 20
2.2.3. Tekil donatılarda ve bindirmeli eklerde kenetlenme boyu 21
2.3. Lifli Polimer (Fiber-Reinforced Polymer - FRP) 26
2.3.1. Lifli polimer (FRP) türleri ve mekanik özellikleri 29
2.3.2. Lifli polimer (FRP) davranışını etkileyen faktörler 32
2.3.3. Lifli polimerin (FRP) betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanımı 37
2.4. Betonarme Kolonlar 53
2.4.1. Betonarme kolonların tasarımı 53
2.4.2. Kolon davranışında temel tanımlar 63
2.4.3. Kolon davranışında tepe deplasman 69
2.4.4. Betonarme kolon davranışı ve davranışı etkileyen faktörler 77
2.4.5. Betonarme kolon davranışı ve bindirmeli ekler 91
2.5. Betonarme Kolonlarda Bindirme Boyu Problemine Yönelik Güçlendirme Çalışmaları 94
3. DENEYSEL ÇALIŞMA 97
3.1. Giriş 97
3.2. Malzeme Özellikleri 97
3.2.1. Beton 98
3.2.2. Donatı çeliği 99
3.2.3. Karbon lifli polimer (CFRP) 99
3.2.4. Epoksi bazlı yapıştırıcı (Epoksi reçine) 100
3.2.5. Tamir harcı 101
3.3. Numuneler ve Deney Değişkenleri 102
3.3.1. Numunelerin tanıtımı 102
3.3.2. Donatı çeliği yerleşimi 104
3.3.3. Numunelerin üretim aşaması 108
3.3.4. Lifli polimer kullanım detayları 115
3.3.5. Lifli polimer ardgerme sistemi (FRP aktif sargılama aparatı) 118
3.3.6. Deney değişkenleri ve numunelerin adlandırılması 124
3.4. Yükleme Sistemi 129
3.5. Veri Toplama Sistemi ve Yerleşimi 132

3.6. Yük Protokolü 134
4. DENEY SONUÇLARI 136
4.1. Giriş 136
4.2. Test Numunelerinin Deneysel Davranışı 136
4.2.1. CL-N1-D0-CFRP00 140
4.2.2. CL-N1-D0-CFRP1P 146
4.2.3. CL-N1-D0-CFRP2P 150
4.2.4. CL-N1-D0-CFRP1A 156
4.2.5. CL-N1-D0-CFRP2A 162
4.2.6. CL-N1-D0-CFRP3A 167
4.2.7. CL-N1-D1-CFRP1A 172
4.2.8. CL-N1-D1-CFRP1AC 177
4.2.9. CL-N2-D0-CFRP00 184
4.2.10. CL-N2-D0-CFRP1P 189
4.2.11. CL-N2-D0-CFRP1A 194
4.2.12. CL-N2-D1-CFRP1A 198
5. VERİLERİN İRDELENMESİ ve DEĞERLENDİRME 202
5.1. Giriş 202
5.2. Yatay Yük Deplasman İlişkileri 202
5.3. Çevrimsel Enerji Tüketimi 215
5.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı 227
5.5. Rijitlik 229
5.6. Kalıcı Ötelenme 238
5.7. Birim Deformasyon Verileri 241
5.8. Bindirmeli Donatı Ekinde Aderans Gerilmeleri 242
6. SONUÇ ve ÖNERİLER 247
6.1. Çalışmanın Özetlenmesi 247
6.2. Sonuçlar 247
6.3. Öneriler 249
KAYNAKLAR 250
EKLER 258
ÖZGEÇMİŞ 331

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Betonarme kompozit yapı elemanlarında basınç ve çekme bölgeleri..... 2
Şekil 1.2: Moment aktarabilen yapı sistemlerinde yatay yük etkisinde deforme olmuş şekil ve moment dağılımı 4
Şekil 2.1: Yük altındaki kiriş ve eğilme etkisindeki kirişin değişik bölgelerindeki parçalara ait serbest cisim diyagramları 10
Şekil 2.2: Donatı erleştirilmiş parçanın serbest cisim diyagramı..... 11
Şekil 2.3: Artan gerilme seviyelerinde nervür önündeki betonun ezilmesi 14
Şekil 2.4: Kesit içindeki çatlakların oluşumundan sonra donatı etrafındaki betonda oluşan deformasyonlar [8] 15
Şekil 2.5: Nervürlü donatı ile beton arasında oluşan kuvvetler [9]..... 16
Şekil 2.6: Tipik ortalama aderans gerilmesi – sıyrılma grafikleri [6] 17
Şekil 2.7: Aderans sorunundan kaynaklanan yarılma türleri [9]..... 19
Şekil 2.8: Aderans sorunundan kaynaklanan yarılma tiplerinin betonarme eleman üzerinde gösterimi 19
Şekil 2.9: Bindirmeli ek yapılan bölgede beton içerisinde oluşan çatlaklar 25
Şekil 2.10: FRP için kullanılan reçine malzemelerinin, en yüksek kullanım sıcaklık değerlerine göre sınıflandırılması [22]..... 28
Şekil 2.11: Lif, reçine matris ve FRP'nin gerilme birim deformasyon ilişkisi [28] .. 30
Şekil 2.12: Çeşitli lif türlerinin ve çeliğin gerilme birim deformasyon grafiği [23].. 31
Şekil 2.13: Tipik bir betonarme mantolama uygulaması [37]..... 39
Şekil 2.14: Tipik bir çelikle güçlendirme uygulaması [37] 40
Şekil 2.15: FRP kullanarak eğilmeye karşı güçlendirme - kiriş [21]..... 43
Şekil 2.16: FRP uygulanmış tipik kiriş kesitinde birim deformasyon ve gerilme dağılımları 44
Şekil 2.17: FRP kullanarak eğilmeye karşı güçlendirme - döşeme [21]..... 44
Şekil 2.18: FRP ile kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişte modifiye basınç alanları teorisi [38] 46
Şekil 2.19: FRP kullanarak kesme güçlendirilmesi – tipik uygulamalar [21] 47
Şekil 2.20: FRP kullanarak kirişte yapılan kesme güçlendirilmesi örneği 47
Şekil 2.21: FRP sargılama üzerinde oluşan gerilmeler 49
Şekil 2.22: Beton üzerinde değişik malzemelerle yapılan sargılamanın etkileri 49
Şekil 2.23: FRP kullanarak sargılanan betonun göçme sonrası görüntüsü 50
Şekil 2.24: FRP kullanarak kolonların sargılanması örneği [37]..... 51
Şekil 2.25: FRP kullanarak yapılan düğüm bölgesi güçlendirme çalışması [37] 52
Şekil 2.26: FRP kullanarak yapılan sistem güçlendirmesi [42] 52
Şekil 2.27: Eksenel yük–eğilme momenti etkileşim diyagramı ve belirli durumlar için kesit birim deformasyon profilleri 54
Şekil 2.28: Moment-eğrilik ilişkisi 55
Şekil 2.29: Yatay yük etkisinde kolonda oluşan ötelenmeler ve eğrilik eğimi dağılımı 56
Şekil 2.30: Moment-eğrilik ilişkisi ve ilerleyen plastik mafsal boyu yaklaşımı [49] 59
Şekil 2.31: Moment kapasitesine dayalı kesme tasarımı 61

Şekil 2.32: Eğilme, kesme ve her ikisinin birlikte etkin olduğu kolon davranışları (yukarıdan aşağı) [50] 62
Şekil 2.33: Betonarme bir eleman için genel yük-yanal ötelenme grafiği 64
Şekil 2.34: Betonarme bir eleman için genel moment-eğrilik eğimi grafiği 66
Şekil 2.35: Betonarme kolonlarda yanal ötelenme bileşenleri [54] 70
Şekil 2.36: Betonarme kolonda deplasmanı oluşturan bileşenlerin grafiksel gösterimi [56] 71
Şekil 2.37: Kesme etkisi baskın kolonda kesme kuvveti-kayma deformasyonu ilişkisi [59] 72
Şekil 2.38: Kolon tepe noktası, sıyrılma deplasmanı bileşeni 73
Şekil 2.39: Donatı gerilmesi-sıyrılma modelleri [62, 63] 75
Şekil 2.40: Kolon deplasman ve hasar tipleri [57] 77
Şekil 2.41: Göçme türünü belirleyen kesme-süneklik ilişkisi 78
Şekil 2.42: Etkin kesme boyu oranının kolon davranışına etkisi [64] 79
Şekil 2.43: Kesme veya eğilme göçmesinin belirlenmesi için yönlendirme şeması [64] 80
Şekil 2.44: Sargılanmış beton davranışı [65, 68] 81
Şekil 2.45: Kare ve dairesel kesitlerde sargılama donatısının etkinliği [66] 82
Şekil 2.46: Etriye kullanılan kare kesitlerde sargılama gerilmesi dağılımı [66, 68] .. 83
Şekil 2.47: (a) Kesme etkisinin ve (b) donatı bindirme bölgesindeki bozulmanın kolon davranışına etkileri [73] 87
Şekil 2.48: Kesme ve eğilme etkisinde kolon davranışı [75] 88
Şekil 2.49: Çeşitli kolon davranışları [45] 93
Şekil 3.1: Numune genel görünümü ve boyutları, (a) plan, (b) düşey kesit (ölçüler mm‘dir) 103
Şekil 3.2: Kolonların yatay yük etkisindeki genel deformasyon ve iç kuvvet değişimleri 104
Şekil 3.3: Temel ve kolon donatıları yerleşimi - üstten görünüşü (ölçüler mm‘dir) 105
Şekil 3.4: Kolon donatıları yerleşimi detayı – plan (ölçüler mm‘dir) 105
Şekil 3.5: Numune donatılarının düşey yerleşimi – yükleme doğrultusuna (a) dik, (b) paralel kesit (ölçüler mm‘dir) 106
Şekil 3.6: Kolon donatıları deformasyon pulu yerleşimi 108
Şekil 3.7: Numune temel donatılarının imalatı 109
Şekil 3.8: Numune temel donatılarının bitmiş hali 109
Şekil 3.9: Numune temellerine ait kalıplar 110
Şekil 3.10: Numune temel donatılarının kalıba yerleşimi ve ahşap kılavuz şeritler 110
Şekil 3.11: Numune temellerinin beton döküm aşaması 111
Şekil 3.12: Numune kolonlarının donatı imalatı 112
Şekil 3.13: Boy donatılar üzerine deformasyon pullarının yapıştırılması 112
Şekil 3.14: Etriye üzerine deformasyon pullarının yapıştırılması 113
Şekil 3.15: Kolon donatılarının yerleştirilmesi 114
Şekil 3.16: Kolon kalıp imalatı 114
Şekil 3.17: Numunelere uygulanmış olan pasif FRP sargılamaların şematik gösterimi (ölçüler mm‘dir) 115
Şekil 3.18: Tüm bindirme boyu uzunluğunca yapılan pasif FRP sargılama 117
Şekil 3.19: Şerit olarak uygulanan pasif FRP sargılama 117
Şekil 3.20: Lifli polimer, betonarme kolon arasında kalan ardgerme dolgu parçaları 118
Şekil 3.21: Ardgerme dolgu parçalarının boyutları 119

Şekil 3.22: Lifli polimer (CFRP) ardgerme sistemi genel görünümü 119
Şekil 3.23: Karbon lifli polimerin (CFRP) hazırlanması 120
Şekil 3.24: Karbon lifli polimer uçlarının Şekil verilerek birleştirilmesi 121
Şekil 3.25: Lifli polimer için ardgerme kilitleme sistemi 121
Şekil 3.26: Şerit halindeki FRP'nin kesit üzerine yerleşiminin şematik gösterimi.. 121
Şekil 3.27: Ardgerme işleminde gerilme değerinin ölçüldüğü çubuk yük hücresi .. 122
Şekil 3.28: Aktif FRP sargılama aparatlarının kolon üzerindeki yerleşimi 123
Şekil 3.29: Lifli polimer (CFRP) ardgerme sistemi uygulanmış genel görünüm 124
Şekil 3.30: Numune isimlendirme anahtarı 126
Şekil 3.30: Kesitte sargılama gerilmeleri 127
Şekil 3.31: Numune teorik kapasiteleri, (a)eksenel yük oranı %10, (b)eksenel yük oranı %25 129
Şekil 3.32: Yükleme sistemi ve numune yerleşimi 131
Şekil 3.33: Yükleme sistemi ve test kolonuna ait genel görünüm 132
Şekil 3.34: Veri toplama sistemi yerleşimi 134
Şekil 3.35: Deneylerde kullanılan yükleme protokolü 135
Şekil 4.1: Yatay yük-eksenel yük düzeltmesi, eksen ve kesit dönmesi hesapları 137
Şekil 4.2: CL-N1-D0-CFRP00 numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 144
Şekil 4.3: CL-N1-D0-CFRP00 numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 145
Şekil 4.4: CL-N1-D0-CFRP00 numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) 145
Şekil 4.5: CL-N1-D0-CFRP1P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 148
Şekil 4.6: CL-N1-D0-CFRP1P numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 149
Şekil 4.8: CL-N1-D0-CFRP2P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 155
Şekil 4.9:CL-N1-D0-CFRP2P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) 155
Şekil 4.10: CL-N1-D0-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 160
Şekil 4.11: CL-N1-D0-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 161
Şekil 4.12: CL-N1-D0-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) .. 161
Şekil 4.13: CL-N1-D0-CFRP2A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü 165
Şekil 4.14: CL-N1-D0-CFRP2A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 166
Şekil 4.15: CL-N1-D0-CFRP3A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 170
Şekil 4.16: CL-N1-D0-CFRP3A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 171
Şekil 4.17: CL-N1-D0-CFRP3A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) .. 171
Şekil 4.18: CL-N1-D1-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 175
Şekil 4.19: CL-N1-D1-CFRP1A numunesi, deney başlangıcına ait görüntü 176
Şekil 4.20: CL-N1-D1-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) .. 176
Şekil 4.21: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinde kullanılan korniyer uygulaması .. 177
Şekil 4.22: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinde kullanılan korniyer uygulaması detayı 178
Şekil 4.23: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği ... 182
Şekil 4.24: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) ... 183
Şekil 4.25: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) 183
Şekil 4.26: CL-N2-D0-CFRP00 numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 187
Şekil 4.27: CL-N2-D0-CFRP00 numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 188
Şekil 4.29: CL-N2-D0-CFRP1P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 193
Şekil 4.30: CL-N2-D0-CFRP1P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme) ... 193
Şekil 4.31: CL-N2-D0-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 196
Şekil 4.32: CL-N2-D0-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği 197
Şekil 4.33: CL-N2-D1-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme) 200
Şekil 5.1: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Tüm numuneler 206

Şekil 5.2: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 207
Şekil 5.3: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 208
Şekil 5.4: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 209
Şekil 5.5: Yatay yük kapasitesi düşüşü – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 211
Şekil 5.6: Yatay yük kapasitesi düşüşü – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 212
Şekil 5.7: Yatay yük kapasitesi düşüşü – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler .. 212
Şekil 5.8: Çevrimsel enerji tüketimi ve çevrimsel efektif rijitlik 215
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri 216
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri (devamı) 217
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri (devamı) 218
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri (devamı) 219
Şekil 5.10: Her bir yükleme adımında çevrimler arası enerji tüketim azalması – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 221
Şekil 5.11: Her bir yükleme adımında çevrimler arası enerji tüketim azalması – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 221
Şekil 5.12: Her bir yükleme adımında çevrimler arası enerji tüketim azalması – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 222
Şekil 5.13: Her bir yükleme adımındaki ortalama çevrimsel enerji tüketimi – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 223
Şekil 5.14: Her bir yükleme adımındaki ortalama çevrimsel enerji tüketimi – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 223
Şekil 5.15: Her bir yükleme adımındaki ortalama çevrimsel enerji tüketimi – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 224
Şekil 5.16: Tüketilen kümülatif toplam çevrimsel enerji – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 225
Şekil 5.17: Tüketilen kümülatif toplam çevrimsel enerji – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 226
Şekil 5.18: Tüketilen kümülatif toplam çevrimsel enerji – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 226
Şekil 5.19: Eşdeğer viskoz sönüm oranı – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 228
Şekil 5.20: Eşdeğer viskoz sönüm oranı – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 228
Şekil 5.21: Eşdeğer viskoz sönüm oranı – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 229
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler 232
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler (devamı) 233
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler (devamı) 234
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler (devamı) 235
Şekil 5.23: Çevrimsel efektif rijitlik düşüşü– Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 236
Şekil 5.24: Çevrimsel efektif rijitlik düşüşü – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 237
Şekil 5.25: Çevrimsel efektif rijitlik düşüşü – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 237

Şekil 5.26: Kalıcı yatay ötelenme değerleri – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler 238
Şekil 5.27: Kalıcı yatay ötelenme değerleri – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler 239
Şekil 5.28: Kalıcı yatay ötelenme değerleri – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler 239
Şekil 5.29: Ortalama aderans gerilmesi-sargılama gerilmesi değişimi 243
Şekil 5.30: m katsayısı-sargılama gerilmesi değişimi (Eksenel yük oranı % 10 için) 245
Şekil 5.31: m katsayısı-sargılama gerilmesi değişimi 245
Şekil 6.1: Aktif sargılama ile elde edileceği düşünülen yük-deplasman ilişkisindeki değişim 249

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Liflere ait tipik mekanik özellikler 32
Tablo 2.2: FRP bileşenleri, donatı çeliği ve betonun çeşitli faktörlerle etkileşimi 36
Tablo 3.1: Kullanılan beton karışımları ve mekanik özellikleri 99
Tablo 3.2: Kullanılan karbon lifli polimere (CFRP) ait mekanik özellikler 100
Tablo 3.3: Kullanılan epoksi reçinesine ait mekanik özellikler 101
Tablo 3.4: Kullanılan tamir harcına ait mekanik özellikler 101
Tablo 3.5: Deney numuneleri ve değişkenler 126
Tablo 3.6: Deneylerde kullanılan yükleme protokolü yatay deplasman değerleri... 135
Tablo 5.1: Dayanım ve deplasman değerlerinin karşılaştırılması 204
Tablo 5.2: Deplasman sünekliği değerlerinin karşılaştırılması 214
Tablo 5.3: Çeşitli rijitlik değerleri 230
Tablo 5.4: Yatay yük kapasitelerine erişildiğindeki birim deformasyon, gerilme ve aderans gerilmesi değerleri 240

SİMGELER

a : Yük ile mesnet arasında yer alan, kolon etkin kesme boyu
A_b : Donatı kesit alanı
c : Donatı yüzeyi ile beton alt yüzeyi arasındaki mesafe (Pas payı)
c_x : Donatı yüzeyi ile beton yan yüzeyi arasındaki mesafe (Pas payı)
C : Basınç kuvveti
D_b, d_b : Donatı çapı
d : Kolon kesit boyutu
f_c : Beton basınç dayanımı
f_{cd} : Beton tasarım basınç dayanımı
f_{ctd} : Beton tasarım eksenel çekme dayanımı
f_{FRP} : FRP üzerindeki çekme gerilmesi
f_s : Donatı çeliği üzerindeki çekme gerilmesi
f_y : Donatı çeliği akma dayanımı
f_{yd} : Donatı çeliği tasarım akma dayanımı
F : Yatay kuvvet
k, k_{ef}, k_{el}, k_{sec} : Kolon eğilme rijitliği
k_1 : Denklemlerde kullanılan çeşitli faktörlere bağlı amprik katsayılar
$k_{çap}$, k_{konum}, $k_{c,s}$: Aderans boyu hesabında kullanılan katsayılar
l : Kolon boyu
l_b : Kenetlenme boyu
l_0, l_d : Bindirmeli ekler için kenetlenme boyu
l_p : Plastik mafsal boyu
M : Moment
N, N_0 : Eksenel yük
P : Kuvvet
S : Komşu donatılar arasındaki mesafe
C : Betonda basınç kuvveti
T_C : Betonda çekme kuvveti
T, T_S, T'_S : Donatıda çekme kuvveti
u : Aderans gerilmesi
V : Kesme kuvveti
z : Moment kolu

β : Donatı ekseni ile nervür arasındaki açı
ε_c : Betonda oluşan birim deformasyon
ε_{cu} : Dayanım değerine ulaşılan noktada, betonda oluşan birim deformasyon
ε_{FRP} : FRP'de oluşan birim deformasyon
ε_s : Donatı çeliğinde oluşan birim deformasyon
ε_y : Donatı çeliği akma birim deformasyonu
$Ø$: Eğrilik eğimi
θ : Kolon eksen dönmesi

Δ : Kolon tepe deplasman değeri
μ : Süneklik
$\zeta_{eş}$: Eşdeğer viskoz sönüm oranı

Kısaltmalar

N.A. : Tarafsız eksen
LP : Lifli Polimerler
FRP : Fiber Reinforced Polymers
ACI : Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
CFRP : Karbon Lifli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
GFRP : Cam Lifli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer)

YETERSİZ DONATI BİNDİRME BOYU BULUNAN KOLONLARIN AKTİF FRP SARGISI İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Erkan AKPINAR

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kolon, Güçlendirme, Bindirme Boyu, Sargılama, Karbon Lifli Polimer (CFRP)

Özet: Yetersiz bindirme boyu ile üretilen kolonlar, şiddetli depremler sırasında tasarım yük kapasitelerine ulaşamadan, erken göçme ile karşılaşabilmektedirler. Literatürde yer alan çalışmalar, dairesel kolonlarda yetersiz bindirme boyu probleminin çözümünde, pasif FRP sargılamanın etkili olduğunu gösterirken, dairesel olmayan kolonlarda aynı etkinin tam olarak elde edilemediği belirtilmektedir. Pratikte imal edilen kolonların büyük bölümünü, kare ve dikdörtgen kolonlar oluşturmaktadır. Bu yüzden, yetersiz bindirme boyu ile imal edilmiş dairesel olmayan kolonların güçlendirilmesi için etkili bir tekniğin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma yetersiz bindirme boyu bulunan kare kolon davranışının, aktif FRP sargılama ile geliştirilmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bindirme boyu sorununun temelde aderans problemi olması ve aktif sargılamanın, eklenen donatıları çevreleyen hayali beton silindirin güçlendirilmesi yoluyla, aderans sorununu çözebileceği düşüncesi, çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada on iki adet, yetersiz bindirme boyu ile imal edilmiş kolon, iki farklı ekseney yük seviyesinde, tersinir tekrarlanır yük altında test edilmiştir. Aktif FRP sargılamanın, numunelerdeki aderans davranışında sağlayacağı etkinliğin incelenebilmesi amacıyla, iki adet sargısız referans numune ve üç adet pasif FRP sargılama yapılmış numune denenmiştir. Aktif sargılanmış numunelerde, üç farklı başlangıç öngerilme değeri kullanılmıştır.

Deney sonuçları, eksenel yük seviyesi yüksek olan ve aktif sargılama başlangıç öngerilme değerinin fazla olduğu kolonlarda, yatay yük taşıma kapasitesinde, belirli bir oranda iyileşme olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda aktif FRP sargılama uygulanmış kolonlarda, pasif sargılama ile güçlendirilmiş kolonlara göre daha fazla enerji tüketimi olduğu, rijitlik düşüşünün azaldığı ve daha az kalıcı deformasyonların elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

STRENGTHENING OF INADEQUETLY LAP-SPLICED REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING ACTIVE FRP CONFINEMENT

Erkan AKPINAR

Keywords: Reinforced Concrete Column, Strengthening, Lap-splice, Confinement, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Abstract: The reinforced concrete columns with inadequate lap-splice length may undergo premature failure in a severe earthquake. The studies in literature indicate that while passive FRP confinement is effective in solving inadequate lap-splice length problem in circular columns, it is not so effective in noncircular columns. However, most of the columns in practice are in either square or rectangular shapes. Thus, it is necessary to develop an efficient technique for strengthening of noncircular columns with lap-splice problems. This study aims at enhancing the behavior of square reinforced concrete columns with inadequate lap-splice length by active FRP confinement. It is based on the idea that insufficient lap-splice length problem is actually an anchorage problem and that active confinement may strengthen the pseudo-cylindrical concrete block around the rebar, which in turn, may improve the bond behavior.

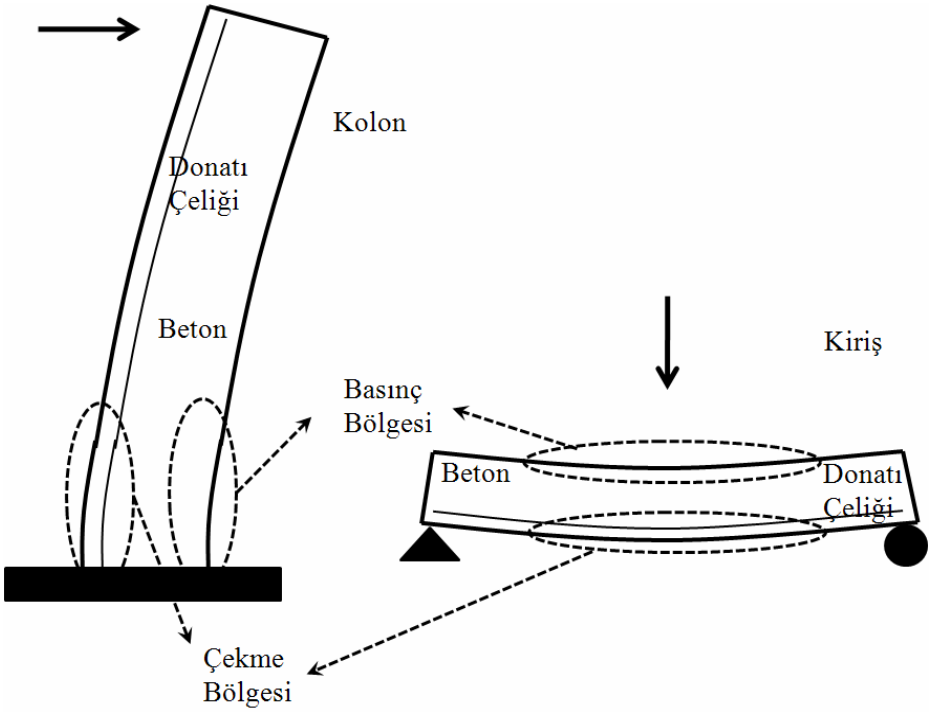
Twelve square reinforced concrete columns with insufficient lap splice length are tested in reversed cyclic lateral loading under two different axial load levels. In order to evaluate the effectiveness of active FRP confinement on enhancing the bond behavior of the test columns, two reference columns are tested with no external confinement and three columns are tested using passive FRP confinement. Three different levels of initial confining pressure are applied to actively confined columns.

Test results indicate that active confinement with CFRP sheets improves lateral load capacities of test columns, especially in those with higher axial load and larger initial confining pressure. It is also observed that actively confined specimens dissipate more energy, exhibits less stiffness degradation and have smaller residual displacements than passively confined specimens.

1. GİRİŞ

Barınma, tarihinin başlangıcından beri insanlık için temel ihtiyaçlardan biri olmuştur. Yaşamak ve tehlikelerden korunmak için kapalı alanlar oluşturmak, insan için hayatın ayrılmaz ve vazgeçilmez parçasıdır. Bazı özel yapıların dışında bu ihtiyaç, uzun zaman boyunca değişik malzeme ve tekniklerin kullanıldığı, iki katı aşmayan yapılarla karşılanmıştır. Gelişen sanayi ve teknoloji birlikte yaşama gerekliliğini doğurmuş, özelikle son yüzyıllarda nüfusun şehirlerde yoğunlaşmasına ve yapı üretim biçimlerinin değişmesine sebep olmuştur. Artan nüfus ve daralan kullanılabilir arazi miktarı, aynı alanda birçok barınma ihtiyacını karşılayabilen, çok katlı yapı imalatının gelişmesine ve yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Günümüzde yapı imalatı sadece yaşama alanı olan evlerin imalatını değil, köprülerden barajlara, sanayi tesislerinden limanlara kadar çok geniş bir üretim alanını temsil etmektedir.

Geride kalan yüzyıl içerisinde, özellikle şehirlerde ve gelişmiş bölgelerde yapı üretimi, yaygın bir biçimde betonarme yapı sistemleri ile gerçekleştirilmiştir. Betonarme, temel olarak basınç etkisini karşılayan beton ve betonun yetersiz kaldığı çekme etkileri için içerisine yerleştirilen çelik çubukların birlikteliği olarak nitelendirebileceğimiz kompozit bir üründür. Betonarme kompozit malzeme kullanılarak üretilen tipik yapı elemanları (kolon, kiriş) ve yük etkisinde bu elemanlarda oluşan çekme ve basınç bölgeleri Şekil 1.1'de görülmektedir. Kapalı alanlar oluşturmakta oldukça başarılı olan betonarme yapı sistemlerinin, her ürün ve imalatta olduğu gibi kendine özgü sorunları bulunmaktadır. Akla gelebilecek her sistemde olduğu gibi betonarme yapı imalatında da, inşa edilen yapı hacminin ve/veya eleman sayısının artmasıyla, oluşturulan sistemin davranışında problemler ortaya çıkabilmektedir. Betonarme yapı sistemleri durağan ve statik şartlarda, amaçlanan hedef doğrultusunda oldukça güvenli ve başarılı sonuçlar vermektedir. Deprem gibi dinamik yüklemeler altında ise, projelendirme ve/veya imalat hataları, zaman içerisinde yıpranma, uygun olmayan kullanım ve sistem değişiklikleri gibi etkiler nedeniyle, zaman zaman istenmeyen kötü sonuçlarla karşılaşılabilmektedir.



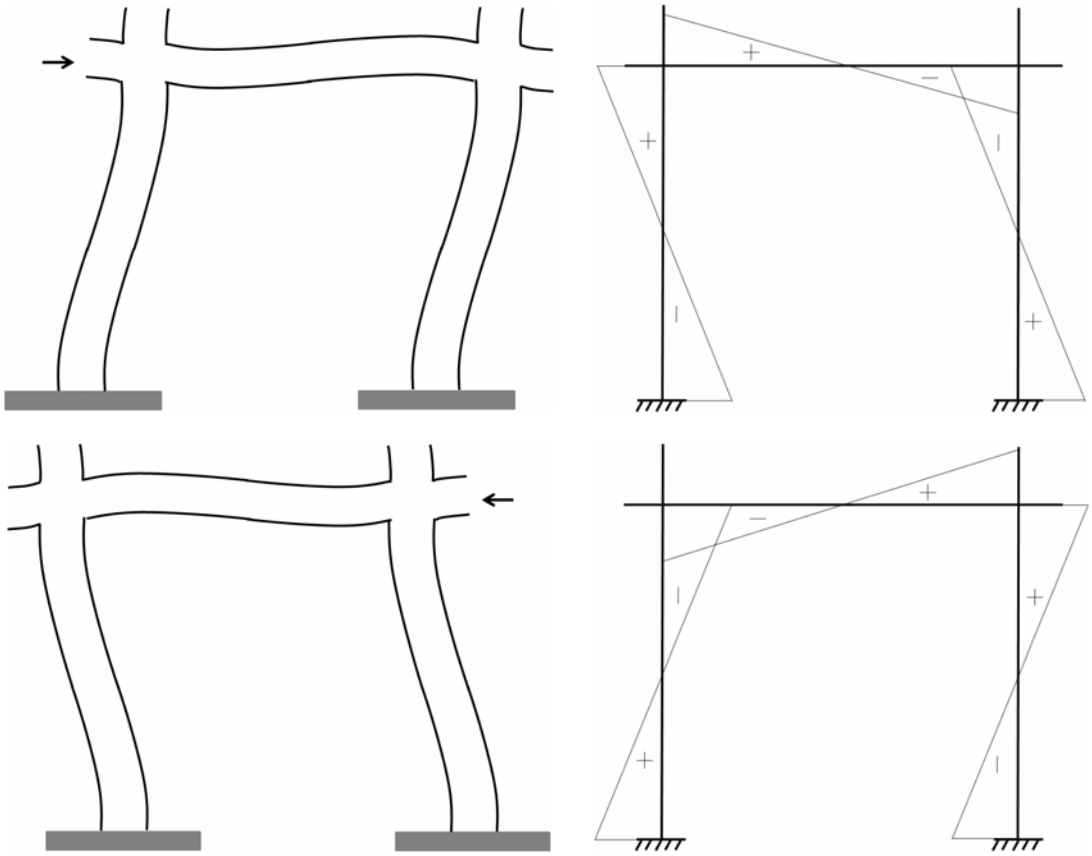
Şekil 1.1: Betonarme kompozit yapı elemanlarında basınç ve çekme bölgeleri

Özellikle depremlerle ortaya çıkan tablolar göz önüne alındığında, yıkılan ve ne yazık ki can kaybına sebep olan kötü tasarlanmış, gerektiği biçimde imal edilmemiş betonarme yapıların varlığı ortadadır. Bunun yanında, bunların sayısından kat be kat fazla, yapı şartnamelerinin öngördüğü şekliyle, az, orta veya ağır oranda hasar görerek ama yıkılmayarak görevini yerine getirmiş olan betonarme yapıların da var olduğu, tartışılmaz bir gerçektir. Yapı şartnameleri, bazı özel amaçlar için yapılacak yapılar dışında üretilecek tüm yapılar için, farklı tasarım depremlerine göre çeşitli hasar miktarlarını kabul edilebilir olarak tanımlamaktadırlar. Günümüzde tüm dünyada, bu temel felsefe göz önüne alınarak yapı üretimleri gerçekleşmektedir. Tasarımda değişik hasar seviyeleri öngörülmekle birlikte asla toptan göçmeye izin verilmediği unutulmamalıdır. Nükleer santraller, açık deniz yapıları ve barajlarda olduğu gibi, ne tür etki altında kalırlarsa kalsınlar belirgin hasar almayacak yapılar üretilebilmektedir. Bu tür yapılarla, belirli bir miktar hasar öngörüsü ile maliyetin 5, 10 veya 20 kat azaltıldığı normal olarak nitelendirilebilecek yapılar arasındaki ekonomik denge, yapı üretim ve tasarım felsefesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu gerçeklerin ışığında betonarme yapıların insanoğlunun hayatını tehlikeye sokan bir imalat tipi olduğunu söylemek, etik olmayan bir karalama kampanyasının parçası olmaktan öteye geçmemektedir.

Deprem gibi dinamik etkilerin söz konusu olduğu durumlarda, diğer yapı sistemlerinde olduğu gibi, betonarme yapılar için de yapısal sorun oluşturabilecek değişik noktaların varlığı, daha önce vurgulandığı üzere tartışılmaz bir gerçektir. Genel bir bakış açısı ile deprem etkisinin, betonarme yapı sisteminden belirli bir ötelenme yapmasını talep ettiğini, yapının da bu talebi geri gelebilmek koşulu ile karşılayabildiği oranda güvenli olduğunu söylemek mümkündür. Oluşan bu ötelenme talebi ve talebin karşılanması ilişkisinde, kullanılan malzemelerin elastik ötesi davranış karakteristiğine bağlı olarak enerjinin korunumu prensibine göre, sünek tasarım felsefesi ışığında sistemin hasar görmesi, kaçınılmaz bir durumdur. Depremle ortaya çıkan enerjinin, yapı sisteminde mutlak biçimde, hareket, deformasyon ve hasar formlarında tüketilmesi gerekmektedir. Yapının, deprem tarafından talep edilen ötelenme yani deplasmanı göçmeden yapabilmesi için, betonarme sistemin genelinin ve ayrı ayrı tüm elemanlarının, betonarme tasarım ve imalat kurallarına uygun olarak üretilmiş olması gerekmektedir. Gününüze kadar oluşturulmuş ve oluşturulmaya devam edilen bu kuralların herhangi birinde yapılacak olan yanlışlık, yapının tasarımında kabul edilmiş olan hasar görme derecesini az veya çok arttıracak ve hatta göçmesine sebep olacaktır.

Betonarme yapı sistemlerinde kolonların, hizmet ömürleri süresince yapının ayakta kalabilmesini sağlayan en önemli bileşenler olduğu genellemesi yapılabilir. Belirtmek gerekir ki bu genellemede, perdelerin yatay yük taşımadaki etkisi, kiriş ve döşemelerin yük dağılımındaki ve yatay yük etkisinde kolonların davranışa katılımı üzerindeki belirleyici rolleri akıldan çıkartılmamalıdır. Düşey taşıyıcı yapı elemanı olarak kolonlardan beklenen davranışın, temel olarak ikiye ayrılması mümkündür. Üzerindeki düşey yükleri güvenli biçimde taşıyabilmesi, bunlardan ilkini oluşturmaktadır. Kolonlardan beklenen ikinci önemli ve temel davranış ise, yapıya gelebilecek deprem etkisi gibi yatay yüklerin, hizmet ömrü süresince güvenle karşılanmasıdır. Betonarme elemanların tasarım felsefesinde, tüm dünyadaki yapı şartnamelerinde uygulandığı gibi, kesme göçmesinin oluşumuna izin verilmemekte, eğer bir hasar ve hatta göçme oluşacaksa bunun, elemanların eğilme kapasitelerine ulaşmaları sonucunda olması öngörülmektedir.

Yatay yük etkisinde en büyük moment zorları, moment aktarabilen sistemlerde bilindiği gibi kolon ve kiriş uç bölgelerinde meydana gelmektedir (Şekil 1.2). Özellikle şiddetli bir deprem etkisinde ortaya çıkan bu moment zorlarının, sürekli bir çevrimle ve işaret değiştirerek, kolon ve kiriş uç bölgelerini, tasarım eğilme kapasitelerine kadar etkiledikleri açık bir gerçektir. Kolon kiriş düğüm bölgeleri, daha rijit bileşenler olduğu için eleman uç noktalarında, doğrusal olmayan ötelenme ve dönmeler oluşmaktadır (Şekil 1.2). Yer hareketi sırasında ortaya çıkan enerjinin yapı elemanlarınca yutularak tüketilmesine ve dolayısıyla azaltılmış deprem yüklerine göre tasarım yapılabilmesine olanak sağlayan sünek yapı tasarımında, tasarım moment kapasitelerine kadar zorlanan bazı betonarme elemanların uç bölgelerinde, mafsal oluşumuna izin verilmektedir.



Şekil 1.2: Moment aktarabilen yapı sistemlerinde yatay yük etkisinde deforme olmuş şekil ve moment dağılımı

Sünek yapı tasarım felsefesine göre, şiddetli deprem etkisi altında öncelikle kiriş uç bölgelerinde mafsallaşmaların olması öngörülmektedir. Kirişlerin uçlarında meydana gelecek bu davranıştan sonra oluşması öngörülen kolon uç bölgelerindeki mafsal oluşumlarında, bu bölgelerin meydana gelen plastik deformasyonları

gerek ve yeter derecede karşılayabilecek biçimde detaylandırılmış ve imal edilmiş olmaları beklenmektedir. Bilindiği gibi kiriş ve kolon sarılma bölgelerinin oluşturulmasının, bu bölgelerde daha sık etriye kullanımının zorunlu tutulmasının amacı, bu yeterliliği sağlayarak sünek davranış elde edebilmektir. Hasar görmekle birlikte depremin talep ettiği deplasmanların, yapı tarafından göçme olmaksızın taşınabilmesine imkan sağlamaktır.

Betonarme elemanlar için sünek davranışın en önemli koşullarından biri, yukarıda belirtildiği gibi enine donatı yani etriye kullanımıdır. Etriye kullanımı ile her ne kadar betonarme elemanlarda kesme dayanımı artışı temel olarak hedeflenmekte ise de, eksenel yük ve enerji yutma kapasitelerinde, deformasyon ve eğrilik sünekliklerinde de artışlar olduğu bilinmektedir. Ayrıca etriye kullanımının, ileri yük seviyelerinde beton basınç bloğunun dağılmasını geciktirdiği ve boyuna donatıların burkulmasını engellediği bilinmektedir. Bunların yanında etriyenin varlığıyla, donatı ile betonun birlikte çalışmasını sağlayan, betonarme sistemin oluşumuna dayanak teşkil eden, aderans ve kenetlenme davranışı da olumlu yönde etkilenmektedir. Nervürlü donatı kullanımında aderans oluşumunu sağlayan en büyük etken mekanik diş etkisi, aynı zamanda çevresindeki betonu yarmaya çalışan bir kuvvet bileşeni de oluşturmaktadır. Yeteri miktarda etriye varlığının, muhtemel bu yarılma çatlaklarının genişlemesini ve gelişimini geciktirerek, aderans göçmelerinin engellenmesinde de önemli bir rol oynadığı bilinmektedir.

Enerji yutabilen sünek tasarımın temel ilkesi, betonun ezilmesinden önce donatı çeliğinin akması olarak özetlenebilir. Bu da donatının betona yeteri kadar kenetlenmesi ve ekleme durumunda sürekliliğinin sağlanması koşulu ile bağlantılı bir olgudur. Yapı yükseklikleri ve açıklıkları düşünüldüğünde, tüm sistem boyunca parçasız ve eksiz bir donatı kullanımının mümkün olamayacağı açıktır. Donatı sürekliliği, basit olarak bindirmeli eklerle sağlanmaktadır. Kolon uç bölgelerindeki olası mafsal oluşumlarında enerji tüketebilmenin, mafsal oluşumu öncesinde ve sonrasında uygun davranışı sergileyebilmenin gereği olarak, bindirmeli boyuna donatı eklerinin mümkün olduğunca kolon orta bölgelerinde oluşturulması, seçilebilecek en iyi uygulamadır. Bunun sebebi olarak, Şekil 1.2'de görüldüğü gibi deprem etkisinde kolonlarda oluşan momentin, orta bölgede en düşük değerde olması

gösterilmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizdeki yapı şartnamesinde de, bindirmeli eklerin kolon orta bölgesinde yapılması tavsiye edilmektedir [1]. Ancak bu gereklilik, uygulama aşamasında zorluklar oluşturduğu için zorunlu kılınmamakta ve tavsiyeden öteye gidememektedir. Mevcut yapı stoğunun çok büyük bir bölümünde kolonlardaki boyuna donatı bindirmeli eklerin, kolon uç bölgelerinde yapılmış olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, "tavsiye edilmeyen" bölgede yapılan bu donatı ekleme işleminde, meydana gelmiş olan tasarım ve uygulama yanlışlıkları ve/veya eksiklikleri göz önüne alındığında, sünek olacağı düşünülerek tasarlanan kolonlarda, uygun mafsal davranışından ve dolayısıyla süneklikten söz etmek mümkün olamamaktadır. Daha da kötüsü kolon uç bölgelerinde yapılmış olan eksik ve hatalı donatı bindirme uygulamaları sonucunda, tasarlanan kolon eğilme kapasitelerinin çok altında aderans problemleri yaşanabilmektedir. Bunun sonucu olarak kolonlarda, donatı sıyrılması ve aderans yarılmasının tetiklendiği erken ve gevrek göçmelerin oluştuğu, yaşadığımız depremlerde ve literatürde yayınlanan birçok çalışmada gösterilmiştir.

Kesitte etriye varlığının ve sayısındaki artışın, donatı ankrajı ve bindirmeli donatı eklemesinde etkili olduğu, kolon uç bölgelerinde oluşan aderans problemlerini azalttığı, daha önce de belirtildiği gibi bilinen bir gerçektir. Etriye kullanımının bindirmeli donatı eklerinde olumlu etkisi olmakla birlikte, bu uygulama sadece yapı imalatı sırasında alınabilecek bir önlemdir. Var olan betonarme yapı stoğu düşünüldüğünde, deprem etkisi altında kapasitesinin çok altında olan yüklerde göçeceği muhtemel, yetersiz bindirmeli donatı eki bulunan kolonların varlığı endişe vermektedir.

Literatürde, kolonlarda bindirme boyu kaynaklı olumsuzlukların giderilmesini, erken ve gevrek göçmelerin önlenmesini hedefleyen birçok deneysel çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları Bölüm 2'de yer almaktadır. Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, kullanılan temel yöntemin, sorunlu bölgenin etrafında sargılama gerilmelerinin oluşturulması olduğu görülmektedir. Sargılama gerilmesi oluşturulması prensibi aynı olmak kaydıyla, farklı malzemelerin bu amaçla kullanıldığı, bindirmeli ek bölgesinin betonarme manto, lifli polimer (LP – FRP) veya çelik plaka ile sarıldığı ilgili çalışmalarda izlenmektedir. Burada belirtilmelidir

ki bu tip uygulamalarda oluşturulan sargılama etkileri, pasif sargılama olarak adlandırılmakta ve nitelendirilmektedir. Pasif sargılamada uygulamanın etkinliği, kesitin hasar alıp çatlayarak genişlemeye başlaması ile ortaya çıkmaktadır. Çatlama sonucu kesitin genişlemesi ile birlikte, kullanılan sargılama malzemesi üzerinde oluşan çekme gerilmeleri oluşmakta, bunun sonucu olarak kesit üzerinde yanal sargılama gerilmeleri meydana gelmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi kesitte oluşacak aderans probleminden ve/veya diğer etkenlerden kaynaklanan çatlamalara kadar, sargılama etkisi yok denecek kadar az olmakta, bu durumda bindirmeli donatı ekinde bir miktar sıyrılmanın ortaya çıkmış olması kaçınılmaz hale gelmektedir. Literatürdeki güçlendirme çalışmalara bakıldığında, güçlendirilen kolonlardan elde edilen sonuçların, sürekli donatı içerdiği düşünülerek yapılan kolon tasarım değerlerini yakalanmasında hala sorunlar olduğu düşünülmektedir.

Uç bölgelerinde yetersiz donatı bindirme eklemesi yapılmış kolonlarda, deprem etkisi ile meydana gelmesi muhtemel erken ve gevrek göçmelerin, pasif sargılama yerine aktif sargılama ile önlenmesi hedefiyle bu çalışmanın yapılması düşünülmüştür. Bu amaca yönelik olarak, kesit üzerinde sargılama etkisini, uygulandığı andan itibaren öngerilmeli FRP şeritlerle oluşturan aktif sargılama yöntemi çalışmada geliştirilerek kullanılmıştır. Bindirmeli ek problemi olan kolonların yük taşıma kapasiteleri, tasarım aşamasında hedeflenen yük seviyelerine öngerilmeli FRP sargılamasıyla tekrar getirilebilmesi, çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Bu bölümde, konu ile ilgili literatür araştırmasının sonuçları yer almaktadır. Yapılan çalışmanın temel unsurları olan aderans ve bindirmeli donatı eklerinin davranışı, lifli polimerler (FRP) ve betonda sargılama konuları özetlenmiştir. Bindirmeli donatı eklemesi yapılarak, boyuna donatı yerleşimi sağlanmış betonarme kolonların, deprem davranışı, güçlendirilmesi ve özellikle sargılamanın davranışa etkisi ile ilgili literatür taramasından elde edilen sonuçlar, bu bölümün içeriğini oluşturmaktadır.

2.2. Aderans, Donatıların Kenetlenmesi ve Bindirmeli Ekler

Betonarme yapı elemanının tasarlandığı gibi davranabilmesi ve kompozit bir malzeme olabilmesi için gerekli en temel şartlardan biri, beton ve donatı çeliğinin arasındaki bağlantının yeteri kadar sağlanmasıdır. Bu sayede betonarme yapı elemanında, kapasite altı yüklerde sıyrılma olmayacağı ve yükleme sırasında oluşacak deplasmanlarda beton ve donatıda benzer deformasyonların oluşacağı varsayılmaktadır [2]. Böyle bir durumda, donatının betona yeteri kadar kenetlendiği söylenebilir. Bunun sonucu olarak, denge altı donatılı betonarme elemanda, kritik kesitteki basınç bölgesinde bulunan betonun ezilmesinden önce, donatı akmaya başlayacak ve istenilen kompozit davranış sergilenecektir. Betonarme tasarım şartnamelerinin hemen hemen hepsinde, kenetlenme için verilen formüller malzemeler arasındaki bağın tamamıyla kırılmasından önce, donatının akacağı düşüncesi ışığında türetilmişlerdir. Aksi durumlarda, donatıda oluşan gerilmelerin betona yeteri miktarda aktarılamaması sonucu, donatının betondan sıyrılarak ani ve gevrek göçmelere neden olacağı çok açık bir gerçektir.

Beton ve donatı arasındaki gerilme aktarımını sağlayarak, ortak deformasyon yapabilmelerine neden olan kayma formundaki gerilmelere, aderans (gerilmeleri) denilmektedir [2-4]. Aderans gerilmesi, donatı ile beton ara yüzeyinde ve donatı eksenine paralel doğrultuda oluşmaktadır.

Aderans gerilmesi, genellikle betonarme yapı elemanlarında iki ayrı şekilde incelenmektedir: "Eğilme aderansı" ve "kenetlenme aderansı". Farklılığın daha iyi anlaşılabilmesi için, yapı elemanı üzerinde oluşan etkilerin incelenmesi gerekmektedir. Betonarme elemanlarda oluşan iç kuvvetler, yük etkileri ile eleman boyunca farklılıklar göstermektedir.

Momentin, bir kesitten diğerine farklılık gösterebilmesi için, donatıdaki gerilmenin de bu değişimi karşılayabilecek biçimde değişmesi gerekmektedir. Donatı üzerindeki gerilmenin bir noktadan diğerine ani değişimler gösterebilmesi, beton ile donatı arasında aderans gerilmelerinin oluşması ile mümkündür [4]. Bu tür eğilme momentinde ani değişimler gösteren betonarme parçada yer alan donatıda, ani gerilme değişimleri sonucunda oluşan aderans türüne, eğilme aderansı adı verilmektedir.

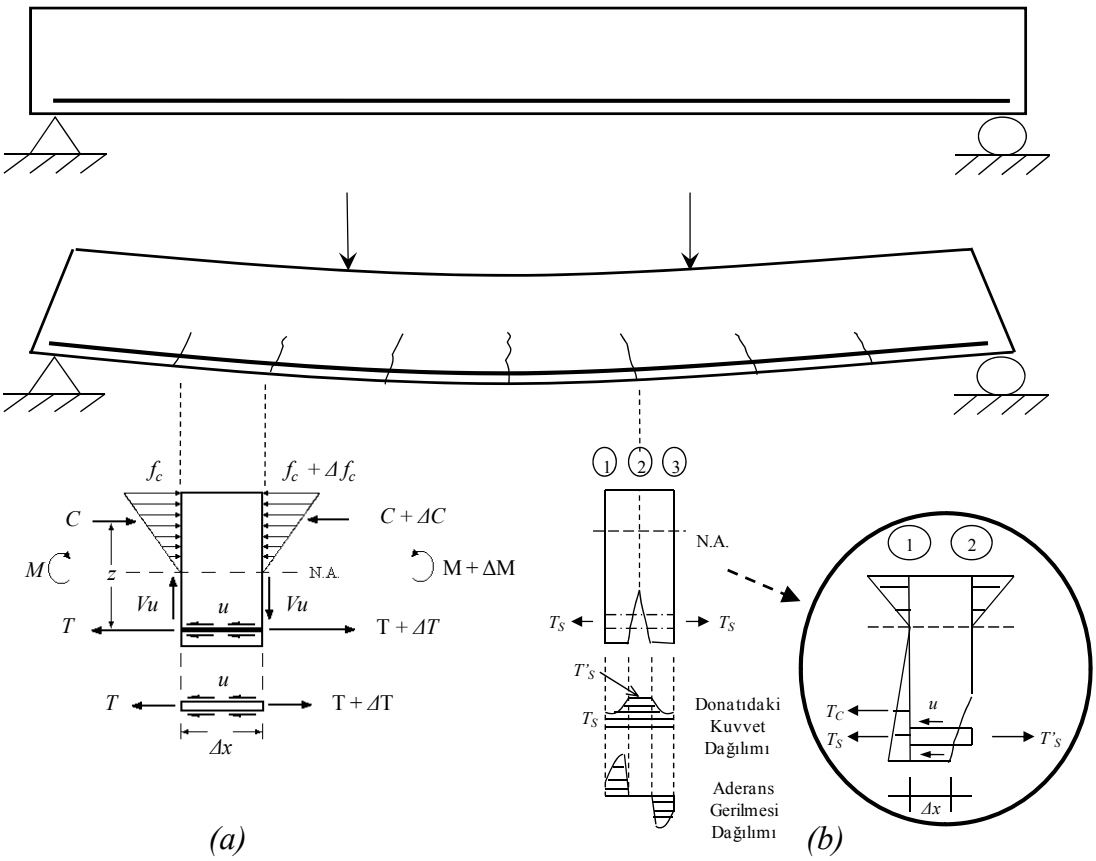
Şekil 2.1'de eğilme etkisindeki kiriş ve iki farklı bölgedeki beton parçaya ait serbest cisim diyagramları görülmektedir. Bu kirişte iki noktadan yükleme yapılmıştır. Yükleme sonucu oluşan moment değerleri, mesnetler ile kuvvetler arasında artıyorken, iki kuvvet arasında sabittir. Kesme kuvveti ise mesnetler ile kuvvetler arasında sabit ve ters işaretli, iki kuvvet arasında sıfırdır. a ile gösterilen parça, momentte değişikliğin olduğu bölgeye aittir [2]. b ile gösterilen parça ise momentte değişikliğin olmadığı, sabit kaldığı bölgede bulunmaktadır [2].

Şekil 2.1 a'da momentin arttığı bölgede, yük etkisi ile oluşan iki çatlak arasındaki betonarme parça görülmektedir. Bu parçanın dengesi incelendiğinde, moment değişimi sonucu oluşan ΔT fark kuvvetinin, Δx uzunluğu boyunca donatı etrafında oluşan eğilme aderansı ile karşılandığı görülür (Denklem 2.1). Burada, aderans gerilmelerinin donatı uzunluğunca düzgün yayılı olarak dağıldığı varsayılmaktadır.

$$\Delta T = u\left(\pi D_b\right)\Delta x = \frac{\Delta M}{z} = \frac{V_u}{z}\Delta x \tag{2.1}$$

1971'e kadar, özellikle Amerikan yapı şartnamesinde (ACI Code) aderansla ilgili hükümler, aderans gerilmelerinin sadece momentteki değişimlerden kaynaklandığı görüşü üzerine kurulmaktaydı [2]. Yapı elemanı üzerinde, kesme kuvvetinin sıfır olduğu ve dolayısıyla momentin değişim göstermeyerek sabit kaldığı bölümlerde, bu

düşünce yetersiz kalmaktadır. Deney sonuçları, çatlakların oluştuğu bölgelerde, donatıdaki gerilmelerde ve aderans gerilmelerinde büyük değişimlerin oluştuğunu



Şekil 2.1: Yük altındaki kiriş ve eğilme etkisindeki kirişin değişik bölgelerindeki parçalara ait serbest cisim diyagramları

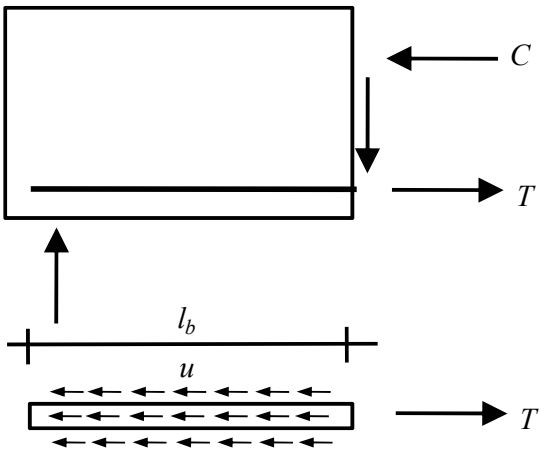
göstermektedir. Bunun dikkate alınması ile sabit moment etkisindeki eğilme bölgesi için, temelde önceki ile aynı olmakla birlikte, alternatif bir aderans yaklaşımı olan ankraj boyu düşüncesi ortaya çıkmıştır.

Şekil 2.1 b'de sabit moment etkisi altında ve yerel eğilme çatlaklarının bulunduğu bölgeden, bir adet çatlağı da içeren parçanın serbest cisim diyagramı görülmektedir. Eleman üzerindeki moment, çatlamış kesitte (Şekil 2.1 b kesit 2) de taşınmaya devam edecek ve şekilde görüldüğü gibi boyuna çekme kuvvetinin tamamı (T'_S), bu kesitte donatı çeliği tarafından karşılanacaktır. Çatlamış kesitin hemen yanında bulunan ve beton ile donatının temas halinde bulunduğu kesitlerde (Şekil 2.1 b, kesit 1 ve kesit 3) ise, T'_S kuvveti çatlamamış beton parça ve donatı çeliği tarafından karşılanacaktır. Şekilde çatlamış nokta ve yakın çevresinde, donatı ve aderans

gerilmelerindeki değişimler görülmektedir. Betonun bu kuvvet dağılımına katkısı, donatı çeliğinde iki kesit arasında (Şekil 2.1 b, kesit 1 ve kesit 2) oluşan gerilme farkı kadar olmaktadır. Donatı çeliğinde gerilme değişiminin olması, beton ile donatının temas halinde olduğu parçada aderans gerilmelerinin var olduğunun en büyük kanıtıdır. Bu anlatılan olgu denge denklemi yardımı ile sayısallaştırılırsa, denklem 2.2'deki aderans gerilmesi ifadesi elde edilir [2].

$$u = \frac{(T'_S - T_S)}{(\pi\ D_b)\,\Delta x} \tag{2.2}$$

Beton kütle içerisine yerleştirilmiş bir donatı çubuktan beklenen davranış, bulunduğu yerden çıkarılmak için kuvvet uygulandığında betondan sıyrılıp veya beton parçayı yarıp çıkmaması, yani kararlı bir halde bulunmasıdır. Bunun olabilmesi için donatı çubuğun, beton kütleye yeteri miktarda gömülmüş olması gereklidir. Beton içerisinde bırakılan donatı parçası boyunca, aderans gerilemeleri oluşarak donatı üzerindeki kuvvet betona aktarılmakta ve istenilen davranışın sergilenmesini sağlanmaktadır. Söz konusu yeterli uzunluğa kenetlenme boyu (l_b) ve bu tür aderansa da kenetlenme aderansı denilmektedir [4].



Şekil 2.2: Donatı erleştirilmiş parçanın serbest cisim diyagramı

Şekil 2.2'de yer alan parçada yatay kuvvet dengesi, Denklem 2.3'deki gibi yazılabilir.

$$T = A_b f_S = \left(\frac{\pi\ D_b^{\,2}}{4}\right) f_S = \sum_0^{l_b} u(\pi\ D_b) \tag{2.3}$$

Aderans gerilmelerinin kenetlenme boyu uzunluğunca düzgün dağıldığı varsayılarak Denklem 2.3 düzenlenirse, l_b kenetlenme boyu aşağıdaki şekilde elde edilir [4].

$$l_b = \frac{D_b}{4u} f_S \tag{2.4}$$

2.2.1. Donatı-beton arasında aderans oluşum mekanizması ve aderans göçmesi

Donatı olarak kullanılan çelik çubuklar, yüzey özelliklerine göre nervürlü ve düz yüzeyli olarak iki gruba ayrılmaktadır. Günümüzde düz yüzeyli çubuklar yapı imalatında boy donatı olarak kullanılmamaktaysa da, mevcut yapı stoğundaki eski yapılarda bu tip donatılar boy donatı olarak bulunmakta ve aderans açısından farklılığın bilinmesi gerekmektedir. Üretim aşamasında üzerinde deformasyonlar oluşturulan nervürlü donatılar ile düz yüzeyli donatıların, beton ile arasındaki bağlanma ve aderans davranışında büyük farklılık görülmektedir [5].

Betonarme bir elemanın oluşum süreci, bilindiği gibi donatının kalıp içerisine yerleştirilmesinin ardından, betonun kalıba dökülmesi ve sertleşerek prizini alması ile gerçekleşmektedir. Bu iki malzeme arasındaki bağlantıyı sağlayan en temel ve doğal neden, bu süreçte beton ile donatı arasında oluşan kimyasal yapışmadır.

Birbirine temas eden iki malzeme arasında rölatif hareketlenme olduğu durumda, temas yüzeyinde ve bu harekete ters yönlü bir direnç oluşacağı, mekaniğin en temel kanunlarından biridir. Oluşacak olan ters yönlü sürtünme kuvveti, iki malzemeyi birbirine doğru iten kuvvet ve iki malzemenin ara yüzeylerinin pürüzlülük oranı ile doğru orantılıdır. Belirli yük seviyelerinden sonra, donatı ve beton arasında rölatif hareketlenmeler oluşmaktadır. Bunun sonucunda beton ile donatı ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvveti, aderansı oluşturan diğer bir etkendir. Bu aşamada

- kimyasal yapışma
- sürtünme kuvveti

hem düz yüzeyli donatılar, hem de nervürlü donatılarda aderans oluşumunu sağlayan temel bileşenlerdir.

Düz yüzeyli çubuklarda aderans, kimyasal yapışma ve sürtünme etkileri sonucu oluşmakta, nervürlü donatılarda ise aderans oluşumunu, bu iki faktörle beraber daha belirgin bir paya sahip olan

- mekanik diş etkisi

sağlamaktadır.

Aderansı oluşturan bu sebeplerin katkısı, donatı üzerindeki gerilmenin farklı seviyelerine göre değişmektedir [2]. Yük etkisi ile gerilmeler artmaya başladığında, donatı (nervürlü ya da düz yüzeyli) ile beton arasındaki gerilme aktarımı, belirli bir gerilme seviyesine kadar kimyasal yapışma ile sağlanmaktadır. Kimyasal yapışmanın oluşturabileceği sınırlı aderans gerilmesi, bazı kaynaklarda 1.38-2.07 MPa olarak [2], bazı kaynaklarda ise beton çekme dayanımının 0.2-0.8 katı olarak [6] verilmektedir. Kimyasal yapışma, aderans oluşumunda en düşük katkıya sahip olan etkendir. Eleman üzerindeki gerilmeler arttıkça kimyasal bağlar kırılır. Bununla birlikte donatı, birim deformasyon farklılığından dolayı etrafını saran betona göre küçük yer değiştirmeler yapmaya çalışacaktır [3]. Bu seviyeden itibaren, nervürlü ve düz yüzeyli donatılardaki aderans oluşumunu birbirinden ayırmak gerekir.

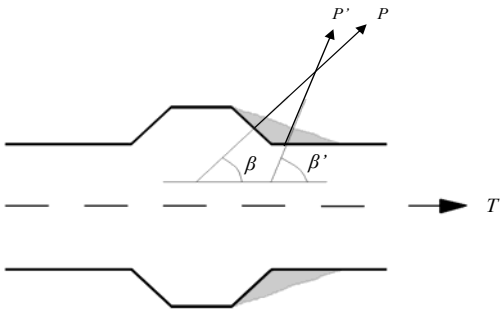
Düz yüzeyli donatılarda kimyasal bağların kırılmasının ardından oluşan rölatif hareketler, sürtünme kuvvetleri ile karşılanmakta ve bu sayede aderans gerilmeleri oluşmaktadır. Bilindiği gibi sürtünmenin oluşabilmesi için, ara yüzeye dik doğrultuda belirli bir kuvvetin olması gerekmektedir. Düz yüzeyli donatının etrafını saran beton, prizini alıp sertleşirken yapacağı büzülmeden (hacim azalmasından) dolayı, serleştikten sonra donatıya bir basınç uygular. Bu basınç sürtünmede etkili olan normal kuvveti oluşturan etkenlerden biridir. Sürtünme için gerekli normal kuvveti oluşturan diğer faktör ise, donatı üzerindeki pürüzlerin ve küçük girinti çıkıntıların, yer değiştirme ile içinde bulunduğu betonda belirli bir oranda kama etkisi oluşturmasıdır. Düz yüzeyli donatıların üzerindeki bu küçük girinti çıkıntı ve pürüzler, sürtünmenin oluşmasını sağlayan temel sebeptir [3, 7].

Nervürlü donatılar için, aderansın kimyasal yapışma ile oluştuğu gerilme seviyelerinde, buna ek olarak bir etken daha ortaya çıkmaktadır. Nervür dişlerinin, önünde bulunan betona ezmeksizin dayanması, düşük gerilme seviyelerinde

aderans oluşumunda kimyasal yapışmaya yardımcı bir rol oynamaktadır. Bu etkiyi durağan olması yönüyle, Abrams (1913)'ın düz yüzeyli donatılar için benzer seviyelerde tanımladığı, statik sürtünme gibi düşünmek mümkündür.

Nervürlü donatılarda da, eleman üzerindeki gerilmelerin artmasıyla birlikte, kimyasal yapışma ile oluşan bağlar kırılmakta ve mekanizma statik halden, kinetik hale geçmektedir. Donatı ile beton arasında rölatif hareketlenmeler, yani çok küçük değerlerdeki ilk sıyrılmalar oluşmaya başladığında, nervürlerin betona kenetlenmesi aderans oluşumunda pay sahibi olmaya başlamaktadır. Nervürlü donatılarda aderansı oluşturan ana unsur, donatı üzerindeki dişlerin mekanik kilitlenmesidir. Bu durum diğer unsurların ihmal edildiği değil, nervürlü donatılardaki aderans oluşumunda ikincil önemde etkilerinin olduğu anlamına gelmektedir [3]. Donatıda sıyrılma başladığında nervürler, dişler arasındaki betona tam olarak dayanarak harekete engel olmaktadırlar.

Eleman üzerindeki gerilmeler arttıkça, donatı üzerindeki dişlerin, önünde bulunan betona uyguladığı kuvvet artmaktadır. Bu incelendiğinde, diş niteliklerinin, özellikle nervür açısının, davranış üzerinde önemli bir unsur olduğu ortaya çıkmaktadır. Nervürlü donatılarda, eleman üzerindeki gerilmelerin daha büyük seviyelere ulaşması ve sıyrılma değerlerinin artmasıyla birlikte, dişlerin önünde yer alan beton ezilmeye başlamaktadır [3].

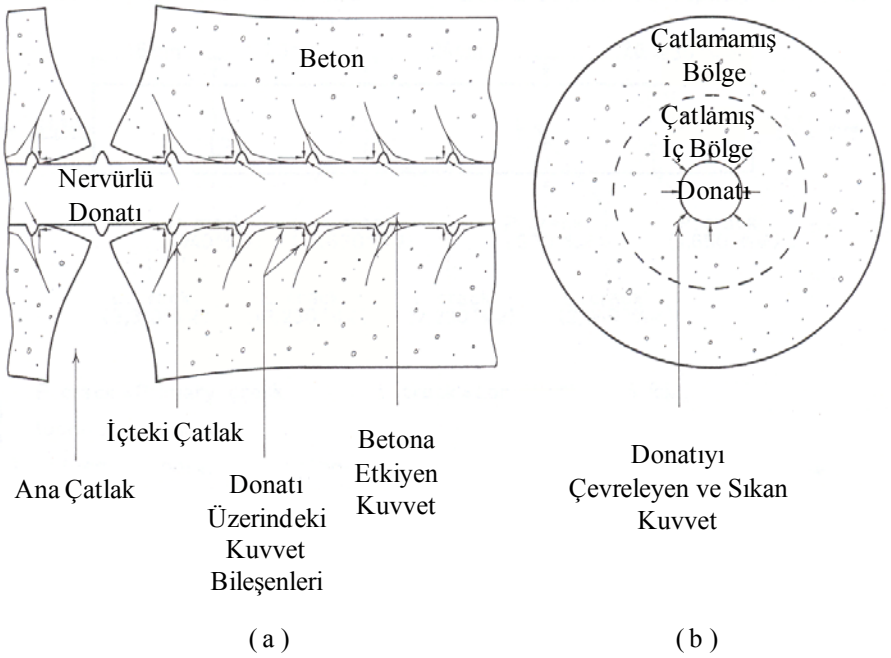


Şekil 2.3: Artan gerilme seviyelerinde nervür önündeki betonun ezilmesi

Nervür önündeki betonun ezilmeden önceki durumu incelendiğinde, betonun oluşumu sırasında medyana gelen ve doğasında var olan mikro boşlukların varlığı görülmektedir. Sıyrılma sonucu dişlerin etkisi ile ezilerek toz haline gelen bu beton parça, homojen boşluksuz bir hal almakta, bununla birlikte yeni bir nervür yüzeyi ve açısı (β') oluşmaktadır (Şekil 2.3) [3]. Bu durumda donatıyı çevreleyen beton

üzerindeki kama etkisi ve radyal gerilme kuvvetleri artmakta, buna bağlı olarak da beton üzerinde oluşan çekme gerilmeleri büyümektedir.

Goto (1971) yaptığı çalışmada, dişlerin mekanik kilitlenmesi ile betondaki davranışı ve oluşan çatlakları incelemiştir [8]. Donatının iki ucundan eksenel çekme uyguladığı silindir şeklindeki betonarme elemanların donatı - beton ara yüzeylerine, deney sırasında mürekkep enjekte etmiştir. Göçmeye ulaşmadan deney bitirilmiş ve elemanlar ikiye ayrılarak, içteki çatlaklar incelenmiştir (Şekil 2.4).



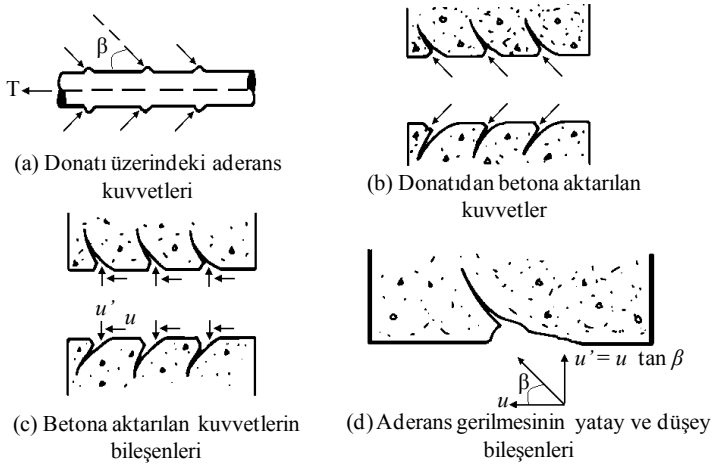
Şekil 2.4: Kesit içindeki çatlakların oluşumundan sonra donatı etrafındaki betonda oluşan deformasyonlar [8]

Bu deneylerde, belirli bir gerilme seviyesinin ardından eleman üzerinde, betonun dış yüzeyine ulaşan birincil, ana çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlaklarda, anlaşılabileceği gibi gerilmeler sadece donatı tarafından taşınmaktadır. Dış çatlağın olmadığı betonarme bölge, deney sonunda ikiye ayrılıp incelendiğinde bu kesimde dış yüzeye varmayan çok sayıda iç çatlağın oluştuğu görülmüştür. İçteki çatlakların, donatıdaki dişlerin bulunduğu bölgelerde meydana geldikleri ve donatı ekseni ile 45°-80° aralığında (çoğu kabaca 60°) kendilerine en yakın ana çatlağa yönelecek şekilde oluştukları görülmüştür [8].

Şekil 2.4'de görülen içteki çatlakların, nervürlü donatıların aderans oluşum mekanizması üzerinde büyük etkisi olduğu bilinmektedir. Şekilde

görülebileceği gibi bu iç çatlaklar, donatı çevresindeki bölgede, dişlerin donatıdaki gerilmeleri betona iletmesi ile ana çatlaklara yönelmiş beton bir tarak oluşturmaktadırlar. Şekil 2.4. b'de elemanın kesiti yer almaktadır. İçteki çatlakları dış yüzeye ulaşamamakta ve çatlama nedeniyle plastik deformasyon yapmış olduklarından dolayı donatı etrafında, çatlamış–plastik deforme olmuş bir bölge oluşturmaktadırlar. Daha dış katmanda ise bu bölgeyi saran ve kalıcı olmayan deformasyonlar yapan bir çatlamamış–elastik bölge varlığını korumaktadır. Donatı ve çatlamamış–elastik bölge arasındaki çatlamış iç bölge, donatının sıyrılması ile daha fazla gerilme almakta, tarak şekline benzetilen yapının dişleri daha da deforme olarak donatıyı çevreleyen ve sıkan kuvvetler oluşmaktadır. Donatıyı çevreleyen ve sıkan bu kuvvetler aynı zamanda, donatı etrafındaki betonda halka formundaki bir çevrede, çekme gerilmelerine sebep olmaktadırlar. Bu çekme gerilmeleri eleman yüzeyinde, donatı eksenine paralel boyuna çatlaklar meydana getirmektedir [8].

Şekil 2.5'de, nervürlü donatılarda sıyrılmanın başlamasıyla mekanik diş etkisi sonucu oluşan, etkileşim kuvvetleri açık biçimde görülmektedir.

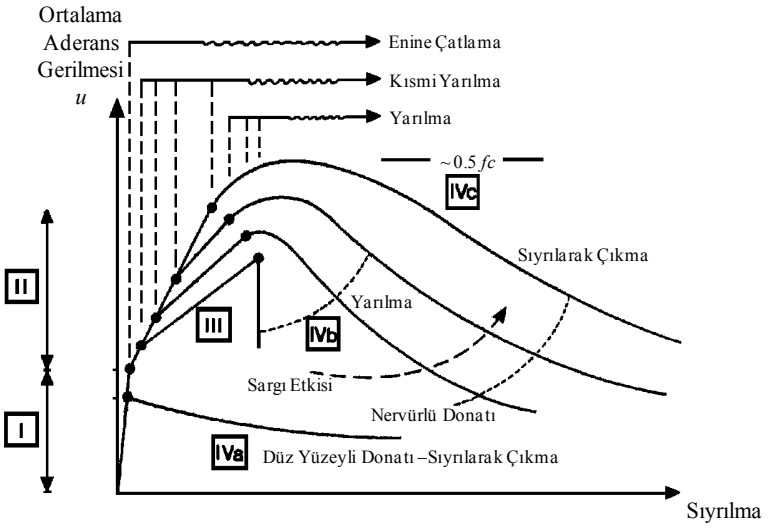


Şekil 2.5: Nervürlü donatı ile beton arasında oluşan kuvvetler [9]

Şekil 2.5'de de görüldüğü gibi, daha önce anlatılan mekanik diş kenetlenmesinin beton üzerinde oluşturduğu gerilme kuvveti, nervür açısı olan β eğimi ile etkimektedir. Bu gerilme kuvvetinin, donatı eksenine paralel doğrultuda olan yatay bileşeni u, aderans gerilmesini oluşturmaktır. Düşey bileşen ise radyal bileşen olarak da anılmakta ve $u\tan\beta$ şeklinde matematiksel olarak ifade edilen bu bileşen, donatı çevresindeki beton üzerinde çekme gerilmeleri oluşturmakta, göçme sırasında da

elemanın yarılmasına sebep olmaktadır. Donatı kesiti düşünüldüğünde, kesit çevresi etrafında yer alan bu radyal gerilme kuvvetleri, boru analojisi kullanılarak Tepfers (1973) tarafından modellenmiştir. Yapılan çalışmalarda aderans kapasitesine yaklaşıldıkça, oluşan aderans gerilmeleri, ankraj boyu uzunluğunca düzgün dağılıma yakın bir dağılım gösterdiği saptanmıştır. Buna göre radyal gerilme kuvvetleri, kalın çeperli beton bir boru içindeki suyun basınç kuvvetlerine benzetilmişlerdir. Beton borunun kalınlığı, yan yana yerleştirilmiş iki donatı arasındaki mesafenin yarısı veya pas payı değerlerinden küçük olanına eşittir [9]. Bu modeldeki beton borunun, Goto (1971)'nun tarif etmiş olduğu plastik etkilere maruz kalan iç bölge göz önüne alınarak düşünülmesi, konunun anlaşılmasında daha etkili olacaktır.

Düz ve nervürlü donatıların kullanıldığı betonarme elemanlarda aderans oluşumunun farklı olması gibi, aderans göçmesi mekanizması da farklılık göstermektedir. Düz yüzeyli donatılarda göçme, betonarme eleman üzerindeki gerilmelerdeki artışlar sebebiyle, aderansın en büyük değerine ulaşması (Şekil 2.6-I) ve artan rölatif hareketler sonucunda donatının, içinde bulunduğu betondan sıyrılarak dışarı çıkması şeklinde oluşur (Şekil 2.6-IVa) [6].

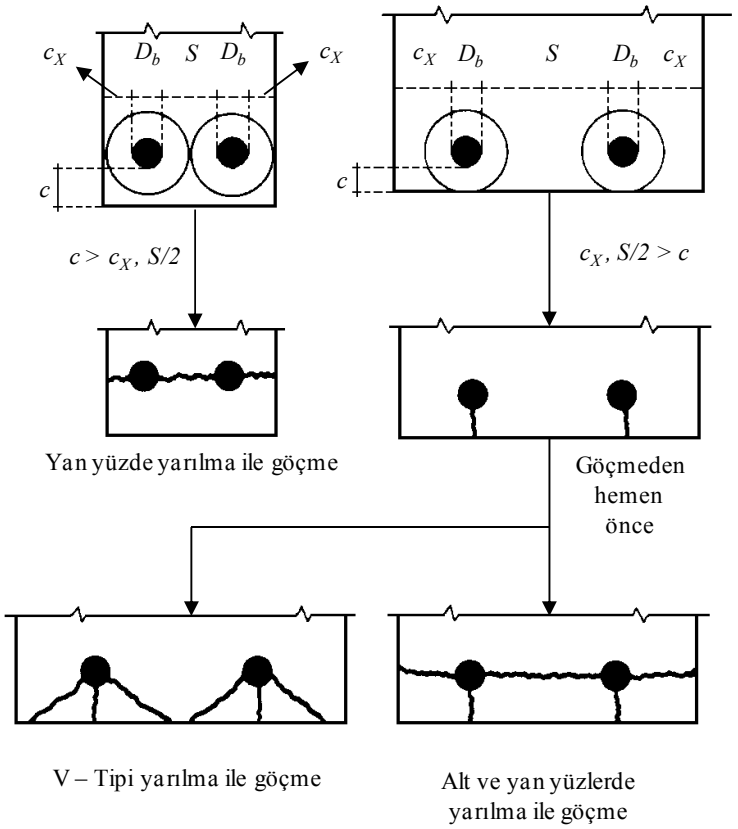


Şekil 2.6: Tipik ortalama aderans gerilmesi – sıyrılma grafikleri [6]

Nervürlü donatılarda ise göçme, birçok faktöre bağlı olarak değişik biçimlerde oluşabilmektedir. Bu farklılığı, artan gerilmeler (Şekil 2.6-II) doğrultusunda betonarme elemanın sahip olduğu bünye özellikleri belirlemektedir. Bilindiği üzere, eleman üzerindeki gerilmelerin artması ile mekanik diş kilitlenmesi, daha çok ön

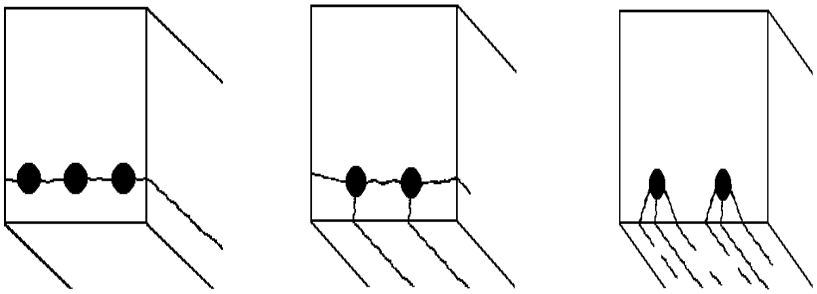
plana çıkmaktadır (Şekil 2.6-II). Nervürlerin önündeki betonun ezilmesi sonucu dayanma yüzeyindeki değişme ile radyal gerilmeler artar ve betonda oluşan kama etkisi artarak devam eder (Şekil 2.6-III). Donatı çevresindeki beton üzerinde, iç çatlamalar ile oluşan plastik deformasyonlar ve kama etkisi sonucu oluşan çekme gerilmelerinin, betonun çekme kapasitesini aşmaya başladığı durumlarda kesit yüzeyinde donatıya paralel kısmi yarılmalar görülmektedir. Bu kesitlerde, betonun etrafındaki sargılama etkilerinin de değişimine göre, az sargı etkisi olduğu durumlarda, kısmı yarılmalar artar ve bunların birleşmesi ile eleman yarılarak göçmektedir (Şekil 2.6-IVb). Donatı çevresindeki betonun çekme kapasitesinin yüksek ve üzerinde yeterli sargılama etkilerinin bulunduğu durumlarda göçme oluşumu yarılmadan farklı bir hal alır. Nervürler arasında bulunan beton parçalar, sıyrılmanın artması ile üzerlerine etkiyen kesme gerilmelerini taşıyamaz hale gelmekte ve bu beton parçaların ana beton gövdeden kopmasıyla donatının sıyrılıp çıkmasına neden olmaktadır (Şekil 2.6-IVc). Burada belirtilmesi gereken bir diğer göçme mekanizması ise değinilen iki durumun birlikte oluşması, yani kısmi yarılmalar ile başlayıp sıyrılma ile sonuçlanan göçme türüdür. Bu durumda, sıyrılmaların etkisi ile dişler önündeki beton parça ezilmeye başlamakta, oluşan yeni nervür açıları ile radyal kuvvetler büyümektedir. Beton yüzeyinde kısmi yarılmaların görüldüğü bu durumda, kama etkisiyle şişmeye çalışan kesit yeteri kadar sargılanmış ise göçme, nervürlerin önünde bulunan beton parçaların kesme ile gövdeden ayrılıp, donatının sıyrılarak dışarı çıkması sonucu oluşmaktadır [6].

Daha önce tanımı yapılan donatı etrafındaki plastik çatlamış bölge ve boru analojisi düşünüldüğünde, yarılma ile sonuçlanan göçme türleri bu bölgenin ve varsayılan beton borunun kalınlığı, yeri ve beton dayanımına göre farklı biçimlerde oluşabilmektedir. Donatı etrafındaki beton silindir kesitin üzerinde var olan, donatının kama etkisi ile oluşan çekme gerilmeleri, bu kesitin tamamında yer almaktadır. Çekme gerilmeleri var olan en zayıf bölgeyi yarıp, göçme mekanizmasını başlatmaktadır. Şekil 2.7'de, donatı etrafında oluşan beton silindirin alabileceği değişik hallere göre yarılma ve göçme tipleri özet olarak verilmiştir.



Şekil 2.7: Aderans sorunundan kaynaklanan yarılma türleri [9]

Göçme davranışını kontrol eden donatı etrafındaki beton silindirin kalınlığı, donatı yüzeyinin beton alt yüzeyi ile arasındaki mesafe (c), beton yan yüzeyi ile arasındaki mesafe (c_x), ve komşu donatılar arası uzaklığın yarısı ($S/2$) değerlerinden en küçük olanına eşittir (Şekil 2.7). Şekil 2.8'de, tanımlanan aderans göçme tiplerinin betonarme eleman üzerindeki görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2.8: Aderans sorunundan kaynaklanan yarılma tiplerinin betonarme eleman üzerinde gösterimi

Betonarme elemanlarda, donatıların yerleşimine göre aderans yarılmaları ayrı ayrı oluşabileceği gibi, aynı kesitte bir kaç tip yarılma beraber de görülebilmektedir. Büyüyen eleman kesit boyutları, kesit en-boy oranının artması, aynı düzlemde çok

fazla donatının kenetlenmesi veya eklenmesi vb. durumlar, buna neden olabilmektedir. Örnek olarak geniş kesite sahip, kesit en-boy oranının büyük olduğu elemanlarda, aderans göçmesinin yan kenarlara yakın olan donatılardan başladığı ifade edilmektedir [9].

Aderansın yeteri kadar oluştuğu ve uygulanan yük etkisinde donatının betondan sıyrılıp çıkmadığı ya da elemanın yarılmadığı durumlarda donatı, tasarımda düşünüldüğü gibi akmaya başlamaktadır. Bunun sonucunda betonarme eleman taşıma kapasitesine ulaşabilmektedir. Kenetlenme veya bindirme boyunun yeterli fakat nispeten kısa olduğu olması gibi bazı durumlarda, donatı akmaya ulaştıktan sonra da aderans göçmeleri ile karşılaşılabilmektedir.

2.2.2. Aderans dayanımını etkileyen faktörler

Aderans dayanımını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. En önemlileri olarak beton dayanımı, betonda lif kullanımı, kenetlenme ve bindirme boyu uzunluğu, donatı çapı, geometrisi ve yüzey özellikleri, donatılar arası mesafe, paspayı kalınlığı, sargılama donatısı ve çevresel basıncın etki sıralanabilir. Görüldüğü gibi bazı faktörler doğrudan beton ile, bazıları ise donatı ile ilişkilidir. Genel olarak bu faktörleri beton ile ilgili, donatı ile ilgili ve sargılama ile ilgili değişkenlerin etkisi olarak ayırmak mümkündür. Genelde ikincil önemde olan geri kalan etkenler, diğer faktörler adı altında bu seriye eklenebilir [5].

Kullanılan betonun kalitesi ve özellikleri, aderans mekanizmasında ve aderans göçme davranışında önemli bir paya sahiptir. Bölüm 2.2.1'de anlatıldığı üzere, özellikle nervürlü donatıların kullanıldığı elemanlardaki aderansın oluşumunda, donatı etrafındaki betonda çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Nervürlü donatılarda göçme, oluşan bu çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aşması sonucunda yarılma ile veya nervürler arasındaki beton parçalarda oluşan kayma gerilmelerinin, betonun kayma dayanımının üstüne çıkması sonucunda sıyrılma ile oluşmaktadır.

Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Basınç dayanımı arttıkça çekme dayanımı da artmakta, fakat artış oranı çekme dayanımında, basınç dayanımındaki kadar yüksek olamamaktadır [10]. Örnek vermek

gerekirse basınç dayanımında sağlanacak iki kat artış, çekme dayanımının yükselmesini de sağlamakta, ancak bu iyileşme basınç dayanımındaki gibi iki kat olarak gerçekleşmemektedir. Literatürdeki çalışmalar sonucunda genel olarak, beton basınç dayanımın (dolayısı ile çekme dayanımının) artması ile göçme anında daha yüksek aderans gerilmelerin elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır (6, 10-12]. Lifli beton kullanımı, özellikle çatlama sonrası beton çekme davranışında iyileşmeye yol açması nedeniyle, aderans üzerinde olumlu etkiye sahiptir [14].

Agrega türü ve boyutları, karışımdaki suyun, çimentonun, diğer bağlayıcıların ve sürüklenen havanın oranları, betonun yerleştirilmesi, kürleme, vibrasyon, beton içerisinde boşluk ve oturmaya yol açması nedeniyle donatının yerleşim düzeni, beton ile ilgili aderansı etkileyen diğer faktörlerdir [5].

Donatı çapı artışı aderans dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir [7, 11, 13]. Nervür geometrisi, aderans davranışını değiştirebilen önemli parametrelerden biridir. Nervür geometrisinin bütün özellikleri, göreceli nervür alanı olarak tanımlanan bir denklemle ifade edilebilmektedir [6]. Özellikle üzerinde yeterli sargılama gerilmesi oluşturulmuş elemanlarda, göreceli nervür alanı arttıkça aderans dayanımının da arttığı bildirilmektedir [15, 16]. Kenetlenme/bindirme boyundaki artışın, aderans dayanımını artırdığı yaygın olarak bilinen bir olgudur. Donatılar arası mesafe ve pas payındaki artış da, aderans davranışını olumlu etkilemektedir [9, 17].

Gerek uygun etriye kullanımı, gerekse çevresel basınç etkisinin, aderans dayanımı ve davranışının üzerinde önemli derecede olumlu etkilerinin olduğu, yaygın olarak bilinmektedir. Bu etkinin belirli bir sargılama gerilmesi değerine kadar arttığı, bu sınır değerden sonra ilave edilecek sargılama gerilmelerinin yeni bir artış sağlayamadığı ifade edilmektedir [5, 9].

Sıcaklık, çevresel etkiler, donatıdaki korozyon ve yükleme türü, aderansı etkileyen diğer faktörler olarak sıralanabilir [5].

2.2.3. Tekil donatılarda ve bindirmeli eklerde kenetlenme boyu

Kenetlenme boyunun teorik olarak denge denklemleri ile ifadesi, Bölüm 2.2'nin sonunda verilmiştir (Denklem 2.4). Özetle hatırlamak gerekirse, beton içerisine

yerleştirilmiş bir donatıya ekseni doğrultusunda betondan dışarı doğru çekme kuvveti uygulandığında, beton ve donatı arasındaki etkileşimden dolayı bir tepki kuvveti oluşmaktadır. Beton içerisinde kalan donatının tüm yüzey alanında, kayma gerilmeleri formundaki aderans gerilmeleri oluşmaktadır. Donatının, beton içerisinde kalan, üzerinde aderans gerilmeleri oluşarak betondan çıkmasını engelleyen ve geri kalan kısmının akma gerilmesine ulaşmasını sağlayan parçası, kenetlenme boyu nitelendirilmektedir. Beton içerisinde bırakılacak donatının uzunluğu, kenetlenme boyundan az olamaz. Bu ifade, aderans gerilmesinin kenetlenme boyu uzunluğunca düzgün yayıldığı kabul ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$T = A_b f_y = \left(\frac{\pi \ D_b^{\,2}}{4} \right) f_y = \sum_0^{l_b} u\,(\pi \ D_b) = u(\pi D_b)\, l_b \tag{2.5}$$

Temelde Denklem 2.4 ile aynı olmakla birlikte bu eşitlik, kenetlenme boyunun, donatı çapının belirli bir katı olarak ifade edilebilmesi için Denklem 2.6'daki gibi düzenlenmektedir.

$$l_b = \frac{f_y}{4\,u} D_b \tag{2.6}$$

Tasarım yaparken, donatının akma gerilmesine ulaşabildiği gerekli en küçük kenetlenme boyunu ifade eden Denklem 2.6'dan somut bir değer alabilmek için, *u* yani aderands gerilmesinin sayısal olarak tanımlanması gerekmektedir. Bölüm 2.2.1 ve Bölüm 2.2.2'de belirtildiği gibi aderansı kontrol eden en önemli faktör, donatının etrafındaki beton ve özellikleridir. Beton boru biçiminde düşünülen bu sanal bölge, donatı ile beton arasındaki etkileşimin oluştuğu yer olarak tanımlanır. Bu bölgede hasar ve göçme olmadığı durumda, gerilme aktarımının sağlandığı ve kompozit davranışın elde edildiği düşünülebilir. Nervürlü donatılarda bu bölge üzerinde çekme gerilmeleri oluşmakta ve betonun çekme dayanımı aderansı kontrol eden en önemli parametre haline gelmektedir. Buna bağlı olarak aderans gerilmesi, beton çekme dayanımına, dolayısıyla beton basınç dayanımına bağlı olarak amprik tarzda Denklem 2.7'deki gibi ifade edilmektedir.

$$u = k\sqrt{f_c} \tag{2.7}$$

Denklem 2.7'de yer alan aderans gerilmesi ifadesi, kenetlenme boyunu ifade eden Denklem 2.6'da yerine yazılır ve düzenlenirse,

$$l_b = k_1 \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} D_b \tag{2.8}$$

şekline dönüşür. Denklem 2.8'de, k_1 hariç tüm terimler bilinmektedir. k_1 katsayısı, Denklem 2.7'de ki k katsayısı gibi, yapılan birçok deneyin sonucunda elde edilen, aderans ve donatı kenetlenmesini kontrol eden amprik bir değerdir. Aynı zamanda k_1 değeri, aderansı etkileyen faktörlerin bazılarının etkisini de içermektedir.

Değişik şartnamelerde temel kenetlenme boyu hesabı, özde Denklem 2.8 ile aynı olmakla birlikte, k_1'in aldığı farklı değer ve bazen de ifadelerle yer almaktadır. Ülkemizde kullanılan şartname olan TS 500 [18]'de, nervürlü donatılar için temel kenetlenme boyu

$$l_b = \left(0.12 \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} D_b \right) \geq 20 D_b \qquad \text{(N, mm)} \tag{2.9}$$

olarak hesaplanmaktadır. Betonun, tasarım eksenel çekme dayanımı olan f_{ctd}, yine TS 500 [18]'de $0.35\sqrt{f_{cd}}$ olarak ifade edilmektedir. Kenetlenme boyu denklemi (Denklem 2.9) ile ilgili TS 500 [18]'de, adresansı etkileyen bazı faktörlerin etkisi ayrı olarak tanımlanmış ve çeşitli katsayılar ilave çarpan olarak verilmiştir. Donatı çapı değişiminin etkisi 32 mm'ye kadar ihmal edilmiş, 32-40 mm arası çaplara sahip donatıların kullanımı durumunda, kenetlenme boyunun $100/(132\text{-}D_b)$ katsayısı ile çarpılacağı belirtilmiştir. Donatıların yerleşimi, konum I ve konum II olarak tarif edilmiş ve hesaplanan kenetlenme boyunun, konum II'ye giren çubuklar için 1.0 ile, konum I'e giren çubuklar için ise 1.4 ile çarpılacağı ifade edilmiştir. Beton örtüsünün (pas payı) donatı çapından az olduğu veya aynı sıradaki donatı çubukları arasındaki net uzaklığın donatı çapının bir buçuk katından küçük olduğu durumlarda, hesaplanan kenetlenme boylarının 1.2 ile çarpılarak artırılması sağlanmıştır [18].

Bütün bunlar göz önüne alınarak TS 500 [18]'deki kenetlenme boyu ifadesi (denklem 2.9), temel kenetlenme boyu formunda yazılırsa

$$l_b = 0.34\ k_{çap}\ k_{konum}\ k_{c,s}\ \frac{f_{yd}}{\sqrt{f_{cd}}} D_b \qquad \text{(N, mm)} \tag{2.10}$$

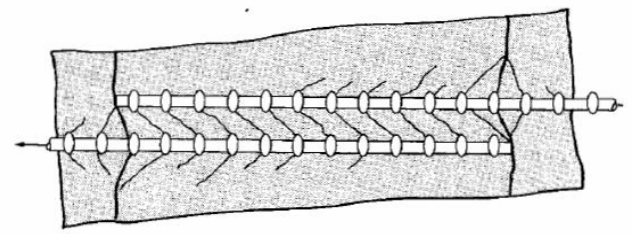
şeklinde bir sonuç elde edilir. Böylece kenetlenme boyu için şartnamede verilen tüm sınır durumlar aynı denklemin içinde görülebilir.

Boy donatı üzerine enine çubukların kaynaklanması veya mekanik/kaynak birleşimi yardımıyla donatının ucuna plaka eklenmesi ile de kenetlenme sağlanmasına şartnamede izin verilmektedir [18].

Yapı imalatı düşünüldüğünde, düşey elemanlarda kat bazında imalat yapılması sonucu, kat yüksekliği kullanılan donatıların boyunu sınırlamaktadır. Ayrıca yatay elemanlarda tüm yap alanı boyunca tek bir donatının kullanılması mümkün değildir. Bununla birlikte kullanılan donatıların sürekliliğinin sağlanması, garantilenmesi gereken kaçınılmaz bir işlemdir. Bu durumda birbirini takip eden donatıların eklenmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Donatıların eklenmesi için, donatıların uç kısımlarının beton içinde serbest olarak aynı doğrultuda üst üste bırakılması/bindirilmesi, mekanik birleştiriciler kullanılması veya donatıların birbirlerine kaynaklanması yöntemleri kullanılmaktadır. Kaynaklama işlemi için donatıların, kaynak yapılmaya uygun karbon içeriğine, ısı ile kırılgan hale dönüşmeyen yapıya sahip olmaları gerekmektedir [18]. Mekanik birleştiricilerin (manşon) kullanılması, kaynakla birleştirmede olduğu gibi maliyeti arttırmakta ve zaman almaktadır. Bu sebeplerden dolayı genellikle bindirmeli ek kullanarak donatı sürekliliğinin sağlanması tercih edilmektedir.

Bindirme ile donatı eklenmesi durumunda, bir donatıdaki kuvvetin diğerine aktarımı, beton aracılığı ile olmaktadır [19]. Bu yüzden gerilme transferinin sağlanabilmesi için, bindirme yapılan iki donatı arası mesafenin belirli bir değerden az olması veya bitişik biçimde eklenmesi gerekmektedir [18]. Bindirme boyu uzunluğunca kuvvet aktarımı beton ortamı ile sağlandığından bindirmeli eklerin, betonda yüklemeler nedeniyle oluşan gerilmelerin az olduğu bölgelerde yapılası, doğru olan bir uygulamadır. Bu yüzdendir ki ülkemizde kullanımda olan deprem

şartnamesinde (DBYBHY), kolonlarda yapılacak bindirmeli eklerin, deprem etkisinde momentin sıfır olduğu kolon orta bölgesinde (Şekil 1.2) yapılması gerektiği yazmaktadır [1]. Ne var ki bu ifade sadece öneri niteliği taşımaktadır. Şekil 2.9'da, bindirmeli ek yapılan bölgede, beton içerisinde oluşan çatlaklar görülmektedir. Donatıdaki kuvvet, aderans gerilmeleri ile betona geçmekte, beton üzerinden de diğer donatıya akış sağlanmaktadır. Enine yarılma, genellikle donatıların bittiği noktalarda başlamaktadır. Etriye kullanımı, tekil donatıların kenetlenmesinde olduğu gibi, bindirmeli ek bölgesinde oluşan çatlakların açılmasını önlemekte ve aderans davranışına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [19]. Bu nedenle DBYBHY ve TS 500'de, bindirme bölgesinde mutlaka belirli sayıda etriye bulundurulması zorunluluğu getirilmiştir [1, 18].



Şekil 2.9: Bindirmeli ek yapılan bölgede beton içerisinde oluşan çatlaklar

Bindirmeli eklerde aderans mekanizması ve aderans göçmesi, tek donatının betona kenetlenmesi ile aynıdır. Dolayısıyla Bölüm 2.2.1 ve Bölüm 2.2.2'de verilen tüm bilgiler, bindirmeli ekler için de geçerlidir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'deki göçme tipleri, aynı biçimde bindirmeli eklerde de söz konusudur [9]. İki durum arasında farlılık gösteren nokta, aderansı ve aderans göçmesini kontrol eden donatı etrafındaki hayali silindirik beton borunun, bindirmeli eklerde eliptik bir beton boru gibi düşünüldüğüdür.

Temel olarak bindirmeli eklerde kenetlenme boyu, tekil donatı için hesaplanan kenetlenme boyunun belirli bir katı olarak düşünülür ve hesaplanır. TS 500'de bindirmeli ekler için kenetlenme boyu, Denklem 2.11'deki gibi verilmektedir.

$$l_0 = \alpha_1 l_b \qquad \text{(mm)} \tag{2.11}$$

Denklem 2.11'de α_1 katsayısı, 1 + 0.5r olarak ifade edilmiştir. r, aynı kesitte eklenen donatının toplam donatıya oranını temsil etmekte, bir ölçüde kesitte transfer

edilen gerilmelere göre kenetlenme boyunu ayarlamaktadır. Bindirmeli eklerin eleman boyunca, şaşırtmalı olarak yerleştirilmesi gerektiği ayrıca belirtilmiştir [18].

2.3. Lifli Polimer (Fiber-Reinforced Polymer - FRP)

Birden çok malzemeyi bir araya getirip, kullanılan malzemelerden daha üstün bir ürün ortaya çıkarma isteği, çabası ve hatta eylemi, insanlık için yeni keşfedilmiş bir davranış biçimi değildir. Bunun tamamen bilinçli bir öngörü sonucu mu ortaya çıktığı yoksa taklit etme davranışı ile mi düşünüldüğü sorusu, hayatın içinde sıkça kullanılan ahşabın da bir doğal kompozit olduğu gerçeği ile akla gelmektedir.

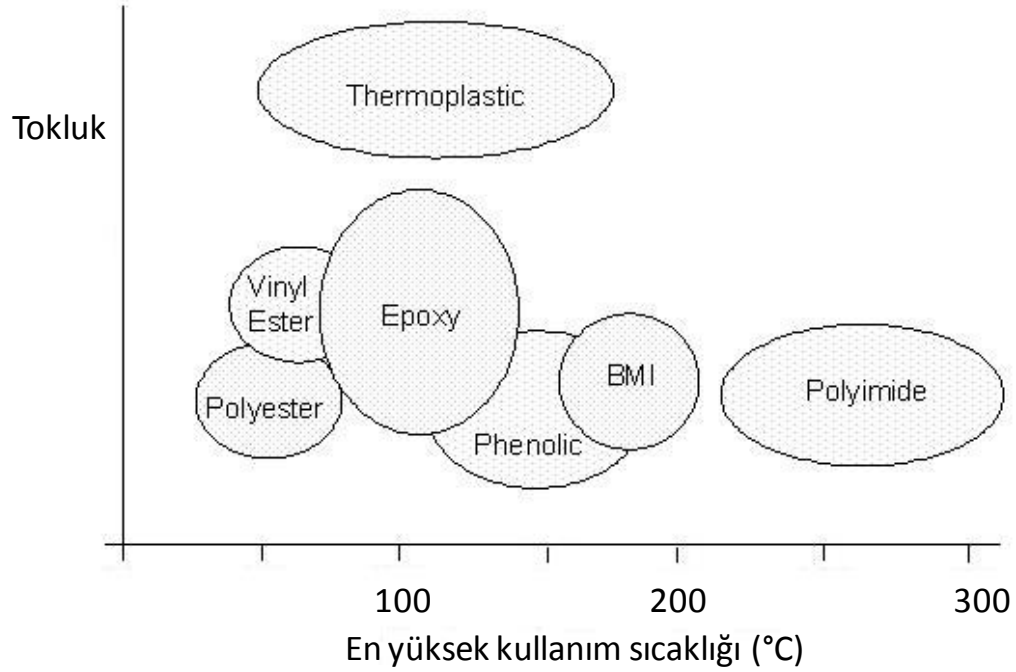
Kompozit malzeme olarak nitelendirilen sonuç ürün, genel olarak bileşenlerinin, birbirlerine göre zayıf veya eksik özelliklerini tamamlaması mantığına dayalı olarak imal edilmektedir. Hayata dair tüm konularda olduğu gibi, yapı ve yapı malzemeleri üretimi alanlarında da kompozit malzeme üretiminin oldukça başarılı örnekleri sergilenmiştir. Daha saf ve üstün özellikli çelik üretimi için demir eriyiğinin içine çeşitli madenlerin katılmasından, daha dayanıklı ve iyi görüntüye sahip briket oluşturabilmek amacıyla kil hamuruyla saman liflerinin birleştirilmesine kadar bu alanda birçok örnek bulunmaktadır. Hatta betonarme, elaman bazında bir ürün olarak, beton ile donatı çeliğinin birleştirilmesiyle oluşturulan oldukça başarılı bir kompozit üründür.

Özellikle geçtiğimiz yüzyılda gelişen teknoloji, yeni kompozit malzemelerin gündelik hayatta yaygın kullanım alanı bulmasını sağlamıştır. Günümüzde lifli polimerler (FRP), kompozit malzeme üretiminin en gözde ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır.

İlk plastik malzeme üretimi her ne kadar 19. yüzyılın ortalarına denk gelmekte ise de plastik malzemeler çağının başlangıcı, kimyager ve sanayicilerin bu konuda büyük adımlar attığı, vinil, polistren ve plastik cam gibi ürünlerin doğadan elde edilen eşdeğer ürünlerle boy ölçüşmeye başladığı, 20. yüzyılın başı olarak kabul edilmektedir. Geçtiğimiz yüzyılın başında çığır açan bu malzemenin kullanımı, içerisine daha güçlü parçaların yerleştirilip, bir anlamda süper dayanıklı plastiklerin üretimi sorusunu ve arayışını beraberinde getirmiştir. Bilinen ilk FRP ürün, cam liflerinin kullanıldığı, 1930'ların ortasında deneysel bir üretim olarak

karşımıza çıkan, tekne gövdesidir [20]. FRP kompozit malzemeler, yolculuğuna cam lifleri ile başlamışsa da, 1960'ların başında karbon ve aramid liflerin üretimiyle FRP malzemelerin çeşitliliği artmaya başlamıştır. Ayrıca çelik liflerden bor liflerine kadar değişik tipte liflerin, FRP malzemelerde kullanıldığı da bilinmektedir. 1930'lardaki başlangıcın ardından FRP malzeme, otomotiv, havacılık ve gemi sanayilerinden, uzay ve savunma sektörlerine, elektronik ve sportif ürünlerin imalatından, hatta ve hatta kurşungeçirmez yelek üretimine kadar pek çok alanda vazgeçilmez bir hammadde olarak karşımıza çıkmaktadır.

FRP kompozitler, malzemeye üstün mekanik özelliklerini sağlayan liflerden ve lifleri bir arada tutan polimer reçine matristen meydana gelmektedirler. Matris özetle, yatak malzemesi veya ürüne sonuç şekli veren ortam olarak tanımlanabilir. Matrisin ana görevi, lifler arasındaki boşluğun doldurulması, uygulanan yükün dengeli biçimde liflere aktarılması ve lifler arasında yük geçişini sağlayacak ortamın oluşturulmasıdır. Bunun yanında polimer reçine matris, sonuç FRP ürüne şekil verme ve lifleri dış etkilerden koruma görevlerini de üstlenmektedir [21]. Reçine matrisin mekanik özellikleri, liflerle kıyaslandığında oldukça düşüktür. FRP malzemenin dayanım ve rijitliğini lifler belirlerken, servis koşullarını ve özelliklerini seçilen birleştirici reçine matris kontrol etmektedir [22]. FRP üretiminde kullanılan reçine matrisler iki ana gruptan oluşmaktadır. En çok tercih edilen grup olan termosetler, oluşumunda çapraz bağlar kurarak, geri dönüşmeyen bir şekil alırlar. Tavada pişirilen yumurta benzetmesi, termostler için kullanılan en ideal analojidir. Diğer grup olan termoplastikler ise doğrusal molekül zincirlerinden oluşmakta ve ısı verilerek tekrar şekil değişikliği sağlanabilmektedir. Çikolata benzetmesi, termoplastikleri anlatmak için kullanılan anolojidir [22]. Termoset grubunda yer alan epoksi reçine matrisleri, kimyasal dayanıklılıkları ve nispeten yüksek mekanik özellikleri ile yapı alanında en çok tercih edilen reçine matris türüdür. Tokluk, yani enerji yutma derecesi olarak nitelendirebileceğimiz mekanik özelliklerine göre, matris tiplerinin kullanılabilir sıcaklık limitleri, yaklaşık olarak Şekil 2.10'daki gibidir. Şekilde termoplastikler grup olarak gösterilmiş, termosetlerin çeşitlerine göre sıralama yapılmıştır [22].



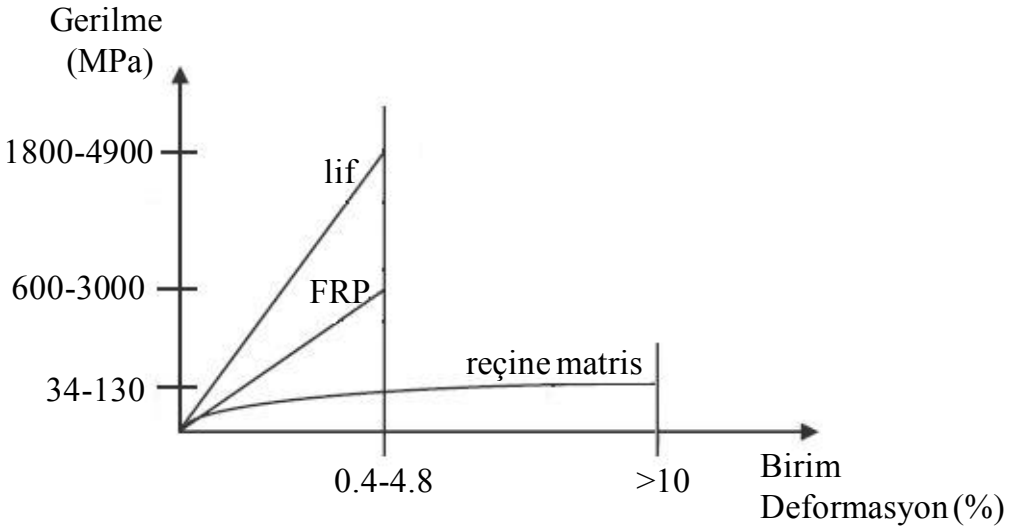
Şekil 2.10: FRP için kullanılan reçine malzemelerinin, en yüksek kullanım sıcaklık değerlerine göre sınıflandırılması [22]

Yapı sektöründe ilk FRP kullanımının, 1950'lerin ortalarında, Rubinsky ve Rubinsky tarafından öngerilme tendonu olarak kullanılması ile yapıldığı literatürde yer almaktadır [20, 23-25]. Çeşitli sebeplerle betonarme elemanlarda oluşan eğilme problemlerinde, epoksi ile çelik plakalar yapıştırılarak giderilmeye çalışıldığı ve işe yarar sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu yöntem 1960'ların sonundan itibaren birçok yapıda ve köprülerde kullanılmıştır. Çelik ile ilgili en büyük sorun olan paslanma, paslanma sonucu kesit kaybının yanında beton-çelik arası aderansta bozulma, ağırlık ve uygulama zorluğu, olumu etkisi kanıtlanmış bu güçlendirme yönteminde FRP kullanımını gündeme getirmiştir [21, 26]. Betonarme elemanların güçlendirmesi amacıyla FRP kullanılarak yapılan ilk deneysel çalışmanın, 1978'de Almanya'da gerçekleştirildiği belirtilmektedir [26]. 1980'lerde İsviçre EMPA laboratuarlarında Urs Meier ve ekibince yapılan çalışmalar, betonarme köprülerde FRP yapıştırılarak eğilmeye karşı güçlendirmenin ilk uygulamasına öncülük etmiştir [25-27]. FRP ile betonarme elemanların sargılanması çalışmaları, 1980'lerde Japonya'da başlamıştır [25, 26]. FRP ile betonarme elemanların güçlendirilmesi çalışmaları, görüldüğü gibi 80'lerde başlamışsa da saha uygulamalarının dünya genelinde yaygılaşması, 1990'lı yıllarda gerçekleşmiştir.

2.3.1. Lifli polimer (FRP) türleri ve mekanik özellikleri

Yapı üretiminde çelik kullanımının doğurduğu en büyük sorun, malzemenin çevresel şartlardan etkilenerek korozyona uğramasıdır. Korozyon sonucu çelik profil veya beton içerisindeki çelik donatı, kesit kaybına uğramakta ve hesaplanan eleman kapasitesinde önemli düşüşler meydana gelmektedir. Betonarme elemanlarda aynı zamanda donatı-beton arasındaki aderans korozyondan etkilenmekte ve istenilen betonarme davranış elde edilememektedir. Benzer durum çelik plakalarla güçlendirme uygulamaları ve öngerilme tendonları için de geçerlidir. Birçok uygulama için, FRP çeliğin yerine uygun bir alternatif olarak görülmektedir [26]. FRP'nin korozyona karşı olan bağışıklığı, çelik malzemenin yerine tercih edilmesini sağlayan tek özelliği değildir. Yüksek dayanım özelliği, çok hafif olması, kolay ve hızlı uygulanabilmesi, dar bölgelerde uygulama imkanı sunması ve kalıp veya desteğe ihtiyaç duyulmaması, uzun süreli yükleme performansının yüksek olması, istenilen uzunluk ve boyutlarda temin edilebilmesi, FRP'ye ilişkin ilk akla gelen önemli avantajlardır [21-23, 25, 26]. Bunların yanında FRP, tasarım yapacak mühendislerin asla akıldan çıkartmamaları gereken, çeliğe göre bazı dezavantajlara da sahiptir. FRP malzemeler, çelikte olduğu gibi akma değerine sahip değillerdir ve doğrusal elastik davranırlar. Yani FRP'nin herhangi bir akma platosu ve plastik deformasyon yapma kabiliyeti bulunmamaktadır. Bazı FRP türlerinin ısıl genleşme katsayısı, beton ile farklılık göstermektedir. FRP kompozit bir malzeme olduğundan dolayı, kullanılan reçine matristen kaynaklanan, yüksek sıcaklıklarda yapışma yüzeyinden ayrılma ve erken göçme problemleri ile karşılaşılabilmektedir [21].

FRP malzemenin oluşturulmasında, kompozit malzemenin içinde yer alan lif tipinin, yönünün, kullanılan reçine matris miktarının büyük önemi vardır [21, 28]. FRP içerisinde yer alan liflerin hacimsel oranı, kullanılan ürün ve uygulamaya bağlı olarak %25 ile %70 arasında değişmektedir. Şekil 2.11'de [28] görüldüğü üzere, liflerin ve reçine matrisin birleşimi ile oluşturulan FRP'nin dayanımı, kullanılan liflere ait değerlerden daha düşük olmaktadır. Kullanılan lif tipi, hacimsel karışım oranı, liflerin yönü, FRP'ye ait dayanım özelliklerini belirleyen faktörlerdir



Şekil 2.11: Lif, reçine matris ve FRP'nin gerilme birim deformasyon ilişkisi [28]

FRP malzemenin üstün özelliklerini sağlayan lifler, türüne göre değişmekle birlikte 5-20 μm çapında dairesel kesit geometrisine sahiptirler ve istenilen boyda üretilebilmektedirler. Yaygın olarak bilindiği üzere, liflerin sahip olduğu dairesel kesit geometrisi, üretimde yapısal kusur ve dislokasyon oluşumunun en az seviyede kalmasını, yük altında gerilme yığılmalarının engellenmesini ve lifler arası gerilme aktarımının en uygun seviyede oluşmasını sağlamaktadır.

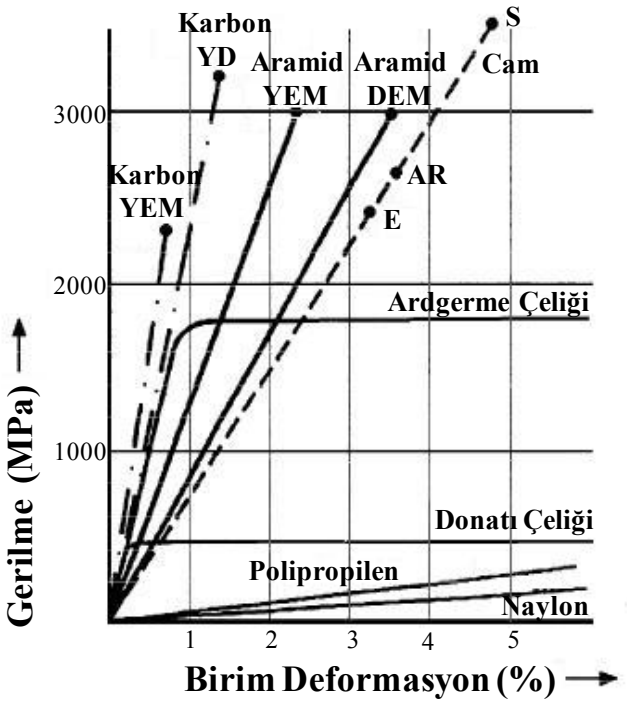
FRP üretiminde, cam, karbon, aramid, bor, bazalt, kuvars, asbest, polipropilen, polietilen, naylon gibi pek çok malzemeden üretilen lifler kullanılmaktadır. Yapı alanında kullanılan FRP'lerde ise karbon, cam ve aramid liflerinin en çok tercih edildiği görülmektedir. Kullanılan lif tipi FRP malzemenin mekanik özelliklerini, durabilitesini ve çevresel şartlarla etkileşimini belirleyen en önemli faktördür.

Karbon lifler, genel olarak en üstün özellikleri sağlayan lif tipidir. İnceltilmiş petrolden veya kömür türevinden elde edilen zift bazlı (PITCH) ve akrlik elyaf (polyacrylonitrile) bazlı (PAN) olmak üzere iki türü bulunmaktadır [21, 29]. PAN tipi üretim yüksek dayanımlı karbon liflerinin üretiminde, PITCH tipi üretim ise yüksek elastisite modülüne sahip karbon liflerinin oluşturulmasında tercih edilmektedir [29] Dayanım, rijitlik, minimum ek ağırlık, çevresel etkilere dayanıklılık ve uygun yorulma performansı gözetilen uygulamalarda tercih edilmektedir [30].

Cam liflerin, üretim sırasında kullanılan maddelere göre birçok türü bulunmaktadır. E-cam lifi, S-cam lifi ve AR-cam lifi, yapı alanında kullanılan türleri oluşturmaktadır. S-cam lifi, en yüksek dayanıma sahip olmakla birlikte, E-cam lifi gibi alkali ortamlara dayanıklılığı düşüktür. Çimentonun alkali bir malzeme olması nedeniyle, alkali dayanımı olan AR-cam lifi tercih edilmektedir. AR-cam lifi mekanik özellik olarak E-cam lifine benzemektedir. [21, 30]

Aramid liflerin dayanım, rijilik ve tokluk değerleri oldukça yüksektir. Aramid liflerin kırılganlığı daha azdır. Çekmede doğrusal elastik davranış gösterirken, basınçta doğrusal olmayan davranış sergilemektedirler. Düşük ve yüksek elastisite modülüne göre sınıflandırılmaktadırlar [21, 30].

Şekil 2.12'de lif türlerinin gerilme-birim deformasyon özellikleri, çelik ile karşılaştırmalı biçimde yer almaktadır [23]. Bu grafikte yer alan sayısal veriler, 90'lı yılara ait olup tipik verilerdir ve bütün çeşitlerin aynı grafikte karılaştırmalı izlenmesini sağlamaktadır. Lif üretim teknolojisindeki gelişmeler, bu grafikte görülenlerden daha yüksek değerlere ulaşılmasına imkan vermiştir. Güncel değerler Tablo 2.1'de yer almaktadır [28].



Şekil 2.12: Çeşitli lif türlerinin ve çeliğin gerilme birim deformasyon grafiği [23]

Tablo 2.1: Liflere ait tipik mekanik özellikler [28]

Lif Tipi		Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Isıl Genleşme Katsayısı (x10-6)	Poisson Oranı
Karbon						
PAN	YD	3500	200-240	1.3-1.8	(-1.2)-(-0.1) (α_{frpL}) 7-12 (α_{frpT})	-0.2
	YEM	2500-4000	350-650	0.4-0.8		
PITCH	S	780-1000	38-40	2.1-2.5	(-1.6)-(-0.9) (α_{frpL})	N/A
	YEM	3000-3500	400-800	0.4-1.5		
Cam						
E		3500-3600	74-75	4.8	5.0	0.2
S		4900	87	5.6	2.9	0.22
AR		1800-3500	70-76	2.0-3.0	N/A	N/A
Aramid						
Kevlar29		3620	82.7	4.4	N/A	0.35
Kevlar49		2800	130	2.3	-2.0(α_{frpL}) 59(α_{frpT})	
Kevlar129		4210	110	---	N/A	
Kevlar149		3450	173-179	1.9	N/A	
Twaron		2800	130	2.3	-2.0(α_{frpL}) 59(α_{frpT})	
Technora		3500	74	4.6	N/A	

(α_{frpL}): boyuna ısıl genleşme katsayısı, (α_{frpL}): enine ısıl genleşme katsayısı
YD: yüksek dayanımlı, YEM yüksek elastisite modüllü, S: sıradan, N/A: uygulanabilir değil

2.3.2. Lifli polimer (FRP) davranışını etkileyen faktörler

Her malzemenin olduğu gibi FRP'nin de davranışını etkileyen bazı faktörler bulunmaktadır. Bu faktörlerin etkisinin, liflerin kendisi üzerinde genellikle az ve ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirtilmektedir. Etkileşimin, bazı durumlarda önemli ve ciddi sorun olabilecek seviyede, beton-FRP ara kesitindeki reçinede gerçekleştiği bilinmektedir. Halihazırda yapı sektöründe kullanılan reçinelerle yapılan FRP güçlendirmelerinin ardından, koruma katmanı uygulamaları, bir çok olumsuz etkiyi önlemede başarılı olmaktadır. Ayrıca olumsuz etki oluşturan faktörlere karşı uygun ve zarar görmeyen reçinelerin pratikte var olduğu, FRP'lerin çok zor şartlar altında kullanıldığı ve kendini ispatladığı uzay, havacılık ve savunma alanlarındaki uygulamalarından anlaşılmaktadır. Bu alanlardaki reçineler,

yüksek maliyetleri nedeniyle yapı alanında kullanılmamaktadırlar. FRP üretiminde kullanılan liflerde, özellikle karbon liflerinde geride bıraktığımız 10-15 yıllık süreçteki fiyat düşüşü benzeri bir eğilimin, gelişen teknoloji ve talep doğrultusunda bu reçinelerde de yaşanabileceği düşünülebilir. FRP ile güçlendirmeyi etkileyen, kullanılan reçine matris ile ilgi tüm sorunların, çelik plaka yapıştırma ile güçlendirmeyi de benzer şekilde etkilediği akıldan çıkartılmamalıdır. FRP davranışı üzerinde etkili olan faktörler, aşağıda görüldüğü gibi sıralanabilir.

- alkali veya asidik ortamlar
- yangın veya sıcaklık değişimi
- donma çözülme etkileri
- nem ve su emme
- ultraviyole güneş ışınları

Alkali ve asidik ortamları kendi içlerinde zayıf ve güçlü olarak ayırmak mümkündür. pH değerine göre 4-7 arası zayıf, 4'ün altı kuvvetli asidik ortamlardır. Asit yağmurları ve karbondioksitin yoğunlaştığı durumlar, zayıf asidik ortamlara sebep olurlar. Kuvvetli asidik ortamların, genel olarak sadece insan eliyle hazırlanmış olacağı söylenebilir. pH değeri 7-10 arası ortamlar zayıf, 10 üzeri ortamlar kuvvetli alkali (bazik) olarak nitelendirilmektedir. Puzolanlar kullanılarak üretilmiş malzemeler zayıf alkali ortamlar oluştururken, yaygın kullanılan portland çimentosu kuvvetli alkali ortam meydana getirir [31]. Karbon lifleri, alkali ve asidik ortamlara karşı dayanıklıdırlar. Aynı durum cam lifler için geçerli değildir [21, 26]. Aramid lifleri zayıf alkali ve asidik ortamlara dayanıklı iken, kuvvetli alkali ve asidik ortamlara karşı dayanıklılığını yitirmektedir (Tablo 2.2 [31]). FRP olarak düşünüldüğünde ise doğru ve gerekli şeklide reçine matris uygulanmış lifler, bu tip ortamlardan etkilenmemektedir [21, 26]. Buna rağmen nemin veya rutubetin fazla olduğu yüksek alkali ortamlarda yapılacak FRP uygulamalarında, karbon liflerin tercih edilmesi tavsiye edilmektedir [26].

Yangın, sürekli karşılaşılmayacak, beklenmedik bir durum ve inşaat mühendisliği açısından, öngörülmeyen yükleme tipidir. Lifler, genel olarak yüksek sıcaklık ve

yangın etkisinde iyi performans sergilemektedirler. Aynı durum yapı alanında kullanılan reçine matrisler için geçerli değildir [23]. Yangın durumunda, özellikle beton-FRP arakesitinde bulunan reçine, işlevini yitirmekte ve güçlendirme uygulaması etkisiz hale gelmektedir. FRP ile güçlendirilmiş elemanlarda, yangına karşı koruma uygulaması yapılabilmekte, fakat bu uygulama sorunu ortadan kaldırmamakta sadece öteleyebilmektedir. FRP kullanımında yangına karşı önlem alınırken, bu değerlendirme de göz önünde bulundurulmalıdır [21]. Tablo 2.2 [31]'de, 100 °C olarak uygulanmış yüksek sıcaklık değerinde, FRP bileşenlerinin etkileşimi yer almaktadır. Reçine matris malzemelerinin yüksek sıcaklıkta etkilenmesine neden olan karakteristik özelliği, camsı geçiş sıcaklığıdır. Bu değer, kürlenmiş ve cama benzer biçimde sertleşmiş reçinenin, kimyasal bağlarında bozulma olarak sertliğini kaybetmeye başladığı limit değer olarak tanımlanabilir. Camsı geçiş sıcaklığının aşılması, beton-FRP ara yüzeyini ve FRP malzeme içerisindeki, lifler arası yük aktarımını etkilemekte, mekanik özelliklerde ve aderans değerlerinde önemli ölçüde azalmaya neden olmaktadır [32]. Servis sıcaklığını belirli bir değerin altında tutmak, yüksek camsı geçiş sıcaklığı değerine sahip reçine kullanmak veya ikincil sıcaklık kürlemesi yapmak çözüm olarak önerilmektedir. Belirli bir dereceye kadar yüksek sıcaklığın, reçine üzerinde ikincil kürleme etkisi yaptığı, camsı geçiş limitini arttırdığı bildirilmektedir. Reçinenin su almış olması, yüksek sıcaklık etkisinin tersine, bu değeri düşürmektedir [21]. Belirli bir sıcaklık değerinin uzun süre etkimesi durumunda da mekanik özelliklerde düşüş yaşandığı belirtilmektedir. Woods (2003) ve Gamage ve diğ. (2005) tarafından yapılan deneylerde, 60 - 70 °C arasındaki uzun süreli sıcaklık etkisinde, önemli dayanım düşüşlerinin oluştuğu bildirilmiştir [32]. Bu sıcaklık değerleri, yaygın olarak kullanılan reçine malzemesi epoksinin, camsı geçiş sıcaklığına denk gelmektedir. Gamage ve diğ (2005)'in verdiği sonuçlar arasında, 22°C ve 36 °C sıcaklık etkisinde, FRP sistemin oda sıcaklığındaki dayanım değerleri ile çok benzer sonuçlar verdiği saptanmıştır [32].

Özellikle düşük ve normal dayanımlı beton, bünyesindeki boşluklar ve muhtemel çatlaklar nedeniyle donma çözülme çevriminin olumsuz etkilerine açıktır. Beton-FRP ara yüzeyini oluşturan reçinede bulunacak nem ve dolayısıyla su, benzer biçimde olumsuz etki yapabilmektedir. Bünyesine su ve nem almayan epoksilerin

kullanımında bu sorun giderilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda, kirişlerde uygulanan FRP uygulamalarında, donma çözülme çevriminin göz ardı edilebilir derecede etkisinin olduğu görülmüştür. FRP sargılanmış silindirler ile yapılan basınç testlerinde, belirli düşüşler olduğu vurgulanmıştır. Özellikle kalitesiz betonların, donma çözülme etkisi altındaki davranışının kötü olması, güçlendirilmiş silindirin davranışının da nispeten kötü olmasına sebep olmaktadır. Yapılan çalışmalarda basınç altındaki sargılanmış beton silindirlerin, FRP uygulaması olmayan alt ve üst yüzeylerine yakın bölgelerinde ezilmelerin yoğunlaştığı görülmüştür. Bu da yukarıda yapılan açıklamayı doğrular niteliktedir. Donma çözülme etkisi elemanın dayanımını, FRP sargılanması sonucu değil, betonun kalitesiz olmasından dolayı etkilemektedir [21]. Toutanji ve Balaguru tarafından yapılan çalışmada CFRP ve GFRP ile sarılmış silindirler, 300 donma çözülme çevrimine tabi tutulmuş ve sonuçları normal koşullarda bekletilmiş, sargılanmış numunelere ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Donma çözülmenin, sargılanmış numunelerin basınç dayanımını, sargılanmamış beton dayanımının altına çekebildiği görülmüştür. Sargılanmış ve donma çözülmeye tabi tutulmuş numunelerin, alt ve üst yüzlerine yakın bölgelerinde hasarın biriktiği, bununda çevrime maruz kalan betonun olumsuz etkilenmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Hasar gören bu bölgeler kesilerek, hasar görmeyen orta bölge tekrar test edildiğinde, FRP sarılarak normal şartlarda bekletilen numunelere göre düşük olmakla birlikte, sargılanmamış beton dayanımının üstünde değerler elde edilmiştir. CFRP sargılanmış numunelerin davranışının, GFRP sargılanmış olanlara göre daha iyi olduğu bildirilmiştir [33].

Yüksek nem oranı, rutubet ve su emme, FRP'yi etkileyen bir diğer faktör grubudur [21, 23, 32]. Liflerin yüksek nemden etkilenme eğilimi değişiklik gösterirken, karbon liflerin bu konuda dayanıklı oldukları görülmektedir (Tablo 2.2 [31]). Diğer faktörlerde olduğu gibi yüksek nem oranı ve rutubetten en çok etkilenen bileşen, reçine matristir. Daha öncede belirtildiği gibi, içerisine su almış olan reçinenin, donma çözülme performansı ve camsı geçiş sıcaklık değeri olumsuz etkilenmektedir [21, 23, 31]. Uzun süreli suya veya yüksek nem oranına maruz kalan FRP uygulamalarında, reçine matris bileşenine bağlı, dayanım düşüşleri görülmüştür [32]. Bu testlerin çoğu, temsili etkiyi ortaya çıkartan, malzeme bazındaki yapışma ve çekip ayrıma (pull off) testleridir. Toutanji ve Gomez (1997), çekme bölgelerine FRP

yapıştırılan kirişleri, deniz suyunu temsilen tuzlu su ile uzun süreli ıslanma kuruma çevrimine tabi tutmuşlar ve sonuçları incelemişlerdir. Değişik reçine matris türlerinin kullanıldığı bu çalışmada, ıslanma kuruma çevrimi sonucu, reçine kaynaklı dayanım düşüşlerinin ve deformasyon artışlarının olduğu görülmüştür. Diğer çalışmalardan da bilinen bu gerçeğin yanında, ıslanma kuruma çevrimine tabi tutulan ve bu çevrime sokulmayan FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin, güçlendirme uygulanmamış kirişlerden çok daha yüksek dayanıma ulaştıkları bildirilmiştir [32]. Sürekli yüksek nem oranına sahip, rutubetli servis ortamında veya doğrudan su ile temasta kalan elemanlarda yapılacak FRP uygulamaları için, reçine matris seçimine dikkat edilmesi gerekmekte ve suya dayanıklı reçinelerin kullanılması tavsiye edilmektedir [23]. FRP uygulamasının ardından uygun koruyucu katman oluşturulması, yüksek nem ve rutubetli ortamlar için alınabilecek diğer bir önlemdir.

Ultraviyole güneş ışınları, lifler üzerinde kısmen etkilidir. Karbon liflerin UV ışınlarına en dayanıklı lif tipi olduğu bilinmektedir. (Tablo 2.2 [31]). Bununla birlikte UV ışınları, reçine matrisin moleküler yapısında, bozulmalara yol açabilmektedir [21, 23]. Reçine içerisine katılacak koruyucu maddelerle, ultraviyole güneş ışınlarının FRP uygulaması üzerindeki olumsuz etkilerinden kurtulmak mümkündür [23]. Koruyucu katman oluşturulması, alınabilecek diğer bir önlemdir.

Tablo 2.2: FRP bileşenleri, donatı çeliği ve betonun çeşitli faktörlerle etkileşimi [31]

Malzeme	Su Emme	Zayıf Asit	Kuvvetli Asit	Zayıf Alkalin	Kuvvetli Alkalin	Yüksek Sıcaklık	UV
E-cam	E	kE	E	E	E	D	kE
S-cam	E	D	kE	E	E	D	kE
PAN Karbon	D	D	D	D	D	D	D
PITCH Karbon	D	D	D	D	D	D	D
Aramid	0.05’	D	kE	D	kE	E	E
Poliester reçine	0.15-0.60’	kE	E	E	E	Y/V	E
Vinilester reçine	0.1-0.2’	D	D	D	D	E	kE
Epoksi reçine	0.1’	D	kE	D	D	E	D
Donatı çeliği	---	kE	E	D	D	---	D
Beton (PÇ) 20-60 MPa	9.1-12.9^	E	E	D	D	kE-D	D

E: etkilenir, kE: kısmen etkilenir, D:dayanıklıdır, Y/V: yetersiz veri
’ASTM D570 (%/24saat)
^kapilar su emme testi

Görülmektedir ki çoğu olumsuz çevresel faktör, özellikle beton ile FRP'nin yapışmasını sağlayan reçine matris üzerinde etkili olmakta, dolayısıyla reçine ile yapıştırma üzerine kurulu tüm güçlendirme sistemleri bu faktörlerden etkilenmektedir. Uygun reçine seçimi ve koruyucu katman uygulaması, FRP uygulamaları için üzerinde önemle durulması gereken konulardır. Ayrıca malzeme bazlı testlerin ötesinde, bu faktörlerin FRP güçlendirme üzerindeki etkilerini net biçimde ortaya çıkartacak, olumsuz etkilere tabi tutulan FRP ile güçlendirilmiş eleman testlerinin yapılmasına ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

2.3.3. Lifli polimerin (FRP) betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanımı

Lifli polimerlerin betonarme yapılarda kullanımı, iki ana başlık altında ifade edilebilir. Yeni imal edilen betonarme yapılarda, çeliğin yerine donatı olarak kullanılmasından, birinci grup olarak söz edilebilir. Donatı çeliği ile yer değiştirme, klasik betonarme imalattaki donatılarda söz konusu olduğu gibi, öngerilmeli betonarme imalatlarındaki öngerilme donatıları için de geçerlidir. Betonarmede kullanılan FRP donatı tipleri, eleman eksenine paralel yerleştirilen FRP boy donatılar, elemanda kesme kuvvetini karşılamak amacıyla kullanılan FRP hasır donatılar ve öngerilmeli betonarme elemanlarda kullanılan FRP öngerilme donatıları olarak sıralanabilir. FRP donatılar özellikle, zararlı çevresel etkilere ve korozyona karşı dayanımın önemli olduğu ve elektromanyetik etkileşim oluşmasının istenmediği yapılarda kullanılmaktadır [28, 34].

Betonarme yapılarda FRP kullanımının ikinci grubunu, güçlendirme uygulamaları oluşturmaktadır. FRP'nin, betonarme yapıların güçlendirilmesinde hangi durumlarda kullanıldığının açıklanabilmesi için, güçlendirme fenomeninden kısaca söz etmek gerekmektedir.

Bilindiği üzere, betonarme yapıların, kullanım ömürleri içerisinde bazı sebeplerle güçlendirilmesi gereği ortaya çıkabilmektedir. Bu sebepler özetle, kullanım amacı değişikliği, standart yüklerin artışı, artan bilgi seviyesi sonucunda yapılması kaçınılmaz olan yönetmelik ve şartname değişiklikleri, meydana gelebilecek hasarlar, proje ve/veya imalat hataları olarak sıralanabilir. Güçlendirme felsefesi genel olarak, sistem ve eleman güçlendirmesi şeklinde ikiye ayrılmaktadır [1, 35-37], Yapının,

deprem veya rüzgar gibi yatay yükler etkisi ile göreli kat ötelenmesi sınırlarını aşması durumunda, bu hareketi engelleyecek, sistem rijitliğini arttıracak önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu tip uygulamalara sistem güçlendirmesi adı verilmektedir. Yapının göreli kat ötelenmesi sınırlarına ulaşmadığı fakat elemanların bireysel olarak taşıma gücü değerlerini aştığı veya aşma ihtimali bulunduğu durumlarda ise söz konusu elemanların takviyesi zorunlu olmaktadır. Bu gibi uygulamalar ise eleman güçlendirmesi olarak adlandırılmaktadır. Sistem güçlendirilmesinin yapıldığı durumlarda, aynı zamanda bireysel eleman güçlendirilmesine de ihtiyaç duyulabilmektedir. Her yapının güçlendirme gereksinimi ve yöntemi, kendine özgüdür ve farklılıkların görülmesi mümkündür.

Sistem güçlendirmesi için, değişik yöntemler kullanılmakta ise de, temelde yapılmaya çalışılan yapının bütün olarak hareketinin sınırlandırılması ve yetersiz olan dayanım-tepe noktası deplasmanı davranışının iyileştirilmesidir. En bilindik ve yaygın kullanılan sistem güçlendirme tekniği, yapıya yeni düşey elemanların eklenmesidir. Genelde eklenecek yeni düşey eleman olarak betonarme perde duvar kullanılsa da, çelik çaprazlar ve moment taşıyan yeni çerçeveler de bu amaçla kullanılmaktadır [1, 35-37]. Betonarme perde duvarlar, yapının mevcut çerçevelerinden, analiz sonucu belirlenen bazılarının içerisine imal edilebileceği gibi, yapının dışına da eklenebilmektedirler [36, 37]. Projelendirme ve imalat aşamalarında uzmanlaşmış kişilerle çalışılmasına, bağlantı detaylarına ve yeni elemanların temellerine büyük özen gösterilmesi gerekmektedir. Yapının, yeni eklenen elemanlarla bağlantısının uygun ve sürekli olarak sağlanamaması durumunda, göçme ile karşılaşılması olasıdır.

Bazı durumlarda düşey taşıyıcı elemanların, sistemin davranışına katılmasını sağlayan kat diyaframının güçlendirilmesi de gerekebilmektedir [35]. Gerektiği durumlarda uygulanması kaçınılmaz olan bu yöntem de, sistem güçlendirmesi grubunda yer almaktadır. Kütle azaltılması, sismik izolasyon, enerji sönümleyicilerin kullanılması, yapıya etkiyecek yatay yükü ve dolayısıyla yapı üzerinde oluşacak deprem kuvvetini azaltmayı amaçlayan yöntemlerdir. Bu tip uygulamaları, ikincil sistem güçlendirme yöntemleri olarak düşünmek mümkündür [35, 36].

Betonarme yapılarda eleman bazında güçlendirme uygulamaları, çeşitli biçimlerde yapılabilmektedir. Beton ve donatı çeliği kullanılarak kesit büyütme, en konservatif ve en çok uygulanan yöntemdir. Betonarme mantolalama olarak bilinen bu yöntem, uygulanılan elemanın rijitliğini arttırmakta ve sargılama etkisi oluşturmaktadır. Eksenel dayanım ve eğilme dayanımı sağlamakla birlikte, süneklik üzerinde de olumlu etkisi vardır. [1, 35, 37]. Uygulama güçlüğü, zaman alması ve bazı elemanlarda kesitin tümünün sarılamamasının yanında, yapıya kayda değer miktarda kütle ilavesine sebep olduğu bilinmektedir. Yapıya ilave edilen kütle miktarı, ilk tasarımda yapılmış olan analiz ve tasarımı etkileyecek değerdedir. Şekil 2.13'de tipik bir betonarme montolama uygulamasına ait görüntü yer almaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere bu imalat için, yapının tümün boşaltılması, belirli bir süre kullanımının durdurulması ve hemen hemen her noktada kırım-döküm işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.13: Tipik bir betonarme mantolama uygulaması [37]

Çelikten yapılmış elemanlar kullanarak takviye, eleman güçlendirme yöntemlerinin diğer bir grubu olarak bilinmektedir [1, 35-37]. Çelik elemanların betonarme yüzeye epoksi ile yapıştırılması, kesitin tümünün kaynaklı veya cıvatalı birleşimlerle sarılması gibi uygulamalar bulunmaktadır. Korozyon, bu uygulama tipinin en önemli dezavantajı olarak bilinmektedir. Ayrıca uygulama zorluğu ve yapıya getirdiği ilave kütle, bu yöntemin diğer olumsuzluklarıdır. Bu yöntemle yapıya eklenen kütle, betonarme mantolamada eklenen miktar kadar olmamakla birlikte, yine de sistemin analiz ve tasarım değerlerini etkileyecek orandadır. Şekil 2.14'de tipik çelikle güçlendirme uygulamasına yer verilmiştir. Bu uygulama tipinde de, uygulama işlemi için betonarme mantolama konusunda söz edilen, uygulama sırasında karşılaşılan olumsuzluklar söz konusudur.



Şekil 2.14: Tipik bir çelikle güçlendirme uygulaması [37]

FRP ile eleman güçlendirmesi, günümüzde gittikçe yaygınlaşan ve diğer yöntemlere göre birçok avantajı bulunan alternatif bir yöntemdir [1, 35, 37]. Bu yöntemde zararlı çevresel şartlardan etkilenme çoğu durumda ihmal edilebilecek düzeydedir ve özellikle korozyon oluşumu gibi problemler görülmemektedir. FRP kullanarak güçlendirme ile yapıya ilave kütle eklenmemekte, dolayısıyla yapıya etkiyecek olan deprem yüklerinde artış söz konusu olmamaktadır. Tasarım ve imalatın uzman kişiler tarafından yapılması gerekliliği akıldan çıkartılmamak kaydıyla, oldukça

kolay ve hızlı bir güçlendirme yöntemidir. En zor ulaşılabilecek noktalarda yapılacak güçlendirme uygulamalarında bile kullanılabilmektedir.

Temel olarak betonarme elemanların FRP ile güçlendirilmesi, yük etkisinde oluşan çekme gerilmelerinin elemanın kapasitesini aştığı bölgelere, genelde epoksi yardımıyla FRP yerleştirilmesi şeklinde olmaktadır. FRP güçlendirme uygulamaları her zaman reçine ile yüzeye yapıştırma şeklinde olmadığı için, özellikle yerleştirildiği belirtilmiştir.

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan FRP'ler farklı şekil ve formlarda olabilmektedir. Dokunmuş/dokunmamış kumaş, önüretimli şerit ve donatı formları, güçlendirme için sektörde ulaşılabilir FRP kompozit tipleridir [21, 38]. Yapılacak uygulamanın türü, kullanılacak FRP'nin lif içeriğini ve kompozit tipini belirlemektedir. En yaygın olarak, kumaş tipinin kullanıldığı görülmektedir. FRP kumaşlar kendi içerisinde, liflerin yönelimine göre tek doğrultulu ve birbirine dik yönde çift doğrultulu olarak ikiye ayrılırlar. Bu tip kumaşlar, sürekli liflerden oluşurlar. FRP kumaşlar, henüz kompozit faza geçmemiş ürünlerdir. Uygulama sırasında reçine ile yüzeye yapıştırılırken, aynı zamanda lifler de reçine ile doyurulmakta (impregnate) ve reçinenin sertleşmesiyle birlikte nihai FRP kompozit oluşmaktadır. Son kullanıcı ürünü olarak kısmi öndoyurulmuş (pre-impregnated) FRP'ler de bulunmaktadır. Bu ürünler tam kompozit faza geçmemekle birlikte, fabrikasyon ortamında kısmi olarak soğuk kürleme yöntemi yardımıyla reçine ile birleştirilmektedirler [38]. Önüretimli şerit veya levhalar, kompozit fazda son kullanıcıya sunulan FRP tipidir. Fabrikasyon ortamında, lifler reçine ile doyurulurken özel bir imalat tekniği sayesinde, sıkıştırılarak çekilmekte (pultrusion) ve ısıyla kür uygulamasına tabi tutulmaktadırlar. Sonuç olarak çelik şerit veya levha benzeri, yapıştırılmaya hazır kompozit ürün elde edilmektedir. Güçlendirme uygulamalarında, sıkıştırılarak çekme yöntemiyle üretilen FRP donatıların da kullanıldığı görülmektedir. FRP donatılar ve bazen de FRP ön üretimli ince şeritler, beton yüzeyde istenilen yer ve doğrultuda açılmış yarıklara, reçine yardımıyla yerleştirilerek uygulanabilmektedir [25, 31, 39, 40].

FRP ile güçlendirmede uygulama öncesi elemanın tamiri ve yüzey hazırlığı büyük önem taşımaktadır. Güçlendirilecek betonarme elemanda, öncelikle gerekli donatı ve

beton tamirinin yapılması, var olan çatlakların giderilmesi gerekmektedir. FRP ile betonun birleşimini reçine sağladığı için, reçinenin betona yapışmasını olumsuz etkileyecek herhangi bir durumun varlığı, uygulamanın da olumsuz etkilenmesine ve beklenen etkinin elde edilememesine sebep olacaktır. Bu yüzden FRP güçlendirme uygulamasından önce beton yüzeyin, toz ve bağlantısı zayıf parçacıklardan temizlenmesi gerekmektedir. Ayrıca uygulama yüzeyindeki girinti-çıkıntıların giderilerek, düz bir yüzey oluşması sağlanmalıdır [21, 25, 26, 31, 38]. Bazı kaynaklarda FRP'nin beton yüzeyden, yapışma ve aderans problemi kaynaklı sıyrılıp ayrılmasının en önemli sebebi olarak, yüzey hazırlığının tam olarak yapılmaması gösterilmektedir [21]. Beton dayanımı, reçine özellikleri ve yapışma katmanının kalınlığı, betonarme-FRP arasındaki adreransı, sıyrılıp ayrılma davranışını kontrol eden, diğer önemli parametrelerdir. Yapıştırılan FRP'nin uç kısmının uzun tutularak daha iyi yapışma ve aderans sağlanacağı düşüncesi geçerli değildir. Etkili ankraj boyunun ötesinde daha fazla kenetlenme boyu bırakılması, betonarme-FRP arası aderansı arttırmamaktadır [41]. Uygulama tamamlandıktan sonra, Bölüm 2.3.2'de açıklanan FRP uygulamasını olumsuz etkileyecek faktörlere karşı koruma tabakası oluşturulması gerekmektedir.

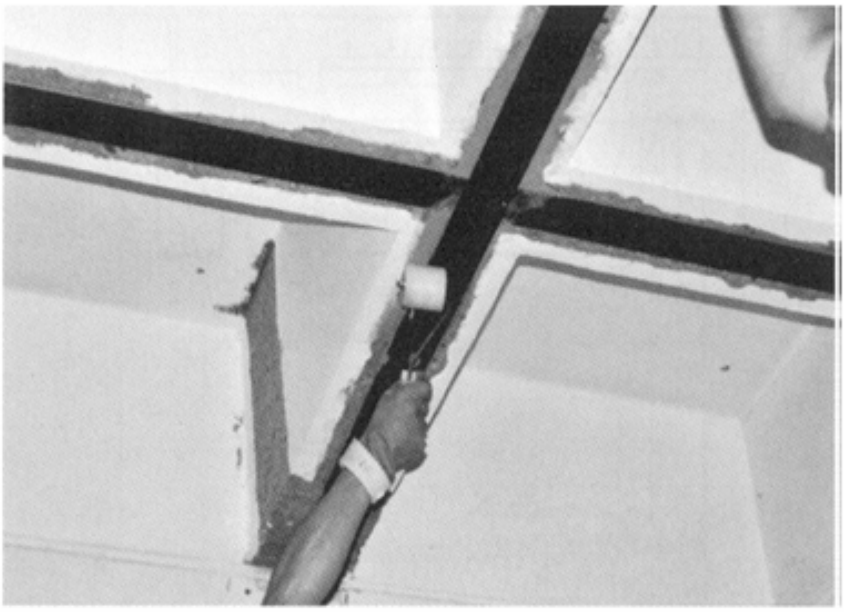
FRP ile güçlendirme uygulamalarında, tasarım felsefesi anlamında dikkat edilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır. Betonarme elemanların FRP kullanılarak güçlendirilmesinde, elemanın belirli bir dayanıma sahip olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Yapılan FRP uygulamasının herhangi bir nedenle (şiddet olayları, yangın vb.) zarar görmesi durumunda, FRP uygulama onarılana veya yenilenene kadar elemanın, ölü ve hareketli yüklerin belirli bir oranından oluşacak yük kombinasyonuna dayanabilecek durumda olduğu, hesapla ispatlanmalıdır [21, 26]. Dayanım artışı hesapları yapılırken liflere ait dayanım ve elastisite modülü değerleri değil, FRP kompozit malzemeye ilişkin değerler kullanılmalıdır. Ayrıca hesaplarda, güvenli bölgede kalmak amacıyla lif türüne ve servis koşullarına göre, gerekli dayanım azaltma katsayılarının kullanılması unutulmamalıdır.

Daha önce de vurgulandığı üzere, FRP kompozitin akma davranışı göstermediği, elastik davranış sergilediği, hesaplamalar sırasında ve davranış değerlendirilirken akıldan çıkartılmamalıdır. Bununla birlikte dayanım artışı hesaplarında birim

deformasyon değeri olarak, elastik davranış sergilediği düşüncesiyle FRP kompozitin kopma birim deformayonu değil, deneylerle ispatlanmış, FRP'nin betondan ayrılmadan çalışmasını sürdürdüğü birim deformasyon değerleri kullanılmalıdır [21, 26, 31].

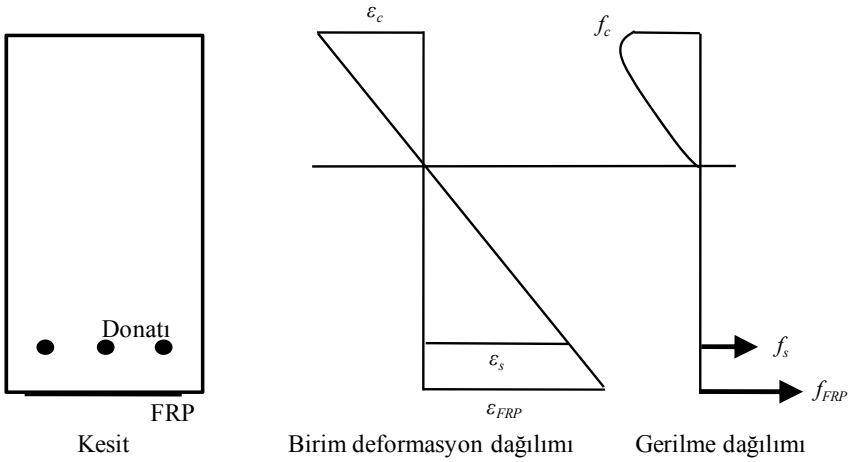
Betonarme yapıların FRP kullanımı ile güçlendirilmesini, eğilmeye karşı güçlendirme, kesmeye karşı güçlendirme ve sargılama olarak üç ana başlıkta toplamak mümkündür.

Eğilmeye karşı FRP kullanılarak güçlendirme, FRP'nin betonarme kirişlerin alt yüzeyine, mesnetler arasında uygulanması ile yapılmaktadır (Şekil 2.15). Malzeme tipi olarak, FRP kumaş, önüretimli FRP şerit veya FRP donatı kullanılabilmektedir. Tek yönlü lif dizilimine sahip FRP, lif doğrultusu kiriş asal ekseni ile paralel olacak içimde yerleştirilmektedir. Özellikle köprü kirişlerinde, uçlarda uygun ankraj kullanımı ile öngerme yapılarak da uygulanabilmektedir.



Şekil 2.15: FRP kullanarak eğilmeye karşı güçlendirme - kiriş [21]

FRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesine ait tasarım, betonarmede kullanılan klasik eğilme analizi ve dayanım hesapları ile yapılmaktadır (Şekil 2.16) [21, 26, 31, 38]. Uygulanan FRP, mevcut çelik donatının katıldığı biçimde hesaplara katılmaktadır.



Şekil 2.16: FRP uygulanmış tipik kiriş kesitinde birim deformasyon ve gerilme dağılımları

Daha önce belirtildiği gibi bu hesaplarda liflerin veya FRP kompozitin karakteristik değerleri değil, deneyler sonucunda belirlenmiş ve şartnameler tarafından önerilmiş mekanik özellikler kullanılmalıdır. Bunun sebebi, yapılan yüzlerce deneyin sonucunda görülen, genelde malzemenin sıyrılıp ayrılması sonucu oluşan göçmenin engellenmeye çalışılmasıdır. Yapılan uygulama, tasarlanırken düşünüldüğü ve istendiği gibi değil doğası gereği hazırlanan şartlara uygun olarak davranış sergilemektedir. Genelde bu uygulama ile birlikte FRP uç bölgelerinin denk geldiği mesnetlere yakın bölgelerde, FRP sargılama da yapılmaktadır [41]. Böylece hem eğilme için yapıştırılan FRP'nin sıyrılıp ayrılma davranışı iyileştirilmekte, hem de kirişte mesnetlere yakın bölgelerde artan kesme kuvvetlerine karşı önlem alınmış olmaktadır. FRP uçlarının ayrılmaması için mekanik parçalar da kullanılabilmektedir. Döşemelerde oluşan eğilme problemleri, aynı uygulama ile güçlendirilebilmektedir (Şekil 2.17).



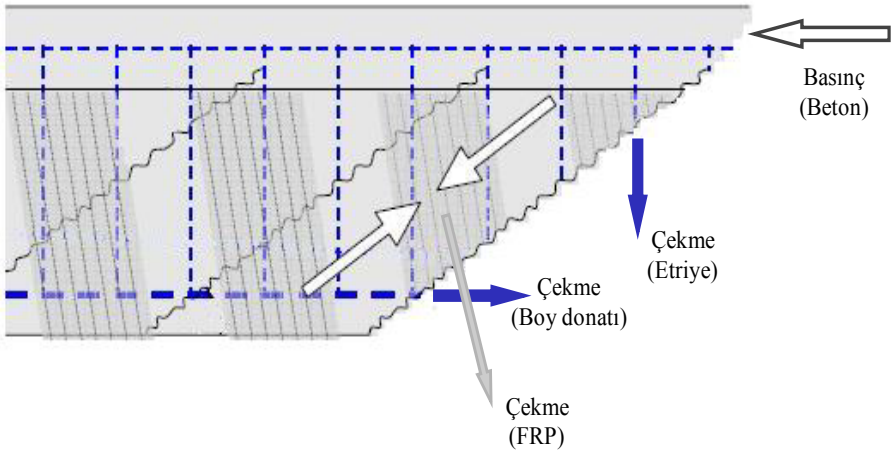
Şekil 2.17: FRP kullanarak eğilmeye karşı güçlendirme - döşeme [21]

Eğilmeye karşı FRP ile kiriş güçlendirilmesinde göçme, temel olarak iki şekilde gerçekleşmektedir. Betonarme-FRP kompozit davranışının ortaya çıktığı, FRP ile kiriş arasındaki yapışmanın bozulmadığı birinci tip davranışta, FRP uygulamasından sağlanabilecek en yüksek fayda elde edilebilmektedir. Bu durumda oluşan göçme davranışı, betonun ezilmesi, donatının akmasının ardından betonun ezilmesi veya donatının akmasını takip eden FRP kopmasıdır. İkinci temel göçme şekli ise, betonarme-FRP kompozit davranışına ulaşılamayan erken göçme tipidir. FRP'nin betondan ayrılması, betonun donatı seviyesinden koparak kirişten ayrılması veya eleman uç bölgelerinde FRP'nin bittiği noktalarda kesme çatlağı ile ayrılmadır [21, 31, 38, 41]. FRP'nin betondan ayrılmasında sorun, yüzey hazırlığının iyi yapılmamasından veya yapıştırma katmanının kendisinden olabilmektedir. Diğer iki durumda ise betonarme-FRP arası aderansın uygun olduğu, göçmenin, beton üzerinde oluşan gerilmelerin beton çekme dayanımını aşması ile oluştuğu anlaşılmaktadır. Göçme davranışında gözlenen değişiklikler, eğilmeye karşı FRP ile güçlendirme uygulamalarının, büyük oranda betonarme-FRP arası aderans davranışına ve dayanımına bağlı olduğunu göstermektedir. Tasarım ve uygulamanın uzmanlaşmış ekiplerce yapılmasının gerekliliği, doğru imalatın ve uygun davranışın elde edilebilmesi için büyük önem kazanmaktadır.

FRP'nin, eğilme etkisindeki betonarme elemanların basınç yüzünde kullanımı, önemli bir noktadır. FRP kompozitlerin basınç altında davranışları, çekme etkisindeki davranışlarına göre oldukça düşüktür. FRP'nin eğilme rijitliğinin oldukça az olması, basınç bölgesine yapıştırılan FRP'de düşük gerilme seviyelerinde bile, yerel burkulma oluşmasına ve etkisini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu davranışın iyileştirilmesi, FRP'nin betonarme elemanların basınç yüzünde de, etkili biçimde kullanılabilmesini sağlayacaktır [21]. Bu konuda halen yapılmakta olan çalışmalardan elde edilecek gelişmeler, kolonların FRP ile eğilmeye karşı güçlendirilmesi konusuna ışık tutacaktır. Deprem etkisi altında, kolonlarda yük çevrimi oluşmakta, bu da kolonların yüzeylerine, basınç ve çekme gerilmelerinin sürekli ve birbirini takip edecek biçimde etkimesine neden olmaktadır. Günümüzde, FRP ile ilgili hiçbir şartnamede, betonarme kolonların eğilmeye karşı güçlendirilmesinde FRP'nin kullanımına izin verilmemektedir. Ayrıca belirtmek gereklidir ki, ülkemizde kullanımda olan şartnamenin (DBYBHY), yapıların

değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi bölümünde, FRP ile kiriş güçlendirilmesi konusu yer almamaktadır [23].

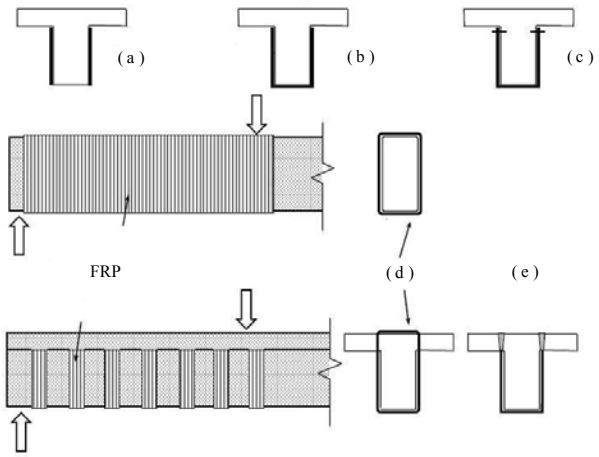
Kesmeye karşı FRP kullanılarak betonarme elemanların güçlendirmesi, elemanların kesme çatlağı oluşacak yüzlerine FRP uygulanarak gerçekleştirilmektedir. FRP uygulama basit biçimde, kiriş veya kolon içerisinde yer alan etriye, enine donatı ile aynı prensipte etki göstermektedir [1, 21, 26, 31, 38, 41]. Betonarme elemanlarda, eleman ana eksenine dik uygulanan yükler sonucunda (kolonlar için deprem, kirişler için ölü yük vb.), beton çekme dayanımı aşıldığı anda, yükten mesnetlere yönelmiş biçimde ve yaklaşık 45° ile kesme çatlakları meydana gelmektedir. Bu noktadan sonra oluşan kesme kuvveti, diğer bazı ilave bileşenlerin yanında esas olarak etriye, enine donatı sayesinde taşınmaktadır [2, 4, 21]. Oluşacak bu çatlakların üzerine, özellikle çatlaklara dik veya belirli bir açı ile (etriye ile aynı doğrultuda) olarak yerleştirilecek FRP, kirişin kesme dayanımını ve davranışını iyileştirmektedir (Şekil 2.18) [21, 26, 31, 38, 41]. FRP'nin açılı yapıştırılması durumunda ilave enine donatı yoluyla kesme dayanımını arttırmasının yanında, oluşan basınç çubuğunu güçlendirerek ve boy donatının sağladığı çekme çubuğuna da yardımcı olarak katkı sağlamaktadır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18: FRP ile kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişte modifiye basınç alanları teorisi [38]

FRP içerisindeki liflerin tipi, yönü, uygulama doğrultusu, FRP uygulama tekniği, yapıştırılan FRP'nin uçlarında uygulanacak ankraj, beton kalitesi, elemanın geometrisi, uygulamanın ve güçlendirmenin etkinlik derecesini belirlemektedir. Kesme kuvvetine karşı kolon ve kirişlerin güçlendirmesinde kullanılan uygulama

teknikleri, Şekil 2.19'de gösterilmektedir. Kirişler göz önüne alınırsa, kesitin sadece yan yüzeylerine yapıştırma (a), U şeklinde yapıştırma (b), tüm kesiti sargılama (d) biçiminde teknikler uygulanabilmektedir [21, 26, 31, 38, 41]. Ayrıca kullanılan FRP şerit veya bütün kumaş olabilmektedir. Tek yönlü veya birbirine dik, iki yönlü lif dizilimi olan FRP'ler kullanılabilmektedir. Bu uygulamalardan en etkili olanı tüm



Şekil 2.19: FRP kullanarak kesme güçlendirilmesi – tipik uygulamalar [21]

kesitin sargılandığı durumdur. U şeklinde yapıştırma etkinlik olarak ikinci sırada yer almaktadır [26]. Kolonlarda bu işlem rahatlıkla yapılabilirken, kirişlerde döşemenin varlığından dolayı diğer teknikler tercih edilmektedir. Bu nedenle kaybedilen uygulama etkinliği, FRP'nin uçlarında sıyrılıp ayrılmayı engelleyecek önlemler alınarak tekrar geri kazanılabilmektedir (Şekil 2.19 (c) (e), Şekil 2.20).



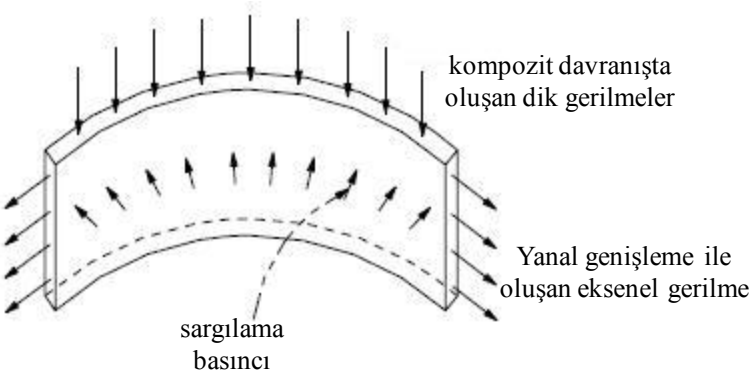
Şekil 2.20: FRP kullanarak kirişte yapılan kesme güçlendirilmesi örneği

U şeklinde yapıştırma ve sadece yan yüzlere yapılan uygulama için FRP'nin uçlarının sıyrılıp ayrılması, muhtemel göçme tipini oluşturmaktadır. Özellikle kirişlerde en çok kullanılan U şeklinde yapıştırmada, kompozitin uçlarında özel

önlem alınmadığı takdirde, FRP'nin uçları belirli bir yük seviyesinden sonra betondan ayrılmaktadır. Bunun sonucu uygulama etkinliğini yitirmekte, elemanda ani ve gevrek kesme göçmesi oluşmaktadır. 2.19 (c) ve (e)'deki gibi özel önlem alınarak, uçlarda sıyrılıp ayrılma engellendiğinde veya tüm kesit sarıldığında, uygulama tasarlandığı ve istendiği gibi çalışarak yüksek kesme dayanımlarına ulaşılabilmektedir. Sıyrılma engellendiği durumlarda kesme göçmesi, liflerin kopması sonucu oluşmaktadır [21]. Tasarımda, lif veya FRP'ye ait olan kopma birim deformasyonu ve buna bağlı dayanım değil, bu güne kadar yapılmış olan deneyler sonucu elde edilmiş ve şartnamelere girmiş olan, sınırlandırılmış birim deformasyon değerlerinin kullanılmalıdır. Şerit genişlikleri ve aralıkları, etriyeler için yapılan kuvvete dayalı hesap benzeri yöntemler ile elde edilmektedir [21, 26, 31]. Betonarme elemanların burulma etkisinde kaldığı durumlarda da, yine kesme etkisi için kullanılan FRP güçlendirme yöntemi uygulanmaktadır. Burulmada, kesmeye göre farklı olarak çatlaklar, betonarme elemanın iki yan yüzünde simetrik biçimde oluşmamakta, iki yüzdeki çatlaklar birbirilerine dik olarak ortaya çıkmaktadırlar. Bu durum, her iki yüzde aynı açı ile FRP kullanımı yapıldığında dikkate alınmalıdır.

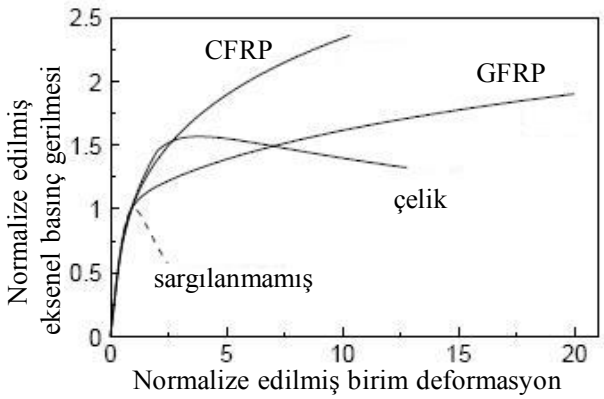
Sargılama, genel olarak basınca çalışan elemanlarda, eksenel yük dayanımını veya dayanım kaybı olmadan deformasyon yapabilme kabiliyeti olan sünekliği arttırmak için kullanılmaktadır [1, 21, 26, 31, 38, 41]. Sargılanmış betonun basınç dayanım artışı, basit olarak hesaplanabilirken, süneklik artışındaki uygulamalar için daha yoğun ve karmaşık hesaplamaların yapılması gerekmektedir [26].

Eksenel yük etkisindeki betonarme elemanların dayanımını artırmaya yönelik FRP güçlendirme tekniği, temelde kolonlarda kullanılan etriyenin eksenel basınç dayanımına olan etkisiyle aynıdır [21, 38]. Eksenel yük dayanımı yetersiz kolonların kapasiteleri, FRP sargılama ile arttırılabilmektedir. Literatürde aktif ve pasif olarak ayrılmakla birlikte, günümüzde yapılamakta olan uygulamalar, pasif sargılama tipindedir. FRP'nin öngerme uygulanmadan kesit üzerine sarıldığı pasif sargılamada, güçlendirmeden beklenen etkinin ortaya çıkabilmesi için kesitin genişlemesi gerekmektedir. Eksenel basınç nedeni ile kesitin genişlemesi sonucunda, kesit çevresine sarılan FRP liflerinde çekme gerilmeleri oluşmakta, bu gerilmeler beton yüzeyinde sargılama etkisi meydana getirmektedir (Şekil 2.21).



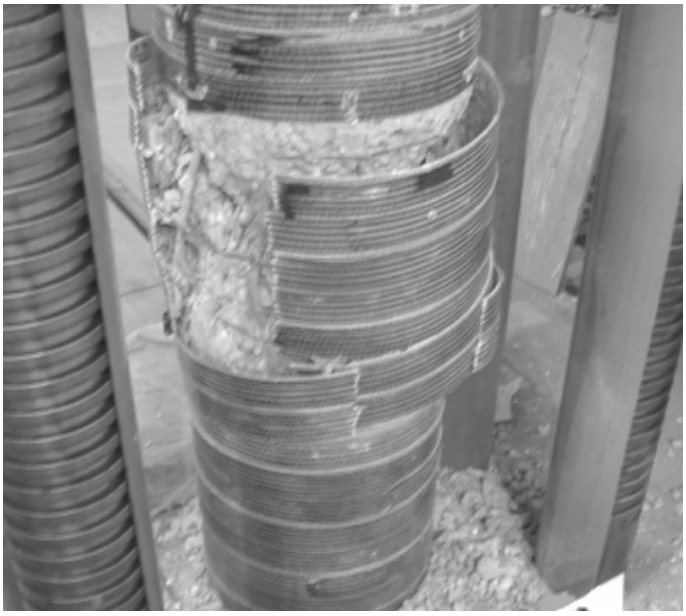
Şekil 2.21: FRP sargılama üzerinde oluşan gerilmeler

Kesitin genişlemesi, FRP sargılama etksinin ortaya çıkabilmesi için anahtar rol oynadığı için, FRP sargılamanın boşluksuz ve sıkı olarak uygulanması büyük önem taşımaktadır [26]. Şekil 2.22'de sargılanmamış ve değişik malzemelerle (çelik, GFRP, CFRP) sargılanmış betonun tipik davranışı görülmektedir. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için gerilme ve birim deformasyon değerleri, sargılanmamış betondan elde edilen değerlere bölünerek normalize edilmiştir [21]. FRP kullanılarak yapılan sargılama sonucu, oldukça yüksek dayanım değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 2.22: Beton üzerinde değişik malzemelerle yapılan sargılamanın etkileri

FRP ile sargılamanın etkinliğini kontrol eden en önemli parametrelerden biri, uygulanacak kesitin geometrisidir. Kesit geometrisine bağlı olarak sargılama etkinliği değişmekte, dairesel kesitte etkinlik oldukça yüksek seviyedeyken, dikdörtgen kesitlerde bu etki azalmaktadır [21, 26, 31, 38, 41]. Kare ve dikdörtgen elemanlarda, kesit köşelerinin pahlanarak yuvarlatılması büyük önem taşımaktadır. Yapılan eksenel basınç deneylerinde FRP sargılanmış kolonların, basınç dayanıma ulaştıktan sonra FRP'nin kopmasıyla göçtüğü görülmektedir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23: FRP kullanarak sargılanan betonun göçme sonrası görüntüsü

FRP sargılama, kolonların deprem performansının arttırılması için de kullanılan bir yöntemdir. Şiddetli deprem esnasında ideal durumda, kolonların yeterli yatay ötelenme kapasitesine sahip olması, kirişlerin ardından bazı kolon uçlarında plastik mafsalların oluşması beklenmektedir. Bu da kolonlara, tasarım ve imalatta yeterli sünekliğin kazandırılması ile mümkündür. Özellikle uç bölgelerinde yeterli etriye kullanılmayan kolonların, FRP sargılama ile sünek hale getirilmesi, olumlu etkisi olan bir uygulamadır. Bu uygulama ile daha önce de belirtildiği gibi aynı zamanda kolonların kesme ve eksenel yük kapasiteleri de arttırılarak her açıdan olumlu etki sağlayan bir güçlendirme elde edilmektedir. FRP sargılama ile aynı zamanda, ileri yük seviyelerinde pas payının dağılması ve kesit içerisindeki boy donatıların burkulması engellenmektedir [21, 26, 31, 38, 41]. Eksenel yük artışı için FRP sargılamada olduğu gibi kesit geometrisi, burada da elde edilecek olumlu etki üzerinde kontrol edici bir parametredir. Dairesel kolonlarda FRP sargılamanın etkisi çok yüksekken, dikdörtgen kesitlerde elde edilen olumlu etkinin miktarı azalmaktadır. Kolonların sargılanması, parçalı ve şerit halinde yapılabileceği gibi, tüm kolonun sargılanması ile de gerçekleştirilebilmektedir. Kolonun halihazırdaki durumu ve güçlendirme tasarımındaki beklentiler, uygulama tipini ve miktarı belirlemektedir. Kolonların FRP sargılanarak güçlendirilmesine ait imalat örneği, Şekil 2.24'de yer almaktadır.



Şekil 2.24: FRP kullanarak kolonların sargılanması örneği [37]

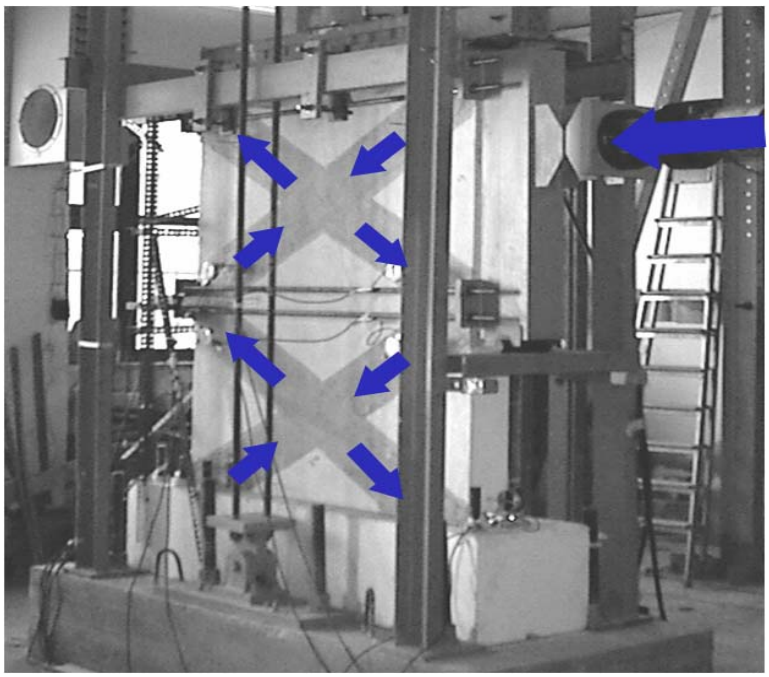
FRP sargılama ile bindirmeli donatı eklemesi yapılan kolonların davranışının da iyileştirildiği çeşitli kaynaklarda belirtilse de, bunun özellikle dairesel kolonlar için geçerli olduğu bilinmektedir. Kare ve dikdörtgen kesitli, yetersiz kenetlenme boyu ile bindirmeli donatı eklemesi yapılmış kolonlarda bu olumlu etkinin oldukça azaldığı çeşitli kaynaklarda belirtilmektedir. Bu konu ile ilgili daha geniş bilgiye, Bölüm 2.5.3'de yer verilmektedir.

Mevcut şartnamelerde FRP ile güçlendirme esasları, kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi, kesmeye karşı güçlendirme ve sargılama başlıkları altında toplanmaktadır. Buraya kadar açıklanan, kompozitlerin kullanıldığı bu temel güçlendirme çeşitlerinin dışında, ikincil sayılabilecek FRP güçlendirme uygulamaları da bulunmaktadır. FRP kullanarak düğüm bölgesi ve döşemelerin güçlendirilmesi, buna örnek olarak gösterilebilir. Bu uygulamalar üzerinde çalışmalar sürekli yenilenmekte ve süregelmektedir. Bu tip güçlendirmeler için, henüz uygulama detayı geliştirme ve olgunlaşma sürecinde olduğunu söylemek yanlış olmaz. FRP kullanılarak laboratuar ortamında yapılan, düğüm bölgesi güçlendirme çalışmasına ait görüntü, Şekil 2.25'de yer almaktadır.



Şekil 2.25: FRP kullanarak yapılan düğüm bölgesi güçlendirme çalışması [37]

Son yıllarda FRP'nin sistem güçlendirmesinde de kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Betonarme yapının deplasmanını sınırlamada, perde duvar ekleme mantığı ile örtüşen bir teknik geliştirilmiştir. Dolgu duvarlı betonarme çerçevelere, diyagonal olarak FRP şeritler yapıştırılmaktadır [42] (Şekil 2.26).



Şekil 2.26: FRP kullanarak yapılan sistem güçlendirmesi [42]

Yatay hareket sırasında, dolgu duvarlı çerçeve çekme ve basınç bölgeleri oluşmaktadır (Şekil 2.26). Dolgu duvarlı çerçeveye ait basınç davranışı uygun olmasına rağmen, çekme durumu için aynı ifadeyi kullanmak mümkün değildir. Şekil 2.26'da görüldüğü gibi dolgu duvarlı çerçeve içerisine FRP şeritler yapıştırılarak, çekme zafiyeti giderilmeye çalışılmaktadır. Depremin tersinir olduğu düşünüldüğünde, her iki yönde de diyagonal şeritlerin gerektiği anlaşılmaktadır. Belirli bir yüksekliğe ve en-boy oranına kadar olan yapılarda uygulanması önerilen bu teknik ile dolgu duvarlı çerçevenin rijitliği ve kesme dayanımı arttırılmaktadır. Sistem olarak düşünüldüğünde bu yöntemle güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeveler adeta bir perde duvar gibi davranışa katkıda bulunmaktadırlar. FRP şerit uçlarının sisteme bağlanmasında özel önlem alınması gerekmektedir [1].

2.4. Betonarme Kolonlar

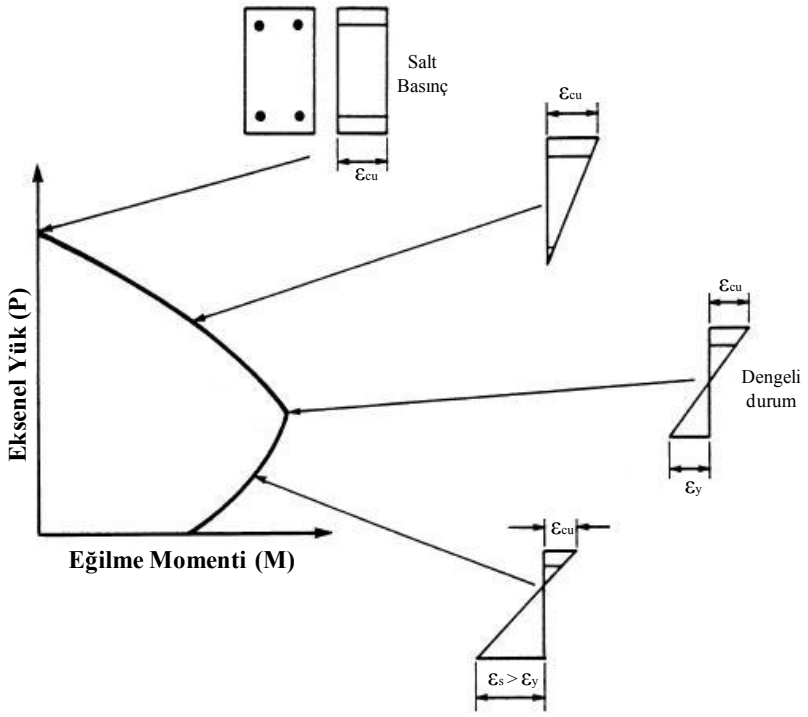
Eksenel kuvvet ve eğilme momenti taşıyan elemanlar sınıflandırmasının içinde en önemli figür olan kolonlar, temel olarak betonarme yapılarda, yüklerin temele güvenle aktarılması görevini üstlenmektedirler. Konut türü betonarme yapılar örnek olarak düşünülürse, çatı ve döşemelerden gelen yükler kirişlere aktarılmakta, kirişlerin kendi yükleriyle birlikte var olan bütün yükler, kolonlar aracılığı ile temele ve dolayısıyla zemine iletilmektedir. Kolonların statik ve durağan şartlardaki bu görevinin yanında bir diğer önemli görevi, deprem ve rüzgar gibi yapıya etkiyebilecek yataydaki yüklerin karşılanmasıdır.

Bu bölümde betonarme kolonların yatay ve tersinir tekrarlanır yükler etkisi altındaki davranışı ve kolonlarda sargılama konuları hakkında literatür araştırma yer almaktadır.

2.4.1. Betonarme kolonların tasarımı

Kolonlar, temel olarak eksenel yük ve eğilme momenti taşıyan elemanlardır. Betonarme bir kolona ait eğilme momenti kapasitesi, üzerine etkiyen eksenel yük değerinin miktarına göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle kolonların eğilme kapasiteleri hesaplanırken, eksenel yük–eğilme momenti etkileşim diyagramları kullanılmaktadır. Eksenel yük–eğilme momenti etkileşim diyagramları, taşıma gücü ilkeleri kullanılarak, kolon kesitindeki birim deformasyon değerinin

değiştirilmesi ile elde edilir. Basınç yüzünde betonun, ulaşabileceği en büyük birim deformasyona ulaştığı varsayımı ile diğer yüzdeki birim deformasyon, aynı değerden başlayarak (salt eksenel basınç durumu) ve sürekli azaltılarak her bir durum için birim deformasyon profilleri elde edilir. Betonun en büyük kısalma birim deformasyonu, beton dayanımına ve sargılama koşullarına bağlı olmakla birlikte, genel olarak 0.003 ile 0.005 arasında değişim göstermektedir (Bu değerler nihai sınırlar değildir). Genelleme yapmak gerekirse pratikte, taşıma gücüne erişildiği anda betonarme kesitin tarafsız eksenine en uzak basınç lifindeki birim kısalmanın, Avrupa ülkelerinde 0.004, Kanada'da 0.0035, Amerika'da 0.003 olduğu varsayımı yapılmaktadır. Elde edilen her bir kesit birim deformasyon profiline ait, eksenel yük (P) ve eğilme momenti (M) değerleri hesaplanır. Hesaplanan P ve M çiftleri grafiğe aktarılarak, kolonun kapasitesini belirleyen eksenel yük-eğilme momenti etkileşim diyagramı elde edilmektedir. Şekil 2.27'de, betonarme kolona ait örnek bir eksenel yük–eğilme momenti etkileşim diyagramı yer almaktadır [19, 43].

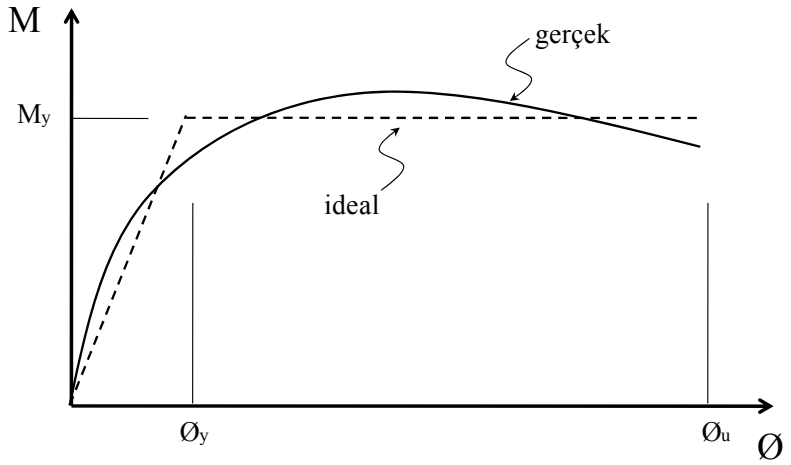


Şekil 2.27: Eksenel yük–eğilme momenti etkileşim diyagramı ve belirli durumlar için kesit birim deformasyon profilleri

Şekil üzerinde, davranışın değişim gösterdiği bazı noktalar için kesit birim deformasyon profilleri de görülmektedir. Betonun en büyük birim deformasyon değerine ulaştığı sırada donatının akması durumu, dengeli durum olarak tarif

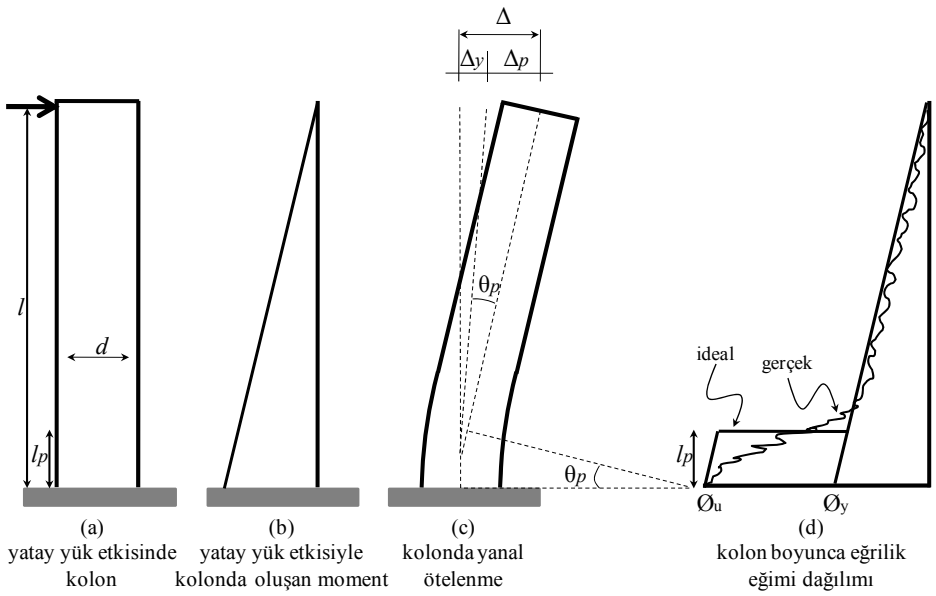
edilmektedir. Şekilde, grafiğin en büyük moment değerine ulaştığı nokta bu durumu göstermektedir. Genel olarak bu değerin üstünde kalan bölgedeki davranışı betonun, altında kalan bölgedeki davranışı ise donatının kontrol ettiği söylenebilir. Buna göre oluşabilecek bir kapasite aşımı durumunda, davranışı betonun kontrol ettiği bölgede basınç göçmesi, donatının kontrol ettiği bölgede ise donatıya ilişkin çekme göçmesi olacağı söylenebilir.

Kolonların eğilme tasarımında, klasik yöntem olarak adlandırılabilecek etkileşim diyagramının kullanımının dışında, moment-eğrilik ilişkisi de kullanılabilmektedir [43]. Özellikle köprüler için düzenlenmiş ve yapıların deprem performansının incelenmesine yönelik oluşturulmuş bazı şartnamelerde, kolonların moment kapasitesi hesaplanırken moment-eğrilik ilişkisinin kullanımı ön plana çıkmaktadır [1, 44]. Moment-eğrilik ilişkisi ile sağlanan en büyük moment kapasitesi miktarının yanında, bu değerin, oluşacak eğrilik eğimi ve dolayısıyla deplasman durumlarında nasıl değiştiği de doğrusal olmayan biçimde elde edilebilmektedir.



Şekil 2.28: Moment-eğrilik ilişkisi

Herhangi bir betonarme kesite ait moment-eğrilik ilişkisi, temel olarak kesit uçlarındaki birim deformasyonlarının adımsal olarak belirlenmesine ve her bir adımda denge denklemleri yarımıyla moment kapasitesinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu hesaplamada doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanılmaktadır. Şekil 2.28'de tipik bir moment-eğrilik ilişkisi görülmektedir. Aynı şekil üzerinde, belirli bir moment değerinden sonra eğrilik eğiminin sabit kaldığı öngörüsü ile yapılan idealleştirme de yer almaktadır.



Şekil 2.29: Yatay yük etkisinde kolonda oluşan ötelenmeler ve eğrilik eğimi dağılımı

Betonarme kolonların yatay yük etkisi altında elastik ötesi davranışında, deformasyonlar ankastre uç bölgelere yakın noktalarda yığılmalar göstermektedir. Plastik dönmeler, kolon uçlarına yakın bölgelerde gerçekleşmektedir. Elastik ötesi davranışta, eleman uç bölgelerinde belirli bir uzunlukta, kesit eğrilik eğimleri Şekil 2.28'de gösterilen en büyük değerine ulaşmaktadır (Şekil 2.29). İdeal olarak betonarme kolonun plastik dönme yaptığı ve teorik model olarak eğrilik eğiminin sabit kaldığının varsayıldığı bu boy, plastik mafsal boyu (l_p) olarak adlandırılmaktadır [45] (Şekil 2.29 a). Plastik mafsal boyu ile ilgili birçok çalışma ve türetilen denklem olmakla birlikte, basitleştirilmiş Corley (1966) denklemi olarak da bilinen denklem 2.12, basitliği açısından en çok tercih edilen plastik mafsal boyu ifadelerinden biridir [1, 46]. Denklemde d, yatay yük doğrultusundaki kesit boyutunu simgelemektedir. Kirişlerin deformasyonunda kullanılmak üzere türetilmiş olan bu ifadenin, kolonlar için de oldukça uygun sonuçlar verdiği görülmüştür [46, 47].

$$l_p = 0.5\, d \ \text{(mm)} \tag{2.12}$$

l_p değerinin, kendi başına bir "boy" tanımı olması ve Şekil 2.29 d'de görüldüğü gibi kolon boyunca düzgün olmayan eğrilik eğimlerinin ağırlıklı olarak yığıldığı kolon boyuna ait bir parçayı temsil ediyor olması, 1960'lardan itibaren türetilen ifadelerde, kolon boyuyla birlikte kesit derinliğinin de hesaba katılması noktasında felsefi bir

çelişki doğurmaktadır. Bu çelişki, aynı kesit boyutlarına sahip farklı boylardaki kolonların plastik mafsal boylarının, denklem 2.12'ye göre eşit kabul ediliyor olmasının verdiği rahatsızlıktan kaynaklanmaktadır. Her ne kadar, basitleştirilerek sadece kolon derinliğine bağlı hale getirilen ifade, daha önce de belirtildiği gibi deney sonuçları ile uyumlu olsa da, temel olarak kesit genişliğine bağlı denklem 2.12'deki ifadeye alternatif arayışları ortaya çımıştır. Yapılan araştırmalarda salt kolon boyunun oranı olacak bir ifadenin, tam olarak nihai uç nokta ötelenmelerini sağlayamadığı görülmüştür [47]. Priestley ve Park (1987) bunun nedeni olarak akma veya birim deformasyon girişimini (yield/strain penetration) ve özellikle mafsal bölgesinde oluşan eğilme çatlaklarının üzerinde oluşan kesme kuvveti etkisini göstermektedirler. Akma girişimi, yatay yük uygulanan kolonun tabanında bulunan boy donatıların, betona göre yaptıkları küçük sıyrılma deformasyonları sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu göreli sıyrılmalar sonucunda boy donatılardaki birim deformasyonlar ve gerilme değerleri, hesaplanan sonuçlardan fazla çıkmakta sonuç olarak kolon tepe deplasmanları artmaktadır. Bu olay gerçekte, boy donatılar üzerindeki birim deformasyon değişiminin, en büyük değerde olduğu kolon tabanından bir sonraki bölge olan temel veya düğüm bölgesi içine de taşındığını ve plastik mafsal uzunluğunu, donatı çapı ile ilişkili ve kolon boyundan bağımsız olarak arttırdığını göstermektedir. Eğilme çatlaklarının üzerinde kesme kuvvetinin etkisiyle, özellikle mafsal bölgesinde yatayda başlayan çatlakların eğimli hale geldiği ve "düzlem kesitler düzlem kalır" hipotezinin geçerliliğinin azaldığı anlaşılmaktadır. Bunun sonucunda plastik bölge uzamakta, çatlaklar arası artan donatı gerilme ve birim deformasyon değerleri hesaplanandan fazla kolon tepe deplasmanlarına ulaşılmasına neden olmaktadır. Genelde bu etki ile kısa kolonlarda karşılaşılmaktadır. Belirli bir boyun üzerindeki kolonlarda, düşük seviyelerde kalan kesme gerilmeleri eğilme çatlaklarını eğimli hale gelmesine sebep olamadıkları için bu kolonlarda, plastik mafsal boyunun kesme-eğilme türündeki çatlaklardan etkilenmesi fenomeni ortaya çıkmamaktadır [47, 48]. Bu bilgiler ışığında, çeşitli revizyonlardan geçen ve genel olarak Priestley (1996) denklemi olarak bilinen, denklem 2.13'deki ifade ile tanımlanan plastik mafsal boyu denklemi türetilmiştir [45, 46, 48].

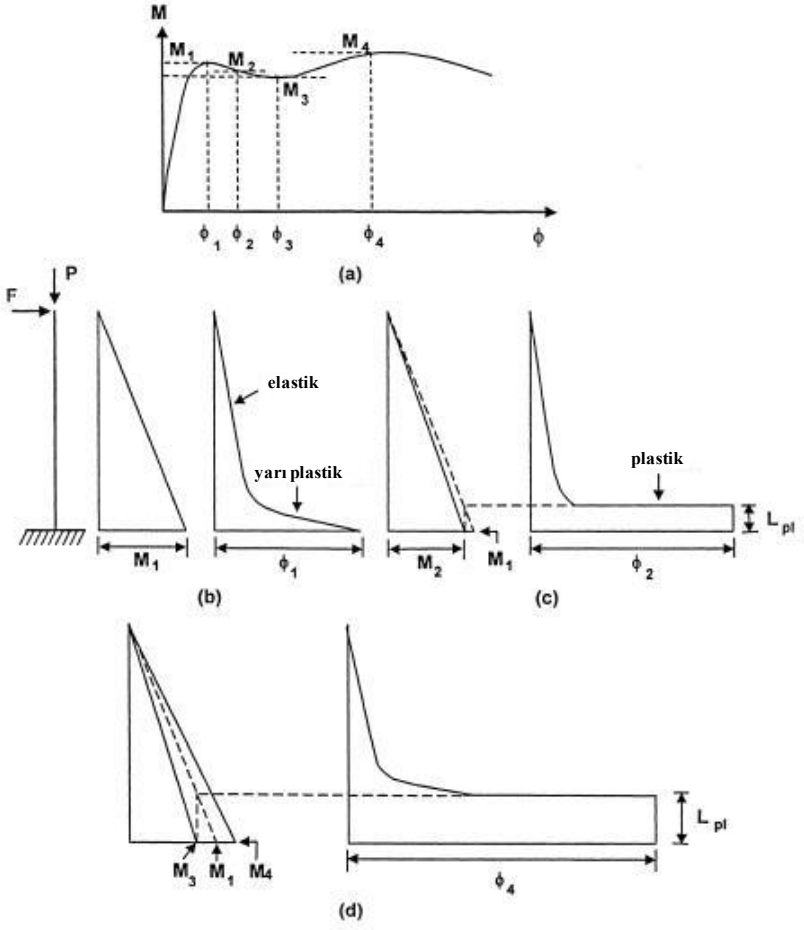
$$l_p = 0.08l + 0.022\, f_y\, d_b \geq 0.044\, f_y\, d_b \quad \text{(mm)} \tag{2.13}$$

Denklem 2.13, özellikle köprüler için hazırlanmış birçok kaynakta ve tasarım şartnamesinde, deplasmana dayalı tasarım sürecinde kullanılmaktadır [44, 46].

Burada hatırlatmak gerekir ki, plastik mafsal bölgesi ve plastik uç bölgesi tanımları birbirine çok yakın olmakla birlikte, aynı anlamı taşımayan ifadelerdir. Plastik mafsal bölgesi, plastik deformasyonların yığıldığı düşünülen, kolon tepe deplasmanının hesabında kullanılan ve bu değerin deney sonuçlarına uyacak şekilde kalibrasyonunu sağlayan, teorik olarak hesaplanmış uzunluğa sahip bölgedir. Plastik uç bölgesi ise kolonun, gerçekte elastik ötesi deformasyonları yaptığı, etriye sıklaştırılmasının yapılması gereken bölgedir. Bu bölgeye ait uzunluğun, kolon tabanından itibaren, yükleme yönündeki kesit boyutu veya momentin, en büyük moment değerinin %80'ine ulaştığı noktaya kadar olan parçanın boyu değerlerinden, büyük olanına eşit olduğu bildirilmektedir [45]. Moment dönüm noktası ile momentin en büyük değeri aldığı noktalar arası uzunluğun 0.25 katı da, bu koşulların arasına eklenebilmektedir [44]. Şekil 2.29 d'de, kolon üzerinde ideal ve gerçek eğrilik eğimi grafiklerinin, *lp* olarak gösterilen bölge üzerindeki kesiştiği noktSa, plastik uç bölgeyi tanımlayan nokta olarak değerlendirilebilir.

Plastik mafsal bölgesinin, yükün etkimeye başlaması ile artarak en büyük değerine ulaşması sürecinde değişim göstermesi ve sargılama donatısı gibi değerlere bağlı olarak değişim göstermesi, kritik yükleme değerlerinde değişen plastik mafsal boyu tanımlamasının yapılmasına sebep olmuştur (Şekil 2.30). Kolonun kritik bölgesi olan uç kısımlarında, boy donatıların akmaya ve paspayı bölgesindeki betonun ezilmeye başladığı değerde, eğrilik eğiminde önemli artış meydana gelmektedir. Bu değişiklikler sonucu kesit gerilmelerinde tekrar dağılım süreci oluşmakta ve uç bölgede plastik mafsal oluşumu başlamaktadır. Gerçek davranışta, Şekil 2.28'deki ideal kesit davranışından farklı olarak, dayanımda küçük değişimler gözlenmekte, plastik deformasyonların artması ve betonun genişlemesi ile sargılama mekanizması etkinliği ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.30 a ve b). Sargılama etkisindeki betonda ortaya çıkan dayanım artışı ve donatıların pekleşmeye başlaması ile dayanım tekrar artmaya başlamaktadır. Dayanım artışına bağlı olarak eğrilik dağılımı kolon boyunca yenilenerek, elastik bölgeye doğru uzamaktadır. Bu da yüke bağlı olarak sürekli gelişen ve ilerleyen bir plastik mafsal tanımlamasını ortaya çıkartmaktadır

(Şekil 2.30 d). Daha önceki tanımlarda, en büyük dayanım ve en büyük birim deformasyon değerleri göz önüne alınarak, yük deplasman davranışının özellikle tepe noktası sonrasındaki göçmeye kadarki evresi karanlıkta kalmaktadır. Değişen plastik mafsal boyu yaklaşımıyla, gerçek davranışın daha gerçekçi biçimde sergilenebileceği belirtilmektedir [49].



Şekil 2.30: Moment-eğrilik ilişkisi ve ilerleyen plastik mafsal boyu yaklaşımı [49]

Şekil 2.30'da gösterilen, ilerleyen plastik mafsal yaklaşımı göz önüne alınarak yapılan kolon deplasman analizlerinde, tepe deplasmanının en büyük değerine ulaştığı bölgede plastik mafsal boyunun kesit genişliğine yaklaştığı görülmektedir [49].

Eğrilik eğimi ve plastik mafsal boyu ifadeleri yardımıyla, yatay yük etkisi altında betonarme kolonun eğilme etkisinde yapabileceği en büyük yanal öteleme değerleri hesaplanabilmektedir [44-48]. Betonarme bir kolonun yatay yük altında elastik ötesi yapacağı yanal ötelenme ve kolon boyuca eğrilik eğimi dağılımı Şekil 2.29

c ve Şekil 2.29 d'de görülmektedir. Elde edilebilecek en büyük deplasman, elastik ve plastik ötelenmelerin toplamı Δ olarak tanımlanmaktadır.

Denklem 2.14 ile oluşacak elastik ötelenme elde edilmektedir.

$$\Delta_y = \frac{\phi_y \, l^2}{3} \text{ (mm)} \tag{2.14}$$

Şekil2.29'da Δ_p ile gösterilen plastik ötelenme değeri, kolonun plastik mafsal bölgesinde yapacağı elastik ötesi dönme ile ilişkilidir. Denklem 2.15'de, bu değer kullanılarak ve dönmenin plastik mafsalın merkezinde olduğu kabul edilerek yapılan, plastik ötelenme hesaplaması yer almaktadır.

$$\Delta_p = \theta_p \times \left(l - \frac{1}{2} l_p \right) \text{ (mm)} \tag{2.15}$$

Denklem 2.15'deki plastik dönme değeri, plastik mafsal boyunda yer alan kesitlerdeki eğrilik eğimlerinin toplanması ile bulunmaktadır. Plastik dönme değeri, denklem 2.16 yardımı ile bulunmaktadır.

$$\theta_p = l_p \times \left(\phi_u - \phi_y \right) \text{ (mm)} \tag{2.16}$$

Yatay yük etkisindeki betonarme kolonların toplam yanal ötelenme değeri, yukarıdaki denklemlerin düzenlenmesi sonucunda denklem 2.17 yardımı ile elde edilmektedir.

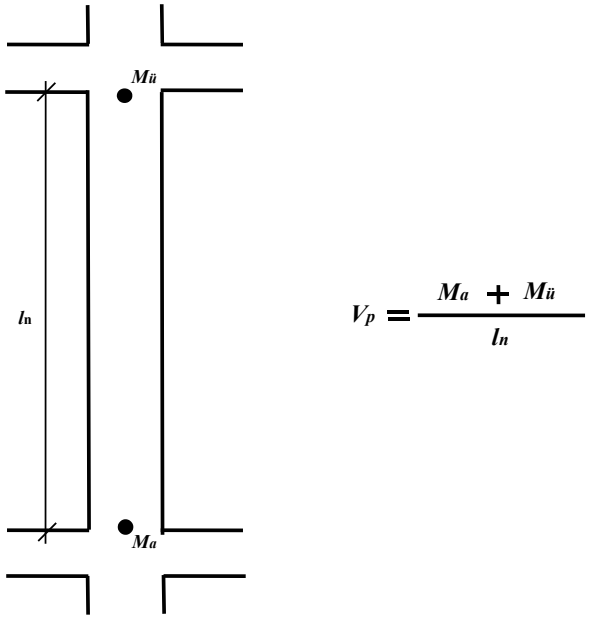
$$\Delta = \frac{\phi_y \, l^2}{3} + \left(\phi_u - \phi_y \right) \, l_p \left(l - 0.5 \, l_p \right) \text{ (mm)} \tag{2.17}$$

Kolonlar üzerinde etkili bir diğer yük türü ise kesme kuvvetidir. Antisimetrik yükleme durumları, rüzgar ve deprem gibi etkiler kolonlar üzerinde yatay yük oluşturarak kesme etkisi meydana getirmektedirler. Kolonların tasarımında göz önüne alınan ikinci önemli ölçüt, kesme dayanımı ve davranışıdır. Kolonların kesme kapasiteleri, betonun çatlama dayanımına bağlı olan beton kesme dayanımı (V_c) ve içerisine yerleştirilen sargılama donatısının (etriye) sağladığı kesme dayanımının (V_s) toplamı olarak ifade edilmektedir [18]. Bu doğrultuda, yapısal analizden elde edilen

kesme kuvvetlerini karşılayacak miktarda etriyenin hesaplanması, klasik kolon kesme kuvveti tasarımını oluşturmaktadır. Denklem 2.18'de betonarme elemana ait toplam kesme dayanımının elde edildiği genel ifade yer almaktadır.

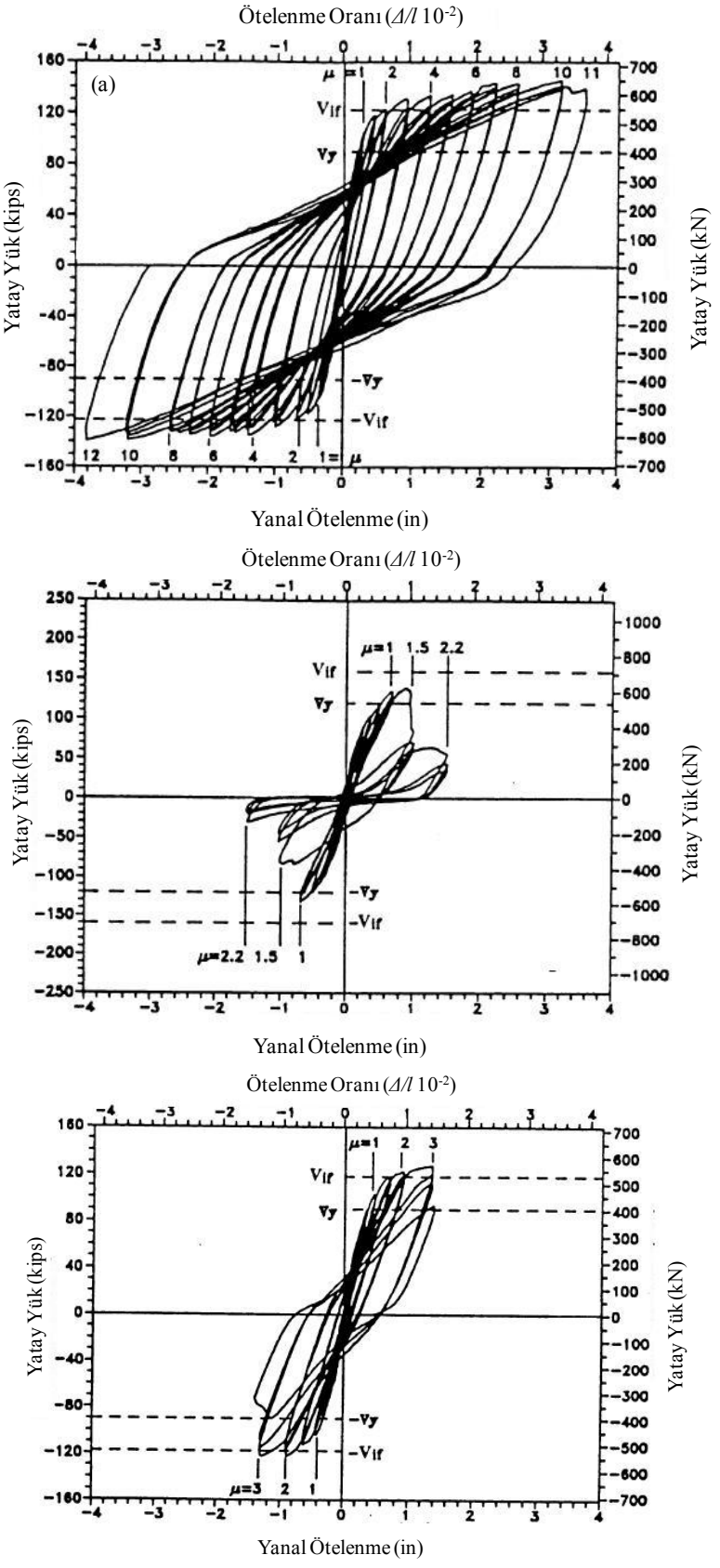
$$V_n = V_c + V_w \tag{2.18}$$

Eksenel kuvvet etkisi, çatlamış betonda agrega kenetlenmesi, boyuna donatıların eksenine dik davranışı (dowel action) kesme davranışında, dayanımı oluşturan diğer bileşenlerdir. Bu bileşenlerin katkıları bazı şartnamelerde yok kabul edilmekte, bazılarında ise V_c hesabının içerisinde amprik katsayılarla yer bulmaktadırlar.



Şekil 2.31: Moment kapasitesine dayalı kesme tasarımı

Günümüz betonarme tasarım felsefesi olan sünek tasarım ilkeleri göz önüne alındığında, kolon kesme kapasitesi tasarımının, moment kapasitesi ile doğrudan ilişkili olduğu ortaya çıkmaktadır. Bilindiği gibi kesme kapasitesinin aşılması nedeni ile yaşanacak bir göçme, ani ve gevrek bir davranıştır. Oluşabilecek bir hasar ve hatta göçme durumunun eğilmeden dolayı ortaya çıkmasını öngören bu tasarım felsefesinde, kolonların kesme kapasiteleri, taşıyabilecekleri en büyük moment değerlerine göre hesaplanmaktadır. Şekil 2.31'de gösterilen kesme kuvveti için kapasite tasarım yöntemi, birçok şartnamede olduğu gibi ülkemizde kullanımda olan deprem yönetmeliği DBYBHY'de de yer almaktadır [1].



Şekil 2.32: Eğilme, kesme ve her ikisinin birlikte etkin olduğu kolon davranışları (yukarıdan aşağı) [50]

Anlaşıldığı üzere kolonların tasarımı, eksenel yük-eğilme momenti ve kesme tasarımı olarak ikiye ayrılsa da bu iki tasarım, özellikle depreme dayanıklı betonarme yapı üretiminde iç içe olan bir süreçten oluşmaktadır.

Şekil 2.32'de, tersinir tekrarlanır yük çevrimleri altında test edilmiş kolonların davranışları görülmektedir. Şekil 2.32 a'da oldukça yeterli sargılama donatısı içeren kolona ait eğilmenin baskın olduğu, b'de kesme kapasitesi eğilme kapasitesinin altında olan kolona ait kesmenin baskın olduğu ve c'de yetersiz sargılama donatısı bulunan kolona ait eğilme ve kesme etkilerinin birbirini etkilediği davranış örnekleri sergilenmektedir [50].

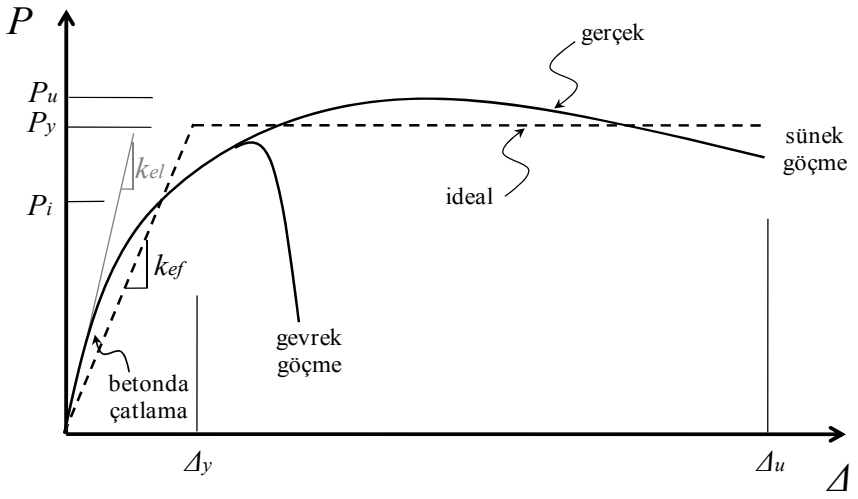
2.4.2. Kolon davranışında temel tanımlar

Kolonların davranışını ve performansını tanımlamak için üç temel ifade kullanılmaktadır. Bu ifadeler aynı zamanda, yapının tümüne ait davranışı tanımlamak için de kullanılmaktadır. Rijitlik, dayanım ve süneklik olan bu ifadeler, ilerleyen paragraflarda açıklanmaktadır.

♦ Rijitlik, tanım olarak en bilinen hali ile yapısal elemana birim deformasyon yaptırabilmek için gerekli olan kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik, malzeme özellikleri ve eleman boyutları ile ilişkili olan bir büyüklüktür. Şekil 2.33'de betonarme elemanlara özgü genel bir yük-yanal ötelenme grafiği yer almaktadır. Hemen belirtmek gerekir ki aralarındaki ilişki sonucu moment-eğrilik eğimi ve aynı zamanda moment-dönme grafikleri de, şekil ve karakteristik noktaları açısından yük–yanal ötelenme grafiği ile büyük benzerlik göstermektedirler (Şekil 2.34). Grafiğin yükleme bölgesindeki eğimi, k ile tanımlanmakta olan rijitliği ifade etmektedir. Eleman rijitliği, yapın tümü için hesaplanan performans ve davranış özelliklerini kontol eden parametrelerden biridir. Yapıya ait periyot, yük dağılımı ve deformasyon talebini belirlemektedir. Ayrıca yapının performansını kontrol eden süneklik üzerinde, akma deformasyonunu belirlediği için dolaylı etkisi bulunmaktadır.

Anlaşılacağı üzere eleman rijitliklerinin belirlenmesinde yapılacak hatalar, yapıya ait tüm hesapları etkilemektedir. Örneğin olması gerekenden düşük olarak belirlenen rijitlik, deprem etkisinde talep gerçek edilecek deplasmandan çok daha fazla

ötelenme talebi ile karşı karşıya kalacaktır. Benzer biçimde gerekenden yüksek olarak alınan rijitlik ise perdeli bir yapıdaki kolonlara için, depremin kolonlardan talep edeceği kesme yükünün, olması gerekenden az olacak biçimde hesaplanmasına sebep olacaktır [51].



Şekil 2.33: Betonarme bir eleman için genel yük-yanal ötelenme grafiği

Elastik yapı analizlerinde, yük ile riritlik arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayımı kullanılmaktadır. Betonarme eleman için gerçekte olan durum düşünüldüğünde, yük etkisindeki betonarme eleman akma noktasına erişmeden önce de, sonrasında olduğu gibi doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Özellikle etkiyen yük deprem gibi bir yatay yük ise, şiddetin az olduğu seviyelerdeki yani bir başka değişle tasarım depreminin çok altında olan hafif ölçekteki depremlerde bile betonarme elemanlarda doğası gereği çatlamalar olmaktadır (Şekil 2.33). Hemen belirtmek gerekir ki bu seviyedeki çatlaklar, yapısal hasarı gösteren ve yapısal güçlendirme gerektiren çatlaklar olmayıp, beton ve donatının kompozit çalışmasının ürünü olan, servis limitleri içerisinde ortaya çıkabilecek, küçük ölçekte çatlaklardır [43,48]. Bu durum göz önüne alındığında betonarme elemanların tasarımında (özellikle deplasmana dayalı tasarımda), çatlamış durumdaki betonarme elemanın rijitliği olan sekant rijitlik değerinin (k_{ef}) kullanılması, daha uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle köprüler için oluşturulmuş bazı şartnamelerde, plastik mafsal oluşumunun ve sünek davranışın sağlanacağı analiz ve tasarım için çatlamış eleman rijitliklerinin kullanılması zorunlu tutulmaktadır [44, 52]. Depreme dayanıklı yapı tasarımı şartnamelerinin bazılarında da, yeni bina

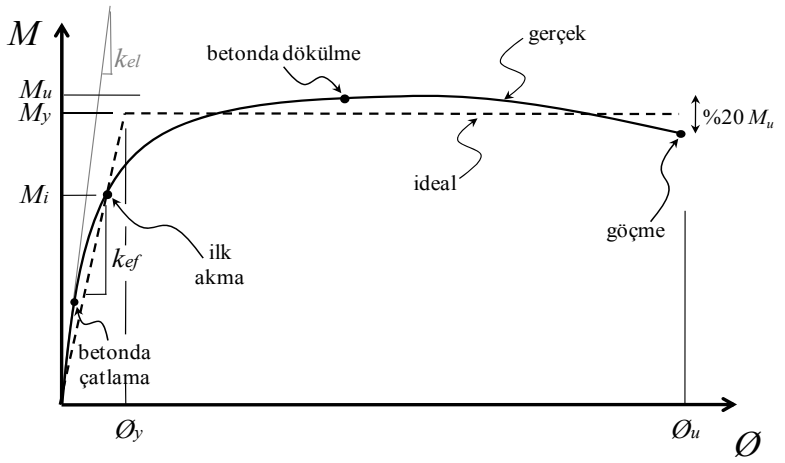
tasarımında çatlamış eleman rijitliklerinin kullanılması gerekliliği belirtilmekte ve yaklaşık çatlamamış eleman rijitliğinin yarısı alınabileceği ifade edilmektedir [53].

Şekil 2.33'deki P_i değeri, betonarme elemanın ilk akma dayanımı olarak da tanımlanabilmektedir. Ayrıca P_i değeri için, ulaşılan taşıma gücünün %75'i, çekme donatısının ilk aktığı değer veya beton birim deformasyonunun 0.002 ye ulaştığı değerden, hangisine ilk ulaşılıyorsa elde edilen bu noktanın kullanılması yönünde tanımlamalar da yapılmaktadır [48, 51-54]. Genel olarak P_i, eksenel yük seviyesine bağlı olarak ulaşılan taşıma gücü kapasitesinin %75'i veya %80'i olarak kabul edilmektedir. P_i değerinin elde edilesi ile sekant rijitliği (k_{ef}) elde edilebilmektedir.

♦ Dayanım genel olarak, betonarme elemanın, dış kuvvetlerden dolayı oluşan gerilmelere göçme olmaksızın karşı koyması olarak tanımlanabilir. Bu doğrultuda ulaşılabilecek en büyük değer, taşıma gücü olarak ifade edilmektedir. Yatay yük etkisinde sünek bir betonarme kolona ait Şekil 2.33'de yer alan, yük-deplasman grafiğinde görüldüğü üzere, kolonun gerçek dayanımının yani taşıma gücü değerinin, P_u olduğu anlaşılmaktadır. Bir önceki paragrafta detaylı olarak anlatılan ve P_u dayanımının yaklaşık %75'i olarak kabul edilen P_i değeri ise genel olarak en dış katmandaki donatıların akmaya başladığı, ilk akma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. P_y ise Şekil 2.33'de görüldüğü üzere gerçek davranışın, doğrusal elasto-plastik biçimde idealize edilmesi durumunda, davranışın elastik ötesi hal aldığı noktayı, bir anlamda elemanın ideal olarak aktığı değeri temsil etmektedir. Bu nokta ideal dayanım olarak da tanımlanabilmektedir. İdeal dayanımın sayısal olarak tanımlanması için, ilk akma dayanımının üzerinde kalan bölgede, gerçek ve ideal davranış grafikleri arasındaki fark alanların dengelenmesinden yararlanılmaktadır (44-48, 51, 54). Bununla birlikte ideal dayanımın, en büyük dayanıma eşit alındığına da literatürde rastlanılmaktadır (54). Grafikte gösterilmemekle birlikte bunların dışında, şartnamelerin kullanımıyla hesaplanan elemana ait tasarım dayanımı ve yük altında elemanın karşılaması gereken, analizlerden elde edilen talep dayanım tanımlamaları da yapılmaktadır. Tasarım dayanımının, en az talep dayanımı kadar olması sağlanmak zorundadır.

Şekil 2.33 ve Şekil 2.34'de tasarım dayanımının konumlandırılması gerekirse, kullanılan şartname ve kolon türüne göre (betonarme bina kolonu, betonarme köprü

kolonu gibi) belirli bir oranda alt ve üst kısmı olmak üzere, ilk akma dayanım değeri civarında olduğu söylenebilir.



Şekil 2.34: Betonarme bir eleman için genel moment-eğrilik eğimi grafiği

Kapasite grafiklerinde bazı durumlarda, grafiğin sonlandığı göçme dayanım değerinin en büyük dayınım değerinden oldukça aşağı seviyelerde olabildiği bilinmektedir. Bu gibi durumlarda, genel olarak en çok kabul gören iki sınır değer tanımlanmaktadır: en büyük dayanım değerinin %20 azalması ve ertiye donatısının kopması. Hangi sınır değerine ilk olarak ulaşılıyorsa, o değer göçme dayanımı olarak belirlenmektedir (43, 47, 54). Bazı kaynaklarda, bu iki durumuma ilave olarak şu sınır durumların da kontrole dahil edilmesi gerektiği belirtilmektedir: boyuna donatı kopması, basınç altındaki boyuna donatıların burkulması, sargılama donatısı olmadığı durumda paspayının dökülmesi ve sargılanmış durumda betonun ezilmesi (43, 54).

Dayanım ile ilgili verilen tanımlalar, Şekil 2.33 ve Şekil 2.34'de görüldüğü gibi hem yatay kuvvet, hem de moment için geçerlidir. Dolayısıyla yatay yük-yanal ötelenme ve moment-eğrilik eğimi için oluşturulacak grafiklerdeki karakteristik noktalar benzer biçimde elde edilmektedir.

♦ Süneklik kısaca, yük kaybı olmaksızın deforme olabilme kabiliyeti şeklinde nitelendirilebilir. Depreme dayanıklı yapı tasarım süreci göz önüne alınarak yapılan süneklik tanımı ise öz olarak bu kısa tanımla aynı olmakla birlikte, sünek olabilmenin temel şartını da içermektedir. Bu tanım, yapının (elemanın) önemli sayılabilecek dayanım kaybı yaşamadan, elastik ötesi davranış bölgesinde büyük

çevrimsel (tersinir-tekrarlanır) deformasyonlara, bir çok defa dayanabilme kabiliyeti olarak yapılmaktadır (45, 54). Özellikle şartnameler söz konusu olduğunda, tanımda yer alan, devamlılığın sürdürülmesinin gerekli olduğu çevrimsel deformasyonun, bir çok defa tekrarlanan biçimde olduğu özellikle belirtilmektedir (44, 52). Literatürde, dayanımla birlikte rijitlikte de önemli kayıp olmaması gerektiği bilgisi bulunmaktadır (45).

Dayanım veya rijitlikte önemli düşüşler olması ve davranışın bu düşüş süreciyle devam etmesi, elastik en büyük deplasmanın çok üzerinde nihai deplasmanlara sebep olmaktadır (45). Düşüş eğilimi göz ardı edilerek hesaplanacak süneklik miktarı çok yüksek ve göreceli olarak olumlu algılanabilir rakamsal bir değer olabilecekse de, dayanım kaybı ile elde edilmiş yüksek süneklik değeri beklide çoktan göçme değerine ulaşmış ve yıkılmış bir "sünek" yapıya veya yapının elemanlarına ait olacaktır. Bu noktada akma deplasmanında olduğu gibi gerçeğe uygun bir sonuç deplasmanın tanımının yapılması gereklidir.

Süneklik tanım olarak önceki paragraflardaki gibi açıklanmakla birlikte, yapının davranışını ve hatta ayakta kalabilmesini tanımlayan bir ifade olabilmesi için matematiksel ve rakamsal bir biçimde ifade edilmelidir. Denklem 2.19'da görüldüğü gibi süneklik (μ), belirlenen bir plastik yük noktasındaki deformasyon değerinin (d_m), akma yükü değerindeki deformasyona (d_y) oranı olarak sayısallaştırılmaktadır.

$$\mu = \frac{d_m}{d_y} \tag{2.19}$$

Şekil 2.33'de görülen ve ilk akma dayanımının hemen sonrasında göçme ile sonuçlanan davranış, gevrek davranış olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak kesme dayanımının kontrol ettiği ve bu dayanım değerinin, eğilme dayanımından düşük olduğu gevrek davranış türü, tüm yapı şartnamelerinin felsefesinde kesinlikle yasaklanmaktadır. Kesme kuvvetinin yönlendirdiği, davranış sürecinin izlenebileceği hiçbir işaret olmaksızın ve ani olarak göçme ile sonuçlanan bu tür davranış, kontrol edilemez olarak nitelendirilmektedir. Yapı şartnamelerinde, bazı formüllerin içerisinde yer alan ampirik katsayılarla, verilen zorunlu konstrüktif kurallarla, bazen de doğrudan süneklik için verilen detay ve hesaplamalarla, kesme

kontrolündeki davranış önlenmeye çalışılmaktadır. Bunun ötesinde tasarımcıya bırakılan konu, yapının/yapı elemanının süneklik seviyesinin ne olacağıdır. Üzerinde en çok durulan ve yapıların/yapı elemanlarının belirtildiği gibi davranışını belirleyen süneklik seviyesi, betonarme tasarım ve imalat aşamasındaki detaylandırma (etriye miktarı, biçimi, uçlarının şekli, eğilme donatısı, basınç donatısı, bindirme boyu uzunluğu vs.), kesit boyutları ve eksenel yük seviyesiyle doğrudan ilişkilidir.

Depremin, kütle, ritilik, zemin koşulları vb. gibi bazı karakteristik özelliklere göre talep edeceği deplasman değeri ve buna bağlı olarak süneklik seviyesi, çeşitli yöntemlerle elde edilebilmektedir. Bunun için doğrusal olmayan zaman tanım aralığında yapılacak dinamik analiz veya daha basit fakat yaklaşık sonuç veren, elasto-plastik deformasyon modellerini içeren statik analiz kullanılabilir. Betonarme kolonlar göz önüne alındığında laboratuar deneylerinin de aynı sonuca hizmet ettiği söylenebilir (54).

Buraya kadar, denklem 2.19'da dahil olmak üzere süneklikle ilgili tanımlamalarda, karşılaştırılan ve birbirine oranlanan büyüklük için deformasyon ifadesi kullanılmıştır. Bunun nedeni, betonarme ile ilgili tek bir büyüklüğe ait süneklik tanımlamasının olmamasından kaynaklanmaktadır. Süneklik değeri genelde, tepe noktası deplasmanı yani yanal ötelenme için kullanılmakla birlikte (deplasman sünekliği - μ_Δ), plastik mafsal bölgelerinde kesit davranışını ortaya koyan eğrilik eğimi için de sıkça dile getirilmektedir (eğrilik eğimi sünekliği - μ_Φ). Denklem 2.20'de deplasman sünekliği ve eğrilik eğimi sünekliği tanımlarının matematiksel gösterimleri yer almaktadır. Bunların yanında dönme ve birim deformasyon süneklik değerleri de kullanılmaktadır. Deplasman sünekliği, elemanın tümü ile ilişkili olmakla birlikte, dönme sünekliği elemanın tümü ve aynı zamanda plastik mafsal boyu ile ilgilidir. Eğrilik eğimi sünekliği ise donatı ve eksenel yük seviyesinin de hesaba katılmasıyla, betonarme kesit ile ilişkilidir. Eleman boyutları kullanılarak süneklik türleri arasında geçiş sağlanabilmektedir (44-48,54).

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y},\ \mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \tag{2.20}$$

Rijitlik, dayanım ve süneklik değerleri, yapının tümü ve diğer yapı elemanları gibi

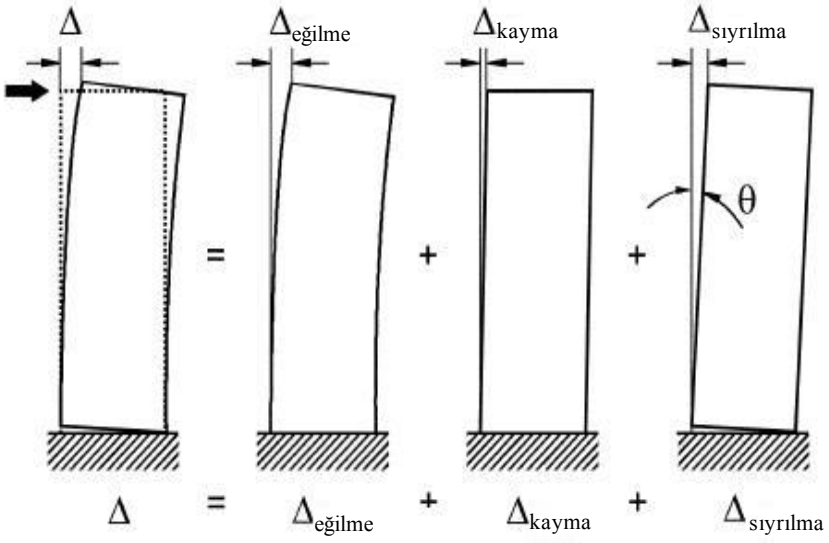
betonarme kolon davranışını da kontrol eden parametrelerdir. Kısmen tanımlamaları içerisinde davranış üzerindeki rolleri verilmekle birlikte, bu tanımları davranış açısından birbirinden keskin hatlarla ayırmak ve birbirleri arasında hiyerarşik önem sıralaması yapmak oldukça güçtür. Genel olarak özetle, rijitliğin dayanım ve deplasman talebini belirlediği, dayanımın kritik deformasyonları etkilediği ve sünekliğin yapının yük altında sürekliliğini kontrol ettiğini söylemek mümkündür.

Başka bir açından bakılırsa bu tanımların iki yönü olduğu söylenebilir. Birincisi, tamamen tasarım ve imalata bakan yönüdür ki yerinde ve gerçekte kolon üzerinde sağlandıkları değerlerle, kolon davranışını belirlemeleridir. İkincisi ise var olan bir kolonun davranışının tahmin edilmesi amacıyla belirli kabuller ile tahmin edilmeleridir ki kolonun davranışının kestirilmesi ve bir anlamda kendisine ömür biçilmesi sürecidir. Birincisinde yani tasarımda gerçek değerlerin, hesaplanan değerlerden fazla olması, ikincisinde ise gerçek ve hesaplanan değerlerin birebir aynı olması esastır. Buna göre yapı/yapı elemanı değerlendirilmesinde bu ifadelerin doğru belirlenmesi, çok büyük önem taşımaktadır. Yapılacak yanlışlık, hasar görmeyecek bir kolona yıkılacak, göçmesi muhtemel bir kolona ise hasar almayacak gözüyle bakılmasına neden olabilmektedir.

2.4.3. Kolon davranışında tepe deplasman

Kolonlar için tüm davranışı temsil etmemekle birlikte, kolonun performansı ve davranışı hakkında fikir veren en temel ölçüt, tepe deplasmanıdır. Kullanılan diğer bazı ölçütlerin de deplasman değişim sürecinden türetilmesi, bu ifadenin geçerliliğini kuvvetlendirmektedir. Uzun zamandır geliştirilen ve son 10-15 yılda popüler hale gelen deplasmana dayalı tasarım yöntemi, kolon davranışının temsilinde, tepe deplasman değerinin yerini perçinlemektedir. Yük tarafından talep edilen ve yapı/yapı elemanı tarafından sağlanan deplasmanların karşılaştırılması temeline kurulu olan bu yöntem, performansa dayalı tasarım adı ile de bilinmektedir. Bu yöntemde talep ve arz deplasmanların doğru belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yapının tümüne ait performansı incelemekle birlikte, bu yöntemde yapı elemanlarının, özellikle kolonların deplasmanları büyük önem kazanmaktadır. Betonarme kolonların tasarımının kısaca özetlendiği Bölüm 2.4.1'de, klasik tasarımın yanında, deplasman bazlı tasarımın temel yöntemi olan eğrilik eğimine

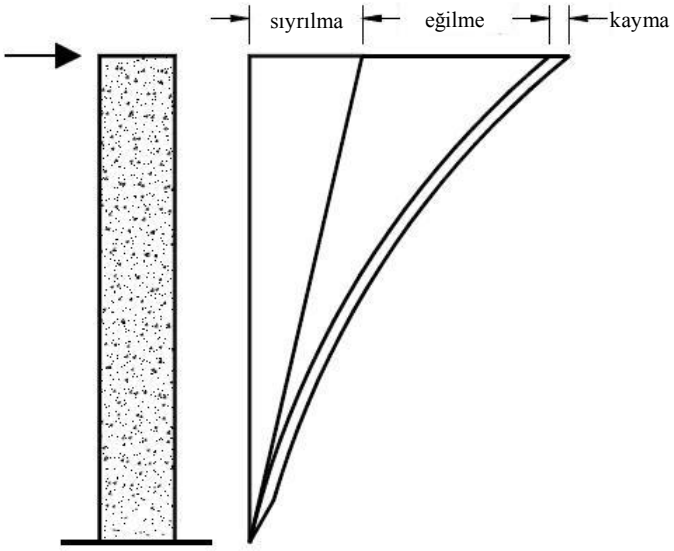
bağlı deplasman hesabı da verilmiştir. Bununla birlikte literatürde birçok kaynakta, kolonun davranışında elde edilen toplam deplasmanın, üç farklı bileşenden oluştuğu belirtilmektedir. Şekil 2.35'de görüldüğü üzere yanal ötelenmenin bileşenleri, eğilmeden, kesme etkisinden ve donatı sıyrılmasından oluşmaktadır [46, 51, 55, 56, 57, 58]. Şekil 2.36'da, deneyler sonucunda da ortaya konmuş olan bu davranış, özet olarak gösterilmektedir (56). Örnekleme olarak, Sezen ve Moehle (2006)'nin yaptıkları, kesme etkisi baskın olan kolon testlerinde, eğilmeden kaynaklanan tepe deplasman değerlerinin, toplam deplasman içindeki payının %40 ile %60 arasında, sıyrılmadan kaynaklanan tepe deplasman değerlerinin ise %25 ile %40 arasında olduğu belirtilmiştir. Kaymadan kaynaklanan deplasman bileşenleri ise en küçük payı oluşturmaktadır. İdeal akma dayanımındaki deplasmanda, kayma deplasmanlarının toplam tepe deplasmanı içerisindeki payı bu deneylerde yaklaşık %10 civarında olmakla birlikte, göçme noktasında %20 ile %40 arasında değişebilmektedir. Belirtilen kolonlar, sürekli boy donatılara sahip, sargılama donatısı oranı düşük ve 1/1 oranında gerçek yapılardaki kolonları temsil eden kolonlardır [58].



Şekil 2.35: Betonarme kolonlarda yanal ötelenme bileşenleri [54]

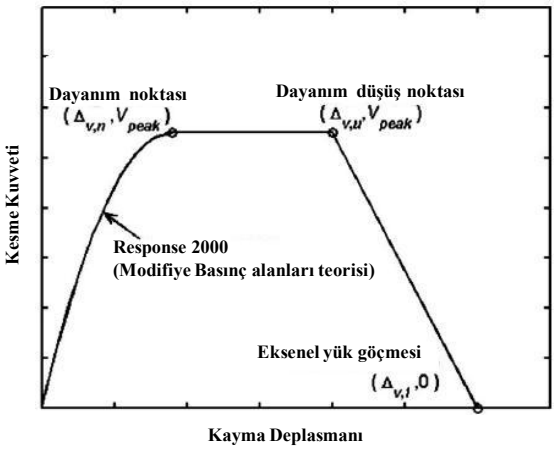
Kayma deplasmanı, eğilme baskın davranış gösteren kolonlarda, çok düşük değerlerde kalmaktadır. Genelde betonarme yapılardaki kolon boylarının nispeten uzun, dolayısıyla kesme etkili açıklıklarının fazla olması nedeniyle, çoğu durumda ihmal edilmektedir. Her ne kadar bu cümle literatürde çok sık tekrarlanan ve çoğu makalede sözü o edilmeye bile gerek olmayan bir cümle olsa da, akılda iki

adet soru işareti bırakmaktadır. Birincisi, eğilme etkisi baskın olup kesme çatlakları sonucu göçme durumu, ikincisi ise kolon boylarının uzun olduğu durumlarda dahi kesme dayanımının, etkili olarak sargılama donatısı tarafından belirlenmesi. Bu iki soru işareti kısmen, Bölüm 2.4.1'deki belirtildiği üzere, kesme dayanımının kolon moment kapasitesinin üzerinde tasarlandığı kolonlar için giderilmektedir. Günümüz deplasmana dayalı tasarım yöntemlerinin genelinde, kaymadan dolayı oluşacak deplasmanların küçük değere sahip olmanın yanında, kapasite tasarımı ile kesme dayanımı sağlanarak, bu tip göçmenin olmayacağının garantilenmesinin ardından ihmal edildiği akla gelmektedir. Bununla birlikte değerlendirmeye tabi tutulan ve güçlendirme uygulanan kolonlarda kesme dayanımının doğru bir biçimde değerlendirilmesi, çok büyük önem taşımaktadır. Özellikle kesme dayanımının eğilme dayanımına yakın olduğu kolonlarda ve fazla eksenel yük etkisine maruz bırakılmış kesme dayanımı aşılarak göçebileceği düşünülen, etriye oranı çok düşük olan kolonlarda, kayma etkisiyle oluşan deplasmanların önem kazanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 2.36: Betonarme kolonda deplasmanı oluşturan bileşenlerin grafiksel gösterimi [56]

Genel olarak kabul gören iki tür kayma deformasyon hesabından söz etmek mümkündür. Birincisi, özellikle davranışın kesme etkisinin baskın olduğu ve kayma deformasyonlarının önemli hale geldiği durumlar için uygundur. Bu tip yaklaşımda, Şekil 2.37'de görülen biçimde modeller benimsenmektedir [59,60].



Şekil 2.37: Kesme etkisi baskın kolonda kesme kuvveti-kayma deformasyonu ilişkisi [59]

Bu tip kayma deplasmanını ifade eden modeller özellikle, kesme kapasitesinin, kesme yükünün altında olduğu durumlarda önem kazanmaktadırlar.

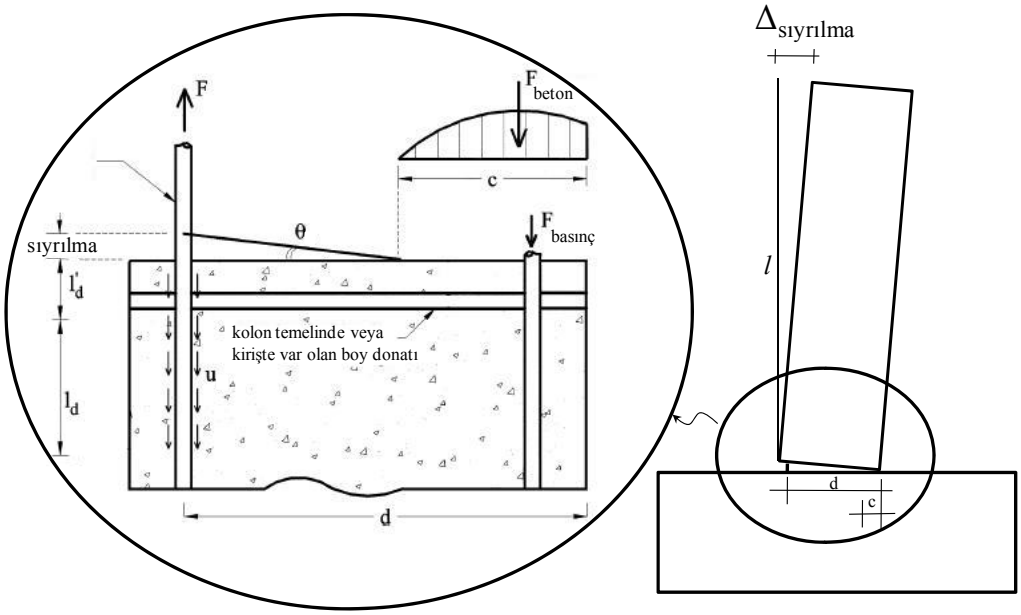
İkinci yaklaşım türü ise, elastik teoride var olan kayma deformasyon denkleminin belirli katsayılarla düzeltilerek kullanımını ön gören, basit yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, bir anlamda kapasite tasarım yöntemi kullanarak kesme etkisinin davranışta baskın olmayacağı ve kesme göçmesinin oluşmayacağı saptanmakta, ihmal edilebilir olan kayma deformasyonları mutlaka hesaba katılacaksa, basit olan ve yaklaşık değer veren bu yöntem seçilmektedir. Betonda çatlak oluşumu sınır durumu belirlemektedir. Çatlama öncesi kayma deplasmanı, elastik teoriye göre denklem 2.22'deki ifade yardımıyla bulunabilir.

$$\Delta_{kayma} = \frac{V\ l}{A_g\ G}\ \text{(mm)} \tag{2.21}$$

Eğilmenin baskın olduğu davranışta, Şekil 2.33'de görüldüğü gibi elde edilecek en büyük ideal dayanımdan önce (P_y), yani ideal doğrusal elastik davranışta, betonun çatlaması ve donatının akması söz konusudur. Bu durumda P_y değerine kadar oluşacak kayma deplasmanları için doğrudan denklem 2.21'in kullanılması doğru değildir. Bununla birlikte eğilme davranışında ortaya konan rijitlik azalması kayma içinde geçerli olduğu varsayımı ve belirli modifikasyonlarla denklem 2.22 türetilmekte, böylece bu bölgedeki kayma deplasmanları hesaplanabilmektedir [50, 61].

$$\Delta_{y,kayma} = \frac{V_y\, l}{0.9 A_g \left(0.4E\right)} \frac{1}{\left(EI_{ef} / EI_g\right)} \text{ (mm)} \tag{2.22}$$

İdeal akma değeri sonrası oluşacak en büyük kayma deplasman miktarı için, denklem 2.22'den elde edilecek değerin (P_u / P_y) değeriyle arttırılması ile yaklaşık hesaplanabileceği önerilmektedir (50).



Şekil 2.38: Kolon tepe noktası, sıyrılma deplasmanı bileşeni

Sıyrılma deplasmanı, yatay yük altında toplam tepe deplasmanını oluşturan önemli bileşenlerden biridir. Hemen belirtmek gerekir ki, buradaki sıyrılma ifadesi, Bölüm 2.2'de betondan tamamen çıkarak göçmeyi ifade etmemektedir. Ayrıca her ne kadar, kelime olarak düşeyde oluşacak deformasyonu tanımlıyor gibi olsa da, düşeyde donatı kaynaklı oluşan deplasmanların, kolon tepe deplasmanına dönüştürülmüş durumunu ifade etmektedir. Donatı üzerinde oluşan sıyrılma, rijit cisim dönmesine sebep olmakta, böylece kolonda yatay tepe deplasmanı oluşmaktadır. Buradaki "sıyrılma" ifadesi oluşabilecek iki hareketi birlikte içermektedir. Eğilme nedeni ile plastik mafsal bölgesinin tabanında oluşacak çatlaklar, donatıların uzamasına ve aderans boyuna bağlı olarak sıyrılmasına neden olacaktır. Donatı uzaması sadece çatlak uzunluğunca sınırlı olmamakta, daha önce Bölüm 2.4.1'de belirtilmiş olan akma/birim deformasyon girişimi ile çatlağa komşu kesitlerde de (özellikle kolon temiz boyu dışındaki) meydana gelmektedir. Aderansla ilişkilendirilebilecek,

donatıya ilişkin bu deformasyonların tümünün etkisiyle oluşan kolon tepe deplasmanı, sıyrılma deplasmanı olarak adlandırılmaktadır [49].

Daha öncede belirtildiği gibi kolon davranışında sıyrılma deplasmanı, toplam tepe deplasmanı içerisinde önemli bir paya sahiptir. Sıyrılma deplasmanının göz ardı edilmesi ile hesaplanacak kolon davranış değerlendirmesinde, tepe deplasman değerleri gerçekte olacaktan az ve kolon rijitliği gerçekte elde edilecek olandan fazla hesaplanacaktır. Şekil 2.38'de kolon tanındaki boy donatılarda oluşacak sıyrılma ile meydana gelen tepe deplasman bileşeninin oluşumu gösterilmektedir [62].

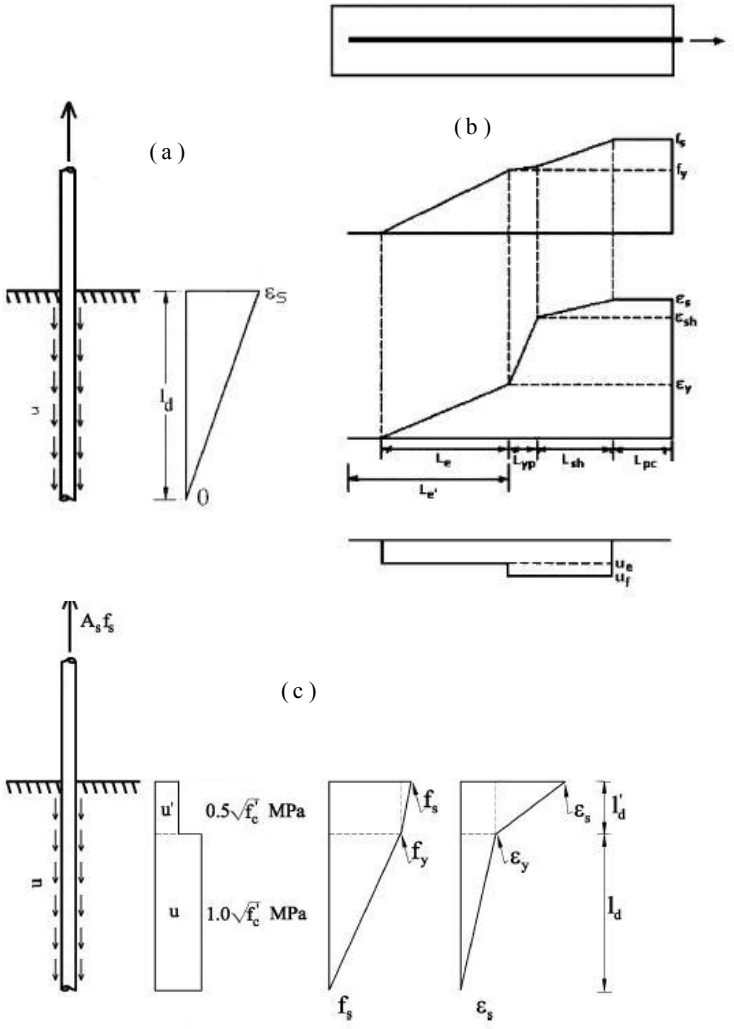
Denklem 2.23 yardımıyla, kolon uç noktasında oluşacak sıyrılma deplasmanları hesaplanabilmektedir. Şekil 2.38'de görülen, boy donatıdaki sıyrılma nedeniyle kolon tabanında oluşan θ açısının hesaplanması gerekmektedir. Bu değeri donatıdaki sıyrılma miktarı belirlemektedir. θ açısı sıyrılma değeri kullanılarak denklem 2.24 yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$\Delta_{\text{siyrilma}} = \theta\, l \ \text{(mm)} \tag{2.23}$$

$$\theta = \frac{\text{siyrilma}}{d - c} \tag{2.24}$$

Donatıdaki sıyrılma değerinin hesabı ile ilgili, günümüze kadar pek çok çalışma yapılmış ve birçok model geliştirilmiştir. Bu modelleri genel olarak aderansa dayalı ve donatıda gerilmesine dayalı olanlar şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Aderans gerilmelerinin, Bölüm 2.2'de anlatıldığı üzere birçok parametreye bağlı olması, aderans-sıyrılma modellerinin genelde daha kompleks olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle yerel bir inceleme alanına sahip bu modeller, genelde davranış modellemelerinde tercih edilmemektedirler. Aderans gerilmesini ortalama bir değer olarak kabul eden ve donatıdaki gerilmelere dayanarak kurulan donatı gerilmesi-sıyrılma modelleri ise genelde daha basit ve modelleme açısından tercih edilen yaklaşımlardır. Aderans gerilmesi gerçeğe daha yakın olarak, aderans boyu uzunluğunca birden fazla kademeli biçimde tanımlanarak bu yaklaşımda kullanılabilmektedir. Alsiwat ve Saatcioglu (1992)'nun geliştirdiği gerilme-sıyrılma modeli, bu yaklaşımın belirgin örneklerinden birini oluşturmaktadır. Bu modelde aderans boyu uzunluğunca, aderans gerilmesi, donatıda oluşan gerilme ve

donatı birim deformasyonları çok kademeli olarak tariflenmiştir (Şekil 2.39 b). Bu modelde, yüklemenin yapıldığı uçta, donatının akma gerilmesini aştığı belirli bir bölgede aderansın bozulduğu, geri kalan kısımda da gerçeğe yakın olduğu düşünülen iki kademeli aderans gerilmesi dağılımı kullanılmaktadır (Şekil 2.39 b) [63].



Şekil 2.39: Donatı gerilmesi-sıyrılma modelleri [62, 63]

Şekil 2.39 a'da donatının elastik davrandığı ve aderans gerilmesinin tamamen düzgün yayıldığı düşüncesiyle oluşturulan elastik model yer almaktadır. Bölüm 2.2.3'deki denklem 2.5 ve denklem 2.6, elastik model düşüncesi sonucu oluşturulmuştur. Aderans gerilmesinin düzgün dağıldığı varsayımıyla bulunan, gerilme aktarımını sağlayan yeterli aderans boyu uzunluğunca, donatıdaki gerilmeler toplanırsa kolon tabanında oluşan çatlaktaki donatı sıyrılma değeri elde edilebilir (Denklem 2.25).

$$\text{siyrilma} = \int_0^{l_d} \varepsilon(x)\,dx = \frac{\varepsilon_s\, l_d}{2} = \frac{f_s\, l_d}{2\, E_s} = \frac{f_s{}^2\, D_b}{8\, E_s\, u}\,(\text{mm}) \tag{2.25}$$

Sezen ve Setzler (2008)'in önerdiği modelde ise, Şekil 2.39 c'de görüldüğü üzere iki düşüncenin, basit olarak birleşimi yer almaktadır. Bu modelde yükleme ucundaki donatının akma değerini aştığı belirli bir bölgede, aderasın bozularak azaldığı, kalan kısımda ise elastik davranış ve düzgün dağılan aderans gerilmesinin varlığı düşünülmektedir. Daha basit bir yaklaşım olan bu modelde sıyrılma ve sınır uzunluk değerleri, denklem 2.26, denklem 2.27 ve denklem 2.28'de yer almaktadır [62].

Eğilme deplasmanı, kolon davranışında tepe deplasmanının en belirleyici bileşenidir. Eğilme deplasmanlarının belirlenmesinde, kesit eğilme davranışını ortaya koyan eğrilik eğimi ifadesi kullanılmaktadır. Yatay yük etkisiyle, kolon boyunca her kesitte oluşan eğrilik eğimlerinin elde edilmesi ve yine kolon boyunca bu eğrilik eğimlerinin toplanması temeline dayanmaktadır. Eğilme deplasmanlarının elde edilme yöntemi Bölüm 2.4.1'de verilmiştir.

$$\text{siyrilma} = \frac{\varepsilon_s \sum l_d}{2} \qquad \varepsilon_s \le \varepsilon_y\,(\text{mm}) \tag{2.26}$$

$$\text{siyrilma} = \frac{\varepsilon_y\, l_d}{2} + \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_y)\, l_d'}{2} \qquad \varepsilon_s > \varepsilon_y\,(\text{mm}) \tag{2.27}$$

$$l_d' = \frac{(f_s - f_y)\, D_b}{4\, u'}\,(\text{mm}) \tag{2.28}$$

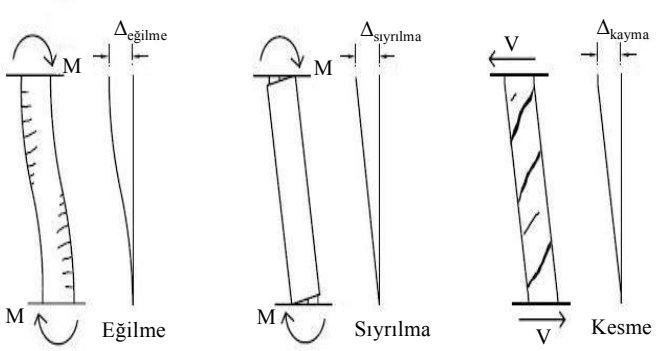
Eğilme deplasmanlarının hesapları, en önemli parametre olan eğrilik eğimlerinin, kolon boyunca toplanması yaklaşımlarına ve bu amaca yönelik plastik mafsal boyu seçimine göre genel olarak ikiye ayrıldığı söylenebilir. Birincisi, plastik mafsal boyunun yük seviyesine göre artarak, elastik bölgeye ilerlemesini temel alan yaklaşımdır [49]. İkincisi ise daha yaklaşık bir hesap mantığı kullanarak eğriliğin, kesit derinliğinin yarısını temel alan plastik mafsal boyunda en büyük değerinde sabit kaldığını öngören yaklaşımdır.

Bu iki yaklaşımda da toplam tepe deplasmanının elde edilebilmesi için, önemli paya

sahip sıyrılma deplasmanlarının da ilave edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte denklem 2.13'de verilen plastik mafsal boyunu kullanan ve belirtilen ikinci tür yaklaşımı benimseyen yöntemde, sıyrılma deplasmanlarının eğilme deplasmanı hesabının içine yaklaşık olarak dahil edildiği görülmektedir [45, 46, 48]. Bu yöntem sayesinde tüm davranış, akma/birim deformasyon girişiminin plastik mafsal boyu içerisine yerleştirilmesi ile tek bir hesaplama ile elde edilebilmektedir. Bu yöntemin, genel kabul gören bir yöntem olarak benimsenmiş olduğu görülmektedir.

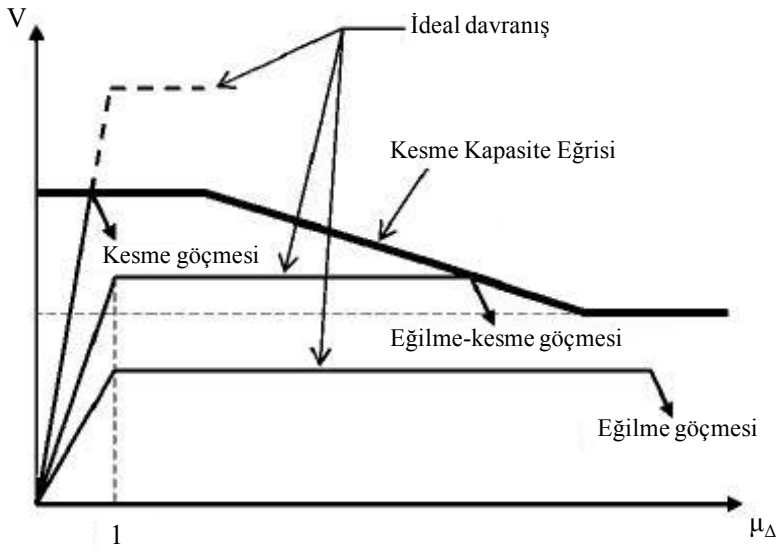
2.4.4. Betonarme kolon davranışı ve davranışı etkileyen faktörler

Şekil 2.40'da, Bölüm 2.4.3'de belirtilen kolon tepe deplasman türlerinin her birine ait, deplasman davranışları ve oluşması muhtemel hasar durumları gösterilmektedir. Bilindiği ve şekilden anlaşıldığı üzere, her bir deformasyon türüne ilişkin, davranışta baskın etkiye göre değişen belirgin çatlak ve hasar mekanizması bulunmaktadır. Eğilme için karakteristik hasar tipi, uçlarda yoğunlaşmış olan, yüke paralel yüzeylerdeki yatay çatlaklardır. Kesme göçmesi durumunda, yaklaşık 45°'lik açı ile yine yüke paralel yüzlerdeki çatlaklar belirgindir. Özellikle bu çatlaklardan, genel olarak alt veya üst uca yakın birinin daha fazla gelişmesi ve açılması ile göçme gerçekleşmektedir. Aderans sıyrılmasında ise genelde, kolonun yüke dik olan alt taban birleşim hattında oluşan çatlağın açılması izlenebilmektedir. Ayrıca aderans sıyrılmasından kaynaklanan hasar ve göçme durumlarında, kolon uç bölgelerinde, özellikle köşelere yakın boy donatılara paralel ve bindirmeli ek durumunda bindirme boyu bitiminde yatay çatlaklara rastlanabilmektedir. Kolonun karakteristik dayanımlarına bağlı olarak, tanımlanan bu üç tür tipik hasar oluşumu, farklı birleşimlerle birbirlerini takip eden biçimde ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 2.40: Kolon deplasman ve hasar tipleri [57]

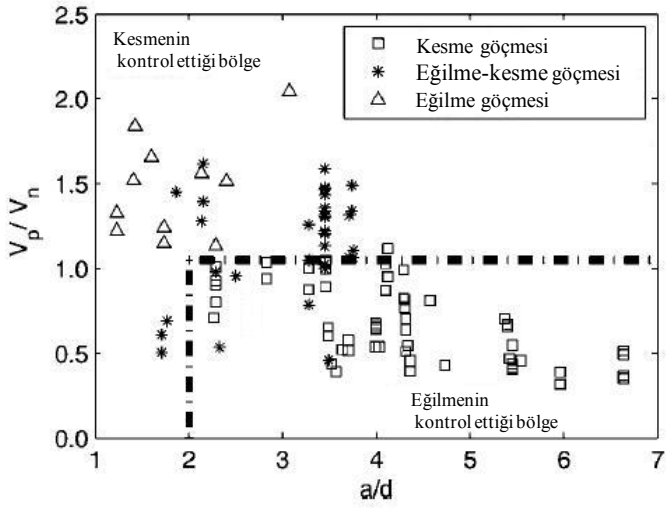
Bir kolonun hasar tipinin, eğilmenin mi, kesmenin mi belirleyeceği sorusunu, plastik kesme talebi (V_p) ile kesme dayanımının (V_n) karşılaştırılması vermektedir. Plastik kesme talebi, Bölüm 2.4.1'de belirtilmiş olan kapasite tasarımı kullanılarak, moment kapasitesinin etkin kesme boyuna oranından elde edilmektedir [64]. Literatür incelendiğinde bu tanımın, deplasman parametresini içermeden çok doğru sonuçlar vermediği görülmektedir. Literatürde, kesme dayanımının artan deplasmanlarla azaldığı sonucu ortaya konulmuştur [36, 45, 59-61, 64]. Şekil 2.41'de genel biçimde gösterilen kesme-süneklik ilişkisi, günümüzde birçok şartnamede yer almaktadır. Şekil 2.41'de gösterilen kolon ideal davranışlarında, aderans davranışının ideal ve tam olduğu varsayımı bulunmaktadır.



Şekil 2.41: Göçme türünü belirleyen kesme-süneklik ilişkisi

Kesme davranışı sadece süneklik parametresi ile değişmemektedir. Etkin kesme boyu oranı olarak tanımlanabilen, yük ile mesnet arası uzaklığın (a) yüke paralel kesit boyuna (d) oranı, betonarme elemanların kesme davranışını belirleyen ve davranışı sınıflandırmada kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bilindiği gibi etkin kesme boyu oranı 2'den küçük olduğu durumlarda, kesmenin kontrolünde bir davranış ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede davranış, daha çok kesme türü göçme ile sonlanmakta ise de eğilme-kesme türü göçme ile de karşılaşılabilmektedir. Etkin kesme boyu oranının 4'den büyük olduğu elemanlarda, eğilme baskın bir davranış görülmektedir. Bu değerin 2 ile 4 arasında değiştiği betonarme elemanlarda, diğer

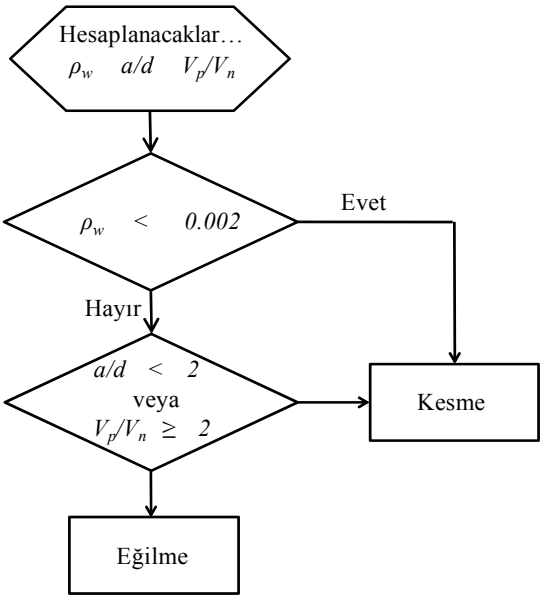
değişkenlerin de etkisi ile büyük oranda etkileşimli bir davranış söz konusudur. Bu bölgede yaşanacak göçme davranışı, her üç türde de olabilmektedir. Genel olarak verilen sınır değerlere yaklaştıkça, sınır değeri kontrol eden göçme türünün ağırlık kazandığı söylenebilir. Şekil 2.42'de görüldüğü üzere, yapılan kolon deneylerinin sonuçlarına göre, kesme kapasitesinin kesme talebinin iki katı olduğu kolonlarda bile, etkin kesme boyu oranının 2'nin altında olması durumunda kesmenin davranışa dahil olduğu, eğilme-kesme türü göçme yaşanmaktadır. Ayrıca Şekil 2.42'deki kolon deney sonuçlarının işlendiği grafikten, plastik kesme talebi olarak tanımlanan kapasite tasarım kesme değerinin, beton ve sargılama donatısının sağladığı kesme dayanımının üstünde olduğu durumda kesmenin davranışta etkili olduğu görülmektedir. Bu gibi durumlarda yaşanan göçme tipi kesme göçmesi veya eğilme hasarı ile başlayan eğilme kesme göçmesi olmaktadır[64].



Şekil 2.42: Etkin kesme boyu oranının kolon davranışına etkisi [64]

Davranışın kesme veya eğilmenin kontrolünde olmasını belirleyen bir başka faktör, kolonlardaki sargılama donatısıdır. Sezen ve Moehle (2006) a/d=6.4 olan ve yetersiz etriye bulunduran kolonlarla yaptıkları testlerde, çevrimsel yük etkisi altında elemanların, eğilme kapasitesine ulaştıktan sonra kesme hasarı ile dayanımlarını yitirdiklerini görmüşlerdir. Eksenel yük oranı düşük olan kolonlarda düşey yük taşıma kapasitesi kaybının, eksenel yük kapasitesine ulaşıldığı deplasman değerinin ötesinde gerçekleştiği belirtilmiştir. Boy donatıların sürekli ve kesite oranının 0.025'dir. Etriye olarak 10'mm çapında donatı, sekiz boy donatının tümü desteklenecek biçimde içi içe, 305'mm aralıkla ve uçları 90° kıvrılarak

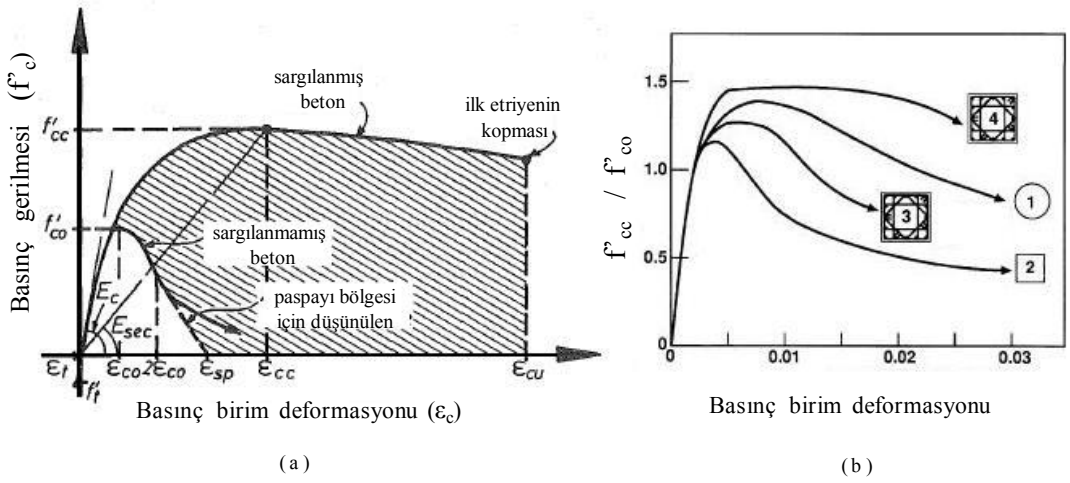
yerleştirilmiştir. Ayrıca eksenel yük kapasitelerinin %15'i ile %60'ı arasında eksenel yük uygulanan bu kolonlardan yüksek eksenel yük altında test edilende, eğilme kapasitesine ulaşılamadan kesme göçmesinin yaşandığı, hemen ardından düşey yük taşıma kapasitesinin de yitirildiği bildirilmektedir [58]. Görülmektedir ki a/d oranı ile birlikte sargılama donatısı da göçme tipini belirleyen önemli bir parametre olarak orta çıkmaktadır. Kolonların kesme göçmesi mi, eğilme göçmesi mi yaşayacaklarının sorusuna cevap olarak, Şekil 2.43'te verilen yönlendirme şeması önerilmiştir. Belirtildiği gibi bu öneride hem a/d değişkeni, hem de sargılama donatısı miktarı yer almaktadır. Öneri aynı zamanda, plastik kesme talebi ile kesme dayanımını da karşılaştırılmasını içermektedir [64].



Şekil 2.43: Kesme veya eğilme göçmesinin belirlenmesi için yönlendirme şeması [64]

Yatay yükleme durumunda salt kesme göçmesi ile karşılaşmayan kolonlar, plastik deplasman talebi ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu tip bir etki altındaki kolonun dayanımını belirleyen ve ayakta kalabilmesini sağlayan, deformasyon yapabilme kabiliyetidir. Betonun karakteristik özelliklerini kaybetmeden gerekli deformasyonları yapabilmesi için temel şartlardan biri, betonun ve donatının yükleme süresince yeterli davranışı sağlayarak, uygun betonarme davranışını sergileyebilmesidir. Bunun için betonun yükleme süresince dağılmadan dayanımını koruyabilmesi ve donatıların tasarım konumlarında kalarak betonla uyum içinde çalışması gereklidir. Bilindiği üzere beton gevrek bir malzemedir. Basınç altındaki betonun davranışı, miktar ve düzenine bağlı olarak

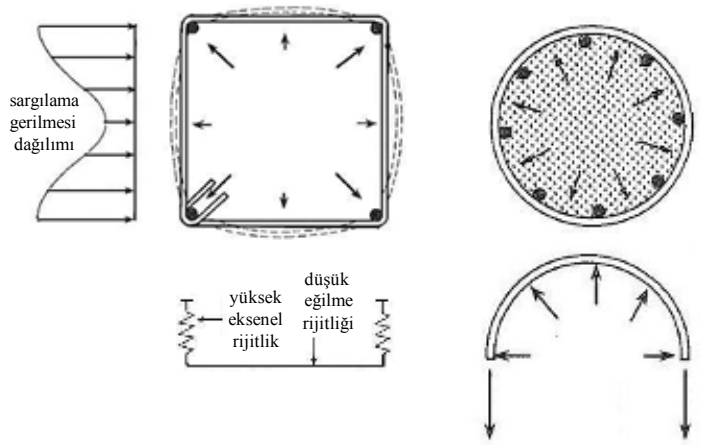
konulacak etriye ile geliştirilebilmektedir. Betonarme bir kesitte sargılama donatısı ile beton basınç dayanımının arttığı, ulaşılan bu noktadaki birim şekil değiştirmenin büyüdüğü ve ulaşılan en büyük dayanımdan sonraki düşüş davranışının iyileştirildiği, günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından ispatlanmış ve modellenmiştir [65-67]. Şekil 2.44 a'da, sargılı ve sargısız betona ait eksenel yük-birim deformasyon davranışı görülmektedir. Grafikteki bton davranış modeli, hem dairesel hem de kare ve dikdörtgen kesitler için aynı denklemle hesaplama imkanı sunan ve günümüzde yaygın olarak kullanılan, Mander (ve diğ. 1988) modeli olarak bilinmektedir [65]. Grafikte görüldüğü gibi sargılamanın etkinliğini kaybettiği nokta olarak, ilk etriyenin koptuğu nokta kullanılmaktadır. Sayısal olarak tipik sargılama değerleri ile en büyük beton birim deformasyonunun 0.02-0.08 aralığına, basınç dayanımının da yaklaşık iki katına çıkartılabildiği literatürde belirtilmektedir [47].



Şekil 2.44: Sargılanmış beton davranışı [65, 68]

Şekil 2.44 b'de ise değişik kesit ve sargılama donatısı oranlarında beton basınç davranışının değişimi yer almaktadır. Bu grafikteki örneklerde 1 ve 2'de boy donatı bulunmamaktadır. Aynı boy donatı miktarı ve sargı donatısı düzenine sahip 3 ve 4 numaralı örnekler için, 4 numaralı elemanda etriye aralığı, 3 numaralı numunedeki etriye aralığının yaklaşık 1/4'ü olarak uygulanmıştır. Grafikten, yaygın olarak bilinen, sargılama donatısının işlerliğinin dairesel kesitlerde daha etkin olduğu gerçeği görülmektedir. 3 ile 4 numaralı elemanların karşılaştırılmasından ise etriye aralığının azaltılması ile davranışın, daha sünek hale geldiği anlaşılmaktadır. Tüm örneklerde sargılama donatısı oranları, yaklaşık olarak aynıdır [68].

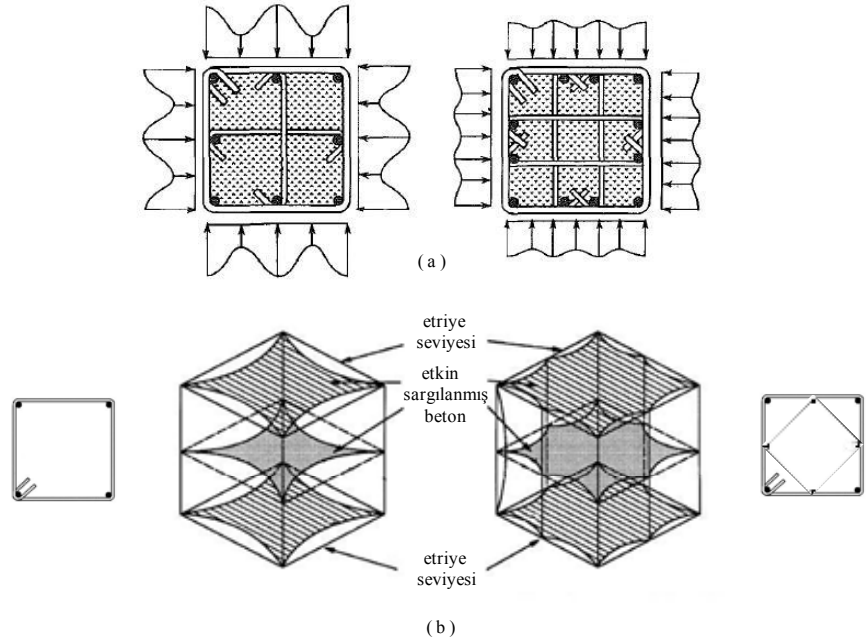
Şekil 2.45'de sargılama donatısının, kare ve dairesel kesitlerde çalışma mekanizması görülmektedir. Sargılama gerilmelerinin oluşumu, temelde etki tepki mekanizması ile sağlanmaktadır. Artan yük altında beton, kesit düzleminde merkezden dışa yani yanlara doğu genişlemeye çalışmaktadır. Bu genişleme hareketi sırasında kesit çevresine yerleştirilen etriye, kendi düzleminde, kesit merkezinden dışa doğru oluşan etkiye karşı ters yönlü tepki gerilmeleri, bilinen adıyla sargılama gerilmeleri oluşturmaktadır. Dairesel sargılama genellikle donatının, kesit çevresine kolon boyunca, belirli adım aralığı ile sürekli olarak sarılmasıyla oluşturulmaktadır. Fret adı da verilen bu uygulamada, betonun dışa doğru şişme eğiliminin neticesinde, dairesel geometriden dolayı sargılama donatısı üzerinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu tepki sonucu kesit üzerinde sargılama gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Dairesel uygulamada sargılama donatısı tarafından, tüm beton yüzey üzerinde eşit ve yüzeye dik bir sargılama gerilmesi oluşmaktadır (Şekil 2.45).



Şekil 2.45: Kare ve dairesel kesitlerde sargılama donatısının etkinliği [66]

Kare kesitlerdeki sargılama donatısı uygulamalarında ise durum biraz daha karmaşıktır. Sargılama donatısı geometrisi köşeli olduğundan dolayı, betonun şişmesi ile etriye üzerinde oluşan etki sonucunda bu donatıda meydana gelen davranış ve oluşturulan tepki sargılama gerilmeleri, bölgesel olarak farklılık göstermektedir. Dairesel etriyede olduğu gibi sargılama donatısındaki temel tepki davranışı çekme gerilmeleri şeklinde olsa da, verilen karşılık köşelerde ve kenarlarda çeşitlenmektedir. Kesitin bir kenarı düşünüldüğünde, betonun genişlemesine karşı köşelerdeki sınırlayıcı tepki kuvveti, etriyenin diğer yöndeki kollarının sınırlayıcı etkisiyle oluşmaktadır. Bu etkide belirleyici olan sargılama donatısının eksenel

çekme rijitliğidir. Köşelerin ortasında kalan bölgede ise betonun şişmesine karşı sınırlayıcı etki, köşe noktalar arasında kalan sargılama donatısının, eksenel rijitliğine göre daha az olan eğilme rijitliği ile ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede eksenel rijitliğin etkin olamamasının nedeni, etriye üzerinde, beton tarafından kendine dik uygulanan kuvvet ile eğilme etkisinin oluşmasıdır. Buna göre kare kesitlerde etriye ile oluşturulabilen sargılama gerilmeleri, kesitin kenarı boyunca Şekil 2.45'te görüldüğü gibi farklılık göstermektedir [66]. Şekil 2.46 a'daki gibi çiroz kullanımı veya iç içe kapalı etriye kullanımı, belirtilen bu farklılığı ortadan kaldırmak ve nispeten kesit çevresinde düzgün dağılmış sargılama gerilmeleri oluşturmak için uygulanan yöntemlerdir.



Şekil 2.46: Etriye kullanılan kare kesitlerde sargılama gerilmesi dağılımı [66, 68]

Beton üzerinde oluşacak sargılama gerilmeleri dağılımı, aynı zamanda etriyelerin aralığı ile de doğrudan ilişkilidir. Aralık büyüdükçe, iki etriye arasında sargılama gerilmelerinin etkinliği azalmaktadır. Şekil 2.46 'de sargılama gerilmeleri dağılımında oluşan farklılık, düşeyde ve yatayda olmak üzere görülebilmektedir [68].

Sargılama donatısı klasik betonarme tasarım hesaplarında, kesme donatısı olarak kullanılmaktadır. Günümüze dek yaşanılan depremler ve laboratuar deneylerinden görülmüştür ki, yatay deplasman ile sargılama donatısı arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Yeterli miktarda sargılama donatısı, belirtilen mekanizmanın

etkinliği ile yük altında betonun dağılmasını ve ezilmesini önleyerek, kolon rijitliğindeki ve dayanımındaki düşüşleri engellemekte ve plastik deformasyon kabiliyetini arttırmaktadır [49].

Deplasmana dayalı hesaplamalarda yeterli etriye miktarının bulunması için, plastik mafsal bölgesi dönmesini kullanarak, en büyük eğrilik eğimine geçilmesi, eğrilik eğiminden de kesit basınç birim deformasyonunun elde edilmesi önerilmektedir. Basınç birim deformasyonu ile etriye oranı arasındaki ilişkiden gerekli sargılama donatısının belirlenebileceği belirtilmektedir [45].

Bununla birlikte uygun aralıklarla yerleştirilmiş kolon sargılama donatısı, plastik mafsal bölgesinde görülmesi muhtemel, boy donatı burkulmasını da engellemektedir. Kolon plastik mafsal bölgesinde görülebilecek boy donatı burkulmalarının engellenebilmesi amacıyla, bu bölgedeki etriye aralıklarının, boy donatının 6 katını aşmaması tavsiye edilmektedir [45, 47].

Priestley ve Park (1987) kolonların, sargılama donatısı varlığı ile artan eksenel yük değerlerinde, hesaplanan moment kapasitelerinden daha fazla kapasite değerlerine ulaştıklarını belirtmektedirler [47]. Sakai ve Sheikh (1989), bu artışın var olduğunu fakat Priestley ve Park'ın belirttiği kadar yüksek olabilmesi için sargılama donatısının oldukça fazla ve düzgün dağılmış olmasının gerekliliğini belirtmiştir [67]. Araştırmacılar, elde ettikleri artış değerleri farklı olmakla birlikte bu artışı, sargılama etkisi ile betondaki dayanım ve birim deformasyon gelişimine ve donatıların pekleşme bölgesine geçmesine bağlamaktadırlar. Ayrıca eksenel yük değerinin artışı ile kesit tarafsız eksen büyümekte, eğilme davranışı daha fazla betona bağlı hale gelmektedir. Dolayısı ile gevrek beton davranışının sargılama donatısıyla geliştirilerek kontrol altında tutulması, eksenel yük oranı fazla kolonlarda, sünek davranış için oldukça önemli hale gelmektedir.

Lam ve diğ (2003) yaptıkları çalışmada, etriye oranının 0.001'den 0.003'e çıkartılması ile tepe noktası deplasman kapasitesinin %100 arttığını belirtmektedirler [69]. Bu çalışmada eksenel yük oranı %40 ile %60 arasında ve etkin kesme boyu 1.5 ile 3 arasında değişmektedir. Kullanılan etriyelerin uçlarının 90° olacak biçimde bırakılması durumunda, belirtilen etkinin oldukça düştüğü kaydedilmiştir [69].

Benzer biçimde, özellikle süneklik hedeflenen durumlarda etriye uçlarının sargılanmış beton gövdeye, 135° ile gömülmesi gerekliliği birçok kaynakta tekrarlanmaktadır [47, 68]. Sheikh ve Khoury (1993) yaptıkları çalışmada, uçları 135° bükülmüş çevresel etriyenin yanında, kesitin kenar ortasındaki boy donatıların, bir ucu 90° olan çirozlarla desteklendiği kolonlarda gevrek bir davranış sergilendiğini ortaya koymuşlardır [70]. Eksenel yük oranı %60 ve üstü olan kolonlarda, sadece çevresel etriye kullanımı ile buna ilave olarak belirtilen türde çirozların kullanımı sonucunda elde edilen moment kapasitelerinde belirgin bir farkın olmadığı belirtilmiştir. Çirozların varlığı belirli bir deplasmana kadar ulaşılan kapasitenin korunmasın sağlamaktaysa da, bu değerin ardından çok ani dayanım kaybına ve göçmeye izin vermektedir. Tüm donatıların kapalı, iç içe etriyelerle desteklenmesi durumunda hem önemli dayanım kazancı elde edilmekte, hem de süneklikte ciddi artış sağlanmaktadır. Ayrıca eksenel yük oranındaki %60'tan %77'ye olacak şekilde bir artışın, eğrilik eğimi sünekliğini %45 oranında azalttığı da bildirilmektedir. Buna göre eksenel yük oranına bağlı sargılama donatısı miktarı belirlenmesi veya eksenel yük seviyesinin sınırlandırılması tavsiye edilmiştir.

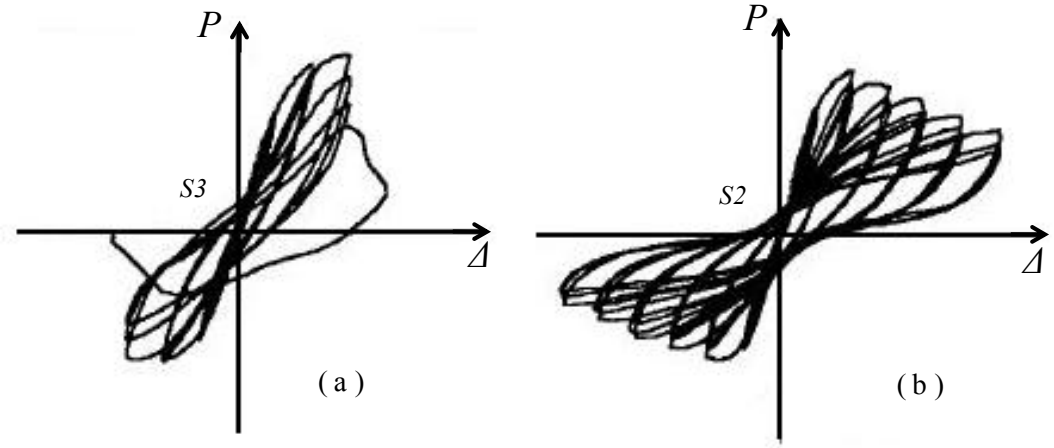
Kolonlar üzerinde uygulanan düşey eksenel yük, kolon tasarımını ve davranışını etkileyen diğer bir önemli faktördür. Eksenel yük seviyesi, büzülmenin, P-Δ olarak tanımlanan ikinci mertebe etkilerinin ve betonun sahip olduğu gevrek davranışın olumsuz etkilerini sınırlandırmak amacıyla, belirli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu sınırlandırma genel olarak tüm şartnamelerde yer alırken, TS 500'de eksenel yük kapasitesinin %60'ı, DBYBHY 2007'de %50'si olarak tanımlanmaktadır [1, 18]. Betonarme yapılarda, kolonlar üzerinde bulunan eksenel yük seviyesi, yapı türüne ve kolonun konumuna göre çeşitlilik göstermektedir. Köprü kolonları, betonarme konut türü yapıların belirli bir kat seviyesinin üzerinde kalan kolonları ve bazı önüretim tekniğiyle imal edilmiş prefabrik yapıların kolonlarında eksenel yük seviyesinin, kolon eksenel yük kapasitesinin %5'i ile %15'i arasında olduğu söylenebilir. Betonarme konut türü yapılarında ise bu değerin, kat seviyesine bağlı olarak %20 ile %50 arasında olduğu öngörülebilir.

Eksenel yük artışı durumunda kesme dayanımının arttığı genel olarak bilinmektedir. Agrega kenetlenmesi üzerinde eksenel yük etkisini temel alan bu artış, genelde

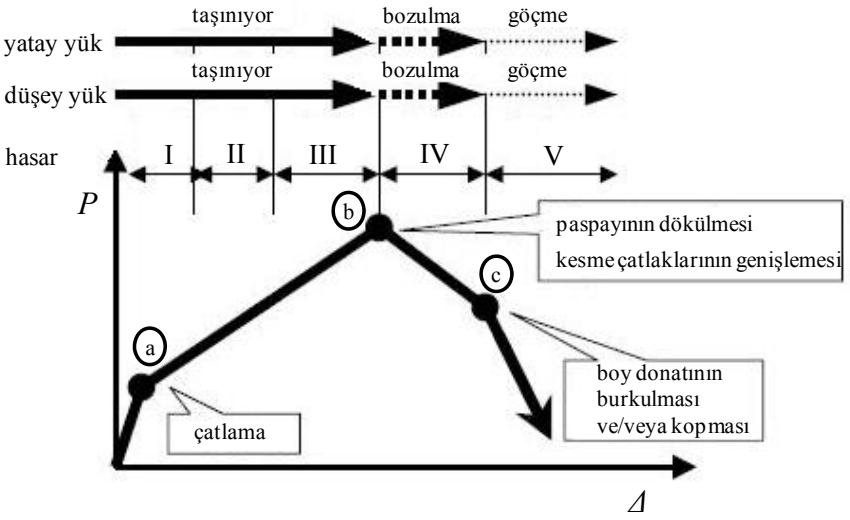
kesme dayanımının beton katkısı parçasında hesaplara dahil edilmektedir. Bununla birlikte eksenel yükün, kesit boyutlarına ve kolon boyuna bağlı olarak kesme kuvvetini arttırdığı bazı kaynaklarda belirtilmektedir (47, 71). Anlaşılmaktadır ki Şekil 2.41'deki kesme-süneklik ilişkisini belirleyen eğilim ve sünekliğe bağlı olarak azalan kesme dayanım değeri, eksenel yükün artmasıyla daha yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu da eğilme kapasitesine ulaşıp sonrasında kesme-eğilme türü göçme ile karşılaşacak kolonlarda, eksenel yük değerindeki belirli artışın, kısmen sünek bir kesme davranışına neden olacağını ortaya çıkartmaktadır. Bununla birlikte eksenel yük taşıma gücüne erişilen bir göçmenin olmaması, her durumda garantilenmelidir. Ayrıca süneklik ön planda olan tasarımlarda, daha önce belirtildiği gibi sargılama donatısı miktarının, eksenel yük seviyesi göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Zahn ve diğ. (1986) yaptıkları çalışmada, iyi sargılanmış kolonların, % 40'ın altındaki eksenel yük oranındaki değişimlerin, kolon davranışında önemli değişikliğe sebep olmadığını belirtmektedirler. Yüksek eksenel yük oranına göre sargılama donatısı yerleştirilmiş olan kare kolonların, %20 ve %40 eksenel yük oranlarında benzer davranış ve dayanım değerlerini sergiledikleri ifade edilmektedir [72].

Yeni Zelanda Canterbury Üniversitesinde, Park ve Priestley danışmanlığında yapılmış çalışmalarda (Gill ve diğ. 1979, Potangaroa ve diğ. 1979), eksenel yük oranındaki artışın, kolon plastik uç bölgesinin uzamasına sebep olduğu, bu durumda sargılama bölgesinin daha uzun tutulmasının gerektiği belirtilmiştir. N/N_0 oranının 0.35'den büyük olan ve etriye sıklaştırması için plastik uç bölgesinin, yükleme doğrultusundaki kesit boyutu olarak seçildiği bu kolonlarda göçmenin, etriye sıklaştırmasının hemen üstünde ve kesme-eğilme türünde olduğu görülmüştür [72]. Eksenel yük değeri $N/N_0 \leq 0.3$ (~0.35) olan kolonlarda kolon uç bölgesi uzunluğunun, yükleme yönündeki kesit boyutu veya momentin en büyük moment değerinin %80'ine ulaştığı nokta devamındaki kısmın boyu uzunluklarından, büyük olanı kullanılacak şekilde seçilmesi tavsiye edilmektedir. $N/N_0 \geq 0.3$ (~0.35) olan kolonlarda ise tanımlanan bu boyun %50 arttırılması önerilmektedir [45, 72]. Zahn ve diğ. (1986), hesaplarda kullanılan plastik mafsal boyu için, $N/N_0 \geq 0.3$ değerini sınır değer olarak alan ve bu değerin altındaki eksenel yük oranlarında azalma eğiliminde olan bir tanımlama önermişlerdir [72].

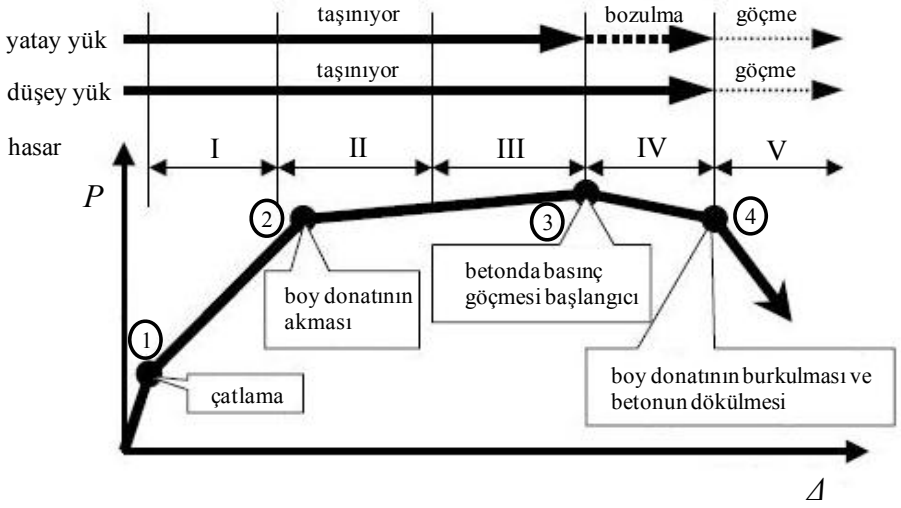
Kolona etkiyecek dinamik yükün oluşturduğu etkiler, enerji formunda düşünüldüğünde, gelen enerjinin, kinetik enerji, sönümlenme enerjisi, elastik ve çevrimsel deplasman enerjisi formlarına dönüştüğü bilinmektedir. Kinetik enerji ve elastik enerji dinamik etkinin sonunda kaybolduğu için, gelen enerjinin sönümlenme ve çevrimsel deplasman enerjisi ile tüketildiği ortaya çıkmaktadır [45]. Buna göre kolon davranışında çevrimsel deformasyon eğrilerinin içerisinde kalan alanlar, kolonların yatay yük altında enerji tüketebilme kabiliyetlerini büyük oranda belirlemektedir. Aynı zamanda bu gösterge, gelen enerjinin form değiştirme göstergesi olan hasar oluşum düzeyini de belirlemektedir. Genel olarak büyük alana sahip, simetriğe yakın yük deplasman grafikleri için, enerji yutabilen ve kalıcı hasar alarak yüke dayanan, eğilme etkisindeki elemanlara ait olduğu söylenebilir. Şekil 2.32'de, eğilme, kesme ve her iki etkinin birlikte baskın olduğu kolon davranışları verilmiştir. Şekil 2.47'de kesme göçmesi (a) ve bindirmeli donatı ekindeki bozulmanın (b) kolon davranışı üzerindeki etkileri görülmektedir [73]. Şekil 2.32 ve Şekil 2.47'deki grafiklerden görüldüğü gibi kesme etkinliğindeki veya bindirmeli ek bozulmasının görüldüğü kolon davranışlarında, dayanım ve rijitlikte ani azalmalar yaşanmaktadır. Ayrıca çevrimsel deformasyon grafiklerinde, orta bölgenin daralması yani çevrim sıkışması meydana gelmektedir. Böylece kolonun enerji yutma kapasitesi önemli ölçüde azalmaktadır.



Şekil 2.47: (a) Kesme etkisinin ve (b) donatı bindirme bölgesindeki bozulmanın kolon davranışına etkileri [73]



(a) gevrek betonarme eleman davranışı



(b) sünek betonarme eleman davranışı

Şekil 2.48: Kesme ve eğilme etkisinde kolon davranışı [75]

Yatay yük etkisi altında kolon davranışı temel olarak kesme ve eğilme baskınlığına göre tarif edilmekte, davranışı belirleyen temel hasar göstergeleri yük deplasman eğrisi üzerinde baskın olan etkiye göre konumlandırılabilmektedir. Literatürdeki çalışmalardan, deneyler sırasında elde edilen veriler ışığında kolon davranışı, çeşitli durumlar için ortaya konulmuş durumdadır [45, 56-58, 64, 69, 71, 73-75]. Şekil 2.48'deki grafiklerde, JBDPA tarafından hazırlanan, genel davranışı veren yük deplasman grafikleri ve davranışın değiştiği sınır durumlar görülmektedir [75].

1 ve a noktalarında beton çatlama dayanımı aşılmakta ve betonda çatlaklar meydana gelmektedir. Bu noktada elemanın başlangıç rijitliği, daha önce belirtildiği gibi değişmektedir. I nolu bölgede kılcal görsel olarak kılcal çatlaklar izlenmektedir.

Hem kesme hem de eğilme baskın davranışta aynı olan bu durum için çatlak genişlikleri, genelde 0.2 mm'den küçük olmaktadır. Artan yük seviyesi ve çevrim sayısı ile çatlak aralıkları azalmakta, çatlak sayısı artmaktadır. Eğilmenin etkili olduğu davranışta 2 noktasına yani boy donatıların aktığı deplasman değerine kadar bu çatlaklarda aşırı değişim ve genişleme gözlenmemektedir.

Kesme etkin davranışta b noktası, yani eleman dayanımına ulaşıldığı noktada, kesme çatlaklarının aşırı büyüdüğü ve yer yer paspayının döküldüğü görülür. Kesme davranışında bu noktaya kadar iki gözlemsel hasar evresinden söz edilebilir. Kesme dayanımının yaklaşık %60'ına kadar olan, II ile gösterilen bölgede 1 mm genişlikte çatlaklar görülmektedir. Kesme dayanımına kadar olan III nolu bölgede ise 1-2 mm genişliğinde belirgin çatlaklar meydana gelmekte ve kısmen betonda dökülmeler ile karşılaşılmaktadır. Kesme dayanımına ulaşılmasının ardından, yatay ve düşey yük taşıma kabiliyetinde bozulma başlamakta, özellikle sargılama donatısı miktarına ve eksenel yük değerine bağlı olarak göçme davranışı belirlenmektedir. Ulaşılan kesme dayanımından sonra davranışı belirleyici görsel hasar, grafikte c ile gösterilen ve genellikle boy donatının burkulması veya kopması ile sonuçlanan durumdur. Bu iki nokta (b ve c) arasındaki deplasman bölgesi olan IV numaralı hasar bölgesinde, bir çok aşırı genişlikte çatlak (>2 mm) görülmektedir. Aynı zamanda bazı bölgelerde paspayının hemen hemen tümü, dökülmüş durumdadır. C ile temsil edilen deplasmandan sonrası göçme bölgesi olarak tanımlanmaktadır. V ile gösterilen bu bölgede yatay yük taşıma kabiliyeti kaybedilmekte, bazı durumlarda bunu izleyen adımlarda düşey yük taşıma kapasitesi de ortadan kalkarak, kolonun özellikle uç bölgesinin dağıldığı gözlemlenebilmektedir. Bu deplasman bölgesinde, kolon üzerinde hasarın yığıldığı kısımlarda paspayının dökülmesi ile açığa çıkan donatılarda burkulma ve/veya kopma meydana gelmektedir. Sargılama donatısının fazla olduğu durumlarda genelde eksenel yük taşıma gücü kaybı oldukça az olmakta, etriye aralıklarının sık olduğu kolonlarda bölgenin uzadığı ve göreceli sünek bir kesme davranışının yaşandığı bilinmektedir.

Eğilmenin etkin, yani kesme dayanımının plastik kesme talebinden fazla olduğu kolonlarda, boy donatının akması (2) ile belirgin hasar oluşumu başlar. Genel olarak, akma deplasmanına (2) ulaşıldıktan sonra, kolon yüksekliğinin ilk 20-30 cm'lik

bölümündeki ve etriye seviyelerindeki çatlaklar stabil hale gelmekte ve daha sonraki davranışta bu çataklar gelişmektedir. Betonda basınç göçmesinin başladığı, en büyük yük değerine kadar (3) çatlaklar genişlemekte, kolonun çekmeye maruz yüzünde 2 mm'ye varan çatlaklar görülmektedir. Betonda kısmi paspayı dökülmeleri izlenebilir. Genel olarak boy donatısı az olan kolonlarda, çatlak genişliklerinin daha fazla olduğu, sargılama donatısının yoğun olduğu kolonlarda ise paspayının dökülmesinin daha belirgin hale geldiği bilinmektedir. Bu noktaya kadar yatay yükte ve eksenel yükte kayda değer bir kayıp görülmez. En büyük taşıma gücüne erişildikten sonra davranışın değiştiği durum, özellikle plastik mafsal bölgesi olan kolon uç bölgelerinde paspayının döküldüğü ve donatıların burkulmaya başladığı noktadır (4). IV ile belirtilen bu deplasman aralığında, dökülmeden önce 2mm'den büyük çatlak genişlikleri ve kısmi paspayı dökülmeleri ile karşılaşılır. Betonun dökülmesi genellikle kısmi biçimde, alt uçtaki plastik mafsal bölgesinde başlamakta, dökülme paspayında çevresel ve düşey olarak yayılmakta ve ardından iç bölgede görülmektedir. En büyük dayanım değerinden sonra yatay yük taşıma kabiliyeti bozulmakta, düşey yük taşıma kapasitesi ise genelde korunmaktadır. 4 ile temsil edilen bu noktadan sonra, içerideki betonda ezilme ve parçalanma hızlanmaktadır. Donatı burkulması genel olarak her iki yük seviyesiyle ve etriye miktarı ile ilişkilidir. Çoğu durumda, özellikle etriye aralığına bağlı olarak birden fazla etriye aralığı uzunluğunda boy donatı burkulmasına rastlanmaktadır. Burkulma sırasında etriyeler daha fazla uzamakta ve etriye donatısının kopması veya uçlarının, sınırlandırılma durumlarına göre açılması söz konusu olabilmektedir. Bunun sonucunda ise yeni boy donatısı burkulmaları meydana gelmektedir. Etriyelerin kopması ile eleman rijitliği ani ve hızlı olarak azalmaktadır. Donatıların burkulmasının ardından, boy donatılarında kopma ile karşılaşılabilmektedir. V numaralı bölge, göçme bölgesi olarak tanımlanmakta, yatay yük ve düşey yük taşıma kabiliyeti hızla düşmektedir.

Var olan sargılama donatısının miktarı, aralığı ve eksenel yük değeri, yüke paralel yüzde, çekme tarafında yatay olarak başlayan çatlakların, ilerleme açısını belirlemektedir. Buna göre iki etkin birleştiği kesme-eğilme davranışı ortaya çıkabilmektedir. Kesme kapasitesin, kesme talebinin üzerinde fakat birbirine yakın olduğu veya artan deplasmanlarla düşen kesme kapasitesinin, kesme talebi ile karşılaştığı durumlarda kesme-eğilme ortak davranışı görülmektedir. Bu davranışta

Şekil 2.48 a'daki b noktasından sonraki süreç, Şekil 2.48 b'deki boy donatı akmasını gösteren 2 numaralı noktadan sonra gerçekleşmektedir.

Burada belirtilen kolon davranışlarında, boy donatıların sürekli olduğu veya donatı bindirme boyunun, akma dayanımına ulaşılmasını ve sonrasında uygun davranış sergilenmesini sağlayacak uzunlukta olduğu akıldan çıkartılmamalıdır.

2.4.5. Betonarme kolon davranışı ve bindirmeli ekler

Araştırmacılar ve tasarım mühendisleri, depreme dayanıklı betonarme yapı tasarımındaki en zayıf halkalardan birinin, aderansın ve bindirmeli ek dayanımının bozulması olarak görmektedirler [76, 77]. Bu yüzden, daha önce de belirtildiği gibi betonarme yapının oluşturulmasında kaçınılmaz olan donatıların eklenmesi işleminin yapılacağı yer büyük önem kazanmaktadır. Kolonlar, yatay yük etkisinde yapının ayakta kalmasını sağlayan en önemli bileşenlerden biri olduğu için, bu zayıf halkanın kolonlardaki yeri konusunda bitmeyen bir ikilem yaşanmaktadır. Davranış ile imalat pratikliği arasındaki öncelik, bu ikilemin çıkış noktasını oluşturmaktadır. Betonarme yapı üretimi kat bazında yapıldığı için kolonlarda donatı ekleme işlemi, kat seviyesinin hemen üzerinde gerçekleştirilmektedir. Yatay yük etkisinde bu bölgeler, en büyük momente maruz kanal ve en çok zorlanan noktalar olduğundan dolayı, davranış açısından donatı ekleme işleminin, momentin en az olduğu bölgede yani kolon orta kısımlarında yapılması daha uygundur. Bununla birlikte kolon ortasında yapılan donatı ekleme uygulaması, yapı imalatı açısından sıkıntı oluşturmaktadır.

Depreme dayanıklı yapı tasarım ilkeleri, kuvvetli kolon-zayıf kiriş kuralı ve sünek tasarım felsefesi, betonarme bir yapıda yatay yük etkisi altında plastik mafsalların kirişlerde oluşmasını hedeflemektedir. Bu düşünce etkisinde kolonlarda plastik mafsal oluşumunun, sınırlı sayıda ve çok ileri deplasman düzeylerinde gerçekleşeceği öngörülmektedir. Böylece yük etkisindeki betonarme yapılarda, kurgulanan dayanım hiyerarşisi içinde, enerji yutmayı sağlayacak belirgin hasar bölgeleri olan plastik mafsalların, kolonların akmasından önce kirişlerde oluşacağı tezi, depreme dayanıklı yapı tasarımının temel noktalarından biri haline gelmektedir.

Belirtilen mafsal oluşum sıralaması gözetilmeden tasarlanmış veya imalatındaki hatalardan dolayı bu sıralamanın ortaya çıkamadığı yapılarda, kolonlarda plastik

mafsal oluşumu, yük altında yapı davranışının ilk evrelerinde ortaya çıkabilmektedir. Kolon plastik mafsal bölgelerinde donatı eklemesinin yapılması, yapının enerji yutmasını ve göçmeden gerekli deformasyonların yapılabilmesini sağlayacak mafsal davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.

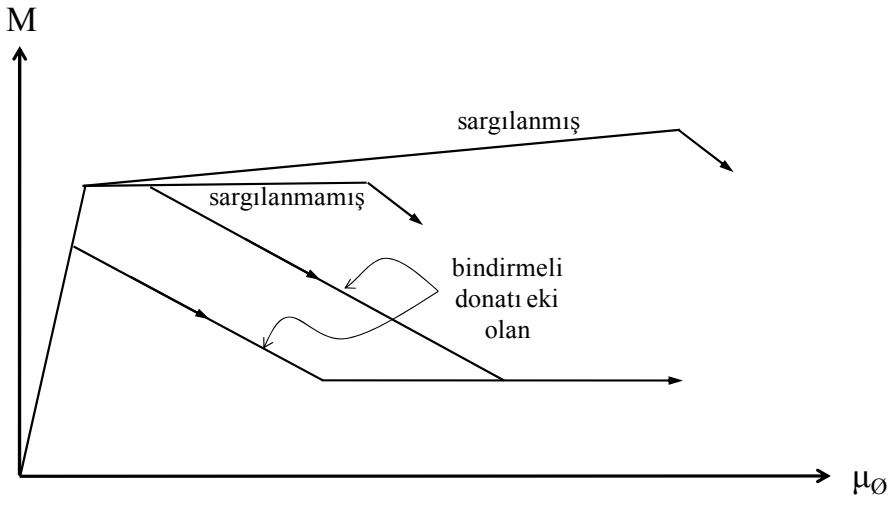
Kolon uç bölgelerinde donatıların eklenmesine, 1980'lere kadar yapı şartnamelerinin genelinde izin verilmediği bilinmektedir. 1980'lerin başında, özellikle Cornell Üniversitesinde yapılan birçok çalışma sayesinde bu tutum değişmeye başlamıştır. Bu çalışmalar sonucunda, bindirme boyu uzunluğunca sağlanacak yeterli sargılama donatısıyla, kolon boy donatılarının akmaya ulaştığı, belirli yük çevrimlerine dayanabildiği ve kolon plastik mafsal bölgesinde donatı ekleme uygulamasının yapılabileceği sonuçlarına ulaşılmıştır [76].

Plastik mafsalların öncelikle kirişlerde oluşmasının hedeflendiği tasarım düşüncenin sonucu olarak kolonlardaki donatı düzenleme sınırlamalarının gevşetildiği ve belirli sargılama donatısı varlığı ile kolonlarda donatı ekleme işlemine, kat seviyelerinin bitiminde izin verildiği literatürde belirtilmektedir [77]. Ortaya çıkan bu değişime ilk ciddi itiraz, sünek davranışın olumsuz etkileneceği kaygısı ile Paulay (1982) tarafından gelmiştir [77].

Bilindiği gibi kolonlarda en büyük momentin oluştuğu uç bölgelerde, gerekli eğilme dayanımı sağlayabilecek, uygun biçimde çalışarak akma davranışı gösterecek boy donatıların var olması gerekmektedir. Bindirmeli ekin uygun davranış sergileyip boy donatıların akmasını sağladığı durumda bile, kolonun Şekil 2.48 b'deki sünek davranışı sağlayabileceği konusuna şüphe ile yaklaşılmaktadır. Bindirme boyu uzunluğunca var olan donatı gerekenden fazla olacağı için, akma bölgeleri bindirme dışında gerçekleşmekte, bindirme bölgesinin ve komşu elemanın içerisine doğru akma girişimi meydana gelmektedir. Bunun sonucu bindirme boyu uzunluğunca, dıştan içeri doğru aderans bozulmakta, iki donatı arasındaki gerilme aktarımını sağlayan etkili boy azalmakta ve açılan fermuara benzetilen bir aderans davranışı sergilenmektedir. Plastik mafsal bölgesinde, davranışın doğası gereği paspayının dökülmesi karşılıklı etkileşim halinde donatı eki sürekliliğini ve mafsal davranışını olumsuz etkilemektedir. İyi sargılanmış ve yeterli aderans dayanımı sağlayabilecek donatı bindirme uygulamasında, dindirme içerisine ilerleyen akma girişimi

engellenebilmektedir. Diğer taraftan bu kazanç, boy donatıda plastik deformasyon yapabilecek uzunluğu, dolayısıyla plastik mafsal boyunu kısaltmaktadır. Bunun sonucunda bindirme yapılan noktadan hemen sonra yer alan donatının olması gerekenden çok önce burkulmasına hatta kopmasına neden olabilmektedir. Plastik mafsal bölgesindeki ikincil etkiler olarak sıralanabilecek, kesme deformasyonları ve bunun sonucundaki asal çekme gerilmeleri de donatı bindirme davranışı üzerinde olumsuz etki yapabilmektedir [77].

Bölüm 2.2.3'de belirtildiği gibi donatı eklemesi yapılan durumlarda bindirme boyu, tek bir donatının betona gömülü olduğu durumda elde edilen ankraj boyunun, belirli bir katı olarak hesaplanmaktadır [9, 18, 19]. Bazı durumlarda iki uzunluğun yaklaşık eşit olabileceği bu yaklaşım, yükün sıfır değerinden başlayarak göçmeye kadar sürekli arttırıldığı, monotonik yükleme koşullarında türetilmiş, çoklu donatı çubukları ve tersinir tekrarlanır yükler etkisinin dikkate alınacağı katsayılarla modifiye edilmiştir. Bu yaklaşım monotonik yükleme için geçerli iken, yükün sürekli yön değiştirdiği, depremi temsil eden tersinir tekrarlanır yükleme durumunda, özellikle ileri yük seviyelerinde davranışın farklılaştığı, bindirmeli ek davranışındaki bozulmanın, belirtilen yaklaşıma oranla, daha hızlı olduğu ve önemli ölçüde arttığı belirtilmektedir. [76].



Şekil 2.49: Çeşitli kolon davranışları [45]

Genel olarak bindirmeli donatı eki içeren kolonların davranışları incelendiğinde, Şekil 2.49'da görüldüğü biçimde sonuçlara ulaşıldığı belirtilmektedir [45].

Sargılanmış kolonlarda önemli ölçüde süneklik artışı yaşandığı, dayanım değerlerinde de bir miktar yükselişin görüldüğü bilinmektedir. Bindirmeli donatı eki bulunduran kolonlardaki davranış ise, donatı ekleme uygulamasının yeterliliğine göre şekil almaktadır. Yetersiz bindirme boyu uygulaması içeren kolonların, hesap kapasite değerlerine ulaşamadığı ve göçmenin erken ortaya çıktığı görülmektedir. Donatı bindirme imalatındaki yeterlilik derecesindeki artışa göre, kapasite değerlerine ulaşılabilmektedir. Bindirme uygulamasındaki yeterliliğin artması sonucunda, belirli bir seviyede, sınırlı süneklik değerlerine ulaşılabilmektedir.

2.5. Betonarme Kolonlarda Bindirme Boyu Problemine Yönelik Güçlendirme Çalışmaları

Betonarme elemanlarda donatı sıyrılması ve aderans yarılmasının tetiklediği, erken ve gevrek göçmeler oluştuğu, yaşadığımız depremlerde ve yayınlanan çalışmalarda ispatlanmıştır (4, 73, 77, 78, 79). Kesitte etriye varlığının ve sayısındaki artışın, donatı ankrajı ve bindirmeli donatı eklemesinde etkili olduğu kolon uç bölgelerinde oluşan aderans problemlerini azalttığı bilinmektedir (5, 76, 80, 81).

Etriye kullanımının, kolon uç bölgelerinde oluşturulan bindirmeli donatı eklerinde yaşanacak aderans sorunlarının giderilmesinde etkisi olmakla birlikte, bu uygulama sadece yapı imalatı sırasında alınabilecek bir önlemdir. Var olan betonarme yapı stoğu düşünüldüğünde, deprem etkisi altında kapasitesinin çok altında olan yüklerde göçeceği muhtemel, yetersiz bindirmeli donatı eki bulunan kolonların varlığı endişe vermektedir. Bu tip problemli kolonlar üzerine, yetersiz bindirmeli donatı ekinin sebep olacağı erken ve gevrek göçmeleri önlemeyi hedefleyen birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda temel olarak aderans sorunu yaşayan, yetersiz bindirmeli donatı eki bulunan kesitler, değişik malzemeler kullanılarak dışarıdan sargılanmışlardır. Elde edilen sonuçlar ümit verici ve güçlendirilmemiş numunelere oranla iyileşme elde edildiğini göstermektedir (5, 21, 31, 38, 41, 42, 45, 79, 87) . Bu güçlendirme çalışmalarında çelik plakalar ve FRP malzemeler kullanılarak oluşturulan sargılama gerilmelerinin olumlu etkileri kullanılmaktadır. Burada belirtilmelidir ki bu tip uygulamalarda oluşturulan sargılama etkileri, pasif sargılama olarak adlandırılmakta ve nitelendirilmektedir. Pasif sargılamada uygulamanın etkinliği, kesitin hasar alıp çatlayarak genişlemeye başlaması sonucunda, sargılama

malzemesi üzerinde oluşan çekme gerilmelerinin kesitte sargılama gerilmeleri oluşturmasıyla elde edilebilmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi kesitte oluşacak aderans kaynaklı çatlamalara kadar sargılama etkisi yok denecek kadar az olmakta, bu durumda bindirmeli donatı ekinde bir miktar sıyrılmanın oluşmuş olması kaçınılmaz hale gelmektedir. Öte yandan güçlendirme çalışmalarının sonuçları incelendiğinde, güçlendirilen kolonların, sürekli donatı içerdiği düşünülerek yapılan tasarımlardaki kapasite dayanımlarının, enerji yutma kapasitelerinin ve deplasman süneklikleriniin yakalanmasında hala sorunlar olduğu görülmektedir.

Kesme kapasitesi düşük kısa kolonların deprem etkisine karşı güçlendirme ve iyileştirme çalışmalarında, kolon uç bölgelerinin kesme kapasitesini arttırarak, tasarlanmış oldukları gibi eğilmenin kontrol ettiği bir davranış sergilemeleri amacıyla, ardgerme uygulanarak aktif sargılama teknikleri kullanılması düşünülmüştür. Aktif sargılamanın oluşturulabilmesi için çelik ard germe tendonları veya plakaları ve özel kilitleyicileri kullanıldığı ve oldukça iyi sonuçlar elde edildiği, literatür incelendiğinde görülmektedir (82, 83, 84). Kolon uç bölgelerinde yapılan bu tip uygulamanın, bindirmeli donatı ekinin getirdiği olumsuzluk üzerinde iyileştirici etkisi olduğu, net olarak açıklığa kavuşturulmamakla birlikte belirtilmektedir (82). Elde edilen olumlu etki, nervürlü donatıların kullanıldığı kolonlarda sağlanmıştır. Kullanımda olan daha eski yapı stoğu düşünüldüğünde, betonarme elemanlarda düz donatı kullanılmış olduğu bilinmektedir. Düz donatılı kolonlardaki bindirme boyu probleminin iyileştirilmesi üzerine yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Nervürlü donatı kullanımına kıyasla düz donatı kullanılan elemanlarda, Bölüm 2.2'de belirtildiği gibi aderans mekanizması değişmekte ve nervürlerden kaynaklanan betonun yarılmasına neden olan ek gerilmeler ortadan kalkmaktadır. Bindirmeli boyu problemi olan düz donatılı betonarme kolonların iyileştirilmesi için yapılan çalışmalarda, sargılama veya bulonlar yardımıyla kolon yüzeyine dik oluşturulan kuvvet ile tatmin edici iyileştirme sağlanamadadığı, yük kapasitelerinde kayda değer artış elde edilemediği görülmüştür. Bununla birlikte bu tip elemanlarda, sargılama sonucunda yatay yük kapasitelerine daha yüksek ötelenme adımlarında ulaşıldığı belirtilmiştir [84, 85]. Donatıların kaynaklanmasının ardından yapılan FRP sargılama sonucunda, daha uygun davranışın elde edilebildiği belirlenmiştir [85].

Literatürde, aktif sargılama uygulamalarında FRP'nin de kullanıldığı görülmektedir. FRP'nin kullanıldığı aktif sargılama uygulamalarında, kolonun şekline uygun ön üretimli FRP kalıplar ile var olan beton arasına genişleyen harç veya epoksi bazlı malzemeler doldurularak aktif sargı elde edilmeye çalışılmış ve eksenel yük–eksenel deformasyon grafiklerinden, pasif sargılamaya oranla çok daha iyi davranışlar elde edildiği görülmüştür (21, 87, 88). Aynı yöntem, FRP ile kolon güçlendirmelerinin incelendiği çalışmalarda da kullanılmış ve pasif sargılamaya göre daha olumlu sonuçların elde edilerek, eğilme, deplasman ve enerji yutma kapasitelerinde artışlar olduğu görülmüştür (21, 89). Öte yandan bu tip aktif FRP sargılama yönteminde, genişleyen dolgu malzemesinin kesit üzerinde oluşturduğu ardgerme miktarının kontrolü, yapıya getirdiği ek ağırlık sorun olabilmektedir. Bu işlemin ıslak imalat olduğu ve kısmen uzun zaman aldığı dikkati çeken bir diğer noktadır. Son zamanlarda kesme kapasitesi düşük olan kolonlar üzerinde yapılan çalışmalarda, FRP kuşaklara ardgerme verilmesiyle aktif sargılama etkisinin oluşturulabileceği ortaya konulmuş, kesme davranışında olumlu artışlara sebep olduğu gösterilmiştir (90, 91). Deprem etkisi ile uç bölgelerinde yetersiz donatı bindirme eki bulunan kolonlarda meydana gelmesi muhtemel erken ve gevrek göçmelerin, aderans yarılmasının veya kesit genişlemesinin oluşmasıyla etkinlik kazanabilen pasif sargılama yerine, sargılama etkisini uygulandığı andan itibaren öngerilmeli FRP kuşaklarıyla oluşturacak aktif sargılama ile önlenebileceği düşünülmekte, fakat bu konuda literatürde doyurucu bilgiye rastlanamamaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş

Yetersiz bindirme boyu ile imal edilmiş kolonların deprem davranışının iyileştirilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, geliştirilen teknikle kolon bindirme bölgesinde lifli polimer (FRP) kullanılarak ardgerme uygulanmış ve aktif sargılama oluşturulmuştur. Uygulanan yöntemin işlerliğinin incelenmesi ve öngerilme verilmemiş FRP kullanılarak yapılan pasif sargılama (yaygın olarak bilinen ismiyle FRP sargılama) ile olası farklılıkların ortaya konulabilmesi için bazı değişkenler sabit tutulmuştur. Yetersiz bindirme boyu uzunluğu, literatürde rastlanan en kısa bindirme boyu olan ve güçlendirme işlemlerinin işe yaramayacağı düşüncesinin var olduğu donatı çapının 15 katı olarak seçilmiştir.

Numune üretiminde, standart nervürlü donatı ve hazır beton kullanılmıştır. Test edilen numuneler, polimer katkılı tamir harcı kullanılarak tamir edilmiş ve tek doğrultuda dokunmuş olan lifli polimerler kullanılarak güçlendirilmişlerdir. Numune üretim aşamasından, test, tamir ve güçlendirme aşamalarına kadar tüm süreç, Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde, deneysel çalışmanın yapısı, kullanılan malzemelerin detayları, numunelerin özellikleri ve deney yönteminin açıklaması yapılmaktadır. Deney düzeneği, yükleme sistemi ve veri toplama yöntemi detaylı olarak gösterilmiştir.

3.2. Malzeme Özellikleri

Malzeme özellikleri başlığı altında, imal edilen kolon numunelerinin üretiminde kullanılmış olan beton ve donatı çeliğine ait detaylar verilmektedir. Oluşturulan güçlendirme tekniğinin ana malzemesi olan karbon lifli polimere ve yapıştırmada kullanılan epoksi reçinesine ilişkin mekanik özellikler yer almaktadır. Onarımda kullanılan tamir harcı ile ilgili özellikler de bu bölüm içerisinde bulunmaktadır.

3.2.1. Beton

Yetersiz bindirme boyu ile imal edilen kolon probleminin, özellikle 1999 Kocaeli Depremi (bilinen diğer isimleri ile 99 Gölcük Depremi, 99 Marmara Depremi) öncesinin gözle görülür problemleri arasında yer alması nedeniyle, bu çalışmada kullanılan beton sınıfı nispeten düşük olan C16 olarak seçilmiş ve uygulanmıştır. Bu beton kalitesinin, son 15-20 yıl içerisinde üretilen yapılar için özellikle hazır beton kullanımının sonucu olarak yaygın rastlanılan ortalama değer olduğu ve bahis konusu yapılarda kullanılan boy donatıların da nervürlü donatı olduğu söylenebilir.

Üretilen numuneler, donatı ekinin düğüm bölgesi/temel kesiminde kalan kısmını temsil eden, aynı zamanda kuvvetli döşeme ile bağlantıyı sağlayan taban bloğu ve devamında yer alan kolondan oluşmaktadır. Donatı ekinin alt kısmını, yani başlangıç bölümünü barındıran temel bloğunun imalatı, kolonlardan önce, 20 MPa dayanıma sahip betonla gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak olan güçlendirmenin, bindirme bölgesinde ne kadar iyileştirme sağlayacağının önceden kesin bilinememesi ve incelenen olgunun bindirme bölgesi olması nedeniyle taban bloğunda herhangi bir kalıcı deformasyon istenmemesi sonucu, bu kısmın test bölgesi olan kolondan daha güçlü olması sağlanmıştır. Ayrıca incelenen durumun gerçekte var olan bir soruna yönelik olması nedeniyle, şantiyelerde genel olarak karşılaşılan uygulanan biçimiyle yani kolon alt ucunda soğuk ders oluşturarak, numune imalatı sağlanmıştır.

Beton, Nuh Beton A.Ş. hazır beton firmasından tedarik edilmiş, laboratuar ortamında beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Kullanılan beton sınıflarına ait karışım özellikleri Tablo 3.1'de yer almaktadır.

Beton dökümü sırasında 15x30 cm boyutlarında standart silindir numuneler alınarak, beton dayanımının tespiti yapılmıştır. Betondan alınan silindir numuneler, şantiye ortamındaki şartların temsil edilebilmeleri ve göreli olarak deney numunelerinin gerçek basınç dayanımlarını yansıtmaları için kolon numunelerle aynı ortam ve kür şartlarında bekletilmişlerdir. Deneyler sırasında silindir beton numunelerin kırılması ile kolon numunelerindeki C16 sınıfı olarak hedeflenen betonun, ortalama basınç dayanımının 17,2 MPa olduğu görülmüştür.

Tablo 3.1: Kullanılan beton karışımları ve mekanik özellikleri

	Miktar ($1m^3$)	
Malzeme Adı	C16	C20
Çimento (CEM I 42.5R) (kg)	190	265
Su (kg)	180	164
Doğal Kum (kg)	463	556
Kırma Kum (kg)	453	489
Mıcır No I (kg)	447	859
Mıcır No II (kg)	465	---
Uçucu Kül (kg)	70	---
Kimyasal Katkı (Orta Akışkan. - Supra) (kg)	1.48	2.12
Basınç Dayanımları		
7 Gün (MPa)	7.2	---
28 Gün (MPa)	11.8	26.1
186 Gün (MPa)	17.2	---

3.2.2. Donatı çeliği

Üretilen numunelerde, D_b=8 mm, D_b=12 mm ve D_b=16 mm çaplarında, BÇ-IIIa sınıfında nervürlü donatı çeliği kullanılmıştır. Yapılana çekme deneyleriden, donatılara ait akma dayanımlarının sırası ile 450 MPa, 491 MPa ve 534 MPa olduğu görülmüştür. Numune taban bloğu imalatında yer alan donatılar, bu bölgede herhangi bir sorunun oluşmaması amacıyla D_b=12 mm olarak seçilmiştir. Kolonların taban bloğu içerisinde kalan bindirme başlangıç donatıları ve kolonlarda yer alan kolon boy donatıları D_b=16 mm'dir. Kolon sargılama donatısı (etriye) olarak ise D_b=8 mm kullanılmıştır. Kullanılan donatılar, nervür geometrisi açısından yüksek aderanslı donatı çeliği olarak sınıflandırılmaktadırlar. Donatılara ait mekanik özellikler Ek A'da yer almaktadır.

3.2.3. Karbon lifli polimer (CFRP)

Geliştirilen güçlendirme tekniği özetle, öngerilme verilmiş lifli polimerin, betonarme elemanda sargılaması gerilmesi oluşturacak şekilde, belirli bir yerleştirme formu kullanarak uygulanmasından oluşmaktadır. Dolayısıyla lifli polimer, çalışmada ve geliştirilen güçlendirme tekniğinde önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada,

elastisite modülü daha yüksek olan, oluşturulacak az miktardaki birim deformasyona karşı daha fazla gerilme üretebilecek, karbon lifli polimer (CFRP) kullanılmıştır. Tek doğrultulu dokunmuş biçimiyle, Sika Türkiye tarafından temin edilmiş olan karbon lifli polimerin, firma tarafından elde edilmiş mekanik özellikleri Tablo 3.2'de yer almaktadır. Lifli polimer güçlendirmesi aktif ve pasif olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Malzeme anlamında belirtilmesi gereken iki uygulama anlamındaki farklılığın burada belirtilmesi gerekmektedir. Pasif yani serbest şekilde el gerdirmesi ile yapılan lifli polimer uygulamasında malzemenin tümü, eposki reçinesi kullanılarak betona yapıştırılmıştır. Aktif yani öngerilme verilerek yapılan lifli polimer uygulamasında ise uygun boyda tek şerit olarak kesilen malzemenin, sadece iki ucu epoksi reçinesi kullanılarak uygulama öncesinde birbirine yapıştırılmış ve malzeme lifli polimer kesit haline getirilmeden kullanılmıştır.

Tablo 3.2: Kullanılan karbon lifli polimere (CFRP) ait mekanik özellikler

SikaWrap - 230C	
Lif Doğrultusu	0° (Tek doğrultulu)
Birim Ağırlık (g/m^2)	230 ± 10
Lif Yoğunluğu (g/cm^3)	1.76
Lif Özellikleri (kuru)	
Çekme Dayanımı (MPa)	4300
Elastisite Modülü (MPa)	238000
Kopma uzaması(%)	1.8
Kompozit özellikleri (epoksi ile)	
Nihai Taşıma Gücü (N/mm)	350 (1 mm kalınlık için)
Elastisite Modülü (MPa)	28000 (1 mm kalınlık için)

3.2.4. Epoksi bazlı yapıştırıcı (Epoksi reçine)

Karbon lifli polimerin uçlarının birbirleri üzerinde bindirilerek yapıştırılması ve klasik olarak beton üzerine yapıştırılabilmesi amacıyla epoksi bazlı yapıştırıcı malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme Sika Türkiye tarafından temin edilmiştir. Ana malzeme ve sertleştiriciden oluşan ürün, belirtilen oranlarla karıştırılarak uygulanmıştır. Malzemeye ait üretici bilgileri Tablo 3.3'de yer almaktadır.

3.2.5. Tamir harcı

Yapılan çalışmada, sadece var olan bindirme boyu probleminin giderilmesi ve güçlendirilmesi değil aynı zamanda daha önceki deprem gibi etkilerde hasar almış ve bu problemi içeren kolonların da onarıldıktan sonra güçlendirilmesi ve davranışı incelenmektedir. Dolayısıyla hasar görmüş kolonların tamir edilmesi gerekliliği ortaya çıkmış ve bunun için polimer katkılı tamir harcı kullanılmıştır. Kullanılan tamir harcı çimento bazlı olup, silis dumanı ve lif içermekle birlikte, polimer katkılı, tek bileşenlidir. Tamir harcının üretici firma (Sika) tarafından verilen özellikleri Tablo 3.4'de yer almaktadır.

Tablo 3.3: Kullanılan epoksi reçinesine ait mekanik özellikler

Sikadur - 330	
Tanım	İki bileşenli, solventsiz, tiksotrpik özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcısı
Karışım (A:B)	4 : 1
Birim Ağırlık (kg/l)	1.31
Viskozite – Kayma Hızı (/sn)	50
Servis Sıcaklığı (C°)	-40 - +50
Çekme Dayanımı (MPa)	30
Elastisite Modülü (MPa)	
Çekme	4500
Eğilme	3800
Kopma Uzaması (%)	0.9
Kullanıma Hazır Olma Süresi (+23C° – gün)	5

Tablo 3.4: Kullanılan tamir harcına ait mekanik özellikler

Monotop 612	
Tanım	Çimento esaslı, silis dumanı ve lif içeren, polimer modifiye, tek bileşenli, tamir harcı, tek bileşenli
Yoğunluk	
Toz (kg/l)	1.54
Taze Harç (kg/l)	2.10
Basınç Dayanımı (MPa)	
1 gün	10-25
28 gün	50-80

Kullanılan tamir harcı ile zayıf parçaları temizlenmiş mevcut tamir edilecek beton arasındaki yapışma ve aderansın, en iyi şekilde sağlanması için yapıştırma emülsiyonu kullanılmıştır.

3.3. Numuneler ve Deney Değişkenleri

Numunelerin tanıtımından üretim aşamasının sonuna kadar olan kısım bu bölümde özetlenmiştir. Numune değişkenleri, adlandırılması, donatı yerleşimleri ve lifli polimer uygulama detayları bu bölümde yer almaktadır.

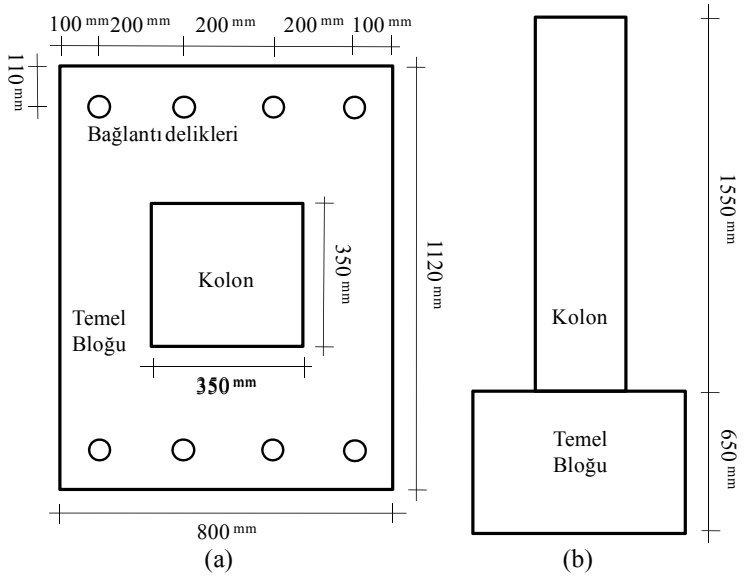
3.3.1. Numunelerin tanıtımı

Yetersiz bindirme boyu bulunduran kolonların iyileştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada 350x350 mm kare kesitli kolonlar, gerçek durumda çeşitli nedenlerle oluşabileceği düşünülen ve şartnamede tanımlanan gerekli boydan az olan bindirme boyu ile (15 D_b) imal edilmiştir. TS500 [18]'e göre uygulanması gereken yeterli ankraj boyu yaklaşık 40 D_b, bindirme boyu ise tüm donatıların aynı kesitte eklendiği için bu değerin 1.5 katı, yani yaklaşık 60 D_b olarak belirlenmiştir. Aktif sargılama oluşturmak amacıyla tasarlanan, öngermeli lifli polimer güçlendirme sisteminin, tanımlanan en küçük bindirme boyu uzunluğunun altında çalışması durumunda, daha ileri seviyede çalışmalara gidilebileceği düşüncesi ile bindirme boyu tüm numunelerde aynı seviyede tutulmuştur. Eldeki sınırlı imkanlar ve sistemin anlamlı bir sonuç verip vermeyeceği sorusu, bu çalışmadaki genel numune özelliklerini, belirtilen bindirme boyu ve tek tip kare kesitler olarak sınırlandırmıştır. Şekil 3.1'de numunelere ait genel görünüm (a-üstten görünüm, plan, b-kesit) ve numune boyutları görülmektedir.

Şekil 3.1'de görüldüğü biçimde temel boyutları seçiminde, temelde hiçbir koşulda deformasyon ve hasar oluşmaması amacıyla, kolon bindirme bölgesindeki yük aktarımının en ideal şekilde olacağı göz önüne alınarak hesap yapılmıştır. Temel boyutlarının belirlenmesinde ikincil faktör olarak, yükleme sisteminin yerleşim düzeni ve bağlantı noktalarının yerleri belirleyici olmuştur.

Bunlara ilave olarak Şekil 3.1'de, numunenin yükleme sistemine bağlantısının sağlandığı, bağlantı delikleri ve yerleşimi görülmektedir. Bağlantı delikleri, temel

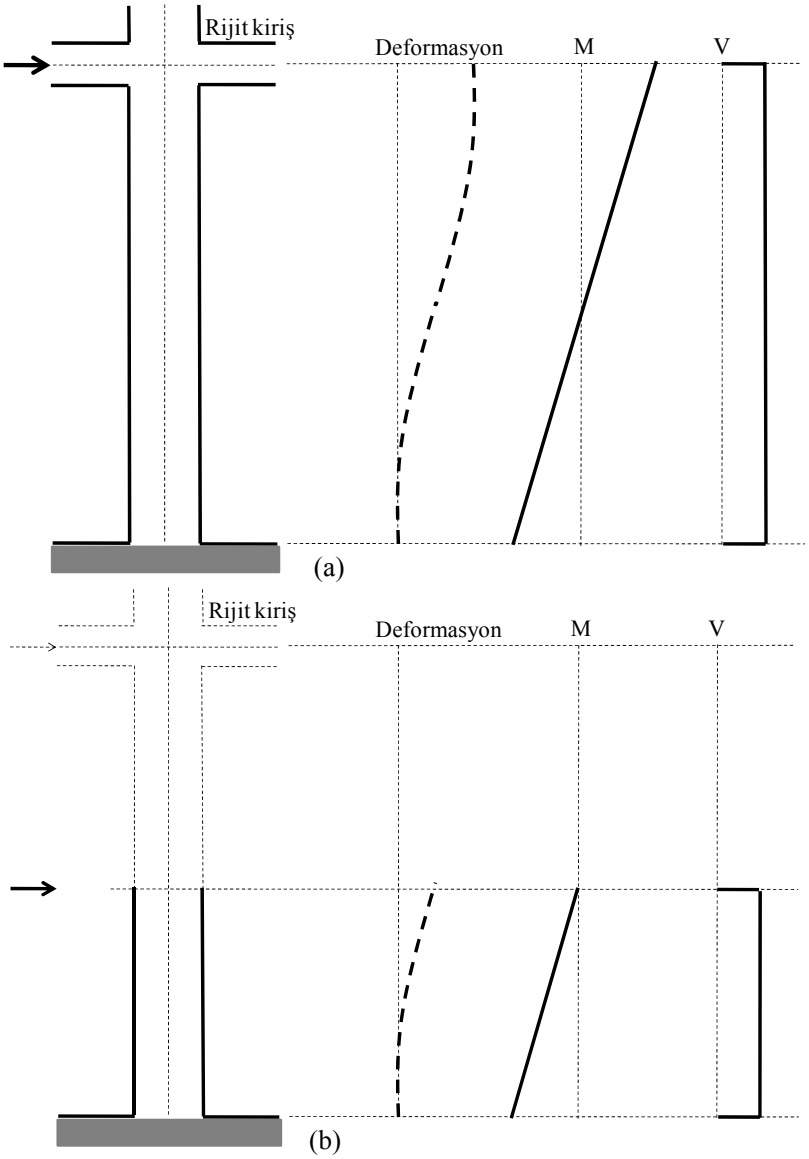
betonu içerisine yerleştirilen ve sabitlenen *D*=50mm'lik PVC borular ile oluşturulmuştur.



Şekil 3.1: Numune genel görünümü ve boyutları, (a) plan, (b) düşey kesit (ölçüler mm'dir)

Kolon boyutları daha öncede belirtildiği gibi ortalama gerçek yapılardaki kesitleri yansıtacak biçimde (1:1 ölçekte) ve 350x350mm olarak uygulanmıştır. Kolon temiz yüksekliği temel üstünden 1550mm, yatay yük uygulama noktası temel üstünden 1400mm'dir. Şekil 3.2'de, taşıyıcı yapı elemanı olan kolonların, yatay yük etkisi altında sergiledikleri davranış ve kolon üzerinde oluşan iç kuvvetler gösterilmiştir (Eksenel yükten dolayı oluşan normal kuvvet bu gösterimde göz ardı edilmiştir). Şekil 3.2 a'da görüldüğü biçimde, alttan ankastre ve üst ucunda rijit kiriş ile birleşen bir kolonu düşünecek olursak, statik analizden bilindiği üzere üst uçtan uygulanan yatay kuvvetle birlikte kolonda, iki eğrilikli bir deformasyon oluşmaktadır. Üst uçta meydana gelecek yatay deformasyonun ortaya çıkabilmesi için, kolon uç bölgelerine yakın noktalarda yani plastik mafsal bölgelerinde kesit dönmeleri gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak kolon uçlarında en büyük moment değerlerine ulaşılırken, dönme talebi ve gereksinimi olmayan orta noktada moment, sıfır değerini almaktadır. Kolon boyunca düşeyde herhangi bir kuvvet ya da tepki olmadığı için yatay kuvvet değeri (kesme kuvveti) tüm kolon boyunca sabit kalmaktadır. Aynı kolonun yarısı düşünüldüğünde, Şekil 3.2 b'de görüldüğü gibi orta noktaya sağlanan serbestlik ile birlikte, yatay yükleme durumunda da aynı davranış elde edilmektedir. Tasarlanan kolon numunelerin, yükleme yapıldığı nokta ile birlikte düşünüldüğünde ve bu

noktanın moment sıfır ya da eğrilik değişim noktası olması nedeniyle, 2800 mm'lik bir kolonun yarısı olduğu anlaşılmaktadır. Özetle, incelenen numunenin, hem kesit boyutları hem de yüksekliği açısından, gerçek yapı stoğunda var olan ortalama bir kolonu temsil ettiği açıkça görülmektedir.

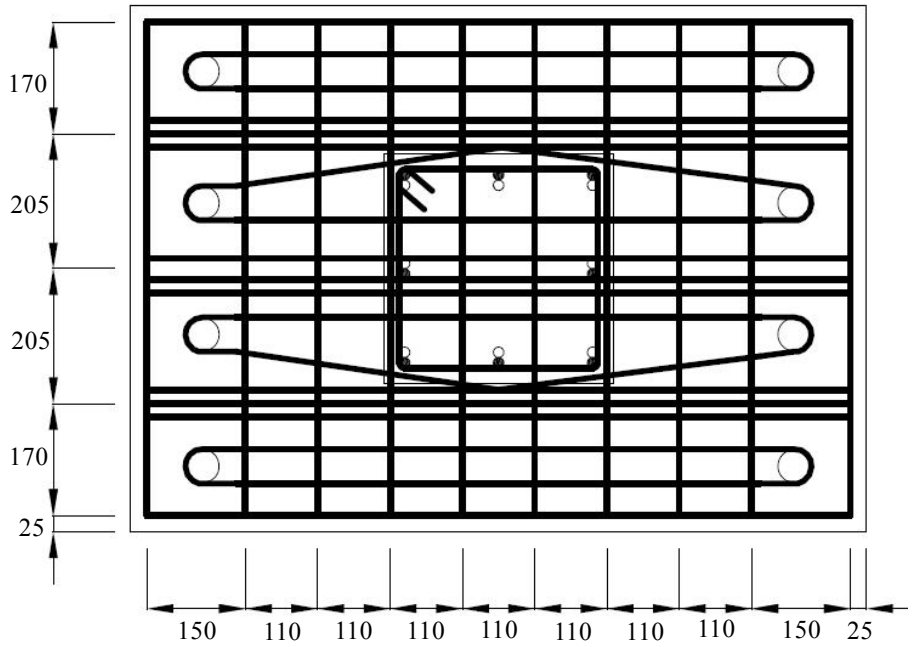


Şekil 3.2: Kolonların yatay yük etkisindeki genel deformasyon ve iç kuvvet değişimleri

3.3.2. Donatı çeliği yerleşimi

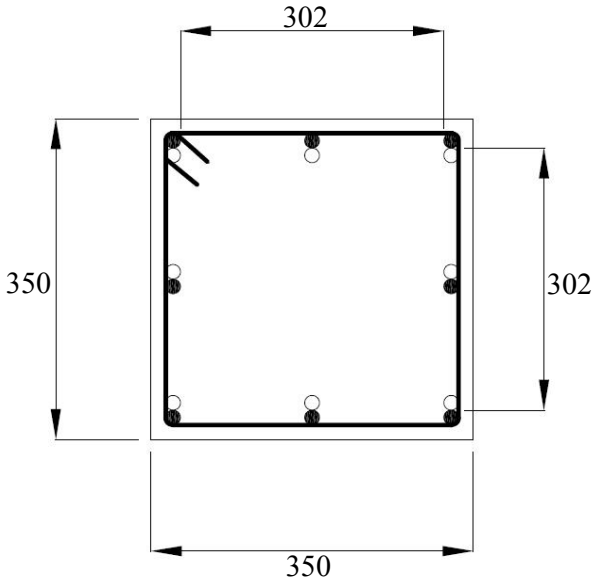
Kullanılan donatı çeliğinin tümü, daha öncede belirtildiği gibi BÇ-IIIa kalitesinde, nervürlü inşaat çeliğidir. Numunelerin taban bloğu, yani temel bölgesinde bulunan tüm donatıların çapı D_b=12 mm'dir. Numunelerin yere bağlantısı için bırakılan boşlukların etrafını dönecek biçimde firketeler kullanılmıştır. Temelle içerisinden

çıkan kolon boy donatı filizleri ise D_b=16 mm'lik çapta kullanılmıştır. Şekil 3.3'de temel donatı yerleşimi, plan görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.3: Temel ve kolon donatıları yerleşimi - üstten görünüşü (ölçüler mm'dir)

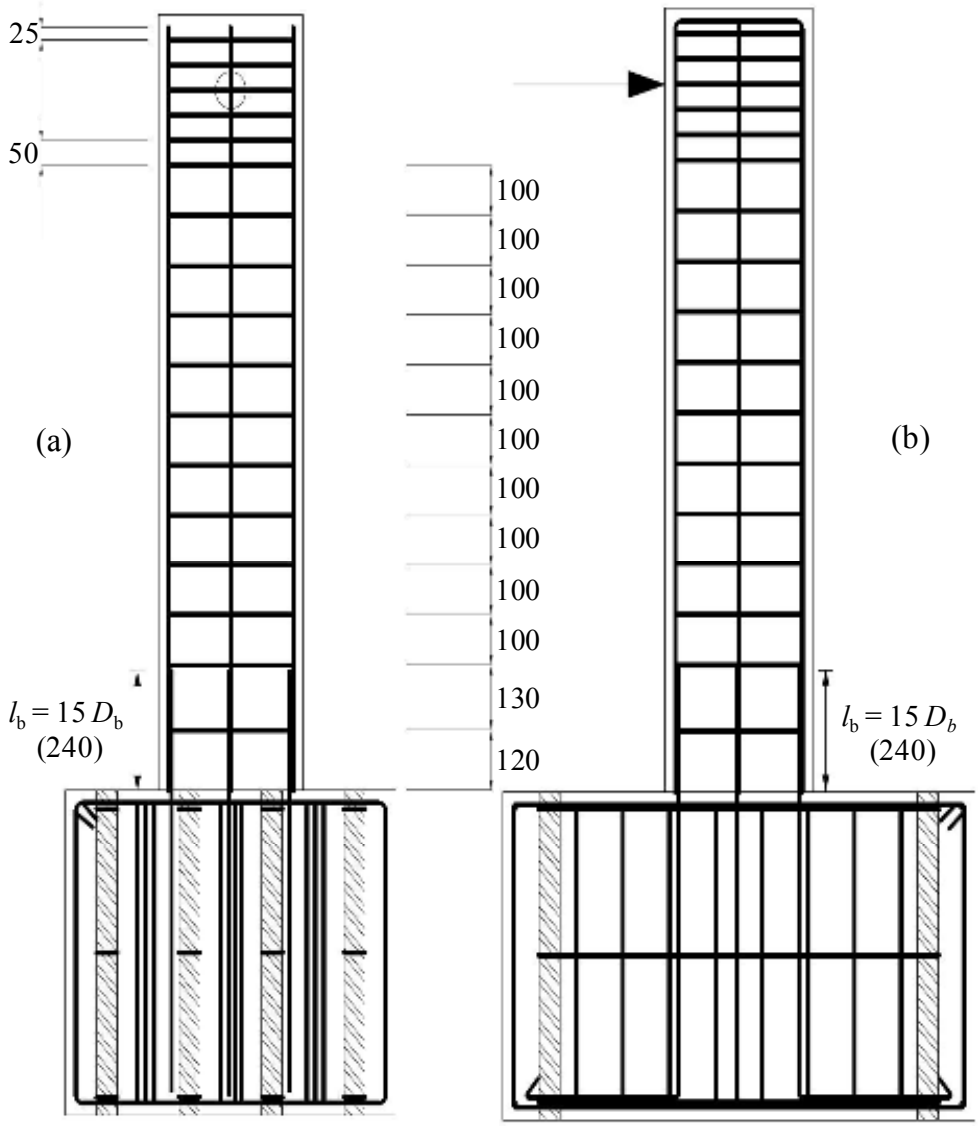
Kolon boy donatılarında D_b=16 mm çap kullanılmıştır. Kolon filizleri ve kolon boy donatıları aynı çapta ve D_b=16 mm olarak süreklilik sağlanmıştır.



Şekil 3.4: Kolon donatıları yerleşimi detayı – plan (ölçüler mm'dir)

Kolon boy donatıları için pas payı olarak, genelde şantiyelerde uygulanmış olduğu şekliyle 1.5 D_b (24 mm) seçilmiştir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de kolon

donatıları yerleşimi, plan görünüşü yer almaktadır. İçi siyah dolgulu, daire olarak gösterilen donatılar, kolon içerisindeki boy donatıları simgelemektedirler. Çember şeklindeki boş olarak gösterilen donatılar ise temelden çıkan kolon filizlerini simgelemektedirler. Yerleşimde kolon filizlerinin içeride kalmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 3.5: Numune donatılarının düşey yerleşimi – yükleme doğrultusuna (a) dik, (b) paralel kesit (ölçüler mm'dir)

Şekil 3.5'de numune donatı yerleşimine ait, kesit çizimleri yer almaktadır. Aynı çizimde numunenin üst kısmında yükleme durumu da görülmektedir. Şekil 3.5 a yükleme doğrultusuna dik, Şekil 3.5 b ise yükleme doğrultusuna paralel kesitlerdir. Bindirme boyu olarak tüm numunelerde, $l_b = 15\ D_b = 240$ mm olarak uygulanmıştır (Şekil 3.5).

Kolon filizlerinin temel betonunda kalan kısmı için her ne kadar yeterli ankraj boyu sağlanıyor olsa da, temel içinde kalan alt kısımları Şekil 3.5 b'de görüldüğü gibi bükülerek uzatılmıştır.

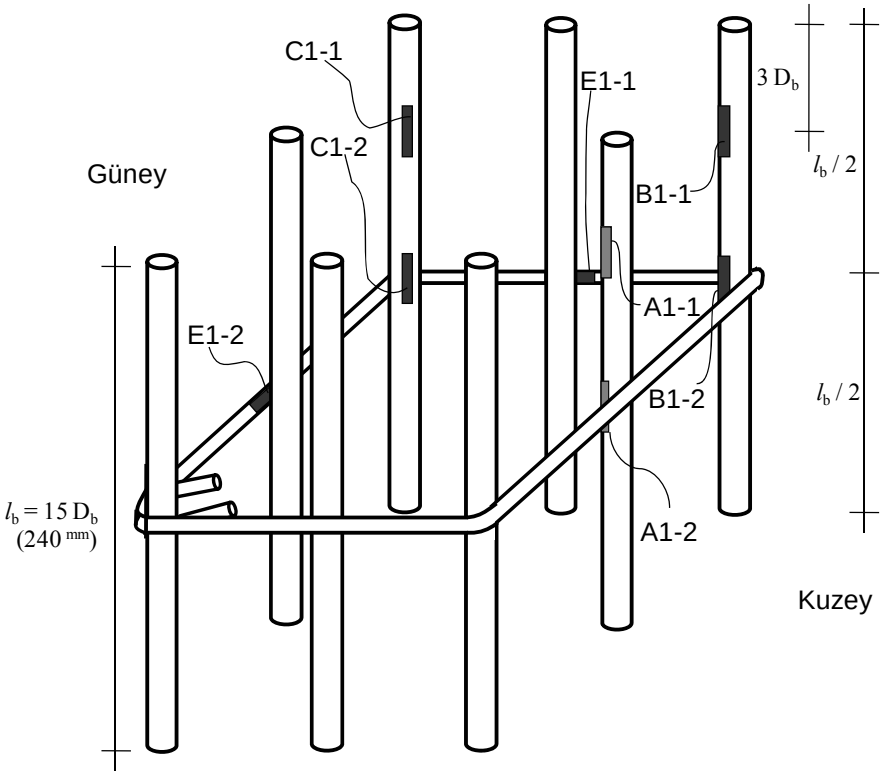
Kolon boy donatıları imalatı, tek parça donatının U şeklinde bükülmesi biçiminde yapılmıştır. Bu sayede kolon üst ucunda meydana gelebilecek ve böyle bir çalışmada kesinlikle istenmeyen, bu bölgedeki donatı sıyrılması probleminin önüne geçilmiştir (Şekil 3.5). Ortadaki dışında U şeklindeki boy donatılar, yükleme doğrultusuna paralel yerleştirilmişlerdir.

Sargı donatısı için, tipik yapı imalatlarında etriye olarak yaygın olarak kullanılan, D_b=8 mm çapı seçilmiştir. Şekil 3.5'de etriye yerleşimi de görülmektedir. Bindirme bölgesinde, hatalı ve yanlış imalatlarda olduğu gibi bir adet sargılama donatısı kullanılmıştır. Dolayısıyla düğüm bölgesi etriye sıklaştırılması olgusu, çalışmanın amacına uygun olarak imalatta uygulanmamıştır. Bindirme bölgesindeki etriye, bu bölgenin tam ortasına yerleştirilmiştir. Bir sonraki etriyenin aderansa etkisinin olmaması amacıyla, etriye yerleşiminde kaydırma yapılmış ve bu etriye, bindirme bölgesinin 10 mm sonrasına yerleştirilerek kalan etriyelerin düzenlemesi gerçekleştirilmiştir. Numunenin üst ucunda, yüklemenin yapılacağı bölgede, kesme kuvvetinden dolayı sorun yaşanmaması için etriye sıklaştırması yapılmıştır.

Deneyler sırasında donatılardaki gerilme değişiminin izlenip kayıt edilebilmesi amacıyla, deformasyon pulları (strain gauge) kullanılmıştır. Deformasyon pulları sadece belirli donatılarda olmak üzere, kolon filizlerinde uygulanmıştır. Şekil 3.6'da deformasyon pullarının hangi donatılarda kullanıldığı ve yerleşimi gösterilmektedir. Şekil 3.6'daki çizim, kolon filizlerine ait olup, temel üstü ile bindirme boyunun bittiği bölgeyi göstermektedir. Kullanılan deformasyon pulları 10 mm'lik boya sahip deformasyon pullarıdır.

Kolon donatılarında olduğu gibi, bindirme bölgesinde kalan sargılama donatısı üzerinde gerilme değişiminin takip edilebilmesi amacıyla, iki doğrultuda deformasyon pulları yapıştırılmıştır (Şekil 3.6). Şekil 3.6'da deformasyon pullarının yükleme sistemindeki konumuda gösterilmiştir. Kuzey yüz, hidrolik yükleme sisteminin bulunduğu tarafı, itme yüklemesinde çekmenin oluştuğu yüzü

tanımlamaktadır. Güney yüz ise kolon tepe noktasının çekme yüküne maruz kaldığı sırada, çekme gerilmelerine maruz kalan yüzü belirtmektedir. Bölüm 3.5'de, yükleme sistemi ile birlikte kolon numunenin bulunduğu çizimde, yükleme ve kolona ait kuzey ve güney yönlendirmesi verilmektedir.



Şekil 3.6: Kolon donatıları deformasyon pulu yerleşimi

3.3.3. Numunelerin üretim aşaması

Numune üretim aşamasının tüm aşamaları, Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

Numuneler, temel ve kolon olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadırlar. Şekil olarak yapılabilecek bu ayrımın ötesinde, temel betonu ile kolon betonu dökümlerinin de ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olması, böyle bir tanımlamayı doğrulamaktadır. Bu şekilde yapılan imalat ve beton dökümü ile genel olarak sahada uygulandığı biçimde kolon alt ucunda soğuk derz oluşumu sağlanması amaçlanmış ve numunelerin gerçek yapı imalatında karşılaşılan durumun birebir sergilemesi hedeflenmiştir.

Numunelerin üretimine, temel donatılarının imalatı ile başlanılmıştır.



Şekil 3.7: Numune temel donatılarının imalatı

Belirlenen ölçülerde olmak üzere temel donatıları, laboratuarda hazırlanarak temellere ait donatı kafes imalatları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7, Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Numune temel donatılarının bitmiş hali



Şekil 3.9: Numune temellerine ait kalıplar

Temel donatıları imalatının ardından kalıp imalatı gerçekleştirilerek, donatılar kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.9, Şekil 3.10)



Şekil 3.10: Numune temel donatılarının kalıba yerleşimi ve ahşap kılavuz şeritler

Temellerin, yükleme sisteminin kuvvetli döşemesine bağlantısı amacıyla, yüklemenin olacağı doğrultunun uç bölgelerinde, bu doğrultuya dik olacak biçimde dörder adet bağlantı boşluğu bırakılmıştır. Bu bağlantı boşluklarının doğru yerde olmaları, kalıp içerisine paysız sığabilen ve beton dökümünde yer değiştirmemesi sağlanan, delik yerleri üzerine açılmış ahşap kılavuz şeritlerle sağlanmıştır. Hazırlanan kalıpların içerisine, belirtilen kılavuz şeritler sabitlenmiş, bağlantı boşluklarının oluşması amacıyla PVC borular konulmuştur (Şekil 3.10). Hazır hale getirilen temellerin beton döküm işlemi, tüm temeller için tek seferde olacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Beton dökümü sırasında yeterli yerleşmensin sağlanabilesi amacıyla şişe vibratör kullanılmıştır (Şekil 3.11). Numune temelleri beton döküm işleminin ardından, ortalama şantiye şartlarını yansıtması amacıyla, günde iki defa olmak üzere kuru yer kalmayacak biçimde sulama yapılarak kür uygulaması sağlanmıştır. Beton dökümünü izleyen beş günün sonunda kalıplar sökülmüştür. Kolonların geleceği bölgelerde mala ile düzeltme işlemi yapılmayarak kolon ve temel betonlarının ortalama beton yapışmasını sağlaması amaçlanmıştır.



Şekil 3.11: Numune temellerinin beton döküm aşaması



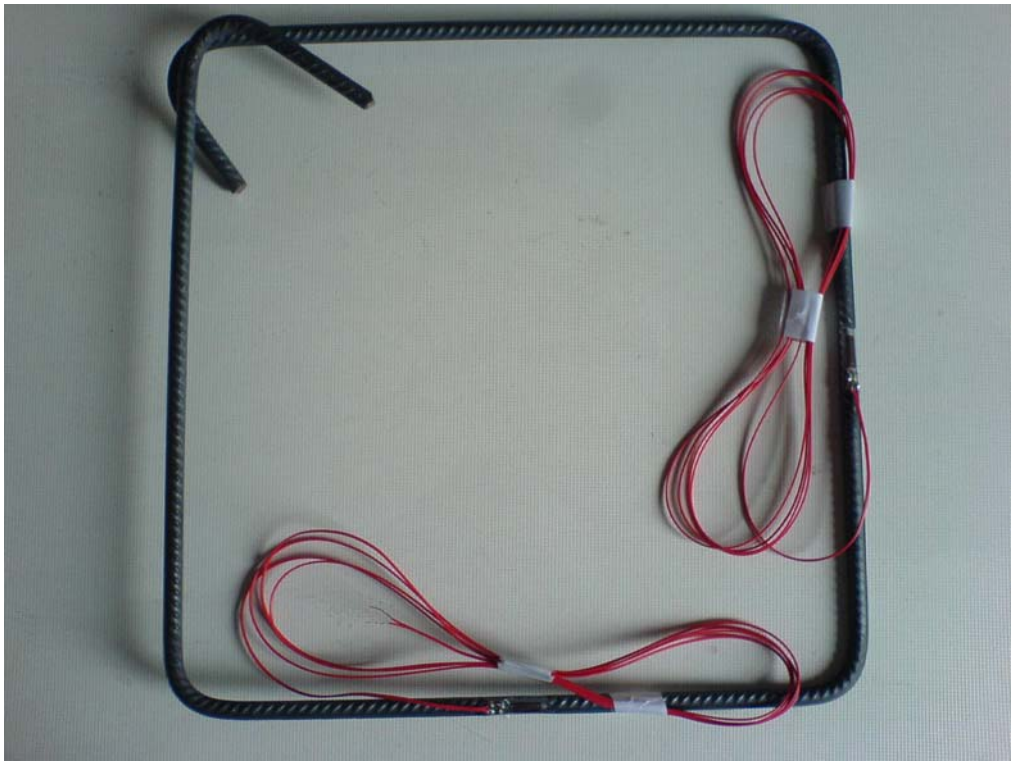
Şekil 3.12: Numune kolonlarının donatı imalatı

Numune temellerinin beton işleminin ardından, kolon donatılarının imalatına geçilmiştir (Şekil 3.12). Daha önce de belirtildiği üzere, kolon üst ucunda donatıda sıyrılma olmaması için boy donatılar bütün olarak bükülmüş ve ek kullanılmamıştır.



Şekil 3.13: Boy donatılar üzerine deformasyon pullarının yapıştırılması

Numune temelleri üzerindeki kolon filizleri, kolon donatıları yerleştirilmeden önce tasarlanan boyda kesilmiştir. Bindirme boyu bölgesinde donatılarda oluşacak gerilme değişimlerinin takibi amacıyla birim deformasyon okuma pulları (strain gauge) kullanılmıştır. Deformasyon pulları, gerilme aktarımının takibi amacıyla sadece temeller üzerindeki bazı kolon filiz donatılarına ve bindirme bölgesinde bulunan etriyenin iki kolu üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.13, Şekil 3.14). Yerleşim detayları Bölüm 3.3.2'de verilmiştir. Deformasyon pullarının yapıştırılmasından önce, yapıştırılacak noktalarda donatı üzerindeki nervürler, elle ve eğe kullanarak temizlenmiş ve tesviye edilmiştir. Zımpara kullanılarak gerektiği gibi pürüzsüz bir yüzey elde edilmiş ve yapıştırma işleminden önce asetonla temizlenmiştir. Yapıştırma için tavsiye edilen cyanoacrylate kökenli yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırma ve kabloların lehimlenmesinin ardından, deformasyon pullarının betondan ve sudan zarar görmemesi için kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin çeşitli safhalarında deformasyon pulları, bağlantıda bir aksilik olmadığının görülmesi amacıyla avometre ile kontrol edilmiştir. deformasyon pullarıyla ilgili son olarak, kablo uçlarına etiketleme ve isimlendirme yapılmıştır.



Şekil 3.14: Etriye üzerine deformasyon pullarının yapıştırılması



Şekil 3.15: Kolon donatılarının yerleştirilmesi

Deformasyon pullarının yapıştırılmasının ardından, hazırlanan kolon donatıları temellerin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.15). Donatı işlemi tamamlanan kolonlar için kalıp aşamasına geçilmiştir (Şekil 3.16).

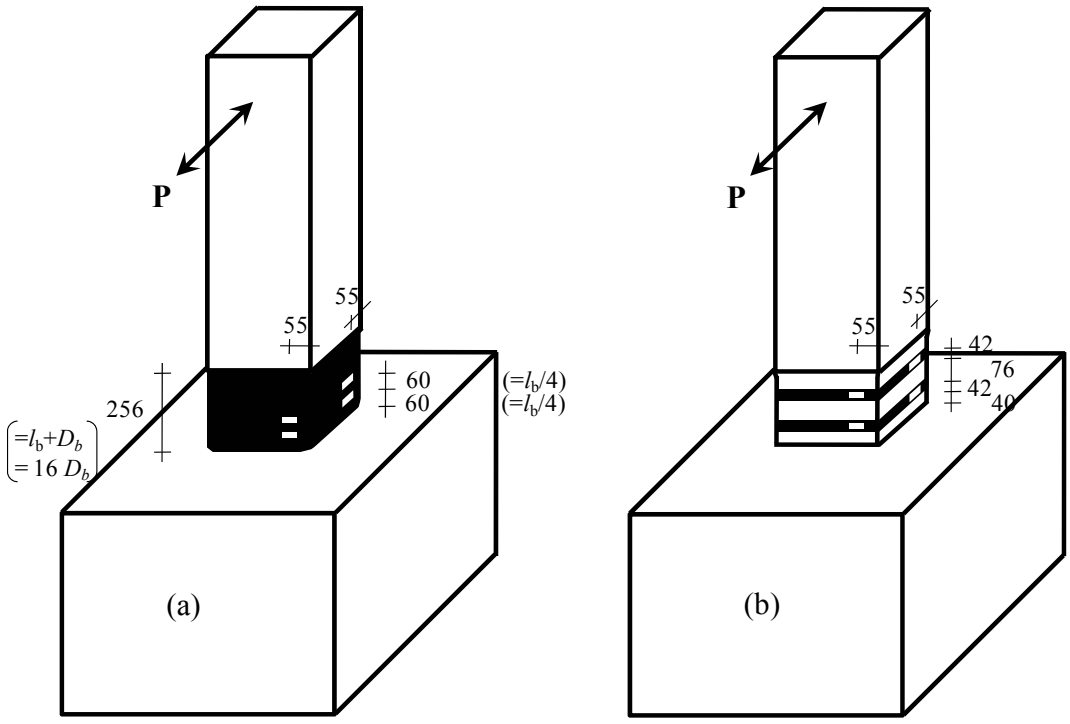


Şekil 3.16: Kolon kalıp imalatı

Kolan kalıpları hazırlandıktan sonra gerilme pullarının kabloları, bindirme bölgesinden uzakta olacak biçimde, tabandan yaklaşık 45 cm yukarıdan kalıp dışına çıkartılmıştır. Kalıp işlemi bitirildikten sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Gerçek imalat tipinde olduğu gibi beton dökümü, kolon üst ucundan yapılmış ve yerleşmenin sağlanması amacıyla şişe vibratör kullanılmıştır. Beton düküm işleminde, betonun dayanımın takibi için standart silindir numuneler alınmıştır. Betonun bakım işlemi olarak, ortalama şantiye şartlarını yansıtması amacıyla, günde iki defa olmak üzere kuru yer kalmayacak biçimde sulama yapılarak kür uygulaması sağlanmıştır. Beton dökümünü izleyen beş günün sonunda kalıplar sökülmüştür.

3.3.4. Lifli polimer kullanım detayları

Yetersiz bindirme boyu bulunan kolonların, argdgerme uygulanmış lifli polimerlerle çevresel aktif sargılama gerilmesi oluşturularak güçlendirilmesinin incelendiği bu çalışmada, karşılaştırma amacıyla pasif FRP sargılama da yapılmıştır. Pasif FRP sargılama yaygın olarak bilinen tanımı ile FRP sargılama uygulamasıdır. Bu çalışmada, Şekil 3.17'de şematik olarak gösterildiği üzere, farklı iki tip pasif sargılama yapılmıştır.



Şekil 3.17: Numunelere uygulanmış olan pasif FRP sargılamaların şematik gösterimi (ölçüler mm'dir)

Bu sargılamalardan ilki, Şekil 3.17 (a)'da görülen boşluksuz ve aralıksız yapılan FRP sargılamadır. Araştırılan konunun bindirme boyu problemi olduğu için, sadece bu bölge yüksekliğinde sargılama yapılması ve oluşturulacak sargılama gerilmelerinin bu bölgeyi aşmaması amaçlanmıştır. Tüm bindirme boyu yüksekliğince yapılan sargılamada, 3 kat CFRP kullanılmıştır. Bu tip sargılama işçilik açısından kolay olmakla birlikte, malzeme tüketiminin en fazla olduğu sargılamadır.

Kullanılan ikinci tip pasif sargılama metodu, Şekil 3.17 (b)'de görüldüğü üzere şerit biçiminde kesilmiş lifli polimerin kullanıldığı sargılamadır. Bu sargılama tipinde, doğrudan öngermeli FRP sargılama yöntemi ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, aynı sargılama yüzey genişliği olan 42 mm kullanılmıştır. Her ne kadar bir sonraki bölümde açıklanacağı üzere, aktif sargılamada şerit genişliği 40 mm olsa da, sargılama gerilmesini betona aktaran genişlik 42 mm'dir. Benzer biçimde karşılaştırma yapılabilmesi açısından aktif sargılamada olduğu gibi 2 kat CFRP kullanılmış ve şerit yerleşiminde de aynı değerler kullanılmıştır. Şeritlerin kolon üzerine uygulandığı ölçüler, Şekil 3.17 (b)'de yer almaktadır.

Yukarıda anlatılan her iki tip sargılama uygulaması için de, kullanılan FRP boyutları dışındaki tüm işlemler aynıdır. Bu çalışmada FRP sargılama uygulamaları, gerçek durumda olduğu gibi numuneler eksenel yük altında iken yapılmıştır. Uygulamadan önce kolon köşeleri, literatürde geçen en uygun şekliyle, 25 mm çapında pahlanarak yuvarlatılmıştır. Beton yüzeyler, var olan zayıf parçacıklar giderilerek ve basınçlı hava yardımıyla tozdan arındırılarak uygulamaya hazır hale getirilmiştir. İstenilen boyutlarda kesilen karbon lifli polimer, epoksi bazlı reçine kullanılarak yüzeye gergin biçimde yapıştırılmıştır. FRP'nin kendi içerisinde bindirme boyu olarak 200 mm seçilmiş ve her parça bu miktar uzunluğunda fazla kesilerek uygulama yapılmıştır. Uygulama sonrasında 5 gün epoksi kürlenme süreci sağlanmıştır.

Deneyler sırasında FRP üzerindeki gerilme değişiminin izlenebilmesi için, 5 mm'lik deformasyon pulları kullanılmıştır. FRP üzerine yapıştırılan deformasyon pullarının yerleşimi, Şekil 3.17'de görülmektedir. Yüklemeye dik ve paralel olan iki yüzde ve iki farklı yükseklikte okuma alınmıştır. Deformasyon pulları, gerilmenin yüksek olduğu köşe bölgelere yakın konumlandırılmıştır.

Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da yapılan pasif sargılama uygulamaları görülmektedir.



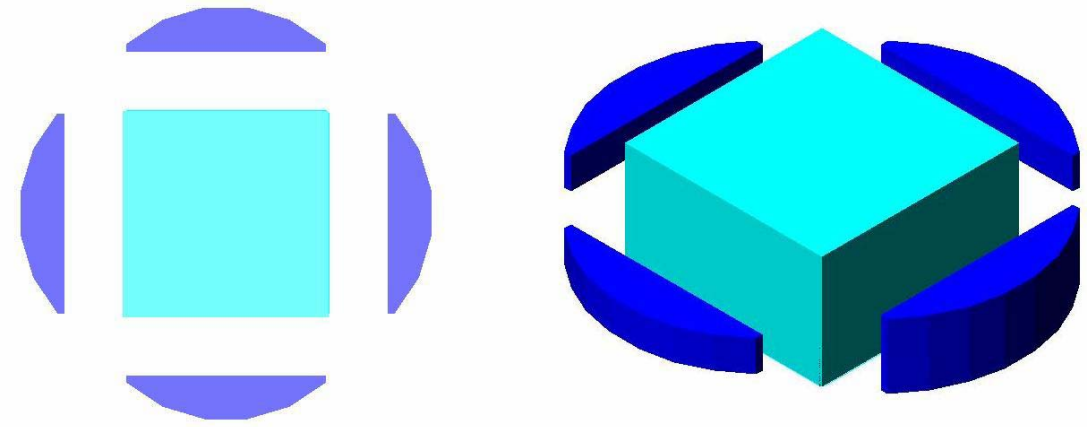
Şekil 3.18: Tüm bindirme boyu uzunluğunca yapılan pasif FRP sargılama



Şekil 3.19: Şerit olarak uygulanan pasif FRP sargılama

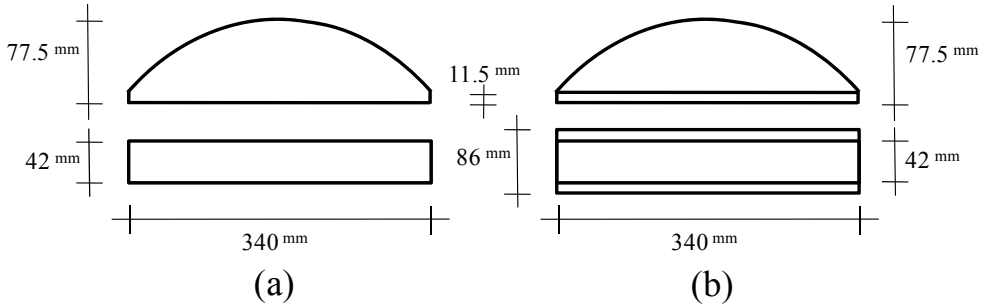
3.3.5. Lifli polimer ardgerme sistemi (FRP aktif sargılama aparatı)

Bu çalışmada, öngerilmeli lifli polimer yardımı ile betonarme kesit üzerinde ardgerme uygulaması sonucu, aktif sargılama gerilmesi oluşumu sağlanmıştır. Bu güne kadar kullanılmış olan ardgerme FRP sargılama sistemleri, genleşen harç kullanan ardgerme yöntemi ve doğrudan ardgerme yöntemi olarak genelleştirilirse, bu çalışmada kullanılan teknik, doğrudan ardgerme ailesinde sınıflandırılabilir. Yapılan uygulamada diğer doğrudan ardgerme tekniklerinden farklı olarak, FRP ile betonarme kesit arasına köşeleri ortadan kaldıracak bir form oluşturan, çelik dolgu malzemeleri yerleştirilmiştir. Bu form dolgu parçaları konulduktan sonra tam bir daire şeklini almakta ve FRP'nin liflerine dik olan herhangi bir kuvvetin ya da gerilme yığılmasının oluşmasını engellemektedir (Şekil 3.20). Dolayısıyla FRP üzerindeki gerilme dağılımını etkileyen ve değiştiren tek parametre, ardgerme uygulandığında FRP'nin kendi üzerindeki ve dolgu parçaları üzerindeki sürtünme olmaktadır. Bu kullanımla birlikte, lifli polimer üzerinde oluşan eksenel çekme kuvvetinin, kare olan betonarme kesite tam bir çevresel sargılama gerilmesi olarak geçebilmesi ve lifli polimer üzerinde kolon köşelerinden dolayı olumsuz bir etkinin görülmemesinden öte hiç oluşmaması hedeflenmiştir.



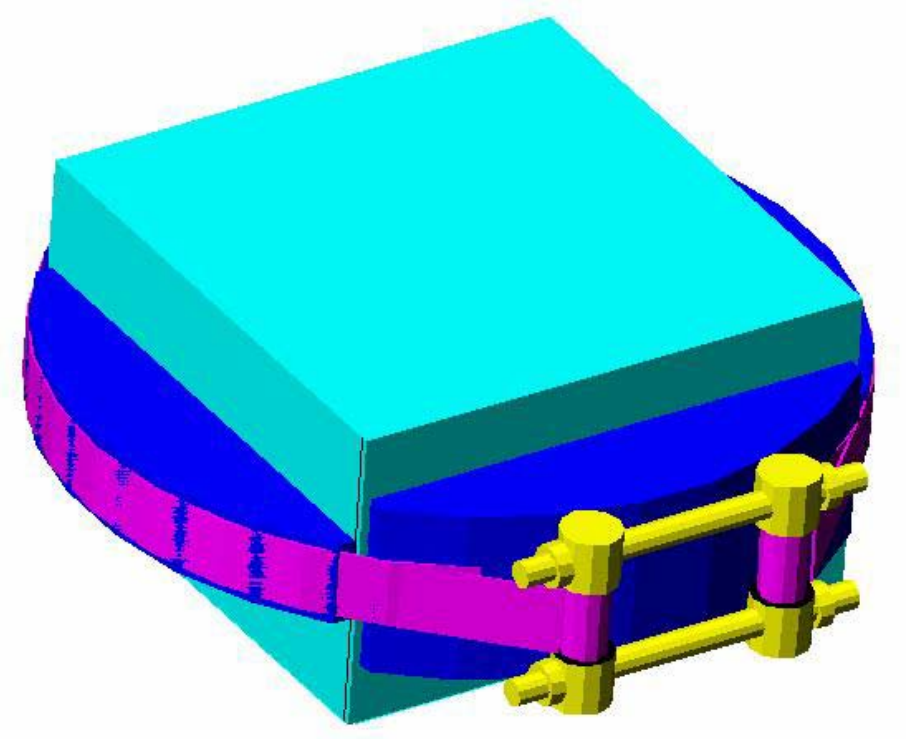
Şekil 3.20: Lifli polimer, betonarme kolon arasında kalan ardgerme dolgu parçaları

Öngerilmeli FRP ile beton kesit arasında kalan dolgu parçalarının boyutları, Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.21: Ardgerme dolgu parçalarının boyutları

Toplamda kolonun dört yüzeyine gelecek şekilde, her bir ardgerme şeridi için Şekil 3.21 (a)'dan üç, (b)'den bir adet üretilmiştir. (b) parçasının ön yüzden bakıldığında yüksek olmasının nedeni, FRP şeridi tutan silindirlerin şerit genişliği olan 42 mm'den büyük olma zorunluluğu ve bu fazlalık kısmında dolgu parçasına dayanması gerekliliğidir. Bu durum Şekil 3.22'de yer alan şematik çizimde görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.21 (b) parçasının kolona dayanan yüzeyi sargılama alanının değişmemesi için girinti yapılarak azaltılmış ve (a) parçasıyla aynı boyuta getirilmiştir.



Şekil 3.22: Lifli polimer (CFRP) ardgerme sistemi genel görünümü

Lifli polimer, kesit çevresini sisteme uygun şekilde saracak biçimde ve bindirme payıyla birlikte iki kat olacak uzunlukta, belirlenen genişlikte kesilmiştir (Şekil

3.23). Şerit genişliği 40 mm olarak seçilmiştir. Bu genişliğin seçiminde, uygulanacak FRP de oluşacak kuvvet ile mekanik ardgerme sisteminde oluşacak gerilmelerin erken kopmayı önleyecek değerlerde tutulması ve mümkün olduğunca az miktarda lifli polimerin kullanımının sağlanması koşulları göz önüne alınmıştır. Ardgerme dolgu parçaları Şekil 3.21'de görüldüğü gibi CFRP şeritlerden 2 mm daha geniş imal edilmiştir. Bunun nedeni, dolgu parçaları üzerinde gerilen liflerin hiçbirinin, bu işlem sürecinde dolgu parçalarının üzerinden taşmaması ve kullanılan tüm şerit genişliğinin sargılama gerilmesi oluşumuna katılımının sağlanmasıdır.



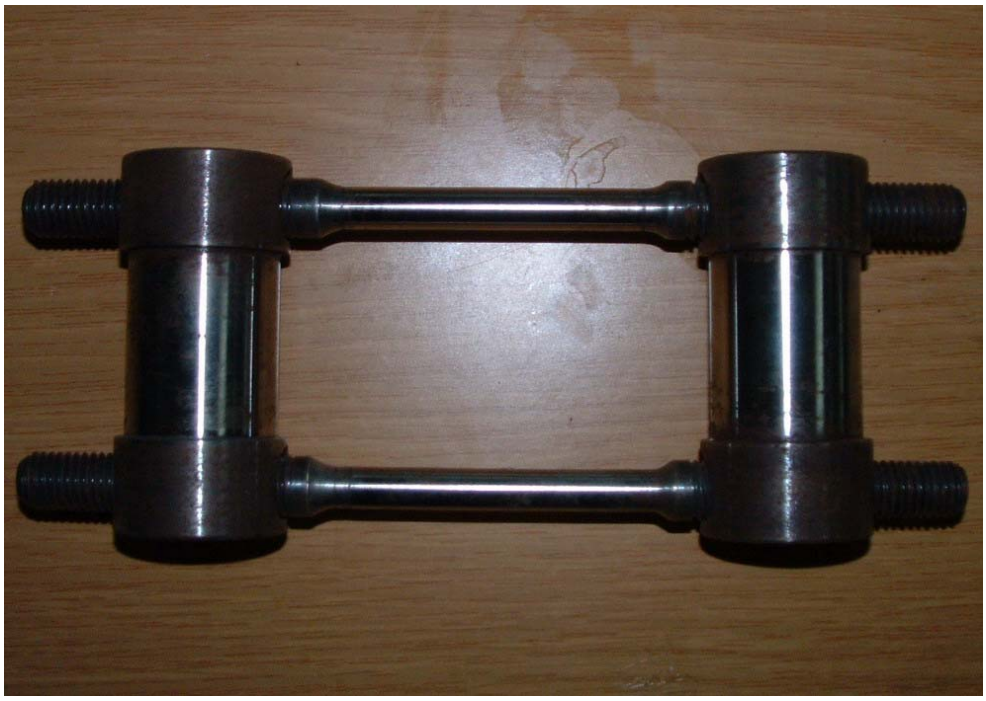
Şekil 3.23: Karbon lifli polimerin (CFRP) hazırlanması

Lifli polimerin uçları, 150 mm'lik indirme boyu kadar ve kuruduğunda dolgu parçasının şeklini alabilmesi için parçanın üzerinde olacak biçimde, epoksi bazlı yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmiştir (Şekil 3.24). Bu işlem sonucunda, 150 mm'lik parçası epoksi emdirilmiş ve şekillendirilmiş, çember biçiminde kapalı bir FRP şerit elde edilmiştir.

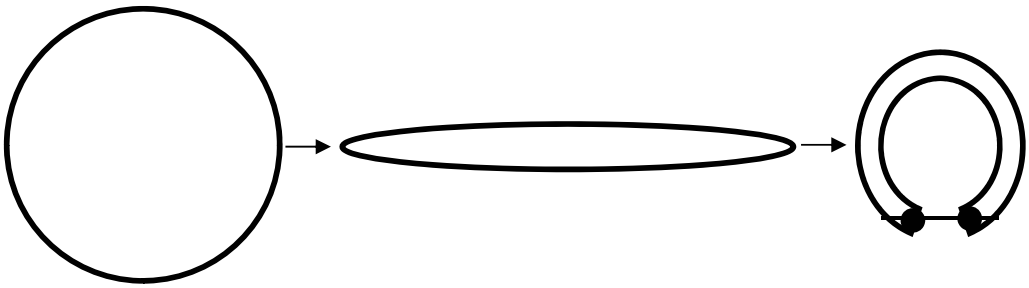
Dolgu parçalarının, kolon üzerinde belirlenen konuma getirilmesi sağlanmış ve üzerine daha önceden hazırlanış çember şeklindeki FRP şerit yerleştirilmiştir. Lifli polimere öngerilme verebilmek için Şekil 3.25'de görülen kilitleme sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 3.24: Karbon lifli polimer uçlarının Şekil verilerek birleştirilmesi



Şekil 3.25: Lifli polimer için ardgerme kilitleme sistemi



Şekil 3.26: Şerit halindeki FRP'nin kesit üzerine yerleşiminin şematik gösterimi

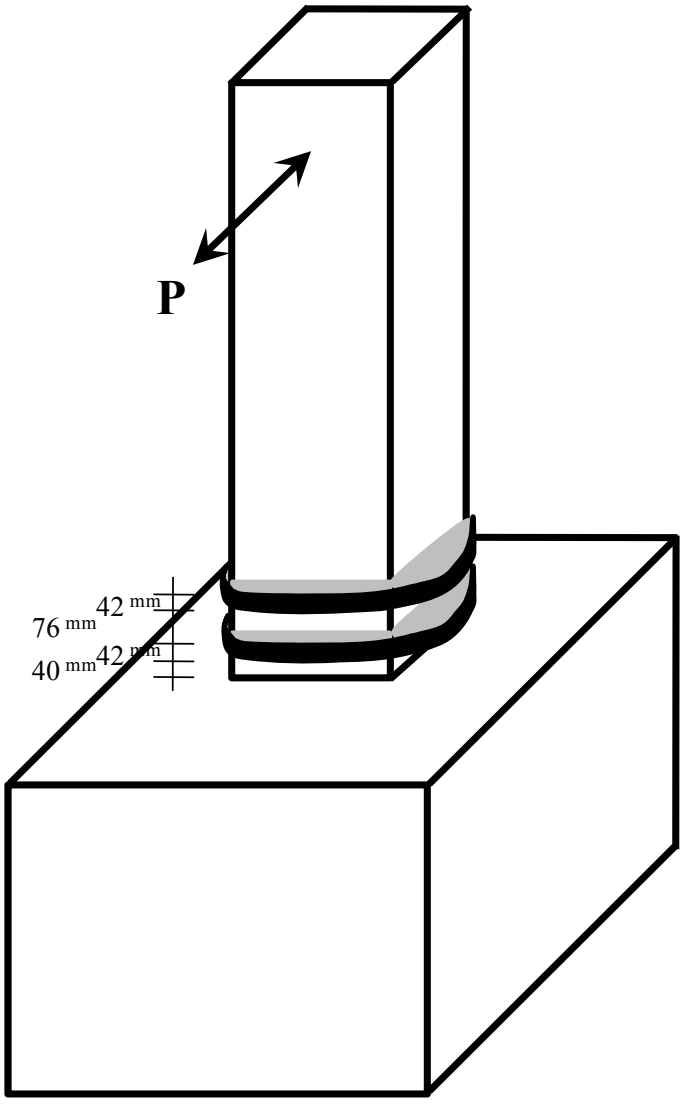
Şekil 3.26'da uçları birbirine epoksi kullanılarak birleştirilmiş, çember şeklindeki FRP şeridin, kesit üzerine yerleştirilmesi şematik olarak gösterilmiştir. Lifli polimer, Şekil 3.24'ün üst bölümünde görüldüğü gibi FRP'yi tutan büyük millerden geçirilmekte ve kolon üzerine yerleştirilen dolgu parçalarının etrafına sarılmaktadır. Ardından FRP'yi tutan büyük millerin içerisinden, Şekil 3.25'de görüldüğü şekliyle bağlantıyı ve ardgermeyi sağlayan küçük miller yerleştirilerek, somunlar yardımıyla dış taraflardan sıkılmaktadır.



Şekil 3.27: Ardgerme işleminde gerilme değerinin ölçüldüğü çubuk yük hücresi

Ardgermenin oluşturulmasında kullanılan miller, FRP şeritler üzerine verilen öngerilmenin ölçülebilmesi ve deney sırasında öngerilme miktarındaki değişimin izlenebilmesi amacıyla, çubuk yük hücrelerine (load cell) dönüştürülmüş ve kalibre edilmiştir (Şekil 3.27). Ardgermenin oluşturulabilmesi için her bir aparatta bu millerden iki adet kullanılmıştır. Bu şekilde FRP şeridin alt ve üst liflerinin eşit olarak ve dengeli biçimde gerilmesi sağlanmıştır. Millerin iki ucundaki 70 mm'lik kısımlar, M14 dişli olarak ve deformasyon pullarının yapıştırıldığı ortada kalan 70 mm uzunluk ise 10 mm çapında olacak şekilde imal edilmiştir (Şekil 3.25, Şekil

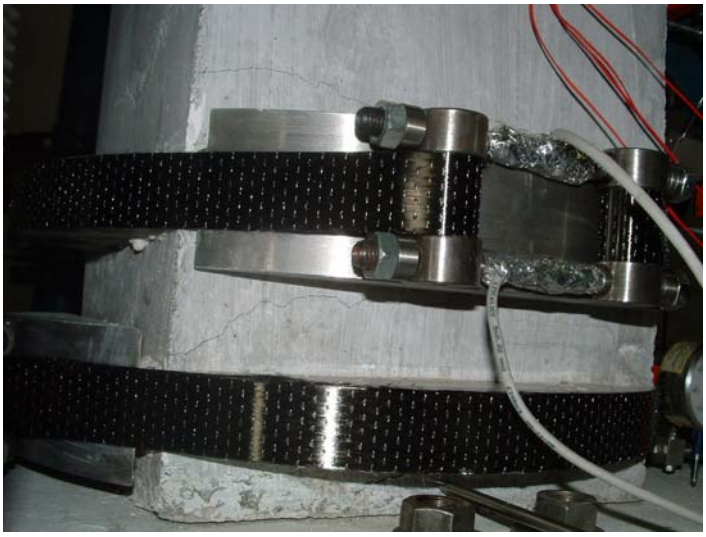
3.27). Kapalı şerit halindeki FRP'yi tutan büyük millerin çapı, dolgu parçasına dayanan dış kısımlarda 40 mm, FRP'nin üzerinden dönmüş olduğu ortada kalan kısımda ise 35 mm'dir. Parça hakkında genel görünüm Şekil 3.22 ve Şekil 3.25'de yer almaktadır. Toplam yüksekliği büyük dolgu parçası ile eşit ve 86 mm olmakla birlikte, FRP'nin üzerinden dönmüş olduğu ortada kalan kısmının yüksekliği 42 mm'dir. Aktif sargılama sisteminde, liflere epoksi emdirilmeden öngerilme verildiği için gerilme hesaplarında her bir kat için kalınlık, birim ağırlığın lif yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilmiştir (t = 0.13 mm).



Şekil 3.28: Aktif FRP sargılama aparatlarının kolon üzerindeki yerleşimi

Şekil 3.28'de görüldüğü üzere, aktif FRP sargılama aparatlarının numuneler üzerine uygulanması ve yerleşiminde, her bir aparatın bindirme boyunun eşit yüksekliğine etki etmesi prensibi gözetilmiştir. Bindirme boyu yüksekliği yaklaşık iki

eşit uzunluğa ayrılarak, kolonun yapabileceği en büyük deplasman da elastik olarak göz önüne alınıp, aparat ucunun temele çarpmayacağı nokta, yerleşim seviyesi olarak belirlenmiştir. Şerit biçiminde pasif FRP sargılamada da, bir önceki bölümde belirtildiği gibi aynı yerleşim kullanılmıştır. Sistemin uygulanmış gerçek görüntüsü, Şekil 3.29'da yer almaktadır.



Şekil 3.29: Lifli polimer (CFRP) ardgerme sistemi uygulanmış genel görünüm

3.3.6. Deney değişkenleri ve numunelerin adlandırılması

Deney numunelerine ait sabit değerler, daha önceki bölümlerde, gerekli bölüm başlıkları altında belirtilmiştir. Numunelere ait genel sabitleri kısaca özetlemek gerekirse, 1550 mm yüksekliğinde ve 350x350 mm kesit boyutlarına sahip kare kolonlar üretilmiştir. Yatay yük uygulama noktası temel üstünden 1400 mm'dir. Etkin kesme boyu oranı 4'tür. Kullanılan beton ve donatı özellikleri sırasıyla C20 ve S420'dir. Kullanılan donatılar standart nervürlü inşaat çeliğidir. Kolon boy donatıları, kesitte 8 adet Ø16 şeklindedir. Kesitte boy donatı oranı % 1.3'tür. Paspayı olarak boy donatı çapının 1.5 katı yani 24 mm seçilmiştir. Tüm boy donatılar için yapılan bindirme yani donatı ekleme işlemi, kolon alt ucunda ve 15 D_b (240 mm) uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Lifli polimer uygulanan tüm numunelerde, birim ağırlığı 230 gr/m^2 olan karbon lifli polimer (CFRP) kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan değişkenler özetle, eksenel yük seviyesi, sagılama tipi, aktif sargılama öngerilme seviyesi, pasif sargı tipi ve numunelerin hasar görmüş yada

görmemiş olması şeklinde özetlenebilir. Kolonlara ait genel sabit ve parametreler Tablo 3.5'de verilmiştir.

Eksenel yük seviyesi iki farkı seviye olarak belirlenmiş ve uygulanmıştır. Toplam 12 numunenin 8 tanesi N/N_0 = 0.25, kalan 4 tanesi ise N/N_0 = 0.10 eksenel yük seviyesinde test edilmiştir (Tablo 3.5). Belirtilen değerler planlama aşamasında kararlaştırılan nominal değerler olup, deneyler sırasında uygulanan gerçek eksenel yük oranları, sırası ile 0.29 ve 0.11'dir. Bu hesaplarda net beton alanı ile işlem yapılmıştır. Tüm sargılama uygulamaları, hasar görmüş eleman deneylerinde tamir ve sonrasında yinelenen sargılama işlemleri, eksenel yük kaldırılmadan yapılmıştır.

Aktif FRP sargılama uygulamalarının tümünde, Bölüm 3.3.5'da belirtildiği üzere, 40 mm genişliğinde, iki kat karbon lifli polimer kullanılmıştır. 240 mm'lik bindirme boyu üzerinde yerleşim detayları yine Bölüm 3.3.5'da verilmiş olan iki adet aktif FRP sargılama yapılmıştır. Başlangıç CFRP öngerilme değerleri olarak, 250 MPa, 500 MPa ve 1000 MPa kullanılmıştır. Öngerilme değerleri, aktif sargılama aparatındaki çubuk yük hücrelerinden elde edilen toplam yükün, CFRP'nin kesit alanına bölünmesi ile elde edilmiştir. Başlangıç öngerilme değerlerinin numunelere göre değişimi Tablo 3.5'de verilmiştir.

Pasif sargılama olarak, Bölüm 3.3.4'detayları verilen iki tip farklı uygulama kullanılmıştır. Bu iki uygulama, tüm bindirme boyunun 3 kat FRP ile sargılama ve 40 mm genişliğinde iki kat FRP şerit halinde sargılama uygulamalarıdır. Pasif sargılama uygulamalarının numunelere göre değişimi yine Tablo 3.5'de görülmektedir.

Bazı numuneler, hasar görmüş elemanlarda sistemin işlerliğinin görülmesi için %4 göreli ötelenme sonrasında tamir edilip, aktif FRP sargılama uygulanarak test edilmişlerdir. Bu numunelerde başlangıç FRP öngerilme değeri 1000 MPa olarak uygulanmıştır (Tablo 3.5).

Bir numunede, aktif sargılama ile birlikte yükleme doğrultusundaki temel-kolon birleşim bölgelerinde çelik köşebentler kullanılmıştır. Korniyerli uygulama, deney sonuçları kısmında detaylı olarak anlatılmaktadır.

Tablo 3.5: Deney numuneleri ve değişkenler

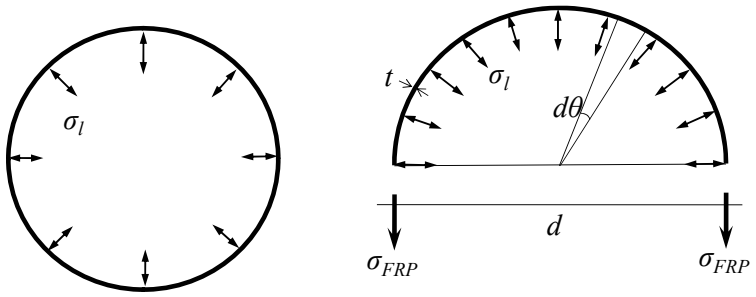
Numune Adı	Eksenel Yük N/N_0	Hasar (%)	FRP Sargılama	FRP katman sayısı	FRP şerit Genişliği (mm)	FRP Öngerilme (MPa)
CL-N1-D0-CFRP00	0.25	---	---	---	---	---
CL-N1-D0-CFRP1P	0.25	---	Pasif	3	256	---
CL-N1-D0-CFRP2P	0.25	---	Pasif	2	42	---
CL-N1-D0-CFRP1A	0.25	---	Aktif	2	40	1000
CL-N1-D0-CFRP2A	0.25	---	Aktif	2	40	500
CL-N1-D0-CFRP3A	0.25	---	Aktif	2	40	250
CL-N1-D1-CFRP1A	0.25	4	Aktif	2	40	1000
CL-N1-D1-CFRP1AC	0.25	4	Aktif	2	40	1000
CL-N2-D0-CFRP00	0.10	---	---	---	---	---
CL-N2-D0-CFRP1P	0.10	---	Pasif	3	256	---
CL-N2-D0-CFRP1A	0.10	---	Aktif	2	40	1000
CL-N2-D1-CFRP1A	0.10	4	Aktif	2	40	1000

CL-	**N1-**	**D0-**	**CFRP00**	**C**
	2	**1**	**01**	
			1P	
			2P	
			1A	
			2A	
			3A	

Şekil 3.30: Numune isimlendirme anahtarı

Şekil 3.30'da isimlendirme anahtarı yer almaktadır. Numunelerin adlandırılmasında CL ön kodlaması kullanılmıştır. Tüm numune isimleri bu iki harfle başlamaktadır. Takip eden kodlamada, eksenel yük bilgisi yer almaktadır. N harfi ile simgelenen bu bilgide, N harfinin ardından 1 ile N/N_0 = 0.25, 2 ile N/N_0 = 0.10 eksenel yük seviyeleri tanımlanmıştır. Ardından numune hasar durumunun belirtildiği D kodlaması gelmektedir. D0 ile numunenin başlangıçta hasarsız olduğu, D1 ile numunenin önceden % 4 göreli yanal ötelenmeye kadar hasara maruz kaldığı ve

tamir edildiği anlatılmaktadır. En son grup olan CFRP ile başlangıç kodlaması yapılan bölümde sargılama tipi belirtilmiştir. CFRPXX ifadesinin en son iki karakterinin 00 olması, numuneye sargılama uygulanmadığını, referans numunesi olduğunu göstermektedir. P harfi ile sargılama tipinin pasif, A harfi ile aktif olduğu belirtilmektedir. 1P tüm bindirme boyu yüksekliğinde yapılan pasif sargılamayı, 2P şerit halinde uygulanan pasif sargılamayı göstermektedir. 1A, 2A ve 3A kodlaması sırası ile 1000 MPa, 500 MPa ve 250 MPa başlangıç öngerilmesi ile yapılan aktif sargılamayı işaret etmektedir. Şekil 3.30'da, kesitte elde edilen sargılama gerilmeleri gösterilmektedir. Denklem 3.1 ile Denklem 3.4 arasındaki ifadeler kullanılarak, kesit üzerinde oluşturulan sargılama gerilmeleri elde edilmektedir.



Şekil 3.30: Kesitte sargılama gerilmeleri

$$2\sigma_{FRP}\, t\, h = \int \sigma_l \, dA \tag{3.1}$$

$$dA = h\, dS \tag{3.2}$$

$$dS = \frac{d}{2} d\theta \tag{3.3}$$

$$\sigma_l = 2\frac{t}{d}\sigma_{FRP} \tag{3.4}$$

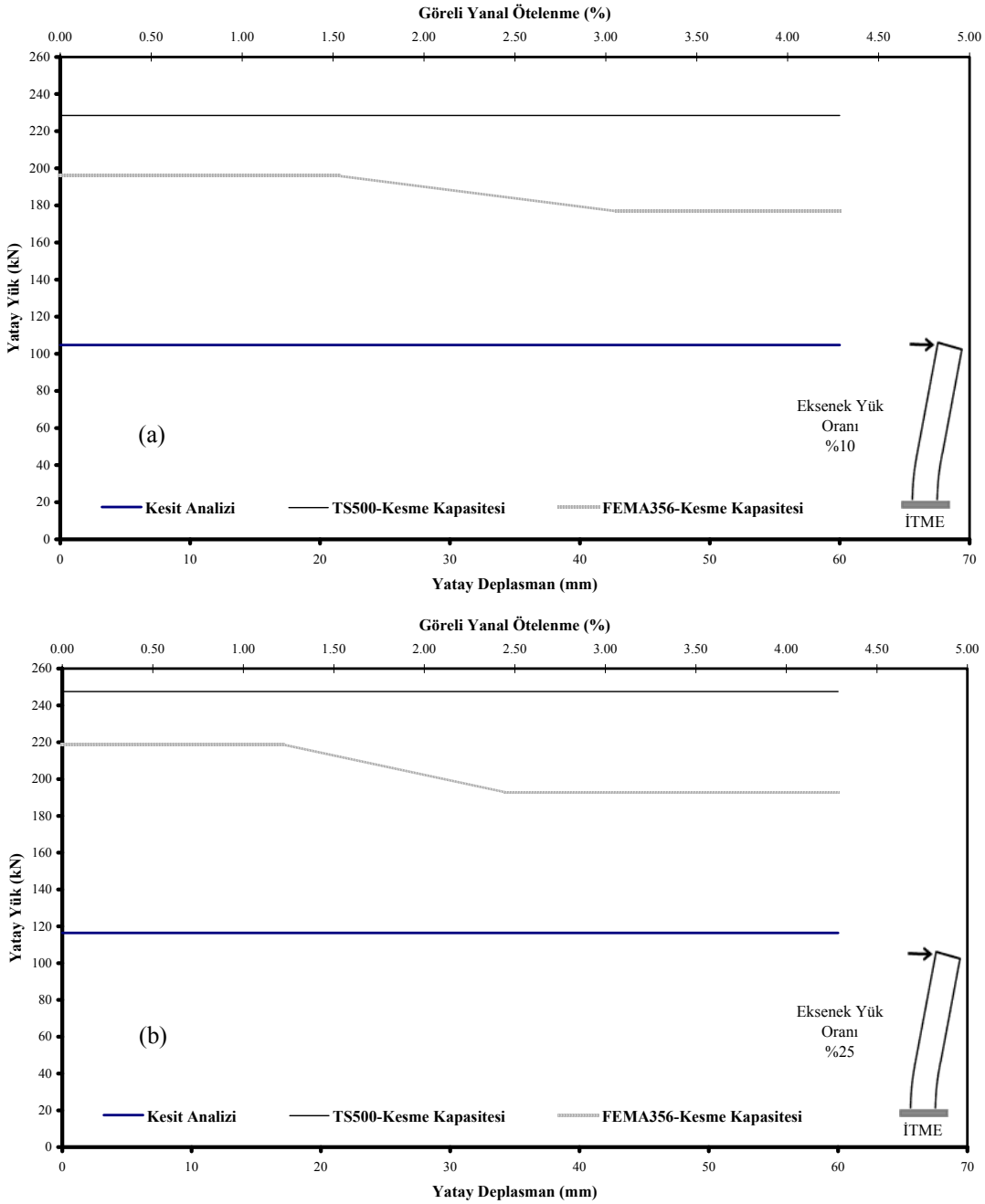
Verilen denklemler yardımı ile FRP üzerine uygulanan ve çubuk yük hücreleri ile değeri takip edilen kuvvet, FRP kalınlığı (t) ve genişliği (h) kullanılarak eksenel çekme gerilmesine çevrilmiştir. Ardından, Şekil 3.30'da görüldüğü gibi kesit üzerine aktarılan sargılama gerilmelerinin, FRP uçlarındaki eksenel gerilmeye paralel olan bileşenleri integrasyon yardımı ile toplanarak eşitlik kurulmuştur. Sonuç olarak Denklem 3.4 elde edilerek sargılama gerilmesi değerine ulaşılmıştır [21].

Aktif FRP sargılamada, beton yüzey ile FRP şeritler arasında dolgu parçaları kullanılarak kesitin dairesel forma dönüştrülmesi sağlandığından, oluşturulan sargılama gerilmeleri, doğrudan Denklem 3.4 kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre kesitte aktif sargılama ile oluşturulan sargılama gerilmeleri, 1000 MPa, 500 MPa ve 250 MPa FRP başlangıç öngerilmesi değerleri için sırasıyla, 1.03 MPa, 0.52 MPa, 0.26 MPa olarak hesaplanmıştır. Verilen değerler, şeritlerin altında elde edilen sargılama gerilmesi değerleridir.

Numune adlandırma sisteminde, en sonda kullanılan C harfi, belirtildiği üzere yalnızca bir numunede, olası taban kaymasını engelleme amacı ile kullanılan korniyer uygulamasını göstermektedir.

Tablo 3.5'de numunelerin özelliklerinde de görüldüğü üzere çalışmadaki temel amaç, farklı tekniklerle FRP sargılama yapılmış, genel anlamda şartnamelere göre yetersiz bindirme boyu ile imal edilen kolonlarda, aynı özelliklerdeki yetersiz bindirme boyu bulunduran referans kolona kıyasla, göreli olarak elde edileceği düşünülen iyileştirmenin ortaya konulmasıdır. Bu nedenle çalışmada, genel anlamda şartnamelere göre yeterli bindirme boyu bulunduran kolon imalatı yapılmamıştır.

Aynı şekilde bindirme boyu sürekli olan bir numune, çalışmada üretilip test edilmemeiştir. Bunun yerine, kullanılan numune özellikleri temel alınarak, tasarım sürecinde yapıldığı üzere aderansın tam ve yeterli oladuğu varsayımı ile teorik kapasite değeri hesaplanmıştır. Numunelere ait kesit analizinden elde edilen yük kapasitesi değeri, TS500'e ve FEMA 356'ya göre hesaplanmış olan kesme kapasitesi değerleri, eksenel yük seviyelerine göre Şekil 3.31'da verilmiştir. Kesit analizinden elde edilen kapasite değerleri, idealize edilmiş değerleri yansıtmaktadırlar. Analizde, bindirme bölgesinde bulunan, sargılama donatısı yerleşimi göz önüne alınmıştır. Kesit analizi sonucunda bu çalışmada kullanılan özelliklerdeki, donatı bindirme boyu problemi olmayan kolona ait yatay yük kapasite değerleri, eksenel yük oranı % 25 olan durumda 116.36 kN, % 10 olana durumda ise 104.71 kN olarak elde edilmiştir. İki farklı şartnameye göre hesaplanan ve Şekil 3.31'de grafiksel olarak gösterilen kesme kapasitesi değerlerinden, numunenin eğilme etkin davranış sergileyeceği görülmektedir.



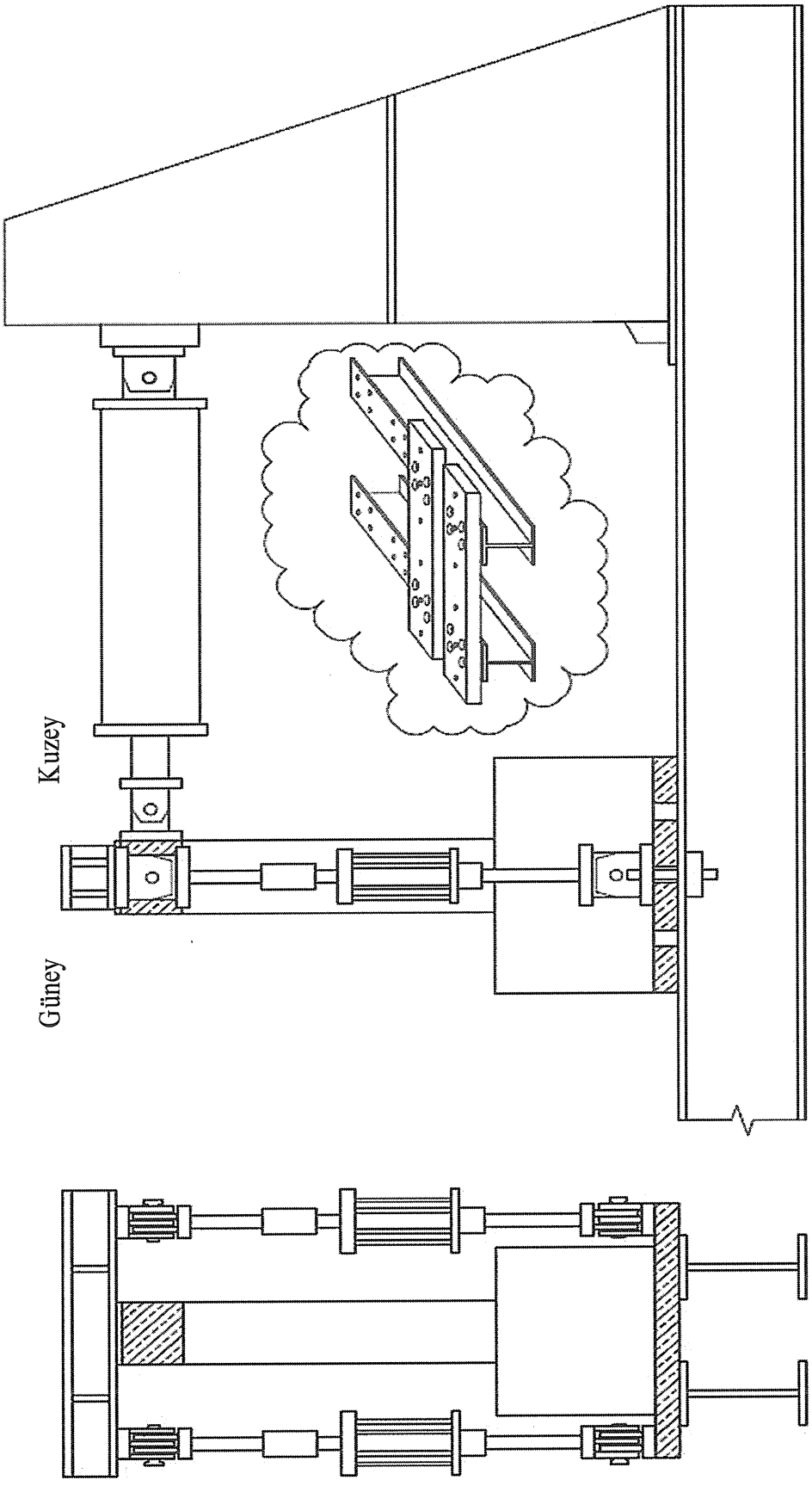
Şekil 3.31: Numune teorik kapasiteleri, (a)eksenel yük oranı %10, (b)eksenel yük oranı %25

3.4. Yükleme Sistemi

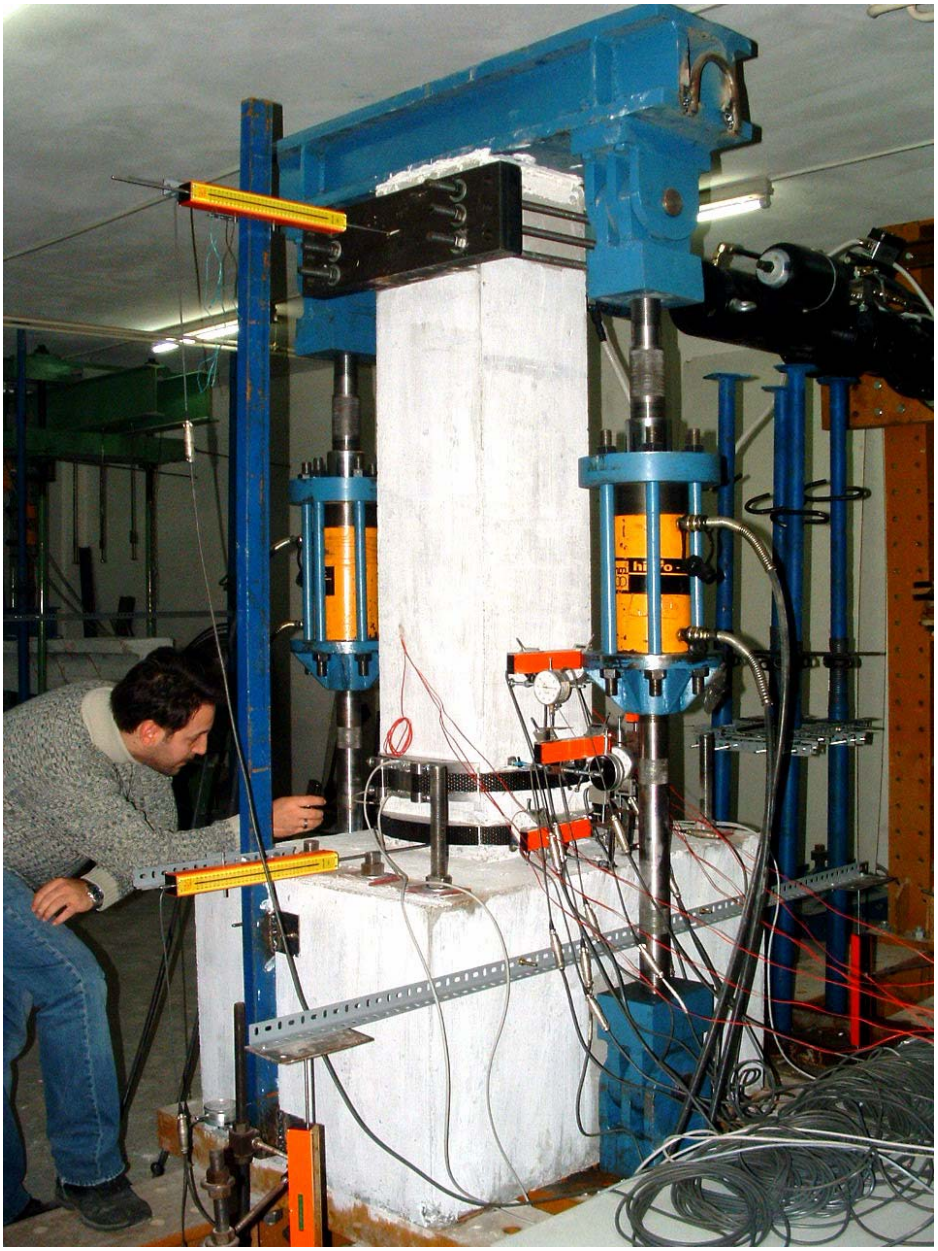
Deneyler, Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler için 400 kN / 400 mm kapasiteli, deplasman ve yük kontrollü hidrolik yükleme sistemi kullanılmıştır. Deneyler, deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme pistonu, deneylerin yapıldığı kuvvetli duvar ve güçlü döşeme sistemi, Şekil 3.32'de görülmektedir.

Numunelere eksenel yük verebilmek amacıyla, boyu ayarlanabilen ve güçlü döşemeye bağlanarak kendi içinde kapalı çerçeve oluşturan bir sistem üretilmiştir. Eksenel yük sistemi 1200 kN kapasiteye sahiptir. Deneylerde, eksenel yük seviyesi test boyunca kontrol altında ve belirlenmiş olan yük seviyesinde sabit tutulmuştur. Eksenel yük sistemi Şekil 3.32'de, kolon üzerine uygulanmış şekilde görülmektedir.

Şekil 3.33'de deney numunesi, eksenel yük sistemi, kolona bağlı yatay yük hidrolik yükleme sistemi ve ölçüm cihazları birlikte yer almaktadır. Örnek olarak verilen bu görüntüdeki kolon, öngerilmeli FRP uygulaması yapılmış, ön hasar uygulanmamış numunedir.



Şekil 3.32: Yükleme sistemi ve numune yerleşimi



Şekil 3.33: Yükleme sistemi ve test kolonuna ait genel görünüm

3.5. Veri Toplama Sistemi ve Yerleşimi

Deneyler sırasında DC voltaj üreten ve deformasyon pullarının doğrudan bağlanabildiği, 30 kanallı veri toplama cihazı kullanılmıştır.

Yatay yük, yükleme sisteminin üzerinde bulunan yük hücresi yardımıyla takip edilmiştir. Eksenel yük seviyesi, kendi üzerindeki kalibreli manometre yardımı ile deneyler öncesinde istenilen seviyede ayarlanmış ve deney süresince sabit tutulmuştur.

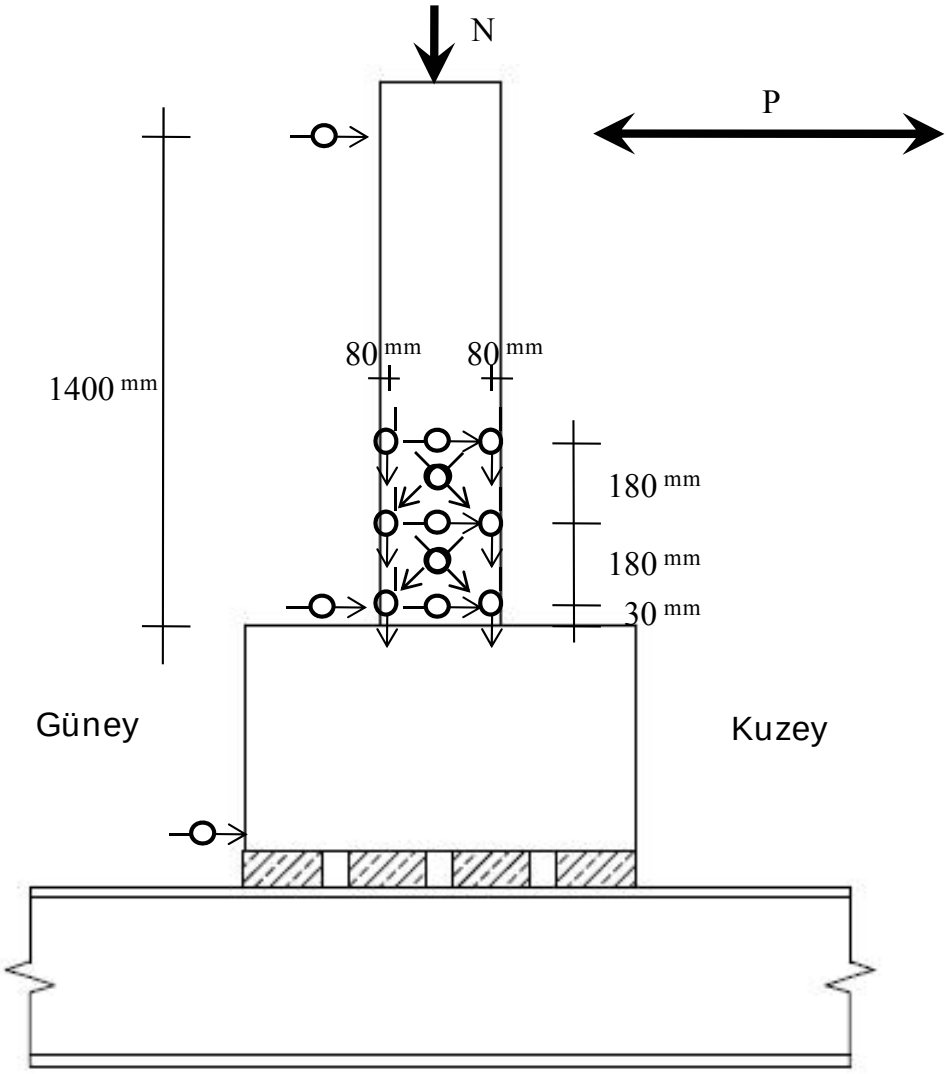
Beton içerisinde kalan deformasyon pullarının sayısı ve yerleşimi, Bölüm 3.3.2 içerinde verilmiştir. Bindirme boyu uzunluğunda 3 boy donatıda 6 adet olmak üzere, 10 mm'lik deformasyon pulu kullanılmıştır. Bu bölgede var olan etriye üzerinde iki dik doğrultuda deformasyon pulu bulunmaktadır.

FRP üzerine yapıştırılan ve bu malzeme üzerindeki gerilme değişiminin takip edildiği deformasyon pullarıyla ilgili bilgi, pasif sargılamada kullanılanlar için Bölüm 3.3.4'de yer almaktadır. Pasif sargılar üzerinde birbirine dik doğrultularda 2'şer adet olmak üzere 4 adet 5 mm'lik deformasyon pulu yerleştirilmiştir. Aktif sargılamanın oluşturulduğu öngerilme uygulanmış FRP üzerindeki gerilmeler, kilitleyicinin bulunduğu yüzey dışındaki tüm yüzeylerde FRP üzerine yapıştırılan deformasyon pulları kullanılarak takip edilmiştir. Bu deformasyon pulları, FRP şeritlerin her iki doğrultuda da tam ortasına gelecek biçimde yerleştirilmiştir.

Tüm deplasman verileri için, 0.01 mm hassasiyetli elektronik komparatörler kullanılmıştır.

Tepe deplasmanı ve taban kayması, temele göre göreli olarak alınmıştır. Bunun için temele, 2 m uzunluğunda düşey doğrultuda rijit çelik profil bağlanmış ve bu komparatörler bağlanan profile sabitlenmiştir. Göreli tepe deplasmanı yüklemenin uygulandığı nokta olan 1400 mm den alınmıştır (Şekil 3.34). Ayrıca temelde kayma olup olmadığının kontrolü için temel alt seviyesinden deplasman okuması yapılmıştır.

Kolon tabanı açılması ve eğrilik hesaplamaları için, yüklemeye paralel bir yüzden, toplam 3 seviyenin her birinden karşılıklı iki adet olmak üzere, düşey deformasyon okumaları alınmıştır (Şekil 3.34). Bu komparatörlerin sabitlendiği noktalardan, yatay okumalar ve oluşan kapalı çerçeve içerisinden diyagonal okumalar da alınmıştır. Bu sayede kayma deformasyonları elde edilmesi planlanmıştır (Şekil 3.34). Şekliden de görüldüğü üzere seçilen seviyelerin orta kısımda kalanı, normalde oluşması beklenen plastik mafsal bölgesidir. Üstte kalan bölgedeki okumalar ise plastik mafsal bölgesinin bir adım sonrasında oluşan deformasyonların takibi amacıyla alınmıştır.



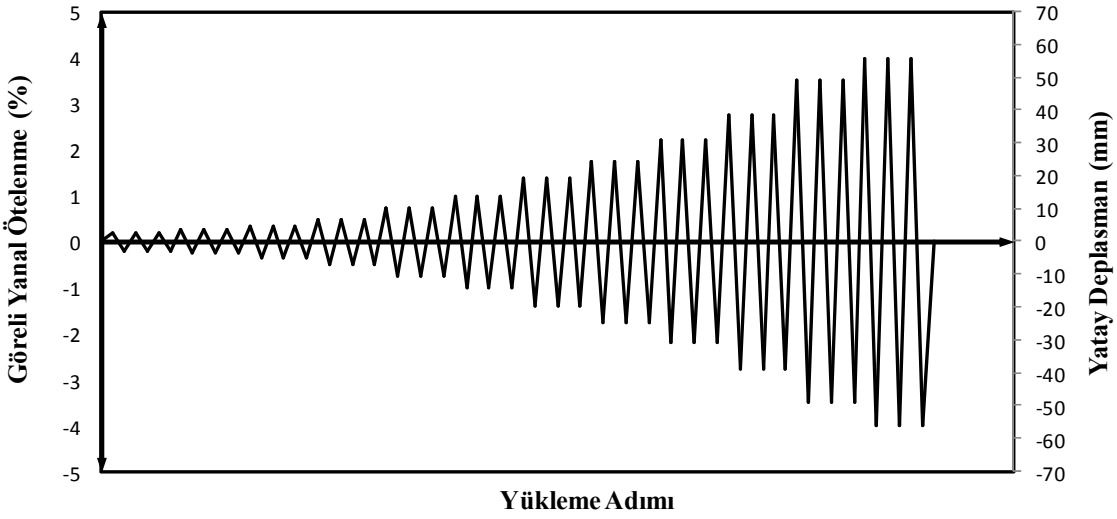
Şekil 3.34: Veri toplama sistemi yerleşimi

3.6. Yük Protokolü

Bu çalışmada kolonlar, tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmişlerdir. Kolon testleri için henüz, dünya çapında kabul edilmiş olan bir yükleme sistematiği mevcut değildir. Değişik noktalarda farklı yükleme patronları ile deneyler süregelmektedir. Bununla birlikte ACI tarafından moment taşıyan çerçevelerin test edilmesi için hazırlanmış olan bir yönerge bulunmaktadır. Bu çalışmadaki testlerin genel olarak kabul edilebilir yükleme mantığında yapılmış olması için kullanılan yükleme protokolü, yukarıda bahsedilen ACI T1.1-01 [92] temel alınarak hazırlanmıştır. Yükleme adımlarında takip edilen göreli yanal ötelenme değerleri, yüzdelik ve gerçek (mm) değer olarak Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Deneylerde kullanılan yükleme protokolü yatay deplasman değerleri

Yük adımı	Göreli Öteleme (%)	Göreli Öteleme (mm)
1	0.20	2.8
2	0.25	3.5
3	0.35	4.9
4	0.50	7.0
5	0.75	10.5
6	1.00	14.0
7	1.40	19.6
8	1.75	24.5
9	2.20	30.8
10	2.75	38.5
11	3.50	49.0
12	4.00	56.0



Şekil 3.35: Deneylerde kullanılan yükleme protokolü

Şekil 3.35'de görüldüğü üzere, Tablo 3.6'nın her bir adımında yer alan yatay deplasman değerleri, her iki yönde (itme-çekme) üçer kez uygulanmıştır. Başlangıç noktasında başlaması ve bitmesi koşuluyla, bu değerlerin itme-çekme (+/-) hareketi birlikte düşünüldüğünde, bir çevrimi oluşturulmakta ve her bir adımda üç çevrim gerçekleştirilmiş durumdadır. Yüklemeye tüm numuneler için, itme yükü ile başlanmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Giriş

Bu bölümde, depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yükleme ile yapılmış olan, 12 adet kolon testinde elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Numunelere, yükleme sistematiğine ve ölçme yöntemine ilişkin detaylar, Bölüm 3'de verilmektedir. Her bir kolon numunesinin davranışı, yatay yük-yatay deplasman ilişkisi, yatay deplasman bileşenlerin dağılımı, bu bölümde detaylandırılmaktadır. Tüm deneyler, numunelerin imalatında olduğu gibi Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

4.2. Test Numunelerinin Deneysel Davranışı

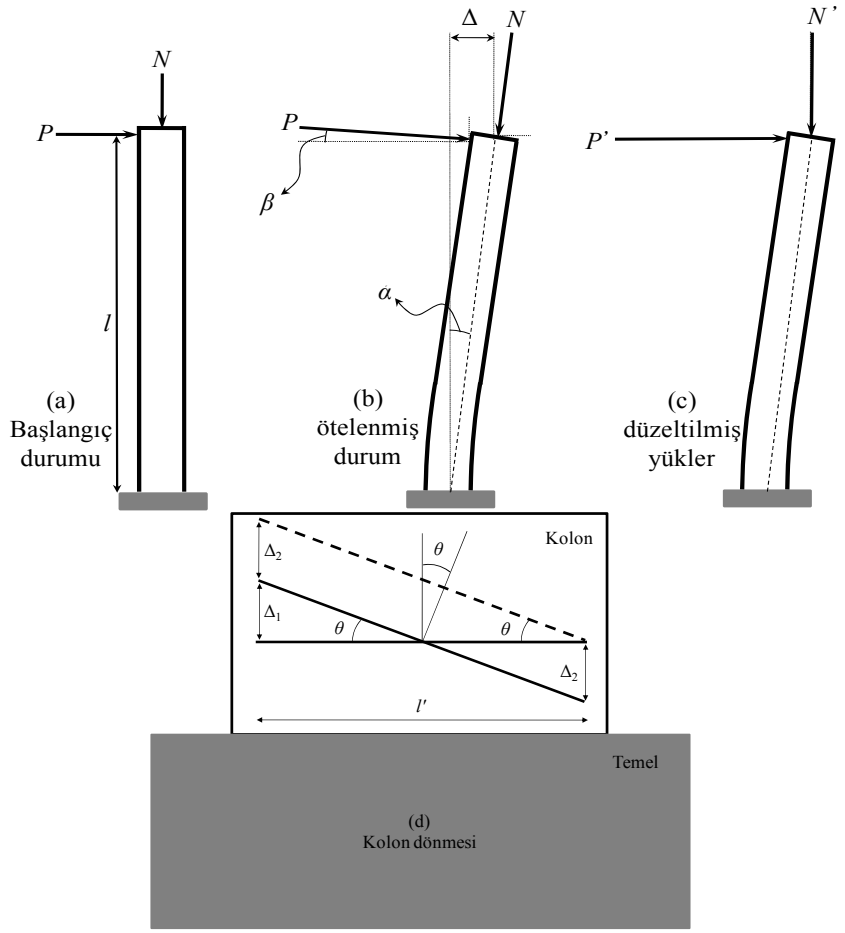
Aynı yükleme protokolü kullanılarak yapılmış olan 12 adet kolon deneyine ait, gözlemsel davranış sonuçları, hasar gelişim adımları ve çevrimsel yatay yük-yatay deplasman ilişkileri, bu bölümde sunulmaktadır. Bölümün alt başlıkları olan kolon numunelerinin adlandırılmasına ilişkin açıklama, Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır.

Yatay yük-yatay deplasman ilişkisi ile yatay yük-göreli yanal ötelenme ilişkisi, aynı grafik üzerine işlenmiştir. Bu bölüm içerisinde, her bir kolona için tüm yük çevrimlerini içeren, birer adet grafik verilmektedir. Davranışın daha net biçimde görülebilmesi amacıyla hazırlanan, her bir yük adımındaki üçer yük çevrimini içeren grafikler, Ek B'de yer almaktadır.

Davranışa ait gözlemler yazılı olarak açıklanmakta, hasar durumları yazılı ve görsel olarak verilmektedir. Akışı bozmamak amacıyla, bölüm içerisinde her bir numune için sadece son çevrime ait görüntülere yer verilmiştir. Her bir numune için belirli adımlardaki hasar durumunu gösteren görüntüler, Ek C'de yer almaktadır.

Kolon davranışını temsil eden temel değerler, her bir numune için elde edilerek tablolar halinde sunulmaktadır.

Gerek duyulduğunda kullanılmak amacıyla kolaylık sağlaması için, hidrolik yatay yükleme pistonuna göre yön kabulü kullanılmıştır. Buna göre yükleme pistonun bulunduğu taraf kuzey, diğer taraf güney olarak tanımlanmıştır. Bölüm 3.4, Şekil 3.31'de, yapılmış olan bu yön kabulü açık olarak görülmektedir.



Şekil 4.1: Yatay yük-eksenel yük düzeltmesi, eksen ve kesit dönmesi hesapları

Tersinir tekrarlanır yükleme ile yapılan, statik yükleme kullanılarak deprem yüklemesinin benzeştirildiği bu tip deneylerde, uygun değişiklik yapılmamış ise deneysel düzeneğin doğası gereği, uygulanan yatay yükün ve eksenel yükün belirli bir düzeltmeye tabi tutulması gerekmektedir. Vurgulanan deney düzeneği değişikliği, oldukça maliyetli olabilmekte, halihazırda oldukça pahalı ve zahmetli olan bu tip deneylerin yapılmasını çok fazla zorlaştırmaktadır. Çoğu zaman, belirtilen sebeplere ilave olarak uygulama kapasitelerin yetersizliği veya test alanlarının elverişsiz olması gibi çeşitli sebeplerle gerçek durumda olduğu şekliyle eksenel yük oluşturulabilen deney düzeneklerinin kullanılması mümkün olamamaktadır. Yatayda uygulanan yükleme ile yanal ötelenmenin artması sonucunda, başlangıçta kolona paralel

olan yatay yük, belirli bir açı ile uygulanır hale gelmektedir. Benzer biçimde, gerçek durumda olduğu şekliyle, başlangıçta kolona dik ve tam olarak düşeyde olan eksenel yük, artan yükleme adımları ile kolona dik kalmakta, bununla birlikte gerçek durumdan saparak düşeydeki dikliğini kaybetmektedir (Şekil 4.1 a, Şekil 4.1 b). Buna göre bu çalışmada, her adımda yatay yükün ve eksenel yükün, yatay ve düşey eksenlerden sapmaları bulunmuş, gerekli düzeltmeler denklem 4.1, denklem 4.2 ve denklem 4.3 kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.1 b, Şekil 4.1 c).

$$\alpha = \arctan \Delta / l \tag{4.1}$$

$$P' = P \cos \beta \quad - \quad N \sin \alpha \tag{4.2}$$

$$N' = P \sin \beta \quad + \quad N \cos \alpha \tag{4.3}$$

N eksenel yükü, P yatay yükü, Δ yatay ötelenmeyi ve l kolon temiz boyunu simgelemektedir. α eksenel yükün düşeye göre yaptığı açıyı ve β ise hidrolik yatay yük yükleme pistonunun, başlangıç durumu olan düşeye göre yaptığı açıyı simgelemektedir.

Deneyler sırasında, Bölüm 3.5, Şekil 3.33'de gösterildiği üzere, kolon yan yüzünde, yatay yüke dik olan yüzlere yakın noktalarda, düşey deformasyonlar takip edilmiştir. Düşey deformasyonlar, Şekil 3.33'de görüldüğü gibi kolon tabanından itibaren ardışık üç bölgede toplanmıştır. Bu deformasyonlar kullanılarak, davranışın daha iyi anlaşılabilmesi ve kolon-temel bölgesinden itibaren kolondaki deformasyonların dağılımının görülebilmesi amacıyla, plastik bölge dönme değerleri elde edilmiştir. Eksen dönmesi değerleri üç bölgede elde edilmiştir. Kolon-temel birleşiminde yer alana ve taban açılmasının gösteren bölge, birinci bölgedir. İkinci bölge, genel olarak plastik mafsal boyu olarak kabul edilen, yüklemeye dik kesit boyutunun yarısı (~$h/2$) olan kısımdır. Eksen dönmesinin takip edildiği son bölge ise plastik mafsal boyunun en üst limiti sayılabilecek boyda seçilmiştir (~h). Elde edilen eksen dönmesi değerleri, belirtilen bu bölgeler uzunluğunca, ortalama dönme değerlerini vermektedirler. Kolon, eksen dönme değerleri elde edilirken, aynı seviyedeki komparatörlerin mutlak toplam deplasman verileri, aradaki mesafeye bölünmüştür (Denklem 4.4, Şekil 4.1 d).

$$\theta = \arctan \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2|}{l} \tag{4.4}$$

θ, elde edilen bölgeye ait ortalama eksen dönme açısını, Δ_1 ve Δ_2 düşey deplasmanları ve l deplasman okunan iki nokta arası mesafeyi göstermektedir. Belirtilen her üç bölge için, kolonlardan elde edilen moment-dönme grafikleri, Ek D'de yer almaktadır. Bu grafikler, P-Δ etkisini de içermektedirler. Şekilde yer alan α ve θ değerleri birbirlerine çok yakın olmakla birlikte, eksenel yük aparatına ait kolun bağlantı noktasının, kolon-temel birleşim noktasının altında kalmasından dolayı, iki farklı sembol kullanımı uygun görülmüştür.

Yükleme sırasında, Bölüm 3.6'da belirtildiği gibi deplasman kontrollü olarak, belirli göreli tepe nokta ötelenme oranları kullanılmıştır. Özellikle akma deplasmanı elde edilerek, bu değerin katları şeklinde yüklemenin tercih edilmemesinin sebebi, davranışta donatı akmasının elde edilemeyebileceği düşüncesi ve dayanımın ardından ani düşüşlerin yaşanabilir olmasıdır. Her iki düşünce de deneyler sonrasında doğrulanmıştır. Bu nedenle deneyler göreli ötelenme oranları kullanılarak yapılmış, tespit edilen tüm yükleme adımları tamamlanmış ve belirli bir yük düşüşü veya süneklik değerinde deneylere son verilmemiştir.

Deneyler sırasında bazı elektronik ölçüm cihazlarından gelen veriler, yükleme değerinin artmasına bağlı oluşan hasar nedeniyle, belirli yük adımlarında sonra sağlıklı toplanamamıştır. Ölçüm alınan noktalardaki deformasyonların, cihazlarının fiziksel sınırlarının dışına çıkması, cihazların bağlı olduğu noktalarda artan yük ile (özellikle bazı deneylerde, sona yakın yük adımlarında) hasar birikmesi gibi faktörler buna neden olmuştur. Bu gibi durumlar gerek elektronik veri toplama sisteminden, gerekse görsel takip yolu ile belirlenmiştir. Sonuçların sunumunda, gerekli görülen ve sorgulanabilir hale gelen noktalardan sonra veriler kesilmiştir.

Çalışmada kullanılan kesit özelliklerine sahip, bindirme boyu problemi olmayan kolon için yapılan analiz sonuçları, Bölüm 3.3'de belirtilmiştir. Buna göre, eksenel yük oranı %25 olan kolon için dayanım değeri 116.36 kN, %10 olan durumda ise 104.71 kN olarak hesaplanmıştır.

4.2.1. CL-N1-D0-CFRP00

Sargılama uygulaması yapılmamış, referans numune olan bu kolonun davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.2'de yer almaktadır. Bu numune ile birlikte, ilk sekiz numunede eksenel yük oranı N/N_0 = 0.25'tir. Numunenin, son çevrimde en büyük deplasmandaki görüntüleri, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.1'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.1'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.1'de yer almaktadır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Herhangi bir sargılamanın uygulanmadığı, referans numune olan bu kolonda, ilk yükleme adımından itibaren, yüke dik çekme yüzlerinde, tabanda (kolon-temel birleşimi boyunca) kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu yükleme adımında, kılcal taban çatlağının yanı sıra, kolon alt ucundan itibaren ilk beş etriye seviyesinde, etriye yerleşimi ile uyumlu kılcal çatlaklar görülmüştür. Bu yükleme adımının, birinci çevrimi ile ikinci ve üçüncü çevrimleri arasında, oluşan bu çatlaklarla uyumlu, önemsiz derecede rijitlik azalması görülmüştür.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Yükleme yönü ile uyumlu olarak, tabandaki ve etriye seviyelerindeki çatlaklar, 0.1 mm genişlikte olacak biçimde belirgin hale gelmiştir. Bu yük adımının üçüncü çevriminde, tabandaki çatlak genişliği 0.1-0.2 mm genişlik aralığına ulaşmıştır. Bununla birlikte bu son çevrimde yüke dik olan yüzlerde, köşe boy donatıları ile uyumlu (köşelerden 40-55 mm içeride), tabandan başlayıp yaklaşık 30 mm ilerleyen, belli belirsiz düşey kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu yükleme adımının çevrim grafiklerinin arasında, herhangi bir davranış değişimi gözlenmemiştir.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Bir önceki yükleme adımının son çevriminde başlayan boy donatı hizasındaki düşey, kılcal yarılma çatlaklarının geliştiği görülmüştür. Kolonun kuzey ve güney yüzlerinde, köşe donatıların yeri ile uyumlu çatlaklar, yukarı doğru uzamıştır. Kuzey yüzünde tabandan ilk etriyeye kadar gelişen köşelere yaklaşık 50 mm yakın bu çatlakların, temel seviyesinden 85

mm sonra içeriye doğru eğimlenerek etriye seviyesine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca belirtilen eğimli çatlaklar, aynı yüzde kendilerini ikinci etriyenin altında da tekrarlamışlardır. Kolonun güney yüzünde eğimli çatlağa rastlanmamış, tabanda başlamış olan düşey çataklar ikinci etriyeye kadar (250 mm) uzamıştır. Ortadaki donatı hizasında da düşey çatlak oluştuğu gözlenmiştir. Kuzey yüzünde, ikinci etriye (250 mm) seviyesinde her iki köşede, bu seviyeden aşağı doğru yaklaşık 45°'lik çatlaklar görülmüştür. 250 mm'deki tabandan itibaren yerleştirilmiş ikinci etriyenin seviyesindeki ve tabandaki yatay çatlakların genişliği, 0.2-0.3 mm olarak okunmuştur. Diğer tüm çatlaklar kılcal seviyededir. Bu yükleme adımında, birinci çevrim ile ikinci ve üçüncü çevrimler arasında, rijitlik ve dayanım değerlerinde farklılaşma başlamıştır.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Bu yükleme adımında, % 0.35 göreli öteleme yükleme çevriminde oluşan düşey çatlakların genişlediği gözlemlenmiştir. 0.1 mm genişliğe ulaşmış olan mevcut düşey çatlakların yanında, yeni kılcal çatlaklara da rastlanmıştır. Kuzey yüzünde eğimli olarak ilk etriyeye ulaşan, köşelere yakın çatlakların ilerleyerek, ikinci etriyenin seviyelerine ulaştığı fark edilmiştir. Taban açılma çatlağı 0.3-0.4 mm genişliğe, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak 0.2 mm genişliğe ulaşmıştır. Bu adımda yüklemeye dik yüzlerdeki çatlaklara ilave olarak, yan yüzlerde çatlakların oluştuğu da görülmüştür. Genel olarak bu çatlakların köşe donatıları takip ettiği izlenmiştir. Tüm yüzlerde mevcut çatlakların yanında, özellikle ikinci etriye seviyesine yakın, ana düşey çatlaklara yönelmiş eğimli çatlakların varlığı görülmüştür. Ayrıca tabandan 40 mm yukarıya kadar olan bölgede, yerel ve yataya yakın çatlaklar izlenmiştir. Yükleme yönüne dik olan yüzlerdeki köşelere yakın çatlaklar, son çevrimde belirginleşmeye başlamıştır. Birinci çevrim ile diğer çevrimler arasında, davranış farklılığı belirgin hale gelmiştir. Çevrimlerde yükün boşaltılması sırasında, taban çatlağının açılıp kapanmasından kaynaklanan yük-deplasman grafiğinin orta bölgesinde çevrim sıkışmasına ve enerji yutma kabiliyetinin azalmasına neden olan, yükün sabit kalıp deplasmanın azaldığı davranış, görülmeye başlanmıştır.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Tabandaki çatlağın 1.çevrimde 0.5, son çevrimde 0.6 mm gelişliğe ulaştığı, ikinci etriye seviyesindeki çatlağın ise 0.2-

0.3 mm aralığına genişlediği görülmüştür. Var olan düşey ve eğimli çatlaklara ilave olarak, yan yüzlerde ortadaki boy donatı hizasında, etriye seviyelerinde düşeye yakın eğimli çatlaklar izlenmiştir. Özellikle köşelere yakın düşey çatlakların hemen hepsinin genişlediği ve bazılarının 0.2 mm'ye ulaştığı görülmüştür. Tabana yakın yatay, yerel çatlakların kısmen birleştiği, güney yüzünde, kolonun doğu yarısındaki bu çatlağın 0.1-0.2 mm genişliğe ulaştığı izlenmiştir. Kolonun yük kapasitesi olan 61.83 kN (çekme 60.22 kN) yük değerine, bu yükleme adımında ulaşılmıştır. Yük-deplasman grafiğinden, daha önce başlamış olan aynı göreli ötelemesi yüklemesindeki çevrimler arası riritlik azalması ve çevrim sıkışması etkisi tamamen izlenebilir hale gelmiştir. Bu farklılık diğer yükleme adımlarında olduğu gibi birinci çevrim ile diğer çevrimler arasında oluşmuş, ikinci ve üçüncü çevrimlerin arasında davranış farklılığı çok küçük değerlerde gerçekleşmiştir.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Bu çevrimde tabandaki yatay çatlağın 0.8-0.9 mm'ye ulaştığı görülmüştür İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlaklar, kuzey yüzde 0.3 mm, güney yüzde 0.4-0.5 mm genişliğe ulaşmıştır. Kuzey yüzünde, batı tarafta kalan köşe donatı hizasındaki düşey çatlaklar ve aynı köşe için yan yüzdeki düşey çatlak, belirli bölgelerde 0.3 mm değerine genişlemiştir. Güney yüzdeki batı tarafındaki düşey çatlak 0.3 mm, doğu taraftaki alt kısımda kalan yataya yakın çatlak ve düşey eğimli çatlak 0.4 mm genişliğe ulaşmıştır.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Çevrimler arası en büyük rijitlik ve yutulan enerji yani çevrim grafiğinin alanlarındaki farklılık, bu çevrimde meydana gelmiştir. Daha önceki yük adımlarının ardışık çatlak ve hasar durumları göz önüne alındığında, öncesindeki yük adımıyla en büyük çatlak genişliği ve hasar farklılığının oluştuğu göreli ötelenme değerinin, bu yükleme adımı olduğu anlaşılmıştır. Tabanda yer alan yatay çatlağın ve köşe donatıların hizasındaki düşey çatlakların özellikle alt kısımlarının çatlak genişliklerinde, önemli derecede artışlar meydana gelmiştir. Tabandaki açılma 2.0-2.2 mm civarına çıkmıştır. Köşe donatılara yakın düşey çatlak genişliklerinin, 1.4 ile 1.6 mm arasında değiştiği görülmüştür. Kuzey yüzündeki ikinci etriye çatlağının genişliğinde çok büyük değişim olmamakla birlikte (0.4 mm), güney yüzdeki ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişliğinin 1.0 mm değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu yükleme adımının son çevriminde hasar durumu,

çatlakların genişlemesinden kısmi beton parçalanmasına ve dökülmesine dönmüştür. Bu yüzden çatlak genişliklerinin takibi bu yükleme adımından sonra bırakılmıştır.

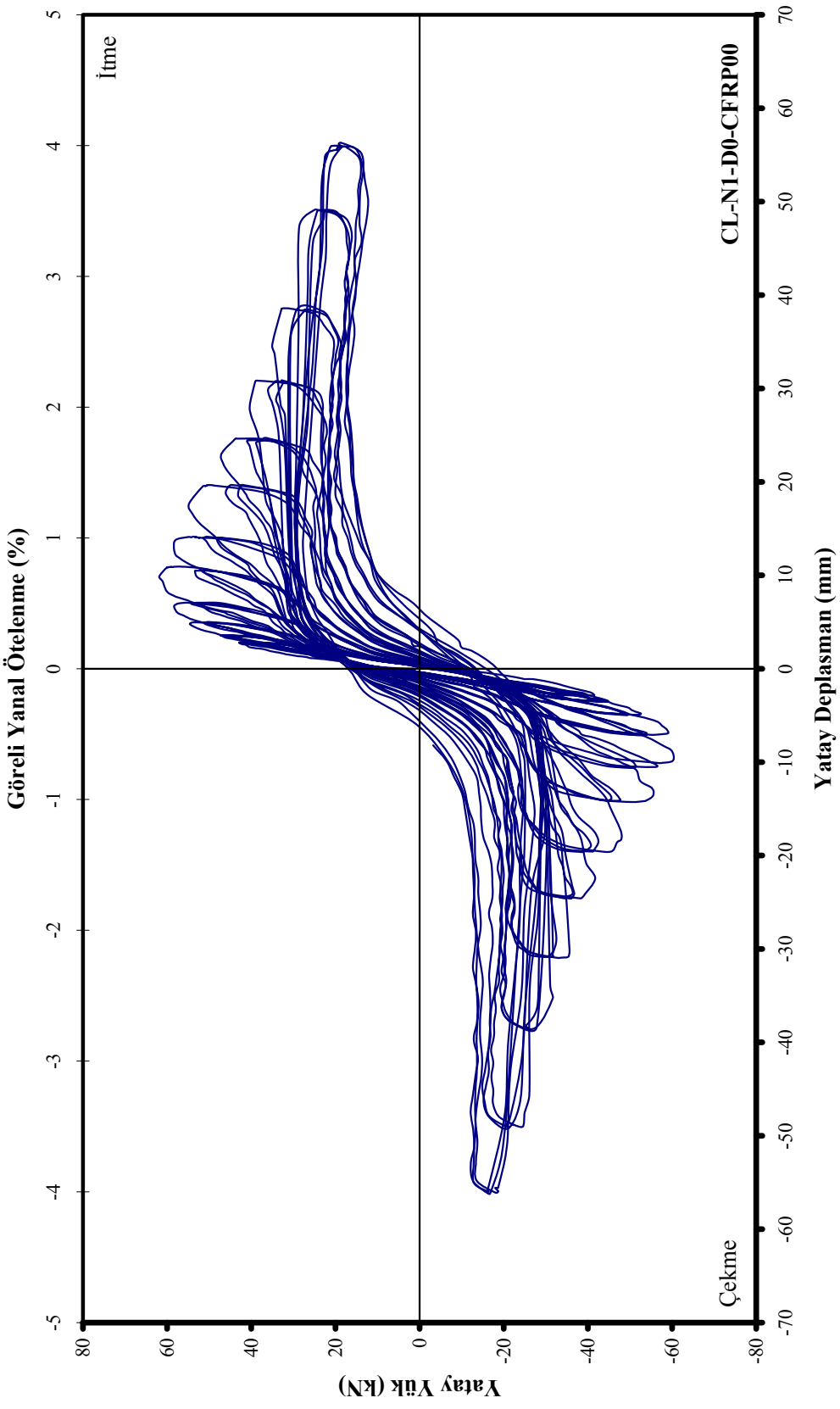
♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Bu yük adımında, tabandaki yatay çatlak açılmaya devam etmiş, kolon tabanında ezilme ve ufalanma belirginleşmeye başlamıştır. Özellikle yüklemeye dik yüzlerde, batı tarafındaki düşey çatlakların önemli derecede açıldığı, bu çatlakların sınırladığı köşedeki betonun ana gövdeden ayrılmaya başladığı izlenmiştir. Bu parçaların alt etriye seviyelerinde de yatay ayrılma görülmüştür. Son çevrimde güney yüzün batı tarafındaki köşe donatı görülür hale gelmiştir. Hasarın baştan beri biriktiği bindirme boyu bölgesinden, 10-20 mm büyüklüğünde beton parçaların döküldüğü görülmüştür.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Son çevrimde, güney yüzde batı tarafındaki köşe beton, ikinci etriyeye kadar dökülmüş ve boy donatılar birinci etriyeye kadar tamamen, ikinci etriyeye kadar ise kısmen açığa çıkmıştır. Bu yük adımında, çevrim içi en büyük deplasman sonrası yük deplasman davranışı, yatay hale gelmeye başlamıştır.

♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Kuzey yüzünde, tabanda betonda ezilme kısmen artmıştır. Güney yüzünde, batı tarafında dökülmüş olan köşe betona ilave olarak, doğu tarafındaki köşe beton da, özellikle birinci etriyenin altında dağılmıştır. Bu yük adımında, çevrim içi en büyük yük sonrası yük-deplasman davranışı, yatay hale gelmeye başlamıştır. Bu yük adımından itibaren, çevrim içi en büyük yük sonrası yük-deplasman davranışı, yatay hale gelmiştir.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Kuzey yüzde, tabanın 20-30 mm üzerinde daha önce açılmaya başlayan yatay çatlaklar, yarılarak ayrılmaya başlamıştır. Yük-deplasman grafiğinden, en büyük yük değerinin ardından davranışın eğiminin yön değiştirdiği izlenmiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Kolonun kuzey yüzündeki plastikleşen alt bölgede, birinci etriye altındaki beton dağılmış ve boy donatılar ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.2: CL-N1-D0-CFRP00 numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



Şekil 4.3: CL-N1-D0-CFRP00 numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.4: CL-N1-D0-CFRP00 numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.2. CL-N1-D0-CFRP1P

Bu numunede 3 kat pasif FRP sargılaması uygulanmıştır. Bindirme boyu yüksekliğinden, boy donatı çapı kadar uzun olarak yapılan uygulamada, kolon köşeleri önceden pahlanmıştır. Uygulamanın detayları Bölüm 3.3.4'de yer almaktadır. Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.6'da görülmektedir. Numunenin, son çevrimde en büyük deplasmandaki görüntüsü, Şekil 4.5'de yer almaktadır. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.2'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.2'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.2'de yer almaktadır. Plastikleşme bölgesi olan kolon alt bölgesinde FRP uygulaması bulunduğundan dolayı, referans numunedeki gibi çatlak takibi yapılması mümkün olamamıştır. Kolon tabanında oluşan çatlağın genişlik takibi de, kolon temel birleşimindeki çatlak ile uygulanmış epoksinin temel yüzeyinden ayrılmasının farklı yerlerde olması nedeni ile yapılamamıştır. Genel olarak bu bölge dışındaki çatlaklar, FRP üzerindeki değişimler ve taban çatlağı hakkında göreli olarak bilgi verilmiştir.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Kolon tabanında (kolon-temel birleşimi boyunca) kılcal çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bu yükleme adımında kuzey yüzde, üçüncü etriyede itibaren ilk dört etriye seviyesinde, etriyelerin yerleşimi ile uyumlu kılcal çatlaklar görülmüştür. Kolon güne yüzünde ise üçüncü etriye seviyesinde çatlağa rastlanmamış, diğer seviyelerdeki kılcal yatay çatlaklar kuzey yüzü ile aynı yerleşimde gelişmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arasında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Bir önceki yükleme adımındaki davranıştan farklı bir oluşum izlenmemiştir. Güney yüzdeki üçüncü etriye seviyesinde, kuzey yüzünden farklı olarak gözlenmeyen yatay kılcal çatlak, bu yük adımında oluşmuştur. Yük-deplasman grafiğinde, birinci çevrimden sonra oluşan düşük seviyedeki yük azalmasından başka, grafiksel olarak rikitlik ve enerji yutma kapasitesinde bir değişikliğe rastlanmamıştır.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Bu yükleme adımının ikinci çevriminde,

her iki yüz için de tabanda kılcal çatlak izlenmiştir. Oluşan çatlaklar kolon tabanında boydan boya değil, yerel olarak görülmüştür. Bu çatlaklar kolon temel birleşimini takip edecek şekilde, kolon tabanı ile temel birleşimine FRP uygulama sırasında sürülmüş olan epoksi üzerinde gerçekleşmiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Bir önceki yükleme adımında gözlenen davranış, bu yükleme adımında farklılaşmamıştır. İlk çevrimde itme yönündeki yüklemede, az miktarda dayanım düşüşü görülmüş, çevrimler arasında kayda değer olmamakla birlikte rijitlik farkı oluşmaya başlamıştır.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Bu yükleme adımında kolon tabanındaki epoksi üzerinde oluşan yatay çatlakların geliştiği gözlenmiştir. Yük-deplasman grafiğindeki davranışta, yükleme çevrimleri arasında (birinci ile ikinci ve üçüncü çevrimler arası) yük ve rijitlik farklılıkları belirgin hale gelmeye başlamıştır. Çevrim sıkışması başlamıştır. Bu yük adımında kolonun dayanımı olan 71.24 kN (çekme 71.18 kN) değerine ulaşılmıştır.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Özellikle ikinci çevrimde, yükleme yönüne dik kolon yüzlerinin tabanındaki, yatay çatlakların belirgin biçimde takip edildiği ve genişliklerinde önemli değişimin olduğu fark edilmiştir. Bir önceki yükleme adımında ulaşılan dayanım değeri bu yükleme adımında da korunmuştur. Çevrimler arası yük ve rijitlik değişimi izlenmiştir. Çevrim sıkışmasının, yük-deplasman grafiğindeki etkisi belirgin olarak görülmüştür.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Çevrimler sırasında kolon tabanındaki açılmaların, her iki yönde de net olarak izlenebilir hale geldiği görülmüştür. Çevrimler arası yük ve rijitlik değişiminin oranı önemli derecede artmıştır.

♦ % 1.75 ve % 2.20 göreli yanal ötelenme – 24.5, 30.8 mm : Bir önceki yükleme adımı ile benzer davranış kaydedilmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, yükleme rijitliğinin oldukça düştüğü görülmüştür.

♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Bu yükleme adımında tabandaki yatay açılma gözlenmeye devam edilmiştir. İlk çevrimden itibaren özellikle kuzey yüzde, FRP'nin orta bölgesinde, yerel yatay çatlak biçiminde ayrılma gözlenmiştir. Aynı

zamanda batı yüzünde de çok az miktarda FRP üzerinde belli belirsiz çatlak biçiminde ayrılmalar izlenmiştir.

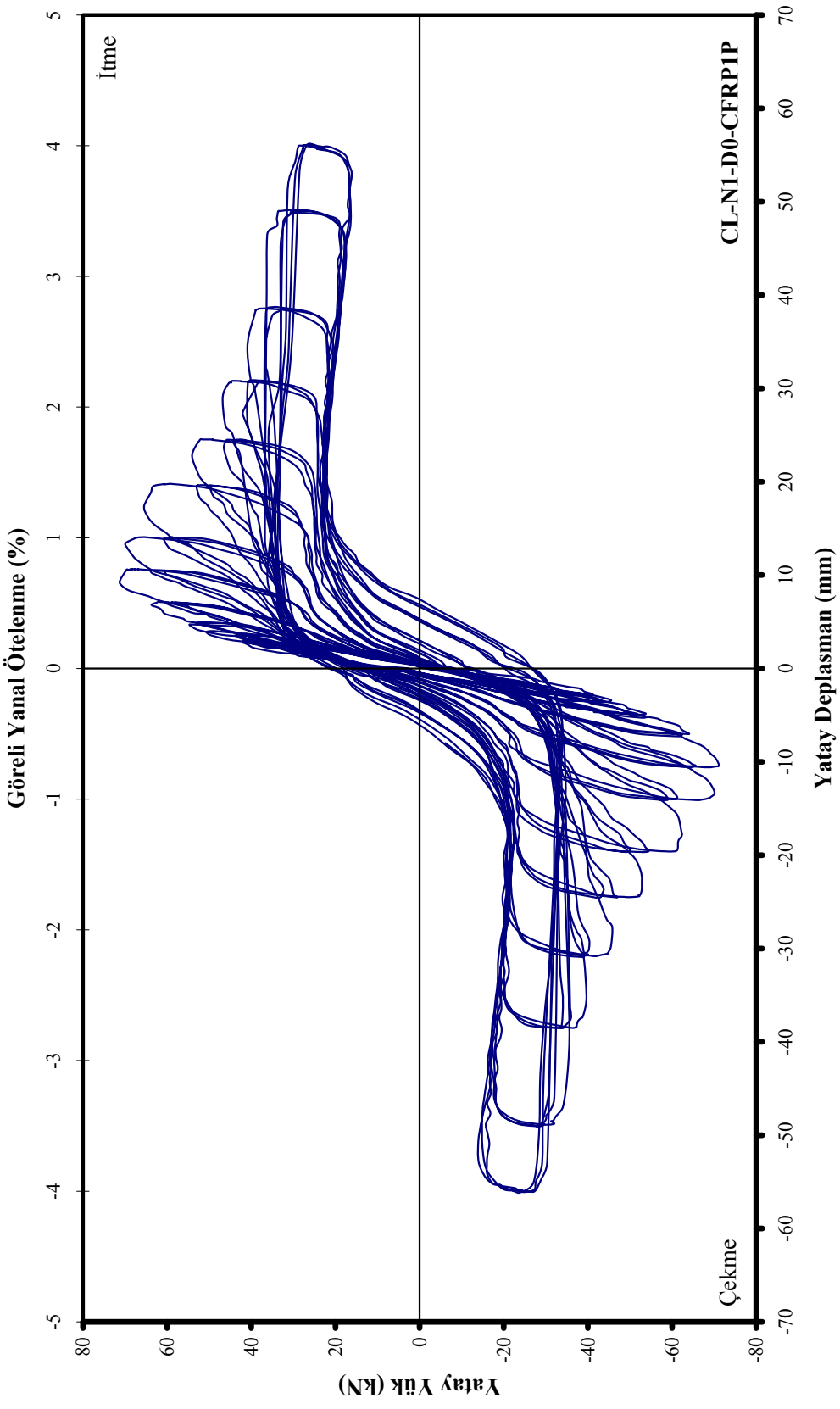
♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Bu çevrimde hemen her yüzde,genelde ilk etriye seviyesinde, FRP'de kısmi çatlak biçiminde, liflere paralel ayrılmalar gerçekleşmiştir. Yük-deplasman davranışında, yükleme sırasında en büyük yük değerine ulaşıldıktan sonra grafiği eğiminin yön değiştirdiği görülmüştür.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Bu yükleme adımında FRP üzerinde oluşan açılmaların arttığı görülmüştür. Özellikle orta bölgelerde, köşe noktalarda FRP'nin, alttaki beton gözükecek kadar yarıldığı belirlenmiştir. FRP nin bittiği seviyeden itibaren (yaklaşık ikinci etriye seviyesi), kayda değer çatlak gelişimine rastlanmamıştır.

Deneyden sonra kolon üzerindeki FRP sıyrılmış ve betonda olan değişimler gözlenmiştir. FRP'nin altında kalan betonun ufalanmış olduğu, bazı yerlerde elle, bazı bölgelerde ise hafif çekiç darbesi ile betonun parçalandığı belirlenmiştir. Özellikle taban ile birinci etriye seviyesi arasında bu parçalanma ve ufalanmanın yığıldığı izlenmiştir.



Şekil 4.5: CL-N1-D0-CFRP1P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.6: CL-N1-D0-CFRP1P numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği

4.2.3. CL-N1-D0-CFRP2P

Bu numunede, çalışmanın temelini oluşturan öngerilmeli FRP uygulamasının doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla, aynı miktarda (2 kat, şerit genişliği 42 mm, bindirme boyu uzunluğunca iki seviyede) pasif FRP sargılaması yapılmıştır. Uygulamanın detayları Bölüm 3.3.4 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.7'de yer almaktadır. Deney esnasında son çevrimde alınan görüntüler, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.3'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.3'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.3'de yer almaktadır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Yüklemeye dik kolon yüzlerinde, kolonla temel birleşiminde ve tabandan 250 mm yukarıda olan ikinci etriye seviyesinde yatay, kılcal çatlaklar oluşmuştur. Güney yüzünde ikinci yük çevriminde, üçüncü etriye seviyesinde (350 mm) de kılcal çatlak oluşmuştur.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Tabandaki yatay çatlakların belirgin ve sürekli hale geldiği, yan yüzlerde de takip edilebildiği görülmüştür. Son çevrimde bu çatlakların 0.1 mm seviyesinde genişlediği fark edilmiştir. Her iki yüzde de, etriye seviyelerindeki yatay çatlakların sayısının, yukarı doğru birer adet arttığı izlenmiştir. Üst FRP sargısının hemen yukarısında kalan ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlakların, bir önceki yük adımına göre belirginleştiği sürekli hale geldiği ve kolon yan yüzlerinde de devam ettiği takip edilmiştir. Diğer etriye seviyesindeki yatay çatlaklar kılcal seviyede kalmıştır. Grafiksel olarak çevrimler arasında bir değişim görülmemiştir.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Etriye seviyelerindeki çatlaklar belirgin hale gelmiş, bindirme boyunun bittiği yerin hemen üzerindeki, ikinci etriye seviyesindeki çatlaklar, her iki yüzde de 0.1 mm genişliğe ulaşmıştır. Kolon tabanın da, her iki yüzde de yer alan yatay çatlakların genişliği, özellikle son çevrimde 0.2 mm seviyesine ulaşmıştır. Bu yükleme adımında ilk çevrimden itibaren, kuzey yüzde kolon tabanı ile ilk FRP şerit arasında, hemen hemen köşe boy donatıların

hizasından başlayan ve içe eğimli olarak yukarıya doğru ilerleyen kılcal çatlaklar gözlenmiştir. Güney yüzde ise bu çatlaklara rastlanmamakla birlikte, bu yüzde iki FRP şerit arasında kalan bölgenin ortasında, ilk etriyeyi takip eden, kılcal yatay çatlak görülmüştür. Yük-deplasman grafiğinde, önemsiz değerlerde olmakla birlikte, çevrimler arası dayanım ve rijitlik farklılaşması başlamıştır.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Bu yükleme adımında, özellikle kuzey yüzde, genel olarak donatıları takip eden düşey çatlakların geliştiği ve çoğaldığı görülmüştür. Kuzey yüzde, bir önceki yükleme adımında, kolon tabanı ile ilk FRP şerit arasında, kısmi olarak görülen ve eğimli olarak yukarıya ilerleyen çatlakların, daha dikey biçimde hemen hemen FRP'ye ulaştığı ve belirgin hale geldiği izlenmiştir. Ayrıca aynı bölgede, orta donatı hizasında da düşey çatlak oluşmuştur. Batı tarafındaki donatı hizasında, tabandan başlayıp yukarıya doğru ilerleyen çatlağın, tabandan 10 mm yukarıda, kolon ortasını geçecek biçimde yatay olarak dallandığı görülmüştür. İki FRP şerit arasındaki bölgede, tam ortadan (ilk etriye seviyesinden) ve köşeden başlayacak biçimde, eğimli olarak ikinci FRP şerite doğru ilerleyen çatlaklar fark edilmiştir. Bu çatlakların, yan yüzlerde de kısmen yatay olarak devam ettiği izlenmiştir. İkinci FRP şerit ile üstünde kalan ikinci etriye arasında, kısmen donatı hizasında eğimli ve düşey çatlaklar görülmüştür. Güney yüzde bir önceki yükleme adımında görülmeyen, boy donatı hizasında düşey çatlaklara rastlanmıştır. Taban ile ilk FRP şerit arasında, köşe donatıları takip edecek biçimde düşey kılcal çatlakların varlığı fark edilmiştir. İkinci FRP şerit ile üstünde kalan ikinci etriye arasında ortada düşey ve kenarlarda eğimli çatlaklar görülmüştür. Yük adımının son çevriminde, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlakların 0.1-0.2 mm genişliğinde, yüklemeye dik olan yüzlerdeki taban çatlaklarının 0.4 mm genişliğinde olduğu belirlenmiştir. Diğer çatlakların hemen hemen kılcal ile belirgin (0.1 mm) aralığında olduğu görülmüştür. Yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arası yük ve rijitlik değişimi belirgin hale gelmiştir.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme - 10.5 mm : Taban da oluşan yatay çatlakların genişlediği görülmüştür. Son çevrimde kuzey yüzde 0.8 mm ve güney yüzde 0.6 mm genişliğe ulaştıkları takip edilmiştir. Tabandan 250 mm yukarıdaki, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlakların, kuzey yüzde 0.4 mm, güney yüzde 0.3 mm genişlikte

oldukları izlenmiştir. Bir önceki yükleme adımında oluşmuş olan boy donatı hizasındaki çatlamaların geliştiği, özellikle taban ile ilk FRP şerit arasındakilerin genişliklerinin, 0.1-0.2 mm aralığına ulaştığı görülmüştür. Güney yüzde, bir önceki yükleme adımında nispeten az olan düşey çatlakların, kuzey yüzdeki çatlaklarla uyumlu olarak arttığı takip edilmiştir. Bu yüzde iki FRP şerit arasında daha önce oluşmuş olan ve birinci etriye seviyesini takip eden yatay çatlağın, 0.1-0.2 mm genişliğe ulaştığı izlenmiştir. Kuzey yüzde taban seviyesi ile 10 mm üstü arasındaki, batı yönünden başlamış olan yatay çatlamanın kısmen yukarı ötelenerek doğu köşesine kadar ilerlediği görülmüştür. En büyük dayanım değeri olan 70.34 kN (çekme 70.89 kN) değerine, bu yükleme adımında ulaşılmıştır. Grafiksel olarak rijitlik ve dayanım düşüşü, çevrimler arasında önemli ölçüde artmıştır. Çevrim sıkışması belirgin olarak grafikten takip edilir hale gelmiştir.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Kolon kuzey yüzünde taban açılmasının, ilk çevrimde 0.9 mm, son çevrimde 1.2 mm olduğu görülmüştür. Aynı değerler güney yüz için 1.1 mm ve 1.4 mm olmuştur. Tabanda kısmi beton ezilmeleri başlamıştır. Kuzey yüzde, tabana yakın yatay çatlakların genişlediği, FRP şeritler arasında çatlakların geliştiği ve yan yüzlerde uzadıkları görülmüştür. Güney yüzde taban ile ilk FRP şerit arasındaki çatlakların geliştiği izlenmiştir. Her iki yan yüzde de, köşe boy donatılar civarında, genellikle boy donatıları takip eden eğimli çatlakların geliştiği görülmüştür.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm :.Tabandaki yatay çatlaklar, 2.3-2.5 mm genişliğe ulaşmıştır. İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişliği kuzey yüzde 1.2 mm, güney yüzde ise 0.7mm şeklinde okunmuştur. Diğer tüm çatlak genişliklerinde de önemli artışlar görülmüştür. Taban ile birinci FRP şerit arasındaki düşey ve eğimli çatlakların genişliklerinin (0.7-0.9 mm), iki FRP şerit arasındaki benzer yönelimli çatlakların genişliklerinden (0.4-0.5 mm) daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yük-deplasman grafiğindeki, çevrimler arası farklılık artmış, çıkış eğimi önemli derece düşmüştür.

♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Bu yükleme adımında, tabandaki çatlağın, çatlak uzunluğunca kuzey yüzde 2.8-3.2 mm ile güney yüzde 2.6-2.8 mm aralığında değiştiği görülmüştür. :Her iki yüzde de kolon tabanı ile ilk FRP

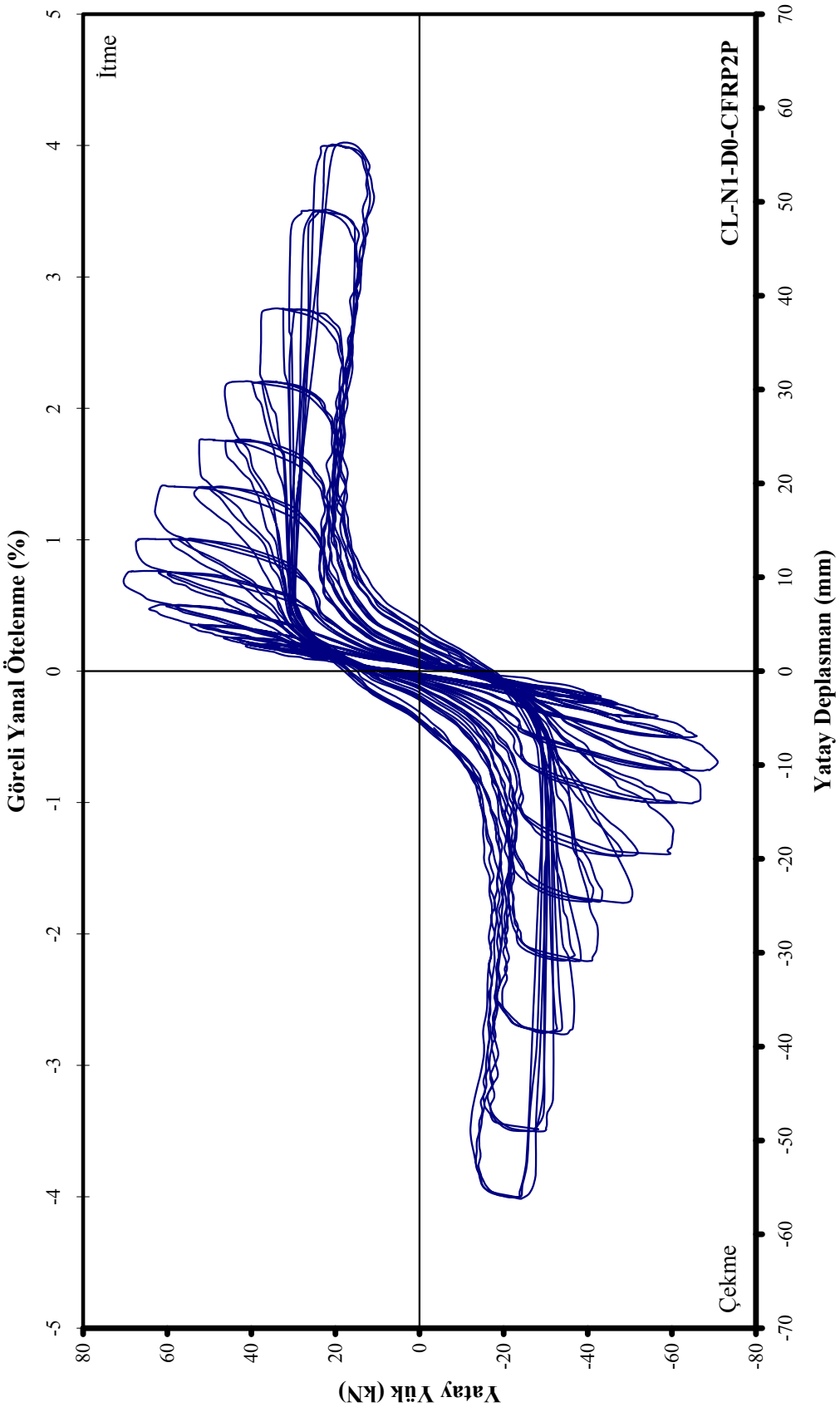
arasındaki bölge, dağılmaya başlamıştır. Buradaki çatlakların genişlikleri yer yer 2.0 mm'nin üzerine çıkmıştır. Özellikle kuzey yüzdeki ikinci etriye seviyesindeki çatlağın genişlediği, 2.0 mm civarına ulaştığı görülmüştür. Bu yükleme adımının ilk çevriminde CFRP'den şiddetli çatlama sesi geldiği duyulmuştur. Güney yüzde ve batı yüzünde iki FRP arasında da, yatay çatlakların önemli seviyede geliştiği görülmüştür. Betonda ezilme, ufalanma ve küçük parça dökülmelerine rastlanmıştır.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Özellikle kuzey yüzde, kolon tabanı ile ilk FRP arasındaki paspayı bölgesi, tamamen ayrışarak dağılmıştır. Tüm yüzlerde iki FRP arasında bulunan, birinci etriye ile uyumlu ve üst bölgedeki ikinci etriye ile uyumlu yatay çatlaklar 3 mm'nin üzerinde genişlemişlerdir,

♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Kuzey yüzünde, tabanda betonda ezilme kısmen artmıştır. Güney yüzünde, batı tarafında dökülmüş olan köşe betona ilave olarak, doğu tarafındaki köşe beton da, özellikle birinci etriyenin altında dağılmıştır. Bu yük adımında, çevrim içi en büyük yük sonrası yük-deplasman davranışı, yatay hale gelmiştir.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : FRP şeritler arası çatlak genişlikleri ciddi derecede artmış, bununla birlikte iri parçaların dökülmesi izlenmemiştir. Bu yükleme adımında CFRP'den çatlama sesi gelmiş, yer yer epoksinin betondan ayrıldığı görülmüştür. Yük-deplasman grafiğinden, en büyük yük değerinin ardından davranışın eğiminin yön değiştirdiği izlenmiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Bu numunede taban ile ilk FRP arası betondaki dağılma, iri parçaların dökülmesi şeklinde değil, betonun ezilerek ufalanması şeklinde gerçekleşmiştir. Özellikle köşelerdeki donatılar görülür hale gelmiştir.



Şekil 4.7: CL-N1-D0-CFRP2P numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



Şekil 4.8: CL-N1-D0-CFRP2P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.9:CL-N1-D0-CFRP2P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.4. CL-N1-D0-CFRP1A

Öngerilmeli CFRP kullanılarak, 1000 MPa gerilme ile aktif sargılama yapılan, ön hasarsız bu numunenin detayları Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.10'da görülmektedir. Deneyin son yük çevrimlerine ait görüntüler, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.4'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.4'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.4'de yer almaktadır. Bu deneyde, ilk üç yükleme adımında alınan fotoğraflar, makine ayarının tam yapılamamış olması nedeni ile kullanılamaz durumdadır. Bu nedenle Ek C.4'de, % 0.2, % 0.25 ve % 0.35 çevrimlerine ait görüntüler yer almamaktadır. Bununla birlikte, tüm deneylerde olduğu gibi deney sırasında, oluşan çatlakların yazılı kayıt edilmesi ve kağıt üzerine de çizilmiş olması, herhangi bir gözlem kaybına neden olmamıştır.

Deney sırasında, % 2.2 göreli yanal öteleme yüklemesinin üçüncü yük çevriminde, itme yükünde, en büyük deplasmana ulaşıldıktan sonra elektrik kesintisi gerçekleşmiştir. Grafik bütünlüğü ve hesaplamalarda bu verilere olan ihtiyaç, eksik kalan bu çevrimin tamamlanmasını gerektirmiştir. Bu yük çevriminin yük boşaltma davranışı, bir önceki % 2.2 göreli yanal öteleme çevriminin, itme yükünün dönüşü ile aynı olacak biçimde tamamlanmıştır. Aynı ötelenme yüklemesinin ikinci ve üçüncü çevrimleri olması ve ekleme yapılan üçüncü çevrimde en büyük deplasman değerinin elektrik kesintisi öncesinde elde edilmiş olması, iki çevrimin yük boşaltmadaki eğilimlerinin benzer olacağı düşüncesini doğurmaktadır. Bu nedenle yapılan işlemdeki hatanın en az düzeyde olduğu düşünülmektedir.. Grafiğin yük boşaltma davranışının tamamlanmasındaki amaç, grafik alanlarından elde edilen enerji değerlerinin yaklaşık doğru biçimde hesaplanabilmesindir. Elektrik kesintisinin ardından, deney veri dosyasındaki son veriler kontrol edilmiş, veri kanalları arasındaki ilişki doğrulanmış ve sistem sıfırlanarak kalan yük adımları tamamlanmıştır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Tabanda her iki yüzde de yatay, kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. İkinci öngerilmeli FRP (ÖFRP) şerit üzerinde

başlayacak biçimde, yük çevrimlerinde kademeli olarak, etriye seviyelerinde yatay çatlakların oluşumu takip edilmiştir. Son çevrimde ÖFRP şeritler arasındaki etriye seviyesinde de yatay kılcal çatlak oluşmuştur. Buna göre kuzey yüzde tabandan itibaren ilk üç, güney yüzde ise ilk altı etriye seviyelerinde yatay kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çatlakların, her seviyede hemen hemen sürekli ve birkaç seviyede yan yüzlere dönmüş halde olduğu izlenmiştir. Yük deplasman grafiğinde çevrimler arası bir farklılık oluşmamıştır.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : İlk itme yüklemesinde, bir önceki yükleme adımında güney yüzde oluşan fakat kuzey yüzde görülmeyen, üst bölgedeki etriye yerleşimleri ile uyumlu yatay ve kılcal çatlakların, kuzey yüzde de ortaya çıktığı görülmüştür (üçüncü etriye seviyesinden itibaren, yukarıya doğru dört seviyede). Üstte yer alan ÖFRP şerit üzerindeki, ikinci etriye seviyesinde bulunan yatay çatlağın belirginleştiği, son yükleme çevriminde 0.1 mm genişliğe ulaştığı belirlenmiştir. Tabanda yer yatay alan çatlaklar, belirgin hale gelmiştir. Bu çatlağın her iki yan yüzde de devam ettiği gözlemlenmiştir. Grafiksel davranış olarak, çevrimler arası bir farklılık oluşmamıştır.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : İlk çevrimde, ikinci ÖFRP şerit üstünde kalan etriye seviyelerindeki yatay çatlakların genişlediği gözlemlenmiştir. Her iki yüzdeki ikinci etriye seviyesindeki (250 mm) çatlak 0.2 mm, üçüncü ve dördüncü seviyedeki (350 mm ve 450 mm) çatlaklar ise 0.1-0.2 mm aralığında genişliğe ulaşmışlardır. Her iki yüzde de ÖFRP şeritler arasında kalan, birinci etriye seviyesindeki (140 mm) yatay çatlağın, 0.1 mm genişliğinde olduğu görülmüştür. Son çevrimde, itme yüklemesi sonunda kuzey yüzde, ikinci ÖFRP şerit üstünde batı köşesindeki donatı hizasından başlayıp yukarı ilerleyen eğimli kılcal çatlak görülmüştür. Tabandaki yatay çatlaklar, 0.1 mm genişliğe ulaşmışlardır. Yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arasında önemli bir değişim gözlenmemiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : İlk çevrimde üstteki ÖFRP şerit üstünde kalan, ikinci etriye seviyesindeki çatlağın, 0.3 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Kuzey yüzde batı köşesine yakın, ikinci ÖFRP şeritten başlayıp ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlağa eğimli ilerleyen çatlağın, belirgin hale geldiği, bunun yanında aynı seviyede orta donatı hizasında düşey kılcal çatlağın oluştuğu

takip edilmiştir. Güney yüzde de diğer yüzle aynı biçimde, doğu tarafındaki köşe donatı seviyesinde, ikinci ÖFRP şeritten başlayıp, yukarı doğru eğimli ilerleyen çatlak belirmiştir. İkinci çevrimde, kuzey yüzde, iki ÖFRP şerit arasında ortada düşey ve doğu tarafında donatı hizasından başlayıp yukarı eğimli giden kılcal çatlaklar oluşmuştur. Bir önceki adımda güney yüzde, doğu tarafında ÖFRP şerit üstünde oluşan, ortaya doğru eğimli çatlak, etriye seviyesine ulaşmış ve yukarıya ve terse doğru eğimli olarak ilerlemiştir. Aynı davranış üçüncü çevrimde kuzey yüzünde ikinci ÖFRP şerit üstünde, batı tarafındaki çatlakta da tekrarlanmıştır. Tabandaki çatlak, 0.2-0.3 mm genişliğe ulaşmıştır. Grafiksel davranışta çevrimler arası farklılaşma başlamış, gözlenen değişimin önemsiz derecede olduğu belirlenmiştir.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme - 10.5 mm : Tabandan itibaren ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak, 0.4-0.5 mm genişliğe ulaşmıştır. Tabandaki açılmanın, 0.4-0.5 mm civarında olduğu görülmüştür. Kuzey yüzde iki ÖFRP şerit arasında, ortadaki donatıların hizasında düşey ve kılcal, doğu tarafında yine donatıların hizasında, yukarıya doğru eğimli giden ve genişliği 0.1 mm okunan çatlaklar oluşmuştur. Güney yüzde şeritler arasında doğu tarafında, donatıları takip eden eğimli çatlama meydana gelmiştir. Her iki yüzde de ilk ÖFRP şeridin hemen altında, özellikle orta kısımda yataya yakın kısa ve kılcal çatlamalar oluşmuştur. Yan yüzlerde, özellikle ilk ÖFRP şeritten itibaren, yaklaşık köşe donatılar hizasında olacak biçimde, kısmen eğimli ve kılcal çatlamalar medyana gelmiştir. 75.45 kN (çekme 77.29 kN) yüke ulaşılan bu yükleme adımının grafiksel davranışında, çevrimler arasında küçük değerlerde rijitlik ve dayanım düşüler olmuştur (1. ile 2 ve 3. çevrimler arasında). Ayrıca çevrim sıkışmasının başladığı gözlemlenmiştir.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Üst ÖFRP üstündeki ikinci etriye seviyesindeki çatlak genişliği, bir önceki yükleme adımı ile aynı değerde kalmıştır. İki ÖFRP arasında köşe donatılardan yukarı doğru ve eğimli çıkan, 0.1-0.2 mm genişlikteki çatlaklar, ilk etriye seviyesindeki yatay çatlakla birleşmiştir. Bu arada kalan, eğimli çatlaklar arasındaki, birinci etriye seviyesinde yer alan yatay çatlak, kuzey yüzde 0.3 mm, güney yüzde 0.2 mm genişliğe ulaşmıştır. Her iki yan yüzde de, özellikle köşe donatıları izleyen ve kuzey tarafta daha belirgin halde olan, kısmen

eğimli düşey çatlaklar oluşmuştur. Taban çatlağı genişliği, 0.6 mm seviyesine gelmiştir. Kolon yük kapasitesine 76.13 kN olarak (çekme 78.98 kN) bu yük adımında ulaşılmıştır.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Dayanımda çok büyük düşüş olmamakla birlikte, çatlak genişliklerinde ciddi artışlar meydana gelmiştir. Betonda biz nokta dışında(kuzey batı alt köşe) parçalanma, ezilme veya dökülme görülmemiştir. İlk yük çevriminde tabandaki birleşim yeri çatlağı, her iki yüzde de 1.6-1.8 mm genişliğine ulaşmıştır. Son çevrimde genişlik değeri 2.0 mm olarak okunmuştur. ÖFRP şeritlerin üstünde yer alan, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın, kuzeyde 0.6-0.7 mm genişliğe, güney yüzde ise 0.4 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. ÖFRP şeritler arasında yer alan, birinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın genişliği 0.3-0.4 mm olarak kaydedilmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arası rijitlik ve dayanım düşüşü belirgin hale gelmiştir.

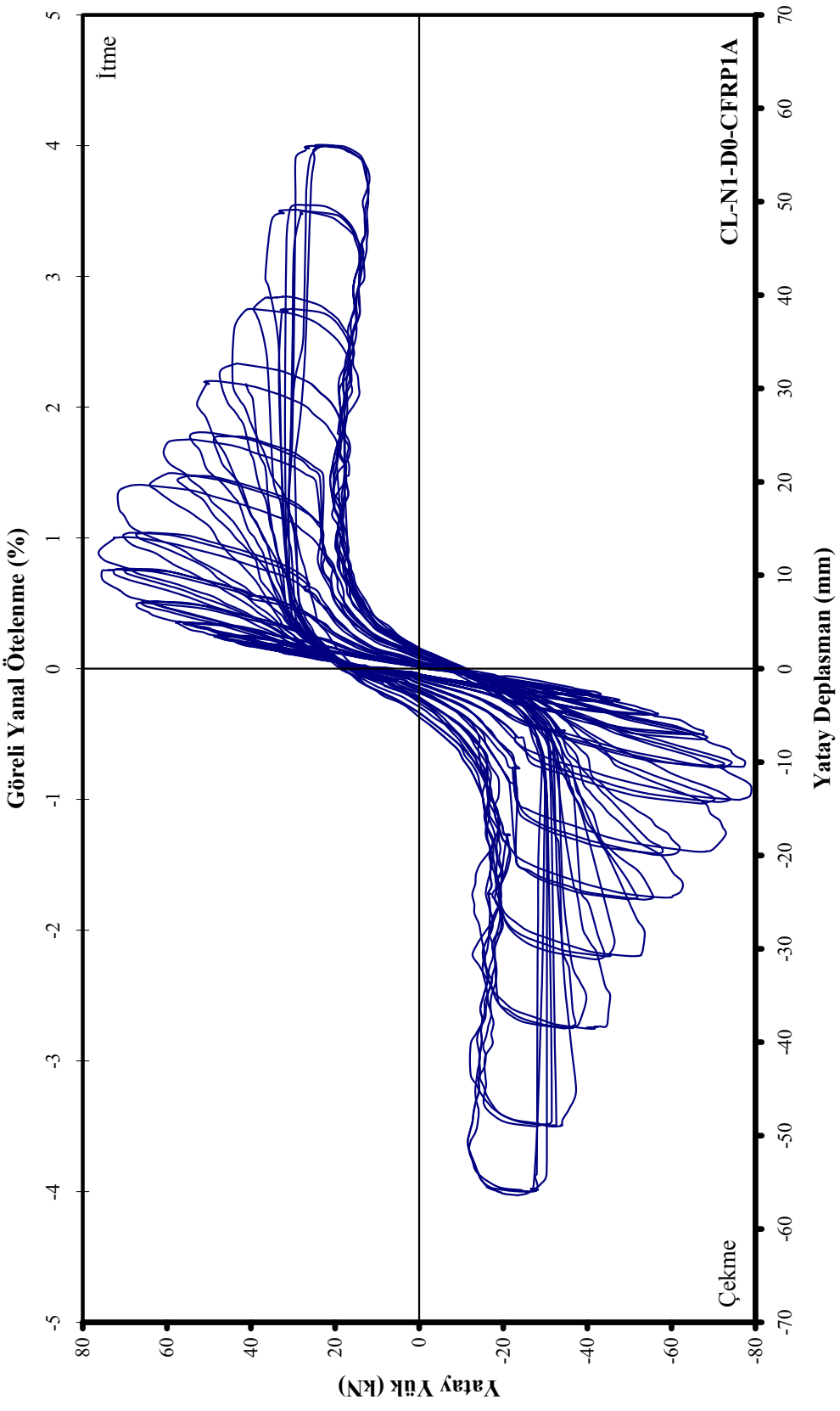
♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Tüm yüzlerde düşey ve eğimli çatlakların genişliklerinde artışlar meydana gelmiştir. Taban çatlağının genişliği 3.0-3.5 mm seviyesine gelirken, güney yüzde, tabanın hemen üstünde, orta bölgede beton parçanın ayrıldığı görülmüştür.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Tabandaki çatlağın 6 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Küçük beton parçaların döküldüğü gözlenmiştir. Kuzey yüzde, iki şerit arasında, doğu köşede, beton parçanın ayrılmaya başladığı fark edilmiştir.

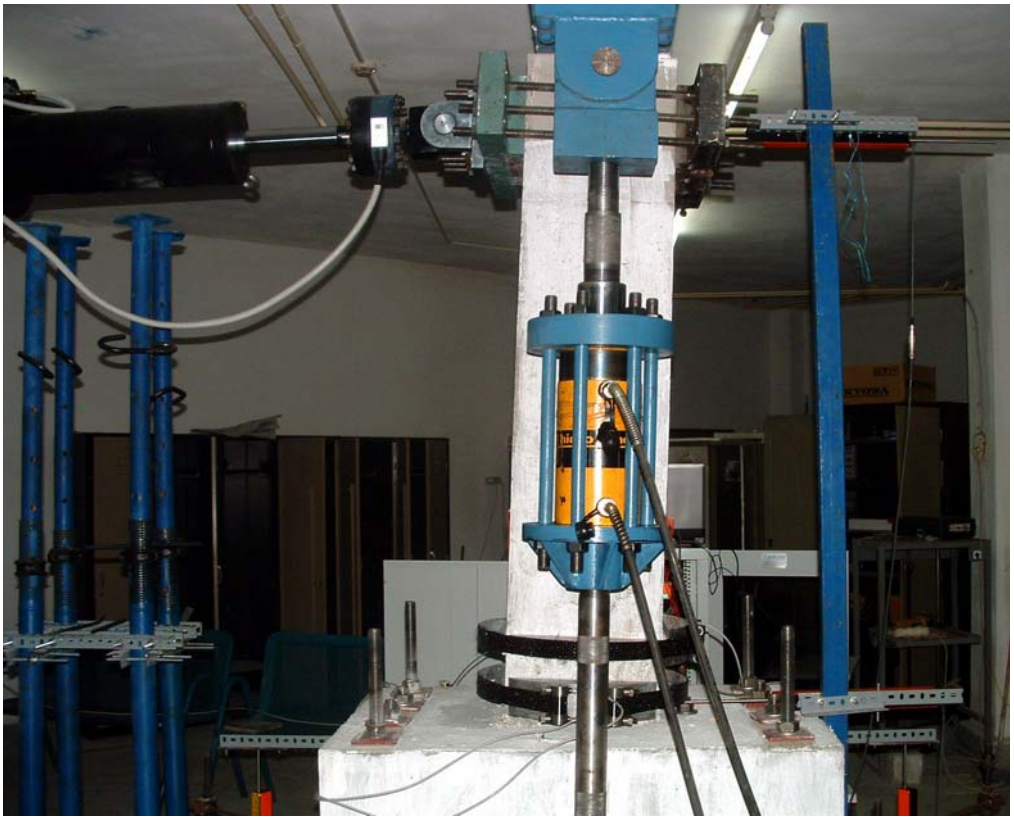
♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Her iki yüke dik yüzde de, taban seviyesinde betonun dağıldığı görülmüştür. Yükleme adımının en büyük yük dayanımına ulaşıldıktan sonra, grafiğin yatay hale gelmeye başladığı belirlenmiştir.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Dağılmayan noktadan yapılan ölçümde, taban çatlağının 12 mm olduğu okunmuştur.

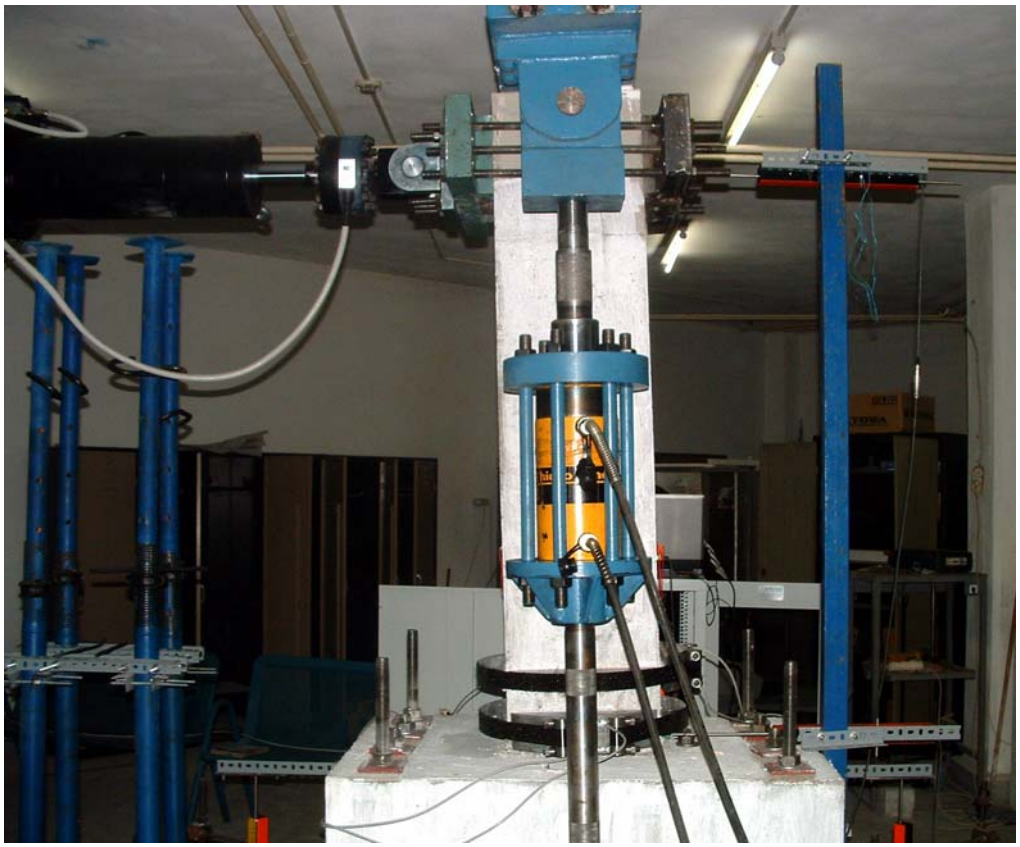
♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Dağılmayan noktadan yapılan ölçümde, taban çatlağının 14-15 mm olduğu görülmüştür. Öngerilmeli FRP şeritlerin her ikisinde de kopma meydana gelmemiştir.



Şekil 4.10: CL-N1-D0-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



Şekil 4.11: CL-N1-D0-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.12: CL-N1-D0-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.5. CL-N1-D0-CFRP2A

Öngerilmeli CFRP kullanılarak, 500 MPa gerilme ile aktif sargılama yapılan, ön hasarsız bu numunenin detayları Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.14'de görülmektedir. Deneyin son yük çevrimine ait görüntü, Şekil 4.13'de yer almaktadır. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.5'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.5'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.5'de yer almaktadır. Bu deneyde, ilk iki yükleme adımında alınan fotoğraflar, makine ayarının tam yapılamamış olması nedeni ile kullanılamaz durumdadır. Bu nedenle Ek C.5'de, % 0.2 ve % 0.25 çevrimlerine ait görüntüler yer almamaktadır. Buradaki anlatımda, görüntüleri olmayan bu yükleme adımlarındaki davranış da, deney sırasında tutulan kayıtlar sayesinde verilmektedir.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Öngerilmeli FRP şeritler arasında konumlanan birinci etriye seviyesi dahil olmak üzere, her iki yüzde de, tabandan itibaren ilk altı etriye seviyesinde yatay çatlaklar görülmüştür. Tabanda kılcal çatlamaya rastlanmıştır.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Kuzey yüzde, üstte yer alan ÖFRP şerit üzerindeki, ikinci etriye seviyesinde bulunan yatay çatlağın, son yükleme çevriminde 0.1 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Tabanda yer yatay alan çatlaklar, belirgin hale gelmiş, kuzey yüzde yer alan taban çatlağının genişliği 0.1 mm civarına ulaşmıştır. Grafiksel davranış olarak, çevrimler arası bir farklılık oluşmamıştır.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : İkinci etriye seviyesindeki (260 mm) çatlak, kuzey yüzde 0.3 mm, güney yüzde 0.2 mm genişliğe ulaşmıştır. Tabandaki çatlakların genişliği 0.1 mm olarak kaydedilmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arasında önemli bir değişim gözlenmemiştir. İkinci çevrimde kuzey yüzde üstte yer alan ÖFRP şeridin üstünde, ikinci etriyeye kadarki bölgede, ortada ve batı köşesinde donatılarla uyumlu sırasıyla düşey ve içeri doğru eğimli kılcal çatlaklar görülmüştür. Bu yüklem adımında, yük-deplasman grafiğinde çevrimler arası değişim, çok az da olsa belirlenmiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : İlk çevrimde kuzey yüzde, üstteki ÖFRP şerit üstünde kalan, ikinci etriye seviyesine kadar olan bölgede, doğu köşede de boy donatı ile uyumlu düşey, kılcal çatlak meydana gelmiştir. Aynı zamanda bu yüzde, iki şerit arasındaki bölgede, alttaki şeritten birinci etriye seviyesindeki yatay çatlağa kadar, köşe bölgelerde kısmen düşey çatlamalar oluşmuştur. Güney yüzde ise ikinci çevrimle birlikte, taban ile ilk ÖFRP şerit arasında ortada ve ortaya yakın olmak üzere düşey iki adet kılcal çatlak görülmüştür. Taban çatlağının 0.2-0.3 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Yatay yük-deplasman grafiğinde yük ve rijitlikte çevrimler arası değişim belirginleşmiştir.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme - 10.5 mm : Çatlak gelişimi ve sayısı artmıştır. Tabandaki çatlak genişliği 0.4-0.5 mm seviyesine ulaşmıştır. Kuzey yüzde, ÖFRP şeritler arasında ve ikinci ÖFRP şerit ile ikinci etriye seviyesi arasında, köşe ve orta boy donatıları ile uyumlu kısmen düşey çatlaklar meydana gelmiştir. Güney yüzde ise özellikle orta boy donatı hizasında, tabandan ikinci etriye seviyesine kadar, yaklaşık 0.1 mm genişliğinde düşey çatlama oluşmuştur. Her iki yan yüzde de ilk ÖFRP şerit üstünde, köşe boy donatılarla uyumlu kısmen düşey çatlaklar meydana gelmiştir. Grafiksel davranışta, çevrimler arası dayanım ve rijitlik değişimi artmış, çevrim sıkışması başlamıştır. 72.23 kN (çekme 73.14 kN) ile kolon dayanımına, bu yükleme adımında ulaşılmıştır.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Kolon plastikleşme bölgesi olan alt kısımdaki çatlakların genişliği ve sayısı, bu yük adımında önemli derecede artmıştır. İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın genişliği kuzey yüzde 0.5 mm, güney yüzde 0.4 mm olarak okunmuştur. Tabandaki çatlak 0.7 mm genişliğe ulaşmıştır. Önceden oluşmuş çatlakların genişlikleri, 0.2 ile 0.4 mm arasında olacak biçimde gelişmiştir. Yeni kılcal çatlaklar, genelde boy donatılar ile uyumlu olarak belirmiştir.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Kolon tabanındaki beton dağılmaya başlamıştır. Buradaki çatlağın genişliği 2.1 mm olarak ölçülmüştür. İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişliğinin, 0.7 mm'ye ulaştığı görülmüştür. İlk yük adımlarından beri oluşmuş olan çatlakların, 0.6 ile 0.9 mm arasında genişliğe ulaştıkları gözlenmiştir.

♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Tabandaki çatlak genişliğinin, dağılmamış olan kısımlarda yapılan ölçümlerde 3.0 mm'ye çıktığı görülmüştür. Şeritlerin arasındaki bölgede yer alan, köşe donatılarla uyumlu başlayan ve yukarıya doğru eğimli olarak uzanan çatlakların, her iki yüklemeye dik yüzlerde de 1.0 mm'nin üzerinde genişliklere eriştiği belirlenmiştir. Güney yüzde, belirtilen bu çatlama sadece doğu tarafında gerçekleşmiş, aynı çatlağın kolon tabanı ile ilk ÖFRP şerit arasında da yaklaşık 1mm genişlik ile devam ettiği görülmüştür. Ayrıca aynı yüzde taban üstündeki orta bölgede, eğimli ve düşey çatlağın 1 mm'den fazla genişliğe ulaştığı izlenmiştir. Yüklemeye dik olan her iki yüzde de şeritlerin ortasındaki yatay çatlağın önemli ölçüde geliştiği tespit edilmiştir.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Kolon tabanındaki betonun, aşırı dağılmaya başladığı görülmüştür. Özellikle kuzey yüzde, iki şerit arasında bulunan ortaya yakın yatay çatlağın, 3.0 mm civarına çıktığı ve ayrışmaya başladığı takip edilmiştir. Aynı zamanda bu çatlağın, özellikle doğu yüzde de kolon ortasına kadar 1.5 mm'nin üzerinde genişlikle devam ettiği görülmüştür. İkinci etriye seviyesindeki çatlağın genişliğinin de 1.5 mm'nin üzerine çıktığı belirlenmiştir. Tabanda dağılmamış kısımdan alınan ölçümde, her iki yüzde de tabandaki yatay çatlak genişliğinin 4.0 mm'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Güney yüzde özellikle doğu kısmındaki köşe boy donatı hizasında var olan, düşey ve eğimli çatlakların geliştiği belirlenmiştir.

♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Çatlak genişlikleri, bu noktadan sonra okunamamıştır. Kuzey yüzde iki şerit arası ve taban ile ilk ÖFRP arası beton hemen hemen tümüyle dağılmış ve donatılar kısmen görünür hale gelmiştir. Kuzey yüzde, iki şerit arasında, dağılma öncesi ortada yer alan çatlağın, her iki yan yüzde de önemli miktarda genişleme ile devam ettiği görülmüştür.

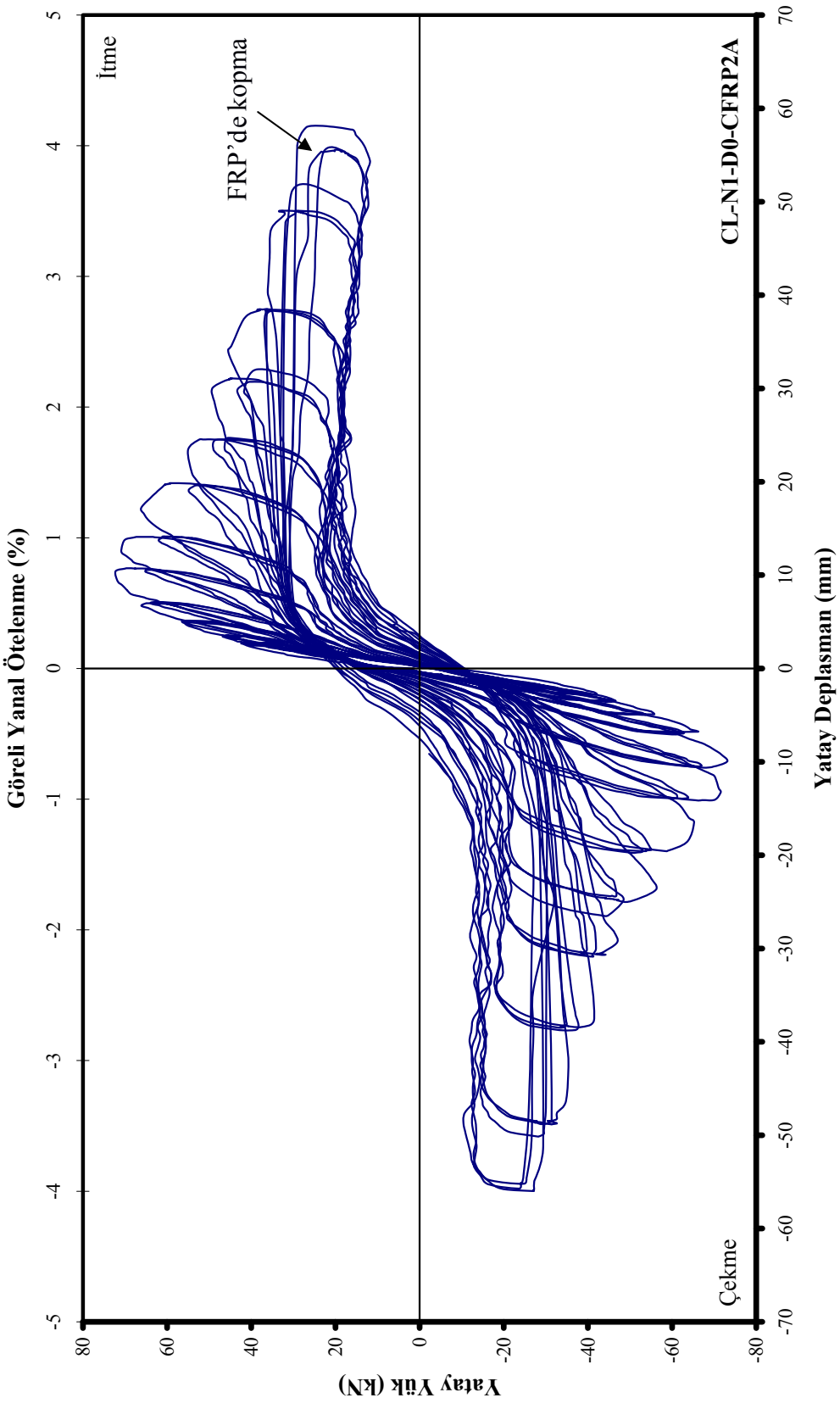
♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Kuzey yüzde taban ile ilk şerit ve iki şerit arası betonun dağılması devam etmiştir. Güney yüzde ise betonda dağılma, daha az ve taban ile ilk şerit arasında yoğunlaşmış, özellikle doğu tarafındaki boy donatı hizasında betonun ana gövdeden dağılmadan ayrıldığı fark edilmiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : İkinci yükleme çevriminde itmede, alt

ÖFRP kopmuştur. FRP şeritin kopmasından sonraki yükleme adımlarında, bu bölgedeki betonun dağılması hızlanmış ve özellikle köşe boy donatılar görülebilir hale gelmiştir.



Şekil 4.13: CL-N1-D0-CFRP2A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü



Şekil 4.14: CL-N1-D0-CFRP2A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği

4.2.6. CL-N1-D0-CFRP3A

Öngerilmeli CFRP ile aktif sargılama yapılan ve başlangıçta hasarsız olan bu deney numunesinde, 250 MPa öngerilme ile aktif sargılama yapılmıştır. Numunenin detayları, Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.15'de yer almaktadır. Deneyin son yük çevrimlerine ait görüntüler, Şekil 4.16 ve 4.17'de görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.6'da verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.6'da ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.6'da yer almaktadır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Öngerilmeli FRP şeritler arasındaki ilk etriye seviyesinde ve izleyen üç etriye seviyesinde, yatay kılcal çatlaklar oluşmuştur. Kuzey yüzde iki öngerilmeli FRP (ÖFRP) arasında yer alan yatay kılcal çatlak, son adımda boydan boya olacak hale gelmiş, güney yüzde ise kısmi olarak görülmüştür. Kolon tabanı ile temel arasında kılcal çatlak oluşumu her iki yüzde de ilk çevrimden itibaren görülmüştür. Yük-deplasman grafikleri arasında önemsenmeyecek derecede, özellikle dayanım değerinde farklılık izlenmiştir.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Tabandaki ve ilk iki etriye seviyesindeki (120 mm, 250 mm) yatay çatlakların belirginleştiği takip edilmiştir (hemen hemen 0.1 mm). İki ÖFRP şerit arasındaki ve şeritlerin hemen üstündeki, ilk iki etriye seviyesindeki yatay çatlakların, yan yüzlere de döndüğü görülmüştür.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Tabanda, birleşim çizgisinde bulunan çatlakların 0.2 mm civarına genişlediği görülmüştür. Kuzey yüzde orta bölgede, tabandan yaklaşık 10 mm yukarıda, kısa bir kılcal yatay çatlak oluşmuştur. Yük-deplasman grafikleri arasında, önemsiz derecede farklılık izlenmiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Tabanda yer alan birleşim hattı boyunca yatay uzanan çatlağın, son çevrimde 0.3 mm civarına genişlediği görülmüştür. Her iki yüzde olmak üzere, şeritler arası ve ikinci şeritin hemen üstünde yer alan yatay çatlakların genişlediği, özellikle kuzey yüzde hemen hemen 0.2 mm olduğu izlenmiştir. Kuzey yüzde, orta donatı hizasında, taban ile ilk ÖFRP şerit arasında kısa ve kılcal, düşey çatlak oluşumu gözlenmiştir. Aynı yüzde doğu

tarafı boy donatı hizasında üst ÖFRP şerit ile ikinci etriye seviyesi arasında kısmen düşey çatlak görülmüştür. Güney yüzde Taban ile ilk şerit arasında köşe boy donatıları hizasından başlayıp, yukarıya doğru içe eğimli giden kılcal çatlaklar takip edilmiştir. Her iki yan yüzde de ikinci şeritin hemen üstünde, köşe donatıların hizasından başlayıp eğimli devem eden çatlaklar oluşmuştur. Grafiksel davranışta, birinci ve diğer çevrimler arasında dayanım ve rijitlik farklılaşması, bu yükleme adımında, hasar ve çatlaklara paralel olarak belirgin hale gelmiştir.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Tabanda yer alan yatay çatlağın genişliğinin, 0.6-0.7 mm'ye ulaştığı görülmüştür. Yüklemeye dik yüzlerde, özellikle iki şerit arasında boy donatıları takip eden kısmen eğimli düşey çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların genişliklerinin, 0.1 ile 0.2 mm olduğu belirlenmiştir. Taban ile ilk şerit arasında, kuzey yüzde ortada düşey (0.1 mm), güney yüzde ise doğu tarafında köşeden başlayan eğimli (kılcal) çatlaklar görülmüştür. Her iki yan yüzde de köşelerdeki donatılar hizasında eğimli ve düşey çatlaklar belirginleşmiş, özellikle doğu yüzünde her iki köşe donatı hizasında tüm bindirme boyu uzunluğunda kısmen eğimli düşey çatlaklar ortaya çıkmıştır. En büyük dayanıma ulaşılan bu yükleme adımında (itme 67.83 kN, çekme 68.10 kN), yük-deplasman grafiğinde çevrimler arasında (birinci ile diğer çevrimler) belirgin rijitlik ve dayanım düşüşleri görülmüş, bunun yanında çevrim sıkışmasının fark edilir biçimde meydana geldiği fark edilmiştir.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Tabandaki yatay çatlağın 0.9-1.0 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Her iki yüke dik yüzde de, kenardaki boy donatı hizalarında özellikle iki şerit arasında eğimli dik çatlakların (0.4 mm), belirgin biçimde genişlediği fark edilmiştir. İki şerit arasındaki ve ikinci şeritin hemen üstündeki, birinci ve ikinci etriye seviyelerindeki yatay çatlaklarda da bu belirgin genişleme izlenmiştir. Taban ile birinci ÖFRP arasında, özellikle köşe boy donatılar hizasında eğimli çatlaklar, genişlemiştir. Dayanım değerinin, bir önceki yük adımı ile yaklaşık aynı kaldığı belirlenmiştir.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Tabanda, birleşim bölgesinde kenarların, özellikle güney yüzde dağılmaya başladığı fark edilmiştir. Tabandaki yatay çatlağın genişliği, 1.2-1.4 mm seviyesine gelmiştir. İki şerit arasındaki

ve ikinci şeritin hemen üstündeki yatay çatlaklar, 0.7-0.8 mm'ye genişlemişlerdir. Bu çatlaklardan kuzey yüzde olanın, kenarlarda boy donatıyı takip eden eğimli çatlaklarla, belirgin biçimde birleştiği görülmüştür.

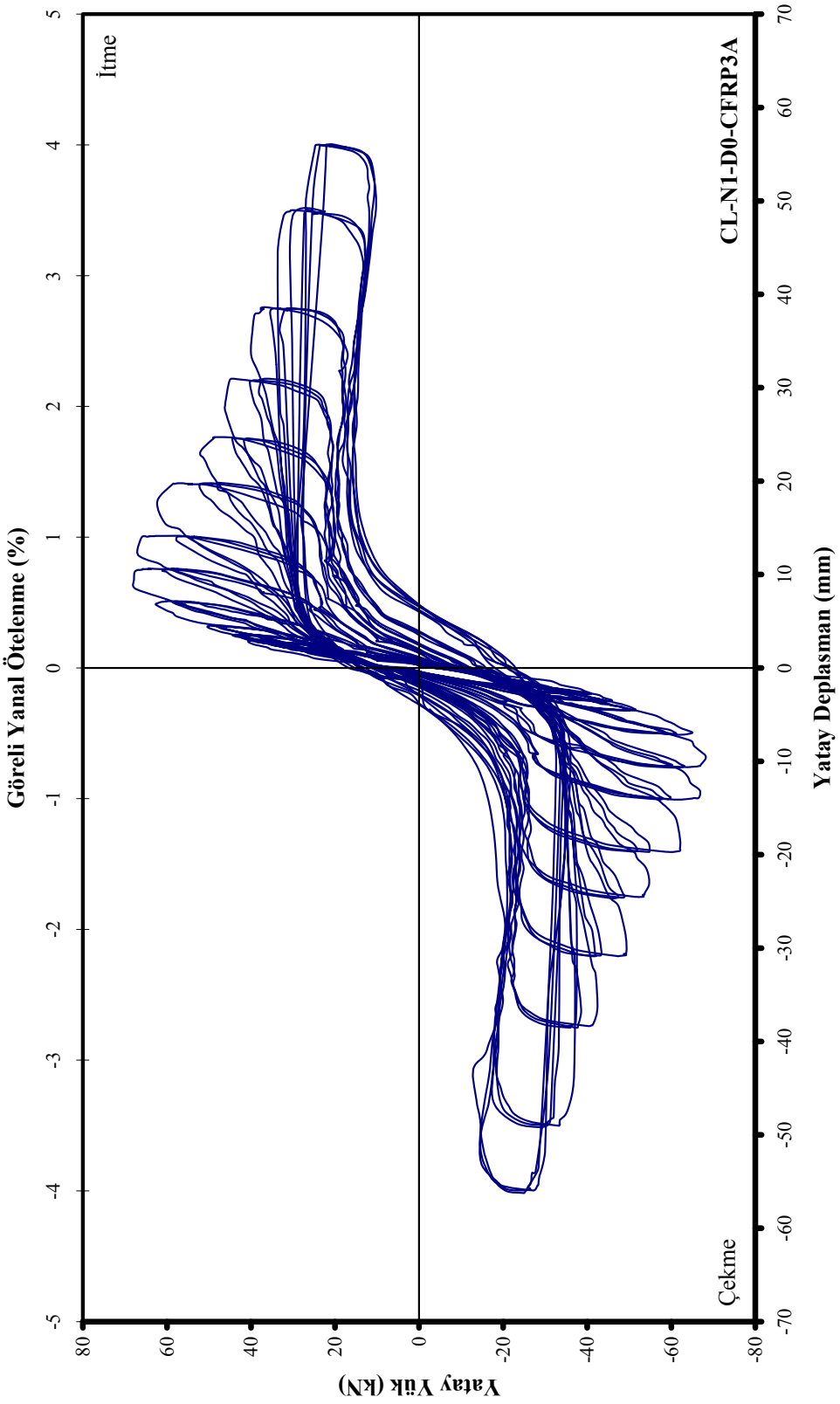
♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Tabandaki yatay çatlak genişliği 2.0-2.5 mm olmuştur. Birinci etriye seviyesindeki, iki şerit arasında kalan yatay çatlak 0.7-0.8 mm, ikinci şerit üstündeki yatay çatlak ise 1.0-1.2 mm seviyesine genişlemiştir. Düşeyde, boy donatılar hizasında oluşan çatlaklar, özellikle kuzey yüzde ve iki şerit arasında belirgin biçimde açılmıştır.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Özellikle kolonun tabanında beton ezilmesi ve dökülmesi oldukça artmıştır. Tabandaki yatay açılma 4.0-5.0 mm değerlerine ulaşmıştır.

♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Çatlak genişlikleri önemli ölçüde artmıştır. Tabanda birleşimde yer alan yatay çatlak 7.0 mm genişliğe ulaşmıştır. Kuzey yüzde, uçları kenar boy donatılar hizasında eğimli olarak düşey ilerleyen, iki şerit arasındaki yatay çatlağın genişliği, 3.0 mm'ye varmıştır. Grafiksel davranışta, çevrim içinde ulaşılan en büyük dayanım sonrası davranışın, yatay hale geldiği gözlenmiştir.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmiştir. Var olan çatlak genişlikleri, betonda dökülme ve parçalanma artmıştır. Güney yüzde köşelerdeki donatılar, taban açılması sırasında en büyük deplasmanda, görünür hale gelmiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Taban ile birinci öngerilmeli FRP şerit arasında yer alan beton, hemen hemen tamamen dağılmış fakat paspayı tümüyle dökülmemiştir. Kuzey yüzde iki şerit arasında yatayda var olan çatlak civarındaki beton dökülmüş ve alttaki etriye görünür hale gelmiştir. Güney yüzde, alt kısımda, kenarlardaki beton kısmen parçalanmış ve kenardaki donatıların uçları ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.15: CL-N1-D0-CFRP3A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



Şekil 4.16: CL-N1-D0-CFRP3A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.17: CL-N1-D0-CFRP3A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.7. CL-N1-D1-CFRP1A

Öngerilmeli CFRP kullanılarak, 1000 MPa gerilme ile aktif sargılama yapılan, ön hasarlı bu numunenin detayları Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Numune deney öncesinde, % 4.0 göreli yanal öteleme değerinde ve Bölüm 3.6'da verilen tersinir tekrarlanır yükleme protokolü ile hasar almıştır. Deprem sırasında orta ve ağır hasar aralığında hasar seviyesinde etkilenmiş kolonların, tamir edildikten sonra, aktif sargılama yöntemi ile güçlendirilmesinin sonuçları incelenmiştir. Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.18'de görülmektedir. Deneyin başlangıcına ilişkin görüntü Şekil 4.19'da ve son yük çevrimine ait görüntü Şekil 4.20'de görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.7'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.7'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.7'de yer almaktadır. Bu deneyde, deneye ait bazı adımlardaki fotoğraflar, makine ayarının tam yapılamamış olması nedeni ile kullanılamaz durumdadır. Bununla birlikte, tüm deneylerde olduğu gibi deney sırasında, oluşan çatlakların yazılı kayıt edilmesi ve kağıt üzerine de çizilmiş olması, herhangi bir gözlem kaybına neden olmamıştır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Bu yükleme adımında tabanda, öngerilmeli FRP (ÖFRP) şeritler arasındaki ilk etriye seviyesinde ve izleyen üç etriye seviyesinde, yatayda kılcal çatlaklar oluşmuştur. Yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arasında farklılık izlenmemiştir.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Tabandaki, ÖFRP şeritler arasında kalan etriye seviyesindeki (120 mm) ve ikinci etriye seviyesindeki (250 mm) yatay çatlakların belirginleştiği görülmüştür (0.1 mm çatlak genişliği). Bu yük adımında, birinci çevrimin çekme yüklemesinde yanlışlıkla 3.5 mm tepe deplasman hedefine gidileceğine, 4.7 mm 'ye gidilmiştir.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Tabanda, birleşim çizgisinde bulunan yatay çatlağın ve ikinci ÖFPR şerit üstünde kalan, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın, 0.35 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. İki ÖFRP şerit arasında, ortada kalan yatay çatlağın genişliği ise 0.1-0.2 mm arasında kalmıştır. Kuzey yüzde taban

ile alt ÖFRP şerit arasında doğu tarafında ve iki ÖFRP arasında her iki yan yüze yakın, boy donatılar hizasında düşey kılcal çatlaklar oluşmuştur. Taban üstünde oluşan daha belirgin ve iki şerit arasındakiler içe eğimli olarak izlenmiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Tabandaki ve ikinci etriye seviyesindeki (250 mm) yatay çatlakların genişlikleri 0.4-0.5 mm seviyesine gelmiştir. İki şerit arasındaki yatay çatlak genişliği ise 0.2-0.3 mm seviyesine ulaşmıştır. Yatay çatlakların yan yüzlerde de ilerlediği takip edilmiştir. Her iki yüzde de, taban ile alt şerit ve iki şerit arasında, boy donatılar hizasında, düşey kılcal çatlaklar oluşmuştur. İki şerit arasında meydana gelenlerin, kolon ortasına doğru eğimli oldukları görülmüştür. Bir önceki yük adımında, belirtilen bölgede oluşan çatlakların ise belirginleşerek, 0.1 mm genişliğe ulaştığı izlenmştir. Yük-deplasman grafiğinde, dayanım ve rijitlik farklılaşması oluşmuştur.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Taban ve ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlakların genişliği 0.6 mm'ye, iki şerit arasında kalan yatay çatlağın genişliğinin ise 0.3-0.4 mm'ye ulaştırğı görülmüştür. Kuzey yüzde, alt ÖFRP şerit altında orta boy donatı hizasından başlayıp, aşağı doğru eğimli olarak 10-15 mm ilerleyip, batı yüzüne kadar devam eden, 0.1 mm genişlğinde çatlağın oluştuğu belirlenmiştir. Her iki yüzdeki, köşe boy donatılar hizasındaki eğimli düşey çatlakların, 0.1-0.2 mm genişliğe ulaştığı takip edilmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, dayanım ve rijitlik farklılaşması belirgin hale gelmiş, çevrim sıkışmasının başladığı izlenmiştir. Bu yük adımında, enbüyük dayanım olan 65.60 kN (çekme 71.43 kN) değerine ulaşılmıştır.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Tabandaki yatay çatlağın genişliği 1.0-1.2 mm seviyesine ulaşmıştır. Birinci ve ikinci etriye seviyesindeki çatlakların genişlikleri, 0.5-0.6 mm civarında kalmıştır. Bir önceki yük adımında kuzey yüzde, taban ile ik ÖFRP şerit arasında oluşan, orta boy donatı seviyesinden başlayıp, yatay olarak batı yüzüne ilerleyen çatlağın genişliği, 0.5 mm olarak okunmuştur. Taban ile alt şerit arasındaki köşe boy donatılar hizasındaki, düşey çatlakların genişliği, 0.3 mm ile 0.4 mm arasında değişim göstermiştir. İki şerit arasındaki eğimli düşey çatlakların geliştiği görülmüştür.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Kuzey yüzde, iki şerit arasında yer alan yatay çatlağın ve bu çatlakla birleşen, kenar boy donatılar hizasındaki eğimli düşey çatlakların genişlikleri, 1.0-1.2 mm'ye ulaşmıştır. Alt şeritin altındaoluşmuş olan, batı tarafa ilerleyen yatay çatlak, yük adımının sonunda 1.6 mm genişliğe erişmiştir. Güney yüzde altta ve iki şerit arasındaki, kenar donatılar hizasındaki eğimli düşey çatlakların genişliği 1.2 mm olarak okunmuştur.

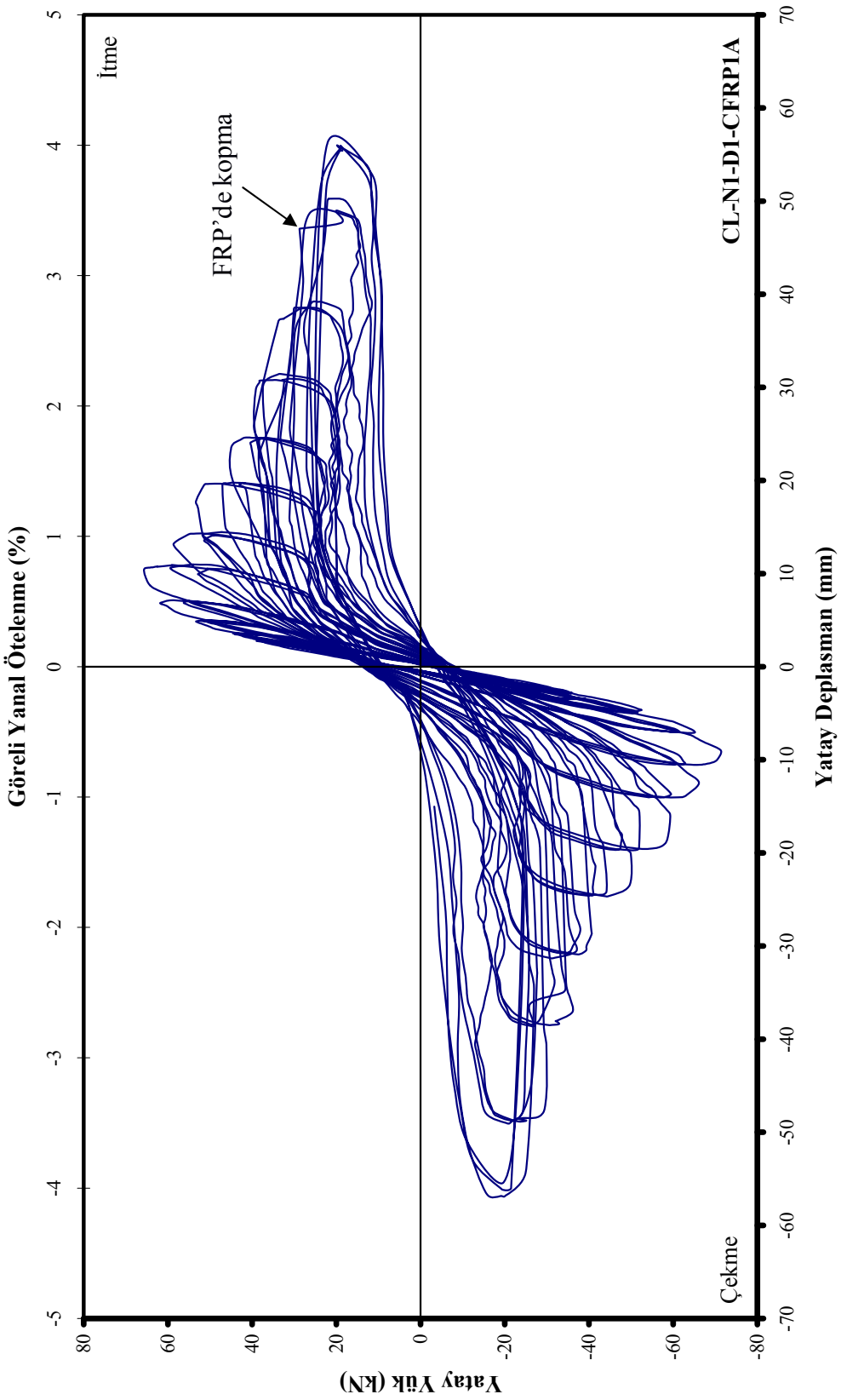
♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Bu adıdan itibaren çatlakların çok fazla genişlemesi ve dökülme olmaksızın beton parça hareketlenmelerinin olmasından dolayı, çatlka genişlği takibi bırakılmıştır. Kullanılan tamir harcının lifli olması, paspayında parçalanmanın ve dökülmenin, erken seviyelerde görülmesini engellemiştir. Grafiksel davranışta, çevrim içinde ulaşılan en büyük dayanım sonrası davranışın, yatay hale geldiği gözlenmiştir.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Yüklemeye dik her iki yüzde de tabandaki, yatay çatlağın ve güney yüzdeki iki şerit arasındaki yatay çatlağın genişliklerinin oldukça arttığı izlenmiştir. Her iki yüzde taban ile ilk şerit arasındaki betonun, parça olarak dışa doğru ayrılmaya başladığı görülmüştür. Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmiştir.

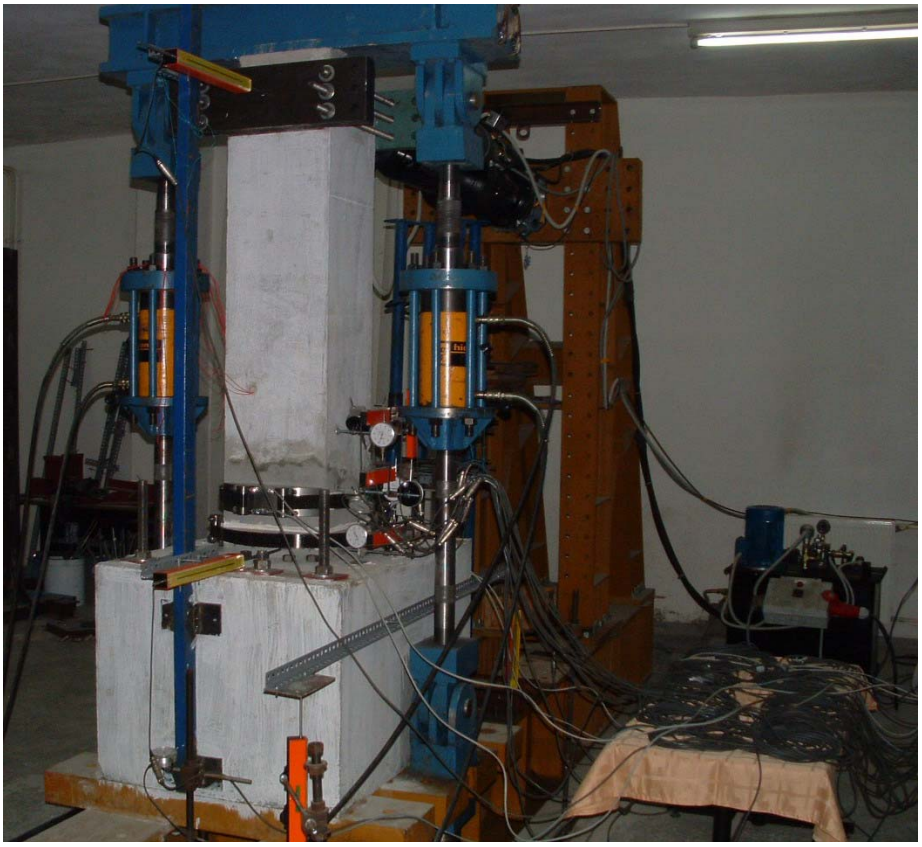
♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Bu yükleme adımının, ikinci çevriminde çekme yüklemesinde, en büyük deplasmana yaklaşırken, ulaşılan enbüyük dayanım değerinin ardından, altta yer alan öngerilmeli FRP şerit kopmuştur. Özellikle FRP'nin kopmasının ardından çatlak genişlikleri ve beton parçaların ana gövde ile arası açılmıştır.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Bu yükleme adımının ikinci çevriminde, itme yüklemesinde, üst öngerilmeli FRP, kısmen kopmuştur. Belirtildiği gibi kopma kısmi olmuş, şerit ve aparat bulundukları yerden düşmemiştir.

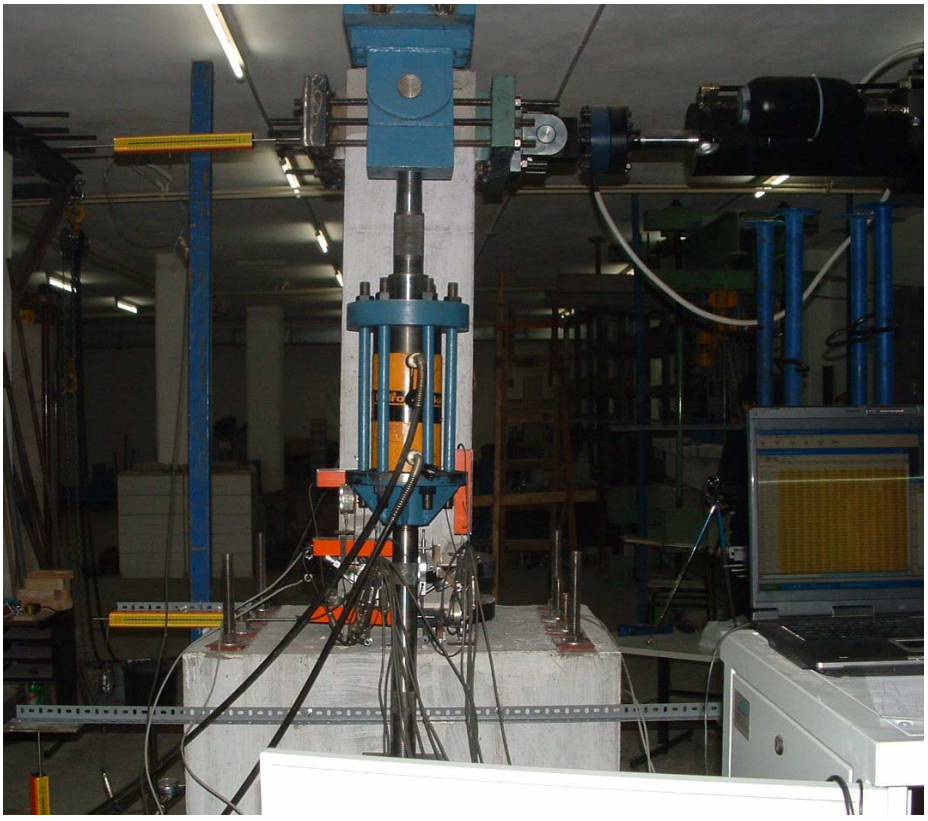
♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Bu yükleme adımında betonda ayrılma ileri seviyelere gelmiştir. Deney tamamlandıktan sonra, gövdeden kısmen ayrılan beton parçaların küçük çekiç darbesi ile tabaka olarak düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.18: CL-N1-D1-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



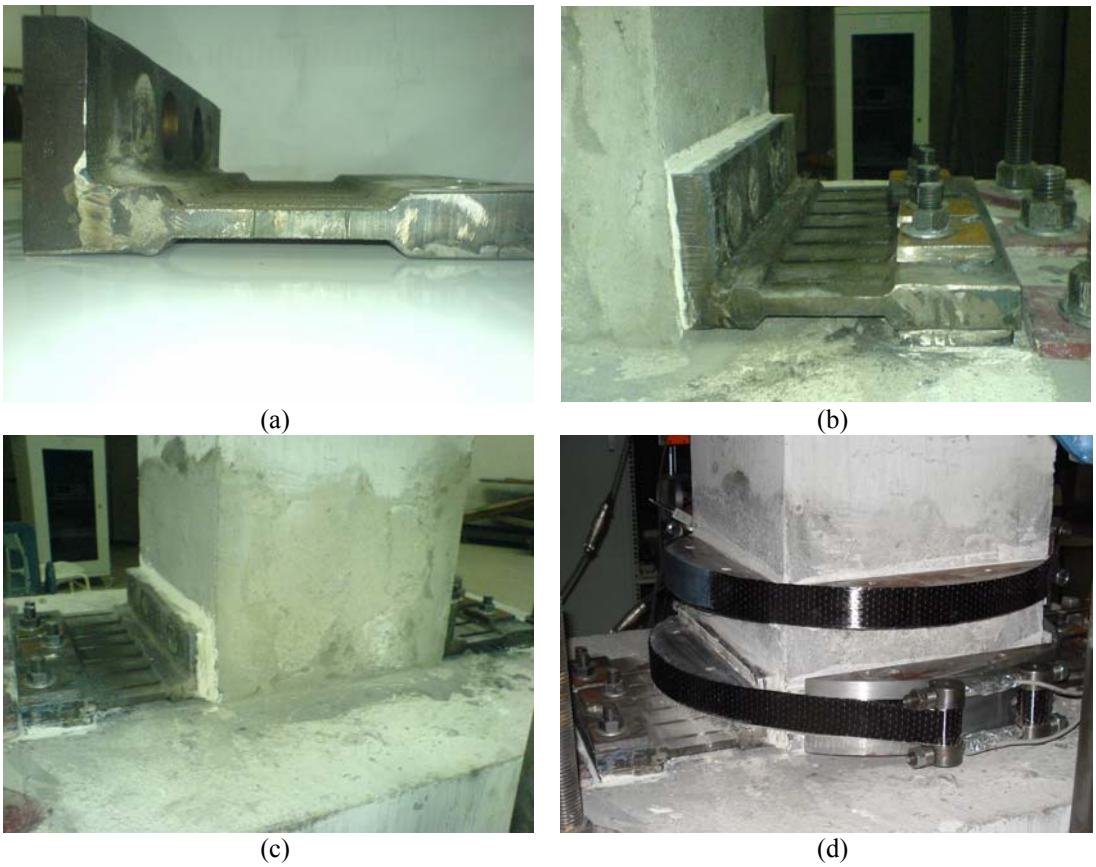
Şekil 4.19: CL-N1-D1-CFRP1A numunesi, deney başlangıcına ait görüntü



Şekil 4.20: CL-N1-D1-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.8. CL-N1-D1-CFRP1AC

Bir önceki numunedeki gibi öngerilmeli CFRP kullanılarak, 1000 MPa gerilme ile aktif sargılama yapılan bu numunenin detayları, Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Numune deney öncesinde, % 4.0 göreli yanal öteleme değerinde ve Bölüm 3.6'da verilen tersinir tekrarlanır yükleme protokolü ile hasar almıştır. Deprem sırasında orta ve ağır hasar aralığında hasar seviyesinde etkilenmiş kolonların, tamir edildikten sonra, aktif sargılama yöntemi ile güçlendirilmesinin sonuçları incelenmiştir.



(a) (b)

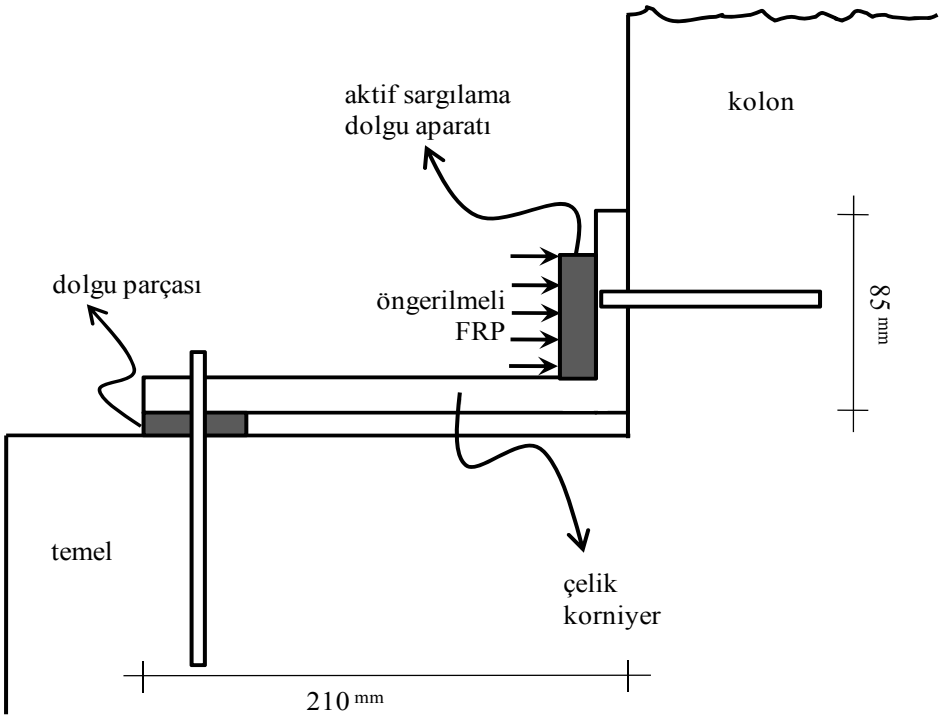
(c) (d)

Şekil 4.21: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinde kullanılan korniyer uygulaması

Bir önceki numuneden farklı olarak, bu numunede, kolon tabanı ve temel birleşim bölgesinde, özel imal ettirilen ve kolon genişliği kadar olan korniyerler kullanılmıştır. Hasar görmüş kolonda taban kaymasını ve hasarlı bölgenin bütünlüğünü amaçlayan bu korniyerler, yükleme yönüne dik yüzlerde, beton tamiri sonrasında epoksi ile belirlenen noktalara gömülen millere, kolonla arasında boşluk kalmayacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Korniyerler, öngerilmeli FRP dolgu aparatının uyulama bölgesi

yüksekliğinde olup, aparatın seviyesinden 17 mm yukarıda bitmektedir. Korniyere ait görüntüler ve uygulanmış hali, Şekil 4.21'de görülmektedir.

Şekil 4.22'de çelik korniyerin, kolon-temel birleşimine uygulanması ve dış ölçüleri verilmiştir. Çelik korniyerin kalınlığı 26 mm olup, temel üzerinde kalan bölümde, kolondan 40 mm ileriden itibaren kalınlık 10 mm'ye düşürülmüş, temele gijonla bağlanan bölgede ise kalınlık tekrar 26 mm'ye çıkartılmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.22: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinde kullanılan korniyer uygulaması detayı

Çelik korniyerlerin montajından sonra, öngerilmeli FRP uygulaması diğer numunelerde olduğu şekliyle uygulanmıştır. Detayları Bölüm 3.3.5'te verilen öngerilmeli FRP uygulamasında, 1000 MPa gerilme uygulanmıştır.

Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.23'de görülmektedir. Deneyin sonuna ait görüntüler Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de yer almaktadır. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.8'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.8'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.8'de yer almaktadır. Kolon-temel birleşim bölgesinde çelik korniyer uygulaması olduğundan dolayı, kolon tabanındaki çatlak ve hasar oluşumları tam olarak takip

edilememiştir Bununla birlikte, köşelerde açıkta kalan kısımlardan elde edilen izlenimler, anlatımda yer almaktadır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Bu yük adımında, son çevrimde güney yüzde, tabanda köşe bölgede yatay kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Yük-deplasman grafiğinde çok az olmakla birlikte, ilk yük çevrimi ile diğer çevrimler arasında farklılaşma görülmüştür.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Kolon tabanında, köşelerde, yatay çatlakların belirginleştiği gözlenmiştir. Yüklemeye dik olan her iki yüzde de, ikinci yük çevriminde, öngerilmeli FRP (ÖFRP) şeritler arasında yer alan birinci etriye seviyesinde (120 mm), yatayda kılcal çatlamanın oluştuğu fark edilmiştir.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Birinci etriye seviyesindeki ve tabandaki yatay çatlakların, ilk çevrimden itibaren genişlediği gözlenmiştir (0.1-0.2 mm). İkinci etriye seviyesi olan, temelden 250 mm yukarıda, her iki yüzde de yatay çatlakların oluştuğu görülmüştür. Grafiksel davranışta, birinci ve diğer çevrimler arasındaki dayanım ve rijitlik farklılaşmasının belirginleşmeye başladığı belirlenmiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Köşelerden takip edildiği kadarıyla, tabandaki yatay çatlak, 0.3 mm genişliğe ulaşmıştır. Şeritler arasında, birinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın genişliği, kuzey yüzde 0.2 mm, güney yüzde ise 0.3 mm olarak ölçülmüştür. İkinci etriye seviyesinde (temelden 250 mm) ise çatlak genişlikleri, kuzey yüzde yaklaşık 0.1 mm, güney yüzde 0.1 mm olarak okunmuştur. Güney yüzde, şeritler asarında yer alan çatlağın, batı tarafta aşağıya doğru indiği ve batı yüzde de eğimli olarak 15 mm devam ettiği görülmüştür. Kuzey yüzde, alttaki ÖFRP şerit üstünde, doğu tarafında boy donatılarla uyumlu, içeri doğru eğimli düşey ve kılcal çatlak oluşmuştur. Yük-deplasman grafiğinde dayanım ve rijitlik farklılaşması belirgin biçimde görülmektedir.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Bu yükleme adımında, her iki yüklemeye dik yüzde de, tabandaki ve şeritler arasındaki yatay çatlakların genişlediği gözlendi. Yük adımı sonunda kuzey yüzde, tabandaki çatlağın batı tarafta 0.5 mm olduğu belirlenirken, doğu tarafta köşede, tabandaki çatlağa ek olarak

temel seviyesinden 20-25 mm yukarıda, yan yüzde de ilerleyen ve 0.2 mm genişliğe sahip, yeni bir çatlağın oluştuğu izlenmiştir. Aynı yüzde, şeritler arasındaki çatlağın 0.5 mm genişliğe ulaştığı, doğu tarafta daha önce oluşmuş olan, boy donatı hizasındaki eğimli düşey çatlakla devam ettiği görülmüştür. Güney yüzde tabandaki yatay çatlak genişliğinin 0.4 mm ve şeritler arasındaki çatlak genişliğinin 0.5 mm olduğu belirlenmiştir. Ortadaki çatlağın yan yüzlere de geçtiği, aynı zamanda güney yüzde, ortada yer alan boy donatılar hizasında eğimli ikincil bir çatlağın oluştuğu görülmüştür. Her iki yüzde de ikinci etriye seviyesindeki çatlakların 0.1 mm genişlikte kaldığı kaydedilmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, çevrim sıkışmasının başladığı izlenmiştir. Numunenin en büyük dayanımına bu yük adımında ulaşılmıştır (İtme 56.03 kN, çekme 56.32 kN).

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Tabandaki ve ÖFRP şeritler arasındaki yatay çatlakların genişlediği görülmüştür. Özellikle kuzey yüzdeki korniyerin, kolona basan kısmının, üst seviyeden ayrıldığı gözlenmiştir. Güney yüzde, şeritler arasında yatay çatlağın 10-20 mm üstünde, orta bölgede kalmak üzere ikinci bir yatay çatlak oluşmuştur. Grafiksel davranışta çevrim sıkışması belirgin hale gelmiştir.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Özellikle ÖFRP şeritler arasındaki çatlağın önemli miktarda genişlediği gözlenmiştir. Çatlak genişlikleri kuzey yüzde 1.4 mm, güney yüzde 1.2 mm olarak ölçülmüştür. FRP şeritler arasında, korniyerin bittiği noktadan ortadaki yatay çatlağa kadar, özellikle orta boy donatılar hizasında düşey ve kılcal çatlaklar oluşmuştur. Özellikle son çevrimde, yan yüzlerde orta boy donatılar hizasında, taban ile alt ÖFRP şerit arasında düşey ve kılcal çatlaklar görülmüştür. İlk çevrimde itme ve çekmede elde edilen dayanımların, numunenin dayanımına çok yakın olduğu görülmüştür. Çelik korniyerlerin kolona dayanan kısmı ile bu parçanın bastığı kolon yüzey arasında birbirine göre hareketlenme görülmüştür.

♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : ÖFRP şeritler arasındaki yatay çatlakların genişlikleri, kuzeyde 1.8-2.0 mm, güneyde 2.2-2.4 mm aralıklarına gelmiştir. Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki

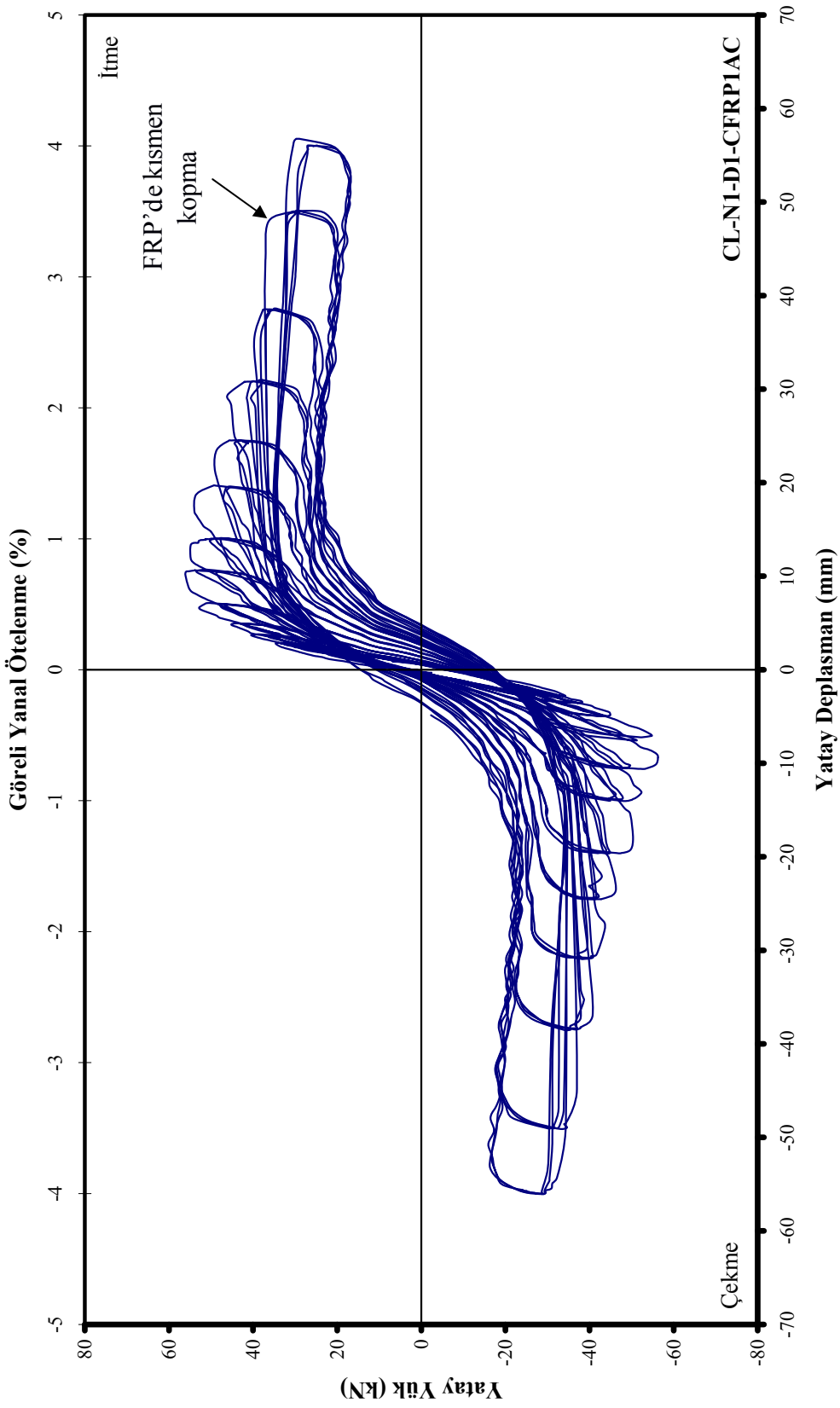
davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmeye başlamıştır.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : ÖFRP şeritlerin arasındaki yatay çatlaklar genişlemeye devam etmiştir. Özellikle kuzey yüzde, kolon-temel birleşimindeki köşe noktalarda, beton parçalar ayrılmaya başlamıştır.

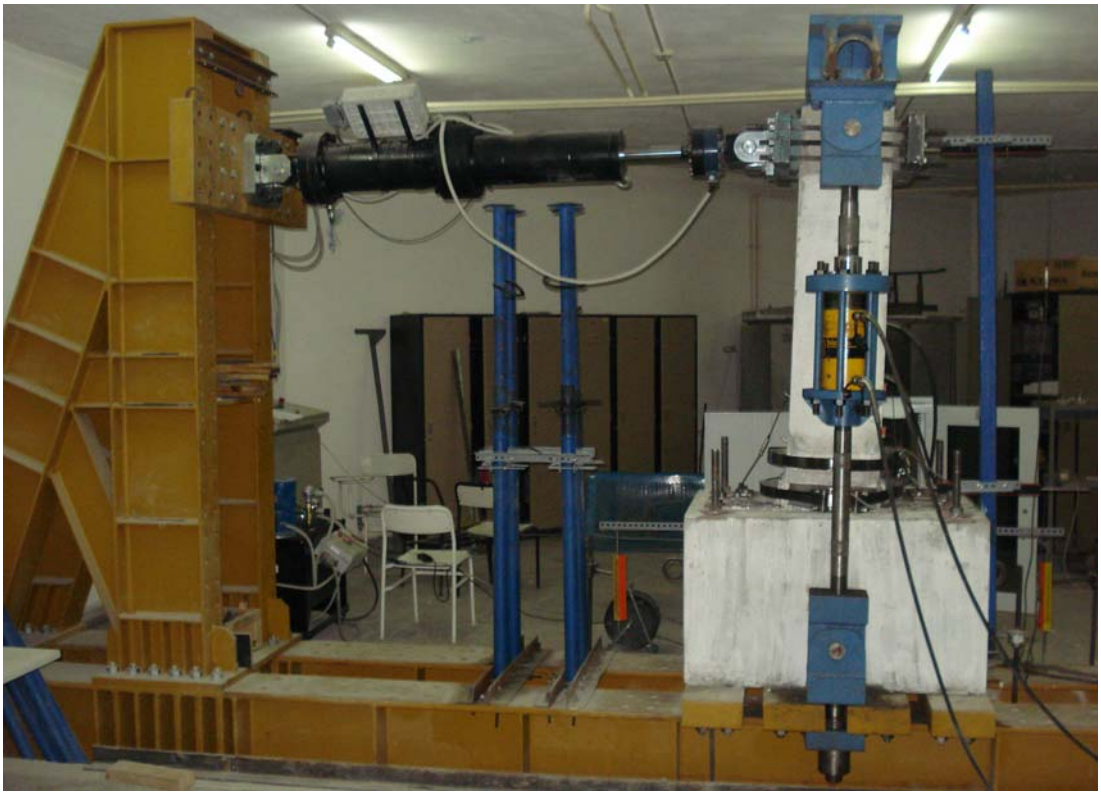
♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Orta bölgedeki yatay çatlaklar, önemli ölçüde genişlemiştir. Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar tamamen yatay hale gelmiştir.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Bu yükleme adımının ilk çevriminde, itme yüklemesinde alt FRP şerit kısmen kopmuştur. Tamamen kopma gerçekleşmemiş olup, FRP şerit ve aktif sargı aparatı yerinde kalmıştır.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Son yükleme adımında, özellikle şeritler arasındaki çatlakların etrafından küçük parçaların döküldüğü, bu çatlakların genişliğinin çok ileri seviyeye geldiği görülmüştür.



Şekil 4.23: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



Şekil 4.24: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.25: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.9. CL-N2-D0-CFRP00

Sargılama uygulaması yapılmamış, eksenel yük seviyesi N/N_0 = 0.10 değerindeki referans numune olan bu kolonun, davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği Şekil 4.27'de yer almaktadır. Numunenin, son çevrimde itme yükü altında en büyük deplasmandaki görüntüsü, Şekil 4.26'da görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.9'da verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.9'da ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.9'da yer almaktadır. Bu numunede, güney yüzde, batı kenarda bulunan boy donatıdaki alt deformasyon pulundan, veri alınamamıştır (Bölüm 3.3.2, Şekil 3.6).

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Bu yükleme adımında, yüklemeye dik her iki yüzde de, kolon tabanı ile temel birleşim noktasında, yerel olacak şekilde, yatay ve kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Yatay yük-deplasman grafiğinde, birinci çevrim ile diğer çevrimler arasında rijitlik ve dayanım farklılaşması görülmüştür.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Tabandaki yatay kılcal çatlağa ilave olarak, ilk dört etriye seviyesinde (120 mm, 250 mm, 350 mm, 450 mm) yatay kılcal çatlak oluşumu izlenmiştir.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Bu yükleme seviyesinde, kuzey yüzde ilk iki etriye arasında köşelerdeki boy donatılarla uyumlu, eğimli ve düşey kılcal çatlaklar oluşmuştur. İlk etriyenin hemen altında, yine köşe boy donatıları ile uyumlu, eğimli olarak yan yüzlere ulaşan 20-30 mm uzunluğunda kılcal çatlaklar da görülmüştür. Bu yüzde birinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın genişliği 0.1-0.2 mm, ikinci etriye seviyesindeki çatlağın genişliği 0.1 mm olarak kaydedilmiştir. Güney yüzde eğimli veya düşey çatlağa rastlanmamıştır. Etriye seviyelerindeki yatay çatlakların genişlikleri, birinci seviyede 0.1 mm, ikinci seviyede 0.1-0.2 mm, üçüncü seviyede ise 0.1 mm olarak belirlenmiştir. Tabandaki yatay çatlağın belirginleştiği, 0.1 mm civarında genişliğe ulaştığı takip edilmiştir. Grafiksel olarak özellikle itme yüklemesinde, çevrimler arası dayanım ve rijitlik farklılığı belirginleşmiştir. Sıyrılmanın başlamış olduğu düşüncesi oluşmuştur.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Kuzey yüzde, kolon tabanında yatay çatlak gelişimi, sınırlı düzeyde kalmıştır (0.1-0.2 mm). Bununla birlikte ikinci etriye seviyesindeki (250 mm) yatay çatlağın genişliği, 0.4 mm değerine ulaşmıştır. Bir önceki adımda köşe donatılar hizasında, ilk iki etriye arasında oluşan çatlakların ilerlediği ve tabandan bindirme boyu uzunluğunca, hemen hemen köşe boy donatıları takip ettikleri görülmüştür. Ayrıca orta boy donatı ile uyumlu, yine bindirme boyu uzunluğunca, düşey ve eğimli çatlamanın olduğu gözlenmiştir. Tabandan 15-20 mm yukarıda, orta bölgede, yerel olacak yatay kılcal çatlama izlenmiştir. Bu çatlakların genişliklerinin, 0.1 ile 0.2 mm arasında değiştiği kayıt edilmiştir. Güney yüzde, belirgin bir eğimli ve düşey çatlak oluşumu takip edilememiştir. Sadece orta bölgede, ilk etriye seviyesinden başlayıp, 25-30 mm düşeyde ilerleyen kılcal bir çatlama tespit edilmiştir. Bu yüzde tabanda yer alan çatlağın, 0.2-0.3 mm genişliğe ulaştığı belirlenmiştir. İlk iki etriye seviyesindeki yatay çatlakların geliştiği görülmüştür. Yük-deplasman grafiğinden, hem itme hem de çekme yükü için, çevrimler arası dayanım ve rijitlik farklılığı belirginleştiği ve itme yüklemesi sırasında çevrim sıkışmasının oluşmaya başladığı görülmüştür. Bu yük adımında kolon dayanımı olan 43.04 kN (çekme 50.85 kN) değerine ulaşılmıştır.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Bir önceki adımda ulaşılan dayanım değeri bu yükleme adımında da hemen hemen korunmuştur. Bu adımda çatlakların geliştiği ve hasar durumunun arttığı tespit edilmiştir. Kuzey yüzde taban seviyesindeki yatay çatlağın, 0.1-0.2 mm genişliğinde kaldığı belirlenmiştir. İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişliği 0.5-0.5 mm değerine ulaşmıştır. Bir önceki adımda oluşan eğimli ve düşey çatlakların geliştiği, özellikle doğu tarafta yer alan boy donatı ile uyumlu düşey çatlağın genişliğinin, 0.3-0.4 mm civarına geldiği görülmüştür. Güney yüzde ise tabanda yer alan yatay çatlak genişliği 0.3 mm değerine ulaşmıştır. Bu yükleme adımında, güney yüzde de, 0.2 mm genişliğe varan eğimli ve düşey çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Güney yüzdeki boy donatılarda da belirgin sıyrılmanın başladığı düşüncesi kuvvet kazanmıştır. Yan yüzlerde, özellikle köşe boy donatılarla uyumlu, eğimli ve düşey çatlaklar meydana gelmiştir. Yine yan yüzlerde, ikinci etriye seviyesinde yatay çatlağın belirginleştiği izlenmiştir. Grafiksel olarak, çevrimler arası rijitlik ve dayanım azalması ile çevrim sıkışması

davranışları tam olarak ortaya çıkmıştır.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Bu yükleme adımında, kuzey yüzde yer alan tabandaki çatlakta, bir önceki adımda olduğu gibi herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Tabandan 250 mm yukarıda, ikinci etriye seviyesinde yer alan yatay çatlağın, 1.2 mm genişliğe ulaştığı tespit edilmiştir. Tabandan bu seviyeye kadar, köşe boy donatıları hizasında yer alan kısmen düşey çatlakların, 0.5-0.6 mm genişliğe ulaştıkları görülmüştür. Güney yüzde taban seviyesindeki yatay çatlak, 0.4-0.5 mm genişliğe ulaşmıştır. Eğimli ve düşey çatlakların geliştiği görülürken, özellikle doğu taraftaki köşe boy donatı ile uyumlu düşey çatlağın, 0.8-1.0 mm'ye genişlediği gözlenmiştir. Birinci ve ikinci etriye seviyelerindeki çatlakların, 0.5-0.6 mm genişliğe ulaştığı belirlenmiştir. Yan yüzlerdeki eğimli ve düşey çatlakların geliştiği, orta donatı seviyesinde ise eğimli çatlamanın olduğu izlenmiştir. Aynı zamanda etriye seviyelerindeki yatay çatlaklar, yan yüzlerde daha belirgin biçimde takip edilmeye başlanmıştır. Plastikleşen bölgeden, küçük beton parçalar dökülmeye başlamıştır.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Bu yükleme adımında çatlak genişlikleri ve hasar durumu oldukça artmıştır. Kuzey yüzde, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak, yan yüzlerde de devam eder biçimde, tümüyle açılmaya başlamıştır. Köşe boy donatıların hizasında yer alan düşey çatlaklarda da benzer genişleme takip edilmiştir. Orta boy donatı hizasında, bindirme boyu alt ve üst bölgelerinde, betonun parça olarak kabarmaya başladığı izlenmiştir. Güney yüzde, özellikle taban ile ilk etriye seviyesi arasındaki, köşe boy donatılarla uyumlu çatlakların oldukça genişledikleri gözlenmiştir.

♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Bu yükleme adımında, yatay yük deplasman grafiğinde gözlenen, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmeye başlamıştır. Kolondan büyük parçalar halinde beton ayrışmaların olduğu ve özellikle köşe boy donatılar civarında paspayının döküldüğü gözlenmiştir.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Çatlaklarda açılma ve beton parça dökülmesi artmıştır. Güney yüzde, birinci etriye seviyesinde yatay çatlak, doğu

yüzünde de devam edecek şekilde, ilerleyerek önemli ölçüde genişlemiştir.

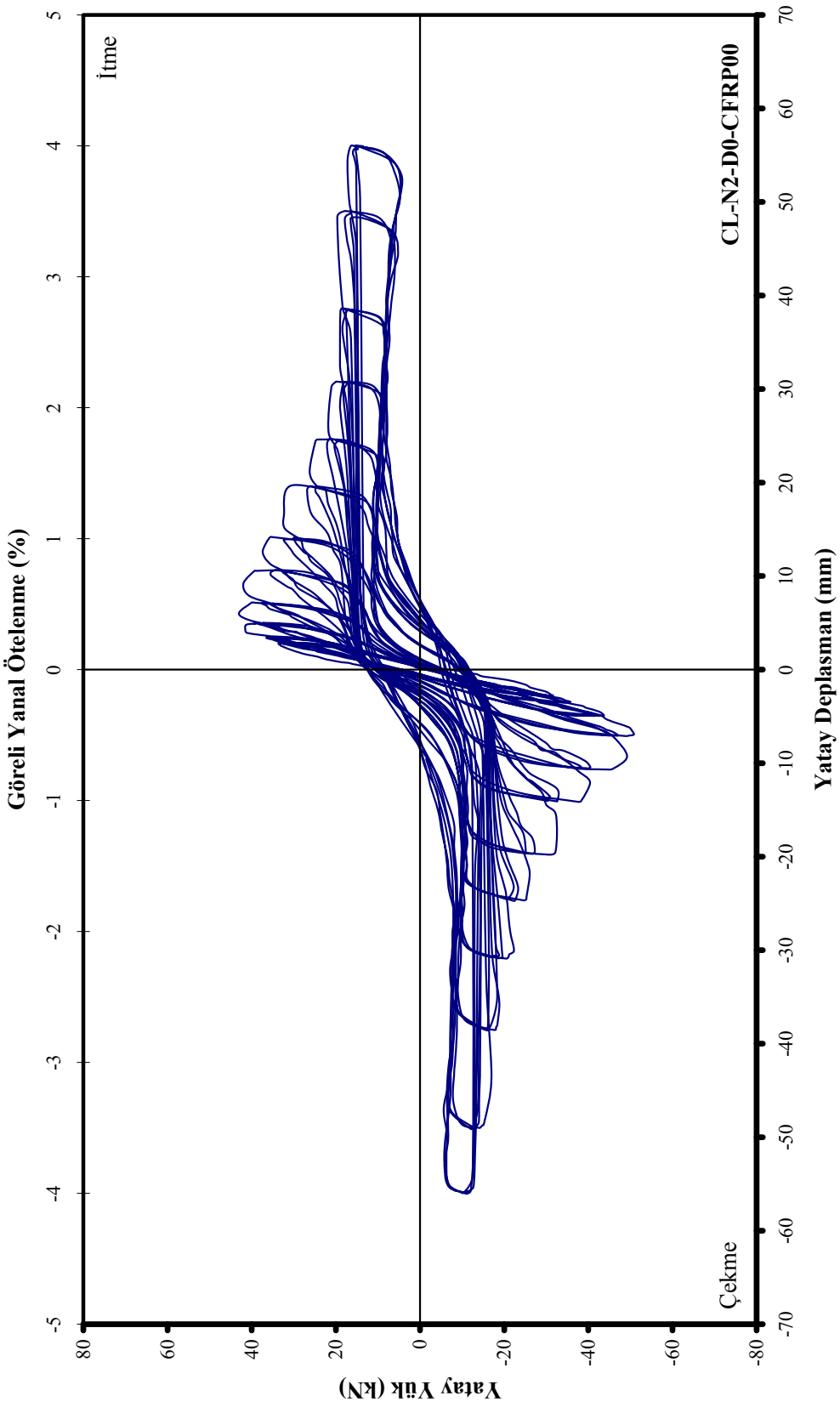
♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Betonda, çatlakların olduğu bölgelerde açılma ve hasar artmıştır. Özellikle batı yüzde, yaklaşık 45° ile plastikleşen bölgeyi geçen çatlağın belirgin olarak ortaya çıktığı görülmüştür.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Özellikle kuzey yüzde, tabandan ikinci etriye seviyesine kadar olan bölgede, tüm boy donatıların etrafında yer alan paspayı dökülmüştür. Güney yüzde ise aynı dökülme, tabandan birinci etriye seviyesine kadar ve özellikle köşe donatılar etrafında gerçekleşmiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Kuzey yüzde ikinci etriye seviyesinde, güney yüzde ise birinci etriye seviyesinde oluşan açılma ciddi seviyelere ulaşmıştır. Batı yüzünde izlenen 45° eğimli çatlağın da önemli derecede açıldığı takip edilmiştir.



Şekil 4.26: CL-N2-D0-CFRP00 numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.27: CL-N2-D0-CFRP00 numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği

4.2.10. CL-N2-D0-CFRP1P

Eksenel yük seviyesi N/N_0 = 0.10 olan bu numunede, 3 kat pasif FRP sargılaması uygulanmıştır. Bindirme boyu yüksekliğinden, boy donatı çapı kadar uzun olarak yapılan uygulamada, kolon köşeleri önceden pahlanmıştır. Uygulamanın detayları Bölüm 3.3.4'de yer almaktadır. Davranışa ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.28'de görülmektedir. Numunenin, son çevrimde en büyük deplasmandaki görüntüsü, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da yer almaktadır. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.10'da verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.10'da ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.10'da yer almaktadır. FRP sargılanmış olan, donatı bindirme bölgesinde, beton yüzeye ait hasar durumu, FRP nedeni ile izlenememiştir. Bu bölge dışındaki çatlaklar ve FRP üzerinde oluşan değişimler burada verilmektedir.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : FRP uygulama sırasında epoksinin, FRP sınırlarından bir miktar dışarıya kadar betona sürülmesi nedeni ile taban ve FRP üst sınırında, çatlak takibi zorlaşmıştır. Bu yük adımında kolon tabanında, sürekli olmayan, bir iki noktada beliren, yatay ve kılcal çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Alttan dördüncü (450 mm) etriye seviyesinde, yatay kılcal çatlak oluşmuştur. Birinci çekme yüklemesi ile diğer çevrimlerin çekme yüklemeleri arasında, özellikle rijitlik farklılığı görülmüştür.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Bu yükleme adımında, kuzey yüzde, beşinci etriye seviyesinde de yatay ve kılcal çatlak oluşumu izlenmiştir. Son yük çevriminde FRP'nin bittiği üst bölgede, yerel olarak ve epoksi üzerinde çatlağa rastlanmıştır.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Tabanda bulunan çatlaklar sürekli hale gelmekle birlikte, genişlik olarak, epoksi üzerinden görülebildiği kadarıyla kılcal seviyede kalmıştır. Betonda, özellikle taban birleşim hattında oluşan çatlamanın, epoksi üzerinde görünür hale gelebilmesi, diğer numunelerle karşılaştırıldığında, epoksiden kaynaklanan geciken bir sürecin varlığını göstermektedir. FRP'nin bittiği üst noktada (tabandan 256 mm), bir önceki yükleme adımında, epoksi üzerinde

oluşan yerel çatlakların geliştiği görülmüştür. Özellikle güney yüzde gelişimin daha belirgin olduğu, köşelerden dönerek yan yüzlere de geçen yatay, kısmi sürekli çatlak haline geldiği izlenmiştir. Yatay yük-deplasman grafiğinde, çevrimler arası rijitlik ve dayanım farklılığı ortaya çıkmaya başlamıştır.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Tabanda oluşan yatay çatlağın, 0.1-0.2 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. FRR'nin bittiği üst noktadaki çatlaklar, 0.2 mm'ye genişlemiştir. Bu çatlaklar dahil, tüm etriye seviyelerinde var olan yatay çatlakların, yan yüzlerde de devam ettiği gözlenmiştir. Sadece kuzey yüzde, FRP'nin üst seviyesinde var olan yatay çatlak, yan yüzde takip edilememiştir. Grafiksel davranışta dayanım ve rijitlik farklılaşması belirginleşmiş, özellikle çekme yüklemesinde çevrim sıkışmasının başladığı görülmüştür.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : 64.88 kN (çekme 59.66 kN) ile numunenin en büyük dayanım değerine ulaşılan bu yük adımında, özellikle tabanda yer alan yatay çatlak genişlikleri, önemli ölçüde artmıştır. Bunun nedeninin, daha önce de belirtildiği gibi epoksinin, çatlakları bir anlamda perdelemesi olduğu düşünülmektedir. Kolon tabanında, kolon-temel birleşim bölgesinde yer alan yatay çatlakların, 0.6 ile 0.8 mm arasında genişliğe sahip oldukları kaydedilmiştir. Etriye seviyelerindeki çatlakların da geliştiği görülmekle birlikte, özellikle ilk yük adımından itibaren var olan dördüncü etriye seviyesindeki (450 mm) yatay çatlak genişliklerinin, 0.2 mm olduğu izlenmiştir. FRP'nin bittiği üst seviyede var olan çatlakların, özellikle köşelere yaklaştıkça 0.2-0.3 mm genişliğe sahip oldukları belirlenmiştir. Bu çatlakların, kuzey yüzde kesit ortasından doğu köşeye kadar sürekli, güney yüzde ise kesitin ortasındaki 1/3'lük kısım hariç, diğer kısımlarda sürekli oldukları görülmüştür. Grafiksel davranışta çevrim sıkışmasının belirginleştiği anlaşılmıştır.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Tabandaki yatay çatlakların genişliklerinin, kuzey yüzde 0.9-1.0 mm, güney yüzde ise 1.0-1.2 mm aralıklarında gerçekleştiği görülmüştür. FRP üst seviyesindeki çatlakların genişlikleri, 0.3-0.4 mm olmuştur. Özellikle, güney yüzde her iki tarafta yer alan bu çatlakların, yan yüzlerde kesitin1/3'ü kadar ilerlediği izlenmiştir.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Bu yükleme adımında, tabanda yoğunlaşmış olarak, önemli çatlak gelişimi görülmüştür. Birinci çevrimin itme yükünde, şiddetli biçimde epoksi kırılma sesi duyuluştur. Tabanda yer alan yatay çatlak genişliklerinin, kuzey yüzde 2.0-2.5 mm, güney yüzde 2.5-3.0 mm seviyelerine ulaştığı belirlenmiştir. Diğer çatlaklarda önemli bir değişime rastlanmamıştır.

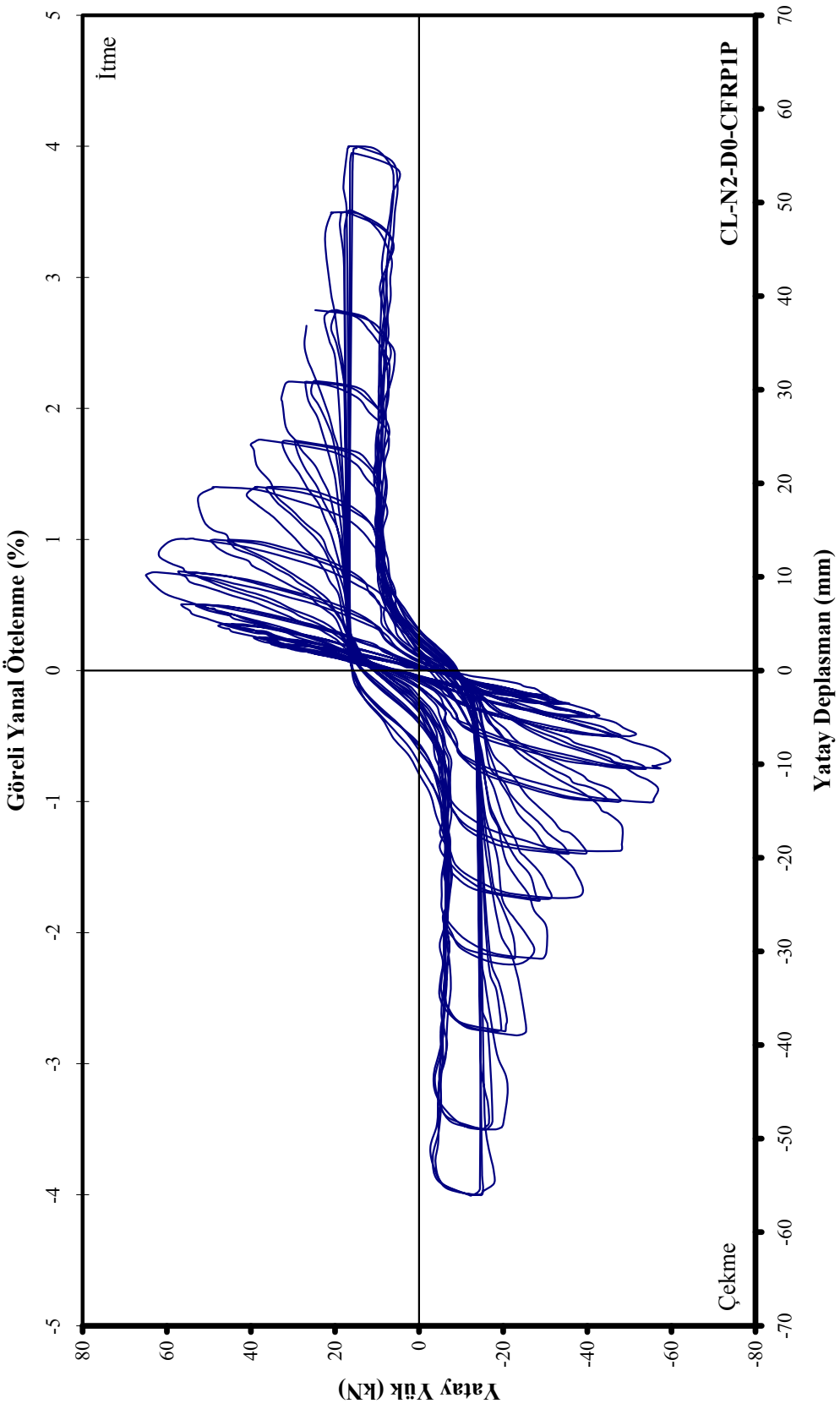
♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Tabanda açılmanın arttığı izlenmiştir. Tabanda yer alan yatay çatlak genişliklerinin, kuzey yüzde 5.0-5.5 mm, güney yüzde 5.5-6.0 mm seviyelerine gelmiştir. Kolon alt bölgesinde, açılmanın artması ile birlikte küçük beton parçaların ayrılmaya başladığı görülmüştür.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmeye başlamıştır. Kolon tabanında yer alan yatay açılmanın 6.5-7.5 mm civarına ulaşmıştır.

♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar, hemen hemen yatay hale gelmiştir. Kolon tabanında yer alan yatay açılma, 8.5 mm'ye kadar ulaşmıştır.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Tabanda yer alan açılmanın kesitin tümüne yayıldığı, açılmanın altında yer alan betonun, büyük oranda ezilmiş ve ufalanmış olduğu görülmüştür. Açılmanın 10 mm'yi geçtiği belirlenmiştir. Özellikle güney yüzde, tabandan 20-30 mm yukarıya kadar olan orta bölgede, FRP'nin altındaki betonun parçalandığı anlaşılmıştır.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Taban açılmasındaki genişleme ve bu bölgedeki betonun ezilmesi devam etmiştir.



Şekil 4.28: CL-N2-D0-CFRP1P numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği



Şekil 4.29: CL-N2-D0-CFRP1P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.30: CL-N2-D0-CFRP1P numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (çekme)

4.2.11. CL-N2-D0-CFRP1A

Eksenel yük seviyesi N/N_0 = 0.10 olan bu numunede, 1000 MPa aktif sargılama uygulaması yapılmıştır. Uygulamanın detayları Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Davranışa ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.32'de görülmektedir. Numunenin, son çevrimde en büyük deplasmandaki görüntüsü, Şekil 4.31'de yer almaktadır. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.11'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.11'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.11'de yer almaktadır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : Kolon tabanı-temel birleşimine ve ilk dört etriye seviyesinde, yatay ve kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Yatay yük-deplasman grafiğinde, ilk çevrim ile diğer çevrimler arasında rijitlik farklılaşması oluşmuştur.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Tabandaki yatay çatlak ve ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak, 0.1 mm genişliğe ulaşmıştır. Kuzey yüzde, ikinci etriyenin altında ve doğu tarafındaki köşe boy donatı hizasından orta seviyesine doğru 60-70 mm uzunluğunda kılcal çatlama meydana gelmiştir. Son yük çevriminde, itme yükünde, üst öngerilmeli FRP (ÖFRP) şerit ile ikinci etriye seviyesi arasında, batı tarafındaki köşe boy donatı hizasında, düşey kılcal çatlak görülmüştür.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Tabanda yer alan yatay çatlak genişliği, kuzey yüzde 0.3 mm, güney yüzde 0.2-0.3 mm değerine ulaşmıştır. ÖFRP şeritler arasındaki, birinci etriye seviyesindeki (120 mm) yatay çatlak genişliği, 0.1 mm olmuştur. İkinci etriye seviyesindeki (250 mm) yatay çatlaklar, 0.2 mm seviyesine ulaşmıştır. Kuzey yüzde üst ÖFRP şerit ile ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak arasında, ortadaki boy donatı hizasında ikinci düşey kılcal çatlak oluşumu izlenmiştir. Güney yüzde de aynı bölgede, üst ÖFRP üstünde ve batı tarafında yer alan köşe boy donatısı ile uyumlu, kılcal ve eğimli düşey çatlak ortaya çıkmıştır. Özellikle son çevrimde, etriye seviyelerindeki yatay çatlakların, her iki yan yüzde de devam ettiği gözlemlenmiştir. Grafiksel olarak çevrimler arası dayanım ve rijitlik düşüşü görülmeye başlanmıştır.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Kolon tabanında, birleşim bölgesinde bulunan yatay çatlak genişliği 0.4 mm değerine ulaşmıştır. Etriye seviyelerindeki çatlak genişlikleri hemen hemen aynı kalmıştır. Kuzey yüzde, ÖFRP şeritler arasındaki boy donatıların yerleşimi ile uyumlu düşey ve kılcal çatlaklar gözlenmiştir. Güney yüzde, şeritler arasında ve doğu boy donatı civarında, köşeye kadar ilerleyen eğimli çatlama meydana gelmiştir. Grafiksel olarak çevrimler arası dayanım ve rijitlik düşüşü belirginleşmiş, çekme yüklemesinde çevrim sıkışması görülmeye başlanmıştır.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Bu yükleme adımında, 58.54 kN (çekme 57.46 kN) ile kolon dayanımına ulaşılmıştır. Yatay yük-deplasman grafiğinde çevrim sıkışması belirgin hale gelmiştir. Taban seviyesindeki yatay çatlak genişliği 0.6 mm'ye ulaşmıştır. İkinci ÖFRP üzerinde kalan ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişliği 0.3 mm, devamındaki iki etriye seviyesindeki yatay çatlakların genişliği 0.1 mm seviyesine gelmiştir. Daha önce oluşmuş olan düşey çatlaklar belirginleşmiştir. Taban seviyesi ile birindi ÖFRP şerit arasında, kuzey yüzde doğu taraftaki köşe boy donatı ile uyumlu, güney yüzde ise ortadaki boy donatı ile uyumlu düşey ve kılcal çatlaklar oluşmuştur.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Tabanda yer alan yatay çatlak genişliği 0.9 mm'ye ulaşmıştır. Düşey çatlakların geliştiği ve 0.2 mm'ye kadar genişleyenlerin mevcut olduğu görülmüştür. Güney yüzde şeritler arası yatay çatlağın, 0.2 mm genişlikte olduğu görülmüştür.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Taban seviyesindeki yatay çatlak genişlikleri önemli ölçüde artmıştır. Kuzey yüzde 1.8-2.0 mm, Güney yüzde 2.0-2.2 mm seviyesine ulaşılmıştır. Kuzey yüzde taban ile birinci ÖFRP şerit arasında, doğu taraftaki köşe boy donatı hizasındaki düşey çatlak genişliği, 0.8 mm olarak okunmuştur.

♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Taban seviyesindeki yatay çatlak genişlikleri, 3.0 mm'nin üzerine çıkmıştır. Güney yüzde taban seviyesinin hemen üzerinde, orta boy donatı ile doğu köşede yer alan boy donatı arasında, beton parçanın, ana gövdeden ayrılmaya başladığı gözlenmiştir.

♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Taban açılması 5.0 mm civarına ulaşmıştır. Kuzey yüzde, doğu tarafın alt köşesi parçalanmaya başlamış, güney yüzde ise bir önceki yükleme adımında alt bölgede ayrılmaya başlayan beton parçanın, daha da belirgin olarak ayrılmaya devam ettiği görülmüştür.

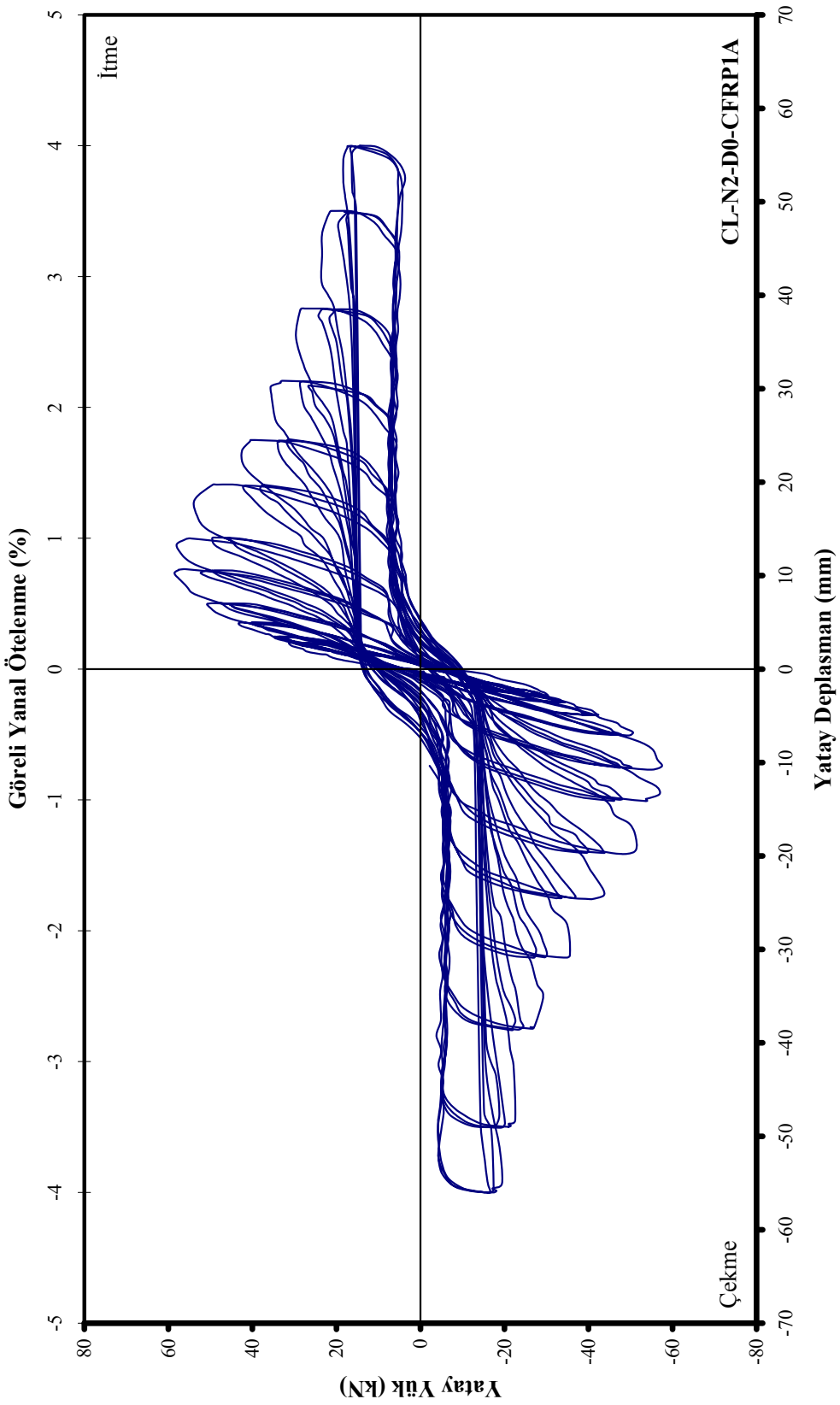
♦ % 2.75 göreli yanal ötelenme – 38.5 mm : Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmeye başlamıştır. Taban açılması 7.0-8.0 mm civarına gelmiştir. Betonda parçalanma, önceki adımlarda belirtilen bölgelerle sınırlı kalmıştır.

♦ % 3.50 göreli yanal ötelenme – 49.0 mm : Kuzey yüzde, boy donatıların olduğu noktalarda (kesit ortası ve köşeler), kolon tabanından 20-30 mm yukarıya kadar olan bölgede betonun parçalandığı gözlenmiştir. Güney yüzde ise daha önceki yükleme adımlarında, taban ile ilk ÖFRP şerit arasında ayrılmaya başlayan parçanın dağılmasında ilave olarak, aynı bölgede köşe noktalardaki betonun da dağılmaya başladığı görülmüştür. Bunun dışında betonda ayrılma veya dökülme gerçekleşmemiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Bir önceki adımda belirtilen bölgelerde, betonda dağılma devam etmiştir.



Şekil 4.31: CL-N2-D0-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.32: CL-N2-D0-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği

4.2.12. CL-N2-D1-CFRP1A

Öngerilmeli CFRP kullanılarak, 1000 MPa gerilme ile aktif sargılama uygulanan, eksenel yük seviyesinin N/N_0 = 0.10 olduğu ön hasarlı bu numunenin detayları, Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.3.6'da yer almaktadır. Numune deney öncesinde, % 4.0 göreli yanal öteleme değerinde ve Bölüm 3.6'da verilen tersinir tekrarlanır yükleme protokolü ile hasar almıştır. Deprem sırasında orta ve ağır hasar aralığında hasar seviyesinde etkilenmiş kolonların, tamir edildikten sonra, aktif sargılama yöntemi ile güçlendirilmesinin sonuçları incelenmiştir. Davranışına ait yatay yük-yatay deplasman grafiği, Şekil 4.34'de görülmektedir. Son yük çevrimine ait görüntü Şekil 4.33'de görülmektedir. Her bir yük adımındaki, üç yük çevrimine ait yatay yük-yatay deplasman grafikleri, Ek B'de, Şekil B.12'de verilmektedir. Ayrıca davranışa ait, buradaki anlatımla uyumlu fotoğraflar, Ek C'de, Şekil C.12'de ve moment-dönme grafikleri Ek D'de, Şekil D.12'de yer almaktadır.

♦ % 0.20 göreli yanal ötelenme - 2.8 mm : İlk yükleme adımı olan bu yüklemede, her iki yüklemeye dik yüzde de kolon tabanında ve ikinci etriye seviyesinde (250 mm), yatay ve kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Güney yüzde ayrıca, dördüncü etriye seviyesinde (450 mm) yatay olarak, belirgin bir kılcal çatlak izlenmiştir.

♦ % 0.25 göreli yanal ötelenme - 3.5 mm : Bir önceki yük adımında oluşmuş olan çatlakların gelişerek, tabanda 0.1-0.2 mm, diğer seviyelerde 0.1 mm genişliğe ulaştıkları belirlenmiştir. Kuzey yüzde ikinci etriye seviyesindeki çatlağın, batı tarafta eğimlenerek yukarıya doğru ilerlediği görülmüştür. Bu hattın, tamir çizgisi olduğu belirlenmiştir. Yeni çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Son çevrimde, yüke dik yüzlerde, ikinci etriye seviyesindeki çatlakların, yan yüzlere de geçtiği görülmüştür.

♦ % 0.35 göreli yanal ötelenme - 4.9 mm : Kolon tabanı ile temel birleşim hattındaki, yatay çatlağın genişliği, 0.3 mm olarak kaydedilmiştir. İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlaklar, 0.2 mm'ye genişlemişlerdir. Üçüncü çevrime sonunda, kuzey yüzdeki ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın doğu kısmında, batı tarafta olduğu gibi yukarı eğimli yeni bir uç oluştuğu görülmüştür. Yatay yük-deplasman grafiğinde, birinci çevrim ile diğer çevrimler arasında rijitlik ve dayanım farklılaşması ile çevrim sıkışmasının başladığı belirlenmiştir.

♦ % 0.50 göreli yanal ötelenme – 7.0 mm : Tabanda yer alan çatlak, 0.5 mm genişliğe ulaşmıştır. İkinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişliği, 0.2-0.3 mm aralığına gelmiştir. Kuzey yüzde öngerilmeli FRP (ÖFRP) şeritler arasında ve üst ÖFRP şerit ile ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak arasında, boy donatılar ile uyumlu, eğimli-düşey kılcal çatlak oluşumu gözlenmiştir. Güney yüzde ise ÖFRP şeritler arasında yaklaşık orta noktada, yatay ve kılcal çatlak meydana gelmiştir. Grafiksel davranış olarak, rijitlik ve dayanım farklılaşması ile çevrim sıkışması, belirgin hale gelmiştir.

♦ % 0.75 göreli yanal ötelenme – 10.5 mm : Bu yük çevriminde, numunenin dayanım değeri olan 39.99 kN (çekme 32.38 kN) yüke ulaşılmıştır. Tabanda yer alan yatay çatlak genişlikleri 0.8 mm'ye, ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlak genişlikleri 0.4 mm'ye gelmiştir. Bir önceki yük adımında oluşmuş olan boy donatılar ile uyumlu, eğimli-düşey çatlakların, 0.1 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Bunlara ilave olarak, kolon tabanı ile alttaki ÖFRP şerit arasında boy donatılar hizasında, düşey kılcal çatlaklar oluşmuştur. Yan yüzlerde de, özellikle şeritler arasında ve ikinci şerit üstünde, köşe boy donatılarla uyumlu, yatay çatlaklara eklenen eğimli ve düşey çatlaklar meydana gelmiştir.

♦ % 1.00 göreli yanal ötelenme – 14.0 mm : Tabanda yer alan yatay çatlak genişliği, 1.0-1.2 mm'ye ulaşmıştır. Kuzey yüzde, şeritler arasında, doğu kenarda boy donatı hizasındaki eğimli düşey çatlakların genişlikleri, 0.2-0.3 mm aralığına gelmiştir. Güney yüzde şeritler arasında oluşmuş olan yatay çatlağın, 0.3 mm genişliğe geldiği gözlemlenmiştir. Diğer değimli-düşey çatlakların ve yan yüzdeki çatlakların gelişmeye devam ettikleri görülmüştür.

♦ % 1.40 göreli yanal ötelenme – 19.6 mm : Hasar ve çatlak genişlikleri önemli ölçüde artmıştır. Kolon tabanında, birleşim bölgesinde yer alan yatay çatlak genişliği, 1.6-1.8 mm seviyesine çıkmıştır. Kuzey yüzde, şeritler arasında, doğu kenarda boy donatı hizasındaki eğimli düşey çatlaklar, 0.5 mm genişliğe ulaşmış, uç kısmında ana gövdeden ayrılmaya başladığı fark edilmiştir. Ayrıca bu yüzde, orta boy donatı ile batı kenar arasında, ÖFRP şeritin hemen üzerinde başlayan yeni bir yatay çatlak oluştuğu görülmüştür. Güney yüzde şeritler arasında oluşmuş olan yatay çatlağın,

0.8 mm genişliğe sahip olduğu kaydedilmiştir. Kolondan küçük beton parçaların döküldüğü belirlenmiştir.

♦ % 1.75 göreli yanal ötelenme – 24.5 mm : Tabanda yer alan yatay çatlak, 2.2-2.5 mm genişliğe ulaşmıştır. Kuzey yüzde ikinci etriye seviyesindeki yatay çatlağın 0.5 mm, şeritler arasında, alttaki ÖFRP şerit üstünde oluşan yatay çatlağın 1.6 mm genişliğe ulaştığı görülmüştür. Şeritler arasındaki, doğu kenarındaki beton parçanın, kolondan ayrılmasının arttığı belirlenmiştir. Güney yüzde şeritler arasındaki yatay çatlağın açıldığı, genişliğinin 1.6 ile 1.8 mm arasında değiştiği gözlenmiştir. Yük deplasman grafiğinde, çevrim içi en büyük yük değerinden sonraki davranış, en büyük deplasman değerine kadar yatay hale gelmeye başlamıştır

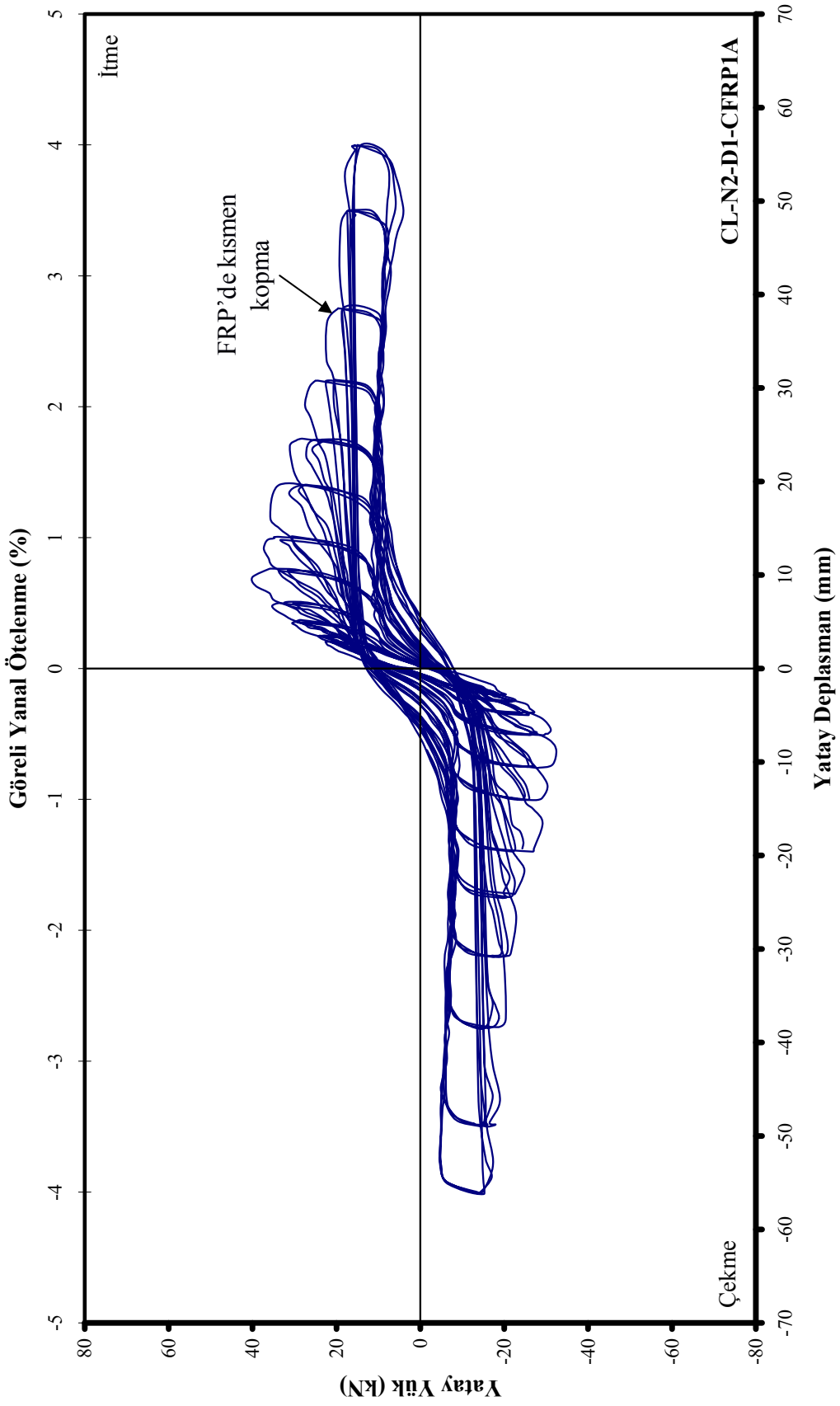
♦ % 2.20 göreli yanal ötelenme – 30.8 mm : Tabandaki yatay çatlakların ve şeritler arasındaki yatay çatlakların, önemli seviyede açıldığı gözlenmiştir. Daha önce başlamakla birlikte, alt ÖFRP şeritte kısmen kopmaların olduğu görülmüştür.

♦ % 2.75 ve % 3.50 göreli yanal ötelenme – 38.5 -56.0 mm : Hasar ve çatlak seviyelerinin arttığı gözlenmiştir.

♦ % 4.00 göreli yanal ötelenme – 56.0 mm : Hasar seviyesi önemli ölçüde artmıştır. Özellikle güney yüzde büyük beton parçaların döküldüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.33: CL-N2-D1-CFRP1A numunesi, son yük çevrimi görüntüsü (itme)



Şekil 4.34: CL-N2-D1-CFRP1A numunesine ait yatay yük-deplasman grafiği

5. VERİLERİN İRDELENMESİ ve DEĞERLENDİRME

5.1. Giriş

Bu bölümde, deneyler sırasında elde edilen verilerin irdelenmesi, değerlendirilmesi ve karşılaştırılması yer almaktadır. Kolonlara ait çevrimsel yatay yük-yatay deplasman grafiklerinin, en büyük değerlerinin birleştirildiği tekil itme ve çekme grafikleri, tüketilen enerji ile ilgili grafikler ve rijitlik değişimlerinin grafikleri bölüm içerisinde değerlendirilmektedir. Bölüm içerisindeki sonuçlar ve değerlendirmeler incelenirken, test edilen kolonlardaki donatı bindirme boyunun, 15 D_b olarak uygulandığı ve bu miktarın oldukça yetersiz bir değer olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

5.2. Yatay Yük Deplasman İlişkileri

Deneylerde elde edilen, kolon dayanımları, dayanımın elde edildiği deplasman değerleri ve sargılanmış kolonlara ait bu verilerin referans numune değerleri ile karşılaştırılması, Tablo 5.1'de görülmektedir. Tablodan görüldüğü gibi, üzerinde eksenel yük kapasitesinin % 25'i kadar düşey yük bulunan güçlendirilmiş kolonlarda, referans numuneye göre en büyük dayanım artışı, 1000 MPa öngerilme ile aktif sargılama yapılmış kolonda gerçekleşmiştir (İtme, +, % 23, Çekme, -, % 31). Bu değer, kolonun bindirme boyu yüksekliğince yapılan, üç kat pasif sargılamada elde edilen dayanım artışından, ortalama % 10 daha fazladır. Yetersiz bindirme boyu bulunan kare kolonların pasif FRP sargısı ile güçlendirilmesinde dayanım artışı, kullanılan FRP'nin miktar ve kalınlığı ile orantılı olarak artmadığı görülmüştür. İki farklı genişlik ve kalınlık ile yapılan, pasif FRP sargılama yapılarak güçlendirilen kolonlardaki dayanım artışlarının, birbirilerine çok yakın çıktığı belirlenmiştir. Aktif sargılama ile güçlendirilen kolonlardaki dayanım artış miktarının, uygulanan öngerilme değerine göre derecelendiği anlaşılmıştır. Pasif sargılama ile karşılaştırıldığında, artış miktarının öngerilme değerine duyarlı olarak, orantılı biçimde değiştiği kaydedilmiştir. 500 MPa öngerilme uygulanan aktif FRP sargılama ile elde edilen dayanım artışı, pasif sargılama ile elde edilen artıştan

yüksek olmakla birlikte, birbirlerine oldukça yakındır. 250 MPa ile uygulanan aktif sargılama sonucu, pasif sargılamada elde edilen dayanım artışlarına çok yakın değer elde edilmiştir. Bu eksenel yük seviyesinde, hasarın ardından tamir edilip, 1000 MPa aktif FRP sargılama ile güçlendirilen kolonun, hasar öncesi dayanımına ulaştığı, % 6 dayanım artışı sağladığı görülmüştür. Tabanda korniyer kullanılan hasarlı numunede ise aktif sargılamanın, % 10 dayanım kaybı ile çalıştığı belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak, korniyerin eğilme rijitliğinin yüksek olması sebebiyle, kolona basan kısmının kolon ile birlikte hareket edememesi olarak değerlendirilmiştir. Bölüm 4.2.8'de de belirtildiği gibi belirli bir tepe deplasmanından sonra, korniyerin kolon ile temastaki bölümü ile kolon arasının açılmaya başladığı görülmüştür. Bu da, özellikle ileri deplasman seviyelerinde, aktif sargılama etkisinin kolona geçmemesine ve dolayısıyla etkinliğini yitirmesine neden olmuştur.

Eksenel yük kapasitesinin % 10'u kadar düşey yük taşıyan kolonlarda ise dayanım açısından sonuçlarda değişiklik gözlenmiştir. Hem aktif hem de pasif sargılamanın etkin olduğu bu durumda, bindirme boyunun tümü yüksekliğince üç kat pasif sargılamanın, aktif sargılamadan daha yüksek dayanım artışını sağladığı belirlenmiştir. Tamir edilip aktif sargılama uygulanan hasar görmüş kolonda ise hasar öncesi dayanım değerinin altında kalınmıştır.

En büyük dayanımların elde edildiği deplasman değerleri incelendiğinde, 1000 MPa öngerilme ile aktif sargılama uygulanmış numunelerde, kolon dayanım değerlerine daha ileri deplasman seviyelerinde ulaşıldığı, dolayısıyla bu kolonların daha büyük göreli yanal öteleme değerlerine kadar bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. Tüm bindirme boyu yüksekliğince yapılan pasif sargılama, düşük eksenel yük değerinde benzer bir katkı sağlamıştır. Hasar gördükten sonra tamir edilip, aktif sargılama ile güçlendirilen numunelerde ise en büyük dayanımın elde edildiği deplasman değerlerinin, başlangıçta hasarsız numunelerde dayanımın elde edildiği deplasman değerlerinden, belirgin bir farklılık göstermediği belirlenmiştir.

Tablo 5.1: Dayanım ve deplasman değerlerinin karşılaştırılması

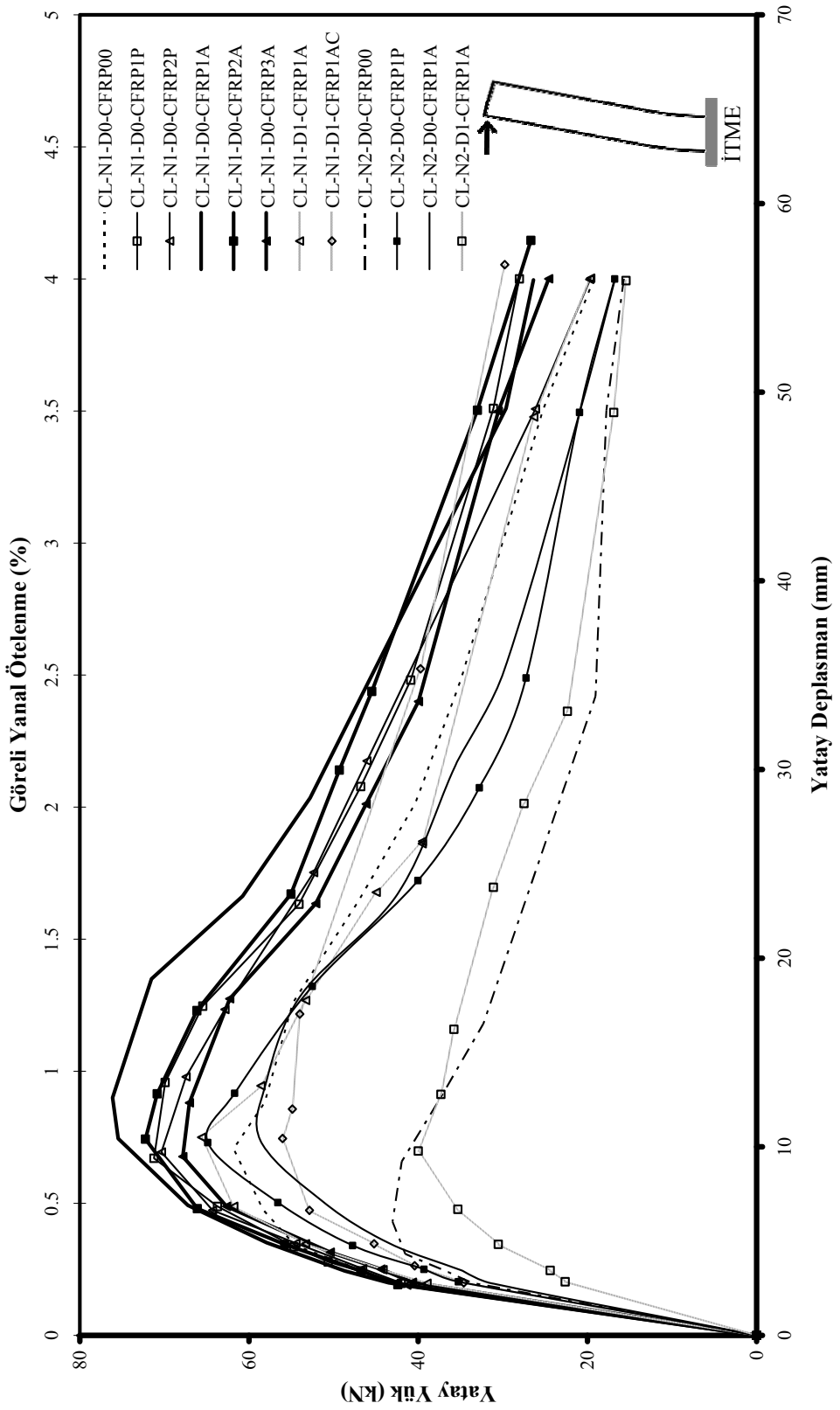
	F_{maks} (kN)		Δ_{maks} (mm) (@F_{maks})		Dayanım Değişimi (%)		Deplasman Değişimi (%)(@F_{maks})	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
CL-N1-D0-CFRP00	61.8	60.2	9.90	9.84	---	---	---	---
CL-N1-D0-CFRP1P	71.2	71.2	9.39	10.38	15	18	-5	5
CL-N1-D0-CFRP2P	70.3	70.9	9.72	9.78	14	18	-2	-1
CL-N1-D0-CFRP1A	76.1	79.0	12.60	12.66	23	31	27	29
CL-N1-D0-CFRP2A	72.2	73.1	10.41	9.96	17	21	5	1
CL-N1-D0-CFRP3A	67.8	68.1	9.48	9.78	10	13	-4	-1
CL-N1-D1-CFRP1A	65.6	71.4	10.5	9.15	6	19	6	-7
CL-N1-D1-CFRP1AC	56.0	56	10.44	9.39	-9	-7	5	-5
CL-N2-D0-CFRP00	43.0	50.8	6.03	6.93	---	---	---	---
CL-N2-D0-CFRP1P	64.9	59.7	10.23	9.69	51	18	70	40
CL-N2-D0-CFRP1A	58.5	57.5	10.23	10.41	36	12	70	50
CL-N2-D1-CFRP1A	40.0	32.4	9.78	8.61	-7	-36	62	24

Deneyler sırasında toplanan, çevrimsel yatay yük-yatay deplasman verileri kullanılarak, her bir numuneye ait yük-deplasman zarf eğrileri elde edilmiştir. Zarf eğrileri, çevrimsel yük-deplasman grafiklerinin tepe noktalarını takip edecek biçimde oluşturulmuştur. Numunelere ait zarf eğrileri, uygulanan en büyük deplasmana değerine kadar sürdürülmüş, numune dayanımının % 80'inde kesilmemiştir.

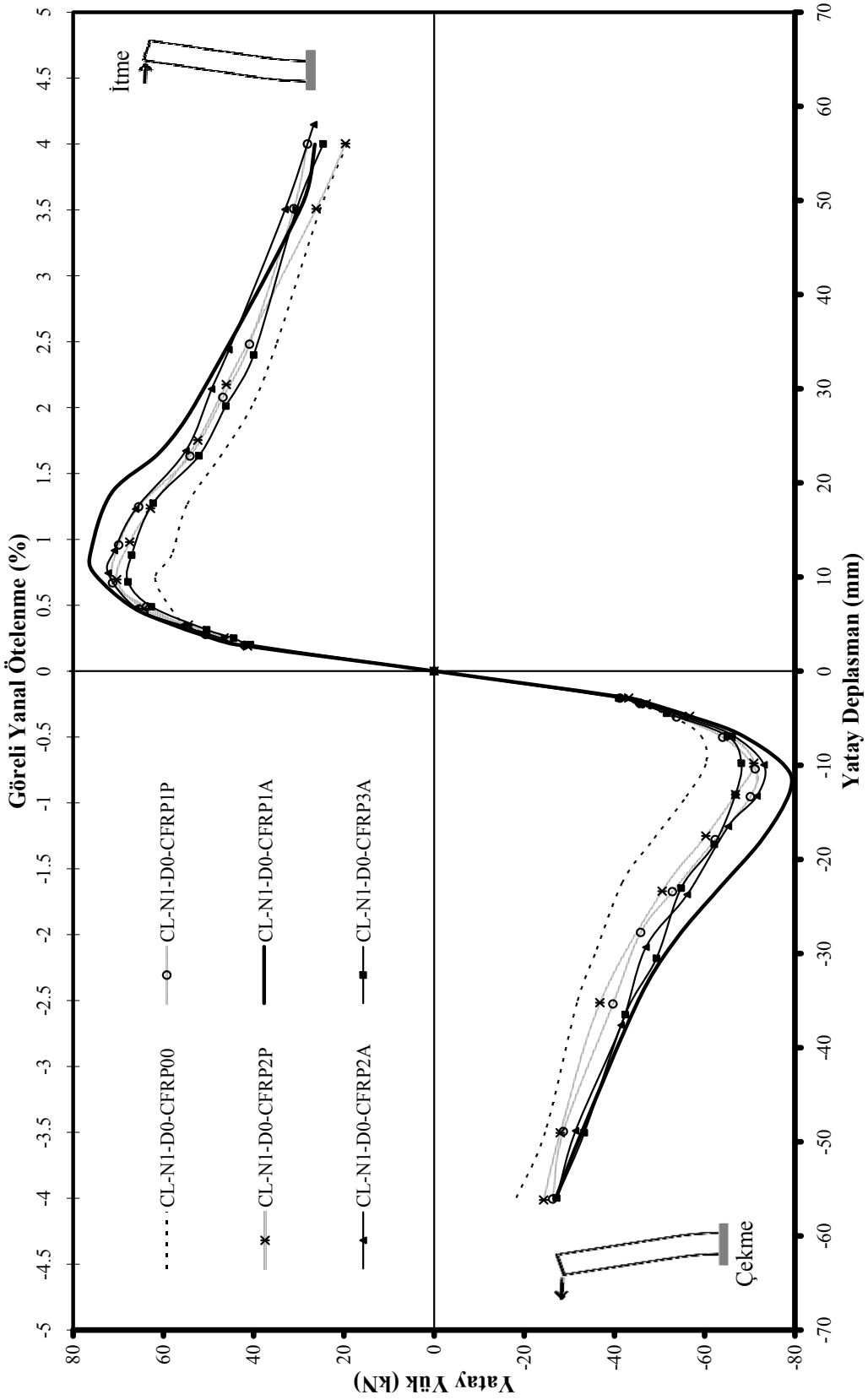
Şekil 5.1'de tüm numunelerin itme yüküne ait zarf eğrileri, aynı grafik üzerinde gösterilmektedir. Test edilen tüm kolonların davranışının görüldüğü bu grafikte, 1000 MPa öngerilme ile uygulanan aktif sargılamanın olumlu etkisi net olarak görülmektedir. Takip eden grafiklerden, ikisi hariç tüm güçlendirilmiş numunelerin, % 4.00 göreli yanal ötelenmeye kadar referans numunelere göre daha iyi performans sergiledikleri görülmektedir. Davranış olarak olumsuzlukla karşılaşılan, başlangıçta hasarlı iki numune hakkındaki görüşler ilerleyen paragraflarda verilmektedir.

Şekil 5.2'de, eksenel yük oranı % 25 olan hasar görmeden güçlendirilmiş kolonların deneylerinden elde edilmiş Şekil 5.2'de, eksenel yük oranı % 25 olan hasar görmeden güçlendirilmiş kolonların deneylerinden elde edilmiş yük-deplasman zarf eğrileri görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, FRP ile sargılama teknikleri, belirli oranlarda referans numuneye göre iyileştirme sağlamışlardır. Daha önce de belirtildiği gibi 1000 MPa öngerilme ile aktif sargılama uygulanan kolondaki dayanım artışı, diğer pasif ve daha düşük öngerilme ile kullanılan aktif sargılama uygulamalarına göre, yaklaşık iki kat daha fazla olmuştur. Her iki tip pasif sargılama yönteminin etkisi de yaklaşık aynı kalırken, 500 ve 250 MPa seviyesinde öngerilme verilen aktif sargılama uygulamaları, pasif sargılama sonuçlarına yakın değerlerde olmak üzere, öngerilme değerine göre olumlu etki sağlamışlardır. Dayanım değer % 80'in altına inmiş olmakla birlikte, özellikle % 3.00 göreli yanal ötelenmeden sonra, aktif sargılama yapılmış tüm numunelerin davranışları tipik hale gelmeye başlamıştır. Genel olarak başlangıç rijitliklerinde çok büyük değişiklikle karşılaşılmamıştır.

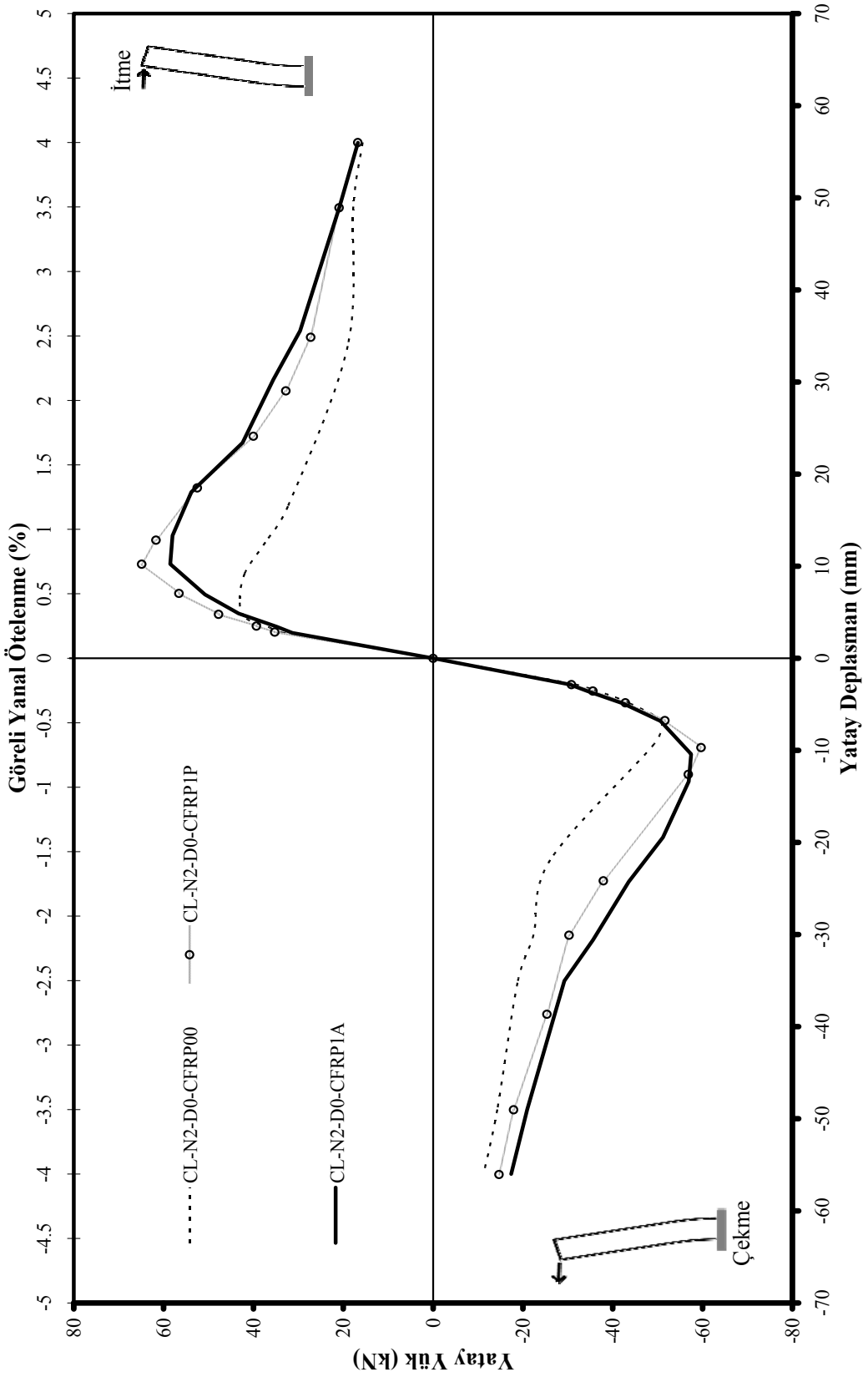
Şekil 5.3'de, kapasitesinin % 10'u kadar düşey yük etkisinde olan kolonlara ait grafikler yer almaktadır. Başlangıçta hasarsız olan, pasif ve aktif FRP sargılama ile güçlendirilen kolonlarda, yaklaşık olarak benzer bir davranış elde edilmiştir. Her iki güçlendirme yöntemi ile de kolon dayanımında artış elde edilmiş, bununla birlikte



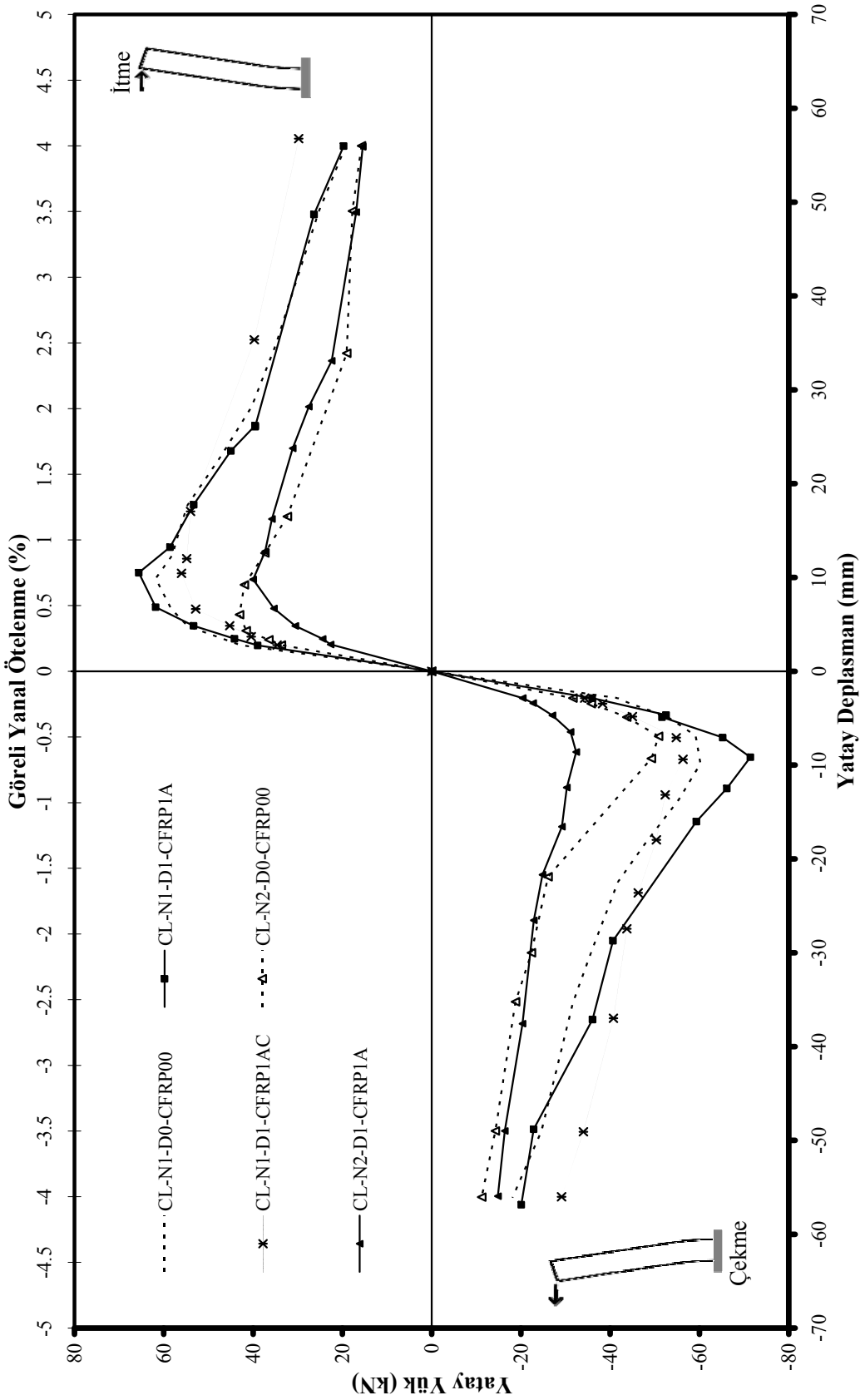
Şekil 5.1: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Tüm numuneler



Şekil 5.2: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.3: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.4: Yatay yük-tepe deplasman zarf eğrileri – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

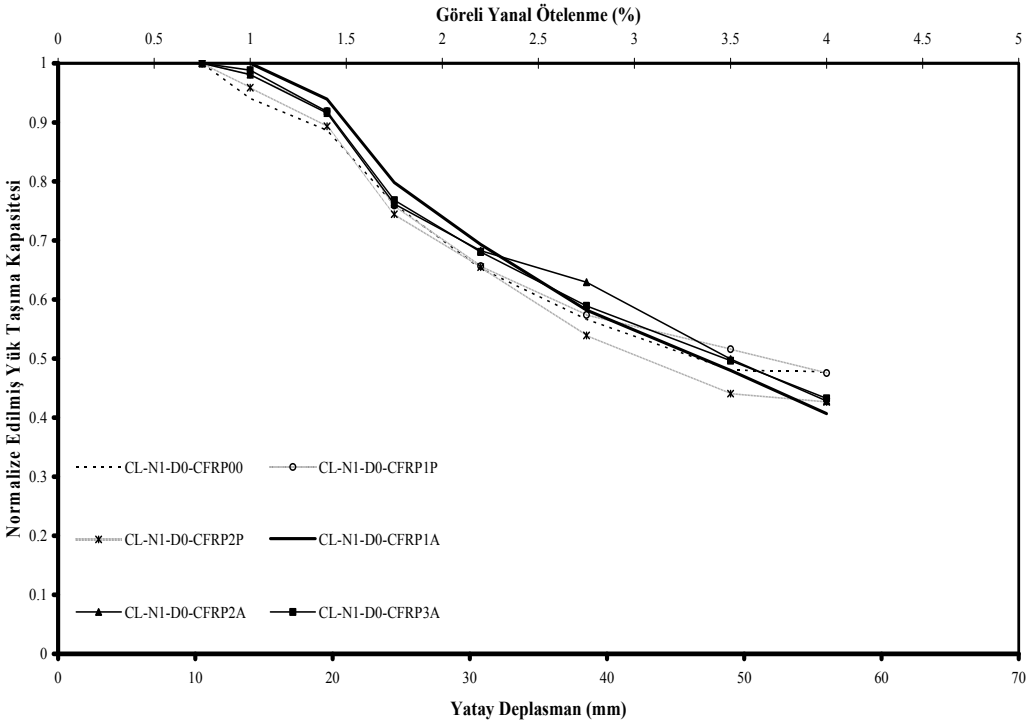
dayanım değerinden sonraki davranışın da her iki yöntem için de yaklaşık olarak benzer olduğu görülmüştür. Daha önce vurgulandığı üzere, eksenel yük seviyesinin az olduğu bu tip kolonlarda, sargılama sonucunda en büyük dayanıma ulaşılan deplasman değerlerinde artış elde edilmiştir. % 3.00 göreli yanal ötelenme değerinden sonra güçlendirilmiş kolonların davranışının, referans numune davranışına benzeme eğilimine girdiği belirlenmiştir.

Şekil 5.4'te, her iki eksenel yük seviyesinde düşey yük ile yüklenmiş, başlangıçta hasarlı olup, tamir edilerek güçlendirilmiş kolonlara ait grafikler görülmektedir. Bu kolonlarda uygulanan güçlendirme tekniği, sadece 1000 MPa öngerilme uygulanmış aktif sargılamadır. Eksenel yük seviyesi düşük olan kolon, dayanım açısından referans numuneye göre daha düşük performans sergilemekle birlikte, dayanıma ulaşılan nokta sonrası yük azalması bakımından olumlu bir eğilim içerisindedir. İtmede %0.75, çekmede ise % 1.50 göreli yanal ötelenme seviyelerinden sonra, davranış referans numune ile benzer hale gelmiştir. Eksenel yük seviyesinin yüksek olduğu tamir edilip güçlendirilmiş kolonda ise, dayanım olarak referans numunenin dayanımı aşılmıştır. Benzer içimde, itme yükünde % 1.20 ve çekme yükünde % 2.00 göreli yanal öteleme seviyelerinin ardından, davranış referans numune ile benzer duruma gelmiştir. Korniyer kullanılan, tamir edildikten sonra aktif sargılama yapılan kolonda ise dayanım anlamında, referans numune dayanımına yakın olmakla birlikte, düşünülen artış elde edilememiştir. Bununla birlikte bu numunede, %1.25 göreli ötelenme seviyesine kadar elde edilen dayanım hemen hemen korunmuş, bu seviyeden sonra ise referans numuneye oranla daha iyi bir davranış elde edilmiştir.

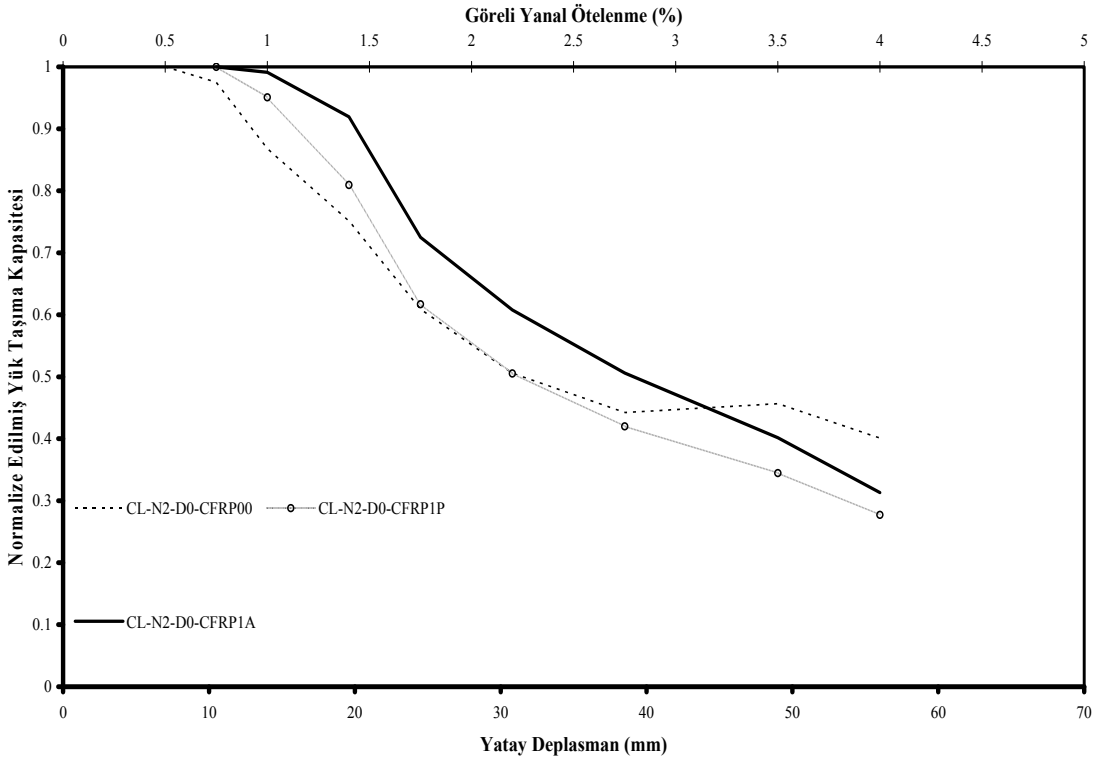
Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de her bir numune için, ulaşılan en büyük dayanım değerinden sonraki, normalize edilmiş yük kapasitesi değerleri görülmektedir. Grafikler, daha önce de olduğu gibi eksenel yük seviyesi ve başlangıçtaki hasar durumuna göre oluşturulmuştur. Şekil 5.5'te % 25 eksenel yük seviyesi ile yüklenmiş, başlangıçta hasarsız numuneler yer almaktadır. Şekilden görüldüğü üzere, tüm numuneler en büyük dayanım değerlerine, % 0.75 göreli yanal ötelenme seviyesinde ulaşırken, 1000 MPa öngerilme kullanılarak aktif sargılama yapılmış kolonda, dayanım değeri % 1.00 seviyesinde elde edilmiştir. Diğer kolonlarda dayanım değerine ulaşılan ötelenme oranı % 0.75'dir.

En büyük dayanıma erişilen deplasman seviyesinden sonra yaşanan kapasite düşüşleri, Şekil 5.5'te yer alan kolonlar için genel olarak birbirine çok yakındır. Genel olarak aynı ötelenme adımında, en az kapasite düşüşü görülen numunedeki değer ile en fazla kapasite düşüşü yaşanan numunedeki değer arasındaki fark, yaklaşık % 5'tir. Artan deplasmanlar sonucunda kapasite azalmasının en yavaş olduğu numune, 1000 MPa öngerilme kullanılarak aktif sargılanan kolondur. Özellikle % 2.20 göreli yanal ötelenme seviyesine kadar, referans numune ile pasif sargılama yapılan numunelerin, belirtilen % 5'lik alt bandı takip ettikleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde, numunelerin % 1.60 - % 1.75 göreli yanal ötelenme değerleri aralığında, yük taşıma kapasitelerinin % 20'sini kaybettiği görülmektedir.

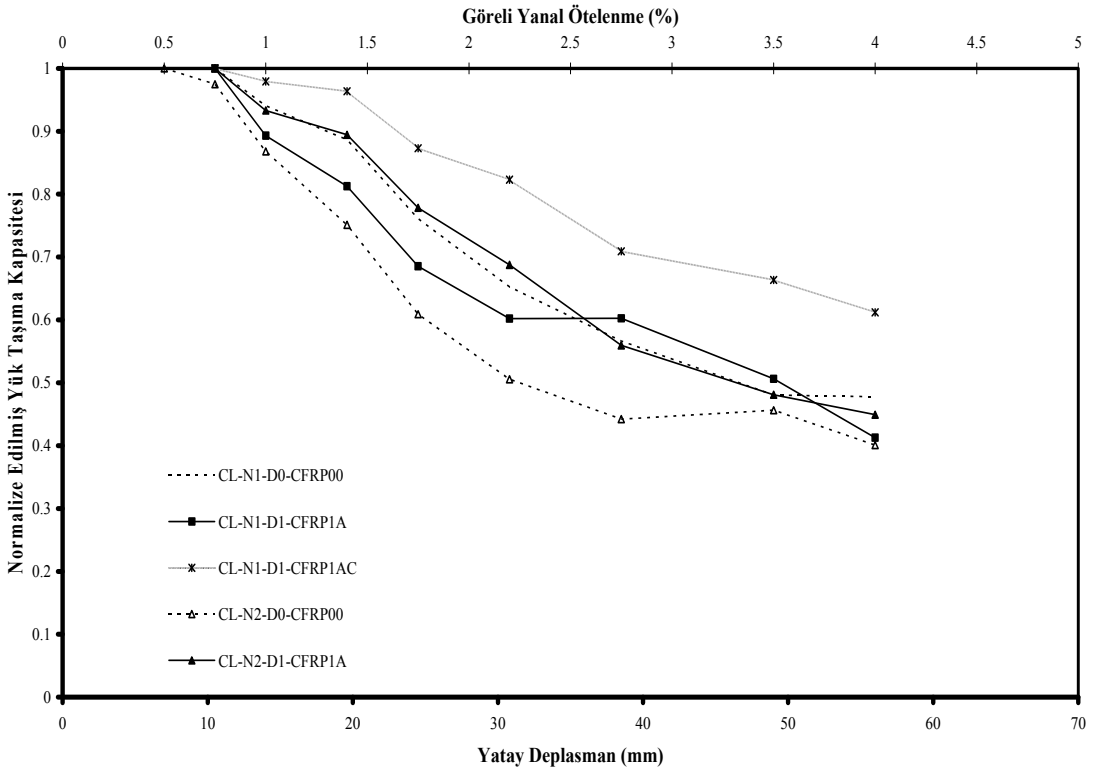
Şekil 5.6'da, eksenel yük oranı düşük olan başlangıçta hasarsız numunelere ait, yük kapasitesi düşüş grafikleri yer almaktadır. Aktif ve pasif sargılama yapılmış her iki güçlendirilmiş numunede de yük kapasitesine, referans numunede kapasiteye ulaşılan ötelenme adımından sonra ulaşılmıştır (sırası ile % 0.75, % 0.50). Bu numunelerde en hızlı kapasite düşüşü, pasif FRP sargılı kolonda yaşanmıştır. En hızlı ve en yavaş



Şekil 5.5: Yatay yük kapasitesi düşüşü – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.6: Yatay yük kapasitesi düşüşü – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.7: Yatay yük kapasitesi düşüşü – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

kapasite kaybı görülen numuneler arasındaki dayanım düşüş farkı, bu kolonlar için yaklaşık olarak % 13 civarındadır. Aktif sargılama ile güçlendirilmiş olan kolonda, en büyük dayanıma ulaşılan, % 0.75 göreli ötelenme oranı ile bir sonraki yükleme adımı olan % 1.00 ötelenme adımı arasında görülen kapasite kaybı, % 1'in altında gerçekleşmiştir. Bu kolonda, dayanımda önemli düşüş, % 1.40 göreli yanal ötelenme değerinden sonra görülmüştür. Referans numuneye ait ilk deplasman adımındaki dayanım düşüşü, pasif FRP sargılı kolona göre daha yavaş gerçekleşmiştir.

Şekil 5.7'de, her iki eksenel yük seviyesinde test edilmiş, referans numunelerle birlikte, önceden hasar görmüş ve tamir edilip aktif sargılama ile güçlendirilmiş kolonlar yer almaktadır. Eksenel yükün fazla olduğu referans numunedeki yük kapasitesi azalmasının, düşük eksenel yük oranı ile yüklenmiş referans numuneye göre daha yavaş olduğu görülmüştür. Eksenel yük oranının düşük olduğu numunede en büyük dayanıma, daha erken deplasman seviyesinde ulaşılmıştır (% 0.50). Grafikte yer alan diğer tüm numunelerde yük kapasitesi, % 0.75 göreli ötelenme oranında elde edilmiştir.

Eksenel yükün % 10 seviyesinde olan, tamir edilip güçlendirilen numunedeki dayanım düşüşü, aynı eksenel yük seviyesindeki referans numunede görülen kapasite düşüşünden belirgin biçimde az olmuştur. Bu davranış özellikle % 1.00 göreli ötelenme seviyesinden sonra görülmüştür.

Eksenel yük seviyesinin yüksek olduğu numunelerde ise bu davranışın tersi ile karşılaşılmıştır. Aradaki fark çok fazla olmamakla birlikte, referans numunedeki dayanım azalması daha yavaş seviyede kalmıştır. Yük dayanımı referans numuneden düşük çıkan, korniyerli ve aktif sargılanmış kolonda yaşanan dayanım kaybı hızı, bu numunelerin arasında en yavaş olanıdır. Grafiklerde görülmemekle birlikte çekme yüklemesinde, bu kolonlar için anlatılan davranışın daha belirgin olduğu görülmüştür.

Her ne kadar deneyler sırasında boy donatıların hiç birinde akma gerilmesine ulaşılamamışsa da, söz konusu betonarme kolonlarda eleman akmasından söz etmek, dolayısı ile göreli bir süneklik değeri hesaplamak mümkündür. Test edilen kolonlara ait süneklik değerleri, Bölüm 2.4.2'de açıklandığı şekilde hesaplanmıştır. Test edilen betonarme kolonlara ait elasto-plasitk ideal davranışın matematiksel olarak

ifadesinde ilk akma dayanımı, kolon kapasite değerinin % 75'i olarak alınmıştır. Zarf eğrileri kullanılarak bu değere ait deplasman elde edilmiştir. Eleman ideal akma deplasmanı, grafiksel olarak başlangıç ve ilk akma noktaları ile elde edilen ideal elastik davranışın, grafikte kolon dayanım değerine ulaştığı deplasman olarak bulunmuştur. Plastik bölge, eleman akma noktasından itibaren, değer olarak sabit ve kolon dayanımı baz alınarak, yük dayanımın % 20 düştüğü deplasman değerine kadar oluşturulmuştur. Elde edilen akma ve sonuç deplasman değerleri yardımı ile, kolonlara ait göreli süneklik değerleri elde edilmiştir. Tablo 5.2'de elde edilen deplasan sünekliği (μ) değerleri görülmektedir.

Tablo 5.2: Deplasman sünekliği değerlerinin karşılaştırılması

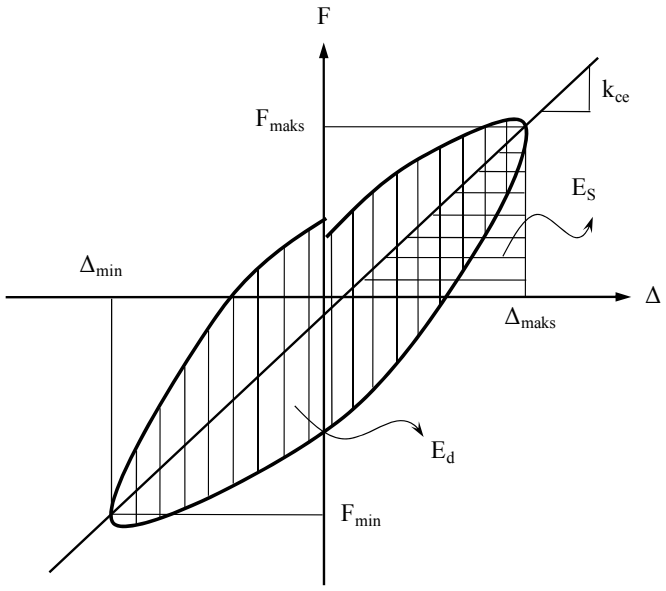
	Deplasman Sünekliği (μ)	
	+	-
CL-N1-D0-CFRP00	4.72	3.82
CL-N1-D0-CFRP1P	3.71	3.34
CL-N1-D0-CFRP2P	3.56	3.41
CL-N1-D0-CFRP1A	3.63	3.32
CL-N1-D0-CFRP2A	3.58	3.42
CL-N1-D0-CFRP3A	3.63	4.01
CL-N1-D1-CFRP1A	3.24	2.52
CL-N1-D1-CFRP1AC	5.29	4.48
CL-N2-D0-CFRP00	4.17	2.70
CL-N2-D0-CFRP1P	2.82	2.59
CL-N2-D0-CFRP1A	3.18	3.35
CL-N2-D1-CFRP1A	3.56	3.97

Sargılama uygulanmış kolonların deplasman sünekliklerinde, özellikle eksenel yük oranı yüksek olan numunelerde, az miktarda düşüç eğilimi olduğu görülmektedir. Eksenel yük oranı az olan kolonlar için bu düşüşün, sınırlı derecede kaldığı söylenebilir. Ayrıca eksenel yük oranı az olan kolonlar için, pasif FRP sargılamada deplasman sünekliğindeki azalmanın, aktif sargılamaya oranla daha fazla olduğu izlenmektedir. Yük kapasitesi artışı olarak beklenilen performansı sergileyemeyen tabanda korniyer kullanılmış kolonda, deplasman sünnekliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Eksenel yük oranının, sargılanmış numunelerin süneklik değerleri

üzerinde önemli etkisi olduğu görülmektedir.

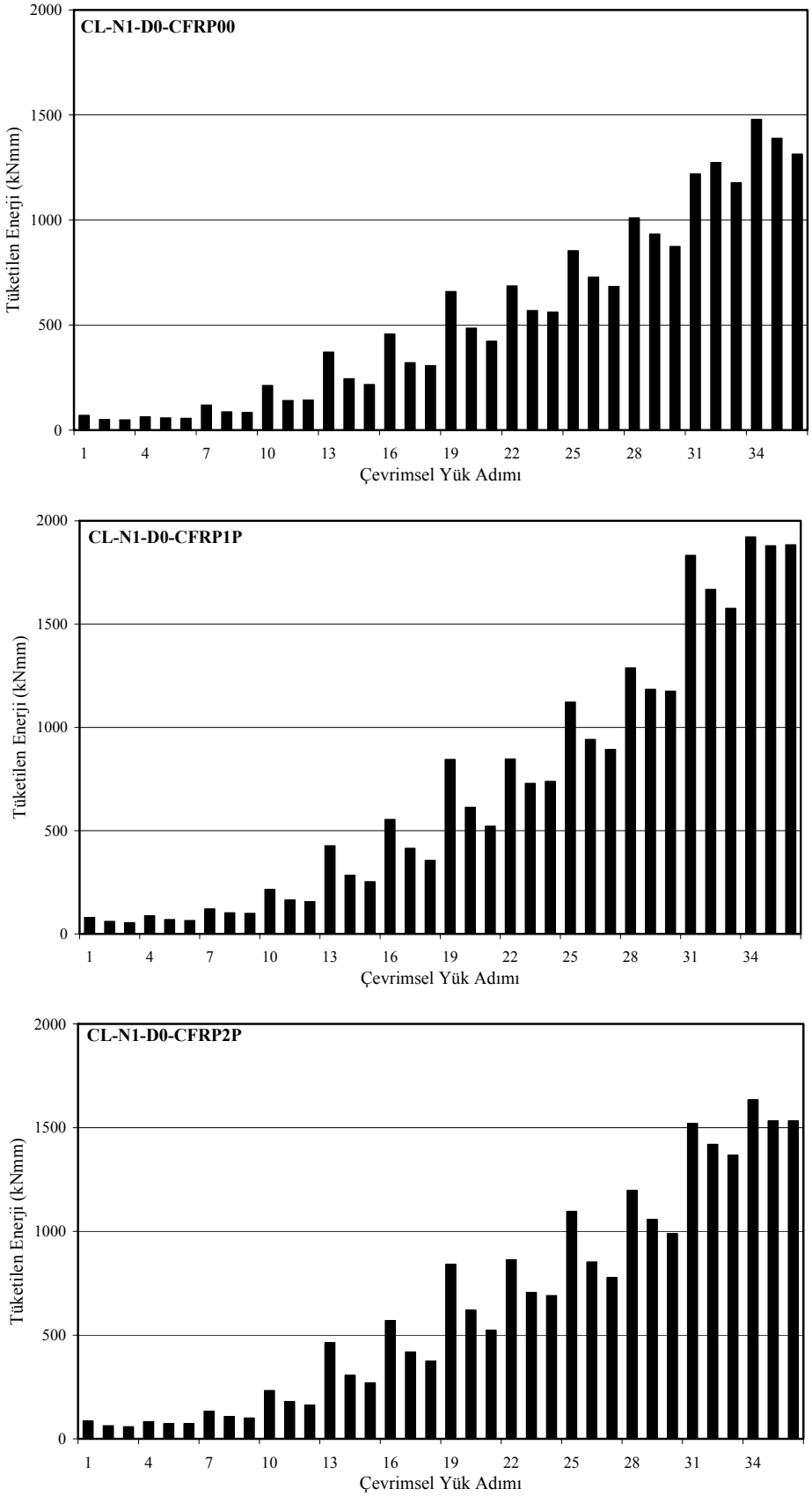
5.3. Çevrimsel Enerji Tüketimi

Enerji tüketim değeri, günümüz depreme dayanıklı yapı tasarımında, sünekliğin ardından en çok üzerinde durulan parametreler arasında yer almaktadır. Çevrimsel deplasman enerjisi, Bölüm 2.44'de belirtildiği üzere, gelen deprem enerjisinin tüketildiği en önemli mekanizmalardan birini oluşturmaktadır. Dolayısı ile yapı ve yapı elemanlarına ait, çevrimsel enerji tüketebilme kabiliyetinin yüksek değerlerde olması, gelen etki sonunda belirli bir miktar hasar almanın yanında, göçme olmaksızın ayakta kalabilmenin temel parametrelerinden birini oluşturmaktadır. Temel olarak süneklik ve enerji tüketebilme kabiliyetinin, birbiri ile bağlantılı olduğu söylenebilir. Tersinir tekrarlanır yük altında enerji tüketme kabiliyetini, yapı/yapı elemanına ait, yatay yük-deplasman ilişkisi belirlemektedir. Elemanın süneklik değerinin yüksek olmasıyla, tükettiği enerji miktarının fazla olması arasında doğru orantı olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, kesme etkin elemanların veya donatı sıyrılması oluşan elemanların, çevrim sıkışması sonucu, enerji tüketme kabiliyetlerinin önemli ölçüde düştüğü bilinmektedir.

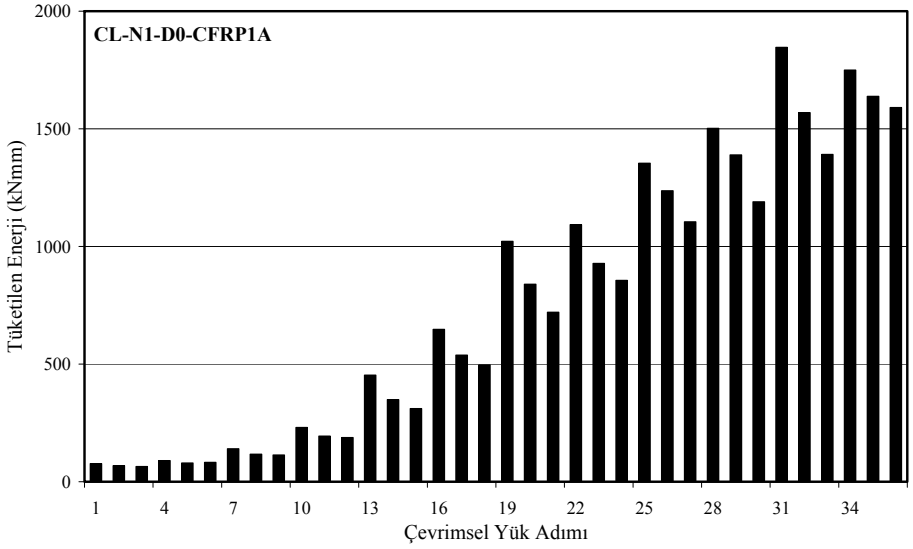


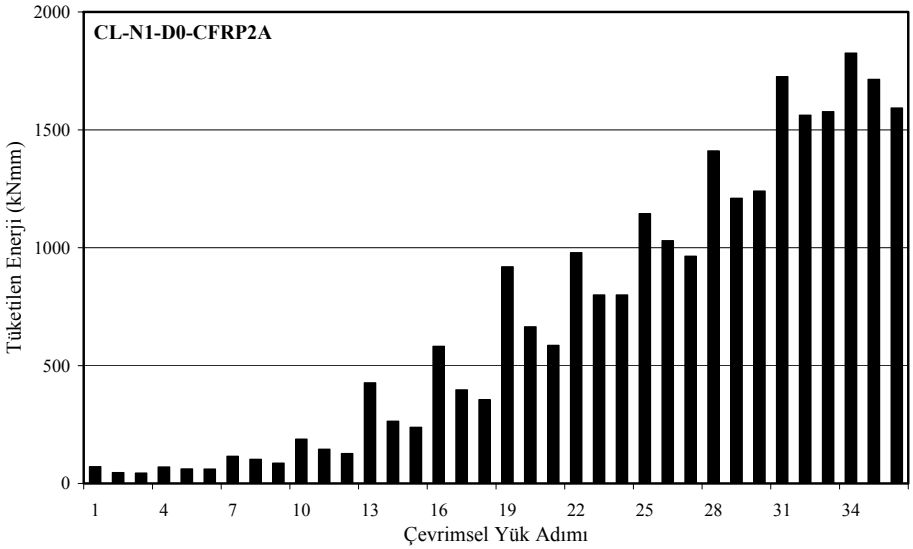
Şekil 5.8: Çevrimsel enerji tüketimi ve çevrimsel efektif rijitlik

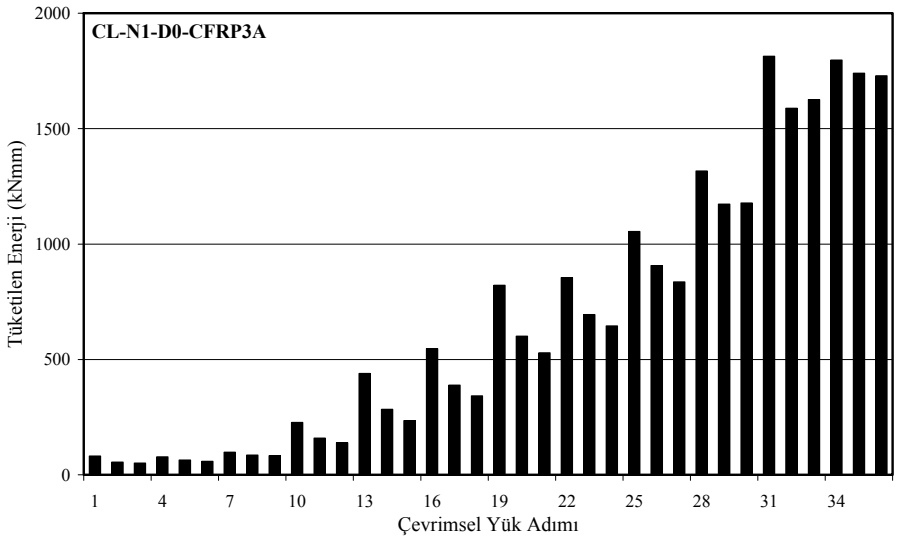
Şekil 5.8'de tersinir tekrarlanır yüklemeye maruz bırakılan betonarme bir elemanın, bir yükleme çevriminde tükettiği enerji miktarı, E_d ile gösterilmektedir.



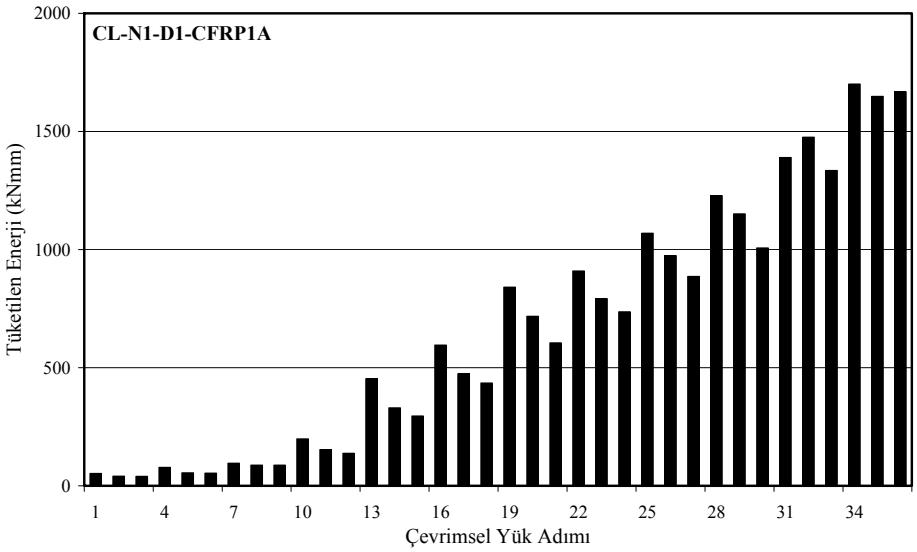
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri

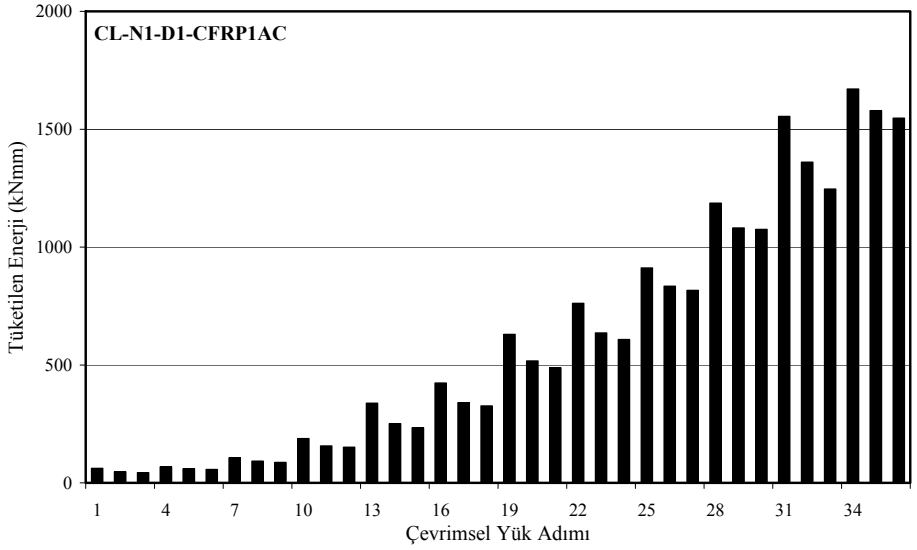


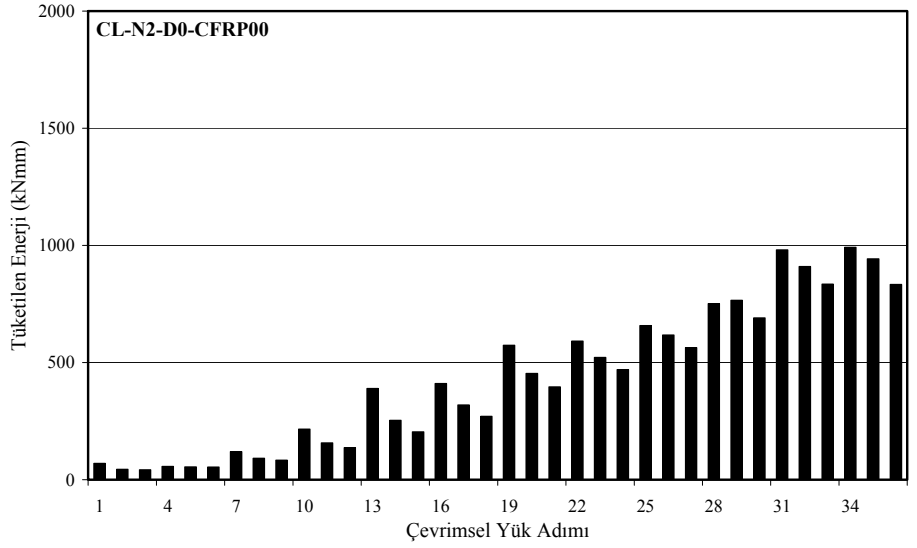




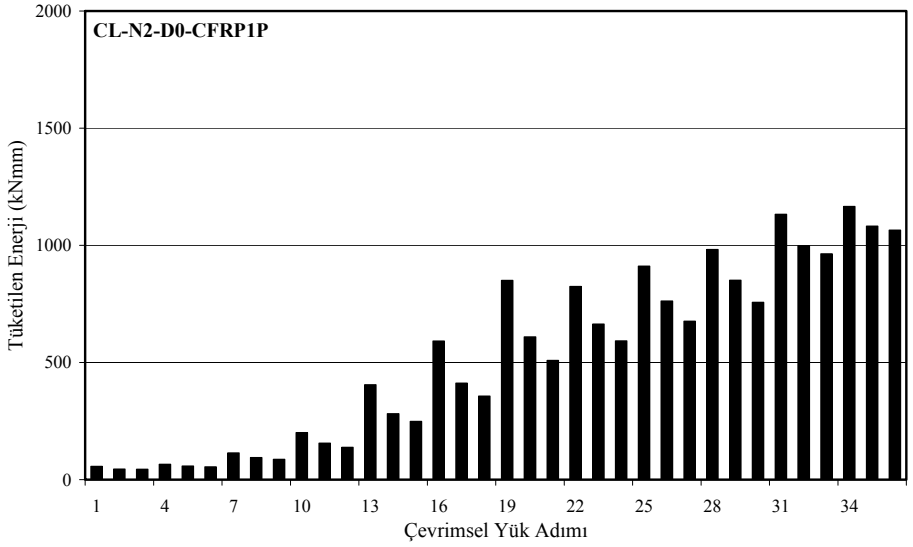
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri (devamı)

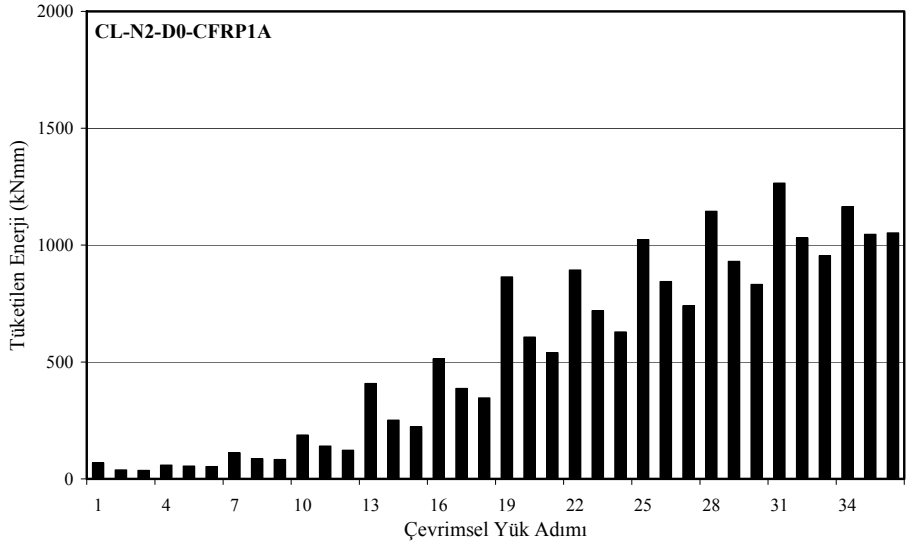


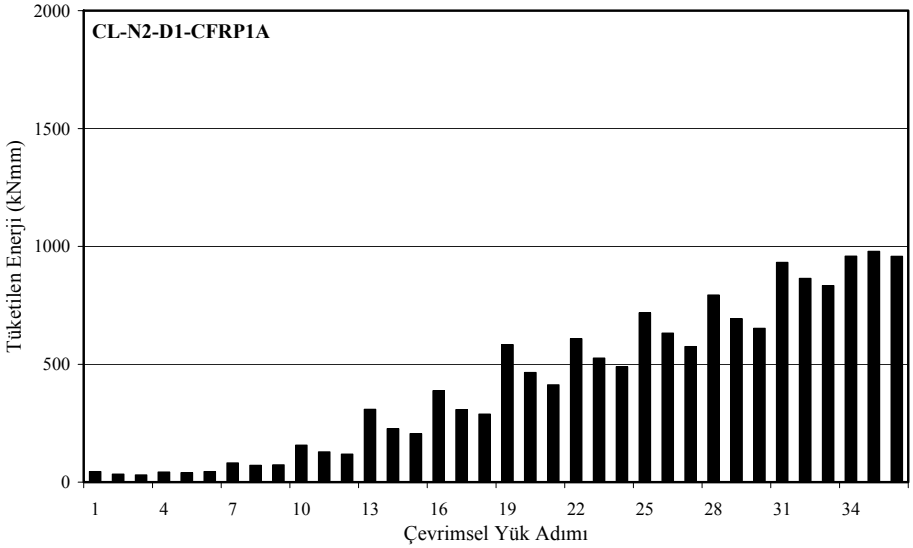




Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri (devamı)







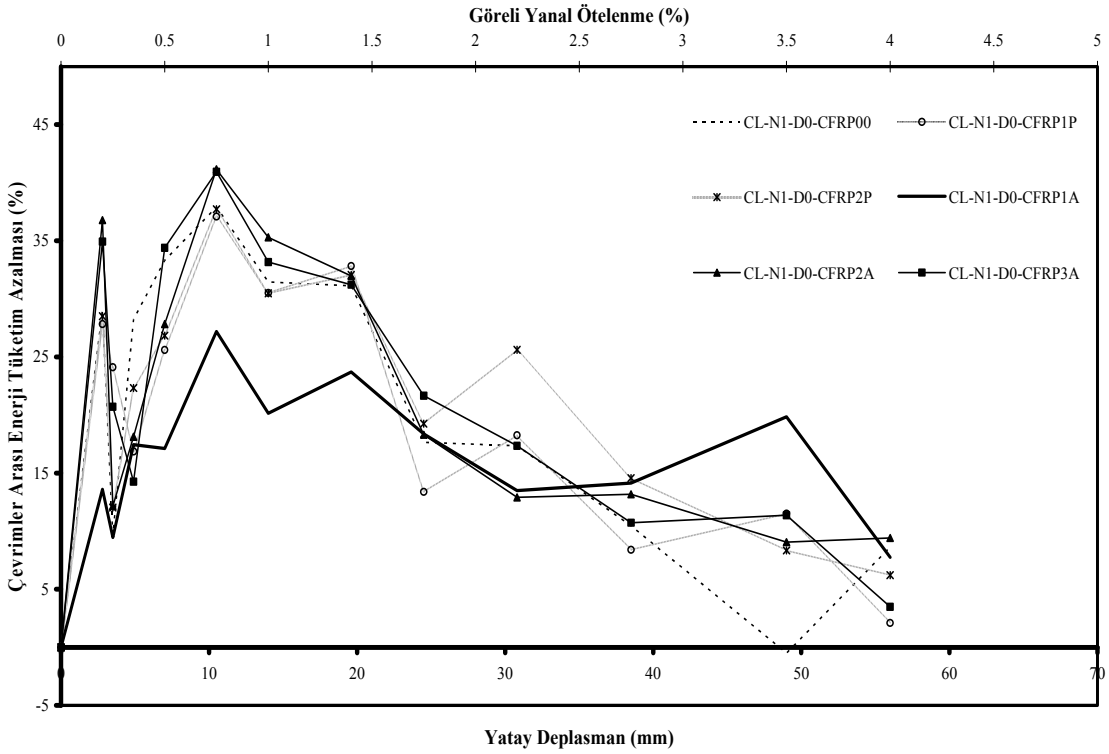
Şekil 5.9: Çevrimsel enerji tüketme kapasiteleri (devamı)

Şekil 5.9'da, test edilen tüm numuneler için, her bir yükleme adımında ve bu adımların her bir çevriminde olmak üzere, tüketilen çevrimsel enerji değerleri yer almaktadır.

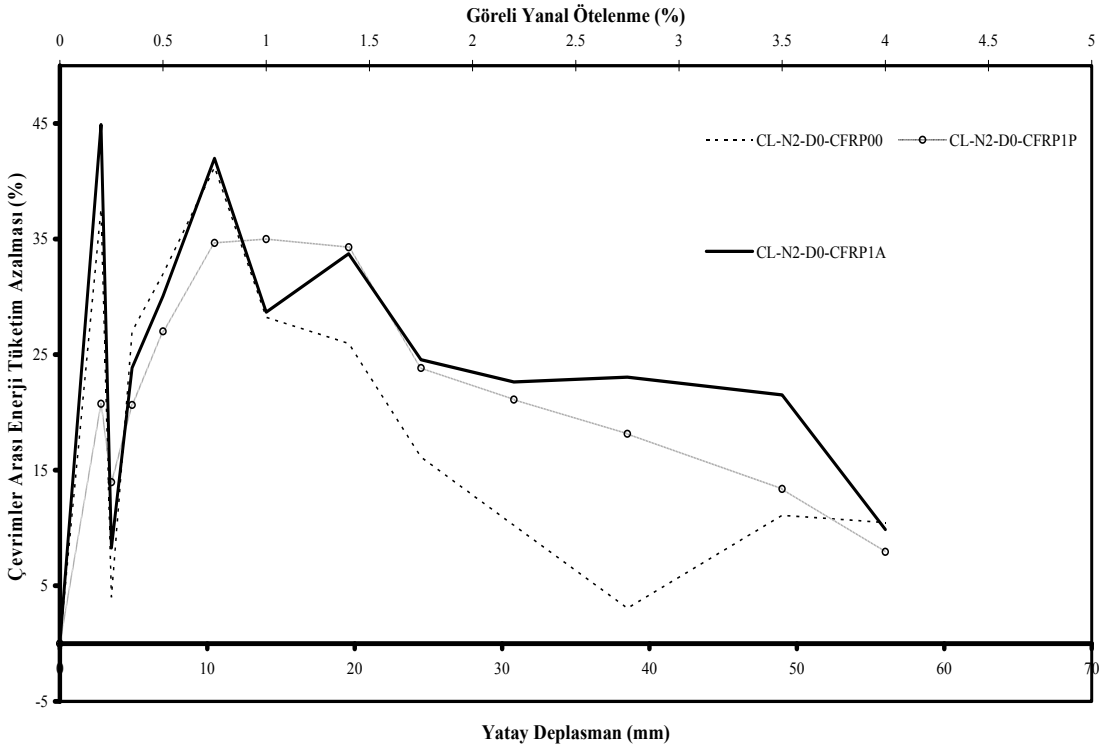
Genel olarak tüm numuneler için aynı göreli yanal ötelenme seviyesindeki birinci çevrimlerde, diğer çevrimlere göre daha fazla enerji tüketildiği görülmektedir.

Başlangıçta hasarsız olup, sargılama ile güçlendirilmiş kolonlarda çevrimler arası enerji tüketim farklılığının, referans ve tamir edilip güçlendirilen numunelerdeki, çevrimler arası enerji değişim miktarından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Grafiklerden, güçlendirilmiş numunelerde özellikle ilk çevrimlerde, tüketilen enerji miktarlarının, referans numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı göreli ötelenme oranındaki ikinci ve üçüncü çevrimlerde tüketilen enerjiler için de, daha az olmakla birlikte aynı eğilimin olduğu anlaşılmaktadır.

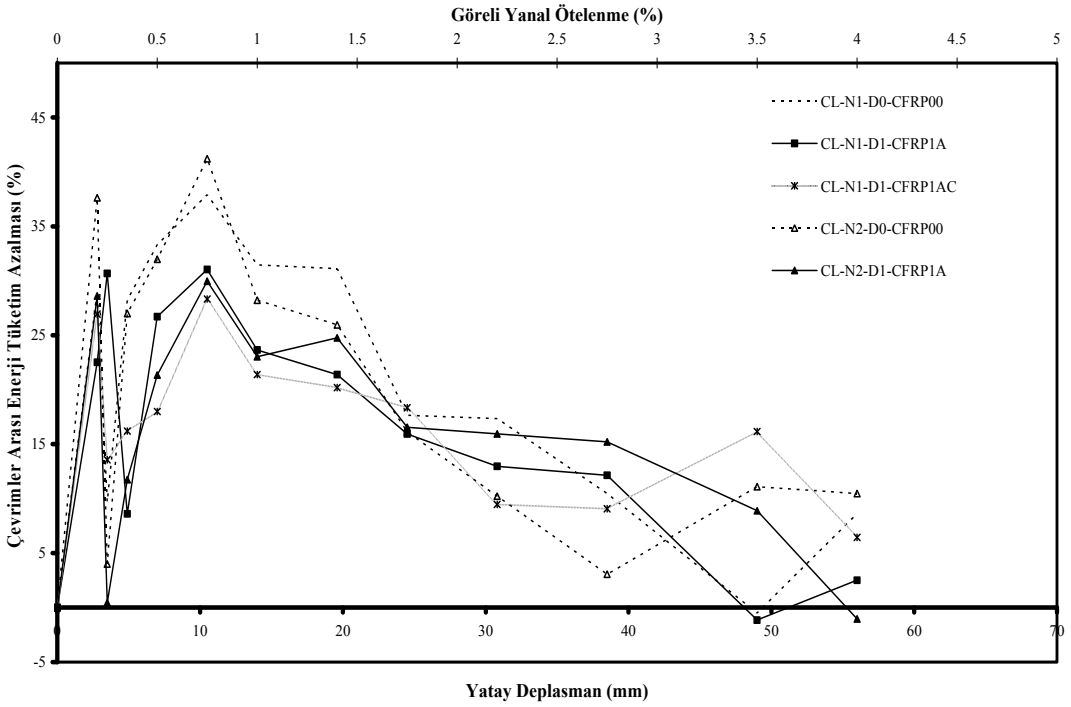
İlk dört yük adımı olan ve grafiklerde 1, 4, 7, 10 olarak yatay eksende gösterilen, yük çevrim gruplarında, tüm numuneler için çok büyük farklılaşmaların olmadığı söylenebilmektedir. 13 ile gösterilen ve % 0.50 göreli ötelenme değerine denk gelen yük çevrim grubunda, kolonlara ait enerji tüketim değerlerinde belirgin farklılaşmalar başlamaktadır. Bu deplasman seviyesi ve bir sonraki adım olan % 0.75 göreli ötelenme değerinin, numunelere ait kapasiteye ulaşılan deplasman adımları olduğu göz önüne alındığında, farklılaşmanın bu noktalarda başlaması anlam kazanmaktadır. Özellikle aktif sargılanmış numunelerde, bu yük adımlarından itibaren belirgin enerji tüketim artışları elde edilmektedir. Aynı zamanda bu davranış, bir önceki bölümde belirtildiği gibi yük kapasitesindeki düşüş eğiliminin, bu tip güçlendirme uygulanan elemanlarda daha yavaş bozulduğu ile de açıklanabilir.



Şekil 5.10: Her bir yükleme adımında çevrimler arası enerji tüketim azalması – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



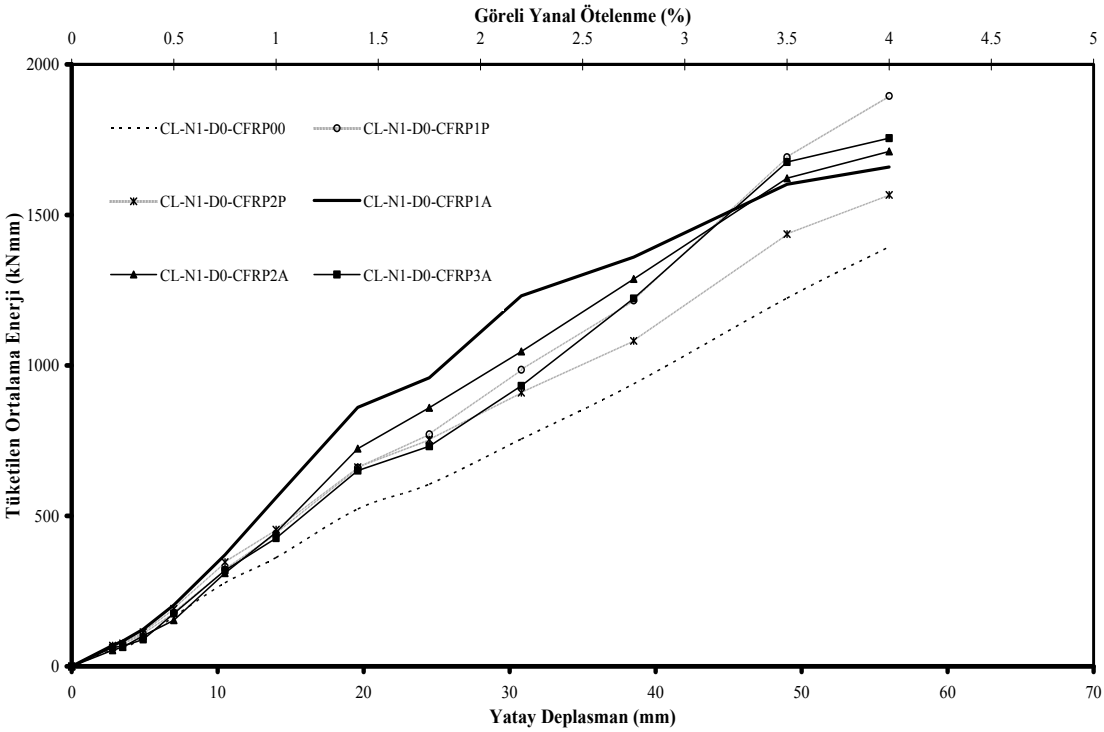
Şekil 5.11: Her bir yükleme adımında çevrimler arası enerji tüketim azalması – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



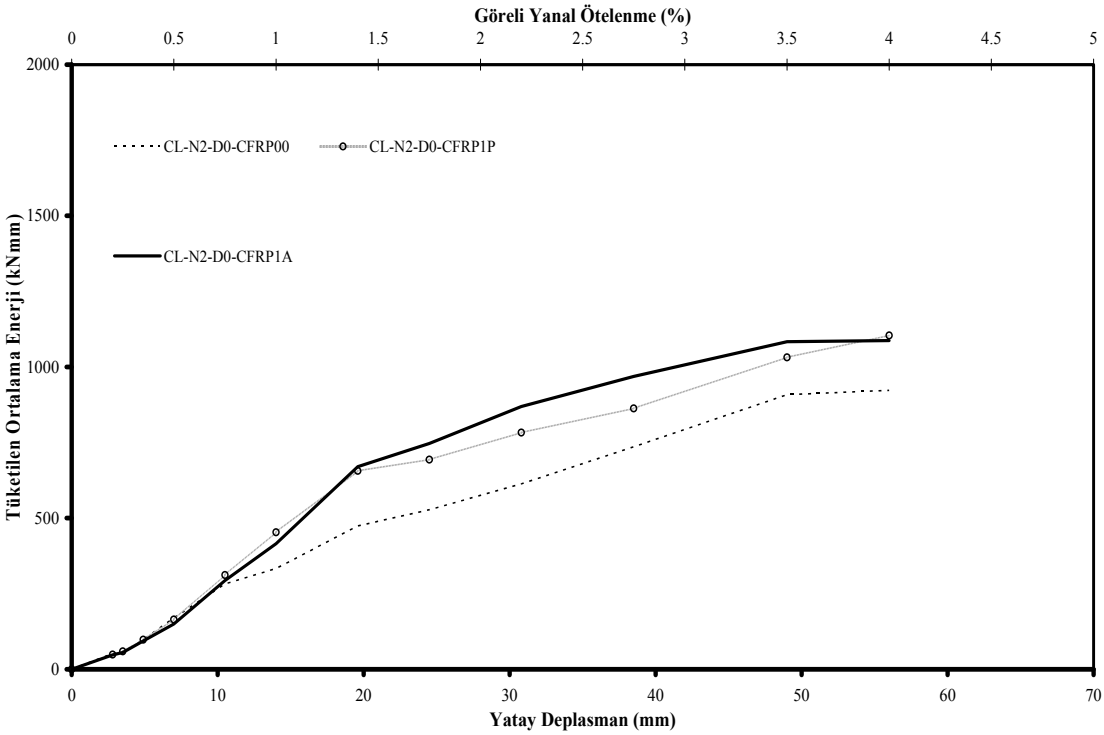
Şekil 5.12: Her bir yükleme adımında çevrimler arası enerji tüketim azalması – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

Şekil 5.10 ile Şekil 5.12 arasındaki grafiklerde, uygulanan deplasman adımlarındaki, birinci çevrimde tüketilen enerji miktarı ile diğer çevrimlerde tüketilen ortalama enerji miktarı arasındaki düşüş yüzdeleri görülmektedir.

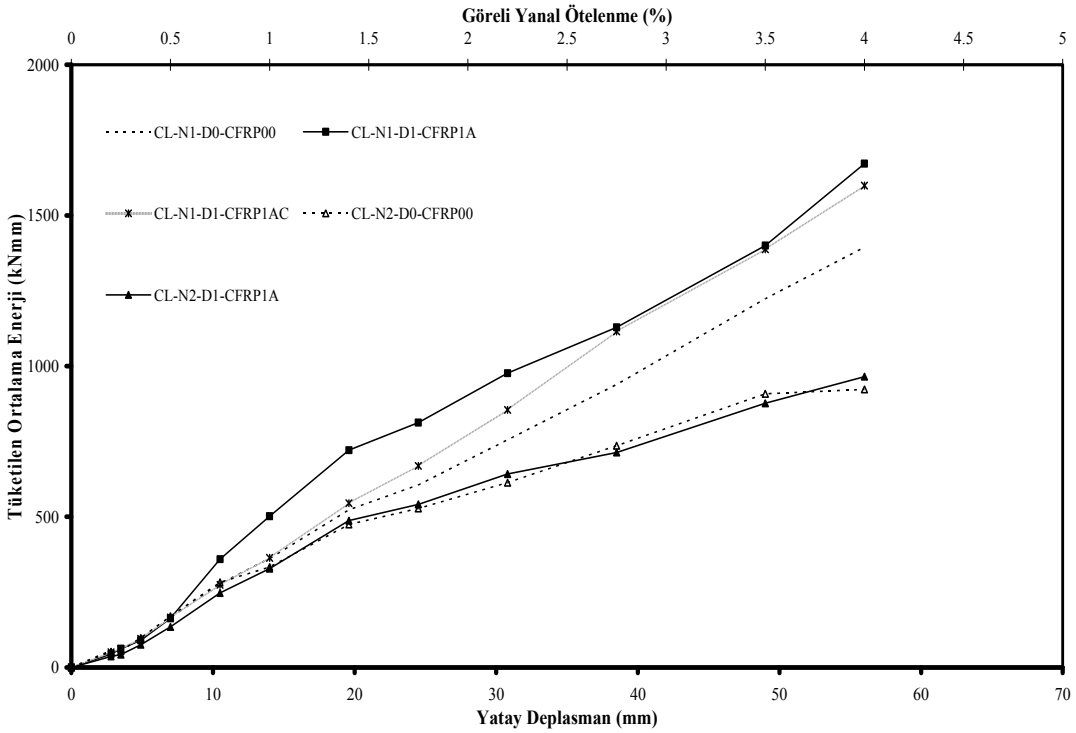
Eksenel yük seviyesi % 0.25 olan, başlangıçta hasarsız numunelerde, aynı deplasmandaki çevrimler arası enerji tüketme kabiliyeti düşüş oranı en az olan, 1000 MPa öngerilme verilerek aktif sargılama yapılan kolondur. Genel anlamda tüm numuneler için benzer bir davranıştan söz etmek mümkündür Başlangıçta hasarsız olan bu numunelerde, ilkçevrimde oluşan çatlaklar ile aynı öteleme oranındaki çevrimler arası enerji tüketme kabiliyetlerinde bir düşüş görülmektedir. Takip eden deplasman adımında, çevrimler arası enerj tüketme kabiliyetindeki farklılık oldukça azalmakta, ardından kapasiteye ulaşılan adımlarda far tekrar büyüdükten sonra, son adımlara doğu düşüş eğilimi tekrar yaşanmaktadır. Benzer davranış, başlangıçta hasarsız, düşük eksenel yük altındaki kolonlarda da görülmektedir. Başlangıçta hasarlı olan güçlendirilmiş numunelerde ise berzer eğilim olmakla birlikte, eksenel yükün fazla olduğu kolonda, ilk büyük farklılaşmanın yaşandığı deplasman adımı ile daha geç karşılaşılmaktadır.



Şekil 5.13: Her bir yükleme adımındaki ortalama çevrimsel enerji tüketimi – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.14: Her bir yükleme adımındaki ortalama çevrimsel enerji tüketimi – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.15: Her bir yükleme adımındaki ortalama çevrimsel enerji tüketimi – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

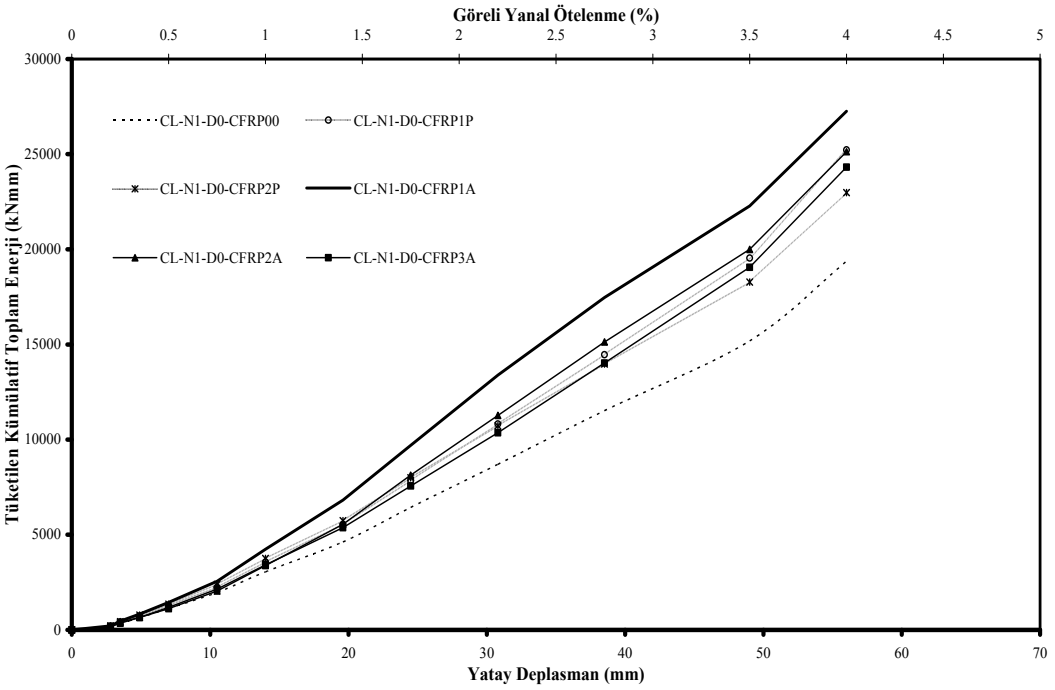
Şekil 5.13 ile Şekil 5.15 arasında yer alan grafiklerde, her bir göreli yanal ötelenme adımında, deplasman adımlarındaki üç ardışık çevrim göz önüne alınarak hesaplanmış, ortalama tüketilen enerji değerleri görülmektedir. Bu grafiklerdeki kolonların ayrımında da, eksenel yük oranları ve başlangıçtaki hasar durumları ön planda tutulmuştur. Bu değerlendirmede de, özellikle 1000 MPa öngerilme ile aktif sargılama yapılmış olan kolonların, daha yüksek değerlere ulaştıkları görülmüştür. Genel olarak % 0.50 göreli öteleme adımına kadar, deplasman adımlarında tüketilen ortalama enerjiler hemen hemen aynı değerlerdedir. Bu seviyeden sonra, düşük eksenel yük oranı ile yüklenmiş, başlangıçta hasarlı ve aktif sargılama yapılmış kolon hariç, diğer tüm sargılanmış numunelerin, referans numunelerden daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. Eksenel yük oranı düşük, başlangıçta hasarsız kolonlarda aktif sargılama ile daha fazla enerji tüketilse de, pasif sargılama ile tüketilen enerjinin de benzer değerlere yaklaştığı görülmektedir. Eksenel yük seviyesi % 25 oranında olan, başlangıçta hem hasarsız, hem de hasarlı aktif sargılanmış kolonlarda, % 0.50 ötelenme oranından sonraki, erken deplasman adımlarında, pasif sargılamaya göre daha fazla enerji tüketildiği anlaşılmaktadır.

Korniyer kullanılan aktif sargılama yapılmış kolonda, enerji tüketimi referans numuneye göre fazla olmakla birlikte, bu yaklaşım geçerli değildir. Eksenel yük oranının düşük olduğu, başlangıçta hasarlı, aktif sargılanmış kolonda enerji tüketim miktarının, referans numune ile aynı olduğu görülmektedir.

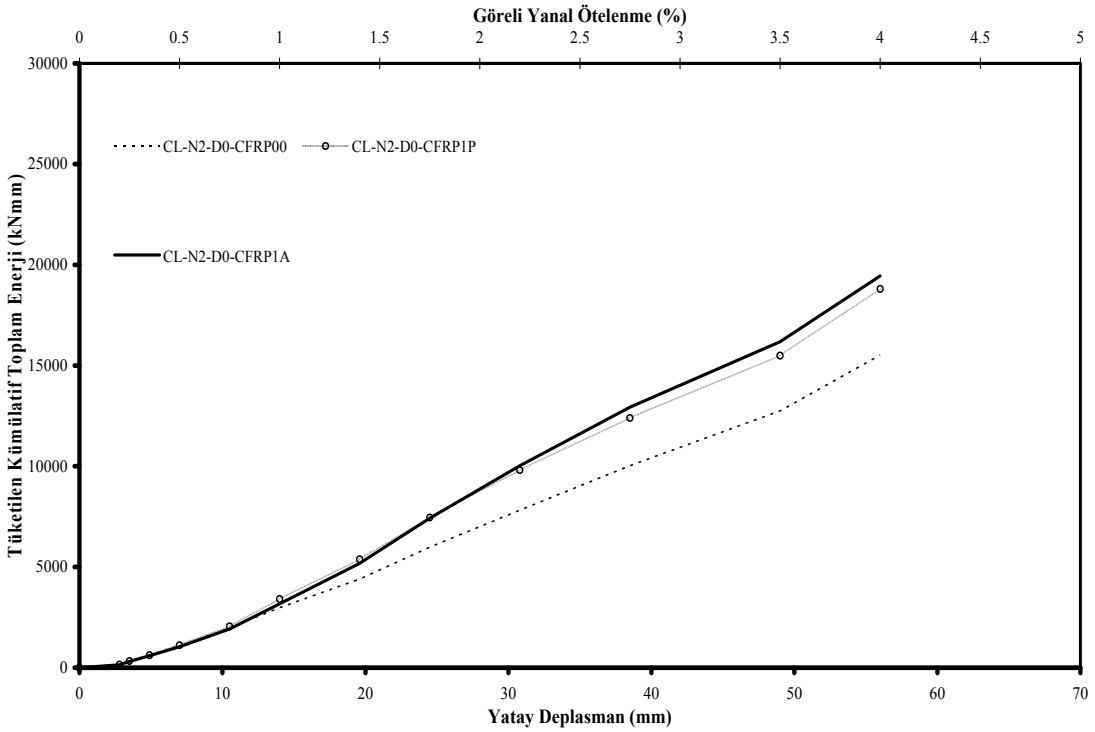
Şekil 5.16 ile Şekil 5.18 arasındaki grafiklerde, her bir deplasman adımında, bir önceki deplasmanda tüketilen enerjinin de eklenerek elde edildiği, kümülatif toplam tüketilen enerji grafikleri görülmektedir. Bu grafikler oluşturulurken tüm çevrimler göz önüne alınmıştır. Belirtilen bu grafiklerden, kümülatif toplam tüketilen enerji değerleri açısından da, özellikle aktif sargılama olmak üzere, güçlendirme işleminin olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

Başlangıçta hasarsız ve yüksek eksenekl yük seviyesi altındaki numunelerde, 250 ve 500 MPa öngerilmeli aktif sargılama ile pasif sargımla uygulanmış kolonlarda benzer davranış elde edilirken, 1000 MPa öngerilme uygulanmış kolonda en fazla enerji tüketimi elde dilmiştir.

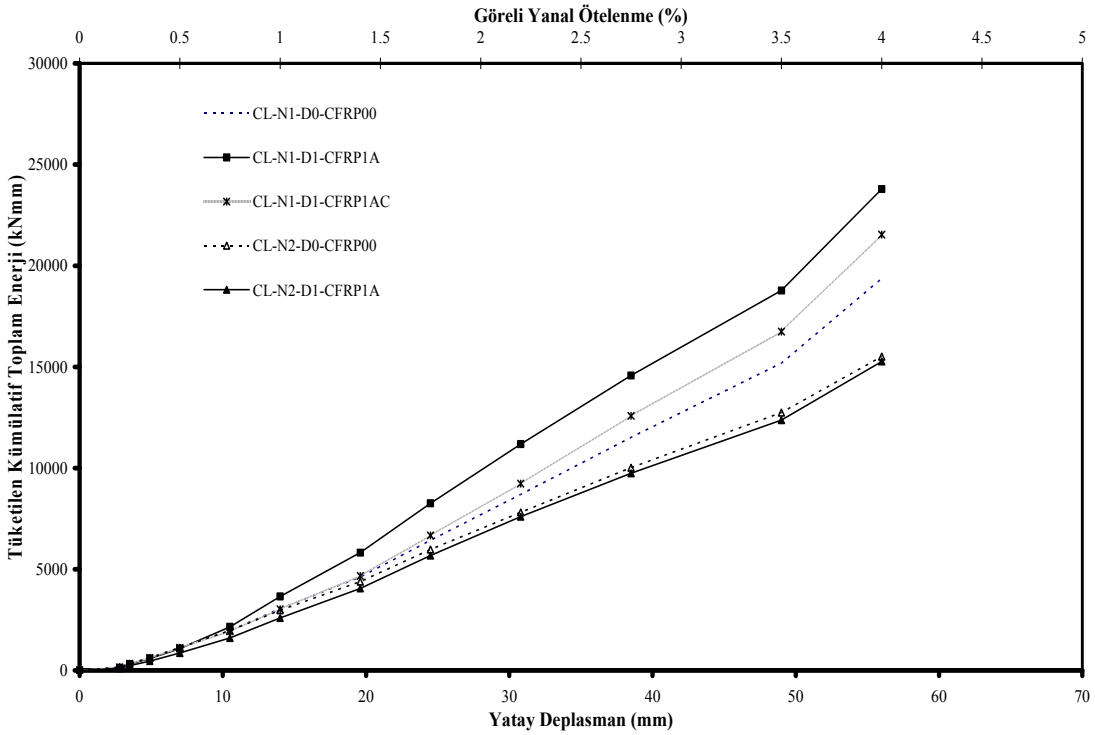
Eksenel yük seviyesi az olan kolonlarda ise pasif ve aktif sargılamanın benzer olduğu



Şekil 5.16: Tüketilen kümülatif toplam çevrimsel enerji – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.17: Tüketilen kümülatif toplam çevrimsel enerji – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.18: Tüketilen kümülatif toplam çevrimsel enerji – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

görülmektedir. Başlangıçta hasarlı numunelerde, eksenel yük seviyesi azaldıkça, kümülatif toplam enerji tüketme kabiliyetindeki gelişme azalmaktadır. Eksenel yük oranının artması ile aktif sargılana ile güçlendirilmiş kolonlarda tüketilen enerji miktaının arttığı görülmektedir.

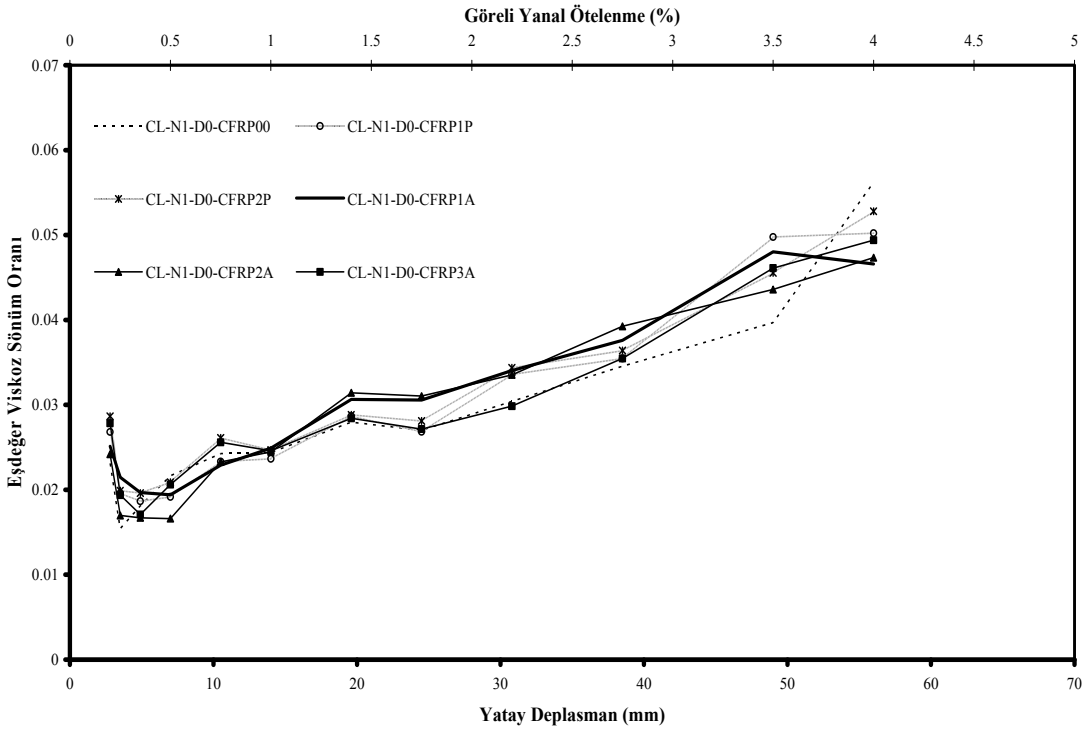
5.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı

Sönümlenme ve enerji tüketimi, genel hareket denklemi içerisinde, oluşan hız ile orantılı olarak yer almaktadır. Gerçek anlamda hıza bağımlı viskoz sönümlenme, sadece yağ ile çalışan sönümleyiciler için geçerlidir ve yapılarda tüketilen ve sönümlenen enerjinin tanımlanması için kullanımı oldukça karmaşıktır. Daha önce de belirtildiği gibi yapılarda enerji tüketimini ve sönümlenmesini sağlayan kaynak, yapı/yapı elemanlarının sergiledikleri yatay yük-deplasman ilişkisinden kaynaklanan, çevrimsel enerji tüketimidir. Betonarme elemanlardaki belirgin ve büyük paya sahip bu enerji tüketimi formu, hareket denkleminde, eşdeğer sönümlenme katsayısı (c) ile ifade edilerek, hız bileşeni ile çarpım şeklinde yer bulur. Eşdeğer sönümlenme katsayısı, eşdeğer viskoz sönüm oranı ($\zeta_{eş}$) kullanılarak elde edilmektedir [45].

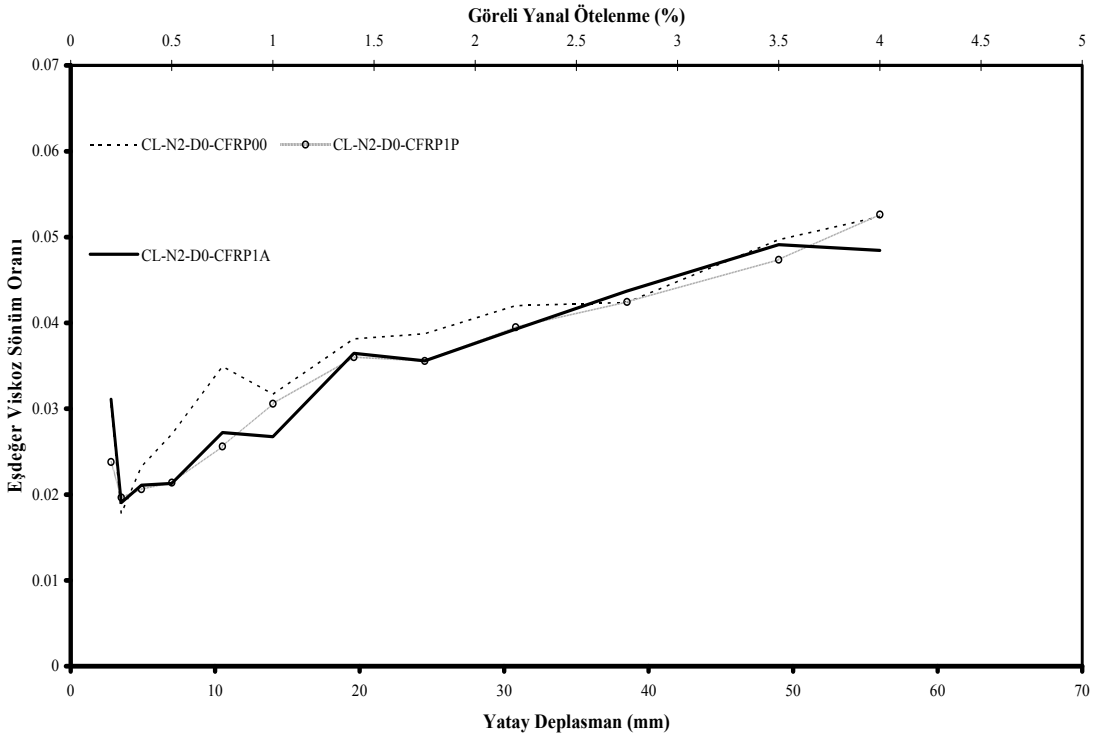
Betonarme kolonlar için eşdeğer viskoz sönüm oranı, yük-deplasman ilişkisinde elde edilen bir tam çevrimin sahip olduğu grafiksel alanın, aynı tam çevrimin sahip olduğu çevrimsel efektif rijitliğin yatay eksenle oluşturduğu alana oranı ile ilgilidir. Şekil 5.8'de görülen ve E_d ile gösterilen, çevrimsel davranışın sahip olduğu grafiksel alan, tüketilen çevrimsel enerjiyi vermektedir. Çevrimin en büyük deplasmanı için hesaplanan ve sekant rijijitlik olarak tanımlanabilecek çevrimsel efektif rijitliğin (k_{ce}) altında kalan alan (E_s), eşdeğer doğrusal sistemde depolanan enerjiyi (elastik birim deformasyon enerjisi) göstermektedir [45, 93]. Eşdeğer viskoz sönüm oranı, Denklem 5.1 yardımı ile bulunmaktadır.

$$\xi_{eş} = \frac{1}{4\pi}\frac{E_d}{E_s} \tag{5.1}$$

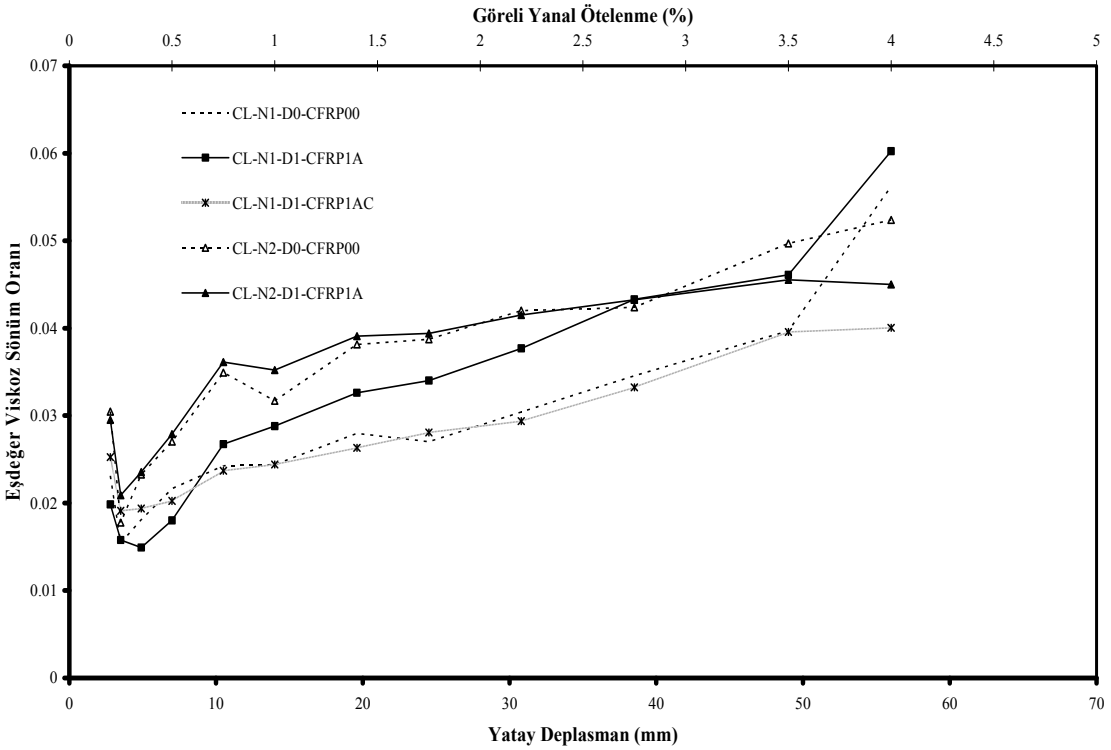
Şekil 5.19 ile Şekil 5.21 arasındaki grafiklerde, test edilen kolonlar için elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 5.19: Eşdeğer viskoz sönüm oranı – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.20: Eşdeğer viskoz sönüm oranı – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.21: Eşdeğer viskoz sönüm oranı – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

Tüm numunelerde, %0.20 - % 0.25 göreli ötelenme oranı aralığında, sönüm oranlarında düşüş yaşandığı görülmektedir. Yine tüm elemanlarda, bu düşüşün ardından, sönüm oranlarının artan deplasman değerleri ile yükseldiği, grafiklerden izlenmektedir. Başlangıçta hasarsız tüm kolonlar için artış eğiliminin, eksenel yük oranlarına göre benzer ve yaklaşık doğrusal bir eğim ile gerçekleştiği görülmektedir. Eksenel yük oranının düşük olduğu elemanlarda % 0.25 ötelenme oranından sora artış eğilimi başlarken, eksenel yük seviyesi yüksek olan elemanlarda sönüm oranının artışının geciktiği grafiklerden takip edilmektedir. Hasarlı numunelerde, belirtilen davranışa benzer performans izlenirken, eksenel yük seviyesi düşük olan, başlangıçta hasarlı aktif sargılanmış numunede izlenen sönüm oranı değişiminin, belirli bir deplasmanın ardından yaklaşık sabit kaldığı görülmektedir.

5.5. Rijitlik

Numunelere ait, başlangıç rijitliği (k_{el}), idealize edilmiş davranışın elastik bölgesindeki efektif rijitliği (k_{ef_ideal}) ve yük taşıma kapasitesi değerlerindeki sekant rijitliği (k_{sek_Fmaks}) değerleri, Tablo 5.3'de verilmektedir. Bazı tekil değerler haricinde,

başlangıçta hasar görmemiş ve sargılanmış numuneler için, eksenel yük seviyesine bağlı olarak, başlangıç rijitliklerinin yaklaşık aynı değerlerde olduğu görülmektedir.

Tablo 5.3: Çeşitli rijitlik değerleri

	k_{el}		k_{ef_ideal}		k_{sek_Fmaks}	
	+	-	+	-	+	-
CL-N1-D0-CFRP00	20.70	17.82	13.66	12.69	6.24	6.12
CL-N1-D0-CFRP1P	17.89	17.80	12.28	11.31	7.58	6.86
CL-N1-D0-CFRP2P	17.81	16.48	11.47	12.3	7.23	7.25
CL-N1-D0-CFRP1A	14.85	17.54	11.92	11.35	6.04	6.24
CL-N1-D0-CFRP2A	19.50	16.73	11.83	11.45	6.94	7.34
CL-N1-D0-CFRP3A	19.07	17.04	11.29	11.64	7.15	6.96
CL-N1-D1-CFRP1A	13.78	12.71	11.61	10.29	6.25	7.80
CL-N1-D1-CFRP1AC	18.91	13.65	10.29	9.91	5.36	6.00
CL-N2-D0-CFRP00	17.12	12.85	12.05	9.82	7.13	7.33
CL-N2-D0-CFRP1P	12.18	14.03	9.73	8.52	6.34	6.16
CL-N2-D0-CFRP1A	16.10	12.58	8.73	-8.47	5.72	5.52
CL-N2-D1-CFRP1A	14.80	9.10	6.37	-6.29	4.09	3.76

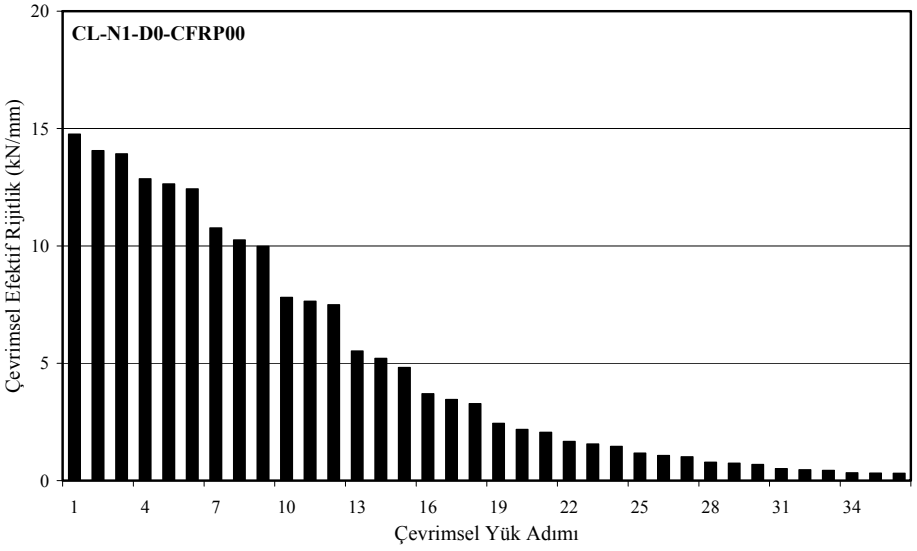
Çatlama öncesine ait başlangıç rijitliklerinin, bilindiği üzere ideal efektif rijitlik değerlerinde n yüksek olduğu, Tablo 5.3'den takip edilebilmektedir. Bölüm 2.4.2'de belirtildiği gibi, yapı elemanının davranışı belirlemekte daha tutarlı bir kavram olan efektif rijitlik değerleri incelendiğinde, sapmanın daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Başlangıç ve efektif rijitlik değerleri göz önüne alındığında, sargılama ile eleman rijitliğinin az miktarda düştüğü göze çarpmaktadır. Genel olarak rijitlik değerlerindeki azalmanın, başlangıçta görüp tamir edilmiş olan ve eksenel yük seviyesi düşük olan sargılanmış kolonlar için daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

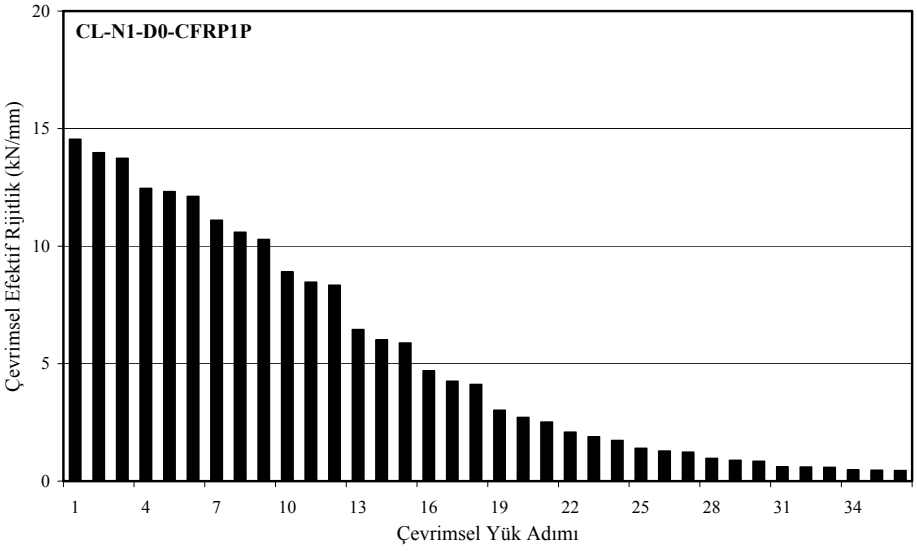
Yük deplasman ilişkisini belirleye rijitlik değerlerinden, bir diğeri olan, kolon yük kapasitesi noktasından elde edilen sekant rijitlikleri incelendiğinde, pasif sargılama sonucundaki eleman rijitliklerinin, aktif sargılamada elde edilenlere göre bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir.

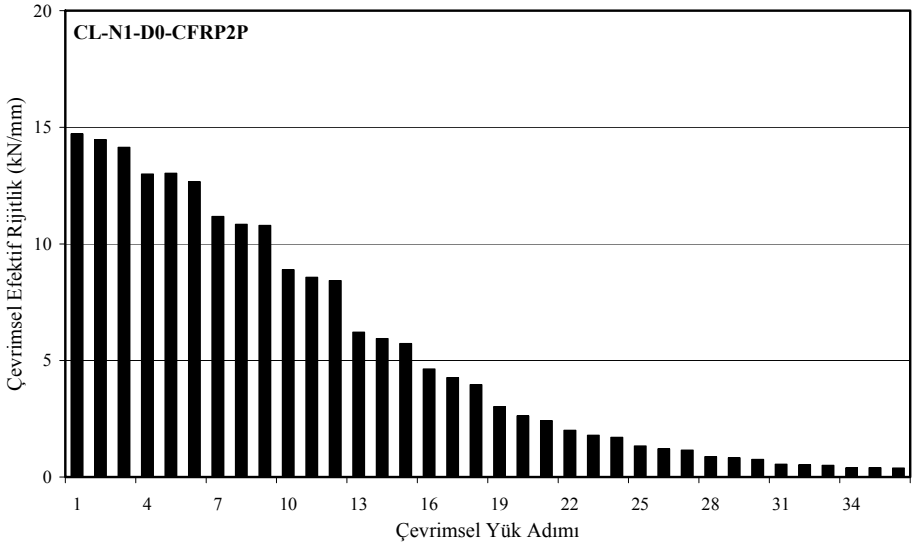
Ayrıca kolonlara ait, her bir çevrimin yük deplasman karakteristiğini veren, çevrimsel rijitlikler de hesaplanmıştır. Bölüm 5.3, Şekil 5.8'de, yük–deplasman davranışında çevrimsel rijitliğin (k_{ce}) grafiksel gösterimi yapılmıştır. Şekil 5.22'de yer alan grafiklerde, elde edilmiş olan çevrimsel efektif rijitlikler, her bir yük adımı için gösterilmektedir.

Genel olarak çevrimsel rijitlik değerlerinin, birinci yük çevriminin ardından düştüğü, ikinci ve üçüncü çevrimler arasındaki değişimin oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Birinci çevrimin ardından rijitlik değerlerinin, yaklaşık olarak aynı kaldığı söylenebilir.

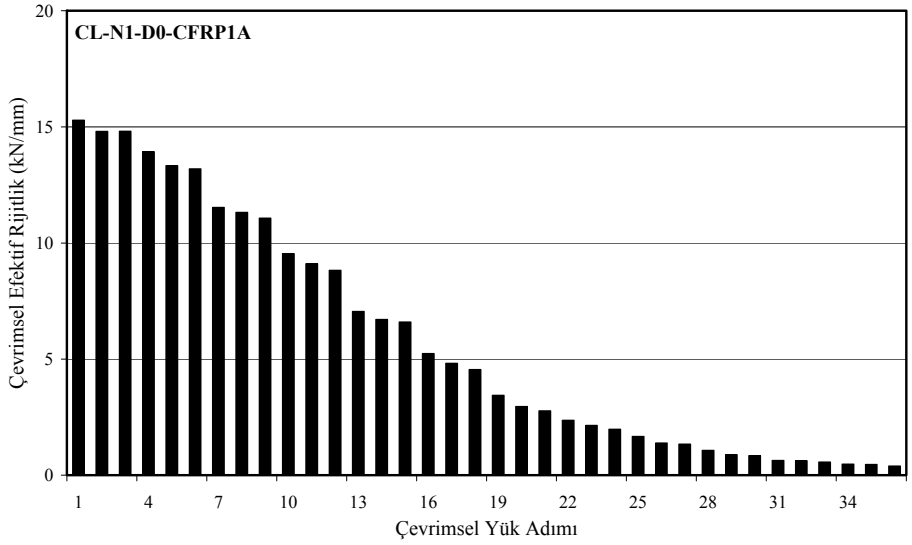
Grafikler incelendiğinde, Eksenel yük oranı düşük olan kolonlarda, sargılama ile rijitlikteki ani düşüşün azaldığı görülmektedir. Özellikle sargılanmamış referans numunelerde, % 1.00 - % 1.40 göreli yanal ötelenme seviyelerine kadar, hemen hemen her ötelenme adımında, önemli rijitlik düşüşleri yaşanmaktadır. Sargılanma ile bu düşüşler azalmakta,% 0.50 ve % 0.75 ötelenme adımlarında en önemli rijitlik azalmaları izlenmektedir.

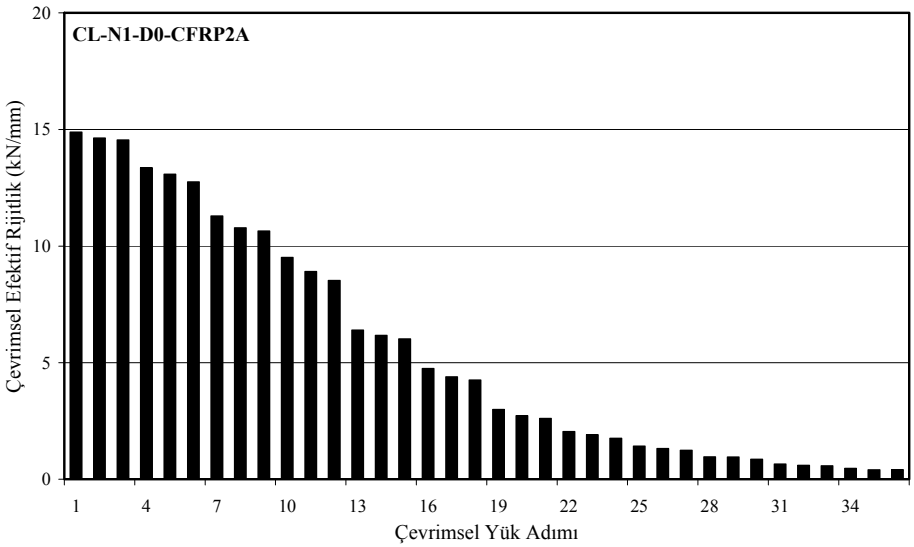


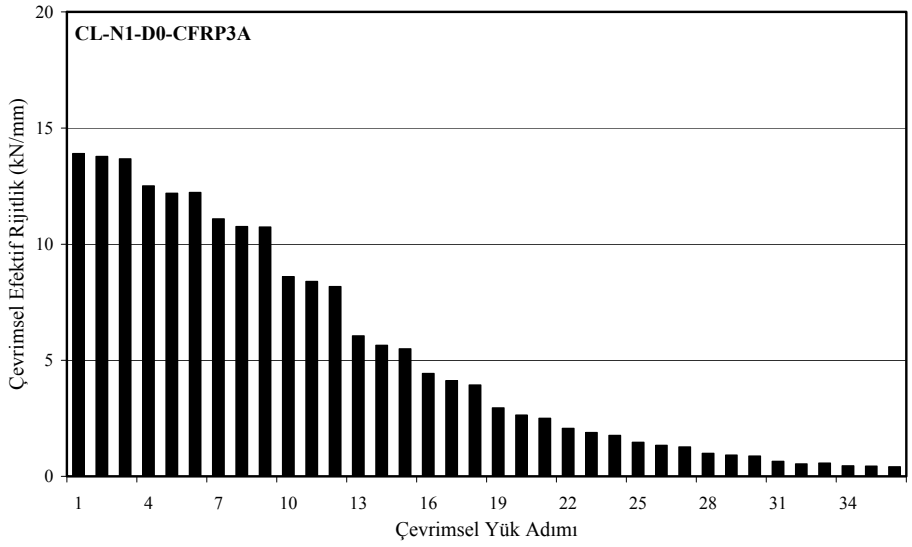




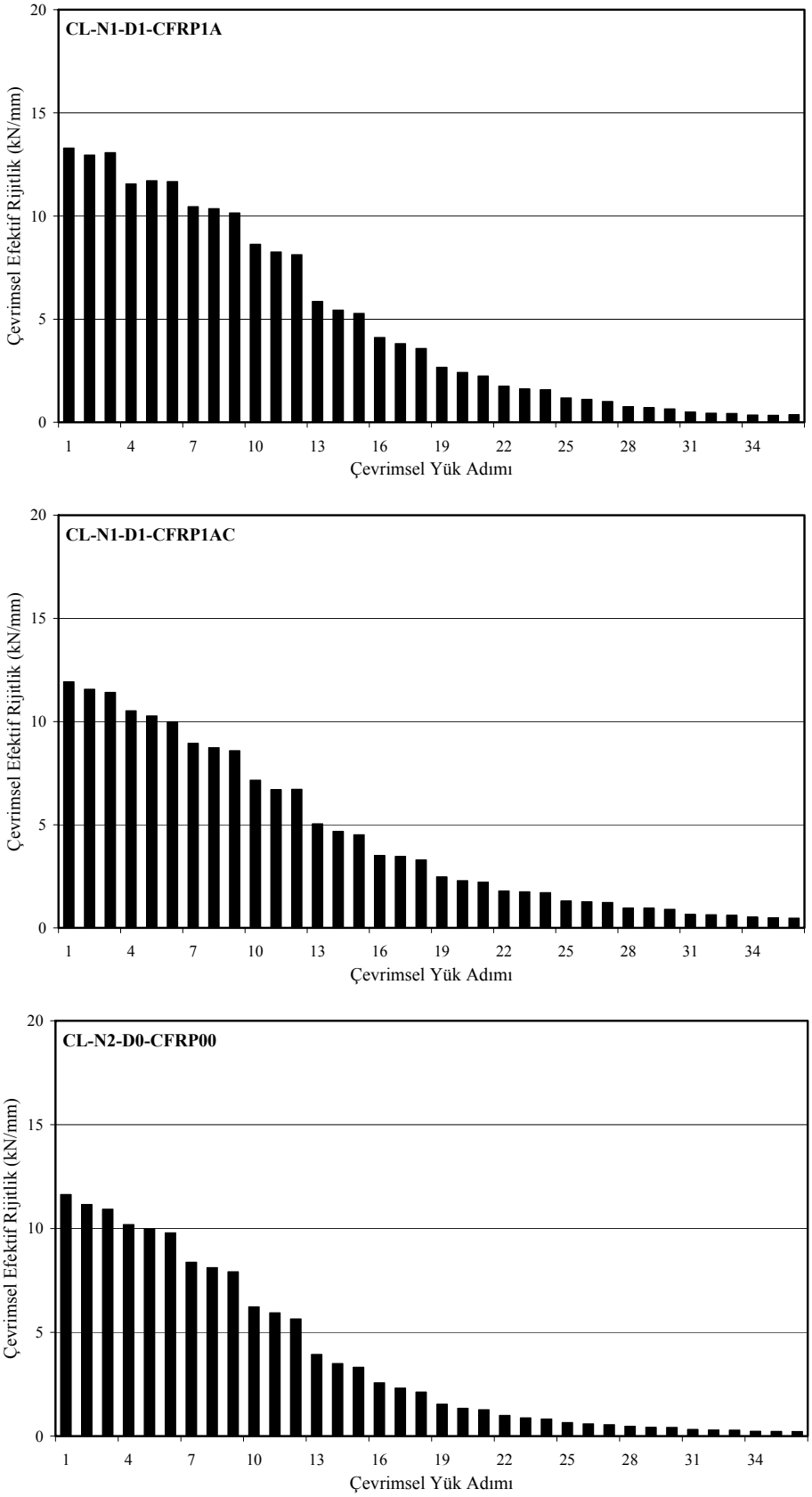
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler



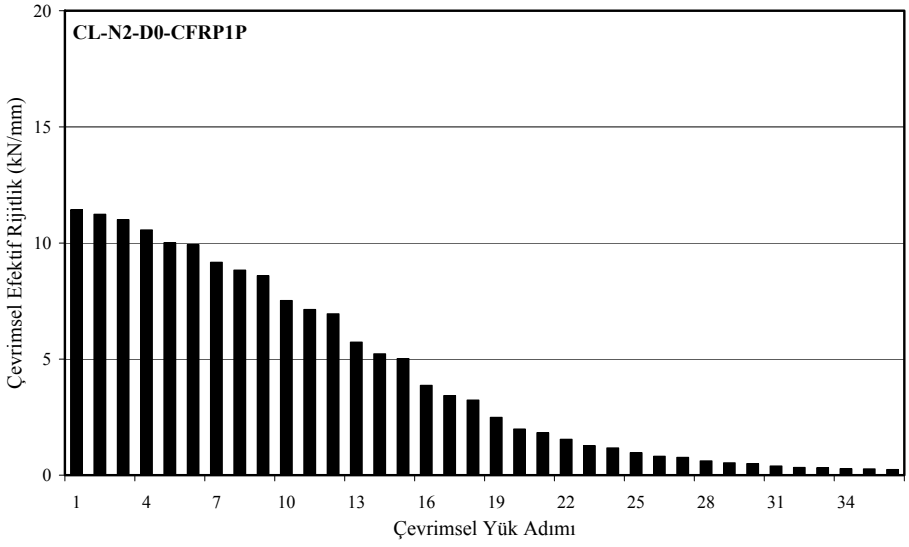


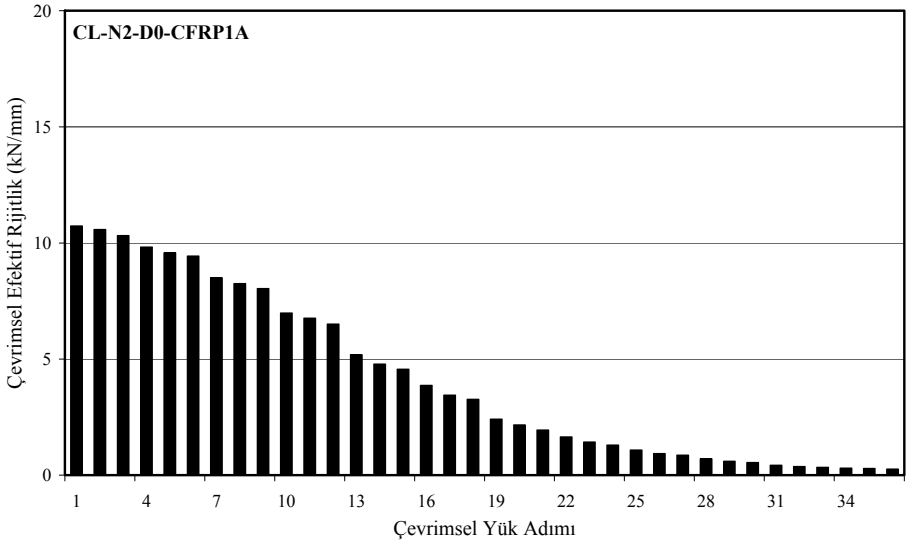


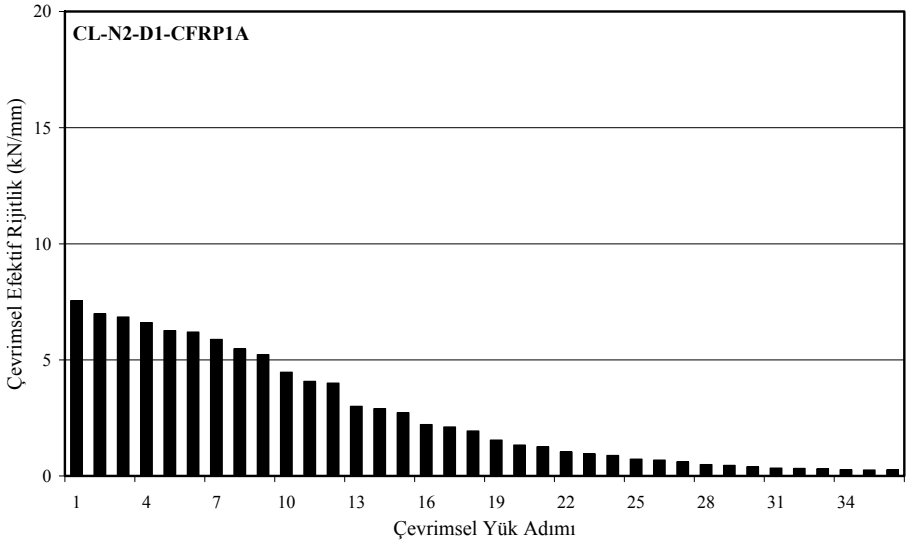
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler (devamı)



Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler (devamı)



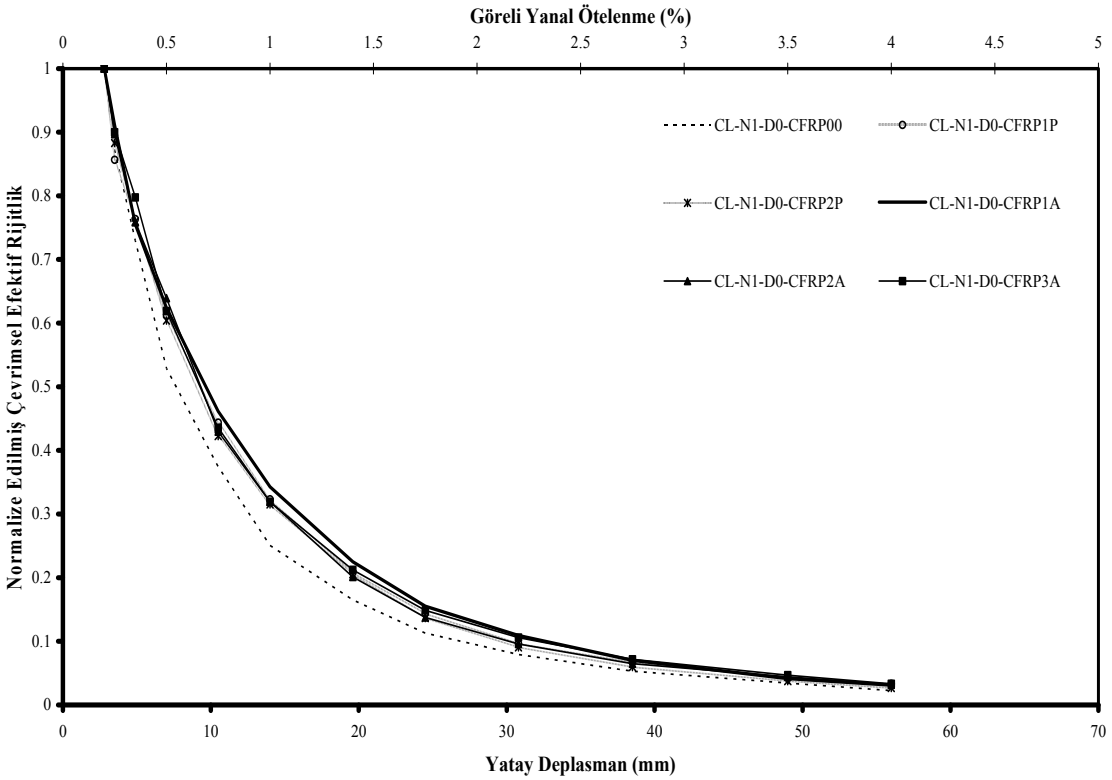




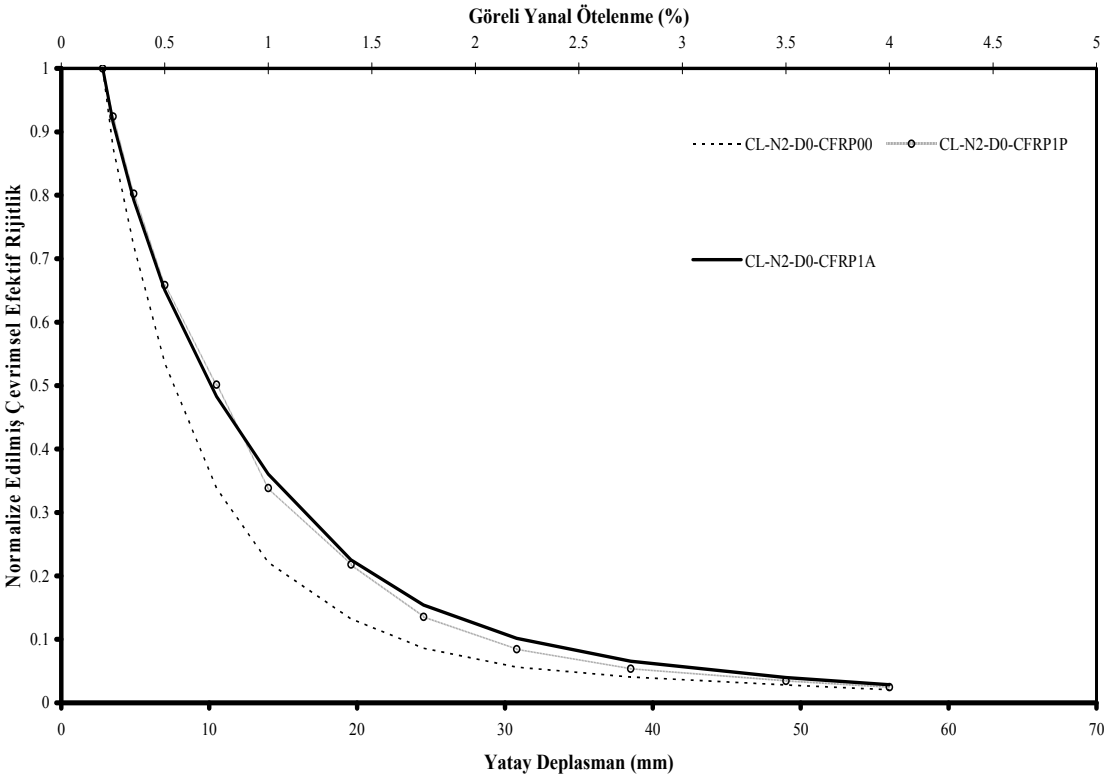
Şekil 5.22: Çevrimsel efektif rijitlikler (devamı)

Şekil 5.23 ile 5.25 arasındaki grafiklerde, her bir ötelenme adımındaki ilk çevrime ait çevrimsel rijitliğin, numunenin ilk çevrimsel rijtlik değerine göre normalize edilmiş hali görülmektedir. Diğer bir değişle bu grafikler, çevrimsel rijitlikteki düşüşü göstermektedirler. Grafiklerden, sargılama ile güçlendirmenin, çevrimsel rijitlik düşüşünü azalttığı ve aynı ötelenme oranı için daha yüksek rijitlik değerlerinin sağlanmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Aktif sargılama yapılmış elemanlarda, pasif FRP sargısına göre rijitlik düşüşü daha az olmuştur. Başlangıçta hasarsız, eksenel yük oranı yüksek olan kolonlarda, % 0.35 ile % 2.75 ötelenme oranları arasında bu gelişimin belirgin olarak görüldüğü belirlenmiştir. Eksenel yük oranı düşük olan kolonlarda bu davranış, % 0.25 ile % 3.50 ötelenme oranları arasında, daha etkin biçimde izlenmektedir.

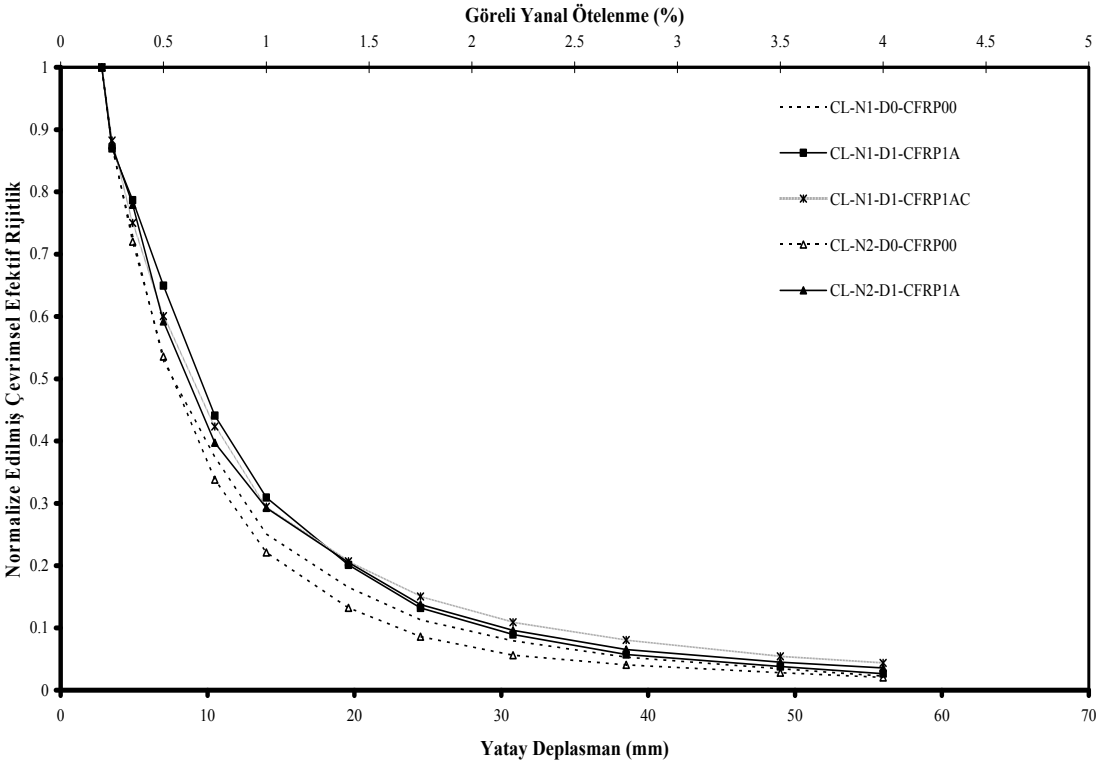
Başlangıçta hasar görmüş, tamir edildikten sonra sargılanmış olan elemanlarda, artan ötelenme oranı ile oluşan rijitlik azalmasının, her iki eksenel yük grubu içinde tüm referans numunelerden az olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.23: Çevrimsel efektif rijitlik düşüşü– Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.24: Çevrimsel efektif rijitlik düşüşü – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler

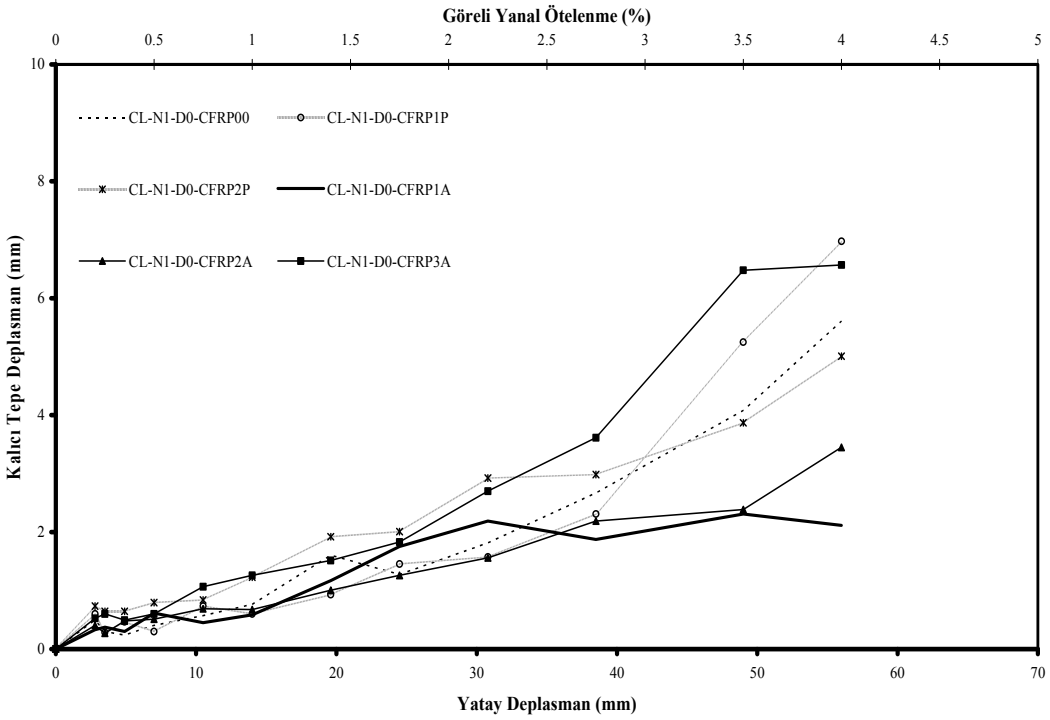


Şekil 5.25: Çevrimsel efektif rijitlik düşüşü – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

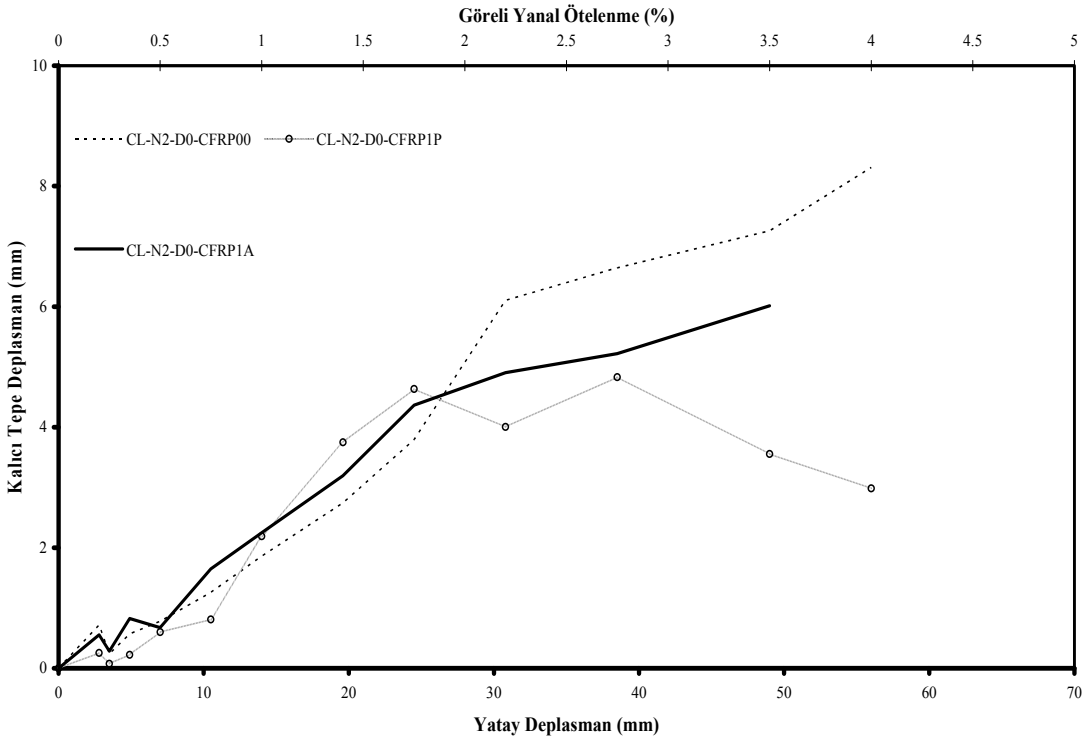
5.6. Kalıcı Ötelenme

Yapı ve yapı elemanı karakteristik davranışı her ne kadar rijitlik, dayanım ve süneklik değerleri ile tanımlanmakta ise de diğer bazı parametreler de, eleman davranışı üzerinde önemli rol oynamaktadırlar. Buraya kadar bahsi geçen enerji tüketimi ve sönümlenmenin yanında bir diğer değişken olarak kalıcı ötelenme miktarı sayılabilir. Çevrimsel yükleme altında yapı elemanlarında, başlangıç seviyesinde oluşan göreli olarak önemsiz çatlak genişlikleri ve hasar miktarı sonucunda, yük kaldırıldığı durumda başlangıç konumuna gelebilmektedir. Artan yükleme ile plastik bölgeye yaklaşılması ve bu bölgeye geçilmesi ile birlikte, çatlak genişlikleri ve hasar durumu artmaktadır. Bu durumda yük kaldırıldığında ve tersinir yük uygulamaya geçilmeden önceki noktada, elemanın başlangıç pozisyonuna ulaşmadığı, yani kalıcı deformasyonların ortaya çıktığı görülür. Yapı elemanlarından, özellikle artan yük seviyelerinde, düşük kalıcı ötelenme yapmaları beklenmektedir.

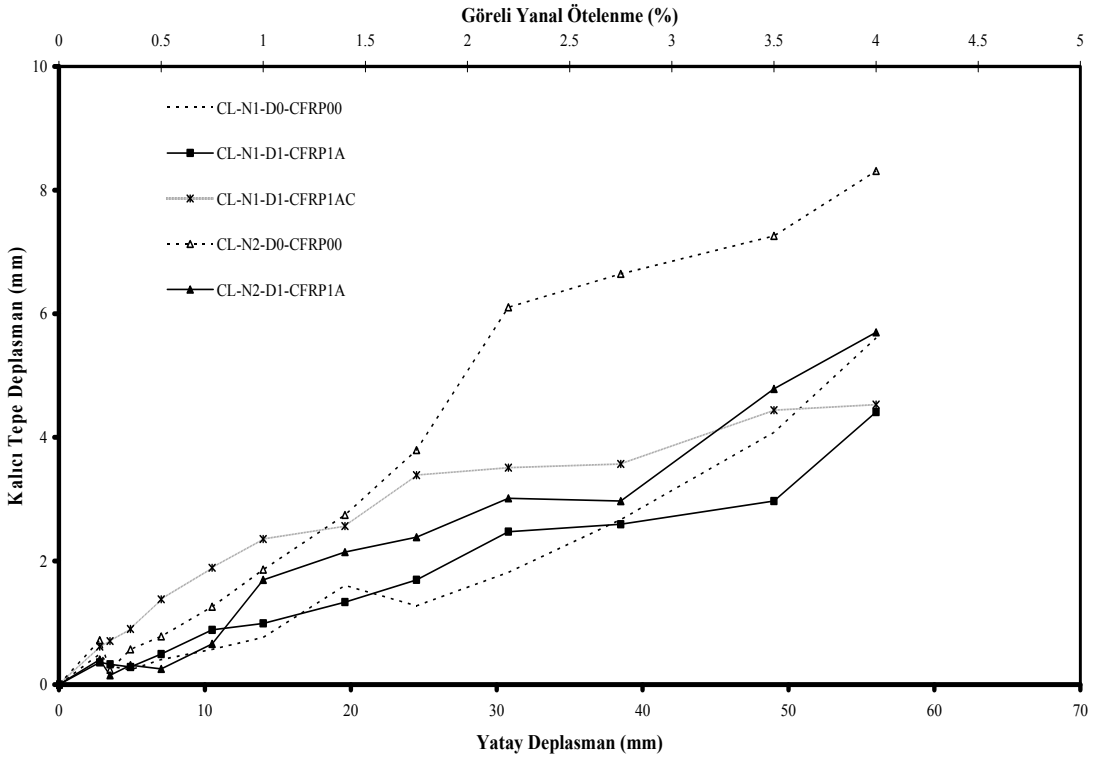
Şekil 5.26 ile Şekil 5.28 arasında, test edilen kolonlarda, her yükleme adımı sonunda elde edilen kalıcı ötelenme değerleri verilmektedir.



Şekil 5.26: Kalıcı yatay ötelenme değerleri – Eksenel yük oranı % 25 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.27: Kalıcı yatay ötelenme değerleri – Eksenel yük oranı % 10 olan hasarsız numuneler



Şekil 5.28: Kalıcı yatay ötelenme değerleri – Tamir edilip güçlendirilmiş numuneler

Başlangıçta hasarsız, eksenel yük seviyesi yüksek olan kolonlarda kalıcı ötelenme değerleri, % 0.75 ötelenme oranına kadar, 0.5 mm farklılıkla, yaklaşık aynı seviyelerde kalmıştır. Bu ötelenme seviyesinden, % 2.20 seviyesine kadar farklılık 1.5 mm civarına çıkmıştır. % 2.20 göreli ötelenme seviyesinden sonra kalıcı ötelenme oranlarındaki farklılık önemli ölçüde artmış, aktif sargılama ile güçlendirilen elemanlar % 4.00 seviyesine kadar ulaşılan kalıcı ötelenme değerinde bu numuneler için ciddi bir artış görülmemiştir.

Eksenel yük seviyesi düşük olan kolonlar için kalıcı ötelenme değerleri, % 1.75 göreli ötelenme seviyesine kadar yaklaşık 1 mm farkla benzer eilimle artmıştır. Bu seviyeden sonra her iki sargılama tipi içinde kalıcı ötelenme değerleri, referans numuneye göre daha az değerlerde kalmıştır.

Başlangıçta hasarlı olan, aktif sargılanmış numunelerin, kalıcı ötelenme değerlerinde, özellikle eksenel yük seviyesi düşük elemanlarda olumlu gelişme izlenmiştir. Eksenel yük seviyesi yüksek olana kolonda ise, referans numune ile benzer bir eğilim saptanmıştır.

Tablo 5.4: Yatay yük kapasitelerine erişildiğindeki birim deformasyon, gerilme ve aderans gerilmesi değerleri

Numune	ε_1 (mm/mm, 10^{-6})	ε_2 (mm/mm, 10^{-6})	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{FRP} *maks-yük* (MPa)	σ_l *maks-yük* (MPa)	u_{ort} (MPa)
CL-N1-D0-CFRP00	620	972	124	194	0	0.00	3.06
CL-N1-D0-CFRP1P	767	1182	153	236	70	0.08	3.75
CL-N1-D0-CFRP2P	727	1279	145	256	71	0.08	3.86
CL-N1-D0-CFRP1A	914	1498	183	300	1000	1.03	4.64
CL-N1-D0-CFRP2A	780	1348	156	270	500	0.52	4.09
CL-N1-D0-CFRP3A	702	1237	140	247	250	0.26	3.73
CL-N1-D1-CFRP1A	--	--	---	---	1000	---	---
CL-N1-D1-CFRP1AC	--	--	---	---	1000	---	---
CL-N2-D0-CFRP00	576	704	115	141	0	0.00	2.46
CL-N2-D0-CFRP1P	685	1551	137	310	72	0.08	4.30
CL-N2-D0-CFRP1A	1007	1577	201	315	1000	1.03	4.97
CL-N2-D1-CFRP1A	--	--	---	---	1000	---	---

5.7. Birim Deformasyon Verileri

Deneyler sırasında, Bölüm 3.3.2'de belirtilen yerleşim doğrultusunda, bindirme bölgesindeki temel bloğundan çıkan kolon filiz donatıları üzerinde, iki farklı seviyede birim deformasyon takibi yapılmıştır. Ek E'de bu noktalarda elde edilmiş olan birim deformasyon-göreli ötelenme grafikleri yer almaktadır. Tamir edildikten sonra, güçlendirilip test edilen numunelerde, boy donatı birim deformasyon okuması yapılamamıştır. Her bir numune için, yatay yük kapasitesine erişildiği andaki ortalama birim deformasyon değerleri Tablo 5.4'de yer almaktadır. Tablo 5.4'de yer alan boy donatı birim deformasyon verileri, Bölüm 3.3.2'deki Şekil 3.6'da yer alan isimlendirme ile uyumlu olarak, 1 ve 2 alt indisleri kullanılarak ayrılmıştır. 1, temelden gelen boy donatı filizleri üzerinde, bindirme boyunun üstünden 3 D_b aşağıda yer alan noktadan, 2 ise bindirme boyunun orta noktasından elde edilen, kolon yatay yük kapasitesine ulaşıldığı andaki donatılardaki ortalama birim deformasyon verisini sembolize etmektedir.

Tablo 5.4'den görüldüğü üzere, FRP sargılama sonucunda, boy donatı birim deformasyon ve gerilme değerlerinde, artış sağlanmıştır. Bununla birlikte bindirme boyunun oldukça kısa olması nedeniyle, donatı akma gerilmesi ve akma birim deformasyon değerlerine ulaşılamamıştır. Yatay yük kapasitesine ulaşıldığında elde edilen, ortalama boy donatı gerilmesi değerleri göz önüne alındığında, eksenel yük oranının % 10 olduğu sargılanmış numunelerde, eksenel yük oranının % 25 olduğu numunelere göre artışın daha fazla olduğu görülmüştür. Boy donatı gerilmesi değerlerinde, eksenel yükün yüksek olduğu kolonlarda, her iki tip pasif sargılama ile yaklaşık aynı artış değerlerine ulaşılmıştır. Yüksek eksenel yük uygulanan grupta referans numuneye kıyasla donatı gerilmelerinde, pasif sargılama sonucunda % 32, 1000 MPa öngerilme kullanılarak aktif sargılamanın uygulandığı kolonlarda ise % 55 artış sağlanmıştır. Elde edilen en büyük donatı gerilmeleri akma dayanımına kıyasla, referans numunede % 36, pasif sargılamada % 48 ve en yüksek öngerilme kullanılan aktif sargılamada % 56 olarak bulunmuştur. Diğer öngerilme seviyeleri kullanılarak aktif sargılama yapılan kolonlarda donatı birim deformasyon değerlerinin, öngerilme seviyesine bağlı olarak değiştiği, bununla birlikte yaklaşık olarak pasif sargılamadaki donatı gerilmesi değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

Eksenel yük oranının % 10 olduğu kolonlarda her iki sargılama tipi uygulaması sonucunda da birbirine çok yakın donatı gerilmesi değerlerine ulaşılmıştır. Eksenel yük seviyesinin düşük olduğu kolonlarda sargılama sonucunda elde edilen dontı birim deformasyon artışlarının, eksenel yük oranının düşük olduğu kolonlarda elde edilen seviyelerden yüksek olduğu görülmüştür.

5.8. Bindirmeli Donatı Ekinde Aderans Gerilmeleri

Tablo 5.4'de, yatay yük kapasitesine ulaşıldığı durumda, bindirmeli ek üzerinde elde hesaplanan ortalama aderans gerilmesi değerleri yer almaktadır (u_{ort}). u_{ort} değerleri Denklem 5.2 yardımıyla elde edilmiştir. Bindirmeli eklerde aderans gerilmelerinin, bindirme boyunun kısalmasıyla birlikte, göreli olarak düzgün yayılı hale geldiği bilgisi yardımıyla, Denklem 5.2 kullanılarak ortalama aderans gerilmelerine ulaşılmıştır. Denklemde, Tablo 5.4'de yer alan donatı gerilme değerlerinin ortalaması kullanılarak (σ), temsil ettikleri toplam boy üzerindeki (13 D_b) ortalama aderans gerilmeleri hesaplanmıştır.

$$u = \frac{f_s \, \pi \, D_b^{\,2}}{4 \, l \, \pi \, D_b} = \frac{f_s \, D_b}{4 \, l} \tag{5.2}$$

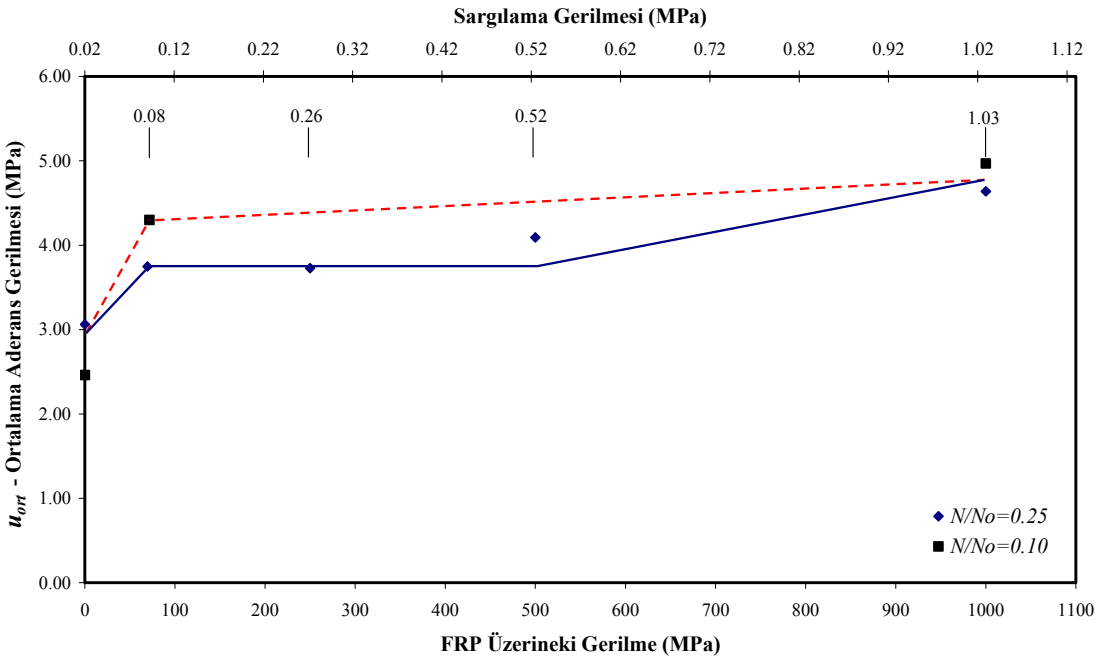
Yatay yük kapasitesinde elde edilen ortalama aderans gerilme değerleri, her bir numuneye ait FRP gerilmesi ve kesitte oluşturulan sarglama gerilmesi değerleri ile birlikte Şekil 5. 29'da grafiksel olarak verilmiştir. Aktif FRP sargılama uygulanan elemanlarda, FRP üzerinden alınan birim deformasyon okumaları ve çubuk yük hücrelerinden alınan ölçümler sonucunda, yatay yük kapasitesine ulaşıldığı anda önemli değişimler oluşmadığı görülmüştür. Ayrıca aktif sargılamada çevresel olarak oluşan FRP gerilme değişimi göz ardı edilmiştir.

$$\sigma_l = \frac{1}{2} k_e \, \rho_{FRP} \, \sigma_{FRP} = \frac{1}{2} k_e \, \frac{4 t_{FRP}}{d} \sigma_{FRP} \tag{5.3}$$

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + \mathrm{d}'^2}{3 \, A_g \, (1 - \rho_{sg})} \tag{5.4}$$

Pasif sargılama uygulanan kolonlarda ise FRP gerilme değerleri, deneyler sırasında FRP üzerinden elde edilen birim deformasyon verisinden hesaplanmıştır. Elde edilen birim deformasyonun elastisite modülü ile çarpımı sonucu bulunan FRP gerilme değeri hesabında, FRP elastisite modülü olarak, % 60 epoksi, % 40 FRP hacimsel karışım oranından elde edilen değer kullanılmıştır. Pasif sargılama sonucu kesit üzerinde elde edilen sargılama gerilmesi değerleri Denklem 5.3 ve Denklem 5.4 yardımıyla elde edilmiştir [21].

Denklem 5.3 dairesel kolonlar için türetilmiş bir ifade olmakla birlikte, Denklem 5.4 ile bulunan k_e etkinlik katsayısı yardımıyla, kare ve dikdörtgen kolonlarda, FRP uygulaması sonucu oluşan sargılama gerilmelerinin elde edilmesi sağlanabilmektedir. ρ_{FRP} hacimsel FRP oranını, ρ_{sg} ise kesitteki donatı oranını temsil etmektedir. FRP hacimsel oranı bulunurken Denklem 5.3'de yer alan d, dairesel kesit çapı kullanılmaktadır. Kare kesitler için hacimsel FRP oranı türetildiğinde, d yerine kolon kesit boyutu geçmektedir. A_g kesit alanını, b' ve d' ise kolon kesit boyutlarından, pahlanmış uç bölge uzunluklarının çıkartılması ile elde edilen boyutları simgelemektedir.



Şekil 5.29: Ortalama aderans gerilmesi-sargılama gerilmesi değişimi

Şekil 5.29'da FRP gerilmesi ve kesitte oluşturulan sargılama gerilmesi ile yatay yük kapasitesine ulaşıldığında elde edilen ortalama aderans gerilmesi değerlerinin değişimi görülmektedir. Şekil üzerinde, eldeki sınırlı veriler ışığında oluşturulan grafiksel model yer almaktadır. Şekilde, aktif sargılama ile doğrudan karşılaştırma amacı ile uygulanan, aynı miktarda FRP malzemenin kullanıldığı şerit halindeki pasif sargılama sonuçları işlenmemiştir.

Sargılanmamış kolonlarda, bindirme bölgesinde oluşan aderans gerilmesi değerleri,özellikle eksenel yük oranı % 25 olan numune için, Orangun ve diğ. (1977) tarafından ortaya konan ve günümüzde de kullanılan aderans gerilmesi hesap denklemi ile uyumluluk göstermektedir (Denklem 5.5). Denklem 5.5'de K_{tr}, etriyelerin aderans gerilmesine olan katkısını temsil etmektedir.

$$\frac{u}{\sqrt{f'_{ck}}} = 0.1 + 0.25(c/D_b) + 4.15(D_b/l_s) + K_{tr} \qquad \text{(MPa)} \tag{5.5}$$

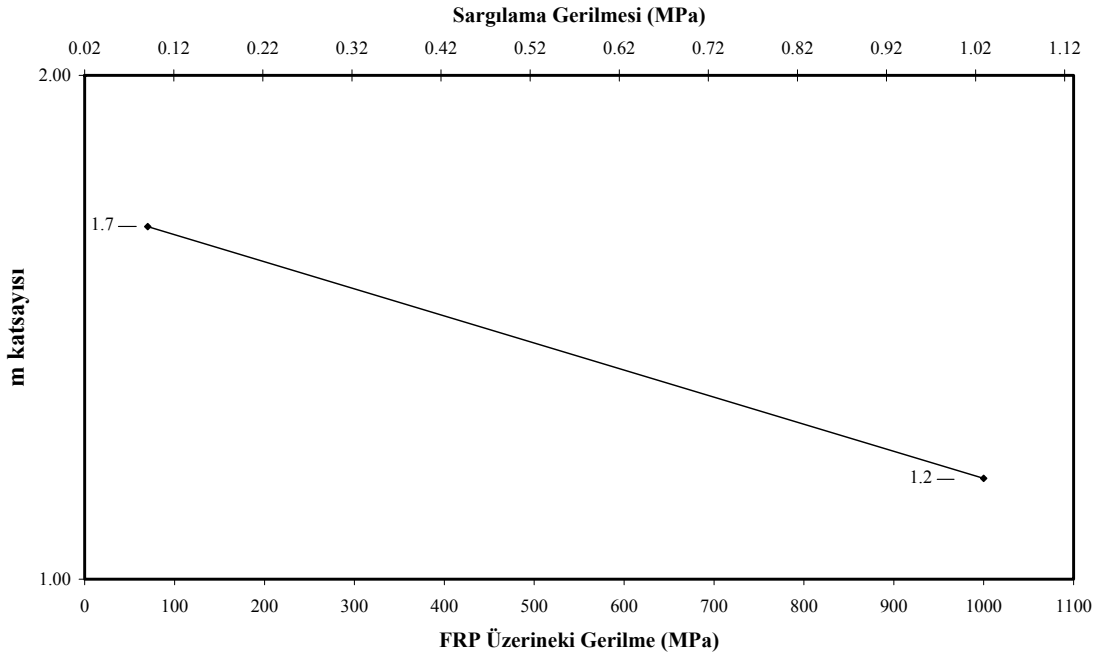
Test edilen kolonlarda bindirme bölgesinde var olan etriyenin oldukça az olması sebebiyle, Denklem 5.5'deki K_{tr} ifadesinin katkısı sıfır alınmıştır. Bu çalışmadaki kolon özellikleri kullanılarak Denklem 5.5'e göre yapılan hesap sonucunda aderans gerilmesi, 3.11 MPa, deneysel olarak elde edilen donatı gerilmesi sonucu hesaplanan ortalama aderans gerilmesi değeri eksenel yük oranı %25 olan numune için 3.06 MPa olarak elde edilmiştir. Eksenel yük oranın %10 olduğu numunede ise bu değer, Denklem 5.5'den elde edilen sonuçtan daha düşük olarak, 2.46 MPa bulunmuştur.

Sargılanmamış numunelerde ortalama aderans gerilmesinin3 olduğu kabulü ile deney sonuçları kullanılarak Denklem 5.6 türetilmiştir. Denklemde yer alan σ_{FRP} sargılama gerilmesini göstermektedir. p katsayısı ise sargılama tipini ve sargılama gerilmesinin etkinliğini ifade eden deneysel bir ifadedir. Bu ifade eksenel yük oranı % 25 olan kolonlar için türetilmiş olup, pasif sargılama durumunda 0.18 değerini almakta, aktif

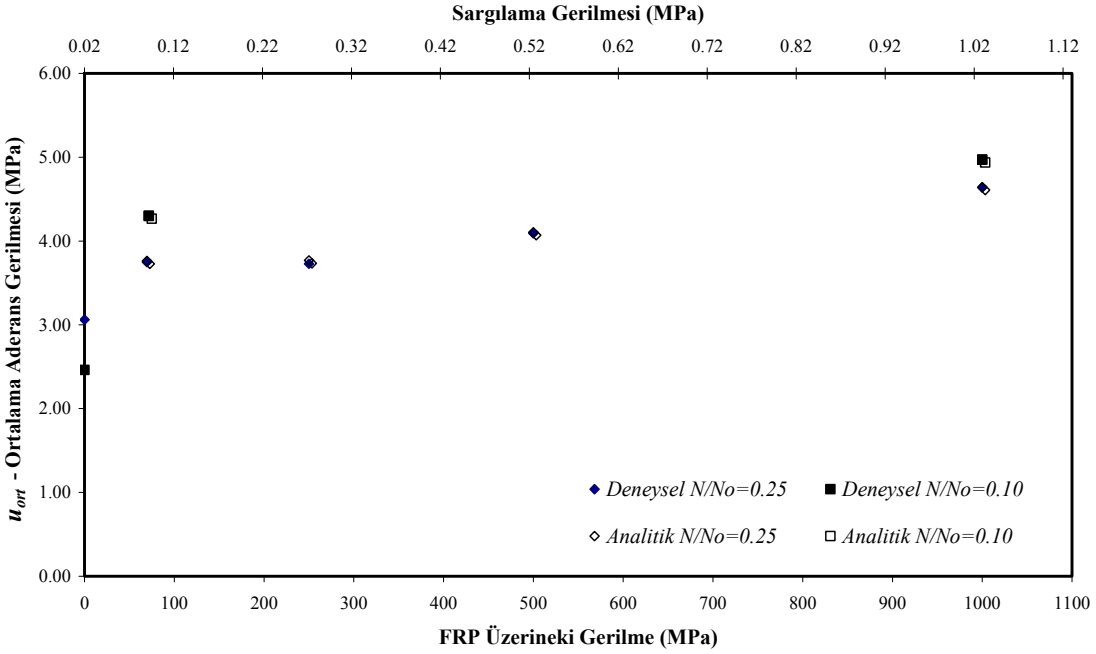
$$u_{FRP} = 1.5\sqrt{\sigma_l + p} \tag{5.6}$$

$$p = 0.17\left(\frac{\sigma_{FRP}}{1000}\right)^3 \tag{5.7}$$

sargılama durumunda ise Denklem 5.7 ‘den elde edilen sonuç şeklinde kullanılmaktadır. Eksenel yükün % 10 olması durumunda, Denklem 5.6’dan elde edilen sonuçlar, sargılama gerilmesi ve FRP gerilmesine değerlerine göre, Şekil 5.30’dan grafiksel olarak elde edilen *m* katsayısı ile çarpılmaktadır.



Şekil 5.30: m katsayısı-sargılama gerilmesi değişimi (Eksenel yük oranı % 10 için)



Şekil 5.31: m katsayısı-sargılama gerilmesi değişimi

Denklem 5.6 ve Denklem 5.7 kullanılarak elde edilen sonuçlar, Şekil 5.31'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi oluşturulan sargılama gerilmesi-aderans gerilmesi ilişkisini temsil eden denklem takımı, deneysel sonuçlarla uyumlu sonuç vermektedir.

Oluşturulan modelin eldeki yetersiz veri ile türetildiği göz önüne alınmalıdır. Belirtilen değişkenlere ek olarak, beton kalitesinin, donatı çapının, bindirme boyu uzunluğunun ve paspayı değerinin de modelde etkili olacağının düşünülmektedir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1. Çalışmanın Özetlenmesi

Oldukça yetersiz, boy donatı bindirme boyu ile imal edilmiş kolon davranışının iyileştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada, 350 mm x 350 mm kesit boyutlarında kare kolonlar test edilmiştir. 15 D_b bindirme boyu ile üretilen kolonların bindirme bölgesinde, öngerilmeli aktif FRP ve pasif FRP sargılama uygulamaları yapılmıştır. Davranışın incelendiği bu çalışmada, iki farklı eksenel yük değeri (nominal % 10 ve % 25) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar izleyen bölümde kısaca özetlenmiştir.

6.2. Sonuçlar

Burada elde edilen sonuçların, deneysel çalışmanın kapsamı ile sınırlı olduğu ve sonuçların genelleştirilebilmesi için daha fazla ve çeşitli veriye ihtiyaç olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Tasarım aşamasında, herhangi bir aderans ve bindirme boyu problemi yaşanmayacağı düşünülen kolonların, herhangi bir sebeple bu soruna maruz kalması durumunda, özellikle tasarım dayanımına erişemeden aderans problemi sonucu göçmeye ulaştığı veya diğer göçme mekanizmalarının erken tetiklendiği bilinmektedir.

Bu çalışmada detayı geliştirilen öngerilmeli aktif CFRP sargılama tekniği kullanılarak, oldukça kısa boyda donatı bindirme ekine sahip kolonların dayanım değerlerinin, eksenel yük miktarı % 25 seviyesinde olan kolonlarda % 27 oranında arttırılabildiği görülmüştür. Uygulamada FRP üzerinde 1000 MPa başlangıç gerilmesi oluşturulmuştur. Aktif sargılama gerilmesinin, başlangıç değerinden itibaren kolon çevresinde farklılık gösterdiği elde edilen sonuçlardan biridir. Bu öngerilme değerinin, daha düşük sürtünme katsayısında sahip dolgu malzemeleri ve üst üste kullanılan FRP şeritler arasındaki sürtünmeyi azaltacak bir malzeme kullanımı ile düzgün dağıtılabileceği öngörüsünde bulunulmaktadır. Bunun sonucunda elde edilen artışın daha yüksek değerlere çıkabileceği

düşünülmektedir. Aktif sargılama ile elde edilen artış oranı, üç kat ve tüm bindirme boyu yüksekliğince yapılan pasif sargılamanın uygulamasından elde edilen artışın % 64 fazlasıdır. Daha düşük eksenel yük seviyesi ile test edilen kolonlarda, her iki sargılama tipinin de etkili olduğu görülmüştür. Başlangıçta, orta hasar seviyesinin üst değerlerinde hasarlı kolonların, tamir edilip aktif sargılama uygulanması sonucunda, yüksek eksenel yük seviyelerinde düşey yüke sahip numunelerde, hasarsız duruma göre dayanım artışı elde edildiği belirlenmiştir. Eksenel yük oranı düşük olan kolonlarda ise hasarsız durumdaki dayanım değerlerine yaklaşılmıştır. Pasif sargılamada, kullanılan malzeme miktarındaki önemli sayılabilecek artışın, kullanılan bindirme boyu ve % 25 eksenel yük seviyesi için, genel olarak düşünülen artışı sağlamadığı anlaşılmıştır.

Elde edilen dayanım değerlerindeki deplasman seviyelerinin, özellikle yüksek eksenel yük seviyesinde, aktif sargılama tekniği ile önemli ölçüde geliştiği, düşük eksenel yük seviyesinde ise benzer gelişimin her iki sargılama tekniği ile elde edildiği belirlenmiştir.

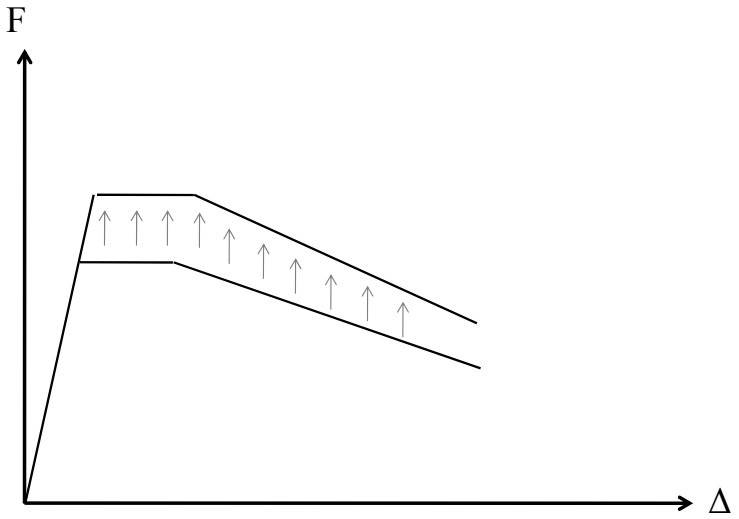
Enerji tüketim miktarlarının her iki sargılama tekniği ile geliştiği gözlenirken, özellikle eksenel yük seviyesinin yüksek olduğu kolonlarda aktif sargılama ile daha yüksek oranlarda enerji tüketildiği sonucuna varılmıştır.

Artan ötelenme oranlarında, yapılan deplasmanın artmasına ve kalıcı ötelenme değerlerinin büyük çıkmasına neden olan, çevrimsel rijitlik değerlerindeki düşüşün, aktif sargılama ile azaltıldığı görülmüştür. Eksenel yük seviyesi düşük olan elemanlarda her iki sargılama tipinin benzer etkiyi sağladığı belirlenmiştir.

Kalıcı ötelenme oranlarının, özellikle belirli bir ötelenme oranı sonrasında, aktif sargılama ile kontrol edilebildiği ve hasar seviyesinin azaltılabildiği, sonuçlardan anlaşılmıştır.

Kesit üzerinde hem aktif hem de pasif sargılama ile oluşturulan sargılama gerilemelerinin, bindirme bölgesindeki aderans gerilmesine katkısı modellenmiştir. Oluşturulan modelin eldeki deneysel veri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Aktif sargılama ile elde edilen artışın, bindirme boyu, beton kalitesi, sargılama öngerilmesi aktif sargılama yerleşimi ve donatı çapına bağlı bir fonksiyon olacağı düşünülmektedir. Elde edilen kısıtlı sonuçların ışığında, belirtilen değişkenlerin de göz önüne alınması ile yük deplasman ilişkisindeki gelişimin, Şekil 6.1'deki gibi olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.1: Aktif sargılama ile elde edileceği düşünülen yük-deplasman ilişkisindeki değişim

6.3. Öneriler

Eldeki sınırlı imkanlarla yapılan bu deneysel çalışmada ulaşılan sonuçlar, aktif sargılamanın bindirme boyu probleminin giderilmesinde kullanılabilecek bir güçlendirme tekniği olduğu konusunda, elde edilen dayanım artışdeğeri göz önüne alındığında umut vermektedir.

Oluşturulan aderan gerilmesi-sargılama gerilmesi ilişkisinin, aderans gerilmesinde etkili diğer parametreler ile desteklenmesi gerekmektedir.

Elde edilen sonuçların geliştirilmesi noktasında, değişken bindirme boyları, beton kalitesi, donatı oranı, sargılama şerit aralığı ile yeni çalışmaların yapılması gerekmektedir. Ayrıca kesit boyutları farklı kare kolonlar ve dikdörtgen kolonlardaki davranışın incelenmesi önem taşımaktadır. Eksenel yük oranının daha fazla çeşitlendirilerek yeni çalışmaların yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

[1]. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", ***Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü***, 33, 129-133, 150-159 (2007)

[2] Leet K., "Reinforced Concrete Design", ***McGraw-Hill Book Company Inc***., New York, 207-237 (1982)

[3] Lutz L. A. and Gergely P., "Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete", ***ACI Journal, Proceedings***, Title No 64-62, 711-721, November (1967)

[4] Ersoy U., ve Özcebe G., "Betonarme", Geliştirilmiş Yeni Baskı, ***Evrim Yayınevi ve Bilg. San. Tic. Ltd. Şti.***, İstanbul, 721-769, 89-118, 325-423, 210-219 (2001)

[5] Akpınar E., "Normal Dayanımlı Betonda Donatı Kenetlenme Özelliklerinin Karbon Elyaf Sargısı İle İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, 4-48,112,113 (2004)

[6] CEB-Task Group Bond Models, "Bond of Reinforcement in Concrete - State of Art Report", ***International Federation for Structural Concrete (fib)***, Switzerland (2000)

[7] Abrams D. A., "Tests of Bond Between Concrete and Steel", ***Bulletin No 71, Published by University of Illinois***, Urbana 20-25, 31-81, 130-163 (1913)

[8] Goto Y., "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars", ***ACI Journal, Proceedings***, Title No 68-26, 244-251, April (1971)

[9] Orangun C. 0., Jirsa J. O. and Bren J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices", ***ACI Journal, Proceedings***, Title No 74-11, 114-122, March (1977)

[10] Neville A. M., "Properties of Concrete", ELBS Edition ofThird Edition, ***Longman Scientific and Technical, Longman Group UK Ltd.***, England (1981)

[11] Larrard F., Schaller I. and Fuchs J., "Effect of Bar Diameter on the Bond Strength of Passive Reinforcement in High - Performance Concrete", ***ACI Materials Journal***, Title No 90-M36, 333-339, July/August (1993)

[12] Esfahani M. R. and Rangan B. V., "Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High - Strength Concrete (HSC)", ***ACI .Structural Journal***, Title No 95-S10, 96-106, March/April (1998)

[13] Yerlici V., and Özturan T., "Factors Affecting Anchorage Bond Strength in High - Performance Concrete", ***ACI Structural Journal***, Title No 97-S54, 499-507, May/June (2000)

[14] Harajli M. H., Hout M. and Jalkh W., "Local Bond Stress - Slip Behavior of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Concrete", ***ACI Materials Journal***, Title No 92-M37, 343-354, July/August (1995)

[15] Darwin D. and Graham E. K., "Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars", ***ACI Structural Journal***, Title No 90-S65, 646-657, November/December (1993)

[16] Zuo J. and Darwin D., "Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete", ***ACI .Structural Journal***, Title No 97-S65, 630-641, July/August (2000)

[17] Untrauer R. E. and Warren G. E., "Stress Development of Tension Steel in Beams", ***ACI Journal, Proceedings***, Title No 74-.36, 368-372, August (1977)

[18] Türk Standartları Enstitüsü (TSE), "TS 500 - Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", Birinci Baskı, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 11-12, 38- 45 (2000)

[19] Macgregor G. J., "Reinforced Concrete – Mechanics and Design", Third Edition, ***Prentice Hall Inc.***, New Jersey, 331-333 (1997)

[20] American Composites Manufacturers Association Market Development Alliance (ACMA DMA), http://www.mdacomposites.org (**Ziyaret Tarihi 21.12.2008**)

[21] CEB Task Group 9.3., FRP (Fibre Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures, "Technical Report - Externally bonded FRP reinforcement for RC structures", Bulletin No. 14, ***International Federation for Structural Concrete (fib)***, 1-18, 27-84, 109-115 (2001)

[22] Composite Advantage, http://www.compositeadvantage.com/composites/ index.html, (**Ziyaret Tarihi 17.02.2009**)

[23] ACI Committee 440, "State-of-the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", ***American Concrete Institute, ACI 440R-96***, (1996)

[24] Antonio B., Marco C. and Andrea V., "New Materials for Strengthening and Seismic Upgrading Interventions", ARIADNE, ***New Materials and Technologies for Conservation and Safeguarding of Cultural Heritage Workshop***, April 22-28, Czech Republic (2002)

[25] Transportation Research Board Executive Committee 2003, "Bonded Repair and Retrofit of Concrete Structures Using FRP Composites", ***NCHRP Report 514***, I-3, I-1 (2004)

[26] ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" ***American Concrete Institute, ACI 440.2R-08***, 10, 23 (2008)

[27] Motavalli M. and Czaderski C., "FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review", ***Composites & Polycon 2007***, American Composites Manufacturers Association, October 17-19, Tampa, FL USA, (2007)

[28] Newhook J. and Svecova D., "Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers", ***Design Manual No. 3, Version 2***, ISIS Canada, 4.1, 4.2 (2007)

[29] American Chemical Society, "The first carbon fibers", http://acswebcontent.acs.org/landmarks/landmarks/carbon/car2.html, (**Ziyaret Tarihi 22.01.2010**)

[30] Homam S. M., "Durability of Fibre Reinforced Polymers (FRP) Used in Concrete Structures", MA.Sc., ***Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto***, 14-20 (2000)

[31] Demers M., Neale K. W., and Sheikh S., "FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures", ***Design Manual No. 4, Version 2***, ISIS Canada, 3.3, 3.4 (2008)

[32] Abanilla M. A., Azhari F., Banthia N., Benmokrane B.,Bisby L. A., Boulfiza M., Christensen P., Ghosh K., Gren M. F., Karbhari M. F., Khalighi Y., Kodur V. K. R., Lee L., Li Y., Mufti A., Onofrei M., Robert M., Sparks G., Talukdar S., Walker R., Yang Q., Youssef T. And Zhang J., "Durability of Fibre Reinforced Polymers in Civil Engineering", ***Duarbility Monograph***, ISIS Canada, 4.9-4.27 (2006)

[33] Toutanji H. A. and Balaguru P., " Effects of Freeze-Thaw Exposure on Performance of Concrete Columns Strengthened with Advanced Composites", ***ACI Materials Journal***, V96, No5, 605-611, September-October (1999)

[34] 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., "Fiber-Reinforced Polymer Compositesfor Construction—State-of-the-Art Review", ***Journal of Composites for Construction ASCE***, Vol. 6, No. 2, May 1, 73-87 (2002)

[35] Applied Technology Council, Seismic Safety Commission, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ***ATC-40 Report No. SSC 96-01***, Vol. 1, 6.12-6.17 (1996)

[36] American Society of Civil Engineers (ASCE), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA-356, ***American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency (FEMA)***, Washington D.C., 2.17–2.20 (2000)

[37] CEB Task Group of Commission 7 (Seismic Design) TG7.1:Assessment and retrofit of existing structures, "State-of-the-Art report - Seismic Assessment And Retrofit of RC Buildings", Bulletin No. 24, ***International Federation for Structural Concrete (fib)***, ch5. (2003)

[38] Setunge S., Kumar A., Nezamizan A., De Silva S., Carse A., Spathonis J., Chandler L., Gilbert D., Jhonson B., Jeary A. and Pham L., "Review of Strengthening Techniques Using Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Composites", Report 2002-005-C-01, ***CRC Construction Innovation***, (2002)

[39] Lorenzis L. D. and Nanni A., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods" ***ACI Structural Journal***, V. 98, No. 1, January-February, 60-68 (2001)

[40] Bournas D. A. and Triantafillou T. C., "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Columns with Near-Surface-Mounted FRP or Stainless Steel", ***ACI Structural Journal***, V. 106, No. 4, July-August, 495-505 (2009)

[41] Teng J. G., Chen J. F., Smith S. T. and Lam L., "FRP – Strengthened RC Structures". ***John Wiley & Sons, LTD.***, England (2002)

[42] Akgüzel U., "Seismic Retrofit of Brick Infilled R/C Frames with Lap Splice Problem in Columns", MSc Thesis, ***Boğazici University***, 39-105 (2003)

[43] Chen W. F. and Duan L., "Bridge Engineering Handbook", ***CRC Press LLC***, New York,. ch.27 (2000)

[44] Caltrans,, "Seismic Design Criteria v1.4", ***California Department of Transportation***, Sacramento, California (2006)

[45] Priestley M. J. N., Seible F. and Calvi G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges", ***John Wiley & Sons, Inc.***, New York, 265-457, 535-654 (1996)

[46] Berry M. P., Lehman D. E.. and Lowes L. N., "Lumped-Plasticity Models for Performance Simulation of Bridge Columns", ***ACI Structural Journal***, V. 105, No. 3, May-June, 270-279 (2008)

[47] Priestley M. J. N. and Park R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading", ***ACI Structural Journal***, V. 84, 84-S8, January-February, 61-76 (1987)

[48] Paulay T. and Priestley M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", ***John Wiley & Sons, Inc.***, New York, 135-146 (1992)

[49] Razvi R. S. and Saatcioglu M., "Analysis and Design of Concrete olumns for Confinement", ***Earthquake and Spectra***, V. 15, No. 4, November, 791-811 (1999)

[50] Priestley M. J. N., Seible F., Xizo Y. And Verma R., "Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength--Part 2 _ Test Results and Comparison With Theory", ***ACI Structural Journal***, V. 91, No. 5, September-October, 476-484 (1994)

[51] Elwood K. J. and Eberhard M. O., "Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns", ***ACI Structural Journal***, V. 106, No. 4, July-August, 476-484 (2009)

[52] European Committee for Standardization, "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges", ***EN 1998-2:2005***, Brussels, ch2, ap.B (2005)

[53] The European Nations Eurocodes, "Earthquake-Resistant Design of Concrete Buildings According to EN1998-1 (EUROCODE 8)", http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/Fardis_2008.pdf, (**Ziyaret Tarihi 17.04.2010**)

[54] Park R., "Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing", ***Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquke Engineering***, V. 22, No. 3, September, 155-166 (1989)

[55] Cho J. Y. and Pincheira J. A., "Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Columns with Short Lap Splices Subjected to Reversed Cyclic Loads", ***ACI Structural Journal***, V. 103, No. 2, March-April, 476-484 (2006)

[56] Lehman D. E. and Moehle J. P., "Seismic Performance of Well-Confined Concrete Bridege Columns", ***PEER Report 1998/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center***, University of California, Berkeley, December, 5-163 (2000)

[57] Sezen H. and Moehle J. P., "Strength and Deformation Capacity of Reinforced Concrete Columns with Limited Ductility", ***13th World Conference on Earthquake Engineering***, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 279 (2004)

[58] Sezen H. and Moehle J. P., "Seismic Tests of Concrete Columns with Light Transverse Reinforcement", ***ACI Structural Journal***, V. 103, No. 644, November-December, 842-849 (2006)

[59] Setzler E. J. and Sezen H., "Model for the Lateral Behavior of Reinforced Concrete Columns Including Shear Deformations", ***Earthquake Spectra***, V. 24, No. 2, May, 493-511 (2008)

[60] Setzler E. J., "Modeling the Behavior of Lightly Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral Loads", MSc Thesis, ***The Ohio State University***, 27-35, 107-116 (2005)

[61] Priestley M. J. N. and Benzoni G., "Seismic Performance of Circular Columns with Low Longitudinal Reinforcement Ratios", ***ACI Structural Journal***, V. 93, No. 44, July-August, 474-484 (1996)

[62] Sezen H. and Setzler E. J., "Reinforcement Slip in Reinforced Concrete Columns", ***ACI Structural Journal***, V. 105, No. 3, May-June, 280-289 (2008)

[63] Alsiwat J. M., and Saatcioglu M., "Reinforcement Anchorage Slip under Monotonic Loading. Journal of Structural Engineering", ***Journal of Structural Engineering ASCE***, Vol.118, No.9, September, 2421-2438 (1992)

[64] Zhu L., Elwood K. J. and Haukaas T., "Classification and Seismic Safety Evaluation of Existing Reinforced Concrete Columns", ***Journal of Structural Engineering ASCE***, Vol.133, No.9, September, 1316-1330 (2007)

[65] Mander J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete", ***Journal of Structural Engineering ASCE***, Vol.114, No.8, August, 1804-1826 (1988)

[66] Saatcioglu, M. and Razvi S. R., "Strength and Ductility of Confined Concrete", ***Journal of Structural Engineering ASCE***, Vol.118, No.6, June, 1590-1607 (1992)

[67] Sakai K. and Sheikh S. A., "What Do We Know about Confinement in Reinforcement Concrete Columns? (A Critical Review of Previous Work and Code Provisions)", ***ACI Structural Journal***, V. 86, No. 2, March-April, 192-207 (1989)

[68] Sheikh S. A. and Khoury S. S., "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns", ***ACI Structural Journal***, V. 94, No. 4, July-August, 421-431 (1997)

[69] Lam, S. S. E., Wu B., Wong Y. L., Wang Z. Y., Liu Z. Q. and Li C. S., "Drift Capacity of Rectangular Reinforced Concrete Columns with Low Lateral Confinement and High-Axial Load", ***Journal of Structural Engineering ASCE***, Vol. 129, No.6, June, 733-742 (2003)

[70] Sheikh S. A. and Khoury S. S., "Confined Concrete Columns with Stubs", ***ACI Structural Journal***, V. 90, No. 4, July-August, 414-431 (1993)

[71] Priestley, M. J. N., Verma R. and Xiao Y.,"Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns", ***Journal of Structural Engineering ASCE***, Vol.120, No.8, August, 2310-2329 (1994)

[72] Zahn F. A., Park R. and Priestley M. J. N., "Design of Reinforced Concrete Bridge Colunms for Strength and Ductility", ***University of Canterbury, Research Report 86-7***, pg. 20-22 (1986)

[73] Jaradat O. A., McLean D. I. and Marsh M. L., "Performance of Existing Bridge Columns under Cyclic Loading-Part 2: Experimental Results and Observed Behavior", ***ACI Structural Journal***, V. 95, No. 6, November-December, 695-704 (1998)

[74] Ranf R. T., Nelson J. M., Price Z., Eberhard M. O. and Stanton J F., "Damage Accumulation in Lightly Confined Reinforced Concrete Bridge Columns", ***PEER Report 2005/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center***, University of California, Berkeley, April, 21-97 (2006)

[75] Maeda1 M., Nakano Y. and Lee K. S., "Post-Earthquake Damage Evaluation for R/C Buildings", ***CTBUH Conference***, October 10-13, Seoul, Korea, 371-377 (2004)

[76] Lukose K., Gergely P. and White R. N., "Behavior of Reinforced Concrete Lapped Splices for Inelastic Cyclic Loading", ***ACI Structural Journal***, V. 79, No. 5, September-October, 355-365 (1982)

[77] Paulay T., "Lapped Splices in Earthquake-Resisting Columns", ***ACI Structural Journal***, V. 79, No. 6, November-December, 458-469 (1982)

[78] Ichinose, T., "Lapped Splitting Bond Failure of Columns under Seismic Action", ***ACI Structural Journal*** , V. 92, No. 5, September-October, 535-542 (1995)

[79] Aboutaha, R., S., Engelhardt, M., D., Jirsa, J., O., Kreger, M., E., "Experimental Investigation of Lap Splice Failure in Damaged Concrete Columns", ***ACI Structural Journal*** , V. 96, No. 2, March-April, pg. 297-306 (1999)

[80]. Carins, J., Arthur, P., D., "Strength of Lapped Splices in Reinforced Concrete Columns", ***ACI Journal*** , Title No. 76-14, February, pg. 277-296 (1979)

[81]. Panahshahi, N., White, R., N., Gergely, P., "Reinforced Concrete Compression Lap Splices under Inelastic Cyclic Loading", ***ACI Structural Journal*** , V. 89, No. 2, March-April, 164-175 (1992)

[82]. Saatçioğlu, M., Yalçın, C., "External Prestressing Concrete Columns for Improved Seismic Shear Resistance", ***ASCE, Journal of Structural Engineering***, V. 129, No. 8, August, 1057-1070 (2003)

[83]. Guo, Z., X., Zhang, J., Yun, Z., "Experimental Study on a New Retrofitted Scheme For Seismically Deficient RC Columns", ***4th International Conference on Earthquake Engineering***, Paper No. 109, Taipei, Taiwan, October, (2006)

[84]. Chapman, J. R., Driver R. G., "Behaviour of Collared Concrete Columns Under Concentric or Eccentric Loads", ***Structural Engineering Report No. 263***, University of Alberta, January, (2006)

[85]. Tezcan A., "Kolon Sarılma Bölgelerinin CFRP Kompozitler ile Güçlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi***, 24-110 (2004)

[86]. Yalcin C., Kaya O., Sinangil M., "Seismic Retrofitting of R/C Columns Having Plain Rebars Using CFRP Sheets for Improved Strength and Ductility", ***Construction and Building Materials***, 22, 295–307 (2008)

[87]. Mortazavi, A. A., Pilakoutas, K., Son, K. S., "RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP", ***Construction and Building Materials***, 17, 491-497, (2003)

[88]. Yan, Z., Pantelides, C. P., Reaveley, L. D., "Shape Modification with Expansive Cement Concrete for Confinement with FRP Composites", ***ACI, SP230-59: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures***.

[89]. Saadatmanesh, H.,Ehsani, M. R., Jin, L., "Repair of Earthquake-Damaged RC Columns with FRP Wraps", ***ACI Structural Journal*** , V. 94, No. 2, March-April, 206-215 (1997)

[90]. Nesheli, K. N., Meguro, K., "External Prestressing Concrete Columns with Fibrous", ***ACI, SP230-92: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures***

[91]. Nesheli, K. N., Meguro, K., "Seismic Retrofitting Of Earthquake-Damaged Concrete Columns By Lateral Pre-Tensioning Of FRP Belts", Paper No. 841, ***Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering***, San Francisco, California, USA, April, 18-22 (2006)

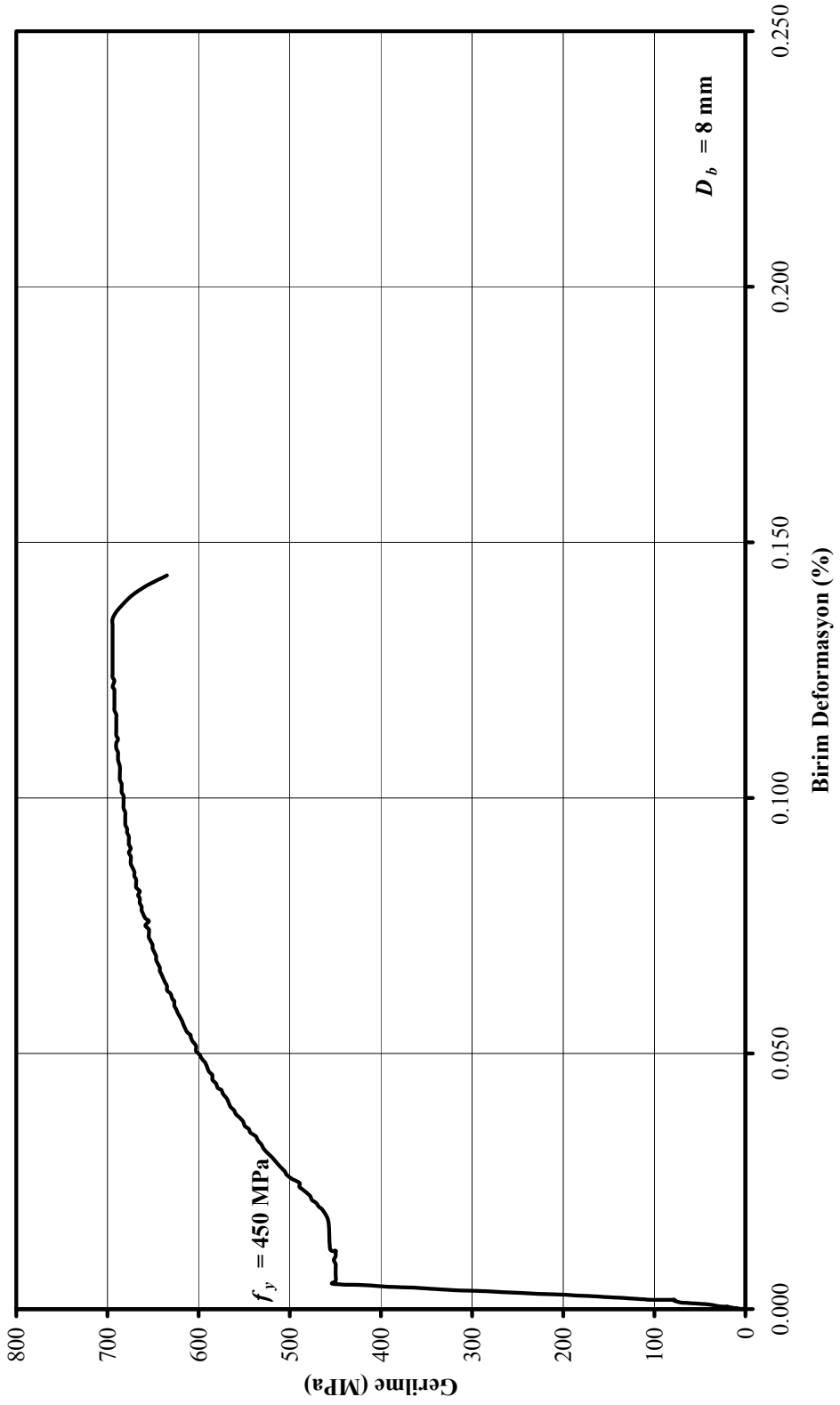
[92] ACI Innovation Task Group 1 and Collaborators, "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing", ***ACI T1.1-01, American Concrete Institute***, Michigan (2001)

[93] Chopra A. K., "Dynamics of Structures", ***Pearson Education Inc.***, Third Edition, New Jersey, 99-105 (2007)

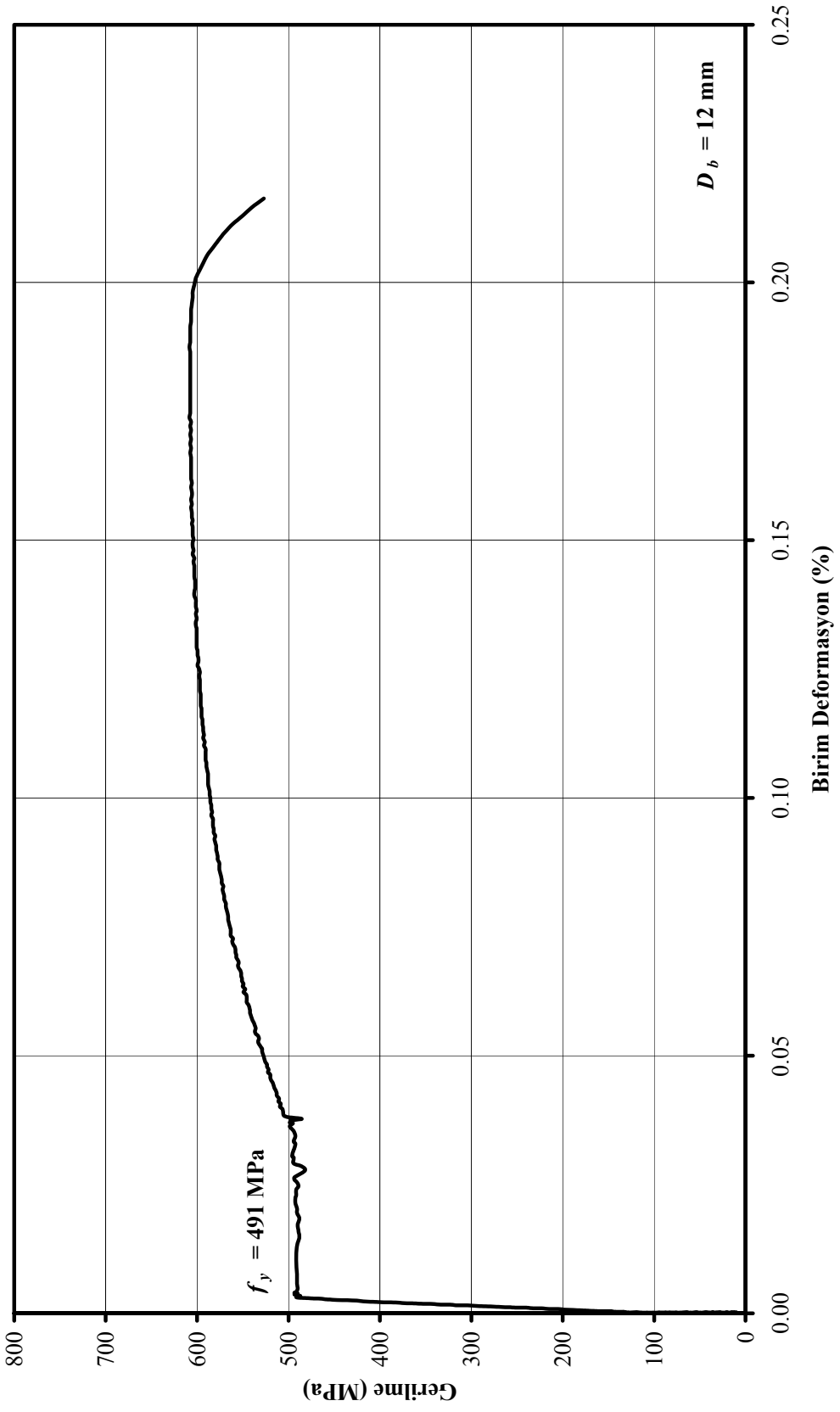
EKLER

Ek A : Kullanılan donatı çubuklarına ait gerilme-birim deformasyon grafikleri
Ek B : Deney yükleme protokolünün, her bir adımında elde edilen yatay yük-yatay deplasman grafikleri
Ek C : Hasar durumu çizimleri ve fotoğrafları
Ek D : Moment-dönme grafikleri
Ek E : Boy donatı-birim deformasyon grafikleri

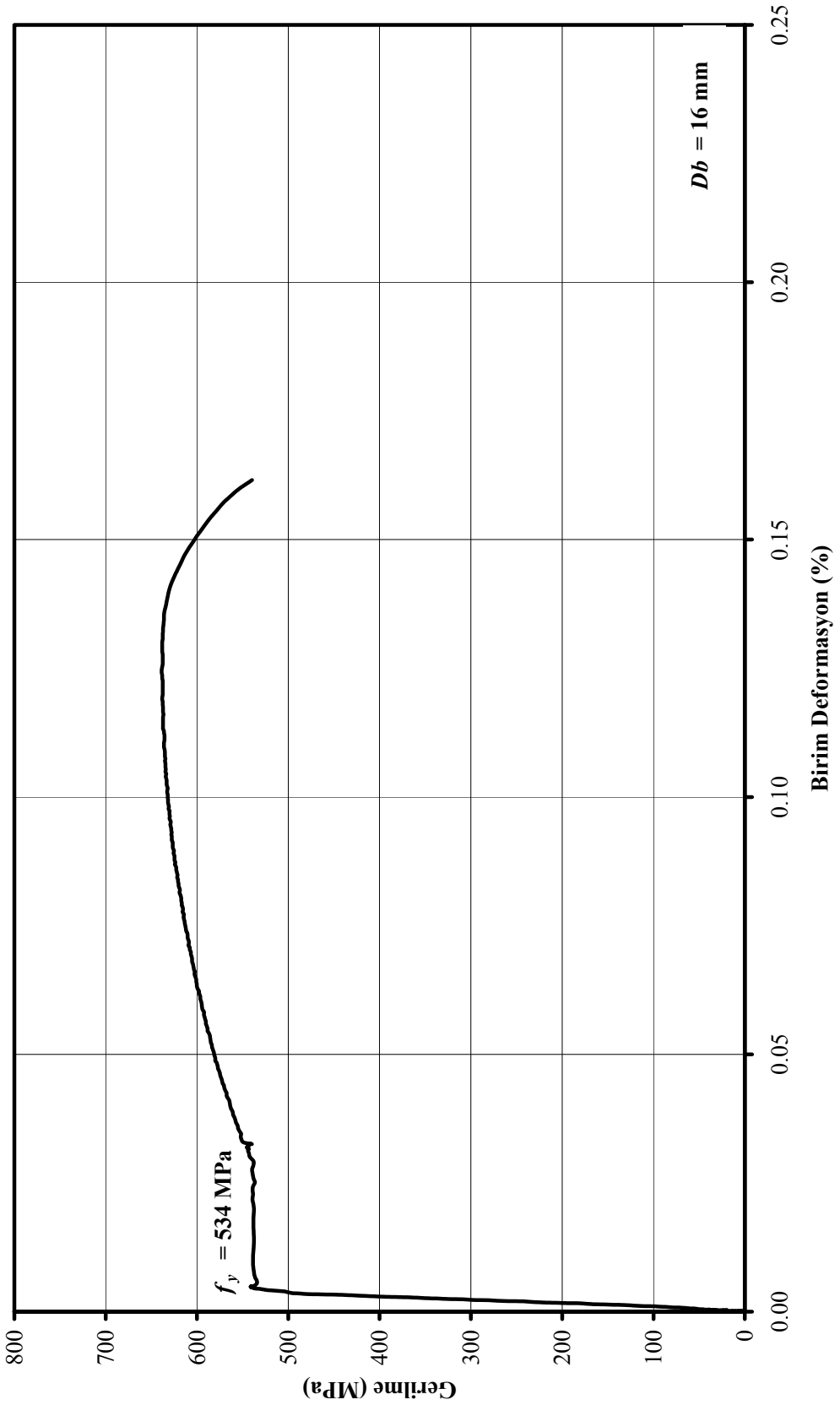
Ek A



Şekil A.1: Donatı çubuğu gerilme-birim deformasyon grafiği, D_b = 8 mm

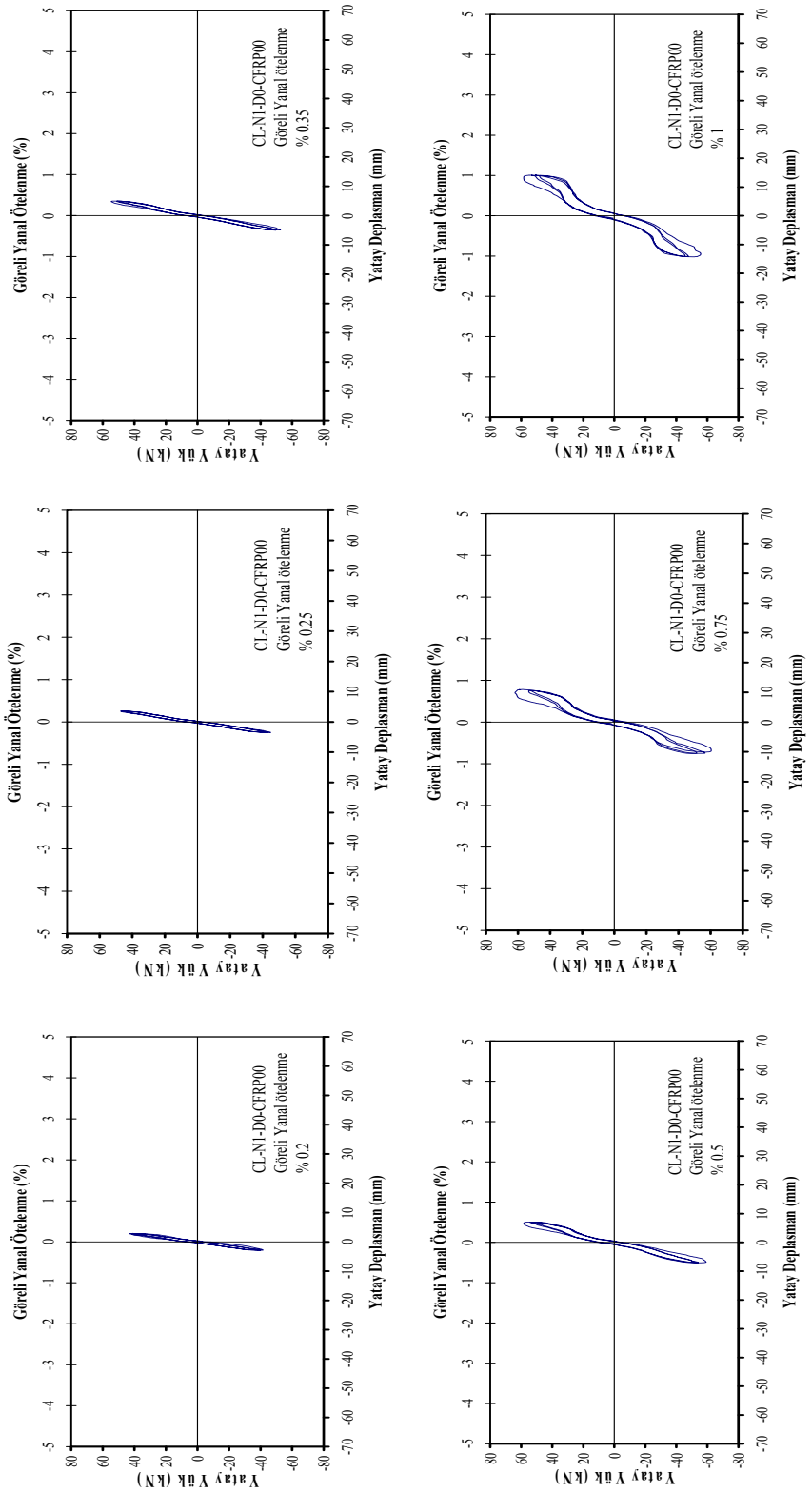


Şekil A.2: Donatı çubuğu gerilme-birim deformasyon grafiği, D_b = 12 mm

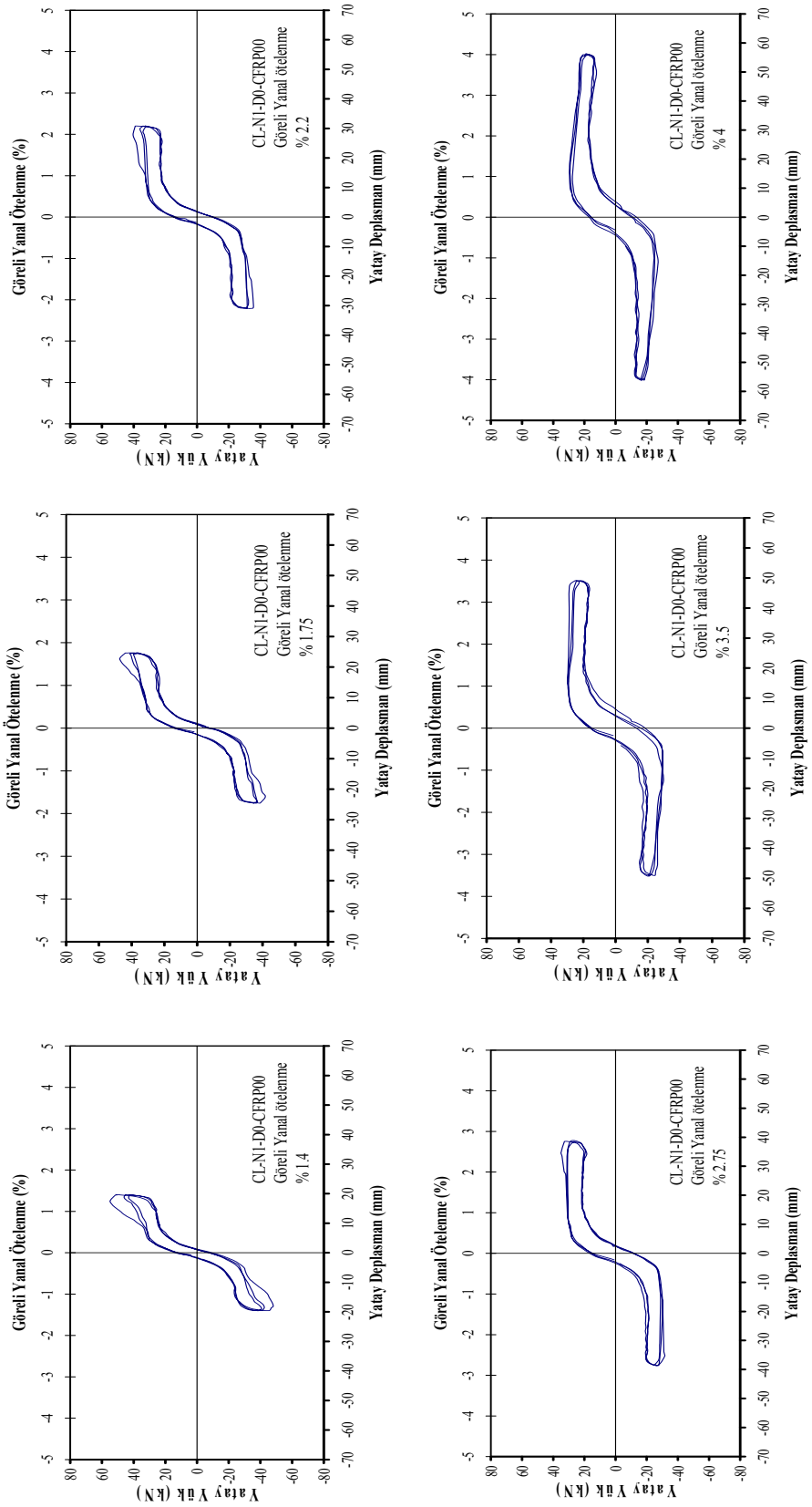


Şekil A.3: Donatı çubuğu gerilme-birim deformasyon grafiği, D_b = 16 mm

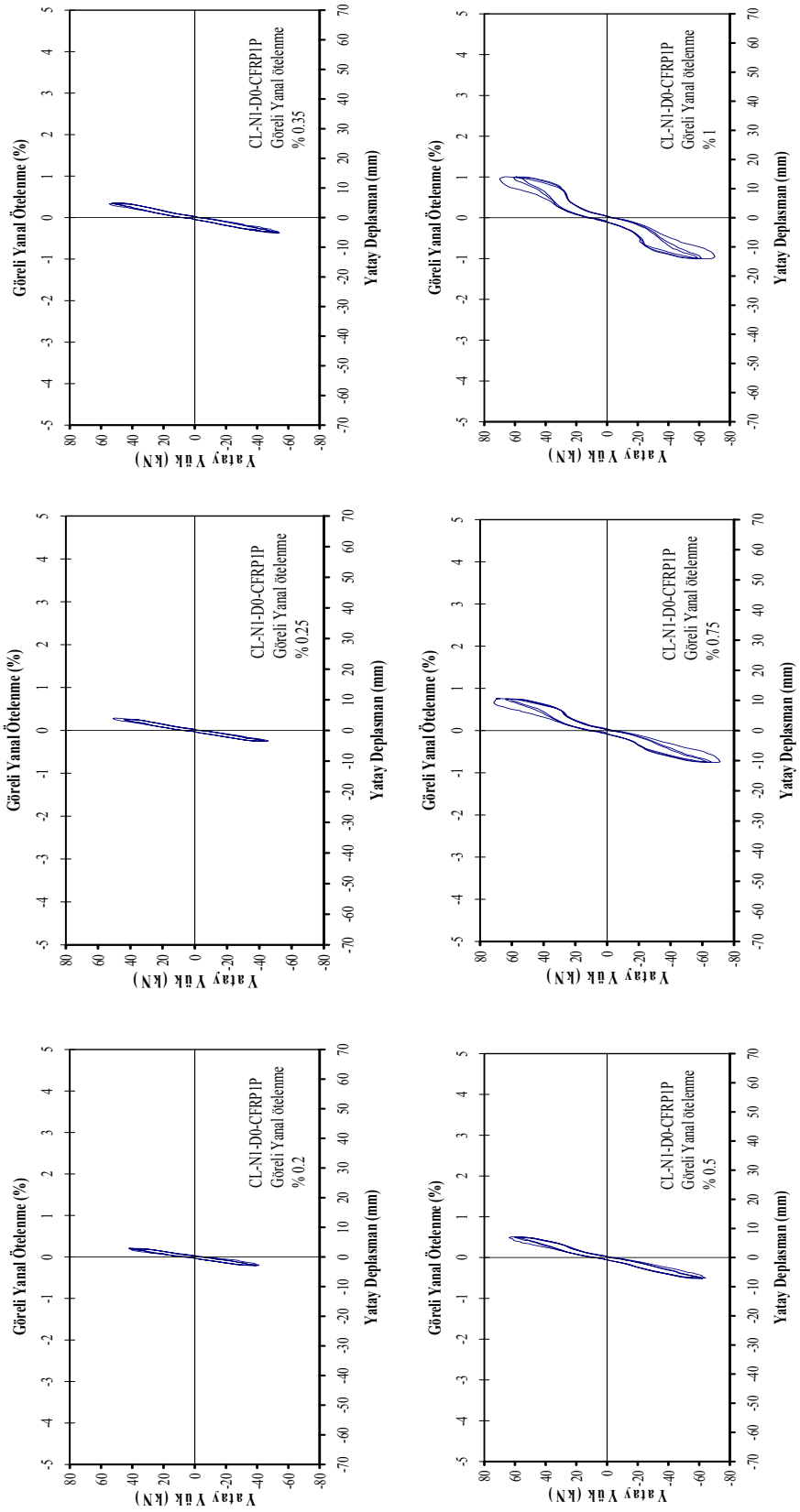
Ek B



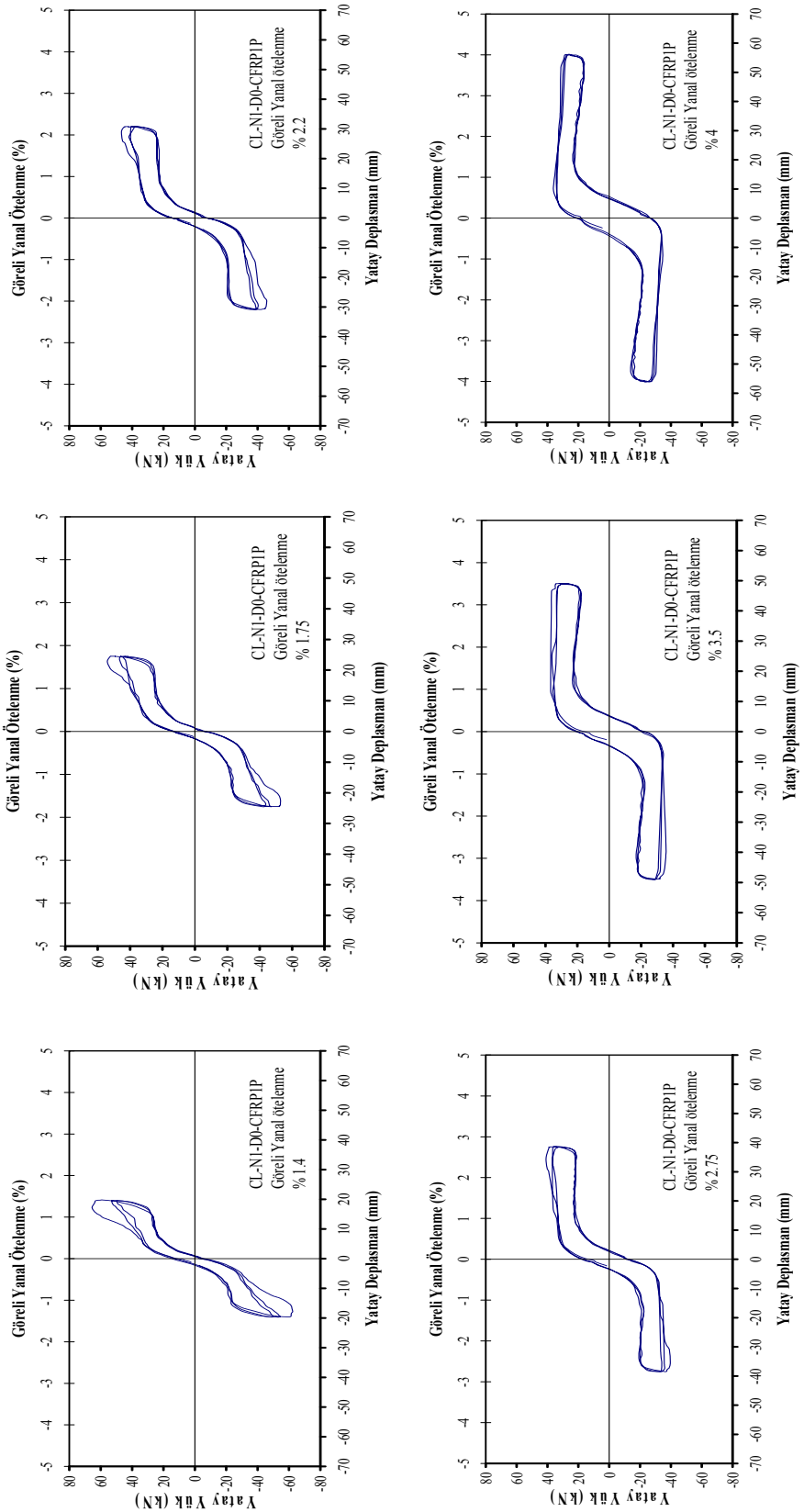
Şekil B.1: CL-N1-D0-CFRP00 numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



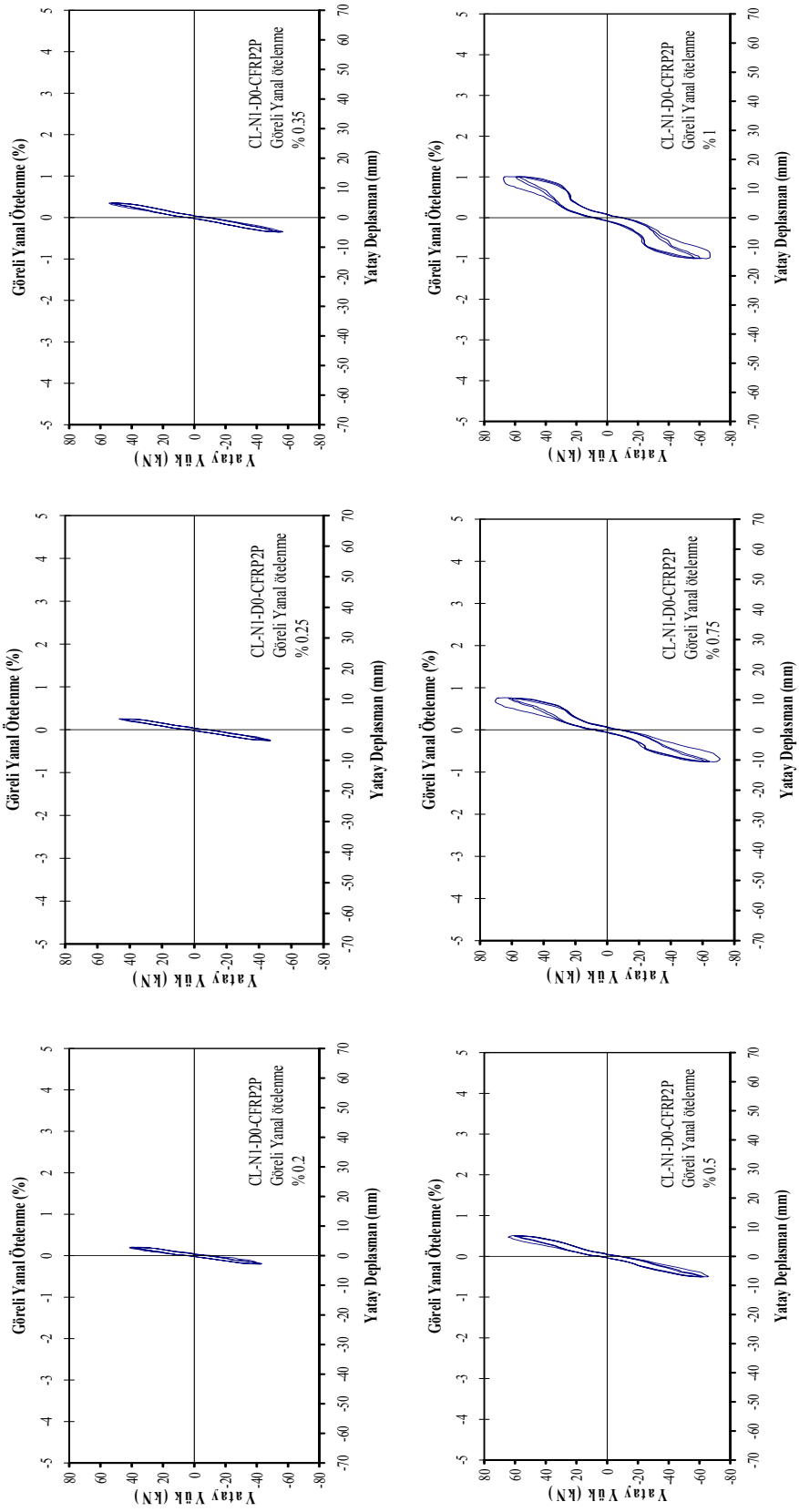
Şekil B.1: CL-N1-D0-CFRP00 numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



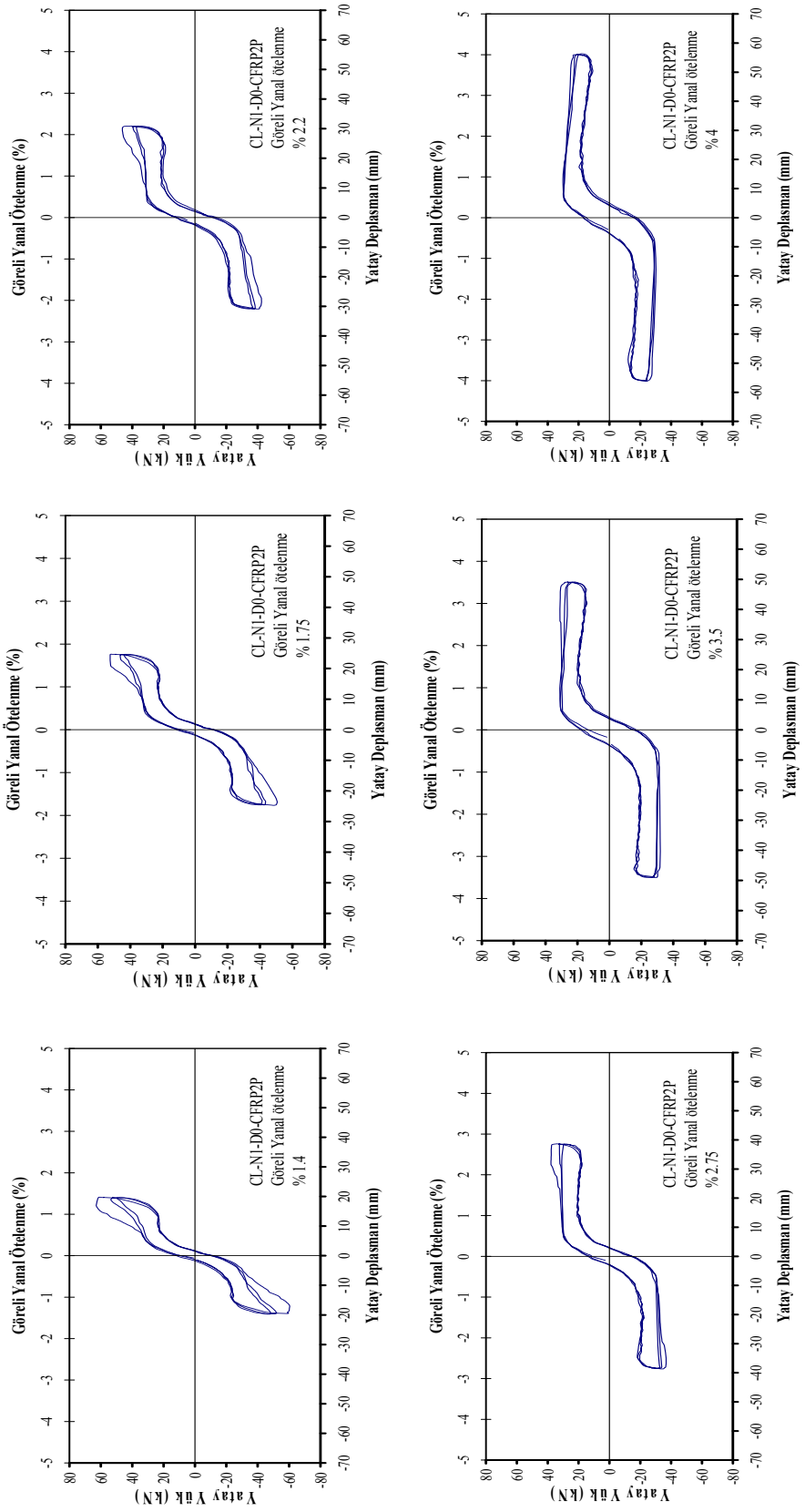
Şekil B.2: CL-N1-D0-CFRP1P numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



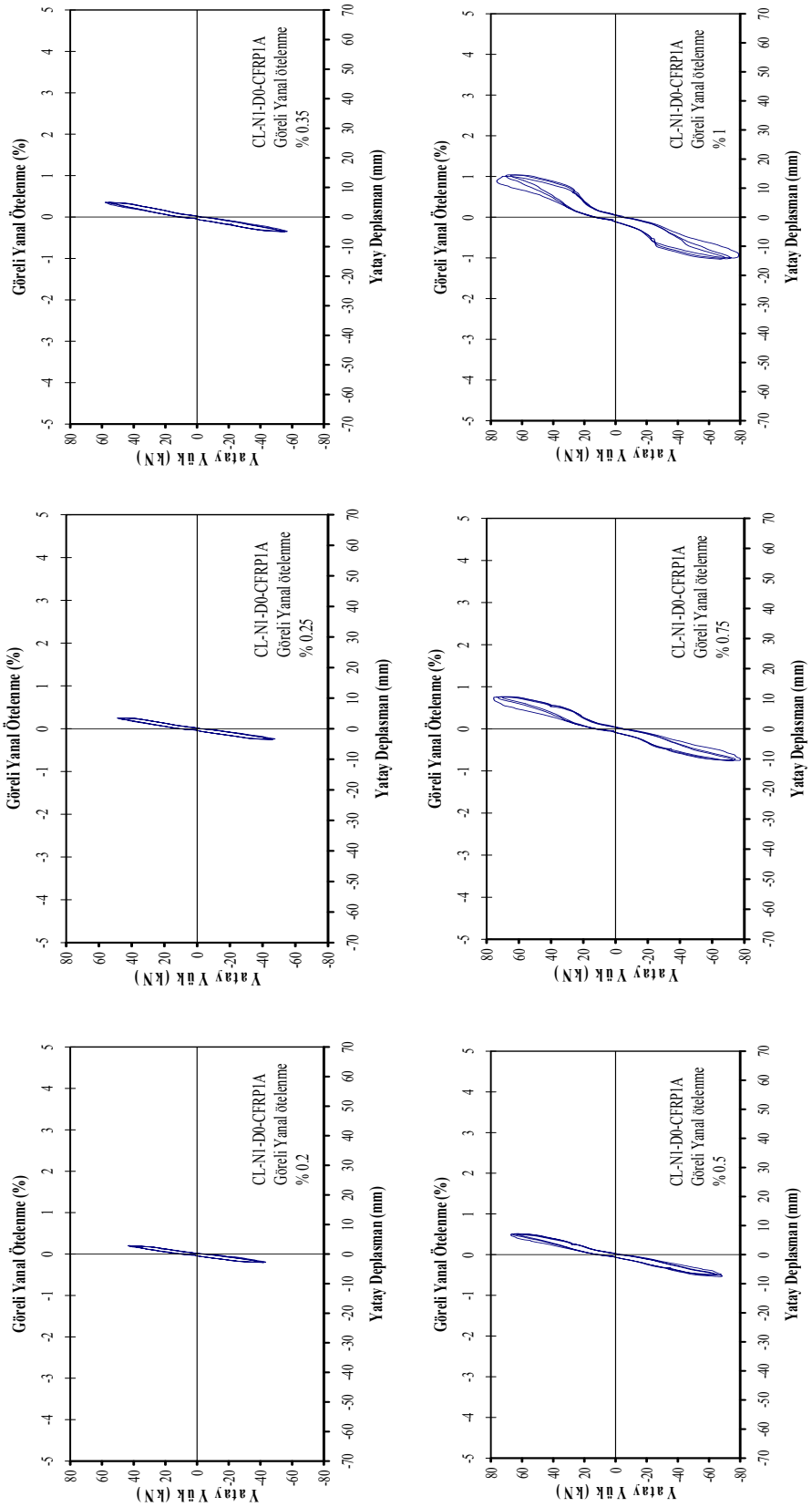
Şekil B.2: CL-N1-D0-CFRP1P numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



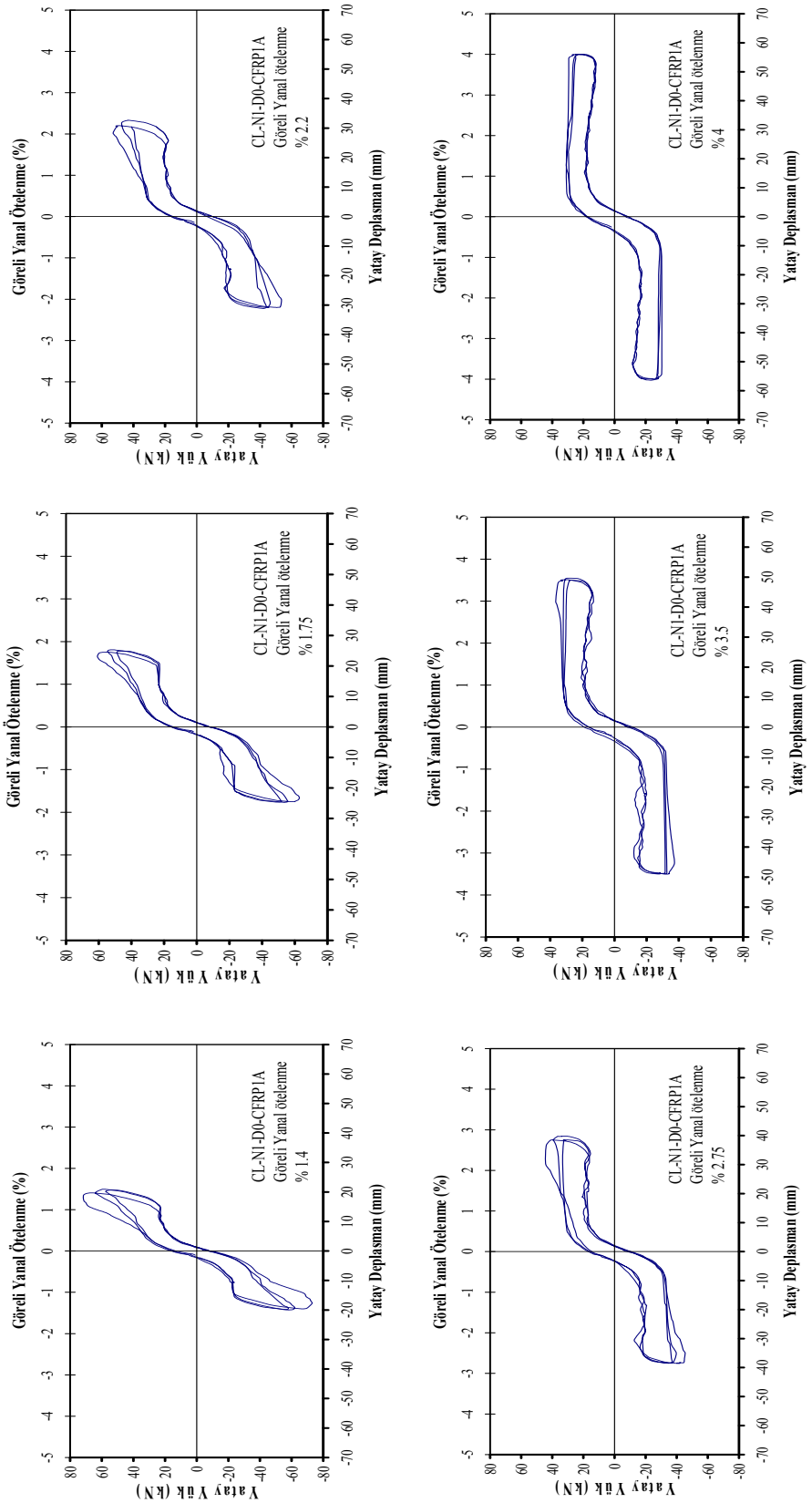
Şekil B.3: CL-N1-D0-CFRP2P numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



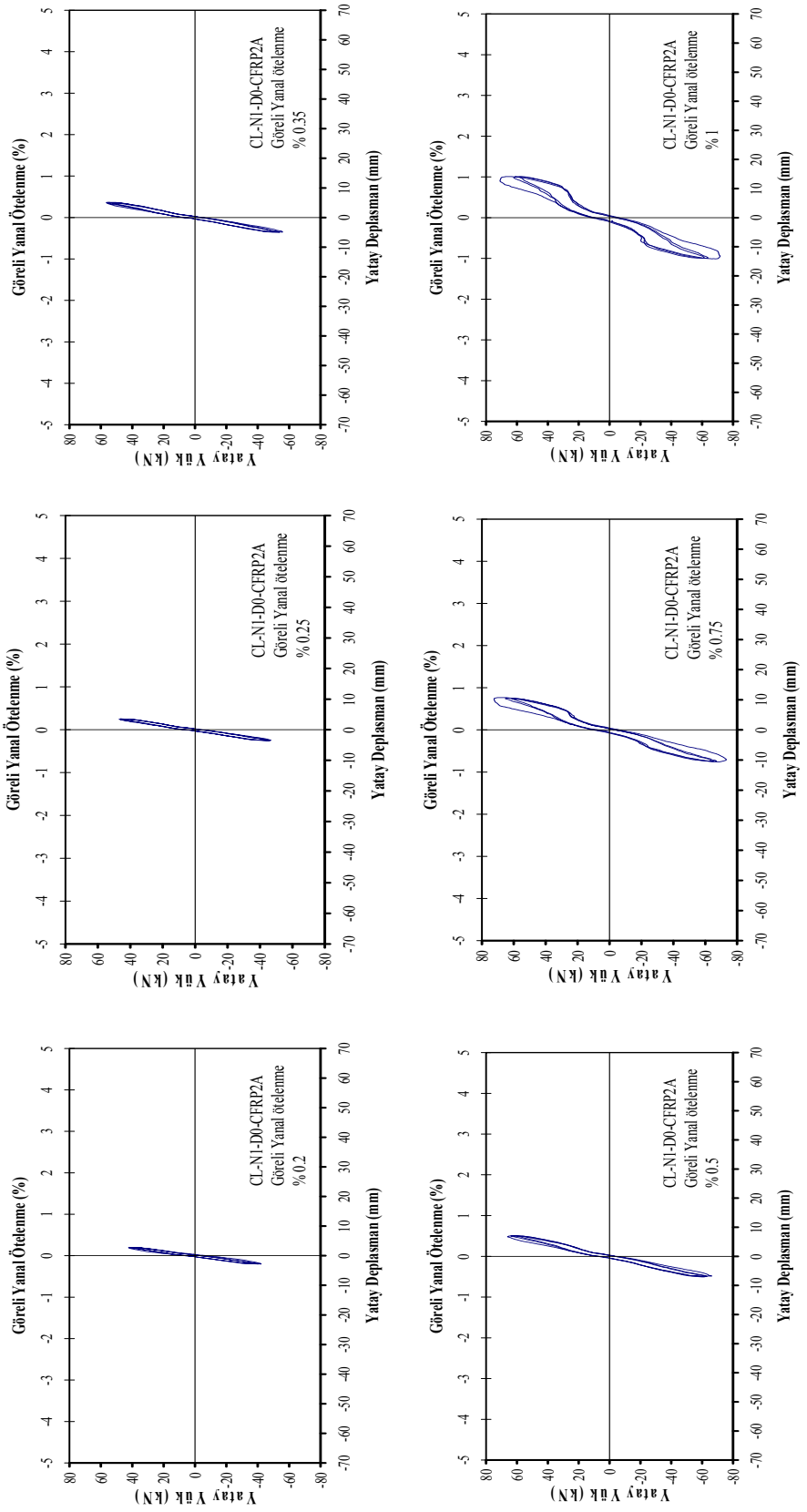
Şekil B.3: CL-N1-D0-CFRP2P numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



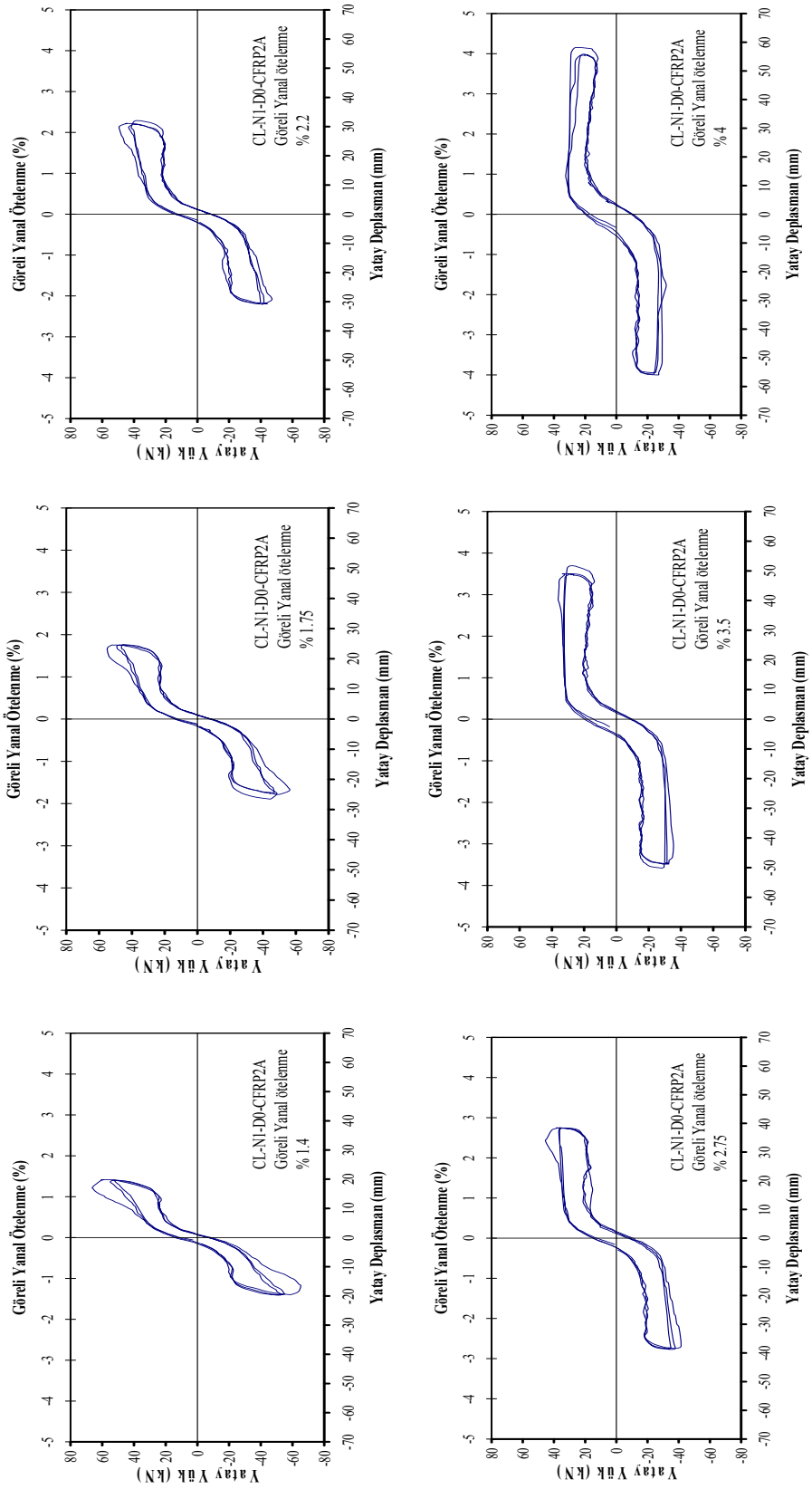
Şekil B.4: CL-N1-D0-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



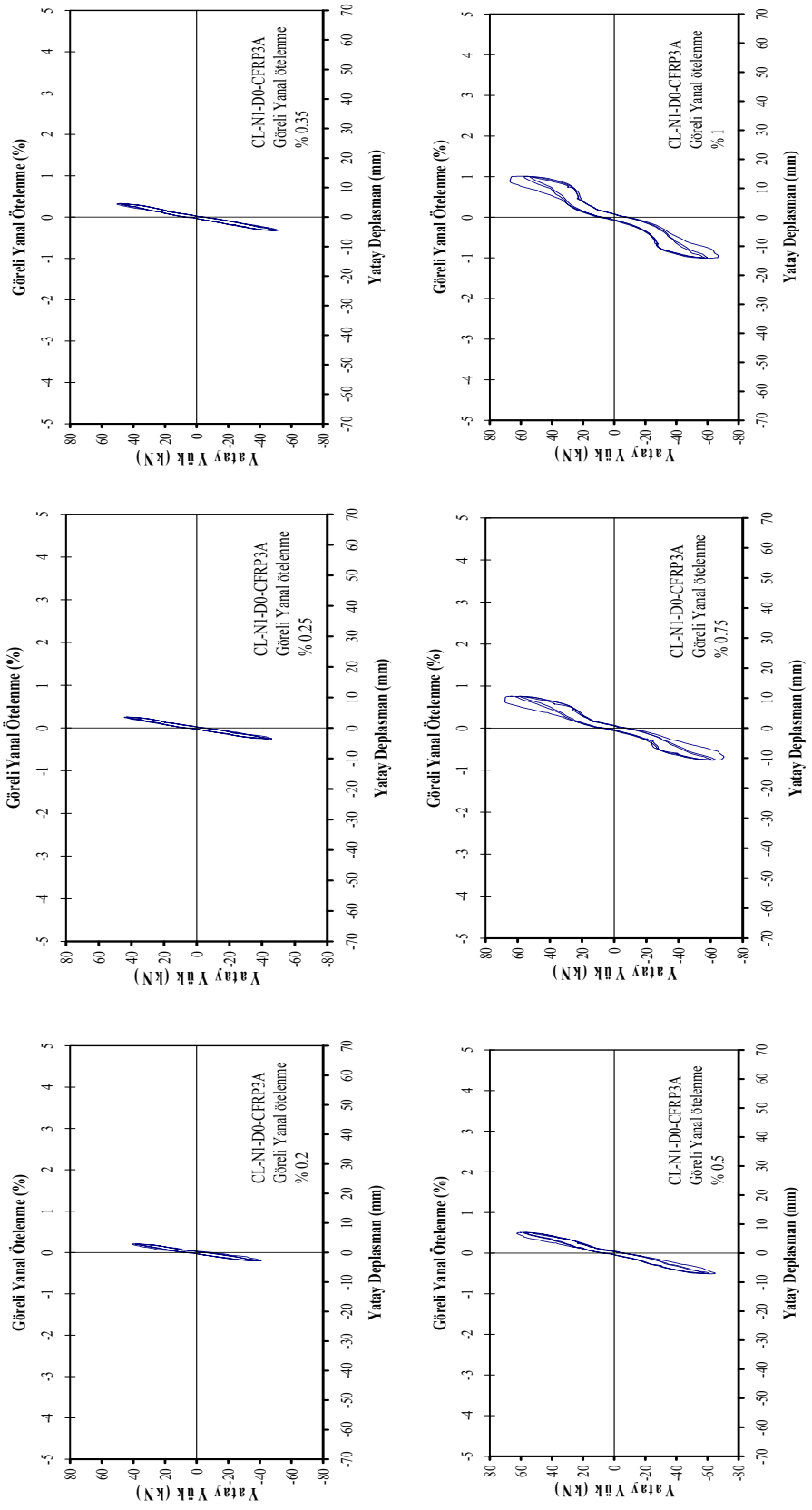
Şekil B.4: CL-N1-D0-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



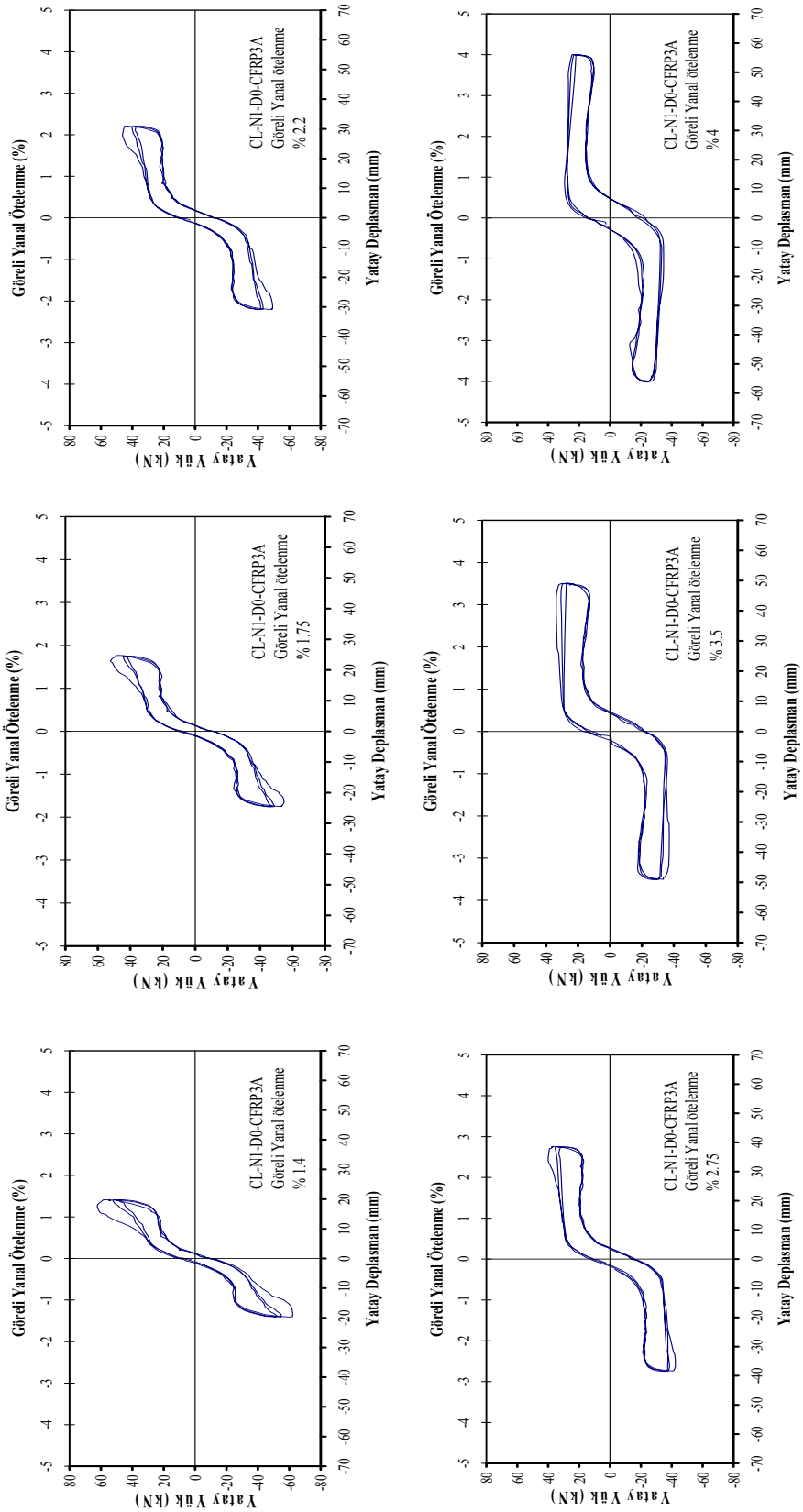
Şekil B.5: CL-N1-D0-CFRP2A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



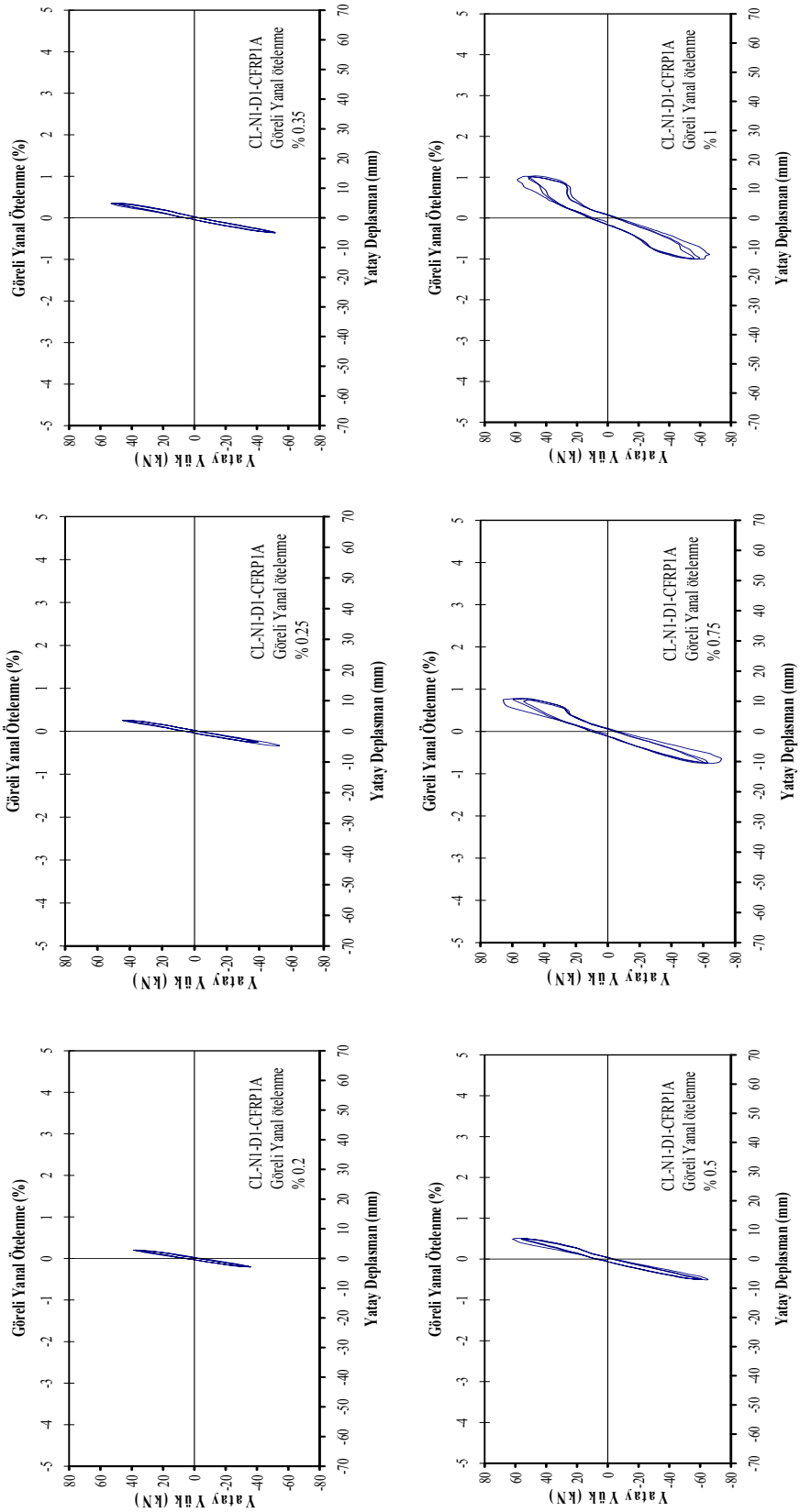
Şekil B.5: CL-N1-D0-CFRP2A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



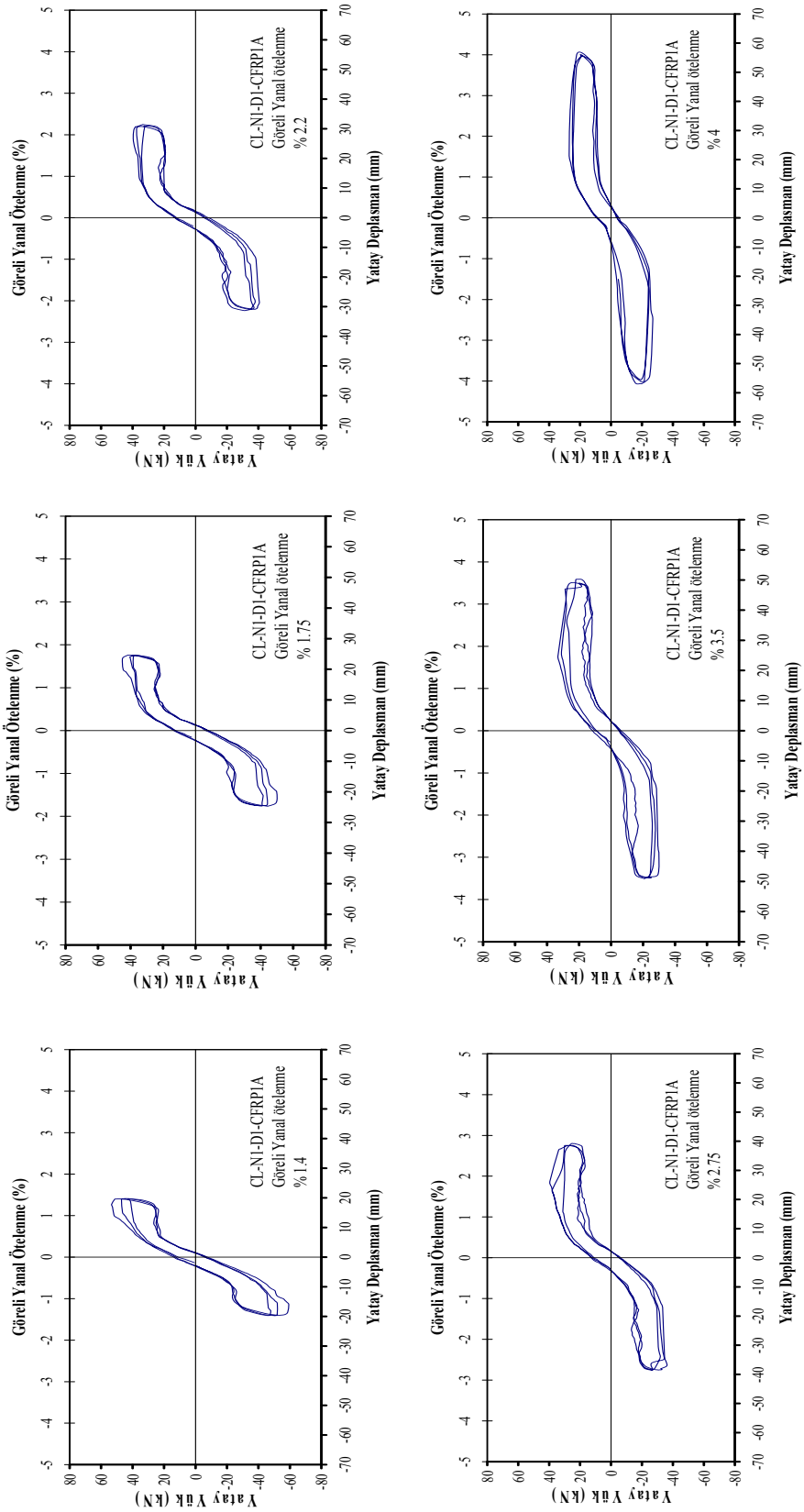
Şekil B.6: CL-N1-D0-CFRP3A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



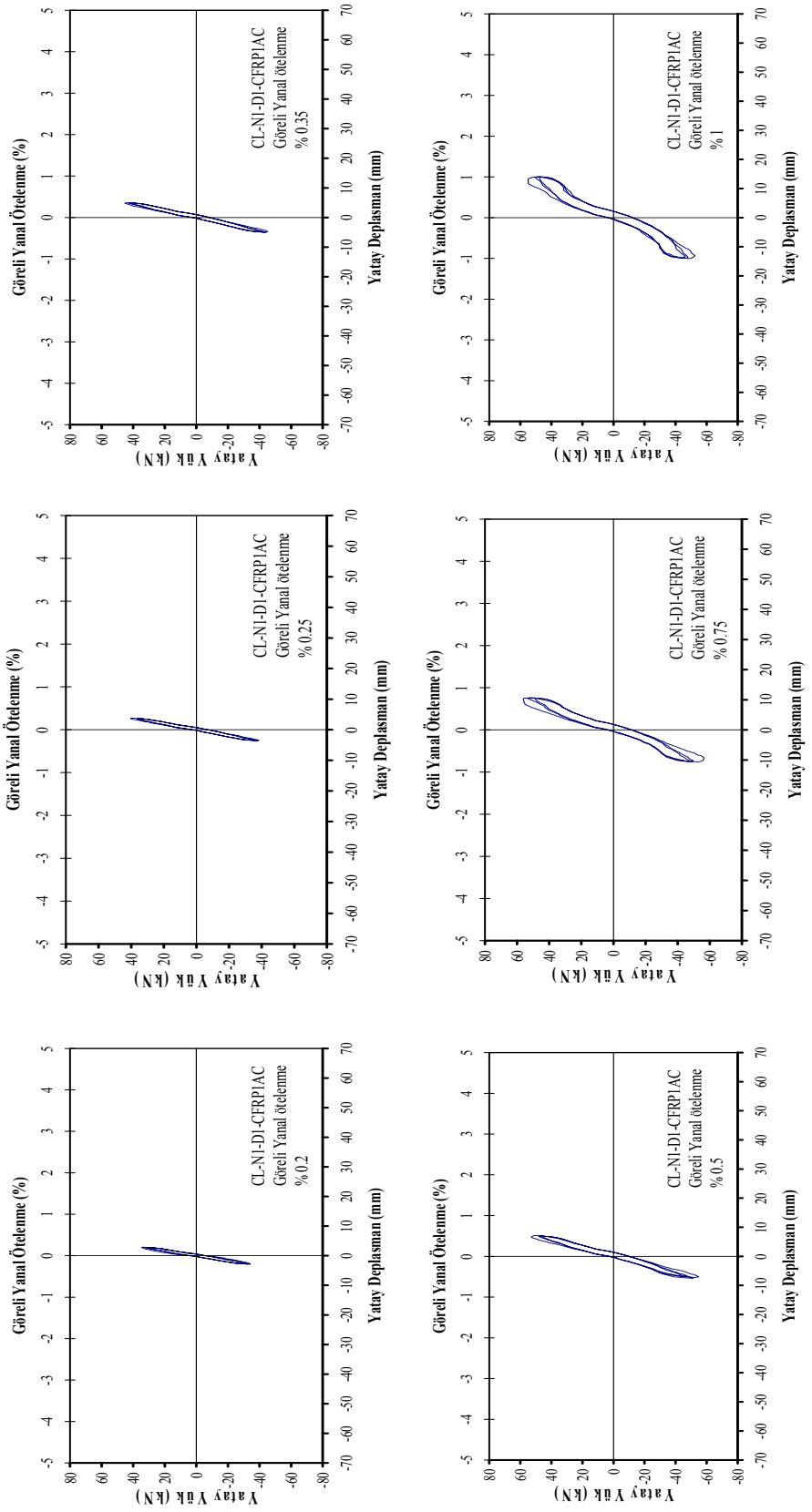
Şekil B.6: CL-N1-D0-CFRP3A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



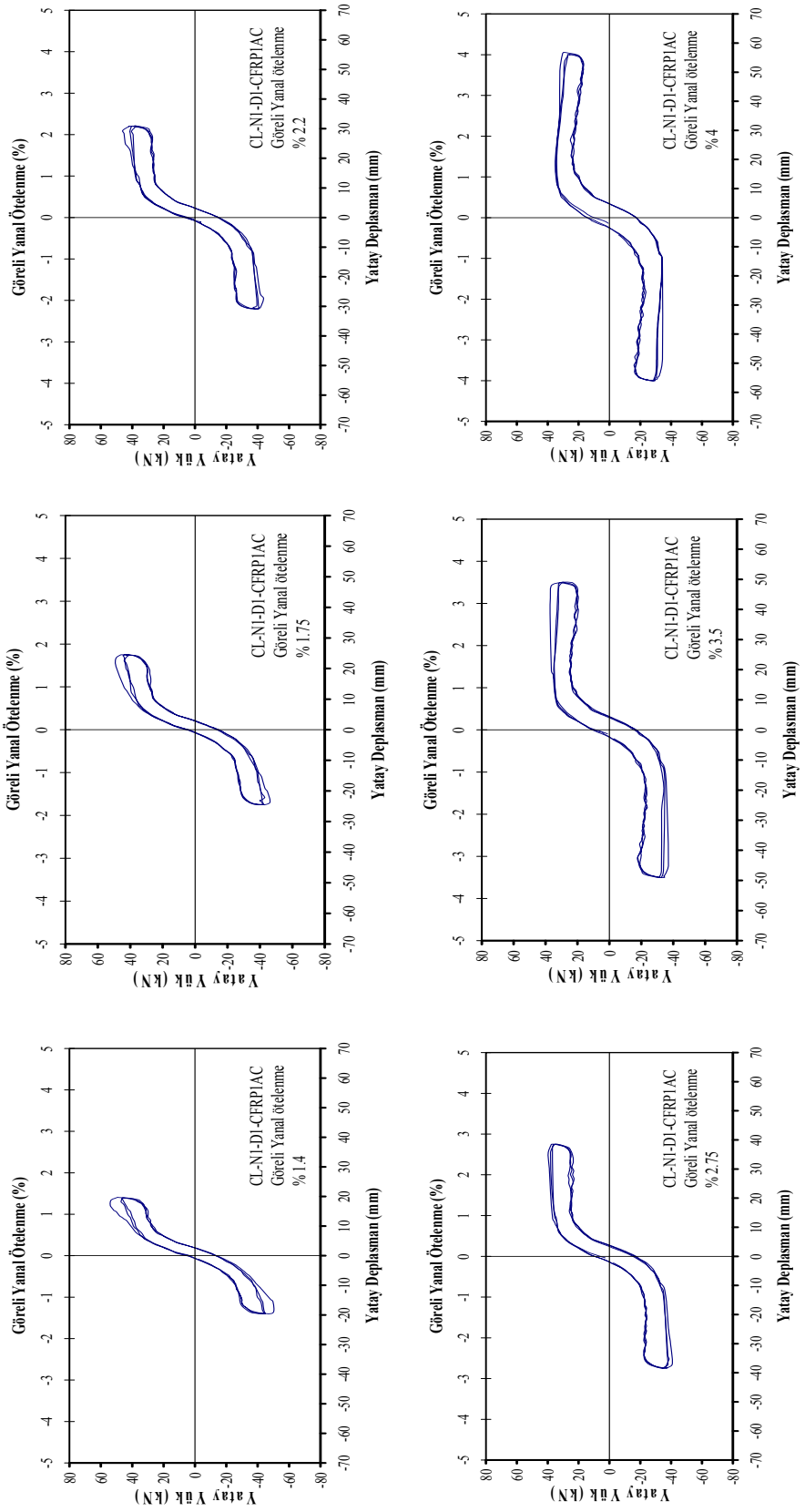
Şekil B.7: CL-N1-D1-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



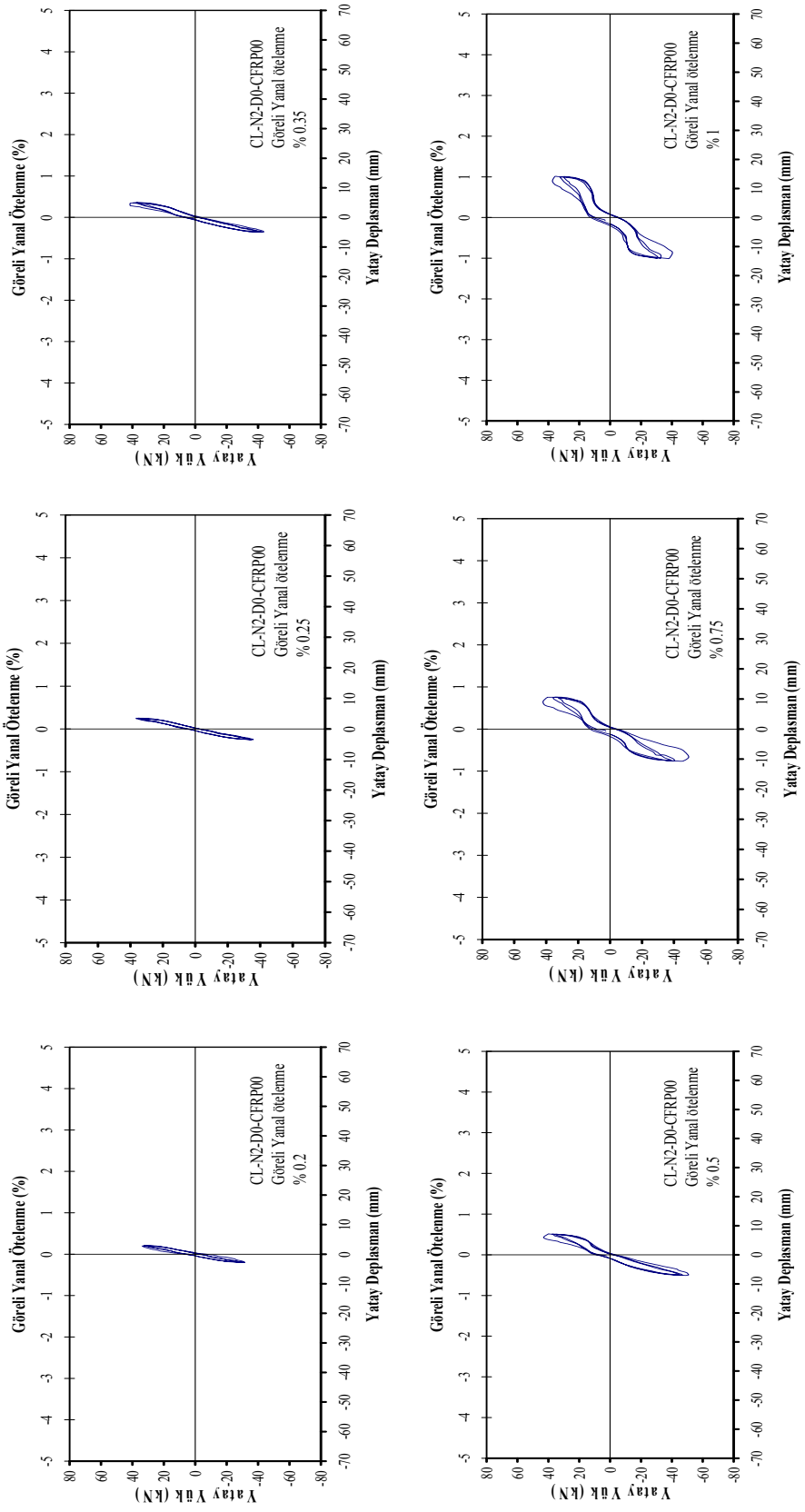
Şekil B.7: CL-N1-D1-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



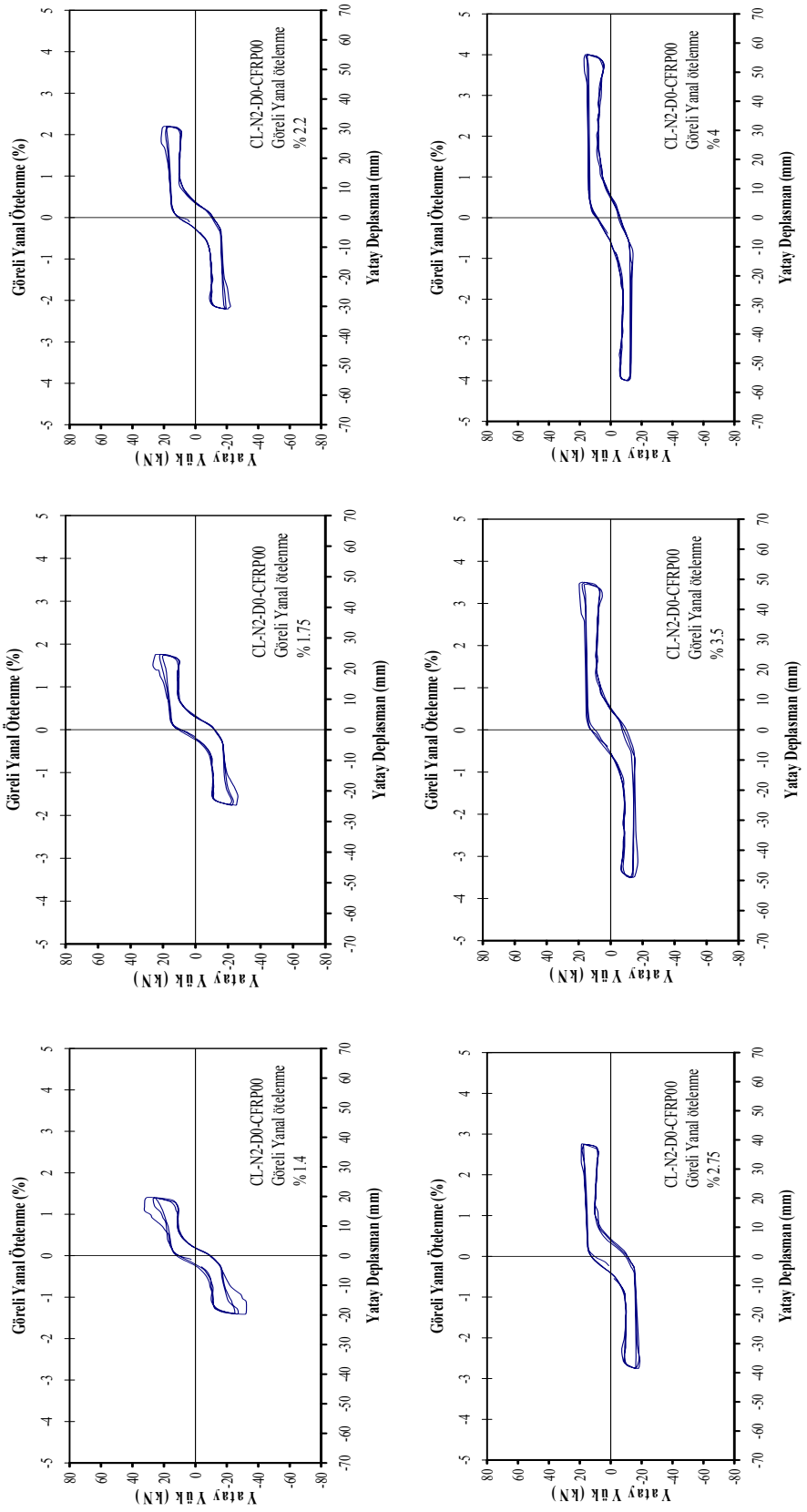
Şekil B.8: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



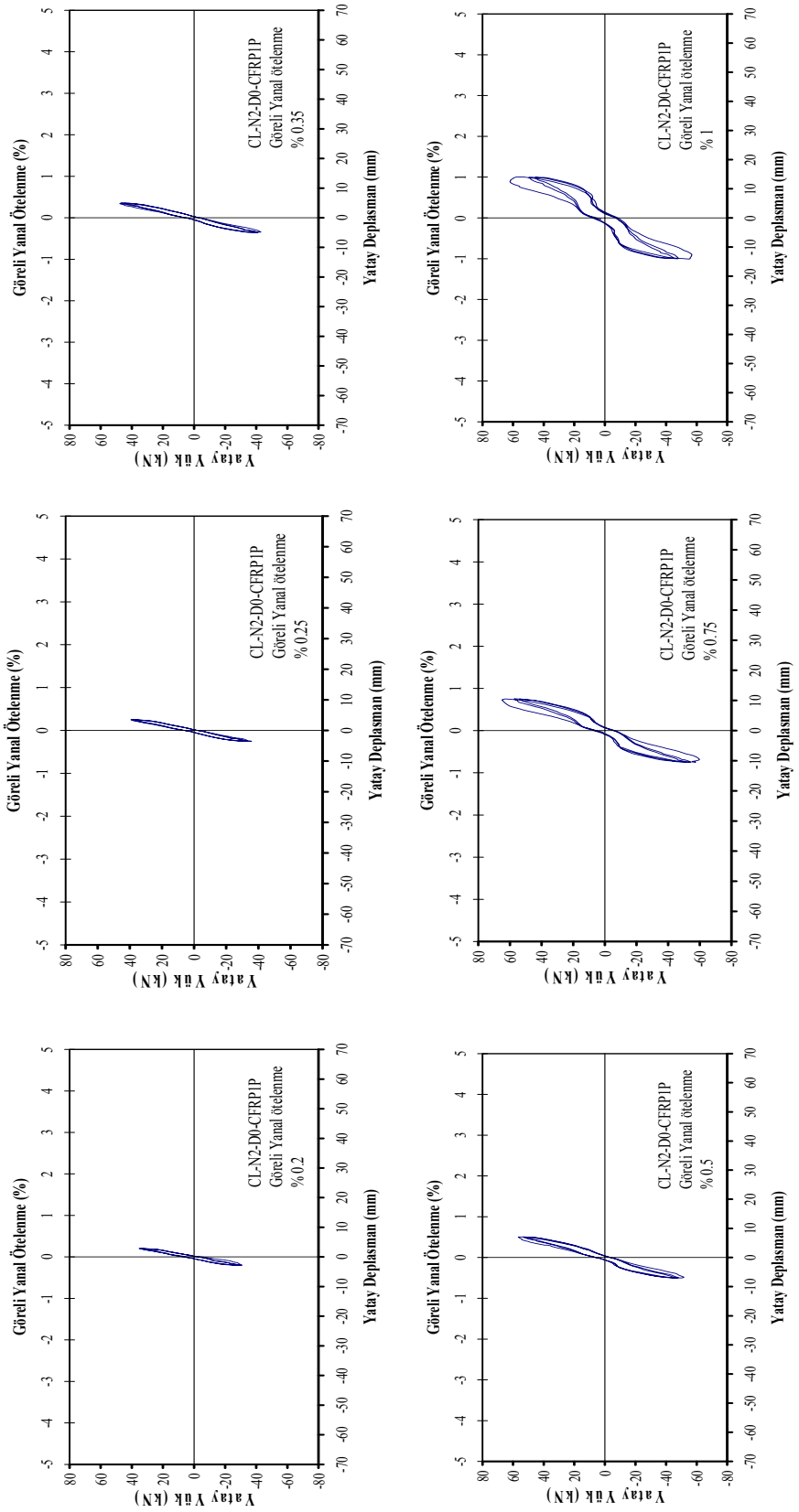
Şekil B.8: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



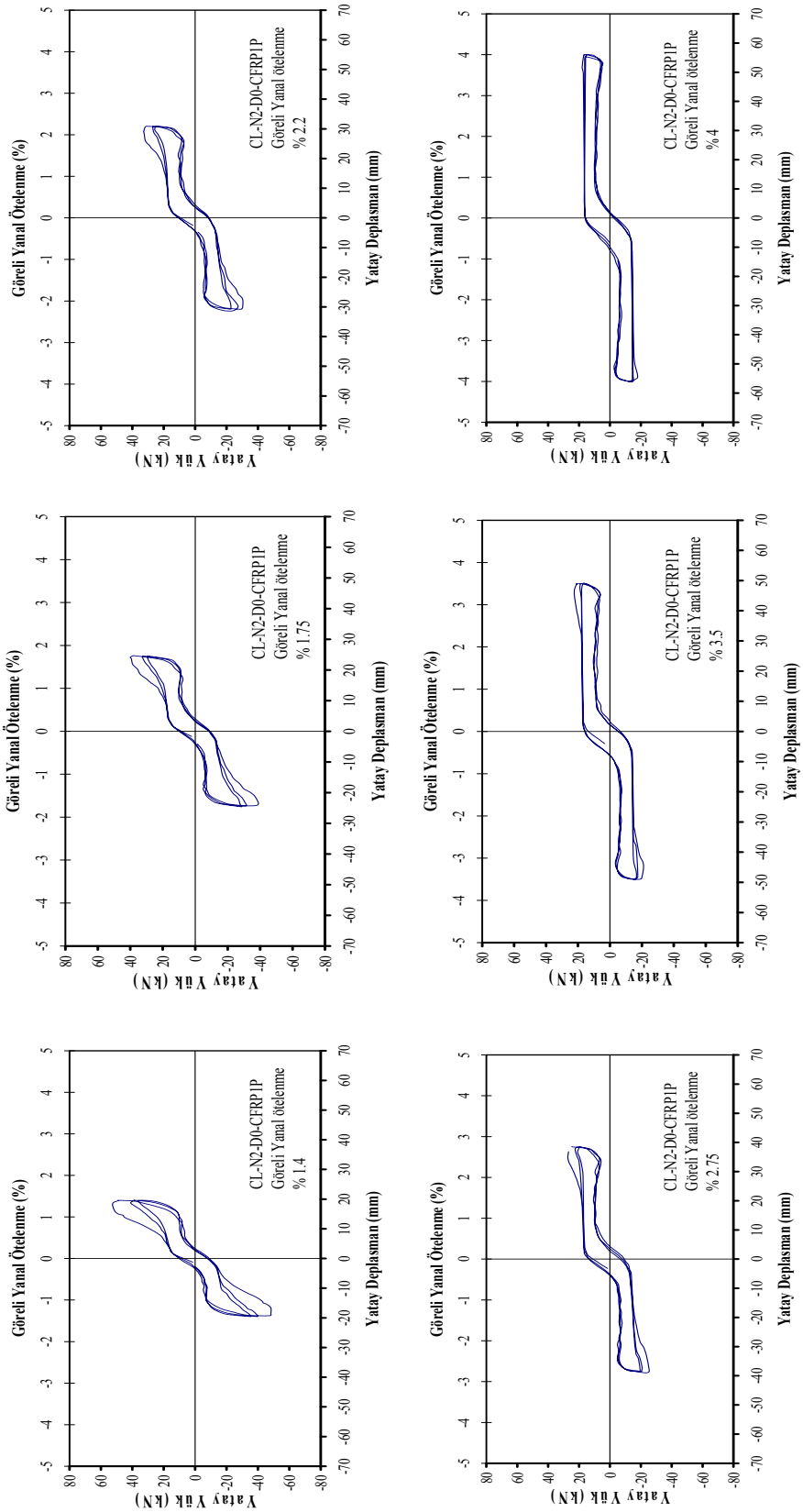
Şekil B.9: CL-N2-D0-CFRP00 numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



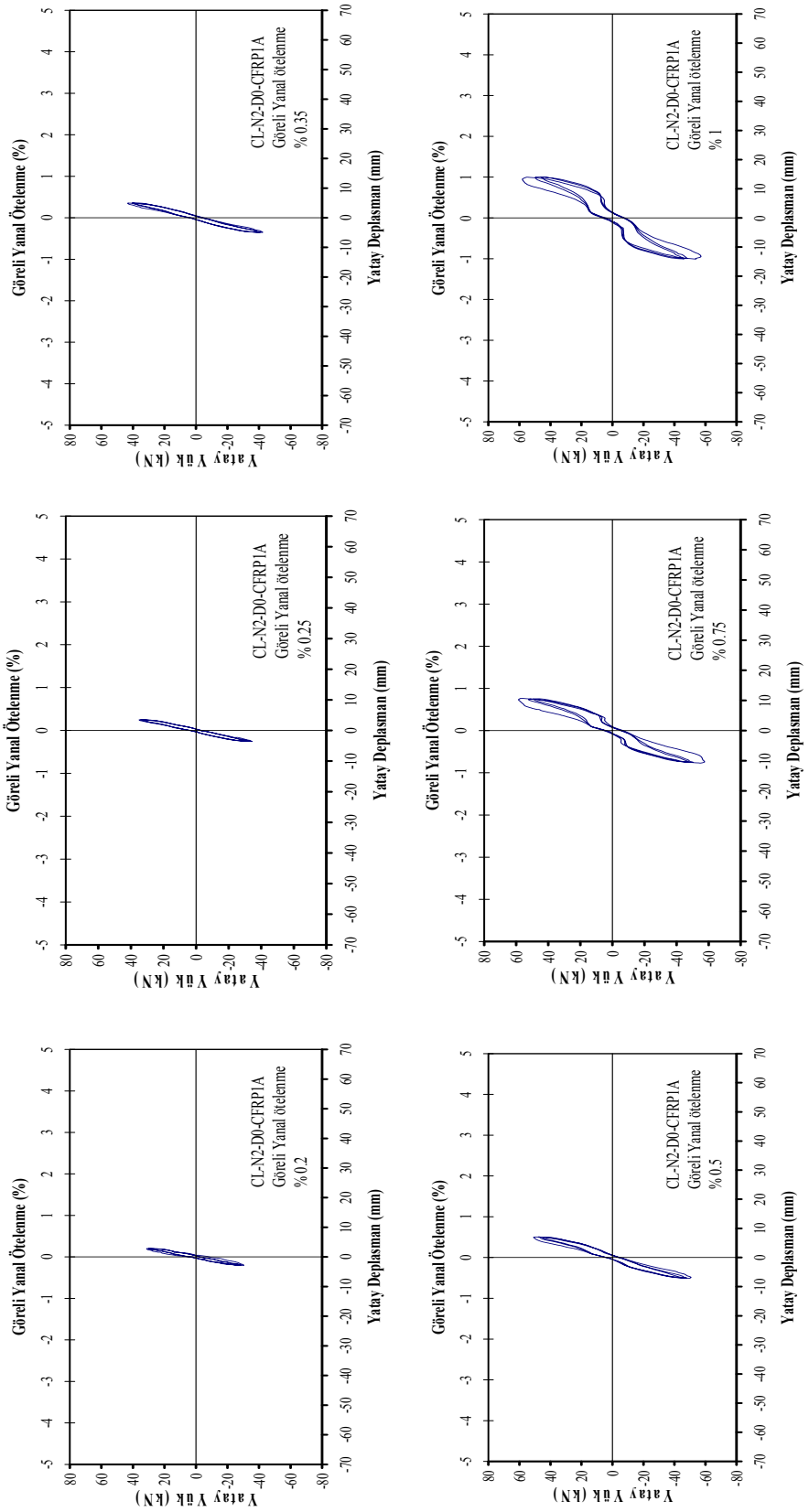
Şekil B.9: CL-N2-D0-CFRP00 numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



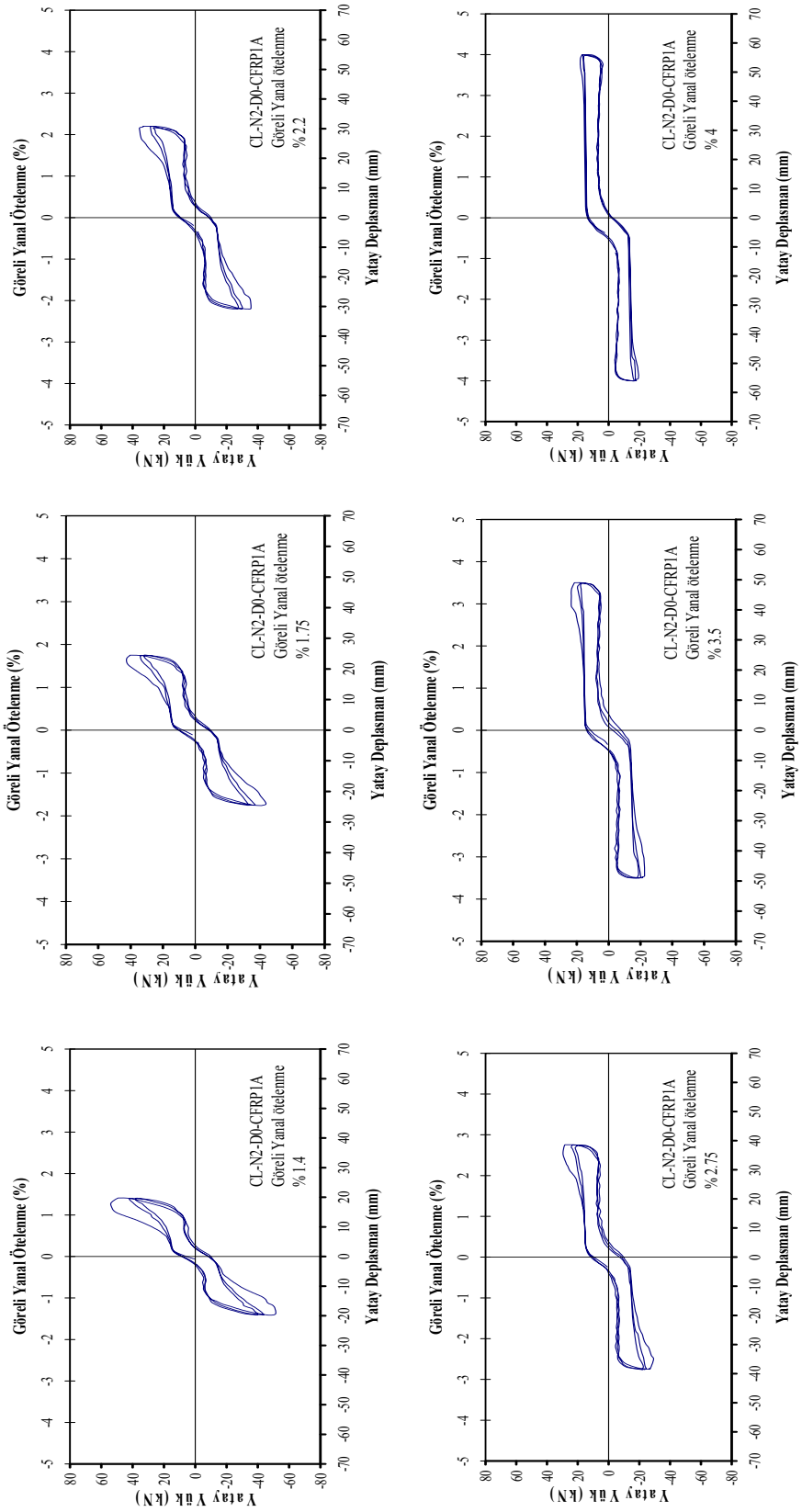
Şekil B.10: CL-N2-D0-CFRP1P numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



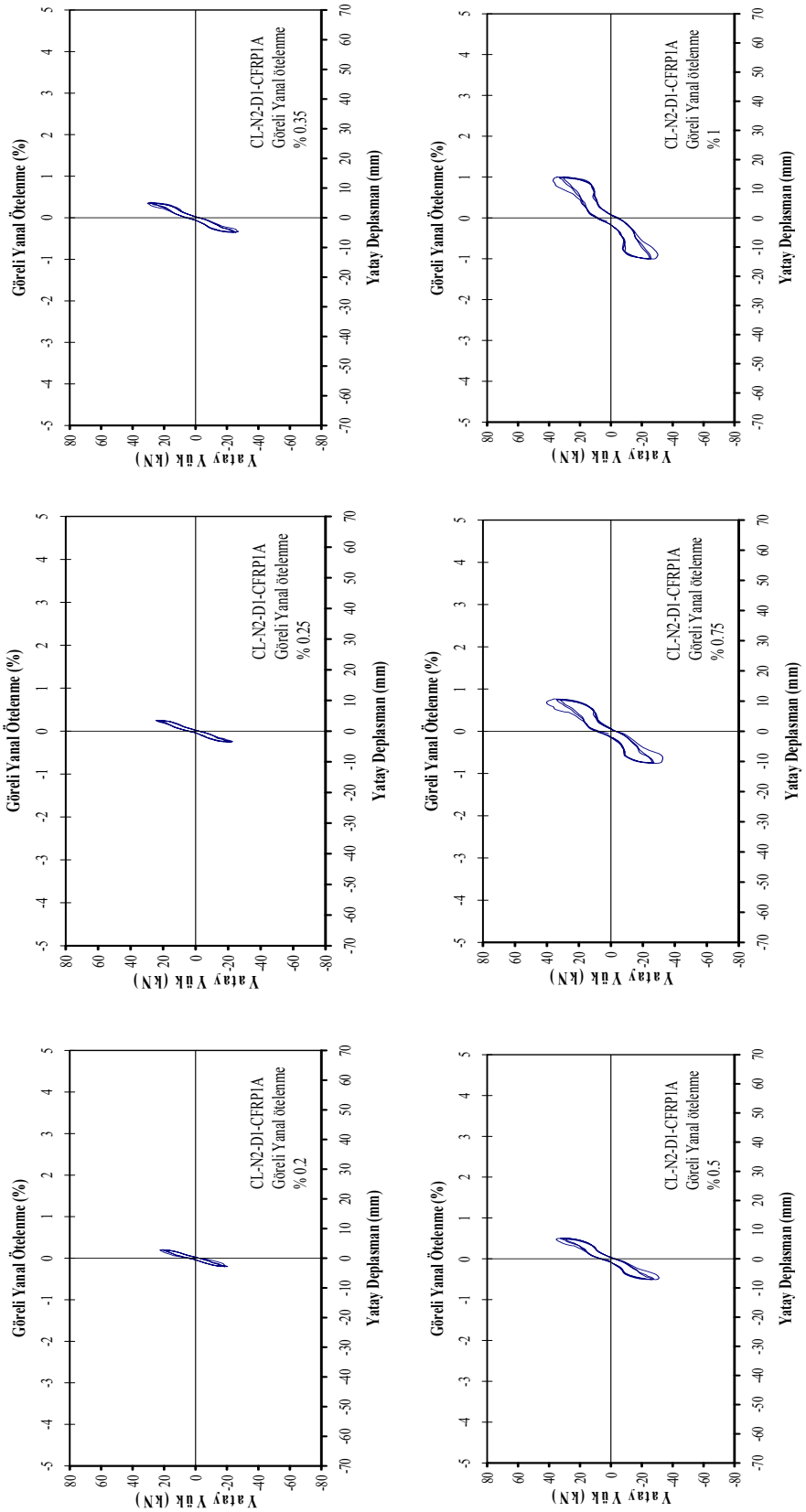
Şekil B.10: CL-N2-D0-CFRP1P numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)



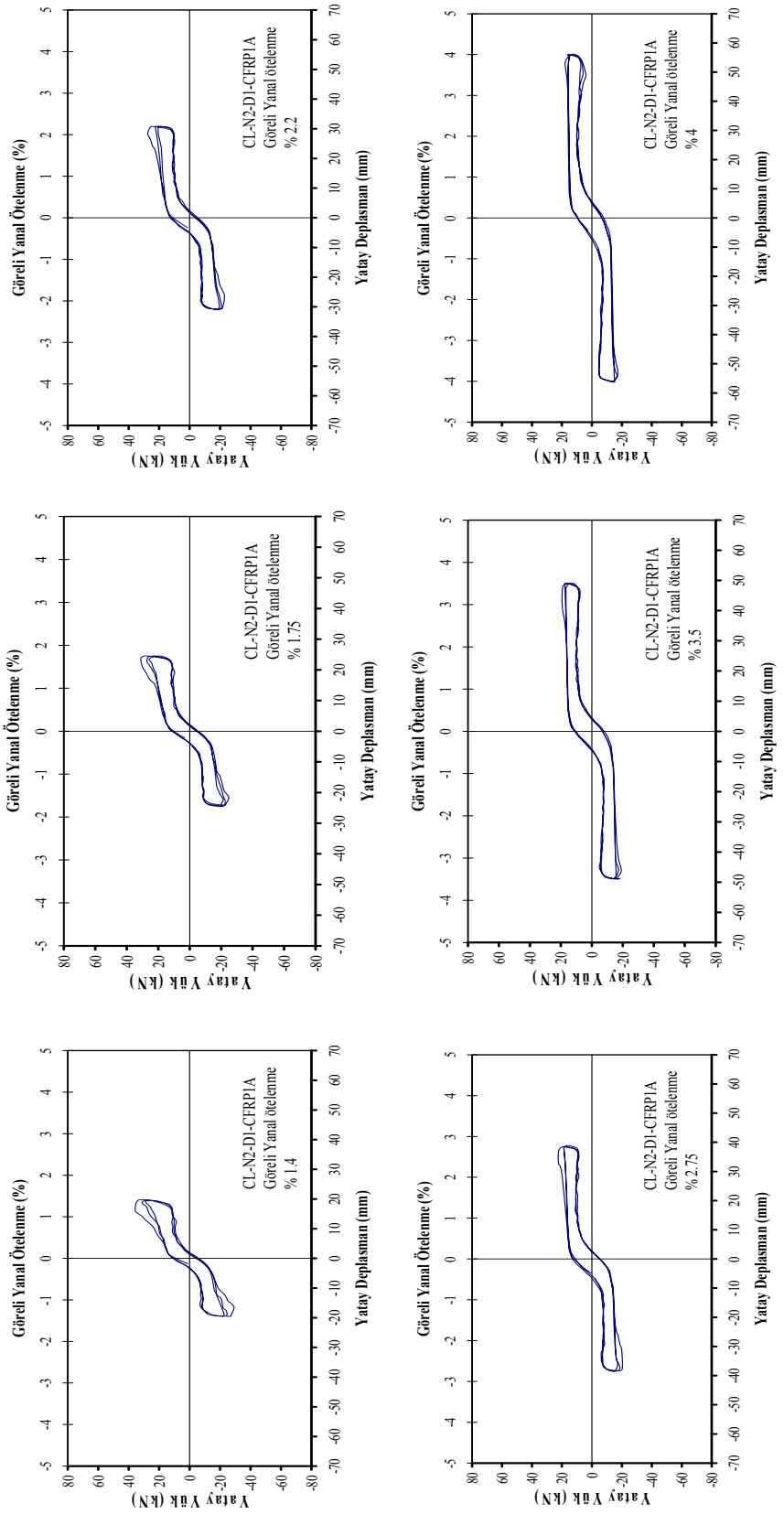
Şekil B.11: CL-N2-D0-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri



Şekil B.11: CL-N2-D0-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)

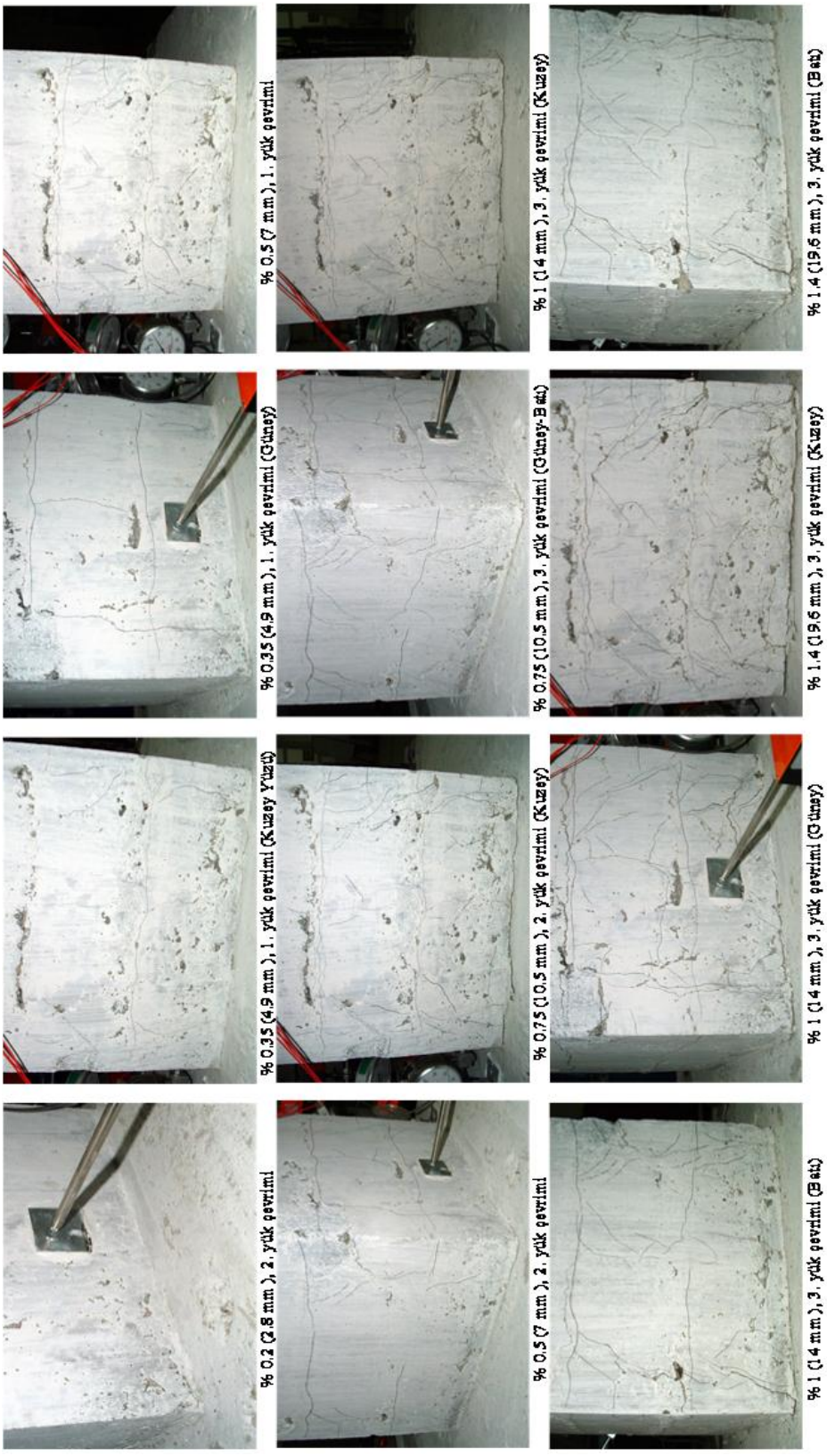


Şekil B.12: CL-N2-D1-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri

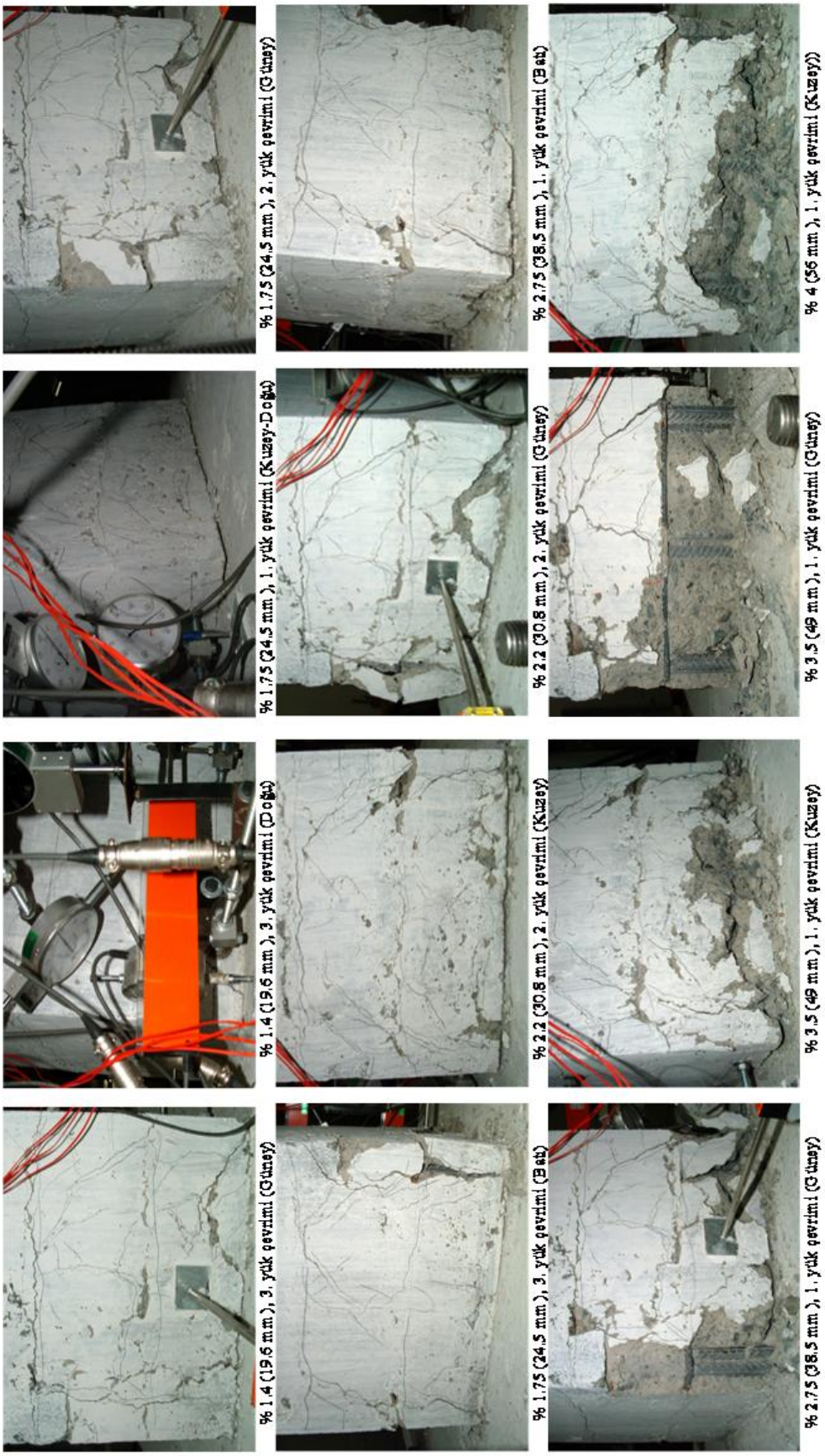


Şekil B.12: CL-N2-D1-CFRP1A numunesinin her bir yük çevrim adımına ait yatay yük-deplasman grafikleri (devamı)

Ek D



Şekil C.1: CL-N1-D0-CFRP00 numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



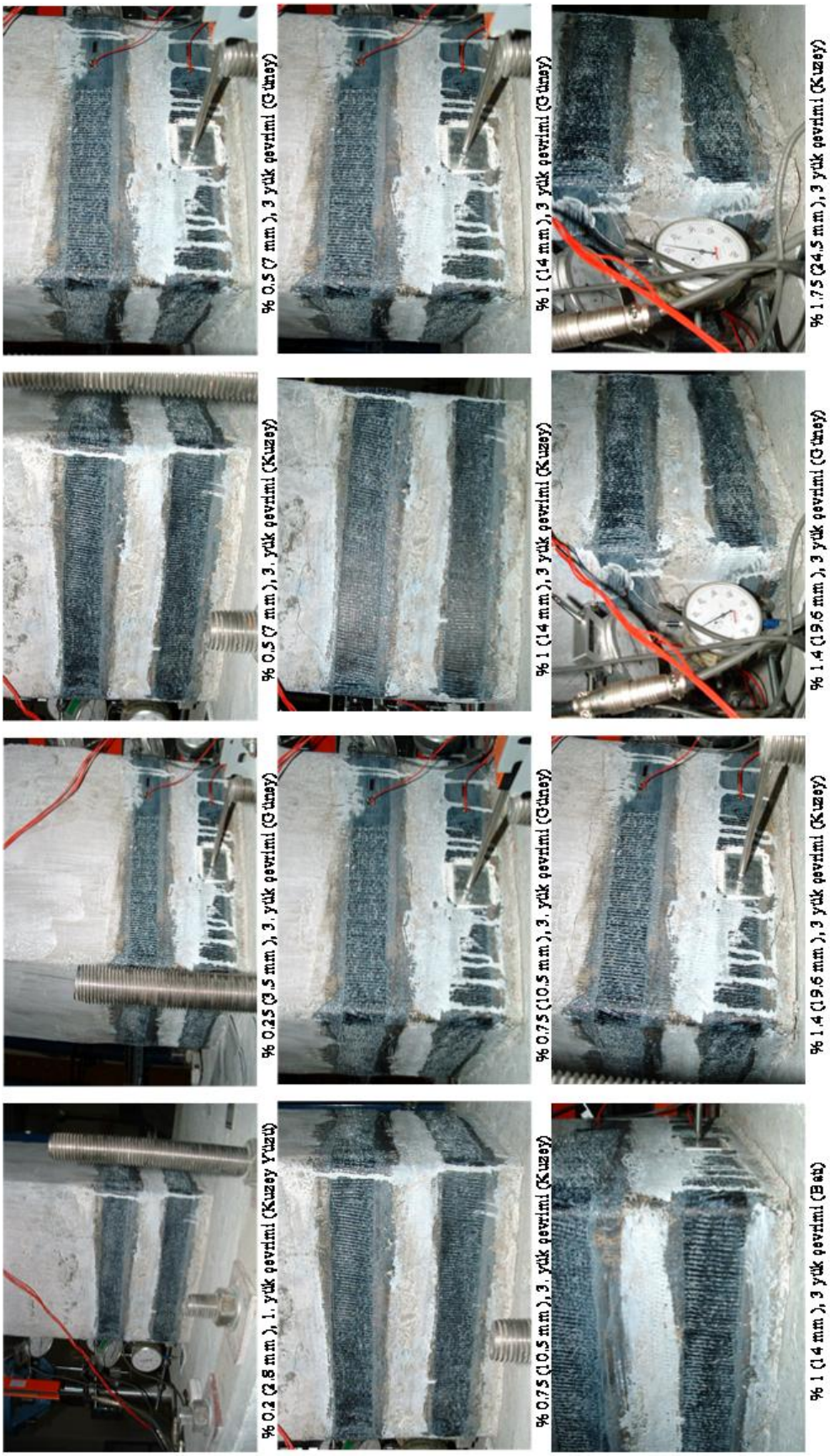
Şekil C.1: CL-N1-D0-CFRP00 numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



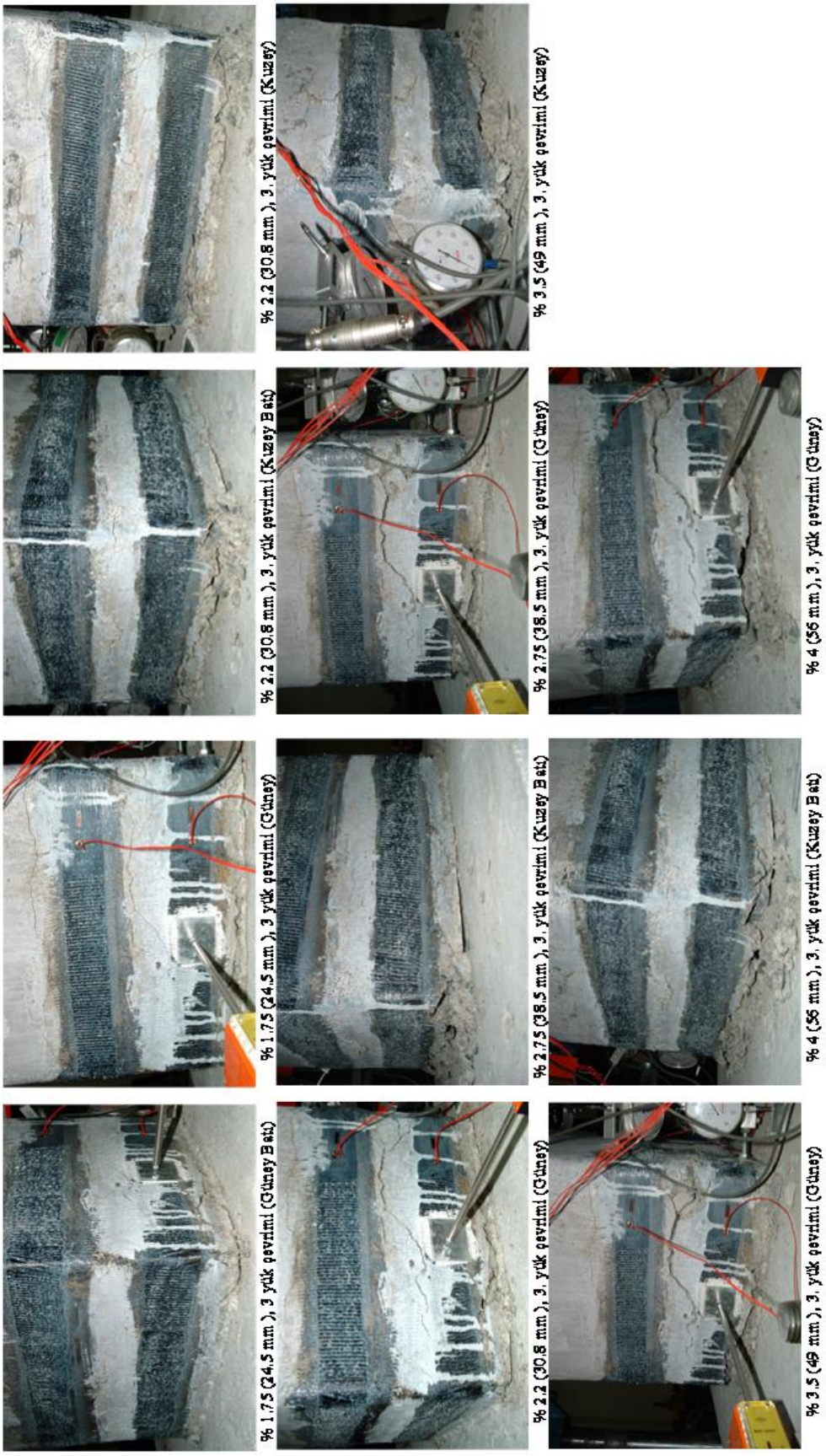
Şekil C.2: CL-N1-D0-CFRP1P numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



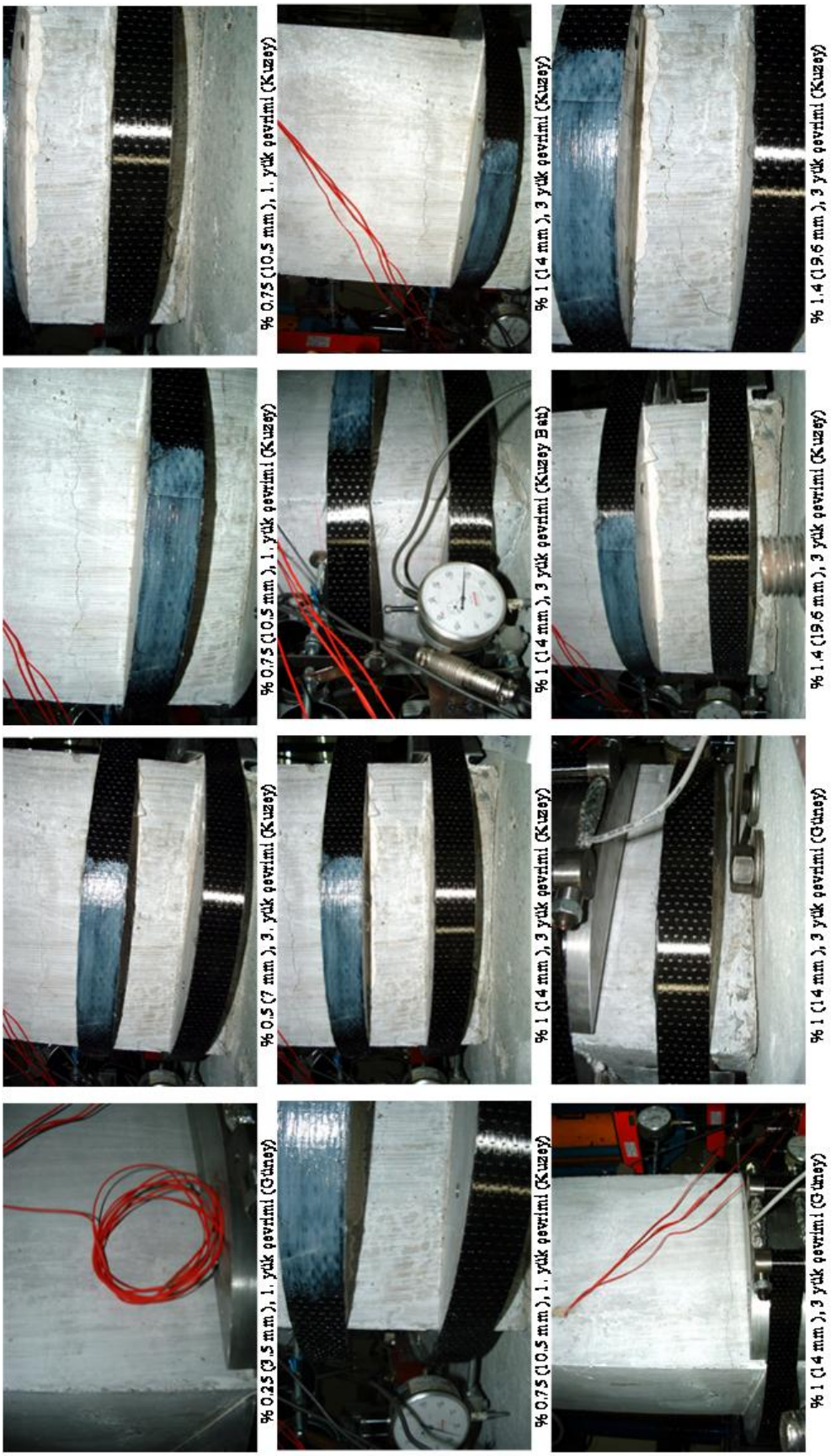
Şekil C.2: CL-N1-D0-CFRP1P numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



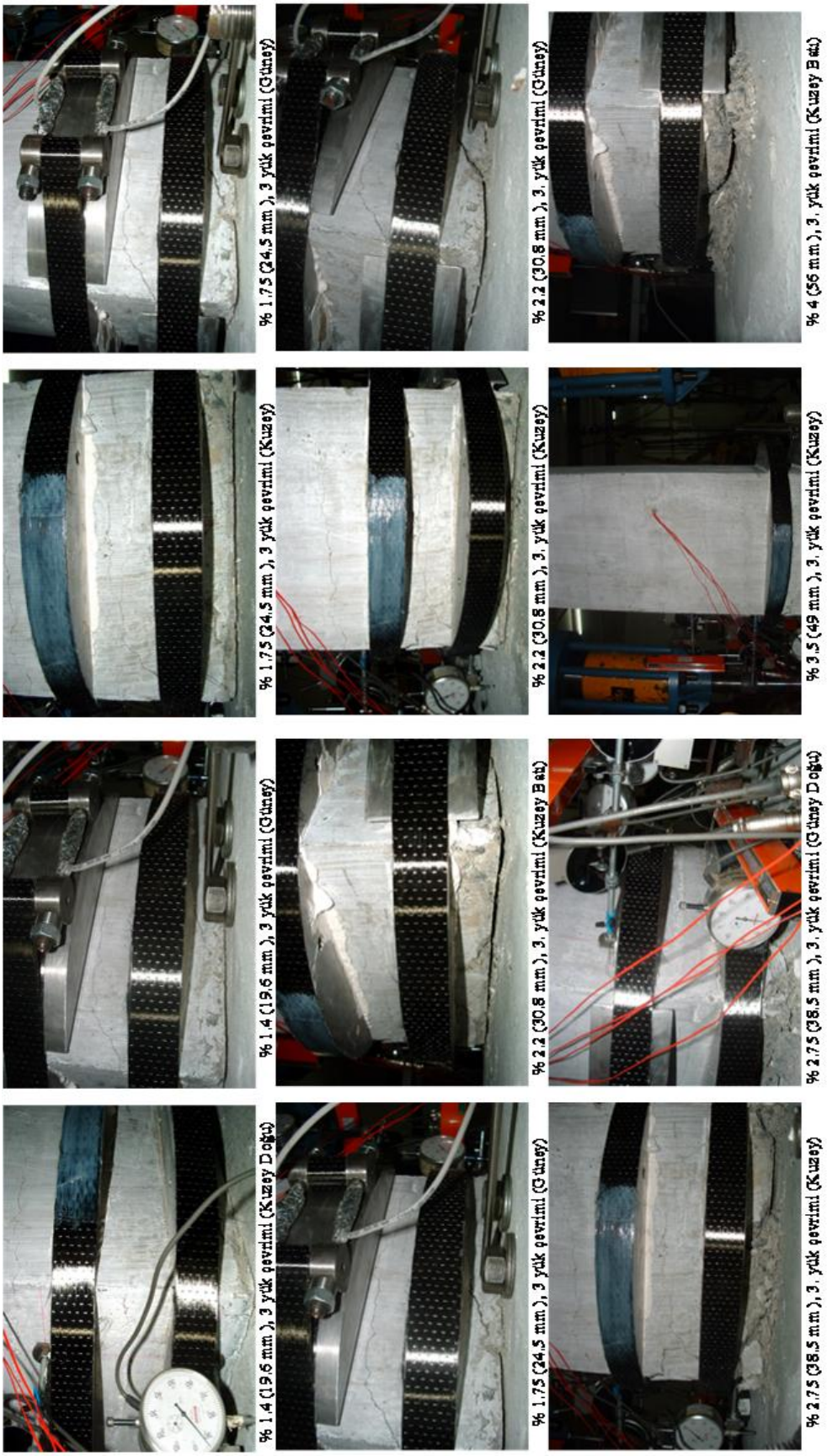
Şekil C.3: CL-N1-D0-CFRP2P numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



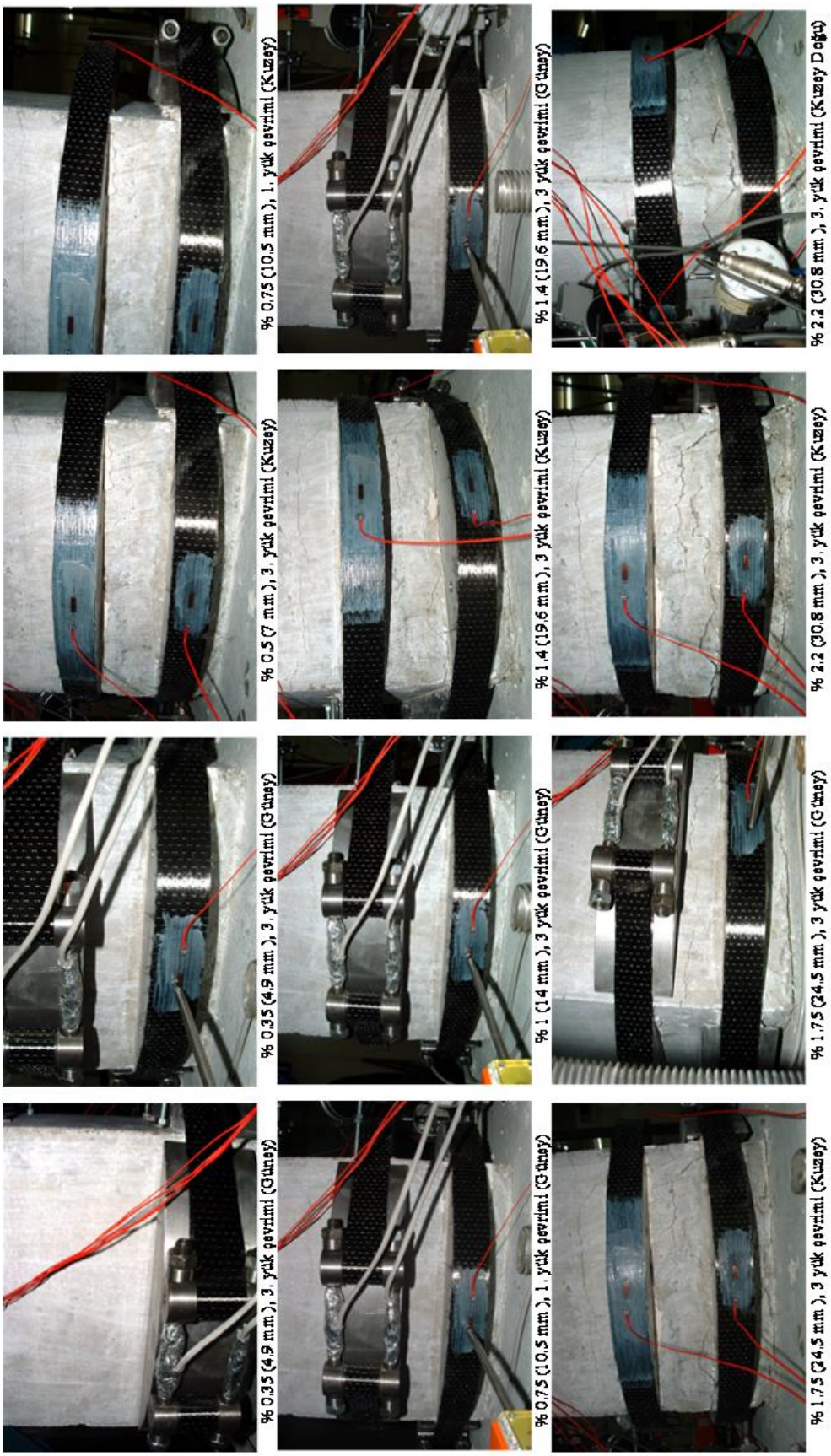
Şekil C.3: CL-N1-D0-CFRP2P numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



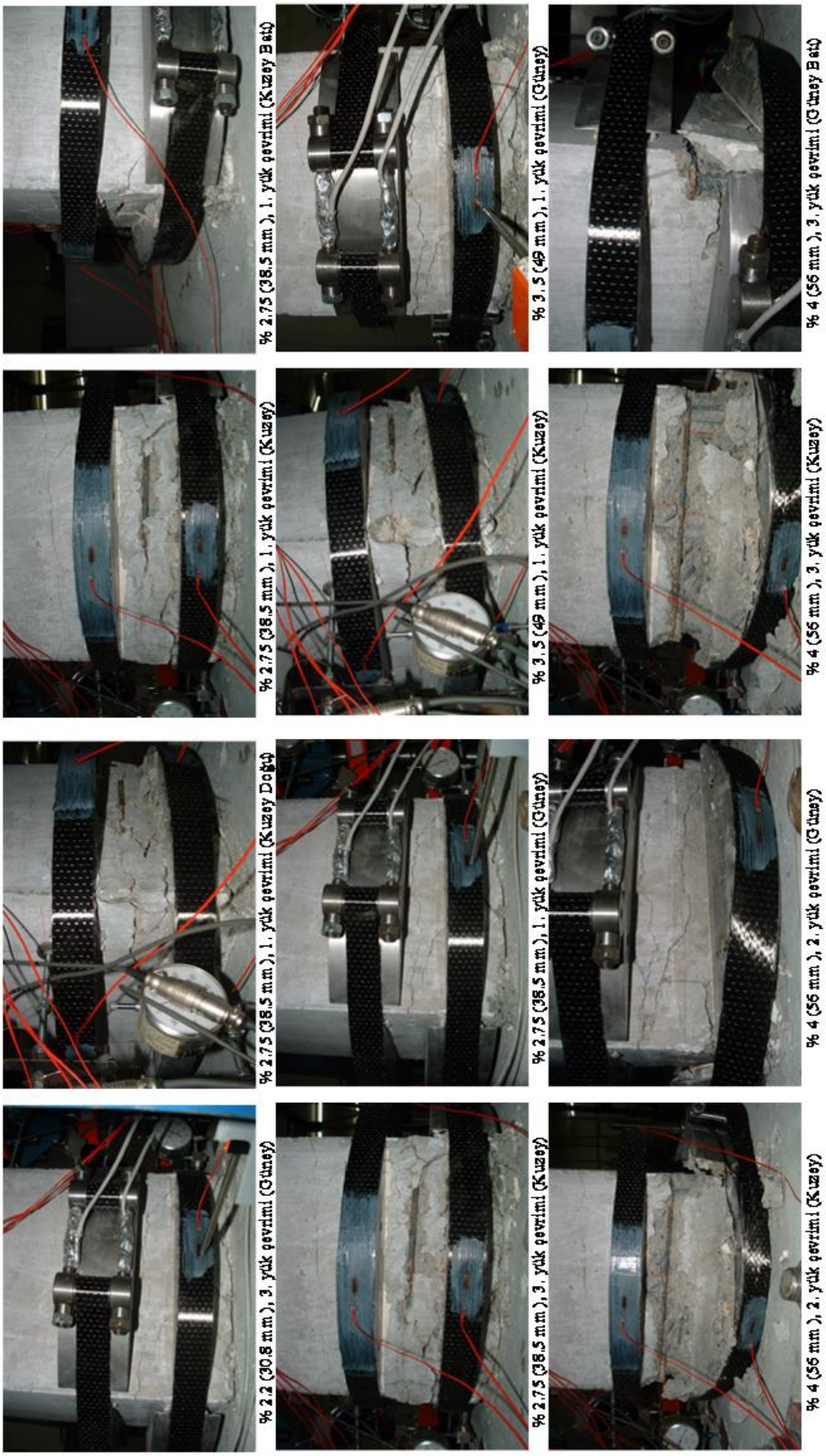
Şekil C.4: CL-N1-D0-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



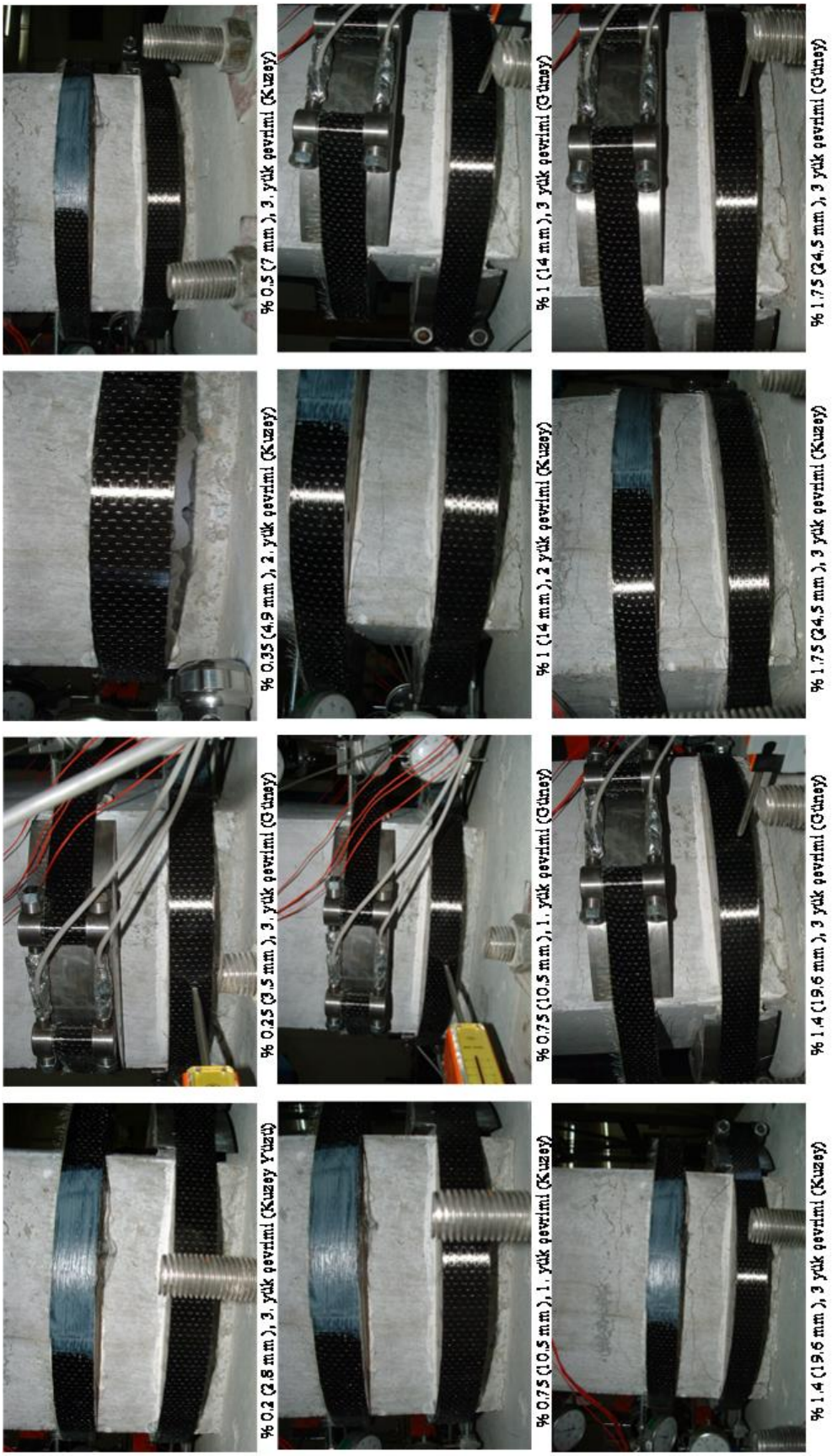
Şekil C.4: CL-N1-D0-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



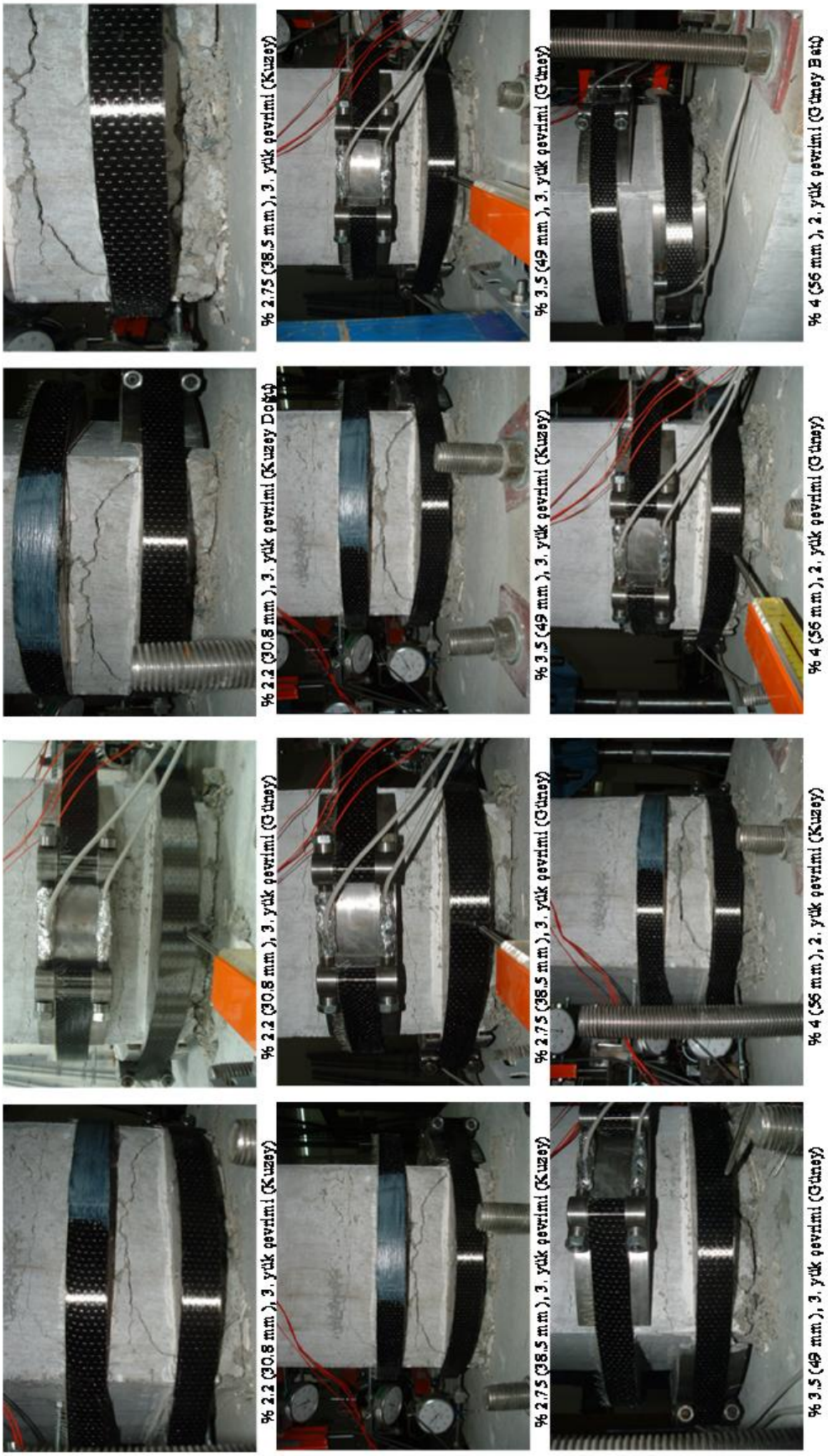
Şekil C.5: CL-N1-D0-CFRP2A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



Şekil C.5: CL-N1-D0-CFRP2A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



Şekil C.6: CL-N1-D0-CFRP3A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



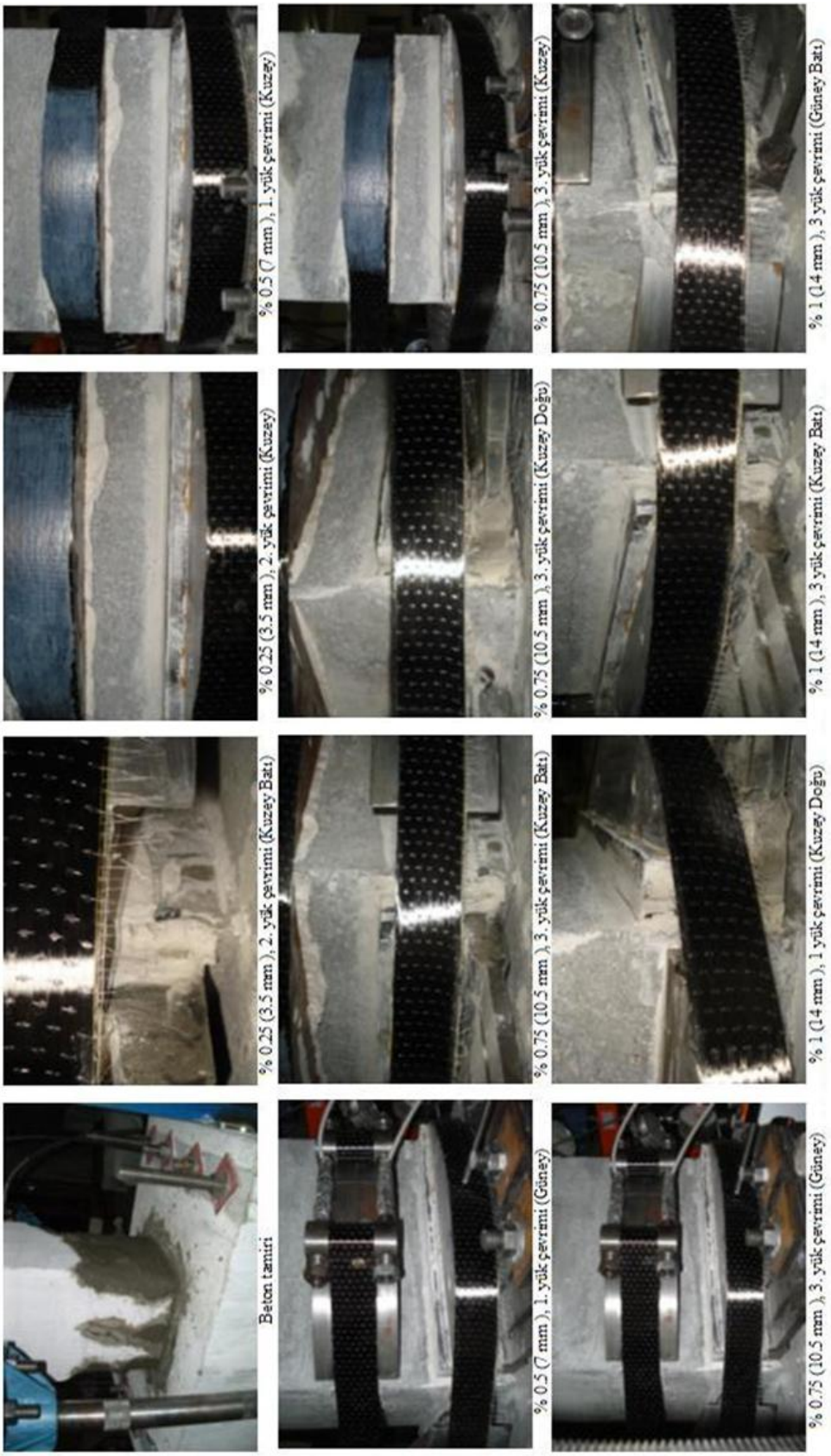
Şekil C.6: CL-N1-D0-CFRP3A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



Şekil C.7: CL-N1-D1-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



Şekil C.7: CL-N1-D1-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)

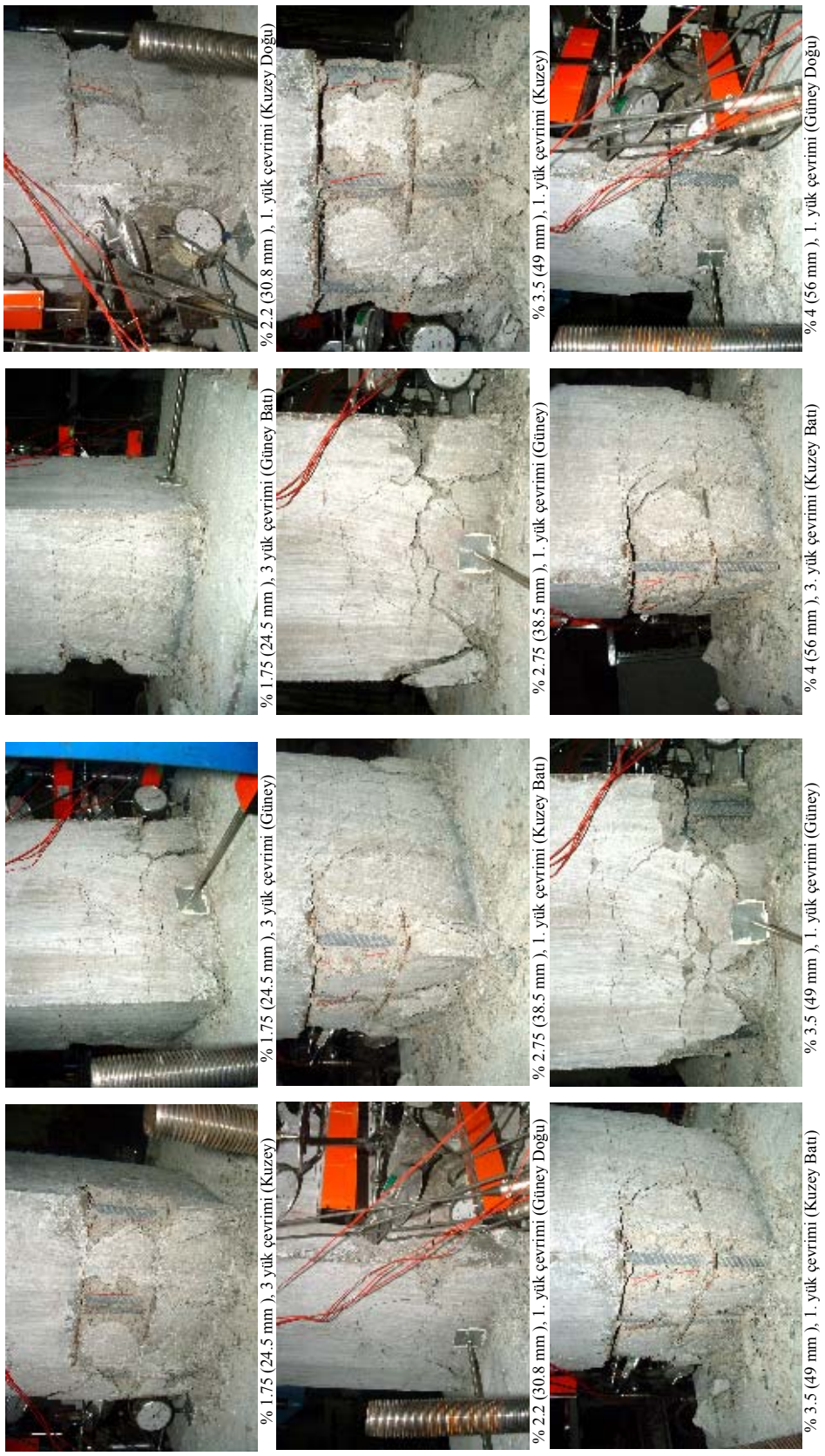


Şekil C.8 - CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu

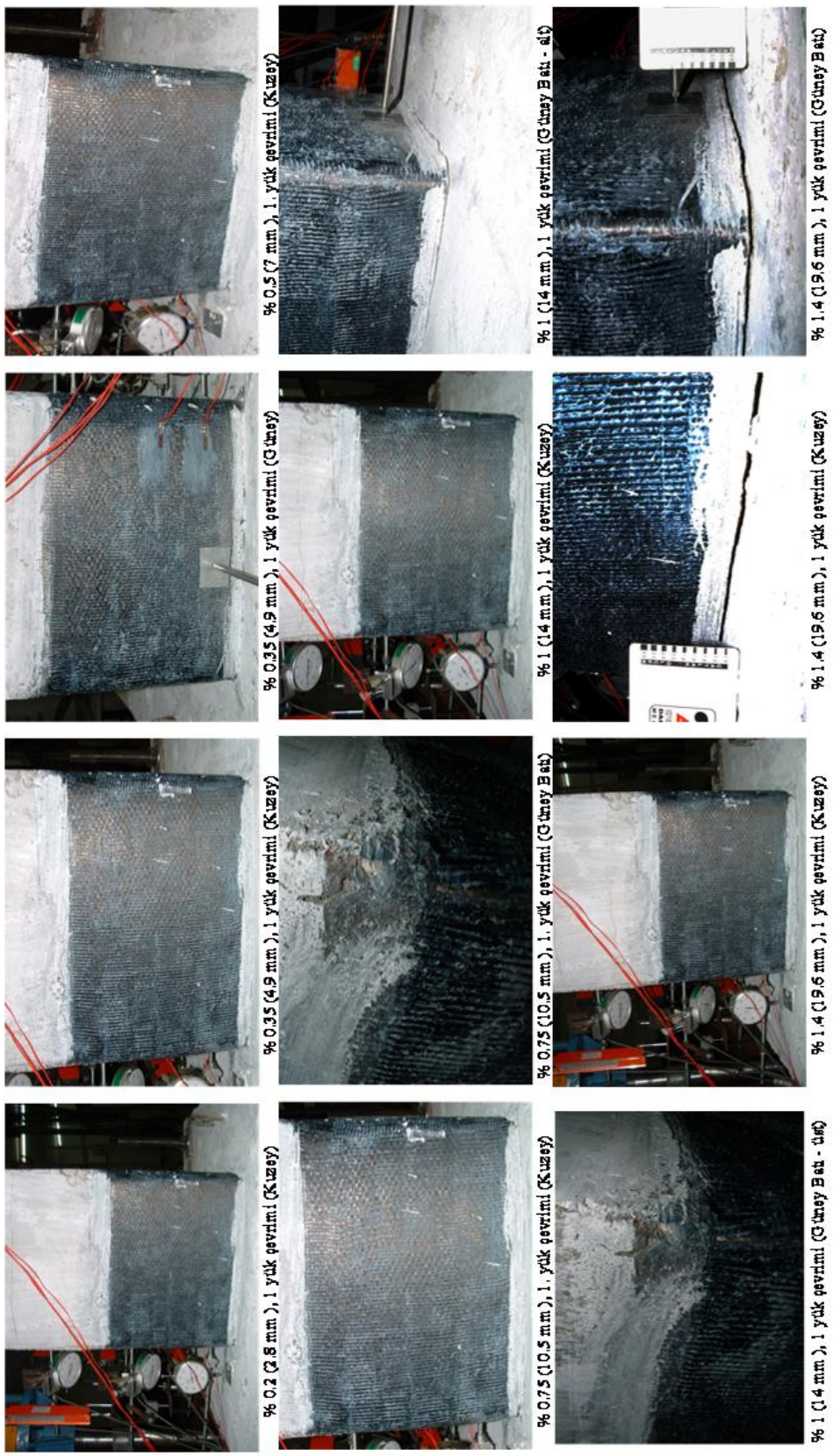
Şekil C.8 - CL-N1-D1-CFRP1AC numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



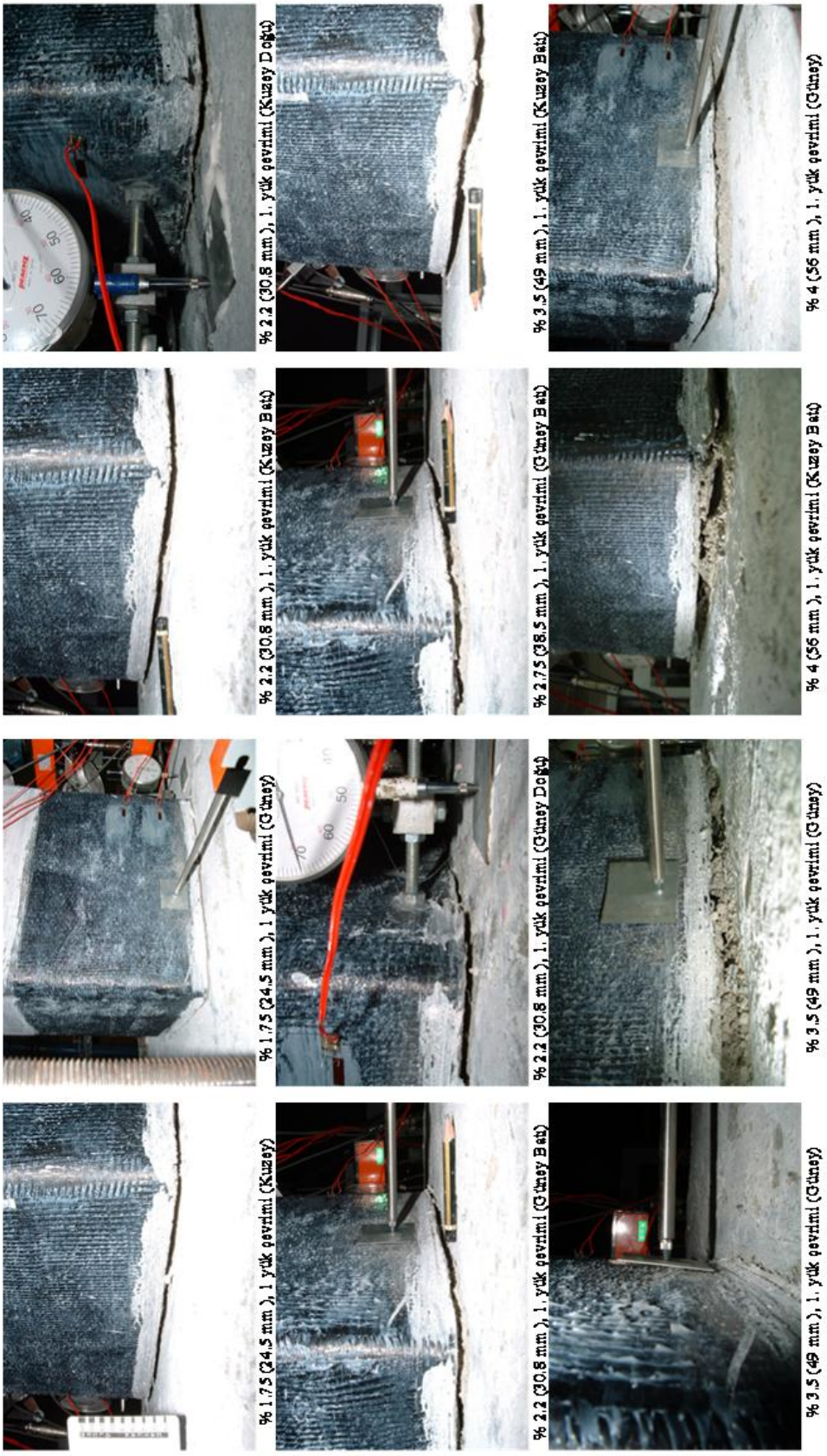
Şekil C.9 - CL-N2-D0-CFRP00 numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



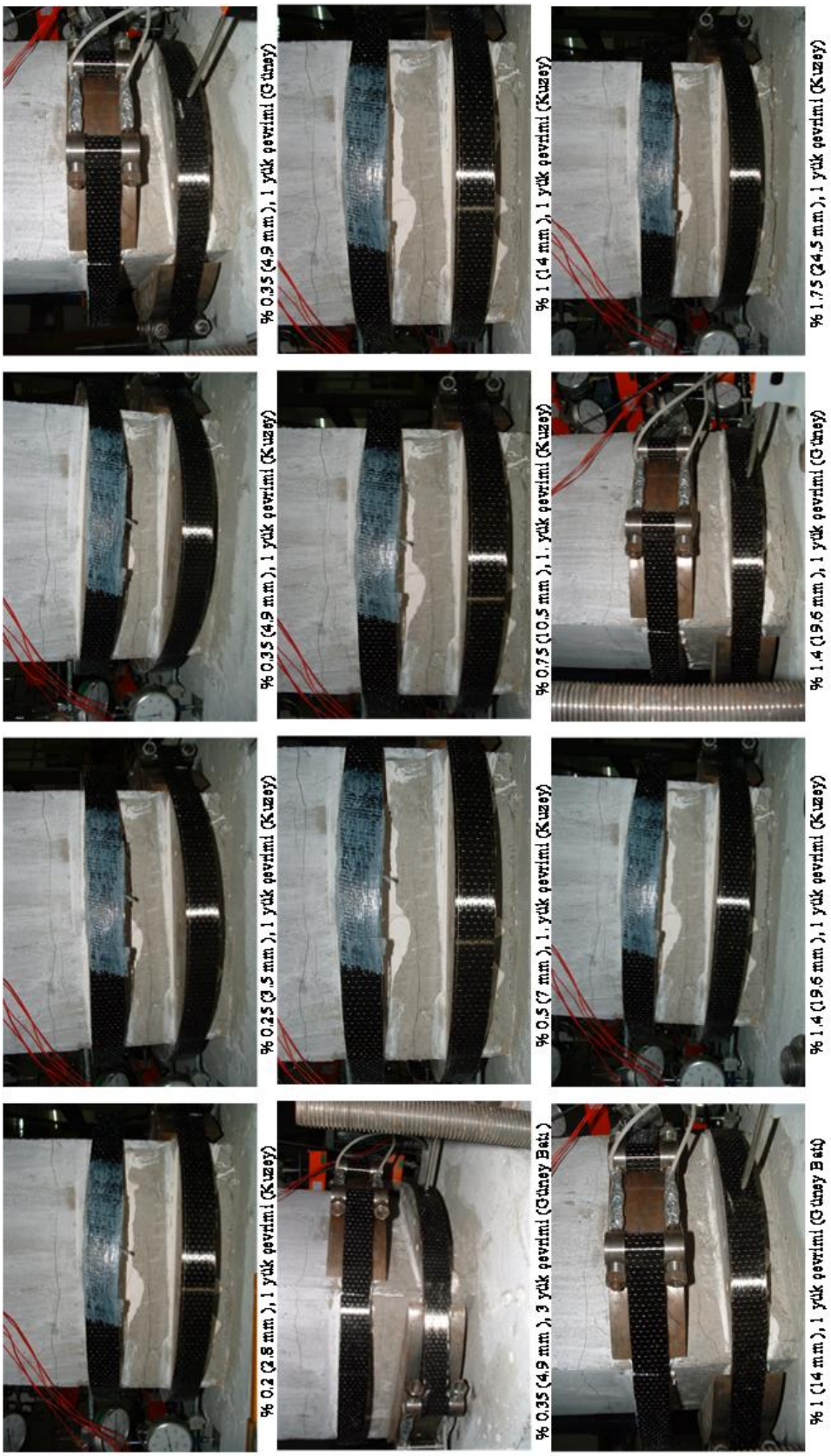
Şekil C.9 - CL-N2-D0-CFRP00 numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



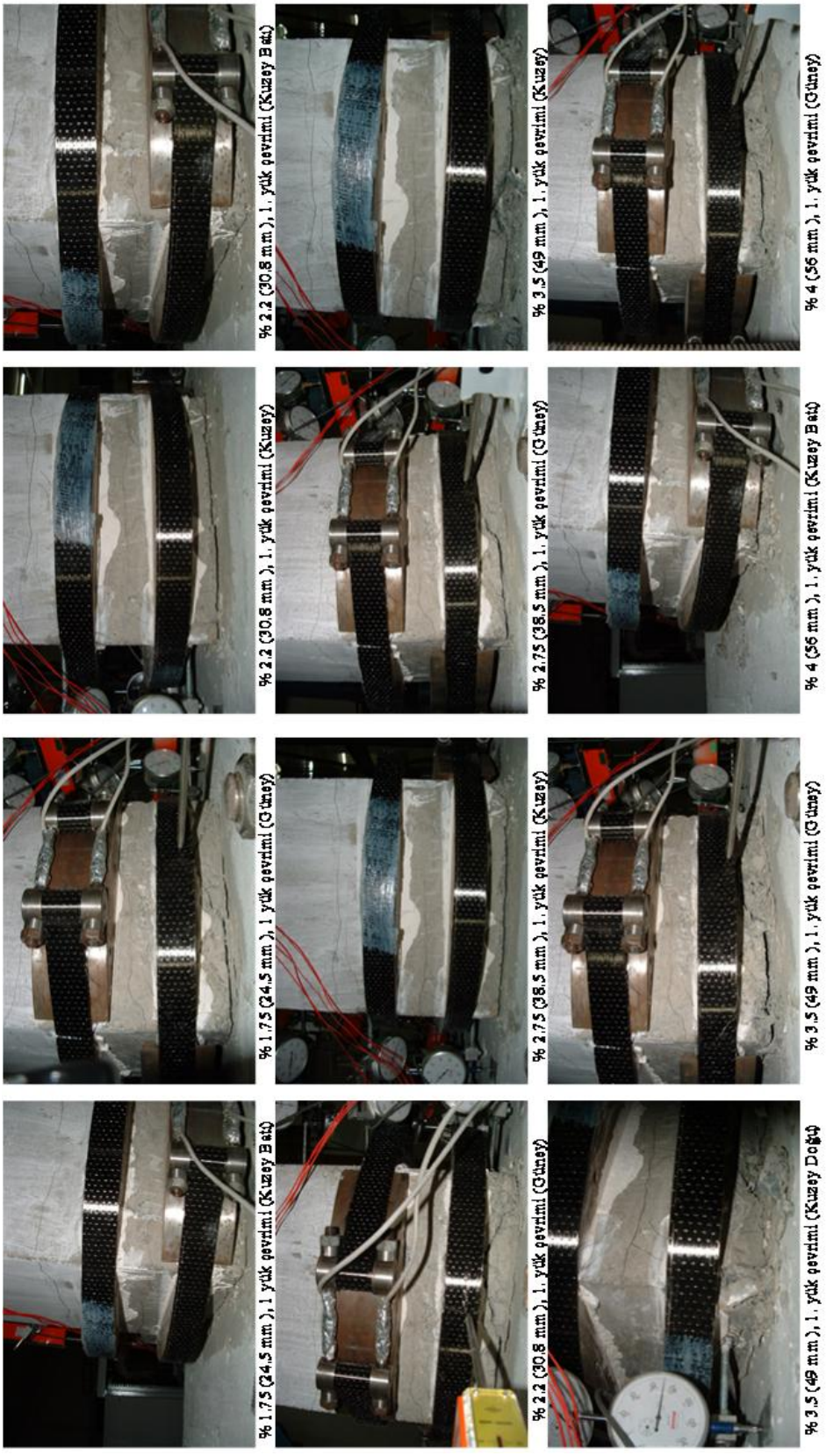
Şekil C.10 - CL-N2-D0-CFRP1P numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



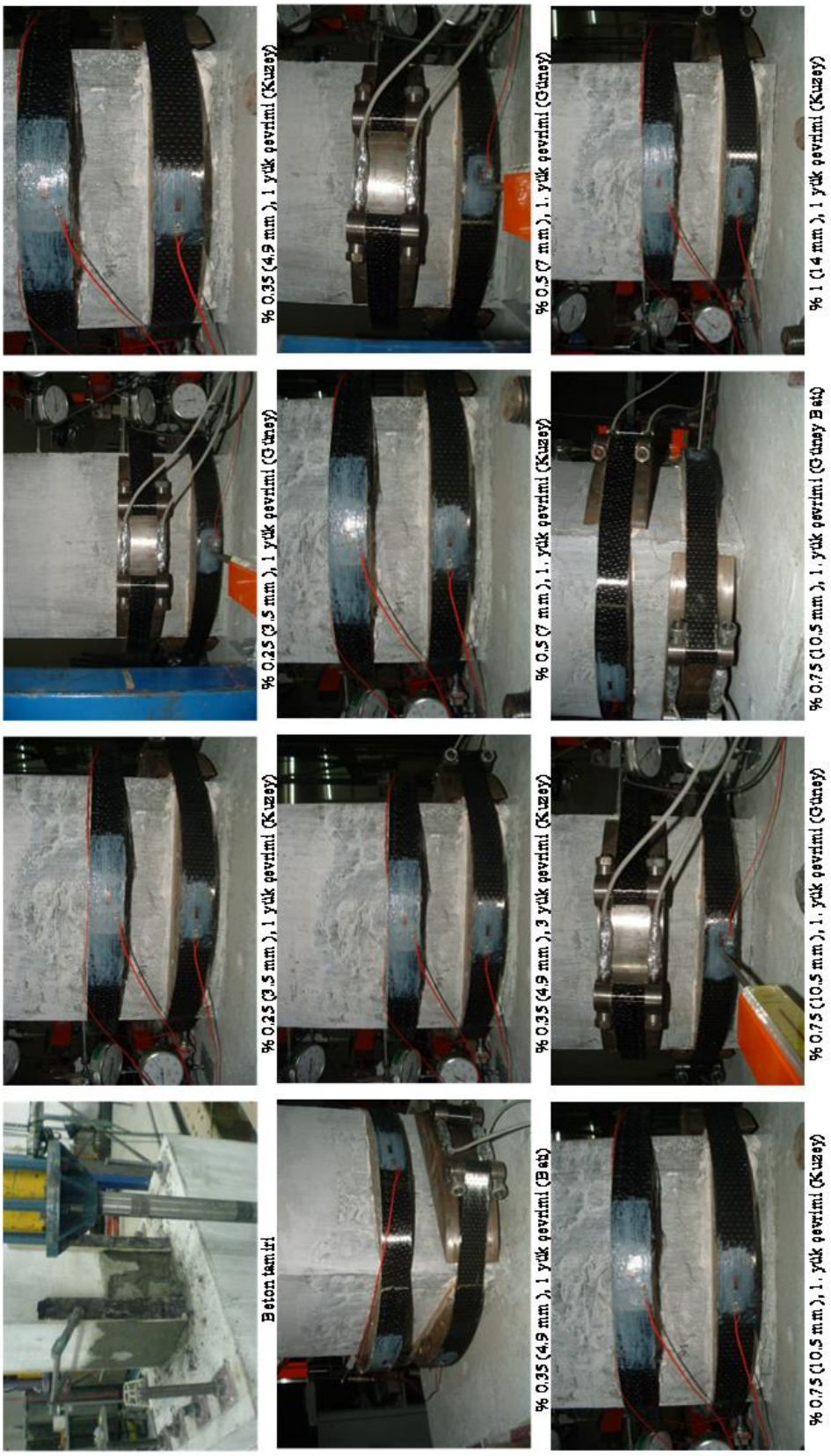
Şekil C.10 - CL-N2-D0-CFRP1P numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)



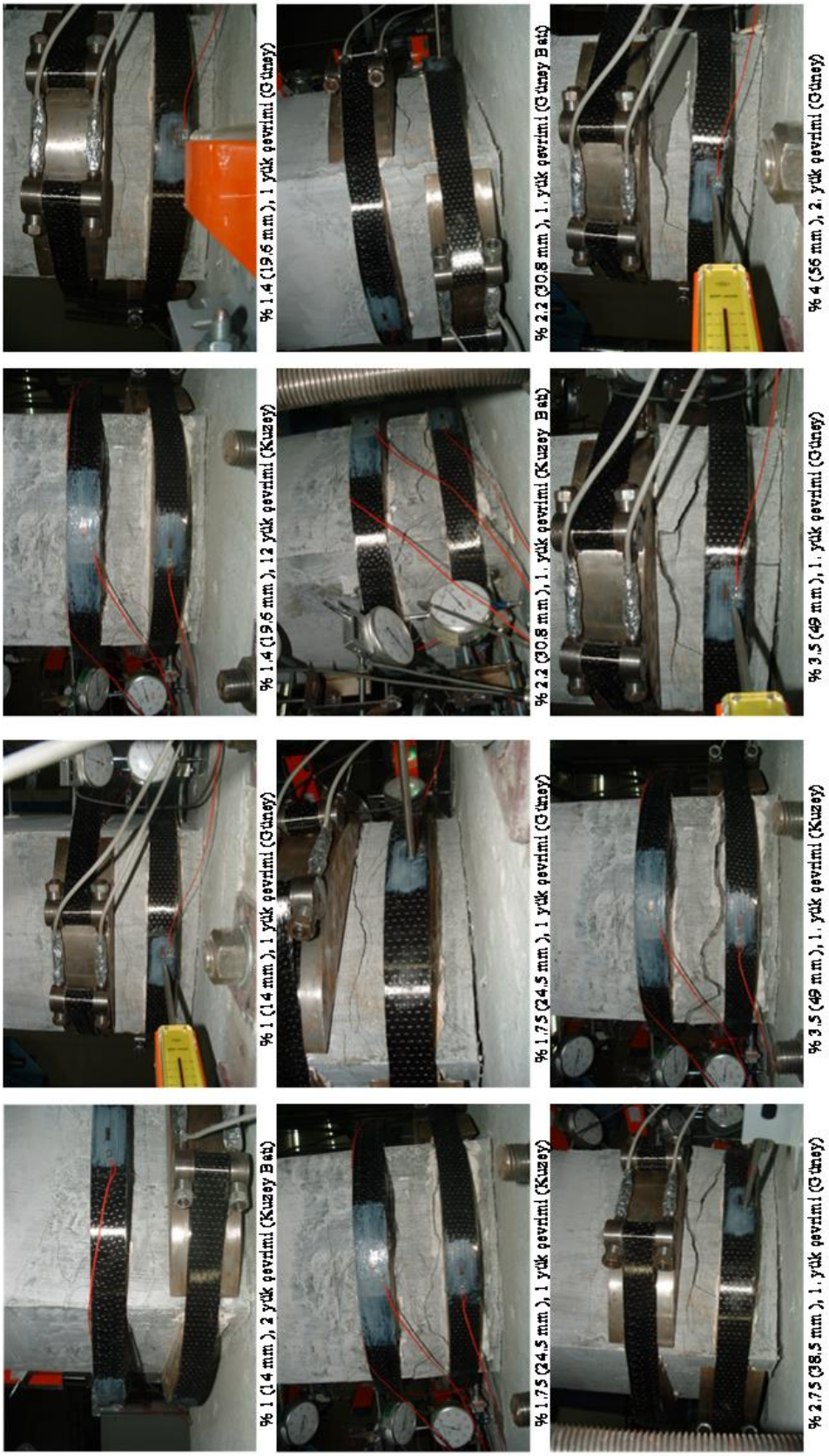
Şekil C.11 - CL-N2-D0-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu



Şekil C.11 - CL-N2-D0-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)

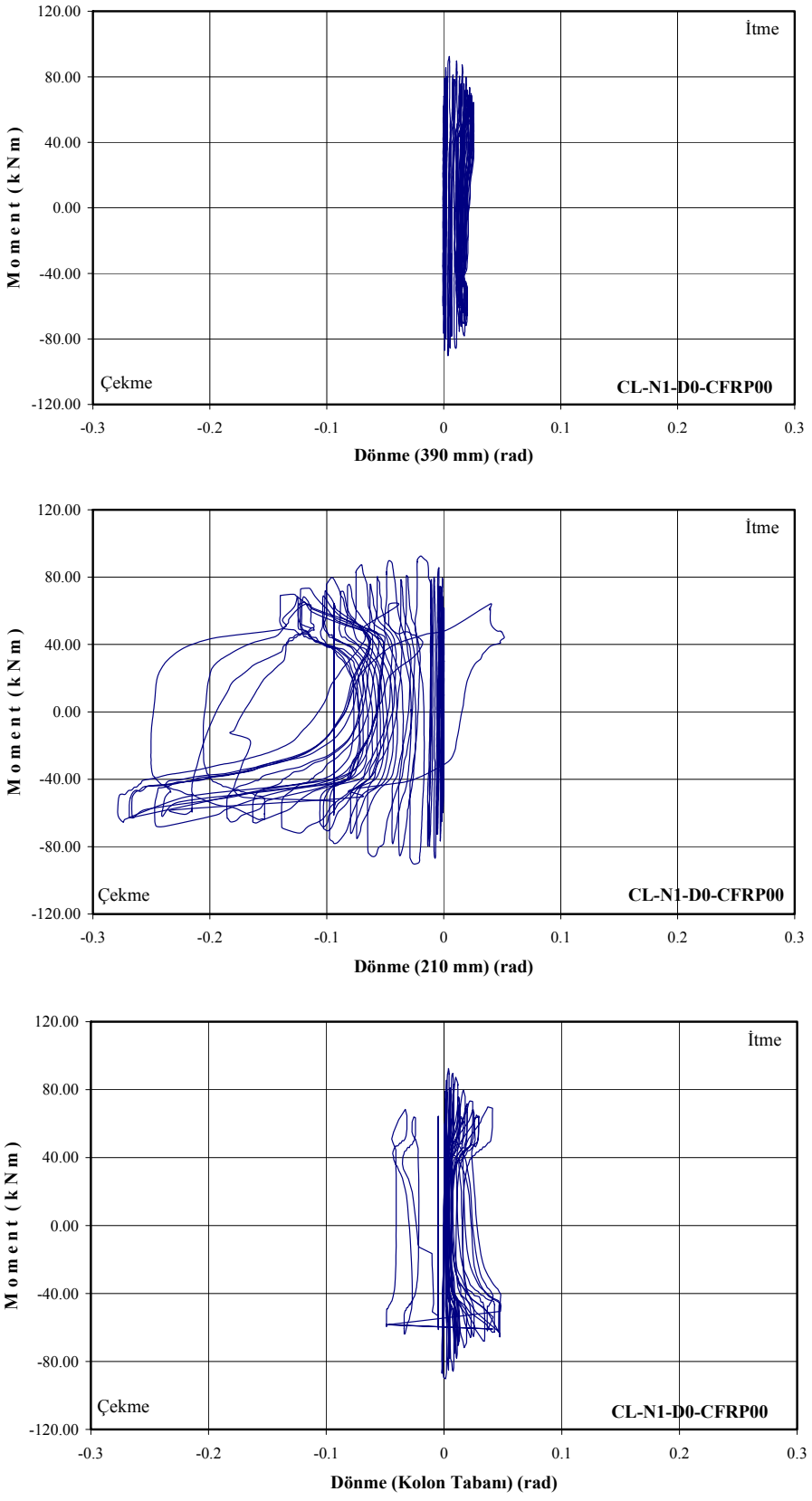


Şekil C.12 - CL-N2-D1-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu

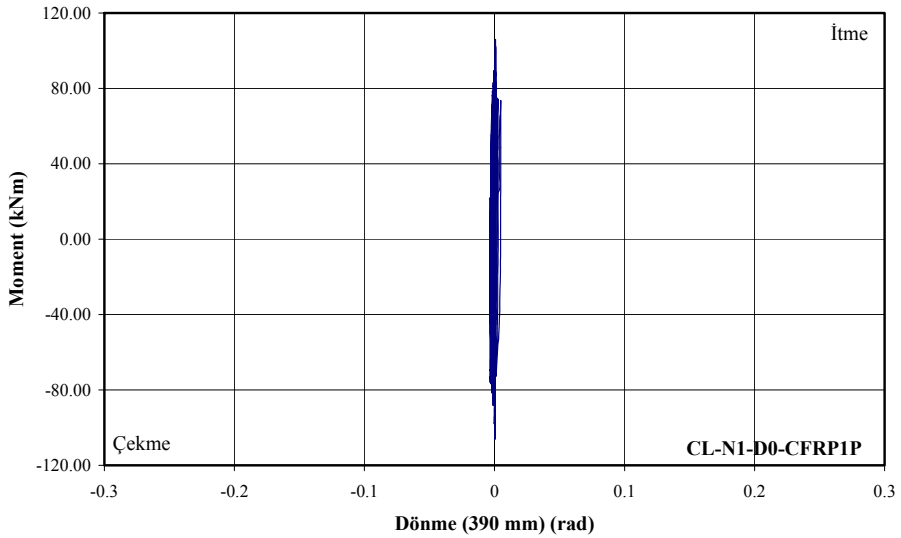


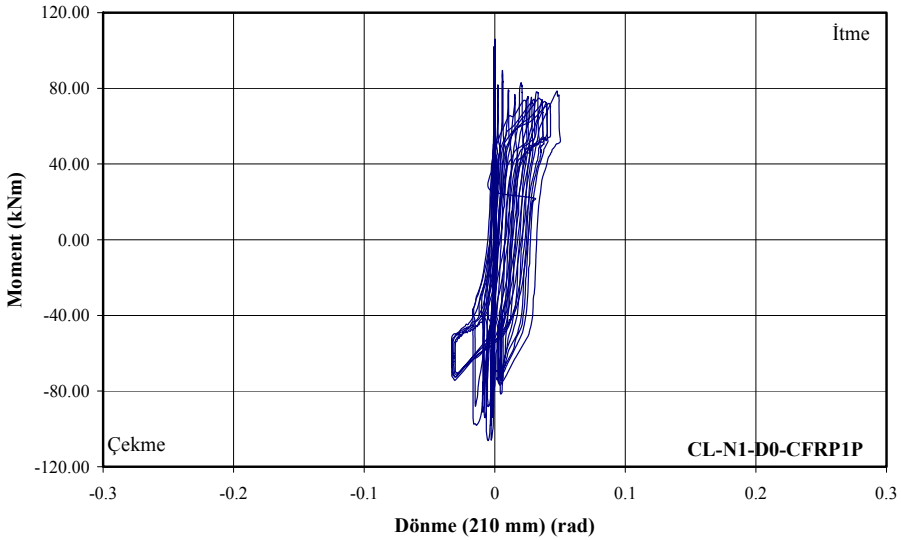
Şekil C.12 - CL-N2-D1-CFRP1A numunesinin çeşitli yükleme adımlarında meydana gelen çatlaklar ve hasar durumu (devamı)

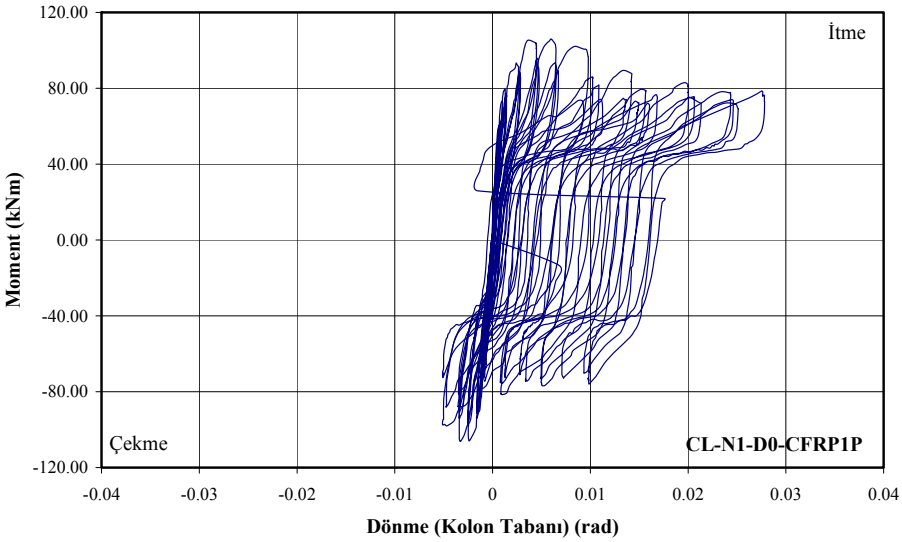
Ek D



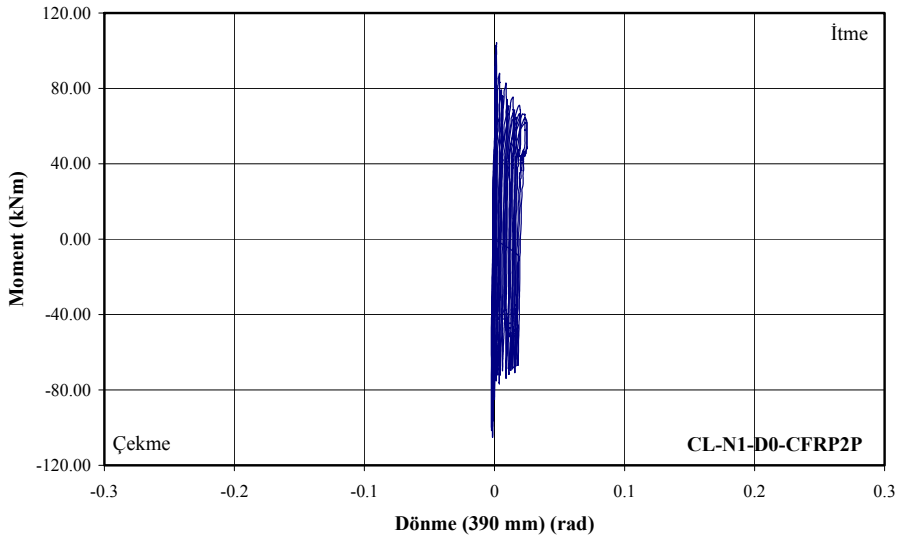
Şekil D.1: CL-N1-D0-CFRP00 numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

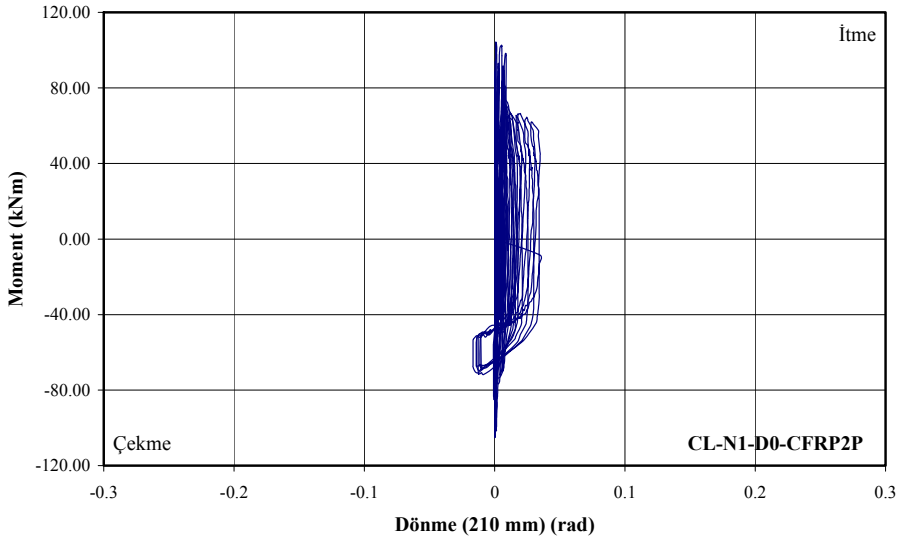


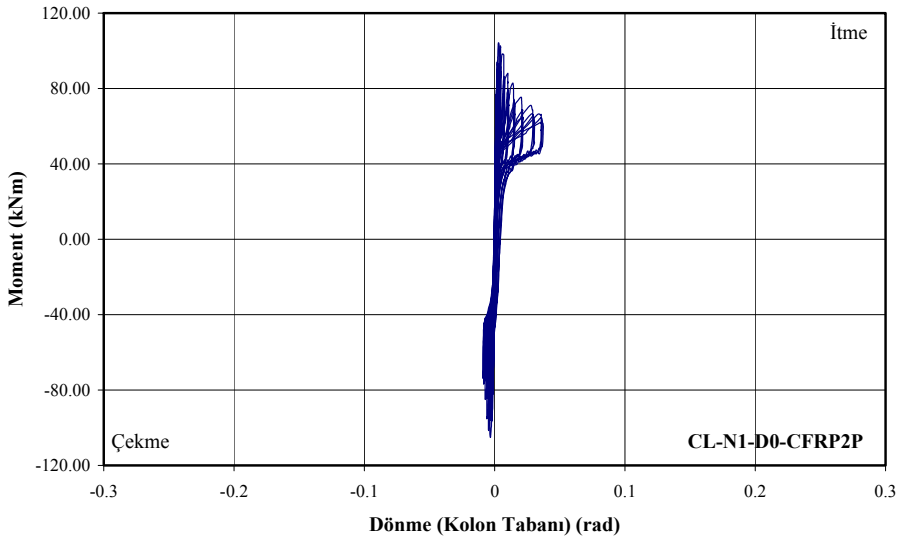




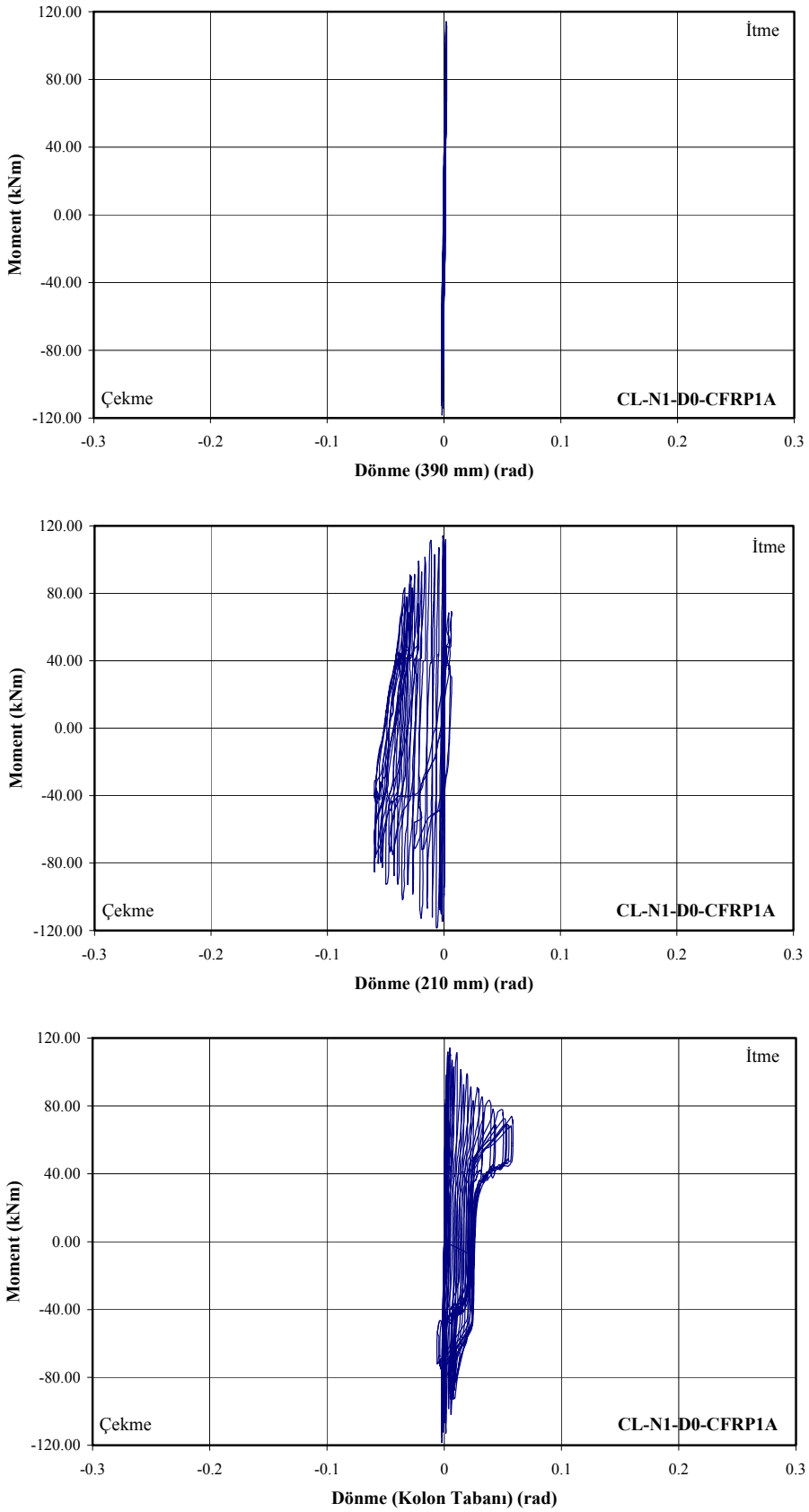
Şekil D.2: CL-N1-D0-CFRP1P numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri



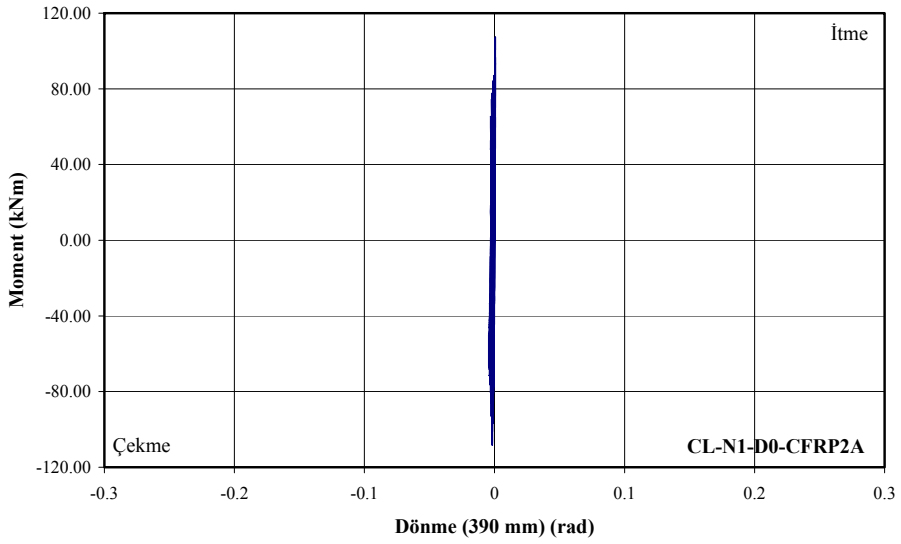


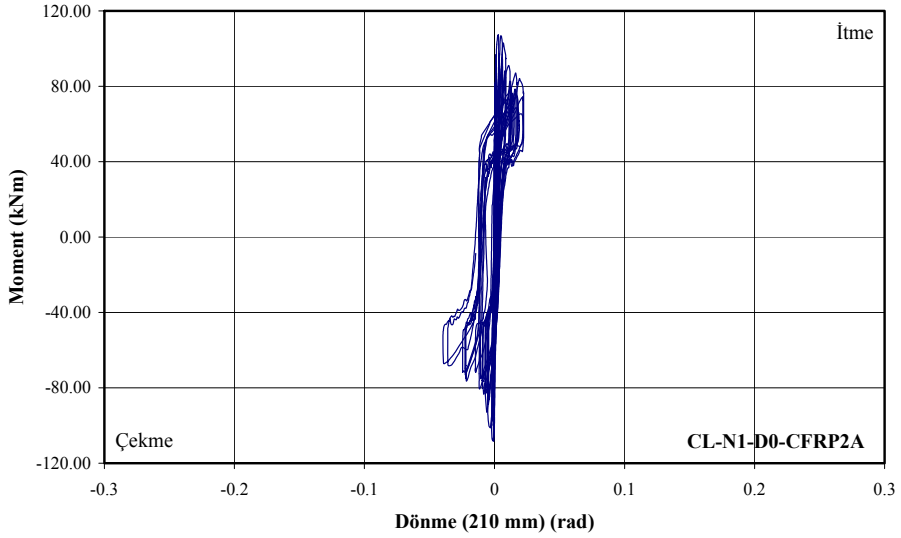


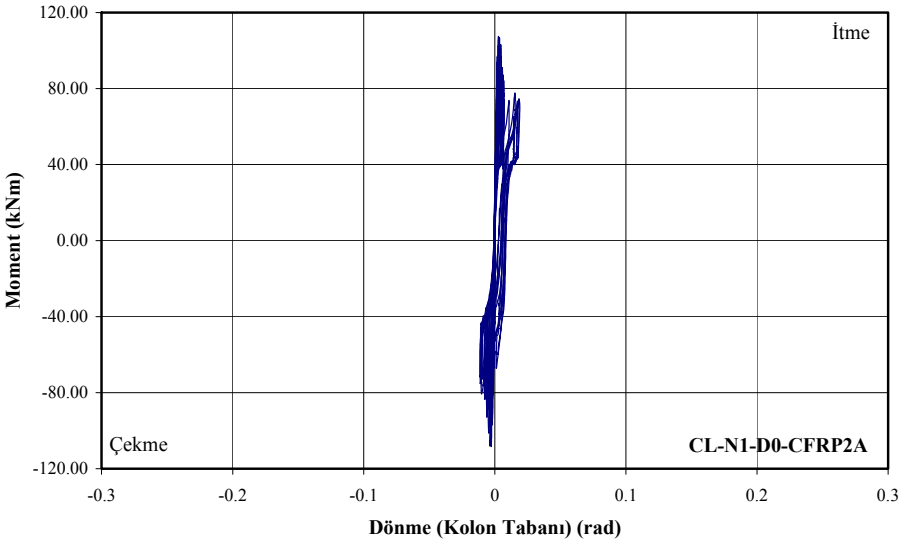
Şekil D.3: CL-N1-D0-CFRP2P numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri



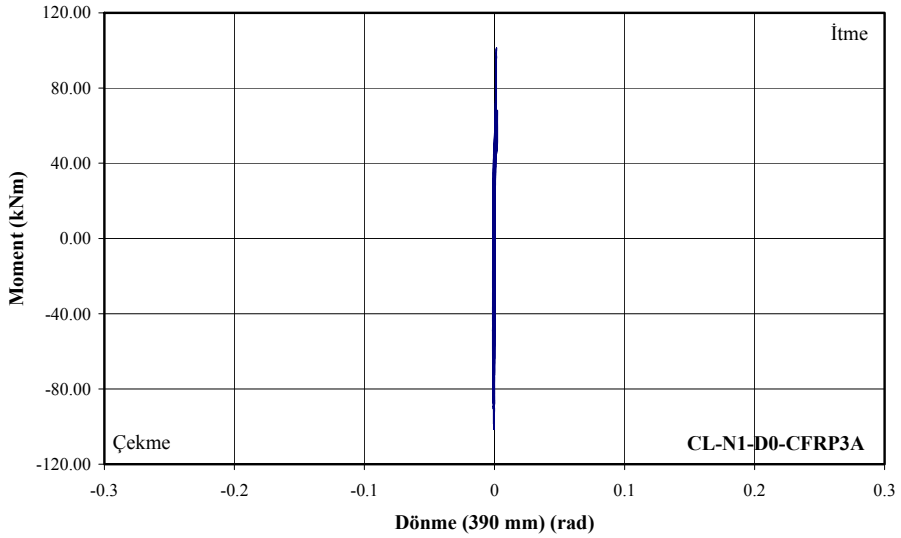
Şekil D.4: CL-N1-D0-CFRP1A numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

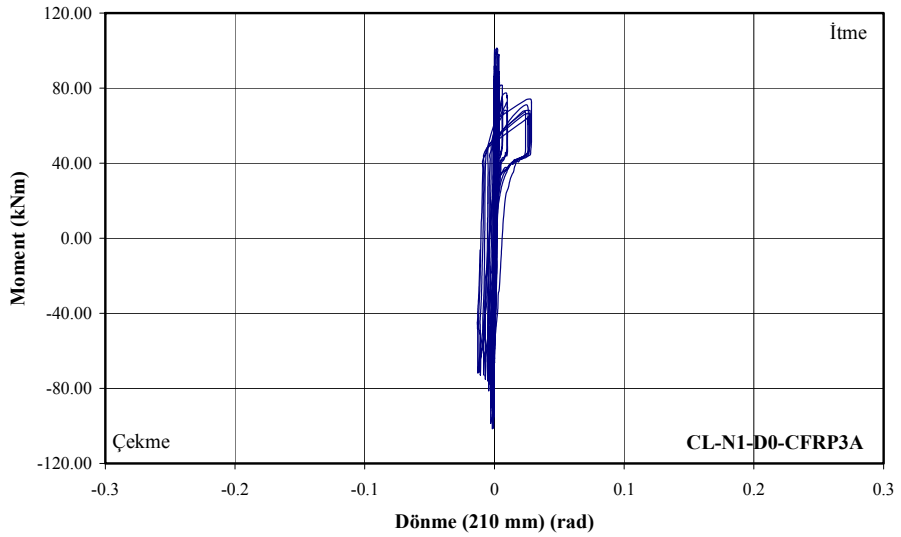


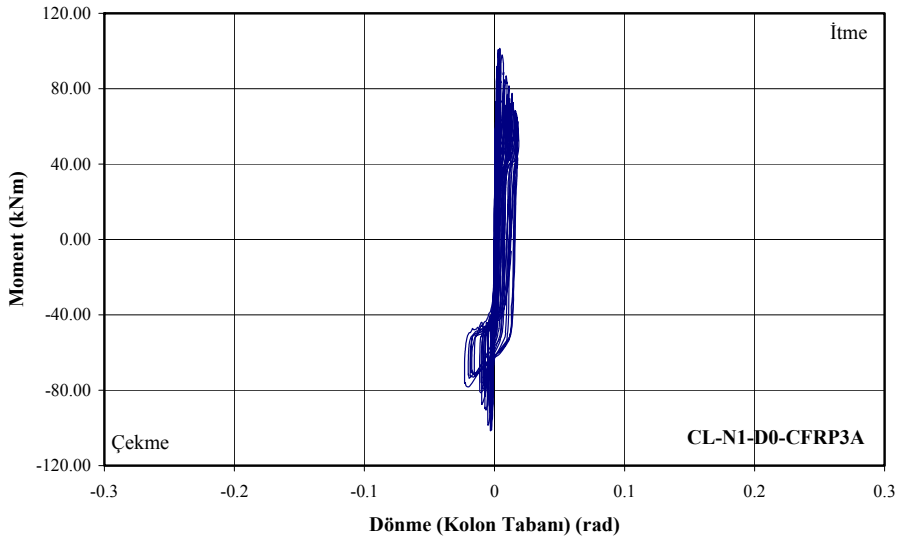




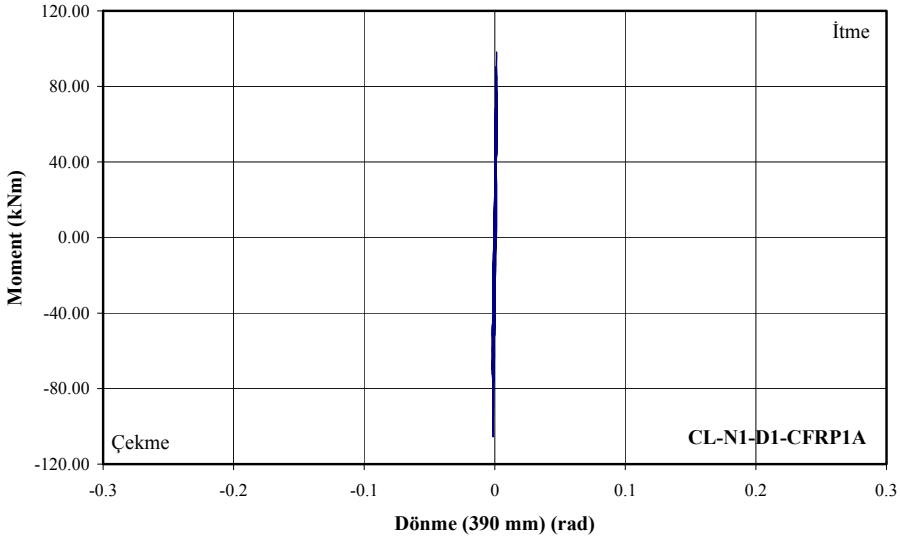
Şekil D.5: CL-N1-D0-CFRP2A numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

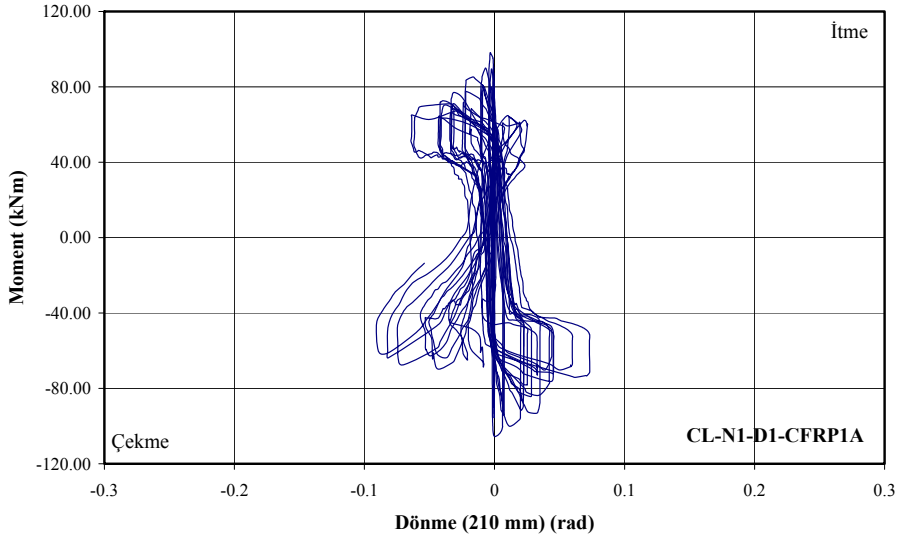


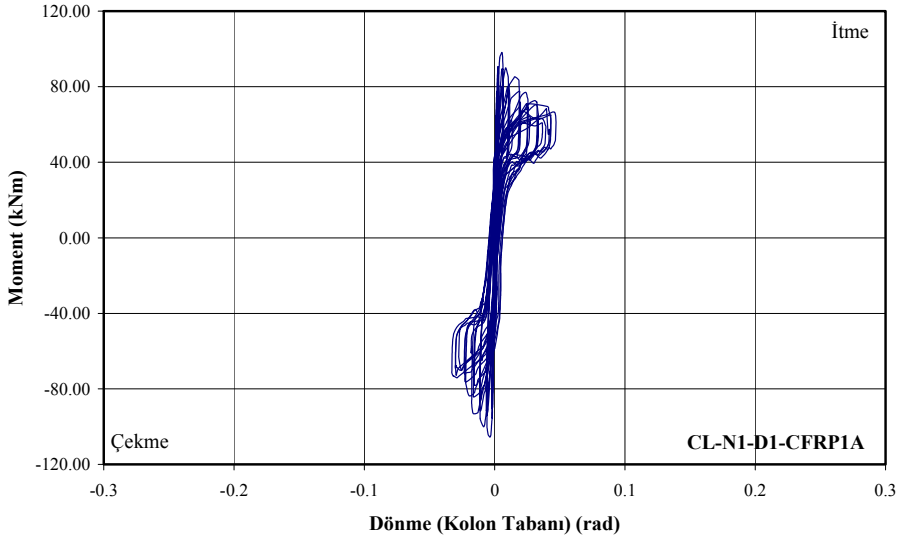




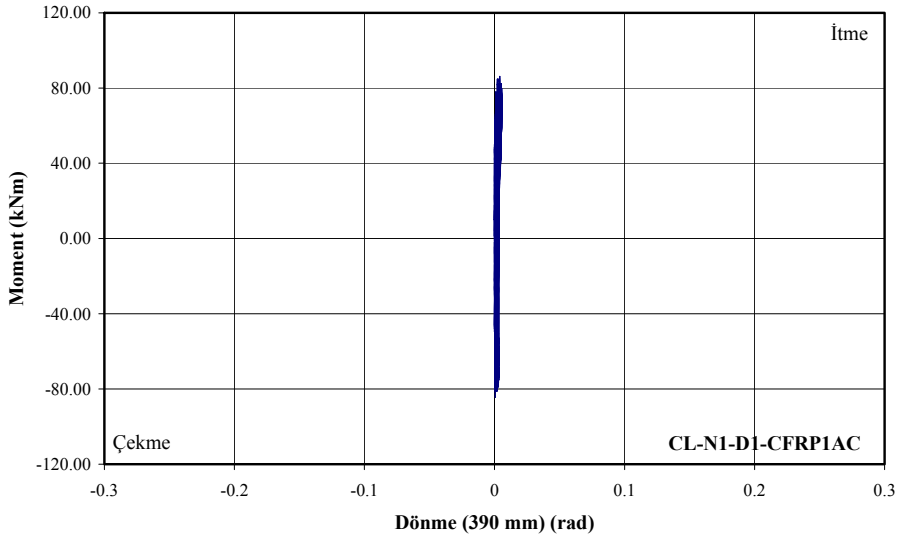
Şekil D.6: CL-N1-D0-CFRP3A numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

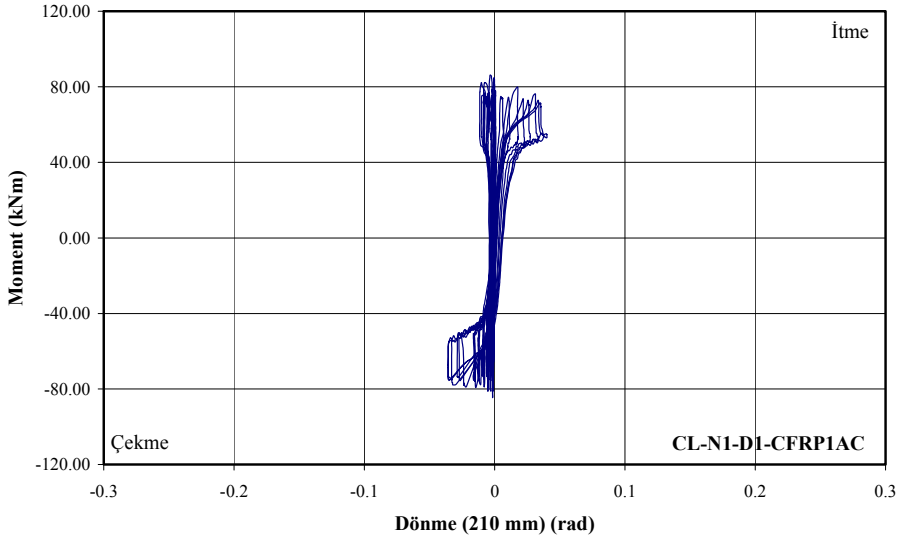


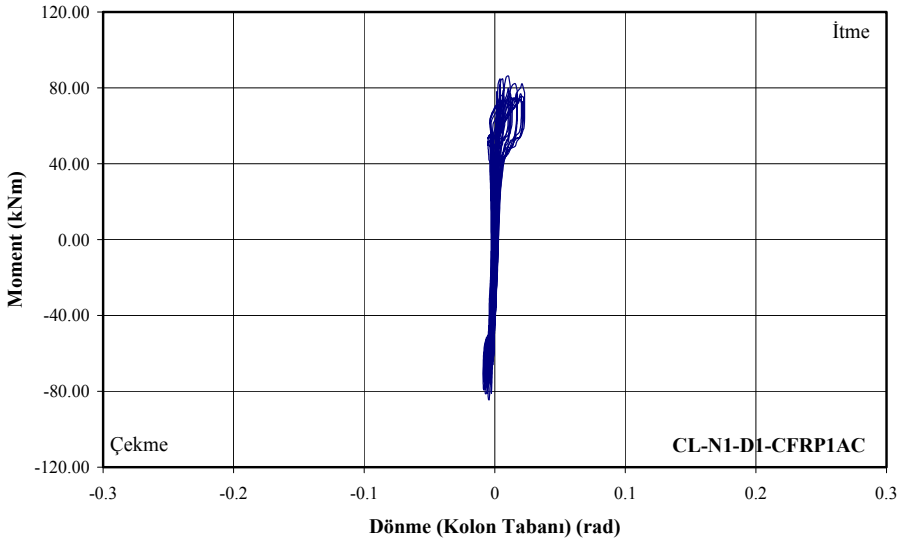




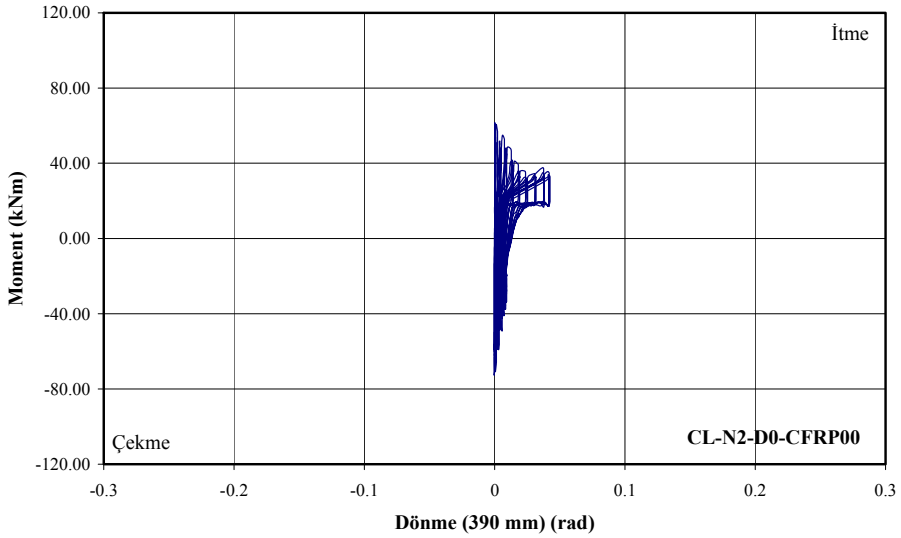
Şekil D.7: CL-N1-D1-CFRP1A numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

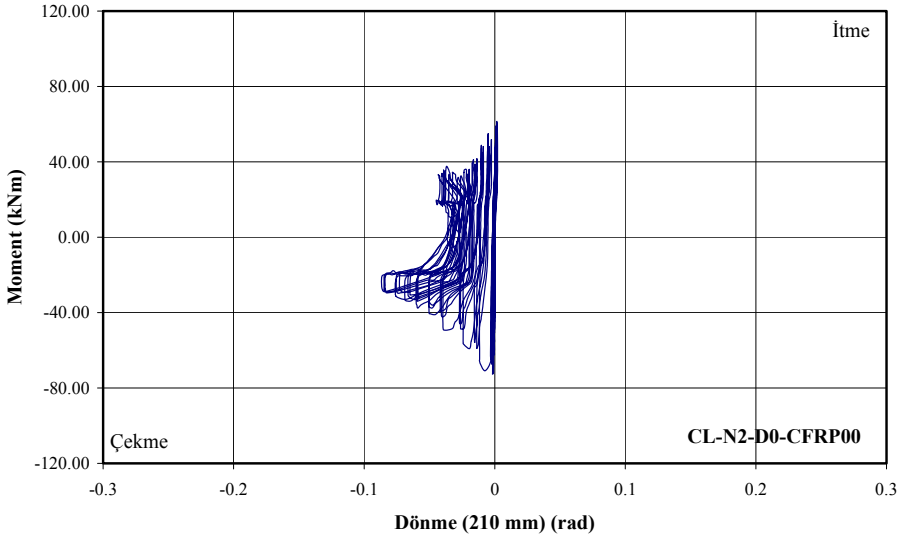


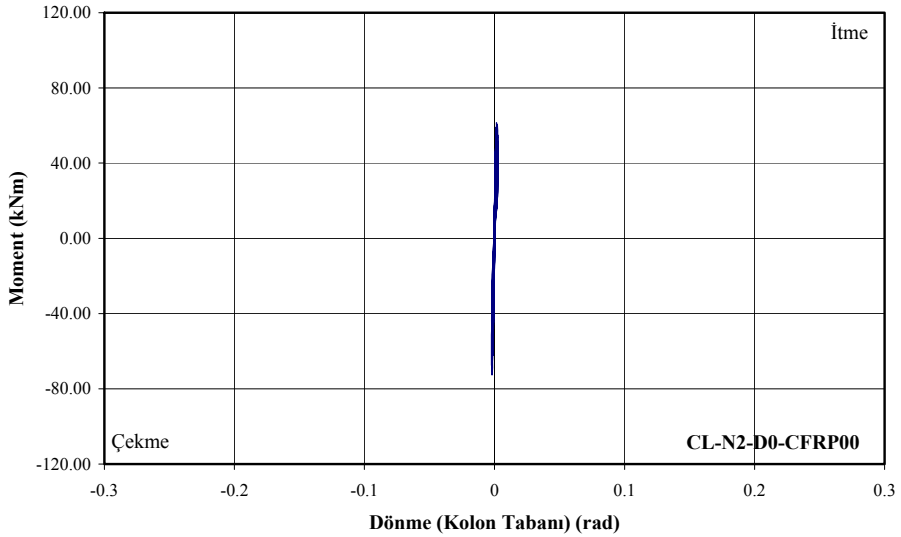




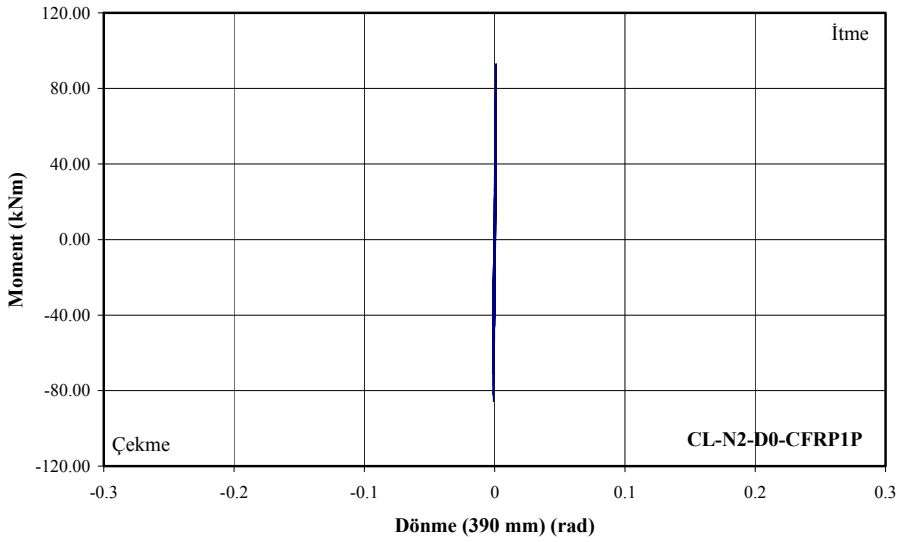
Şekil D.8: CL-N1-D1-CFRP1AC numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

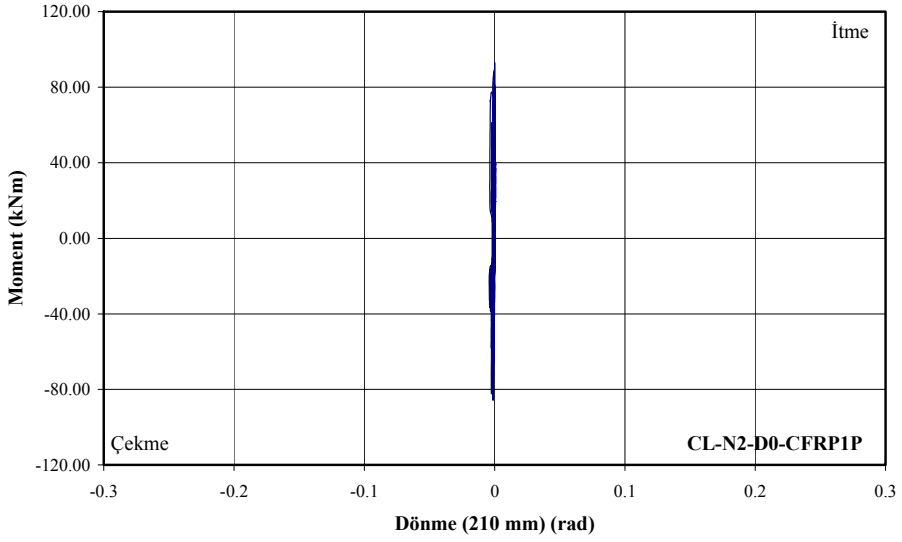


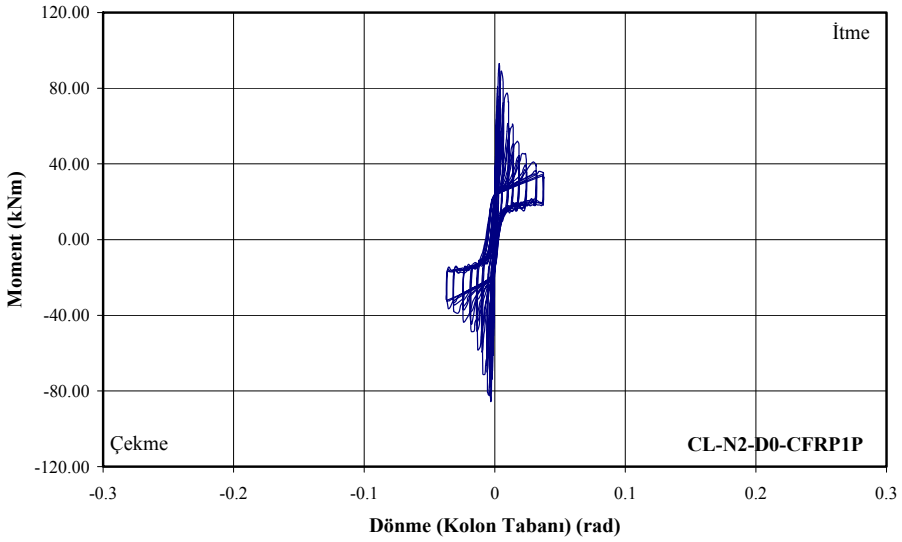




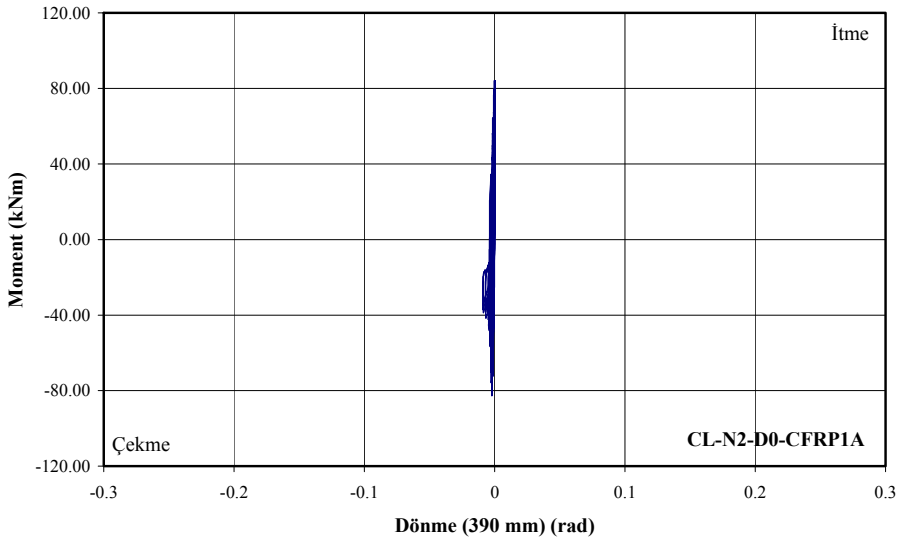
Şekil D.9: CL-N2-D0-CFRP00 numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

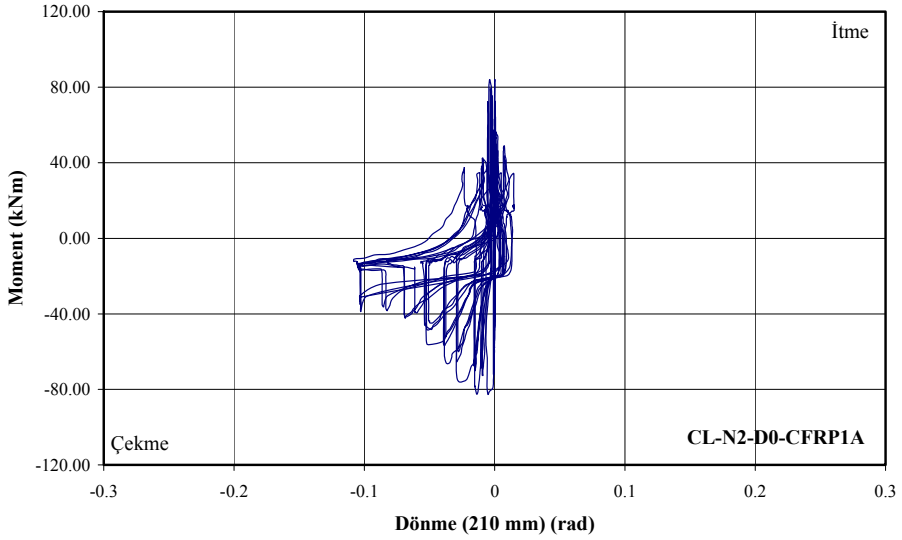


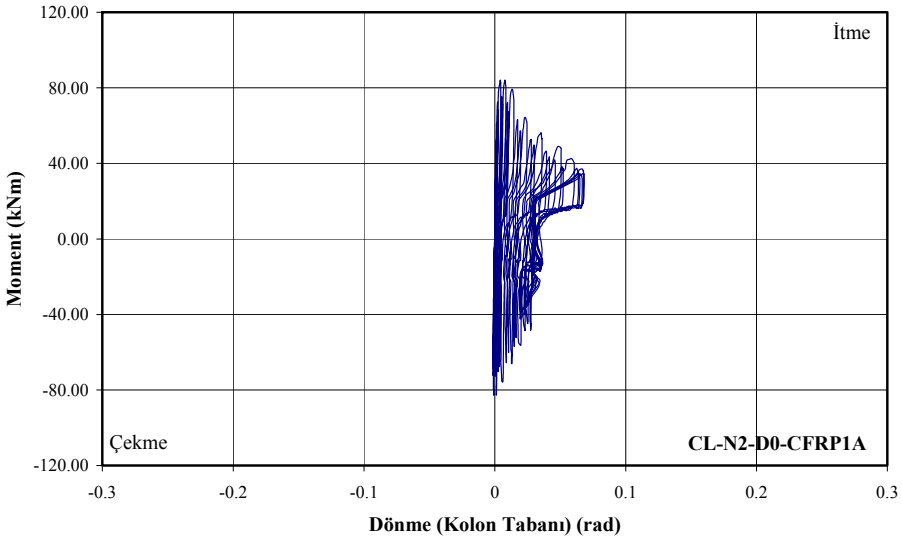




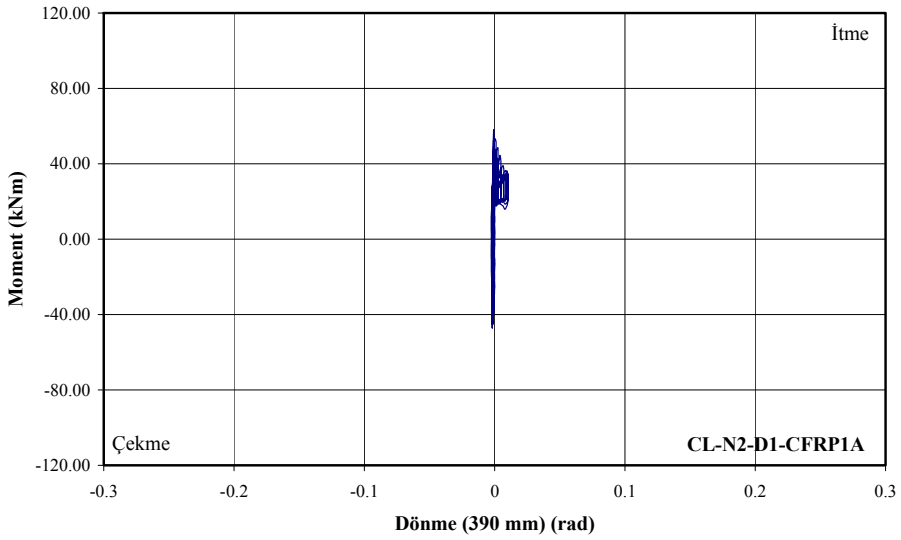
Şekil D.10: CL-N2-D0-CFRP1P numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

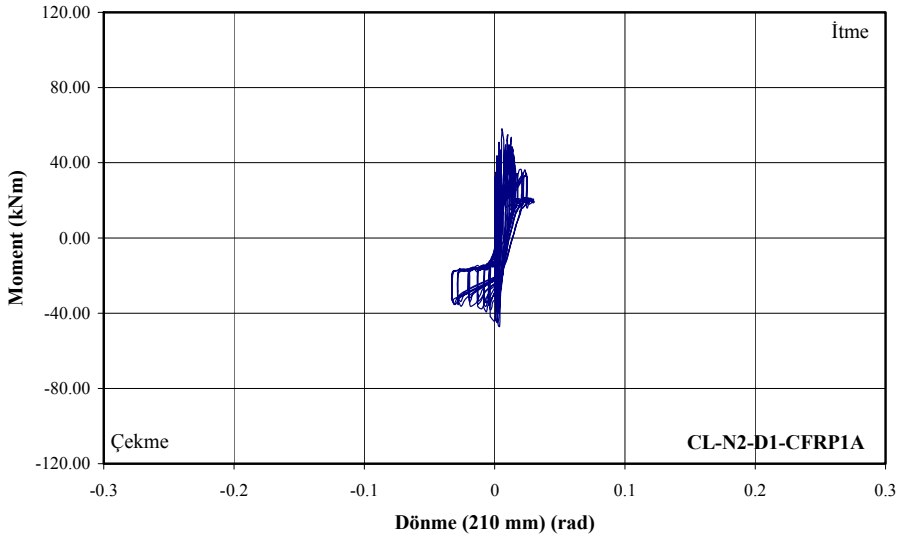


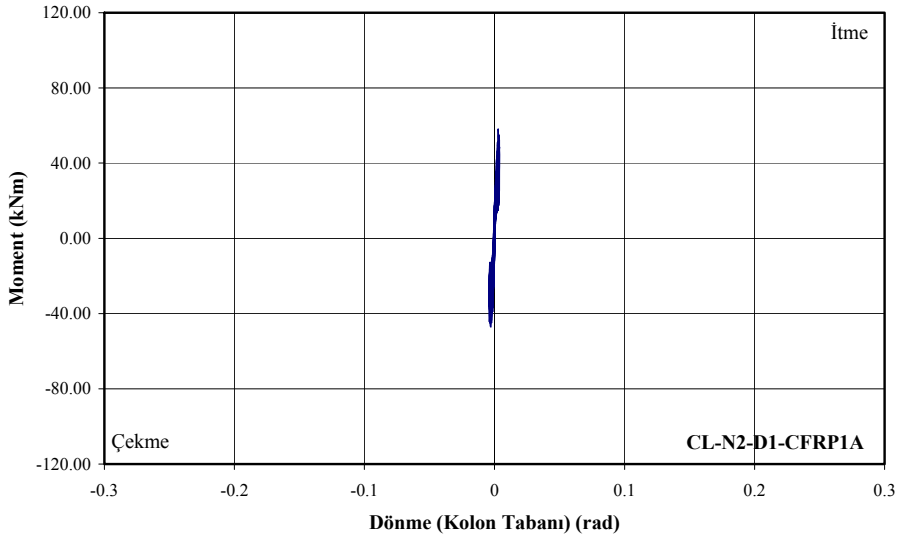




Şekil D.11: CL-N2-D0-CFRP1A numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

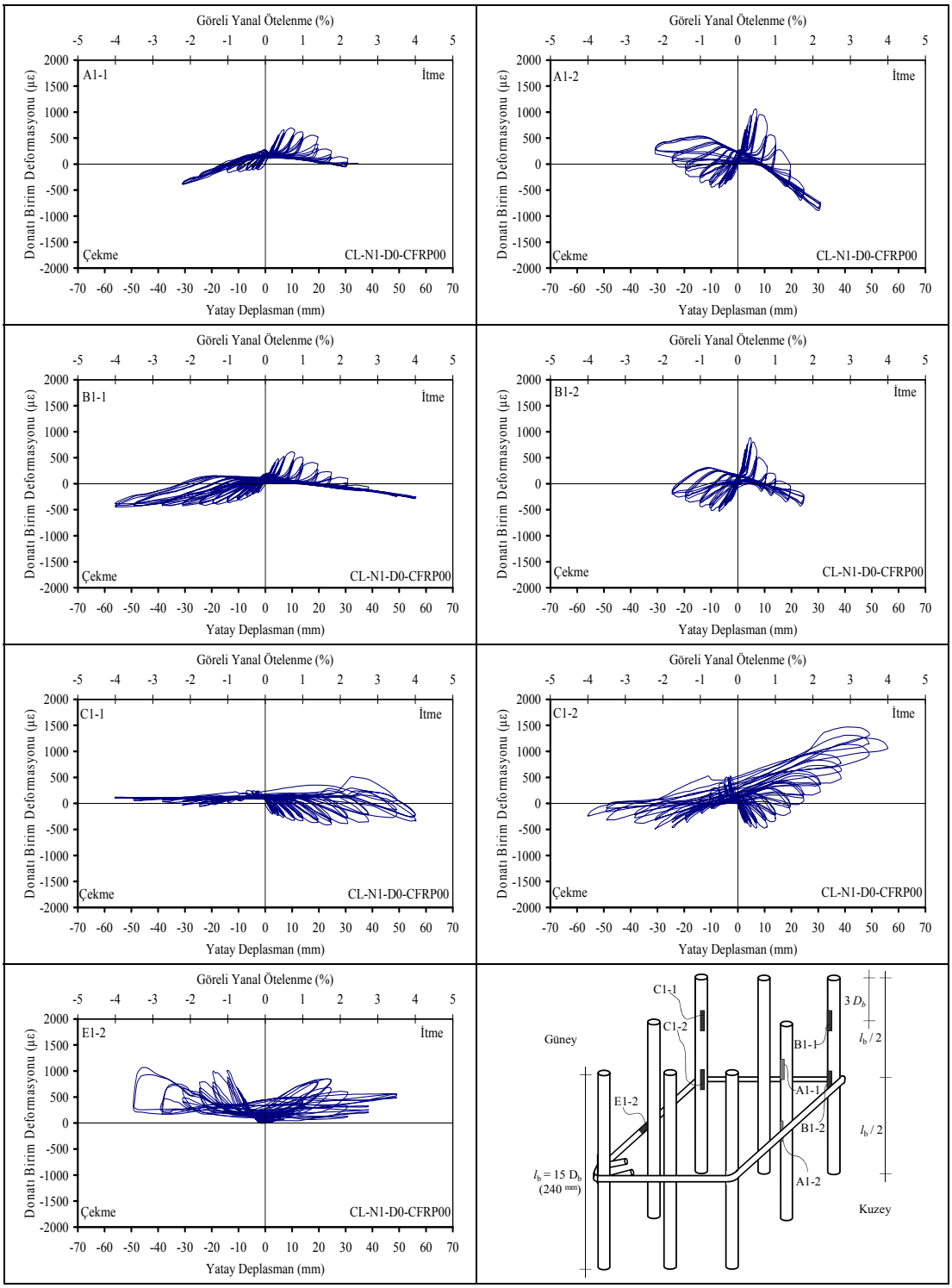




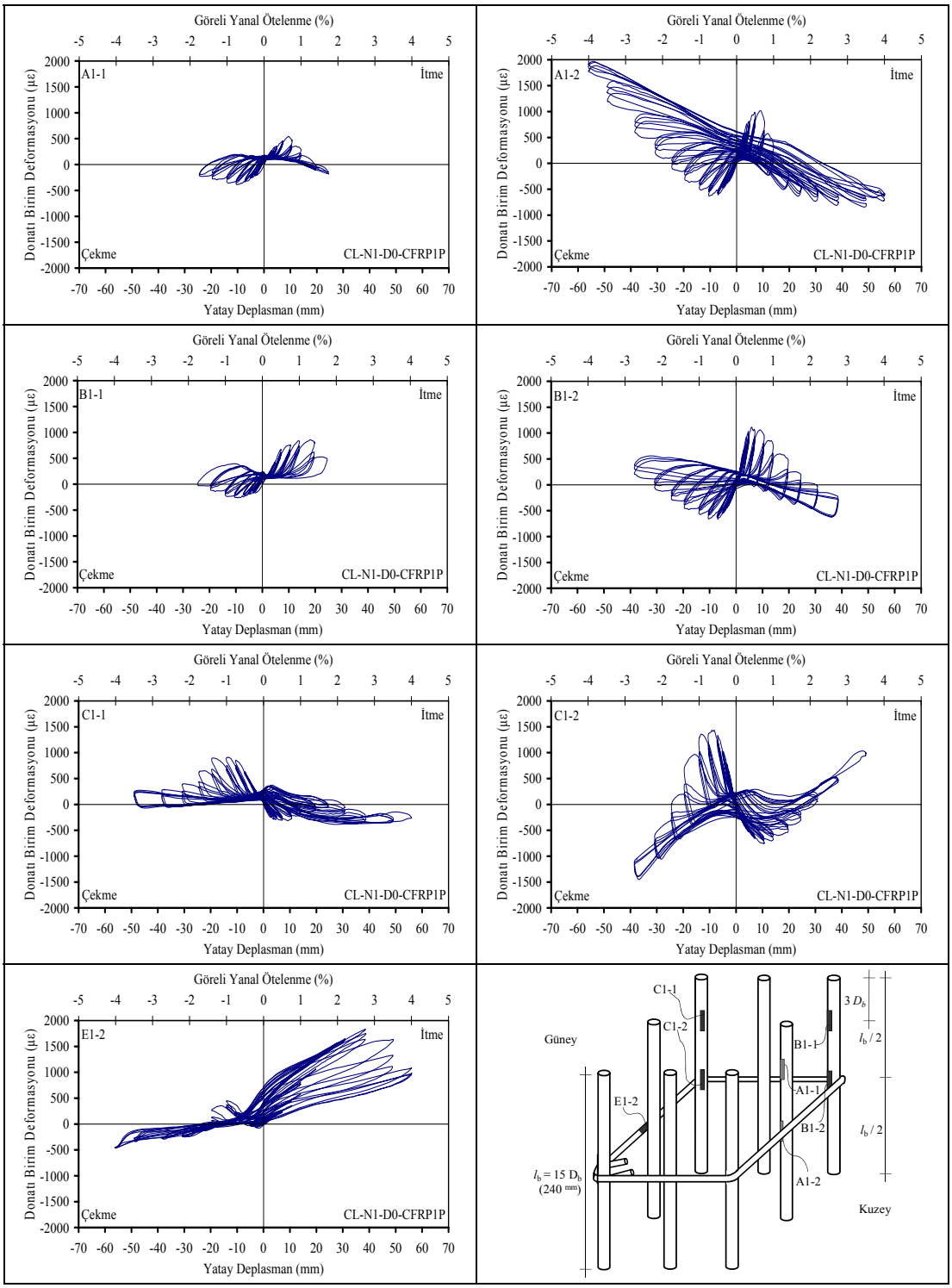


Şekil D.12: CL-N2-D1-CFRP1A numunesine ait moment-dönme ilişkisi grafikleri

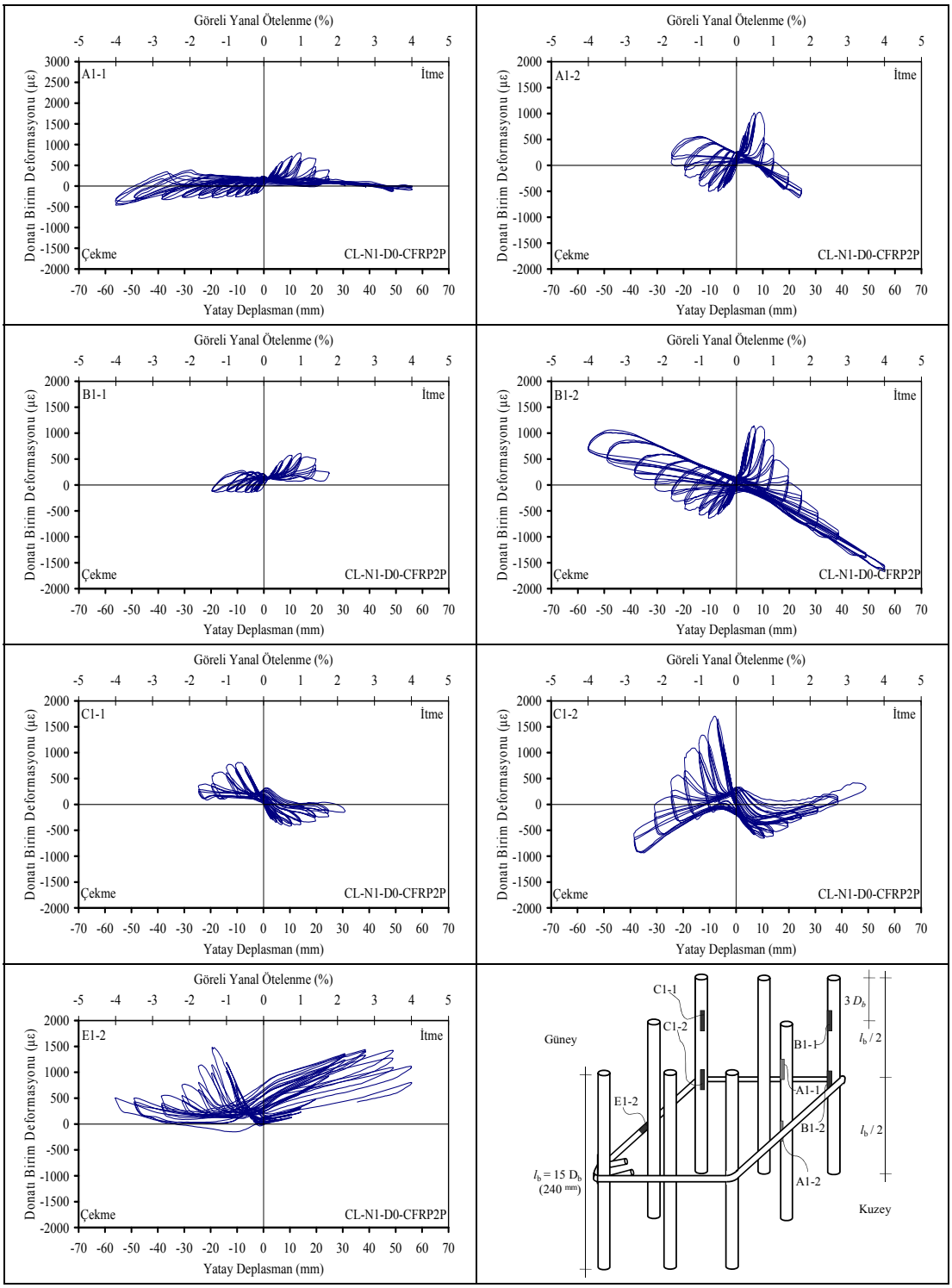
Ek E



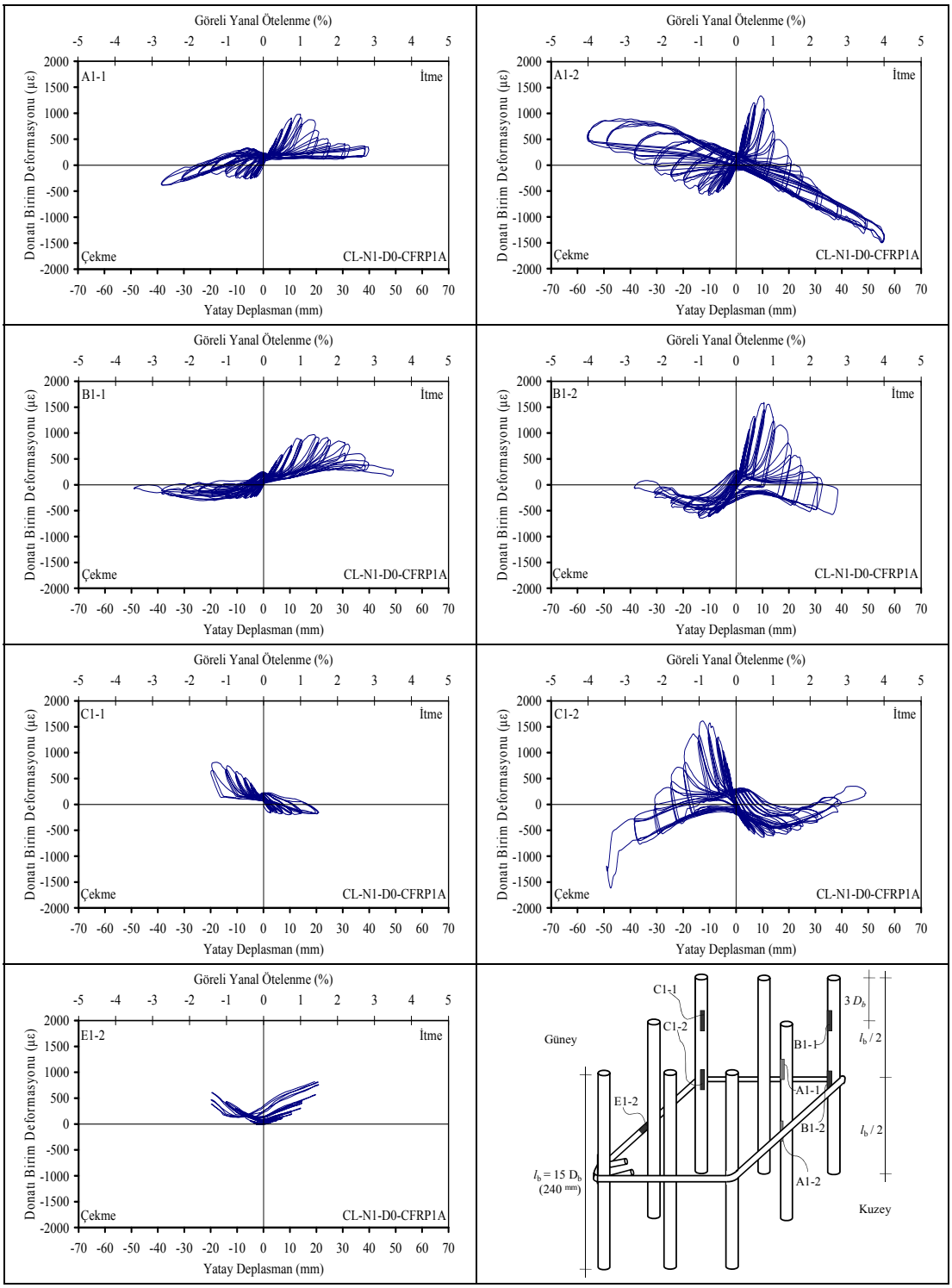
Şekil E.1: CL-N1-D0-CFRP00 numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



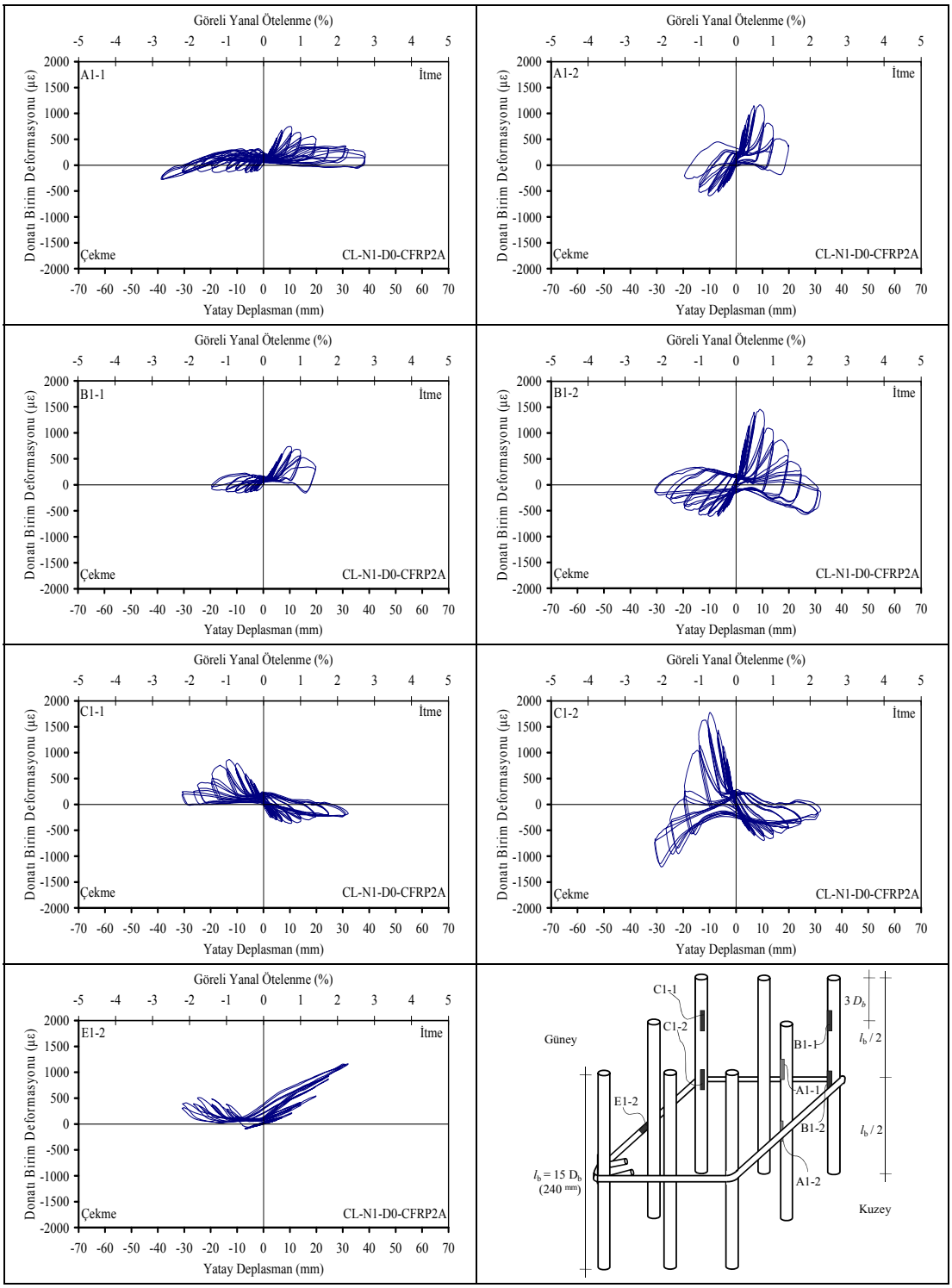
Şekil E.2: CL-N1-D0-CFRP1P numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



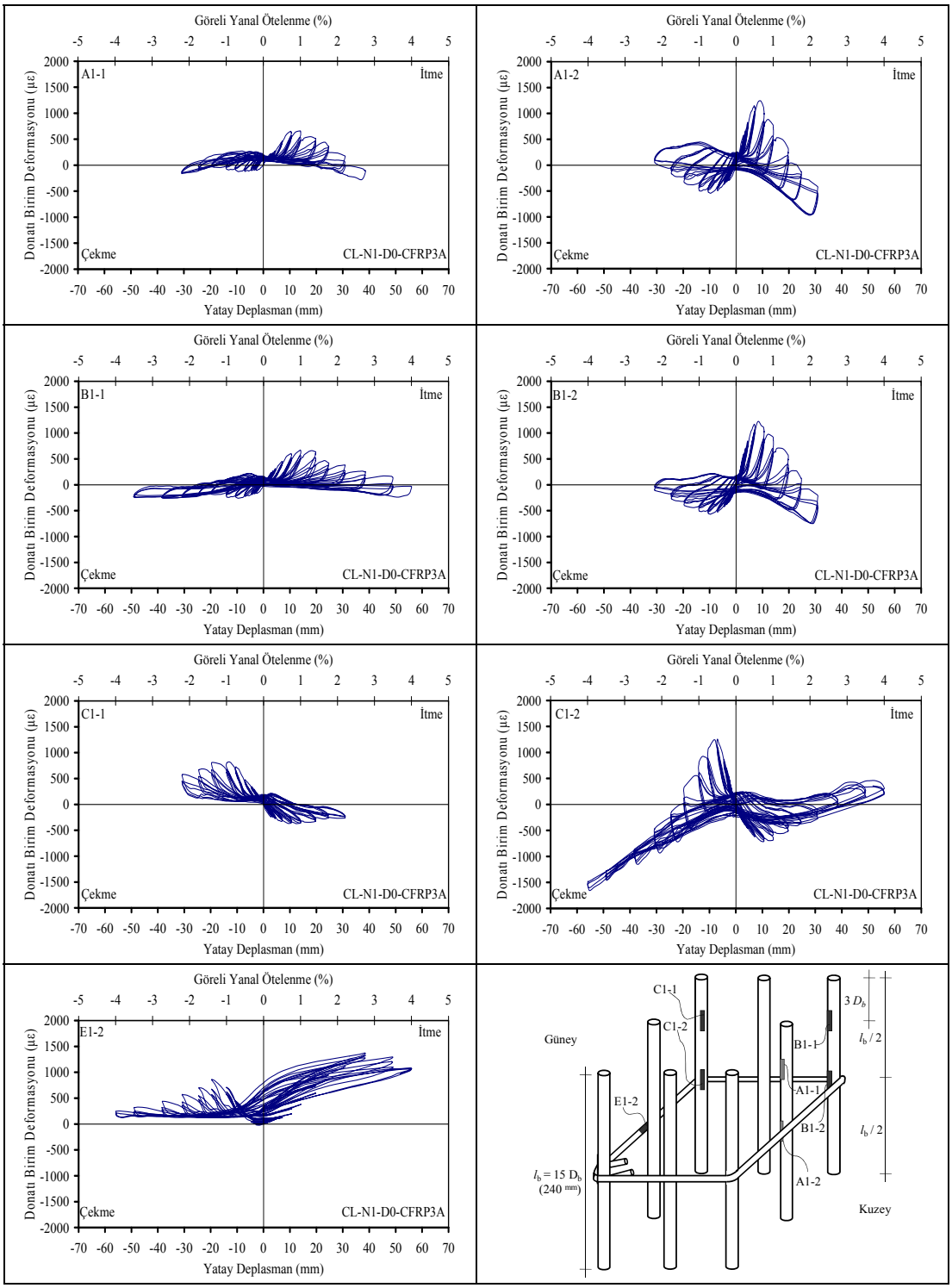
Şekil E.3: CL-N1-D0-CFRP2P numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



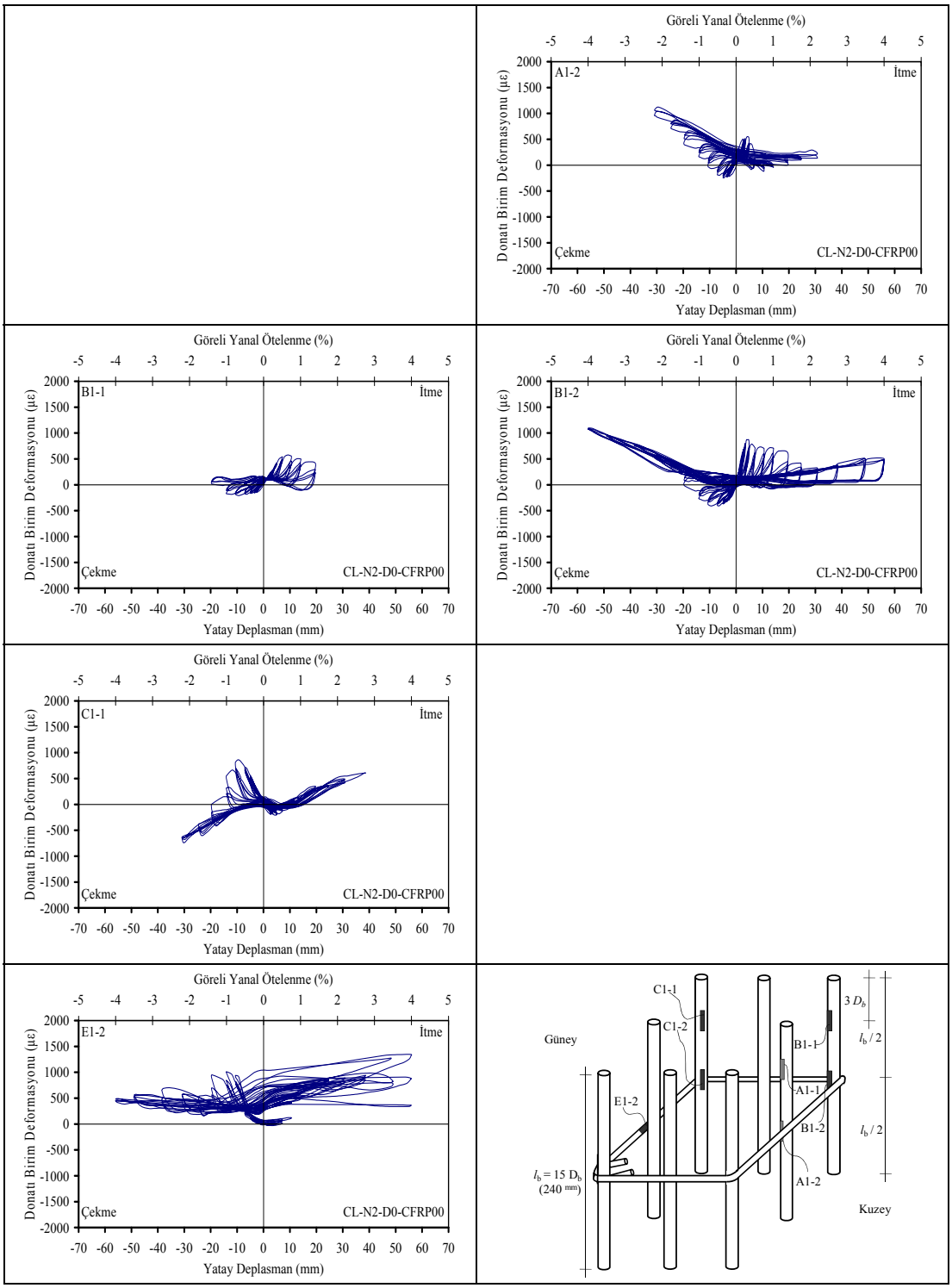
Şekil E.4: CL-N1-D0-CFRP1A numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



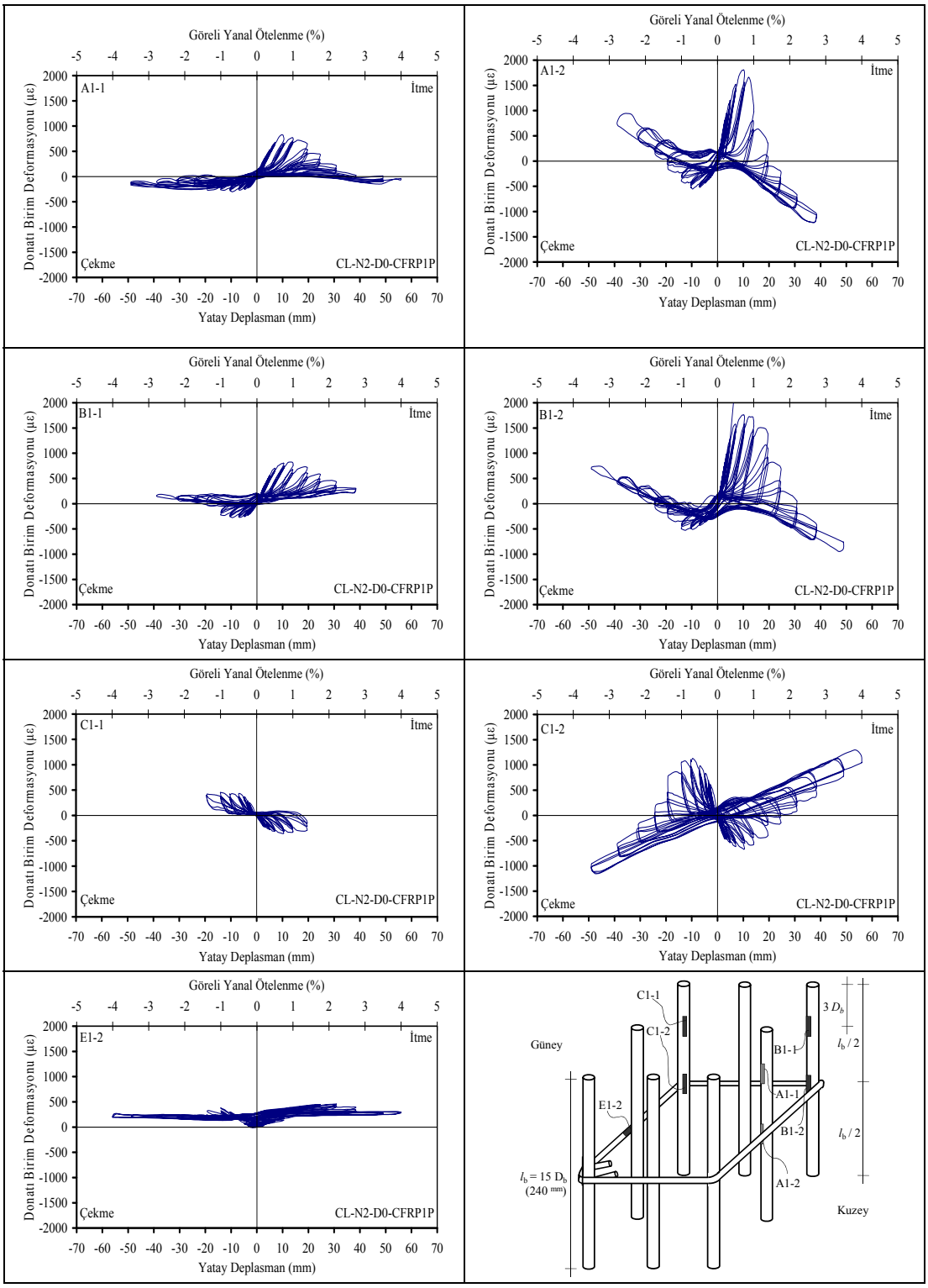
Şekil E.5: CL-N1-D0-CFRP2A numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



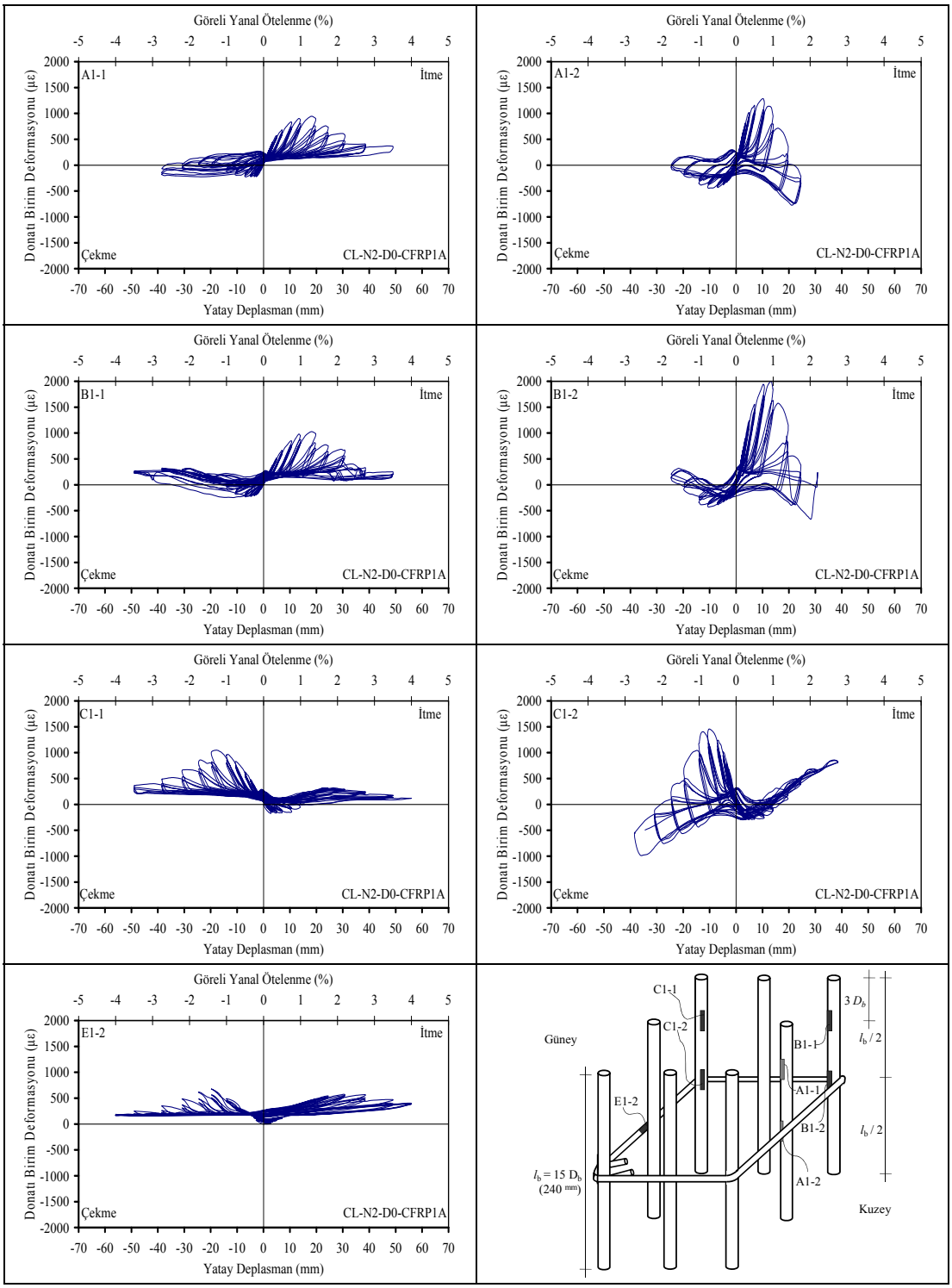
Şekil E.6: CL-N1-D0-CFRP3A numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



Şekil E.7: CL-N2-D0-CFRP00 numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



Şekil E.8: CL-N2-D0-CFRP1P numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri



Şekil E.9: CL-N2-D0-CFRP1A numunesine ait boy donatı-birim deformasyon grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Yalova'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Yalova'da tamamladı. 1997 yılında, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde balşladığı lisans öğrenimini, 2001 yılında tamamlayıp, İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilimdalında başladığı yüksek lisans öğrenimini, 2004 yılında tamamlayarak inşaat yüksek mühendisi ünvanını almaya hak kazandı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilimdalında, doktora öğrenimine başladı.

2001 yılında, lisans mezuniyetini takip eden öğrenim dönemi ile birlikte, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde, araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı görevi sürdürmektedir.