Paslanmaya Maruz Kalmış Betonarme Kolonlarda Donatı Sıyrılma Hesabı İçin Deneye Dayalı Bir Modelin Geliştirilmesi

Program Kodu: 3501

Proje No: 116M162

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Hakan YALÇINER

Araştırmacı(lar):
Dr. Öğr. Üyesi Atila Kumbasaroğlu

Bursiyer(ler):
Ahmet İhsan Turan, Enis Doğru, Mehmet Mermit Fırat, Aqludin Karimi, Rameen Kohistani, Alper Çelik.

Mayıs 2020
ANKARA

ÖNSÖZ

Bu çalışma deprem kuşağında yer alan ülkemizde korozyona maruz kalmış betonarme yapıların sismik performanslarının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlaması amacı ile gerçekleştirilmiştir. Korozyona maruz kalmış betonarme yapılarının sismik performans seviyelerinin belirlenmesinde korozyonun etkisi genel olarak yalnızca donatı çapındaki azalma olarak göz önüne alınması yapının gerçek sismik performansının belirlenmesine sınırlamalar getirmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile; farklı beton sınıfları, eksenel yük ve pas oranları için deneye tabi tutulan tam ölçekli betonarme kolon sonuçlarından elde edilen verilerin korozyona maruz kalmış betonarme yapılarının değerlendirilmesinde daha doğru bir yaklaşımın sağlanacağı düşünülmektedir. Çalışma kapsamının genişletilerek yalnızca mikroskop aracılığı ile ve hiçbir tahribatlı deney gerçekleştirilmeden korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının sismik performans seviyelerinin birincil korozyon çatlak genişliğine bağı olarak ilk kez tahmin edilmesine olanak sağlayan araştırma ekibime teşekkür ederim. Aynı şekilde çalışma kapsamında özellikle yükleme deneyleri sonrası betonarme kolonlarının kırılarak ve içerisinden tüm betonarme donatılarının çıkartılarak gerçek korozyon oranlarının elde edilmesi ile oldukça zor bir çalışmanın gerçekleştirilmesine katkı sağlayan TÜBİTAK kurumumuza ve değerli çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca özellikle; bu projenin gerçekleştirilmesi için sıfırdan bir laboratuvarın kurulmasına ve ardından geliştirilmesine katkı sağlanmasından dolayı yeni bir dönem yapı mekaniği laboratuvarımızda başlamıştır. Katkılarından ve desteklerinden dolayı projenin kabulüne onay sağlayan panelistlerimize teşekkür ederiz.

Proje Yürütücüsü

Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... İİ
İÇİNDEKİLER ..... İİİ
ŞEKİL LİSTESİ V
TABLO LİSTESİ ..... Vİİİ
SİMGELER VE KISALTMALAR ..... İX
ÖZET ..... Xİ
ABSTRACT ..... Xİİİ
BÖLÜM I 1
1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Amacı *4*
1.2. Çalışmanın Önemi *5*
BÖLÜM II 7
2. ADERANS-DONATI SIYRILMASI ÜZERİNE GELİŞTİRİLEN MEVCUT MODELLER 7
2.1. Korozyona Maruz Kalmamış Betonarme Donatıları İçin Geliştirilen Modeller *7*
2.1.1. Otani ve Sozen (1972) donatı sıyrılma modeli *7*
2.1.2. Alsiwat and Saatcioglu (1992) donatı sıyrılma modeli *8*
2.1.3. Sezen ve Setzler (2008) donatı sıyrılma modeli *9*
2.2. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Donatıları İçin Geliştirilen Modeller *11*
2.2.1. Cabrera (1996) aderans modeli *11*
2.2.2. Auyeung vd. (2000) aderans modeli *11*
2.2.3. Lee vd. (2002) aderans modeli *12*
2.2.4. Fang vd. (2004) aderans çalışması *13*
2.2.5. Chung vd. (2008) aderans modeli *14*
2.2.6. Yalciner vd. (2012b) aderans modeli *15*
2.2.7. Chung vd. (2004) aderans boyundaki değişkenlik *18*
BÖLÜM III 19
3. DENEYSEL PROGRAM 19
3.1. Malzeme Özellikleri *19*
3.1.1. Geleneksel betonarme donatılarının mekanik özellikleri *19*
3.1.2. Paslandırılmış betonarme donatılarının mekanik özellikleri *19*
3.2 Betonarme Kolonlarının Kesit Özellikleri *22*
3.3 Betonarme Donatı Montaj İşleri: Donatı kesme, tartım, montaj ve bakır kabloların bağlanması *24*

3.4 Kalıp İşleri *37*
3.5. Beton Döküm İşleri ve Beton Özellikleri *38*
3.6. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi İçin Deney Düzeneği *41*
3.7. Deney Düzeneği ve Ölçümler *45*
BÖLÜM IV 54
4. DENEY SONUÇLARI 54
4.1. Elde Edilen Gerçek Korozyon Oranları ve Dağılımları *54*
4.2. Paslandırma Sonrası Birincil Korozyon Çatlak Haritaları *70*
4.2.1 Korozyon oranları ve birincil korozyon çatlak genişlikleri arasındaki ilişki *81*
4.3. Beton İçerisinde Paslandırılmış Betonarme Donatılarının Mekanik Özellikleri *93*
4.4. Yük-Deplasman Sonuçları *96*
4.5. Yer Değiştirme ve Enerji Bazlı Süneklik Oran Sonuçları *119*
4.6. Enerji Yutma Kapasite Sonuçları *124*
4.7. Betonarme Kolonları İçin Elde Edilen Rijitlik Değerleri *127*
4.8. Betonarme Kolonlarının Hasar İndeksleri *129*
4.9. Aderans-Sıyrılma Sonuçları *130*
BÖLÜM V 167
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 167
KAYNAKÇALAR 171
EKLER 176
EK.1: BETONARME KOLONLARININ YÜKLEME DENEYLERİNDEN SONRA KIRILARAK DONATILARIN ÇIKARTILMASI 176
EK.2: BETONARME KOLONLARI İÇİN BİRİNCİL ÇATLAK HARİTALARI 182
EK.3: BETONARME KOLONLARI İÇİN YÜKLEME SONRASI PLASTİK MAFSAL BOYUNCA ÇATLAK DESENLERİ 194
EK.4: BETONARME KOLON DONATILARINDAKİ ZAMAN-GERİNİM GRAFİKLERİ 206
EK.5: KOROZYONA MARUZ KALMIŞ BETONARME KOLANLARI İÇİN GELİŞTİRİLEN AMPİRİK MODELLERİN ÖZET SUNUMU 215
EK.6: PROJE KAPSAMINDA TAMAMLANAN VE DEVAM TEZLER 218
EK.7: PROJE KAPSAMINDA ÜRETİLEN BİLİMSEL YAYINLAR VE YAYILIMLAR 218
EK.8: PROJE KAPSAMINDAKİ YAYILIMLAR 219

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1: Alsiwat ve Saatcioglu (1992) donatı sıyrılma modeli. 8

Şekil 2. 2: Sezen ve Setzler (2008) donatı sıyrılma modeli. 9

Şekil 2. 3: Sezen ve Setzler (2008) donatı sıyrılma modeli-dönme. 10

Şekil 2. 4: Auyeung vd. (2000) aderans modeli. 12

Şekil 2. 5: Lee vd. (2002) aderans modeli. 13

Şekil 2. 6: Fang vd. (2004) deneysel aderans değerleri. 14

Şekil 2. 7: Chung vd. (2008) aderans kuvvet değerleri. 15

Şekil 2. 8: Yalciner vd. (2012b) aderans kuvvet değerleri: (a) w/c= 0.75; (b) w/c= 0.40. 17

Şekil 2. 9: Chung vd. (2004) aderans boyundaki değişkenlik. 18

Şekil 3. 1: 16 mm çapındaki geleneksel betonarme donatıların mekanik özellikleri 19

Şekil 3. 2: Paslandırılmış ve 16 mm çapındaki donatıların mekanik özellikleri: (a): C8 betonarme kolonundan çıkartılan donatılar; (b) C20 betonarme kolonundan çıkartılan donatılar; (c) C30 betonarme kolonundan çıkartılan donatılar. 22

Şekil 3. 3: Betonarme kolonlarının kesit özellikleri: (a) kolon kesit özellikleri; (b) kiriş ve temel kesit özellikleri. 23

Şekil 3. 4: Tartım öncesi hazır hale getirilen betonarme donatıları: (a) kiriş kafesleri; (b) boyuna ve sargı donatıları. 24

Şekil 3. 5: Üç farklı beton sınıfı için tartım öncesi sıralanan betonarme donatıları 24

Şekil 3. 6: Betonarme donatılarının tartılması: (a) etriye; (b) boyuna donatı. 25

Şekil 3. 7: Betonarme kolon donatılarının kodlandırılması: (a) renkli paslanmaz bakır kabloların hazırlanması; (b) bakır kabloların boyuna donatılara sarılması; (c) renkli bakırlar ve yükleme düzleme için bakış yönü. 29

Şekil 3. 8: Betonarme temel ve kirişlerin yalıtım işleri: (a) plastik boruların temel ve kiriş boyuna donatılarına yerleştirilmesi; (b) plastik borularının elektrik banttı ile sarımı; (c) montajı tamamlanan kafesler. 31

Şekil 3. 9: Donatı montaj işlemleri: (a) bakış açısına göre boyuna donatılarının bağlanması; (b) sargı donatılarının bağlama öncesi kod numaralarına göre sıralandırılması. 32

Şekil 3. 10: Pozitif yüklemeyi sağlayacak olan bakır kabloların bağlanması: (a) boyuna donatılara bağlama; (b) kolon boyunca sargı donatılarına bağlanması. 34

Şekil 3. 11: Üç farklı beton sınıfında ve iki farklı eksenel yükleme için montajı tamamlanan betonarme kolon donatıları. 37

Şekil 3. 12: Betonarme kolonları için kalıp işleri. 37

Şekil 3. 13: Beton döküm işleri: (a) C8; (b) C20; (c) C30. 39

Şekil 3. 14: Paslandırma süreci için kalıptan çıkartılan betonarme kolonları: (a) C8; (b) C20; (c) C30. 40

Şekil 3. 15: Betonarme kolonlarının paslandırma havuzuna taşınması. 41

Şekil 3. 16: Çalışma kapsamında kullanılan paslandırma havuzu. 42

Şekil 3. 17: Paslandırma düzeneği için şematik çizim: (a) Yan görünüş; (b) perspektif detay. 43

Şekil 3. 18: Faraday Kanunu'na göre gerçek pas oranlarının karşılaştırılması (Yalciner vd. 2012b). 44

Şekil 3. 19: Yükleme ve ölçüm düzeneğinin kurulması-deneme numunesi: (a) kolon çelik boğçalama işlemleri; (b) eğrilik ölçerlerin yerleştirilmesi. 45

Şekil 3. 20: Deney düzeneği: (a), Yan görünüş (b) ön görünüş, (c) gerinim pulu ve eğrilik ölçerin düzen ve konumu, (d) deneysel düzenek, (e) ölçüm düzeneği için detay resim. 52

Şekil 3. 21: Yükleme deneyleri için kullanılan yükleme programı. 53

Şekil 4. 1: Yükleme deneyleri sonrası betonarme kolonlarının kırılması…….54

Şekil 4. 2: Betonarme donatılarından korozyon ürünlerinin arındırılması: (a) etriye ve boyuna donatılar için kimyasal temizleme işleri; (b) mekanik temizleme işleri. 55

Şekil 4. 3: C8 betonarme kolonları: Boyuna donatılardaki korozyon dağılımları. 63

Şekil 4. 4: C8 betonarme kolonları: Sargı donatılarındaki korozyon dağılımları. 64

Şekil 4. 5: C20 betonarme kolonları: Boyuna donatılardaki korozyon dağılımları. 65

Şekil 4. 6: C20 betonarme kolonları. Sargı donatılarındaki korozyon dağılımları. 66

Şekil 4. 7: C30 betonarme kolonları. Boyuna donatılardaki korozyon dağılımları. 67

Şekil 4. 8: C30 betonarme kolonları: Sargı donatılarındaki korozyon dağılımları. 68

Şekil 4. 9: Birincil korozyon çatlak genişlikleri: (a) çatlağın okunduğu kolon yüzeyi (çekme bölgesi); (b) mikroskop ile ölçüm; (c) çatlağın okunduğu donatı aralığı. 74

Şekil 4. 10: Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası C8 betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında birincil çatlak genişlikleri: (a) C5 kolonu; (b) C10 kolonu. 76

Şekil 4. 11: Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası C20 betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında birincil çatlak genişlikleri: (a) C19 kolonu; (b) C20 kolunu. 78

Şekil 4. 12: Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası C30 betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında birincil çatlak genişlikleri: (a) C29 kolunu; (b) C30 kolonu. 80

Şekil 4. 13: Kesilen donatılardan elde edilen korozyon oranları ve karşılık gelen birincil korozyon çatlak genişlik dağılımları. 81

Şekil 4. 14: C8 betonarme kolonları için ΔA_s'ye karşılık gelen birincil çatlak genişlik değerleri. 83

Şekil 4. 15: C20 ve C30 betonarme betonarme kolonları için ΔA_s'ye karşılık gelen birincil çatlak genişlik değerleri. 83

Şekil 4. 16: Betonarme kolon donatılarındaki ortalama kesit kaybına karşılık gelen kesilmiş donatılardaki ortalama kesit kaybı.....85

Şekil 4. 17: Eşit enerji tüketimine karşı gelen çatı katı ötelenmeleri: (a) C8-%20; (b) C8-%40; (c) C20-%20; (d) C20-%40; (e) C30-%40. 88

Şekil 4. 18: Çatı katı ötelemesine karşı tüketilen toplam enerji: (a) C8, (b) C20 ve C30. 90

Şekil 4. 19: Passız betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasiteleri: (a) C8, (b) C20 ve C30. 91

Şekil 4. 20: Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasiteleri: (a) $C8_{7-9}$, $C20_{7-9}$, $C30_{6-9}$, (b) $C8_{10}$, $C20_{10}$, $C30_{10}$. 92

Şekil 4. 21: Betonarme donatılarının mekanik özelikleri: (a) C8 betonarme kolonlarından çıkartılan donatılar (B.K.Ç.D); (b) C20 B.K.Ç.D; (c) C30 B.K.Ç.D. 96

Şekil 4. 22: C8 betonarme kolonları için histerik çevirim sonuçları. 101

Şekil 4. 23: C20 betonarme kolonları için histerik çevirim sonuçları. 106

Şekil 4. 24: C30 betonarme kolonları için histerik çevirim sonuçları. 109

Şekil 4. 25: Üç farklı beton sınıfı için meydana gelen çatlak desenleri. 110

Şekil 4. 26: Korozyonun plastik mafsal boyu ve bölgesi üzerine etkisi. 111

Şekil 4. 27: İdealleştirilmiş yük-deplasman eğrisi. 112

Şekil 4. 28: Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen akma yük değerlerinin deneysel değerlere oranı. 117

Şekil 4. 29: Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen nihai yük değerlerinin deneysel değerlere oranı. 118

Şekil 4. 30: Ma vd. (2012) ve Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen süneklik oran değerlerinin deneysel değerlere oranı. 121

Şekil 4. 31: Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen enerji tüketme değerlerinin deneysel değerlere oranı. 125

Şekil 4. 32: Normalize edilmiş rijitlikliklerdeki azalımlar. 127

Şekil 4. 33: Ortalama ikincil rijitlikler. 128

Şekil 4. 34: Hasar indeksi. 130

Şekil 4. 35: Zaman-gerinim grafikleri: (a) $C8_{10}$; (b) $C30_{10}$. 132

Şekil 4. 36: Donatı boyunca gerilme dağılımı. 133

Şekil 4. 37: Aderans gerilmesi hesabı için durum şartları. 134

Şekil 4. 38: C8 betonarme kolonlarına ait aderans-sıyrılma grafikleri: (a) $C8_1$; (b) $C8_2$; (c) $C8_3$; (d) $C8_4$; (e) $C8_5$; (f) $C8_6$; (g) $C8_7$; (h) $C8_8$; (i) $C8_9$; (j) $C8_{10}$. 140

Şekil 4. 39: C20 betonarme kolonlarına ait aderans-sıyrılma grafikleri: (a) $C20_1$; (b) $C20_2$; (c) $C20_3$; (d) $C20_4$; (e) $C20_5$; (f) $C20_6$; (e) $C20_7$; (f) $C20_8$; (e) $C20_9$; (f) $C20_{10}$. 145

Şekil 4. 40: C30 betonarme kolonlarına ait aderans-sıyrılma grafikleri: (a) $C30_6$; (b) $C30_7$; (c) $C30_8$; (d) $C30_9$; (e) $C30_{10}$. 148

Şekil 4. 41: Geliştirilen donatı aderans-sıyrılma modeli. 153

Şekil 4. 42: C8 betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri: (a) $C8_1$; (b) $C8_2$; (c) $C8_3$; (d) $C8_4$; (e) $C8_5$; (f) $C8_6$; (g) $C8_7$; (h) $C8_8$; (i) $C8_9$; (j) $C8_{10}$. 158

Şekil 4. 43: C20 betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri: (a) $C20_2$; (b) $C20_3$; (c) $C20_4$; (d) $C20_5$; (e) $C20_6$; (f) $C20_7$; (g) $C20_8$; (h) $C20_9$; (ı) $C20_{10}$. 163

Şekil 4. 44: C30 betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri: (a) $C30_6$; (b) $C30_7$; (c) $C30_8$; (d) $C30_9$; (e) $C30_{10}$. 165

TABLO LİSTESİ

Tablo 3. 1: C8 betonarme kolonları için paslandırma öncesi gravimetrik değerleri (gr). 26

Tablo 3. 2: C20 betonarme kolonları için paslandırma öncesi gravimetrik değerleri (gr). 27

Tablo 3. 3: C30 betonarme kolonları için paslandırma öncesi gravimetrik değerleri (gr). 28

Tablo 3. 4: Beton numulerinin silindir beton basınç dayanım sonuçları. 41

Tablo 4. 1: C8 betonarme kolonlarındaki korozyon oranı (boyuna ve sargı donatılarının toplam kütleleri)…….57

Tablo 4. 2: C8 betonarme kolonlarındaki boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranı (yalnızca boyuna ve sargı donatılarının kütleleri). 58

Tablo 4. 3: C20 betonarme kolonlarındaki korozyon oranı (boyuna ve sargı donatılarının toplam kütleleri). 59

Tablo 4. 4: C20 betonarme kolonlarındaki boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranı (yalnızca boyuna ve sargı donatılarının kütleleri). 60

Tablo 4. 5: C30 betonarme kolonlarındaki korozyon oranı (boyuna ve sargı donatılarının toplam kütleleri). 61

Tablo 4. 6: C30 betonarme kolonlarındaki boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranı (yalnızca boyuna ve sargı donatılarının kütleleri). 62

Tablo 4. 7: Ortalama çatlak genişliği: Kesilmiş, kesilmemiş tek bir donatıdaki kesit kaybı ve karşılık gelen kolondaki ortalama donatı kesit kaybı. 82

Tablo 4. 8: Vision 2000 performans seviyeleri ve karşılık gelen hasar durumları (Vision 2000, 1995). 85

Tablo 4. 9: Mekanik donatı özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan betonarme donatılarının gravimetrik değerleri-Beton içerisinde paslandırılan betonarme donatıları. 94

Tablo 4. 10: Yük-deplasman ve enerji yutma kapasite sonuçları. 113

Tablo 4. 11: Aderans-sıyrılma değerleri. 149

Tablo 4. 12: Donatı birim uzunluğuna karşılık gelen aderans-sıyrılma değerleri. 150

Tablo 4. 13: Moment-eğrilik sonuçları. 166

SİMGELER VE KISALTMALAR

F_{y0}: Paslanmamış betonarme kolonlarının akma dayanımı,

F_{u0}: Paslanmamış betonarme kolonlarının nihai dayanımı,

F_{yc}: Paslanmış betonarme kolonlarının akma dayanımı,

F_{uc}: Paslanmış betonarme kolonlarının nihai dayanımı,

μ_0: Paslanmamış betonarme kolonlarının enerji bazlı süneklik oranı,

μ_c: Paslanmış betonarme kolonlarının enerji bazlı süneklik oranı,

μ_D: Deplasman bazlı süneklik oranı,

E_c: Paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri,

E_0: Paslanmamış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri,

CL: Gerçek korozyon oranı,

CL_L: Boyuna donatılardaki gerçek korozyon oranı,

CL_S: Sargı donatılarındaki gerçek korozyon oranı,

CL_{Lp}: Pozitif yükleme doğrultusundaki betonarme donatılarındaki korozyon oranı,

CL_{Lpmak}: Betonarme donatılarındaki maksimum korozyon oranı,

CL_{Ln}: Pozitif yükleme doğrultusundaki betonarme donatılarındaki korozyon oranı,

C8: 9.47 MPa karakteristik silindir basınç dayanımına sahip betonarme kolonları,

C20: 27.79 MPa karakteristik silindir basınç dayanımına sahip betonarme kolonları,

C30: 37.46 MPa karakteristik silindir basınç dayanımına sahip betonarme kolonları,

M= Monotonik yükleme,

Δm: Donatı boyuna düşen ortalama birim kütle kaybı,

m: Donatı boyuna düşen birim birinci kütle,

m′: Donatı boyuna düşen son kütle,

ΔA_s: Gravimetrik çalışma sonucunda hesaplanan kesit alanındaki kayıp,

W_{cr}: Birincil korozyon çatlak genişliği,

η= Eksenel yük oranı,

Δ_u: Maksimum yükün %85'ine karşılık gelen yerdeğiştirme,

Δ_y: Akma dayanıma karşılık gelen yerdeğiştirme,

E= Toplam enerji kapasitesi,

K_{s0}: Paslanmamış betonarme kolonlarının ortalama normalize edilmiş ikincil rijitlikleri,

K_{sc}: Paslanmış betonarme kolonlarının ortalama normalize edilmiş ikincil rijitlikleri,

D_i: Kolonlarının hasar seviyeleri,

δ_m: Sismik yükler etkisi altında maksimum deformasyon,

δ_u: Monotonik yükler etkisi altında nihai deformasyon,

Q_y: Donatı akmasına karşılık gelen akma dayanımı,

ε_s: Donatıdaki birim şekil değiştirmeyi,

ε_y: Donatıdaki akma dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme,

l_d: Aderans boyu,

f_s: Donatıdaki gerilim değeri,

f_y: Donatıdaki akma dayanımına karşılık gelen gerilim değeri,

E_s: Donatı elastik modülüsü,

E*: Donatı pekleşme modülü,

θ_s: Donatı kaymasından dolayı kesitte meydana gelen dönme,

d_b: Donatı çapı.

Tablo A: Betonarme kolonlarının isimlendirilmesinde kullanılan numune isimleri.

Beton sınıfı	**Numune**	**Kod**	**η**	**CL_L (%)**	**CL_S (%)**	**CL_{Lp} (%)**	**CL_{Ln} (%)**	**CL_{Lpmak} (%)**
C8	$C8_1$	C1	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C8_2$	C2	0.20	2.14	4.15	2.73	1.74	3.26
	$C8_3$	C3	0.20	2.25	4.79	2.71	1.85	3.00
	$C8_4$	C4	0.20	4.84	9.62	5.92	4.03	6.57
	$C8_5$	C5	0.20	5.44	10.26	7.43	3.90	7.90
	$C8_6$	C6	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C8_7$	C7	0.40	2.86	6.74	3.68	2.04	4.33
	$C8_8$	C8	0.40	4.21	7.17	5.15	3.56	5.74
	$C8_9$	C9	0.40	4.33	9.06	5.59	3.16	6.64
	$C8_{10}$	C10	0.40	4.82	10.54	7.44	2.62	8.89
C20	$C20_1$	C11	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C20_2$	C12	0.20	2.18	4.18	3.37	1.39	3.61
	$C20_3$	C13	0.20	1.33	3.68	1.91	0.99	2.29
	$C20_4$	C14	0.20	2.70	5.73	4.16	1.59	4.87
	$C20_5$	C15	0.20	7.04	11.52	10.34	4.09	11.75
	$C20_6$	C16	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C20_7$	C17	0.40	1.76	4.67	2.76	1.09	3.56
	$C20_8$	C18	0.40	2.45	5.38	3.75	1.55	4.26
	$C20_9$	C19	0.40	3.90	8.40	5.78	2.33	6.15
	$C20_{10}$	C20	0.40	5.91	10.89	9.40	3.22	9.98
C30	$C30_1$	C21	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C30_2$	C22	0.20	1.46	3.95	2.00	0.95	3.63
	$C30_3$	C23	0.20	2.38	5.34	2.80	1.90	4.60
	$C30_4$	C24	0.20	4.16	8.52	5.65	2.86	6.68
	$C30_5$	C25	0.20	6.36	11.75	8.52	4.18	10.75
	$C30_6$	C26	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$C30_7$	C27	0.40	1.83	4.05	2.59	1.09	4.99
	$C30_8$	C28	0.40	3.18	6.97	4.56	1.92	5.03
	$C30_9$	C29	0.40	3.78	7.28	5.91	1.97	6.79
	$C30_{10}$	C30	0.40	6.02	12.36	8.15	4.26	9.79

ÖZET

Donatı paslanması (korozyonu), inşaat sektöründe neden olduğu problemlerden dolayı büyük bir öneme sahiptir. Paslanma yalnızca ülke ekonomisini değil, aynı zamanda yapı güvenliğini de olumsuz yönde etkilemektedir. Korozyon ayrıca yapının yaşam döngüsünü tamamlamadan erkenden onarılmasına, güçlendirilmesine veya yıkılmasına da sebep olabilmektedir. Betonarme donatısındaki paslanma; betonarme yapı elemanlarında betonunun çatlaması, dökülmesi, donatı kesit alanının azalması ve beton-donatı arasındaki aderansın zayıflaması gibi birçok olumsuzluğa sebep olmaktadır. Son yıllarda betonarme binaların sismik performanslarının değerlendirilmesi için birçok farklı modeller ve yaklaşımlar geliştirilmiştir. Fakat bu değerlendirmelerde, paslanmanın yapı üzerindeki etkisi yalnızca donatı alanındaki azalma yönünden değerlendirilmektedir. Paslanmadan dolayı beton-donatı arasındaki aderans kaybı göz ardı edilmekte ve böylece yapılan değerlendirmelerde donatı sıyrılması sebebiyle yapısal ötelemedeki ilave artışlar dikkate alınmamaktadır.

Beton ve donatı arasındaki ilişkiyi ifade eden en önemli kavram, aderans ve buna bağlı olarak da donatı sıyrılmasıdır. Bu ilişki, paslanmadan dolayı daha büyük bir önem kazanmaktadır. Mevcut literatürde korozyon oranına bağlı olarak betonarme kolon donatılarındaki aderans-sıyrılma değerlerinin tahmin edilebilmesine yönelik ampirik bir model bulunmamaktadır. Dolayısıyla paslanmaya maruz kalmış betonarme yapıların değerlendirilmesinde sadece donatı alanındaki azalma dikkate alınarak gerçeği tam olarak yansıtmayan bir yaklaşım kullanılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, donatı sıyrılmasının paslanmamış betonarme kolonlarda dahi toplam ötelenmedeki (yanal yer değiştirme) katkısının %24 ile %40 arasında olduğu belirtilmişken, bu oranın paslanmaya maruz kalmış betonarme kolonlarda çok daha yüksek değerlere çıkması ve yapı performansını büyük oranda etkilemesi kaçınılmazdır.

Yapılan bu çalışmada, öncelikle hızlandırılmış paslandırma yöntemi kullanılarak tam ölçekli betonarme kolon donatıları paslandırılmıştır. Çalışma kapsamında donatıların paslandırılması kontrollü olarak gerçekleştirilerek ve farklı oranlardaki korozyonun etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Paslanmanın belli bir orana kadar aderans kuvvetini artırması ve belirli bir orandan sonra da aderansı düşürmesi sebebiyle kontrollü paslandırma bu çalışmada önemli bir yere sahiptir. Paslanma, düşük ve yüksek beton basınç mukavemetlerinde de farklı yapısal davranışlara yol açmaktadır. Bu etkiyi göz önünde bulundurmak için üç farklı beton basınç mukavemeti alt ve üst sınır olarak deneysel çalışmada kullanılmıştır. Betonarme kolonları öncelikle üç farklı beton sınıfı için üç ana gruba (C8, C20 ve C30 olarak); ardından her bir ana grup da kendi içerisinde teorik paslanma oranları için %2, %4, %6 ve %10 olmak üzere dört

alt gruba ayrılmıştır. Yanal yükleme deneyi esnasında uygulanacak eksenel yük için de betonarme kolonların taşıma kapasitelerine göre %20 ve %40 olmak üzere iki sınıf belirlenmiştir. Bu üç parametre çaprazlama olarak ele alınarak toplamda 30 adet betonarme kolonu deneye tabi tutulmuştur.

Paslandırılan betonarme kolonları için tersinir ve tekrarlanır bir yük programı uygulanarak; korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının yük-yerdeğiştirme, moment-eğrilik, donatı aderans-sıyrılma değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan faydalanılarak farklı paslanma oranlarına ve farklı beton mukavemetlerine bağlı olacak şekilde, donatı sıyrılmasını tahmin etmeye yönelik deneye dayalı (ampirik) bir model geliştirilmiştir. Daha önce literatürde olmayan bu çalışmanın gerçekleştirilmesine bağlı olarak paslanmaya maruz kalmış betonarme yapıların sismik performans seviyelerinin değerlendirilmesinde yeni bir pencere açılacağı kanıtı oluşmuştur.

Ayrıca gerçekleştirilen bu deneysel çalışma kapsamında, paslanmış betonarme kolonlarının korozyon oranına bağlı olarak, akma kuvvet dayanımı, nihai kuvvet dayanımı, süneklik oranları, enerji yutma kapasiteleri, rijitlikleri ve hasar indekslerini tahmin etmeye yönelik ampirik modeller geliştirilmiştir. Tüm bu modellerin yanı sıra; tahribatsız değerlendirme yöntemlerinde kullanılmak üzere, korozyondan dolayı oluşan birincil korozyon çatlak genişliklerine bağlı olarak betonarme donatılarındaki korozyon oranını, enerji yutma kapasitelerini ve çatlak genişliğine bağlı olarak korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının sismik performans seviyelerini tahmin etmeye yönelik yeni bir model geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolonları, korozyon, aderans gerilmesi, donatı sıyrılması, sismik performans.

ABSTRACT

Reinforcement corrosion has an important place in construction industry due to its problems. Corrosion does not only affect country economy, but also adversely affects structural safety. Corrosion in structures might also causes to premature repairing, strengthening or demolishing of structures before completing their life cycle. Corrosion in reinforcement bars causes different effective as cracking, spalling of concrete, reductions in cross-section area of reinforcement bar, and reductions in bond strength between concrete and reinforcement bars. In recent years, there are different models and approaches have been developed to assess the seismic performance of reinforced concrete buildings. However, in such assessments, the effect of corrosion on a structure has been considered only reduction in cross sectional area of reinforcement bar. Reduction in the bond strength between concrete and reinforcement bars due to corrosion has been ignored and thus additional lateral displacement due to slippage of reinforcement bars has not been considered in such assessment methods.

The most important concept which describes the relationship between concrete and reinforcement bar is bond strength and slippage of reinforcement bars that depending on this. This relationship gains more importance due to corrosion. In the available literature, there is no any empirical model to predict slippage of reinforcement bars in reinforced concrete columns as a function of corrosion. Therefore, an approach that does not fully reflect the reality is used for the evaluation of reinforced concrete structures subjected to corrosion by taking into account only the reduction in reinforcement area. In performed experimental studies; even for the uncorroded reinforced concrete columns, slippage of reinforcement bars contributed 24% to 40% of total lateral displacement where it is inevitable to have more ratios for corroded columns that highly affects the structural performance.

In this study, firstly; reinforcement bars of full scaled reinforced concrete columns were corroded by using accelerated corrosion method. Within the scope of the study, reinforcement bars were corroded as controlled and the effects of the corrosion at different corrosion levels were evaluated experimentally. Since corrosion increases the bond strength up to a certain value of corrosion level and then decreases the bond strength, for the current study used accelerated corrosion method within controlled has an important place. Corrosion has shown different behavior at lower and higher concrete strength levels. To consider this effect, three different concrete classes were used as lower and upper boundaries during experimental study. Firstly, reinforced concrete columns were divided into three main groups for three different concrete classes (C8, C20 and C30); then each main group were divided into four

subgroups for different theoretical corrosion levels of 2%, 4%, 6%, and %10. Two groups were identified during the test of the lateral loading for the applied axial load according to the load carrying capacities of the reinforced columns as 20% and 40%. By considering these three parameters crosswise, a total of 30 reinforced concrete columns were tested.

By applying a reversed cycling load program for the reinforced concrete columns; load-displacement, moment-curvature, reinforcement bond-slip values of reinforced concrete columns subjected to corrosion were obtained experimentally. An empirical model was developed to predict the slippage of reinforcement bars as a function of different corrosion levels and concrete strength levels from obtained experimental tests results. According to the performed of this study, where it has not been performed previously in the literature, a new window will be opened in the assessment of seismic performance levels of corroded reinforced concrete structures.

In addition, empirical models have been developed to predict the yield strength, ultimate strength, ductility ratios, energy absorption capacity depending on the corrosion level of corroded reinforced concrete columns. In addition to all these models; to be used in non-destructive assessment methods; a new model has been developed to predict the corrosion level in reinforced concrete reinforcement, energy absorption capacities and seismic performance levels of corroded reinforced concrete columns as a function of initial corrosion crack widths.

Keywords: Reinforced concrete columns, corrosion, bond stress, slip in bars, seismic performance.

BÖLÜM I

1. GİRİŞ

Paslanma betonarme yapıların sismik performans seviyelerinin azalmasında önemli bir rol oynamaktadır. Paslanma ve etkileri sadece can kaybı değil, ülke ekonomisi açısından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. 1999 Marmara depremi sonrası, betonarme binalarında yapılan incelemelerde, yapıların yıkılmasında etkin rol oynayan önemli bir diğer nedenin de betonarme donatılarındaki paslanma olarak belirlenmiştir. Örneğin, Çağatay (2005) tarafından yapılan çalışmada, 17 Ağustos Marmara depreminde yıkılan birçok betonarme binalarında deniz kumu kullanıldığı ve bundan dolayı betonarme donatılarında paslanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Yalciner vd. (2012a) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise 25 yıllık bir betonarme binanın paslanmadan dolayı yıkımına karar verilmiş ve betonarme bina ekonomik döngüsünü tamamlamadan yıkılmıştır. Paslanma her ne kadar donatıdaki kimyasal bir olay olarak bilinse de, bu kimyasal olay sonucunda; donatı alanında azalma, donatı hacminin paslanmadan dolayı artması sebebi ile betonarme elemanlarında çatlamaların ve dökülmelerin meydana gelmesi, beton-donatı arasındaki aderans kaybı ve bu aderans kaybı nedeni ile donatıda ilave olarak yeni sıyrılmanın meydana gelmesi ve yapıdaki ötelenme değerlerinin artması gibi yapı performans seviyesini etkileyecek önemli unsurları beraberinde getirmektedir. Artan deplasman ve çatlaklar nedeni ile betonarmenin ikinci sınır durumu olan kullanılabilirlik sınır durumu aşılmakta ve tasarım aşamasında yeterli rijitliği sağlanması kuralı yapım aşamasından sonra öngörülmeyen bir hal almaktadır.

Paslanmanın yapı performansı üzerindeki etkisi ile birlikte öncelikle paslanma oranın tahmin edilebilmesi için birçok deneysel (ampirik) modeller geliştirilmiştir (Morinaga, 1988; Gulikers, 2005; Ghods vd., 2007). Paslanma oranın tahmin edilebilmesi için yapılan çalışmalar ardından paslanmanın aderansa etkisi ile devam ettirilmiştir. Beton ve betonarme donatısı arasındaki davranış ilişkisini ifade eden aderans, betonarme elemanlarında oldukça önemli bir yere sahiptir. Günümüzde özelikle doğrusal olmayan performans analizlerindeki aderans hesabı, araştırmacılara beton ve donatı arasındaki ilişkiyi yapısal analizlere yansıtabilmek ve modelleyebilmek için kesit plastik mafsal özelliklerinin modifiye edilmesi ile birlikte kolaylıklar sağlamaktadır.

Korozyondan dolayı aderans kaybını tahmin etmek için geliştirilen mevcut çalışmalarda (Cabrera, 1996; Auyeung vd., 2000; Lee vd., 2002; Fang vd., 2004, Yalciner vd., 2012b) aderans ve donatı sıyrılma ilişkisinin tartışılmış olmasına karşın; korozyondan dolayı

betonarme elemanlarındaki donatı sıyrılmasını eksenel yük etkisi altında tahmin etmeye yönelik bir ampirik model geliştirilmemiştir. Küp içerisine yerleştirilen donatıların çekip çıkarılması ile elde edilen modellerde hem donatı hem de beton yalnızca çekme kuvvetlerine maruz kalmakta ve eksenel yükün etkisi ihmal edilmektedir. Özellikle, geliştirilen modellerde aderans boyunun deney düzeneğine bağlı olarak sabit alınması ve böylelikle korozyonun aderans boyu üzerindeki değişkenlik etkisi ihmal edilmektedir.

Korozyonsuz betonarme elemanlarındaki donatı sıyrılmasını tahmin etmek için kullanılabilecek en bildik model Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilmiştir. Öyle ki, Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen aderans-sıyrılma modelinde, donatı sıyrılmasından dolayı betonarme eleman uçlarında meydana gelen dönmelerin güvenilir analitik tahminler için doğrusal olmayan analizlerde hesaba katılmasının şartından bahsedilmiştir. Buna paralel olarak, aynı şekilde Sezen ve Moehle (2006) tarafından yapılan çalışmada, korozyonsuz betonarme kolonlarında donatı sıyrılmasının toplam yanal deplasmana %25-40 oranında etkisi olduğunu belirtilmiştir. Bu oran korozyonlu yapılarda aderans kaybı ile birlikte daha fazla olacağından; yapı performans değerlendirilmelerinde doğru sonuçlara varmak için korozyonun aderans-sıyrılma üzerine etkisinin doğru bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Mevcut literatürde paslanmamış betonarme kolonları için geliştirilen en son donatı sıyrılma modellerinden biri Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilmiştir. Sezen ve Setzler (2008) tarafından birebir ölçekli betonarme kolanlarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen donatı sıyrılma modeli özelikle donatının akma öncesi ve sonrası için farklı bölgelerde sıyrılma hesabını tahmin ve hesaplama imkânı vermesi açısından önem taşımaktadır. Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen modelde donatının elastik ve elastik olmayan bölgelerindeki aderans gerilmeleri yönetmeliklerce tanımlanan beton basınç dayanımına göre göz önüne alınmıştır.

Hali hazırda korozyon etkisi altındaki betonarme elemanlarındaki donatı sıyrılma hesabının yapılabilmesi için bir model olmadığından, araştırmacılar korozyondan dolayı meydana gelen aderans kaybı ve buna bağlı olarak betonarme donatısındaki sıyrılmayı hesaplayabilmek için korozyonsuz betonarme elemanları için geliştirilen betonarme donatı sıyrılma modellerinde birtakım modifikasyonlar ve varsayımlarda bulunarak literatürdeki bu açığı kapmaya çalışmaktadırlar. Yalciner vd. (2012c) korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarının zamana bağlı olarak sismik performanslarının tahmin edilebilmesi için yapmış olduğu çalışma bunlardan bir tanesidir. Yalciner vd. (2012c) tarafından tek serbestlik dereceli sistem üzerine modellenmiş korozyona maruz kalmış betonarme yapısının zamana bağlı sismik performans seviyesinin tahmini edilebilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmasında; korozyondan dolayı betonarme donatısındaki sıyrılmanın hesaplanabilmesi için Sezen ve Setzler (2008) modeli

kullanılmıştır. Yalciner vd. (2012c), korozyon etkisini geliştirilen analizlerde hesaba katmak için Sezen ve Setzler (2008) modelinde varsayılan korozyonsuz aderans denklemi yerine Stanish vd. (1999) tarafından geliştirilen korozyona maruz kalmış etriyesiz betonarme döşeme testinden elde edilen aderans kuvvet denklemi kullanılmıştır. Stanish vd. (1999) tarafından geliştirilen model kullanılarak aderans kuvveti korozyon oranına (C_L) bağlı olarak farklı zaman dilimleri için hesaplanmıştır. Korozyon oranına bağlı olarak hesaplanan aderans kuvveti Sezen ve Setzler (2008) modelinin içerisinde kullanılarak betonarme donatı sıyrılmasının korozyon oranına bağlı olarak hesaplanmasını sağlamıştır. Böylelikle zaman-tanım analizi de kullanılarak korozyona maruz kalmış yapının farklı korozyon oranları için zamana bağlı sismik performans seviyelerinin tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Yalciner vd. (2012c) tarafından yapılan çalışmada her bir korozyon oranına bağlı olarak yapının sismik performansı düşmektedir. Bunun nedeni Stanish vd. (1999) modelinde aderans kuvvetinin her bir korozyon oranına bağlı olarak azalmasıdır. Halbuki korozyon belirli seviyelere kadar aderans kuvvetini artırmakta ardından hacimsel artışın yaratmış olduğu çatlama etkisi ile aderans kuvveti azalmaktadır. Mevcut literatürde betonarme kolonlarında paslanmaya bağlı olarak donatı sıyrılmasını hesaplamaya yönelik bir modelin olmamasından dolayı; mevcut modeller araştırmacıları birçok farklı modellerin birbiri içerisinde kullanılmasına zorlamaktadır.

Proje yürütücüsünün daha önce bahsedilen bir diğer çalışmasında (Yalciner vd., 2012a) korozyona maruz kalmış 25 yıllık bir betonarme ilkokul binası için zaman-tanım analizi kullanılarak yapının sismik performans seviyesi zamana bağlı olarak (paslanmamış yapı ve 50 yıl sonraki yapı) tahmin edilmiştir. Söz konusu çalışmada da betonarme donatısındaki sıyrılmanın hesaplanabilmesi için Sezen ve Setzler (2008) modeli kullanılmıştır. Korozyondan dolayı donatı alanındaki azalma, beton basınç mukavemetindeki azalma, aderans kaybı ve betonarme donatısındaki sıyrılma değerleri moment-eğrilik ilişkisinin modifiye edilmesi ile doğrusal olmayan analizlere yansıtılmıştır. Yalciner vd. (2012a) yapmış olduğu çalışmada yapı performans seviyesini zamana bağlı olarak tahmin etmesinin yanı sıra, yapı analizinde korozyondan dolayı sadece donatı alanındaki kaybın göz önüne alındığında yapı performans seviyesinin ne olacağı ve donatı alanı ile aderans kaybından dolayı betonarme donatısındaki sıyrılmanın birlikte hesaba alındığında yapı performans seviyesinin ne olacağı karşılaştırılarak; betonarme donatısındaki sıyrılma değerinin yapı performansı üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda, 2.43 $\mu A/cm^2$ bir korozyon oranında; 25 yıl sonra korozyonun yalnızca donatı alanındaki kayıp etkisi hesaba katıldığında, aynı maksimum yer ivmelenme değerinde yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %55 iken; bu olasılık hem donatı alanındaki azalma hem de aderans-sıyrılma ilişkisinin hesaba dâhil edilmesi ile yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %77 olarak hesaplanmıştır. Yapının 50 yıl sonraki performans seviyesi yine aynı maksimum yer

ivmelenmesinde korozyondan dolayı sadece donatı alanındaki azalma göz önüne alındığında yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %62 iken bu olasılık hem donatı alanındaki azalma hem de aderans-sıyrılma ilişkisinin hesaba dâhil edilmesi ile yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %84'e yükseldiği hesaplanmıştır. Mevcut literatürde korozyon etkisi altında betonarme yapıların sismik değerlendirmesine ilişkin önemli bir diğer çalışmada Berto vd. (2009) tarafından yapılmıştır. Berto vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada betonarme donatı sıyrılması doğrusal olmayan itme analizlerinde hesaba katılamamış ve donatı sıyrılmasının öneminden bahsedilerek bu konuda yeni çalışmaların ve yöntem ve modellerin geliştirilmesi gerektiğinin altı çizilmiştir.

Görüldüğü üzere, korozyon ve aderans-sıyrılma ilişkisi yapının sismik performansı üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Ancak, mevcut literatürde korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarında donatı sıyrılma hesabı için şu güne kadar hem deneysel bir çalışma yapılmamış hem de kullanılabilir bir model mevcut değildir. Küp numunelerden donatının çekilerek geliştirilmesi ile elde edilen mevcut aderans etriye, eksenel yük vb. diğer etkileri göz önüne almamakta (örneğin: Yalciner vd., 2012b), ya da diğer modellerde olduğu gibi korozyonun temel davranış prensibinden uzak kalmaktadırlar. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma ile birlikte birebir boyutlarında paslandırılan betonarme kolon elemanları ile literatürde yeni bir pencere açacağı hedeflenmiştir. Korozyona tabi tutulan birebir boyutlarındaki betonarme kolonları bu alandaki birçok ileriki çalışmaya referans olması ve gerekli ihtiyacı karşılayarak bu alanda yeni bir sayfanın açılmasına katkı sağlayacaktır. Literatürde benzeri bulunmayan bu çalışma ile korozyona maruz kalmış betonarme binaların analizinde ve değerlendirilmesinde çok daha doğru ve gerçekçi sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı farklı beton basınç dayanımında ve farklı korozyon oranlarında korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarındaki aderans ve donatı sıyrılmasını tahmin etmeye yönelik ampirik bir modelin geliştirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda betonarme kolonlarının paslandırılması için hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılmıştır. Korozyonun farklı beton basınç dayanımlarındaki etkisini göz önüne almak için ülkemizdeki mevcut yapı stoku da göz önüne alınarak üç farklı beton basınç dayanımındaki betonarme kolonları deneye tabi tutulmuştur (C8, C20 ve C30). Paslanma, farklı beton basınç mukavemetlerinde tamamen farklı yapısal davranışlara sebep olmaktadır. İlk kez Yalciner vd. (2012b) tarafından ortaya konulan bu hipotez; aynı korozyon oranında, paslanma etkisinin düşük ve yüksek beton basınç mukavemeti için farklı yapısal davranışlara yol açtığı tespit edilmiştir. Özellikle betonun gevrek yapısal davranış özelliğinden dolayı yüksek basınç mukavemetine sahip betonda paslanmanın daha belirgin sonuçlara sebep olduğu görülmüştür. Bu çalışmada da hem bu etkiyi hem de

Türkiye'deki betonarme yapı stokunu göz önünde bulundurmak için C8 beton basınç mukavemeti alt sınır ve C30 beton basınç mukavemeti de üst sınır olarak ele alınmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde; Türkiye'deki betonarme binalardaki beton basınç mukavemetinin 8 MPa ile 19 MPa arasında değişiklikler gösterdiği saptandığından (Akyüz ve Uyan, 1993; Özturan, 2000; Akcay vd., 2001; Bal ve Yıldız, 2005; Bal vd., 2007); C8 beton basınç mukavemeti alt sınır olarak deneysel çalışmada göz önüne alınmıştır. Korozyon oranın farklı değerlerdeki etkilerini göz önüne almak için dört farklı korozyon oranının hızlandırılmış korozyon yöntemi ile elde edilmesi amaçlanmıştır (%2, %4, %6, ve %10). Paslandırma sürecinin tamamlanması ve yükleme deneylerinden hemen sonra tüm betonarme kolonlarının içerlerinden tüm betonarme donatıları çıkartılarak gerçek korozyon oranlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Betonarme kolonlardaki eksenel yük değerinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini yansıtabilmek için her bir beton sınıfındaki ve farklı korozyon oranlarındaki 30 adet betonarme kolonu için iki farklı eksenel yük değeri (taşıma kapasitesine göre %20 ve %40) deneylerde kullanılarak eksenel yükün korozyon etkisi altındaki davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.2. Çalışmanın Önemi

Betonarme binaların sismik performans seviyelerinin doğru olarak değerlendirilmesi, olası depremlerde hem can kaybını hem de mal kaybını azaltmak ve hatta önlemek için tartışmasız bir öneme sahiptir. Mevcut literatürde, betonarme donatısındaki farklı paslanma oranları için; betonarme kolon donatılarındaki sıyrılma değeri ve buna bağlı olarak ötelenme, dönme ve eğrilik gibi yapısal başarımı belirleyen etkenlerin hesaplanabilmesi için kuramsal (teorik) ya da deneysel (ampirik) bir çalışma ya da model bulunmamaktadır. Bundan dolayı, paslanmaya maruz kalmış betonarme binaların yapısal performanslarının değerlendirilmesinde bu değişkenler göz ardı edilmekte ve yapının gerçek performans seviyesinden uzak sonuçlara ulaşılmakta hem ülkemizde hem de dünyada paslanmaya maruz kalmış betonarme binalar için güvenilir düzeyde değerlendirmelerin yapılması mümkün olmamaktadır. Yapılan bu çalışma ile paslanmaya maruz kalmış betonarme binaların yapısal performanslarının değerlendirmesinde yeni bir dönem başlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca paslanma, yapı ömrü boyunca sürekli devam eden kimyasal bir olaydır ve zamana bağlı etkileri de ihmal edilmemelidir. İlk defa yapılan bu çalışma ile mevcut yapıların pas etkisi altında incelemesinde zamana bağlı performans seviyelerini değerlendirme imkânı sağlayacağı düşünülmektedir. Böylece sadece o döneme ait yapısal performansı değil, gelecek yıllardaki paslanma oranına bağlı olarak değişecek yapısal performansı da tahmin edilebilecektir. İlk kez bu deneysel çalışma ile geliştirilen donatı sıyrılma modeli sayesinde; gelecek yıllarda zamanı bilinmeyen olası depremlerde insanların can güvenliğini sağlamak ve

can kayıplarını önlemek için paslanmaya maruz kalmış yapıların değerlendirmesinde önem taşımaktadır. Kısaca değinilecek olursa; gerçekleştirilen bu deneysel çalışma betonarme yapılarda yapısal performansı belirleyen birtakım değişkenlerin yanı sıra, paslanma etkisinin de hesaba katılabilmesine imkân sağlayacaktır. Betonarme elemanlardaki paslanma oranının tespiti ve ardından her yapı elemanı için tasarım durumuna kıyasla yapısal performans seviyesindeki düşüş hesaplanabilecektir. Mevcut çalışmadan elde edilen deneysel modeller temel alınmak suretiyle, betonarme elemanlar için ayrı ayrı hesaplanan yapısal performans düşüşünün yapı geneline uyarlanmasına dönük ileriki çalışmalara da öncülük edebileceği düşünülmektedir. Aynı şekilde, eşit paslanma oranı söz konusu olduğunda farklı beton basınç mukavemeti değerlerinin donatı sıyrılması ve dolayısıyla yapısal performans üzerindeki etkisine ilişkin yeni fikir ve yaklaşımların oluşturulmasına da büyük katkı sağlayacaktır. Ayrıca tahribatsız değerlendirmeler için geliştirilen ampirik model sayesinde; her bir betonarme sınıfı için elde edilen birincil korozyon çatlakları ve yükleme deneylerinden elde edilen kolon kapasite dayanım sonuçları doğrultusunda; paslanmış betonarme kolonları için çatlak genişliğine bağlı olarak kolon kapasitelerinin sahada hızlı bir şekilde tahribatsız yöntemler ışığında değerlendirilmesine ve yapı performansına yönelik karar alınmasına bu çalışmanın olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM II

2. ADERANS-DONATI SIYRILMASI ÜZERİNE GELİŞTİRİLEN MEVCUT MODELLER

Bu bölümde mevcut literatürde beton-donatı arasındaki aderans kuvveti ve aderans kuvvetine bağlı donatı sıyrılmalarının hesaplanması için geliştirilen modeller korozyona maruz kalmış ve kalmamış elemanlar için ele alınarak sunulmuştur.

2.1. Korozyona Maruz Kalmamış Betonarme Donatıları İçin Geliştirilen Modeller

2.1.1. Otani ve Sozen (1972) donatı sıyrılma modeli

Otani ve Sozen (1972) tarafından geleneksel donatılarda donatı sıyrılması üzerine geliştirilen model temelinde aderans boyunca aderans gerilmelerinin uniform olarak değerlendirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Geliştirilen modelde aderans kuvveti beton basınç dayanımın bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

$$u_b = 6.5\sqrt{f_c'}\ (\text{psi}) \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'de u_b aderans gerilmesini ve f_c' ise beton basınç dayanımı ifade etmektedir. Otani ve Sozen (1972) tarafından geliştirilen modelde donatıdaki gerilmelerin donatı boyunca doğrusal olarak azaldığı ve aderans boyu mesafesinde sıfıra ulaştığı belirtilmiştir. Böylelikle yapılan kabul neticesinde donatıdaki sıyrılma ya da donatıdaki aderans boyunca donatıdaki uzamayı donatı boyunca birim şekil değiştirmenin altında kalan alan olarak tanımlamışlardır.

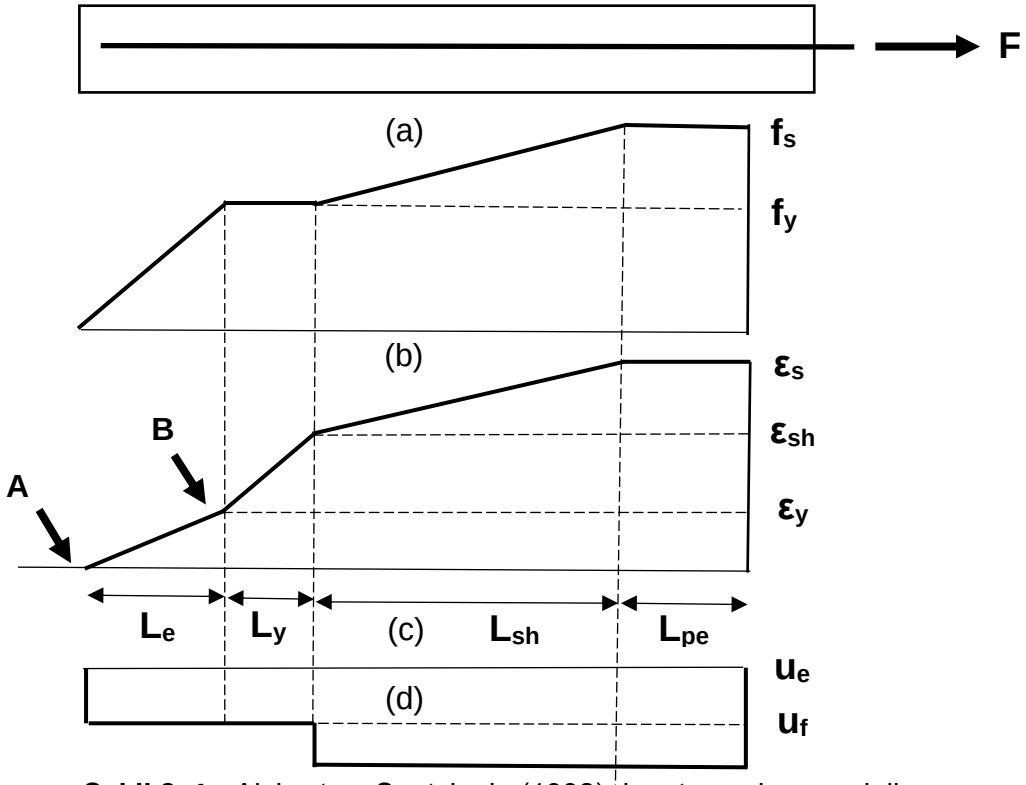
$$sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} = \frac{f_s l_d}{2E_s} = \frac{f_s^2 l_d}{52E_s\sqrt{f_c'}} \tag{2.2}$$

Denklem 2.2'de sırasıyla ε_s donatıdaki birim şekil değiştirmeyi, l_d aderans boyunu, f_s donatıdaki gerilim değerini ve E_s ise donatı elastik modülüsünü ifade etmektedir. Otani ve Sozen (1972) geliştirilen modelin yapısal analizlerde kullanılabilmesi için donatıdaki gerilme değeri ve moment arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu kabul ederek ($\frac{f_s}{f_y} = \frac{M}{M_y}$) donatı sıyrılmasından dolayı oluşacak dönmeyi hesaplayacak Denklem 2.3'ü önermişlerdir. Otani ve Sozen (1972) tarafından geliştirilen model daha çok elemanın elastik sınırlar içerisindeki dönmeyi hesaplamak için kullanılan bir model olup plastik mekanizmanın gerçekleştiği sınır durumları için sınırlı kalmaktadır.

$$\theta_s = \frac{M^2 f_y^2 d_b}{8E_s\, u_b\, M_y^2\,(d-d')} = \frac{M^2 f_y^2 d_b}{52E_s\sqrt{f_c'}\;\; M_y^2\,(d-d')} \tag{2.3}$$

2.1.2. Alsiwat and Saatcioglu (1992) donatı sıyrılma modeli

Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen model donatıdaki birim şekil değiştirmeye bağlı olarak donatıdaki uzamaya karşılık gelen birim şekil değiştirmenin altındaki alanı hesaplama prensibine dayanmaktadır. Donatı sıyrılması ya da donatıdaki uzama olarak tanımlanan modelde aderans boyu ve karşılık gelen birim şekil değiştirme için dört farklı bölge tanımlanmış olup; Şekil 2.1'de Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen model gösterilmektedir.



Şekil 2. 1: Alsiwat ve Saatcioglu (1992) donatı sıyrılma modeli.

Şekil 2.1'de gösterildiği üzere Alsiwat ve Saatcioglu (1992) betonarme donatısındaki donatı sıyrılması için elastik bölge, akma bölgesi, pekleşme bölgesi ve paspayın kırılarak sabit gerilmelerin oluştuğu çekip-çıkarma bölgeleri tanımlanmıştır. Geliştirilen modelde tanımlanan her bir bölge için donatıdaki uzamalar hesaplanarak geliştirilen modelde ortalama aderans gerilmesi ACI 408 (1979) yönetmeliğine göre kabul edilmiştir.

$$u_e = u_{ACI} = \frac{f_y d_b}{4l_d}\ MPa \tag{2.4}$$

Elastik bölge için kuvvet denge denkleminden faydalanılarak, elastik bölgedeki aderans boyunun uzunluğu Denklem 2.5 yardımı ile; akma bölgesi için ise Denklem 2.6 ile tanımlanmıştır.

$$L_e = \frac{f_s d_b}{4u_e} \tag{2.5}$$

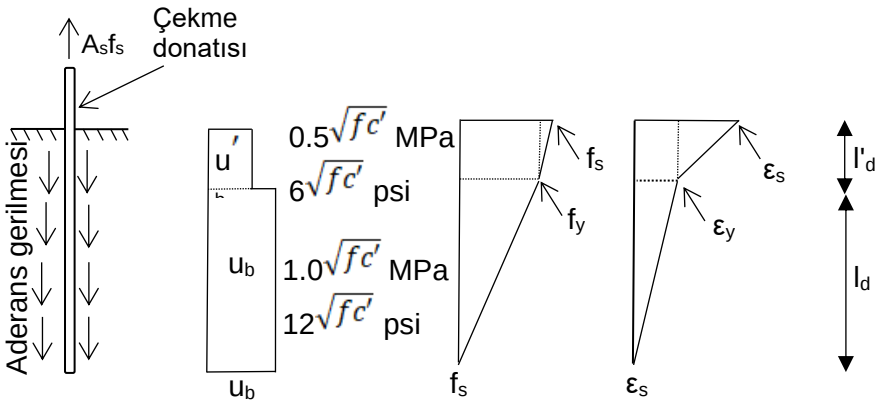
$$L_{yp} = \frac{\Delta f_s d_b}{4u_f} \tag{2.6}$$

Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen modelin en belirgin sunmuş olduğu avantaj; Denklem 2.6'da akma bölgesinde elastik uniform aderans gerilmesi yerine sürtünme aderans gerilmesi donatı nervürlerinin özelliklerine bağlı olarak geliştirilen modele yansıtılmış olmasıdır. Pochanart ve Harmon (1989) tarafından geliştirilen sürtünme aderans gerilmesi Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirdikleri modelde kullanılmış olup Denklem 2.7 donatı sıyrılmasının hesaplanması için önerilmiştir.

$$\delta_{ext} = \varepsilon_s L_{pc} + 0.5(\varepsilon_s + \varepsilon_{sh})L_{sh} + 0.5(\varepsilon_{sh} + \varepsilon_y)L_{yp} + 0.5(\varepsilon_y)L_e \tag{2.7}$$

2.1.3. Sezen ve Setzler (2008) donatı sıyrılma modeli

Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen model yukarıda bahsedilen modelleri temel alarak deneysel olarak elde geliştirilen ampirik bir modeldir. Geliştirilen modelde donatı sıyrılması birim şekil değiştirmenin altında kalan alanın hesaplanması ilkesine dayanmakta olup donatının akmadan önce (elastik) ve donatının aktıktan sonraki bölgesi için donatı sıyrılması hesaplanmayı önermektedir. Şekil 2.2'de Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen model gösterilmektedir.



Şekil 2. 2: Sezen ve Setzler (2008) donatı sıyrılma modeli.

Şekil 2.2'de elastik ve elastik ötesi bölge için iki farklı ortalama aderans gerilmesi ve iki bölge için hesaplarda göz önüne alınması gereken aderans boyu tanımlanmış olup Denklem 2.8'de Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen donatı sıyrılma modeli verilmiştir.

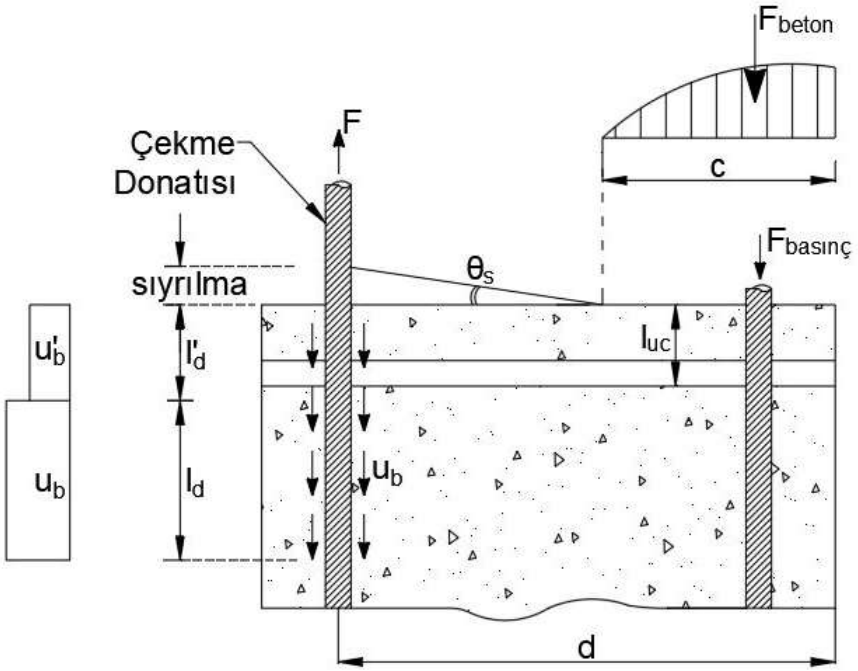
$$sıyrılma = \int_0^{l_d + l'_d} \varepsilon(x)dx \tag{2.8}$$

Denklem 2.8'de l_d donatının elastik bölgedeki aderans boyu ve l'_d ise donatının akmadan sonraki donatı aderans boyudur. Denklem 2.8'de aderans boyuna bağlı olarak hesaplanan alan ile birlikte donatının akmadan önce akmadan sonraki sıyrılma hesabı Denklem 2.9 ve 2.10'da gösterildiği şeklinde önerilmiştir. Donatı sıyrılmasından dolayı kesit de oluşacak dönme Şekil 2.3 ile tanımlanmış ve sıyrılmadan dolayı oluşacak kesit dönme etkileri Denklem 2.11 ve 2.12 yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \tag{2.9}$$

$$sıyrılma = \frac{\varepsilon_y l_d}{2} + \frac{(\varepsilon_{s+}\varepsilon_y)l'_d}{2} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \tag{2.10}$$

$$l'_d = \frac{(f_{s-}f_y)d_b}{4u'_b} \tag{2.11}$$



Şekil 2. 3: Sezen ve Setzler (2008) donatı sıyrılma modeli-dönme.

$$\theta_s = \frac{\varepsilon_s f_s d_b}{8u_b(d-c)} \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \tag{2.12}$$

$$\theta_s = \frac{d_b}{8u_b(d-c)}(\varepsilon_y f_y + 2(\varepsilon_s + \varepsilon_y)(f_s - f_y)\ \varepsilon_s > \varepsilon_y \tag{2.13}$$

Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen modelin en büyük avantajı geliştirilen ampirik denklemlerin tarafsız eksen derinliğini göz önüne alarak ve böylelikle moment-eğrilik ilişkisinin doğrusal olmayan yapı analizleri için sunulan ampirik denklemlerin kullanılabilir olmasıdır.

2.2. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Donatıları İçin Geliştirilen Modeller

Bu projenin sunum aşamasına katkı sağlayan ve e-mail yolu ile proje üzerinde bilgi alış-verişinde bulunulan Prof. Dr. Halil SEZEN'de özellikle korozyona maruz kalmış betonarme elemanları için donatı sıyrılması için ampirik bir modelin geliştirilmesi gerektiğini ve böylelikle de özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesinde daha doğru bir yaklaşım sağlaması açısından önemli olduğunu belirtmiştir. Mevcut literatürde korozyona maruz kalmış betonarme elamanları için aderans-sıyrılma ilişkisi tam ölçekli betonarme elemanları için henüz tanımlanmamış olup geliştirilen modeller küp numunelerin den donatının çekilmesi ile elde edilen modellerdir. Yalciner vd. (2012b) yapmış olduğu çalışmada da belirtikleri üzere; beton içerisinden donatının çekip çıkartılması ile beton ve donatının yalnızca çekme kuvvetlerine maruz kalması sebebi ile sunulan modellerin tam olarak yapı davranışını temsil edememesidir (eksenel yükün ihmal edilmesi).

2.2.1. Cabrera (1996) aderans modeli

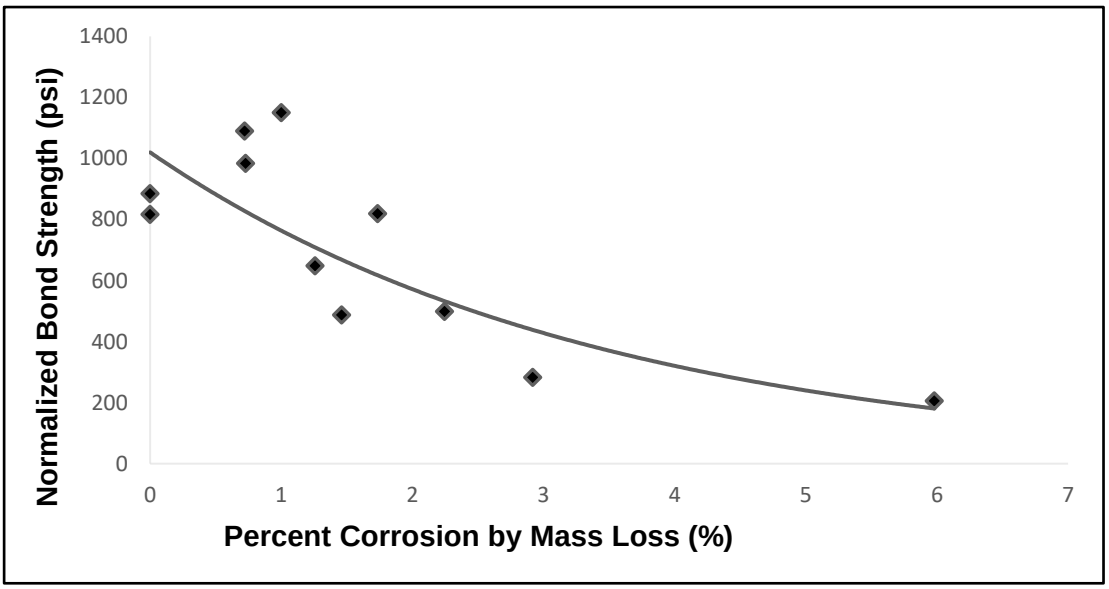
Cabrera (1996) 150 mm boyutlarındaki küp numunelerinin merkezine 12 mm çapında betonarme donatılarını hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanarak ampirik bir model geliştirmiştir. Yapılan deneysel çalışmada donatı gömme boyu 40 mm olarak seçilmiş ve donatıların kopma dayanıma ulaşmadan sıyrılması hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada tek bir beton sınıfı beton basınç dayanımı olarak deneysel programda göz önüne alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmada korozyon oranı %0 ve %12 arasında değerler almıştır. Cabrera (1996) tarafından sunulan aderans gerilmesi korozyon oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Ancak yapılan çalışmada beton basınç dayanımı hakkında bir bilgi verilmemesi modelin kullanılabilirliği değişen beton basınç etkisi altındaki aderans gerilmesini sınırlandırmıştır. Geliştirilen aderans gerilmesi modeli aderans gerilmesinin korozyon oranına bağlı olarak doğrusal bir eğim ile azalmasına neden olmuştur. Bundan dolayı, geliştirilen model korozyonun sargı etkisini ihmal etmektedir.

$$\tau = 23.478 - 1.313C_L \ (\text{MPa}) \tag{2.14}$$

2.2.2. Auyeung vd. (2000) aderans modeli

Auyeung vd. (2000) yapmış oldukları deneysel çalışmada 19 mm çapındaki betonarme donatılarını 178 mm × 178 mm × 355 mm boyutlarındaki beton prizmasına yerleştirilmesi ve

donatıların çekip çıkartılmasına dayalı deneysel bir çalışmadır. Çalışmada tek bir tip beton sınıfı kullanılmış olup 28 günlük beton basınç dayanımı 28 MPa olarak verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada korozyon oranı %0 ve %5.91 arasında değerler almıştır. Şekil 2.4'de Auyeung vd. (2000) tarafından sunulan ve idealleştirilmiş aderans kuvvetini korozyon oranının bir fonksiyonu olarak gösteren grafik yer almaktadır. Aderans kuvvetini korozyonun bir fonksiyonu olarak tahmin etmeye yarayan Denklem 2.15, Cabrera (1996) tarafından geliştirilen modelden farklı olarak aderans kuvveti üstel olarak azalım göstermektedir.

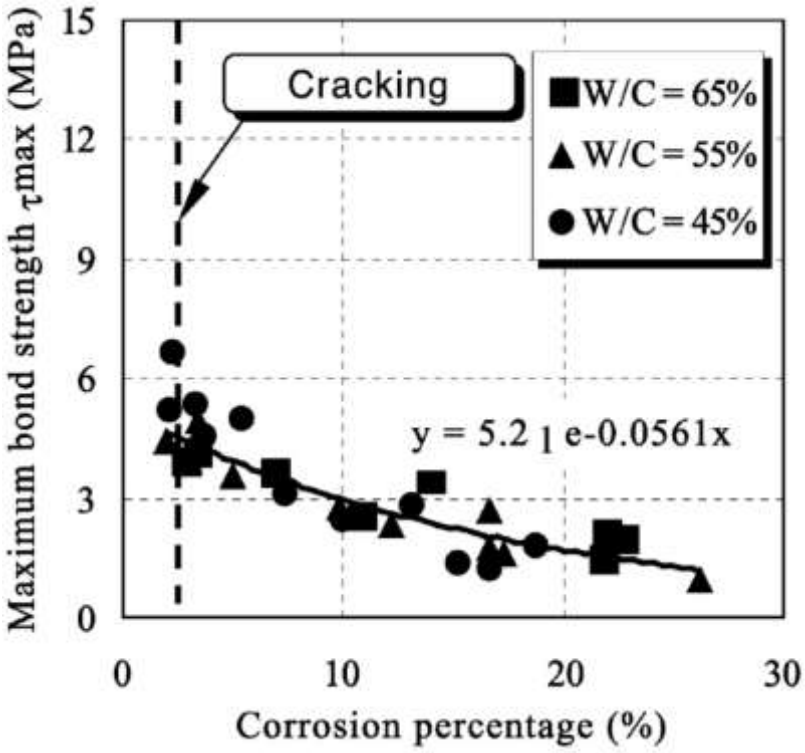


Şekil 2. 4: Auyeung vd. (2000) aderans modeli.

$$\tau = 8.0048e^{(-0.3251C_L)}\ (\text{MPa}) \qquad (2.15)$$

2.2.3. Lee vd. (2002) aderans modeli

Aderans kuvvetini farklı beton basınç dayanımlarında korozyon oranına bağlı olarak tahmin etmek için geliştirilen diğer bir model Lee vd. (2002) tarafından geliştirilen modeldir. Yapılan çalışmada 42.1 MPa, 33.0 MPa ve 24.7 MPa olmak üzere üç farklı beton basınç dayanımına sahip küp numuneleri üzerine gerçekleştirilen çalışmadır. Paslandırılan betonarme donatıları için üç farklı paspayın da etkisi göz önüne alınarak paspayının aderans kuvveti üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada korozyon oranları %0 ve %30 arasında değerler almıştır. Auyeung vd. (2000) tarafından geliştirilen modelde olduğu gibi Lee vd. (2002) tarafından geliştirilen modelde de aderans kuvveti korozyon oranına bağlı üstel azalım olarak tahmin edilmektedir.

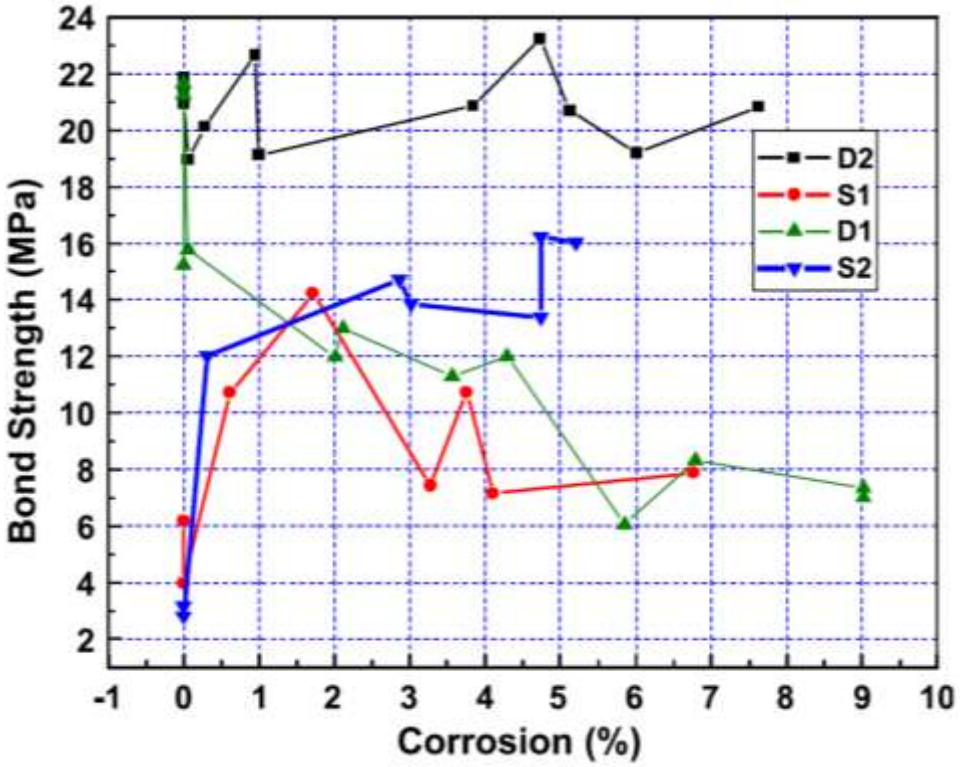


Şekil 2. 5: Lee vd. (2002) aderans modeli.

$$\tau = 5.21e^{(-0.0561C_L)}\ \text{MPa} \qquad (2.16)$$

2.2.4. Fang vd. (2004) aderans çalışması

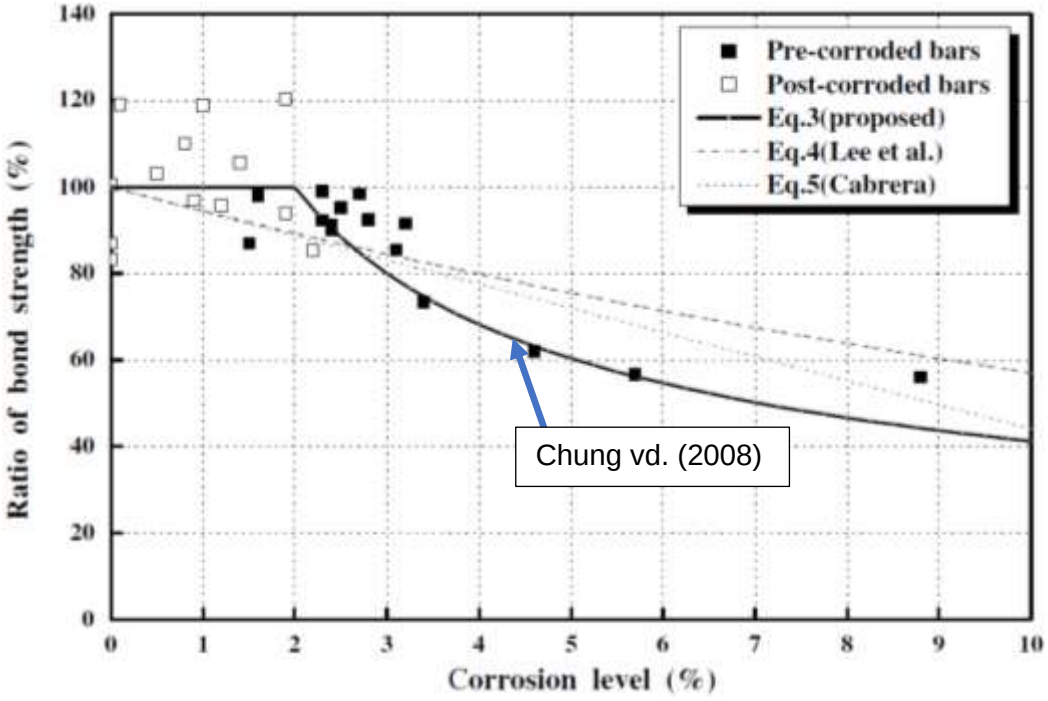
Fang vd. (2004) tarafından tek bir beton basınç dayanımı (52.1 MPa) üzerine yapılan deneysel çalışmada 20 mm çapındaki etriyeli ve etriyesiz; nervürlü ve nervürsüz betonarme donatıları 140 mm × 140 mm × 180 mm boyutlarındaki beton içerisinde hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada korozyon oranları %0 ve %9 arasında değerler almıştır. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere daha önce sıralanan aderans modellerinden farklı olarak Fang vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada aderans kuvveti ani azalım göstermemektedir. Aderans kuvveti belli bir korozyon oranına kadar artmakta ardından azalım göstermektedir. Bundan dolayı Fang vd. (2004) tarafından elde edilen aderans kuvvet değerleri korozyonun betonarme donatısı üzerindeki etkisini daha doğru bir şekilde ifade etmektedir. Korozyon ürünün donatı çevresini sararak sargılama etkisini artırdığı ardından hacimsel genişlemeye ve sonucunda çatlamanın meydana gelmesi ile birlikte aderans kuvvetinin azalım göstermesi gerektiği prensibi ortaya tekrardan koyulmuştur. Bunlara ek olarak gerçekleştirilen çalışmada sargı donatılarının korozyon etkisinde göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 2. 6: Fang vd. (2004) deneysel aderans değerleri.

2.2.5. Chung vd. (2008) aderans modeli

Aderans kuvvetini korozyon oranına bağlı olarak tahmin etmek için geliştirilen diğer bir model Chung vd. (2008) tarafından çalışılmıştır. Yapılan çalışmada özellikle hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanıldığı çalışmalarda zaman zaman tercih edilen ve donatıların beton dışında paslandırılarak ardından beton dökümü ve çekme deneylerin yapıldığı çalışmalara atıfta bulunmak ve iki durum arasındaki farkı ortaya koymak için yapılan deneysel bir çalışmadır. Yapılan deneysel çalışmada tek bir beton basınç dayanımı ve paspayı göz önüne alınmıştır. Hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanıldığı çalışmada korozyon oranları %0 ve %10 arasında değerler almıştır. Daha önce sıralanan aderans modellerinden farklı olarak; Chung vd. (2008) aderans kuvvetinin %2 korozyon oranına kadar sabit kaldığını ve ardından korozyon oranına bağlı olarak üstel azalım gösterdiğini kabul edilmiştir.



Şekil 2. 7: Chung vd. (2008) aderans kuvvet değerleri.

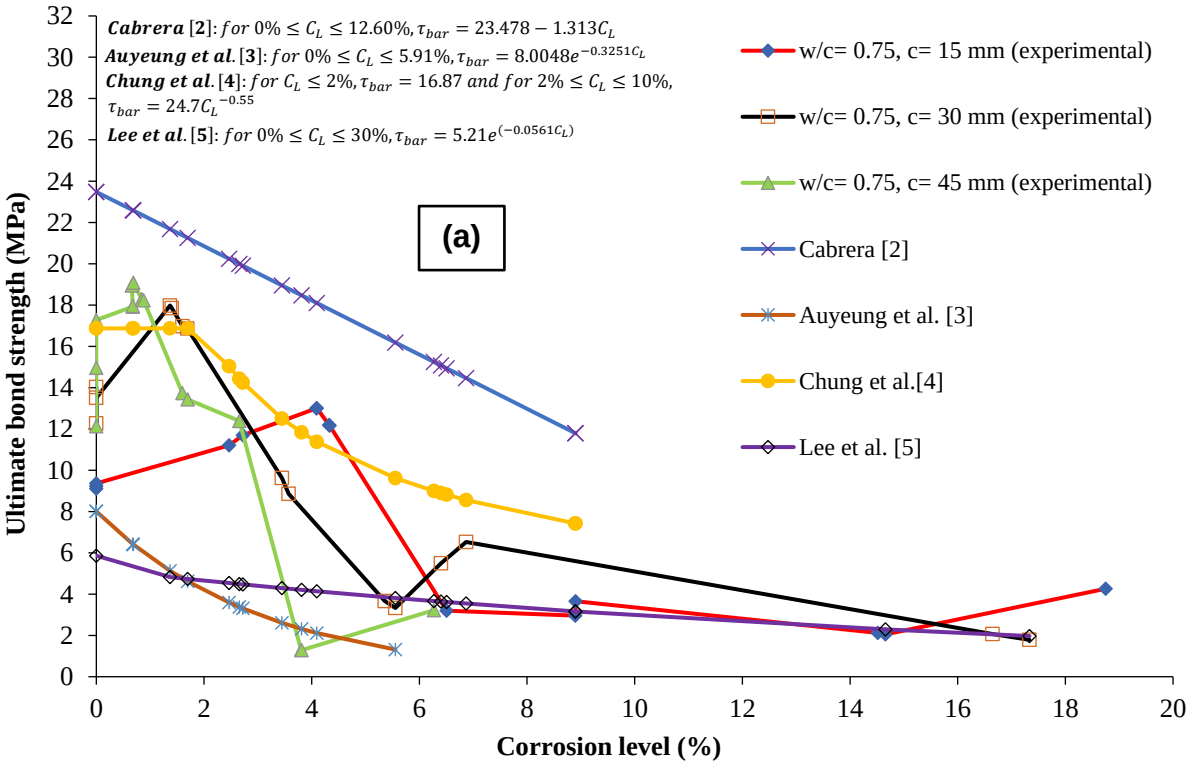
$$\tau = 16.87 \text{ MPa} \qquad CL \leq \%2.0 \tag{2.17}$$

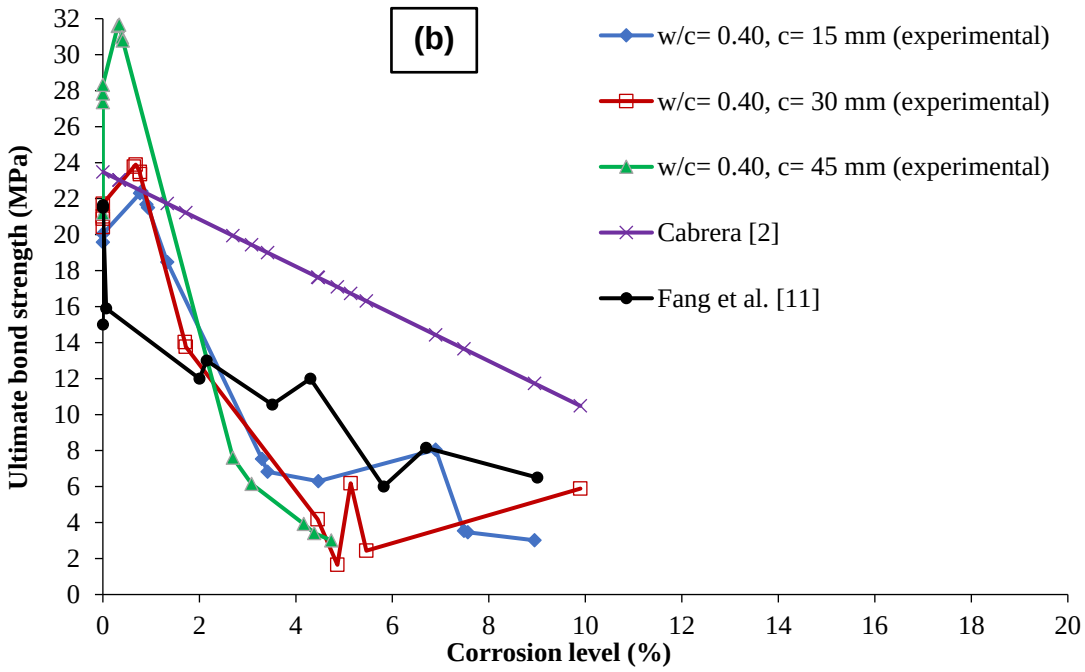
$$\tau = 24.7 {C_L}^{-0.55} \text{ MPa} \qquad CL > \%2.0 \tag{2.18}$$

2.2.6. Yalciner vd. (2012b) aderans modeli

Yukarıda sıralanan modeller ya tek bir beton basınç dayanımı ya da tek bir beton paspayının kullanılması ile geliştirilen modeller olduğundan korozyonun aderans kuvveti üzerindeki davranışını tam olarak yansıtamamaktadır. Farklı beton basınç ya da paspaylarının göz önüne alındığı çalışmalarda ise korozyonun belli oranlara kadar aderans kuvvetine katkısı ihmal edildiğinden korozyonun beton içerisindeki temel prensibi ile çelişkiler göstermektedir. Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan deneysel çalışmada korozyonun farklı beton basınç dayanımı ve farklı paspayların da aderans kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için yapılan son çalışmalardan bir tanesidir. Yapılan çalışmada korozyonun düşük ve yüksek basınç dayanımlarındaki etkisi incelenmiştir. Alt sınır olarak 23 MPa ve üst sınır olarak da 51 MPa beton basınç dayanımı olarak deneysel program tasarlanmıştır. Hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanıldığı deneysel çalışmada korozyon oranları %0 ve %18.75 arasında değerler almıştır. Şekil 2.8'de gösterildiği üzere aynı korozyon oranında paspayının donatı çapı oranına bağlı olarak aderans kuvveti değişkenlik göstermektedir. Paspayının donatı çapı oranına değerinin artması ile birlikte aderans kuvveti paslanmamış numuneler için artmaktadır. Ancak paspayının donatı çapı oranının paslanmış numunelerde artması durumunda aderans kuvvetindeki azalışın daha erken korozyon oranlarında meydana gelmesine sebebiyet verdiği

sonucuna ulaşılmıştır. Paspayının donatı çapına oranın artması ile birlikte korozyon ürünü daha çok bir alana basınç uygulamakta ve daha erken korozyon seviyelerinde aderans kaybı meydana gelmektedir. Paspayının donatı çapına oranın çok düşük olması durumunda (paslanmış elemanlarda) korozyon ürünü beton içerisinde daha az bir alana etki etmekte ve bu etki beton basınç dayanımına göre de değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.8'de gösterildiği üzere paslanmamış numunelerde aderans kuvvet değerleri beton basınç dayanımın artması ile birlikte artmıştır. Ancak beton basınç dayanımının artması ile birlikte aynı korozyon oranında düşük beton basınç dayanıma sahip numunelerdeki aderans kuvvetindeki artış daha yüksek korozyon oranlarında devam etmiştir. Yüksek beton basınç dayanımda gevrek olan beton korozyonun etkisi ile daha da gevrek bir hal alarak daha düşük korozyon oranlarında aderans kuvvetinin azalmasına sebebiyet vermiştir.





Şekil 2. 8: Yalciner vd. (2012b) aderans kuvvet değerleri: (a) w/c= 0.75; (b) w/c= 0.40.

Yalciner vd. (2012b) tarafından geliştirilen model aderans kuvvetini beton basınç dayanımı, paspayının donatı çapına ve korozyon sınır oranlarına göre tahmin etmeye yarayan ampirik bir modeldir. Geliştirilen model aderans kuvvetinin arttığı ve azaldığı bölgeler olarak iki kısma ayrılmıştır. Artışın ve azalışın meydana geldiği bölgeler beton basınç dayanımı ve paspayının donatı çapına oranına bağlı olarak farklı şekillerde modellenmiştir. Aderans kuvvetinin sınır korozyon seviyelerinden sonra azalması beton da çatlamanın başladığı ve çatlak genişliğine bağlı olarak aderans kuvvetinin tahmin edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada aynı korozyon oranında betondaki birincil çatlak genişliklerinin yüksek beton basınç dayanımda daha fazla olduğu gözlenmiş ve elde edilen veriler ampirik modele yansıtılmıştır. Yalciner vd. (2012b) tarafından korozyonun beton basınç dayanımına bağlı olarak sebep verdiği birincil çatlak genişlikleri; gerçekleştirilen bu deneysel çalışmadaki veriler ile örtüşmektedir.

Aderansın arttığı bölge için;

$c/D < 2$ ve $0 \leq C_L \leq 4$ $\quad f_c' = 23$ MPa

$0 \leq C_L \leq 0.8$ $\quad f_c' = 51$ MPa

$$\tau_{bu} = 0.40551 f_c' - 0.25306 \left(\frac{c}{D}\right) + 0.97926\, C_L \text{ (MPa)} \quad (2.19)$$

$c/D \geq 2$ ve $0 \leq C_L \leq 1.4$ $\quad f_c' = 23$ MPa için

$0 \leq C_L \leq 0.68$ $\quad f_c' = 51$ MPa için

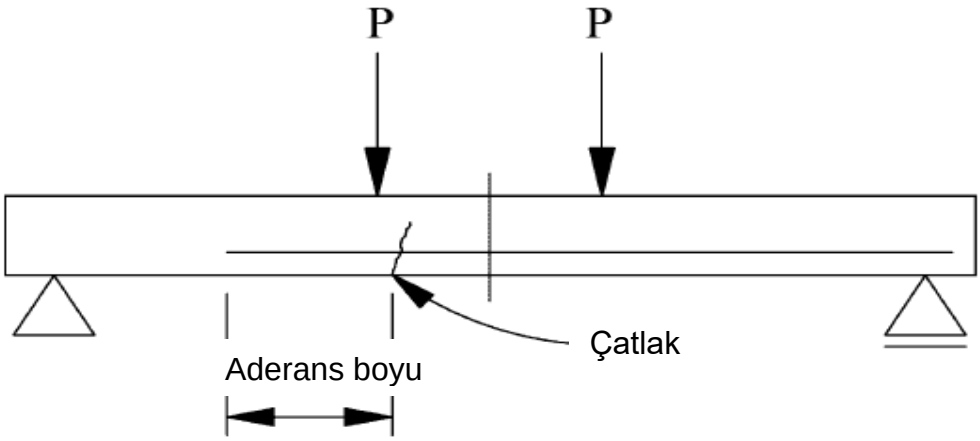
$$\tau_{bu} = e^{\left(0.01572 f_c' + 0.22957\left(\frac{c}{D}\right) + 0.13946 C_L + 1.75913\right)} \text{ (MPa)} \quad (2.20)$$

Aderansın azaldığı bölge için;

$$\tau_{bu} = e^{(0.01667 f_c\text{'}-1.06499 W_{cr}+0.20658\frac{c}{D}-0.12928 C_L+1.80139)} \text{ (MPa)} \qquad (2.21)$$

2.2.7. Chung vd. (2004) aderans boyundaki değişkenlik

Chund vd. (2004) tarafından yapılan çalışma korozyonun aderans ve donatı sıyrılma ilişkilerinin tanımlanmasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Yapılan deneysel çalışma ile birlikte ACI 318 (2002) yönetmeliğinde tanımlanan gerekli aderans boyu korozyon etkisi altında incelenmiş ve korozyon oranına bağlı olarak aderans boyu için bir düzeltme katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada betonarme kirişlerine yerleştirilen çekme donatıları kiriş açıklığından belli bir mesafede kesilerek bırakılmıştır. Farklı korozyon oranları için aderans boyundaki değişkenlik deneysel olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. 9: Chung vd. (2004) aderans boyundaki değişkenlik.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda korozyondan dolayı aderans boyundaki değişkenliği tahmin etmek için geliştirilen ampirik model Denklem 2.22'de sunulduğu şeklindedir.

$$l_d^{'} = l_d x \frac{1}{\delta} \qquad (2.22)$$

Denklem 2.22'de tanımlanan δ düzeltme katsayısı olup, korozyon oranın 2 ve 2'den küçük olması durumunda 1 alınması, ikiden büyük olması durumunda ise $2.09C_L^{-1.06}$ olarak alınması önerilmiştir. Chung vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada korozyondan dolayı aderans boyundaki değişkenlik kiriş içerisine yerleştirilen ve ucu kesilen donatının katkısı eksenel yükün ihmal edildiği eğilme davranışı ile sağlanmıştır. Mevcut literatürde eksenel yük etkisi altında paslanmış betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında aderans boyunu tahmin etmeye yönelik ampirik bir model bulunmamakta olup; gerçekleştirilen bu TÜBİTAK çalışması ile bu eksikliğin giderilmesi çalışılmış ve aderans-sıyrılma ilişkisi modelinde korozyondan dolayı aderans boyundaki değişkenlik göz önüne alınmıştır.

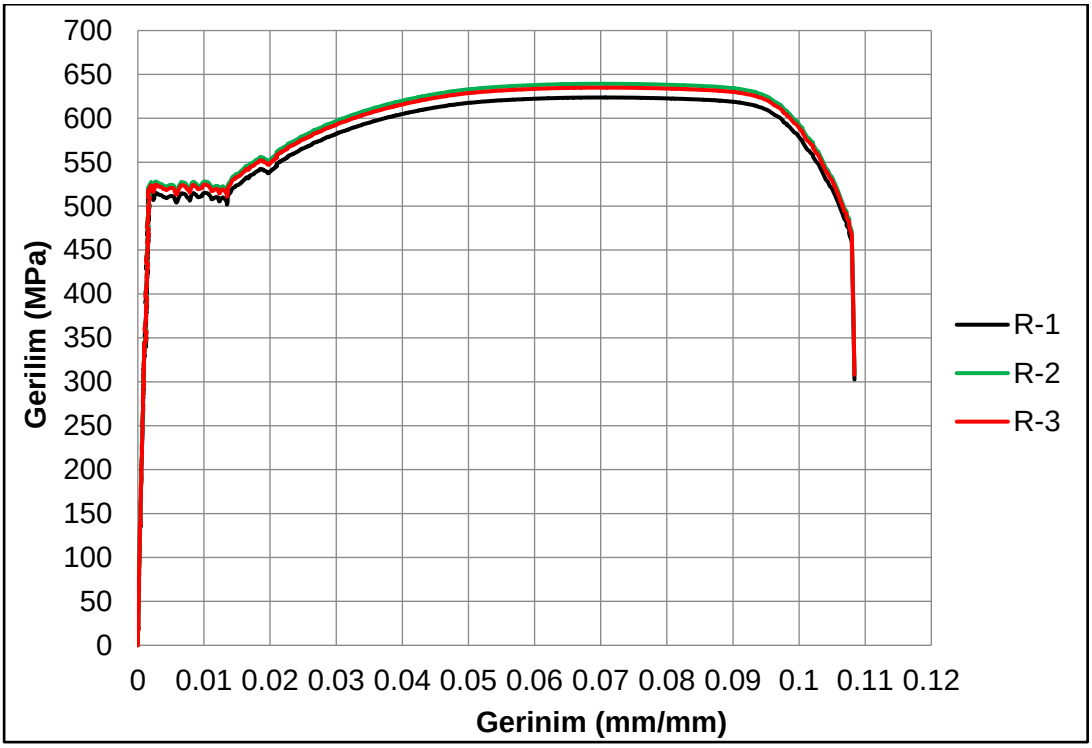
BÖLÜM III

3. DENEYSEL PROGRAM

3.1. Malzeme Özellikleri

3.1.1. Geleneksel betonarme donatılarının mekanik özellikleri

Paslanmamış geleneksel S420 betonarme donatılarının mekanik özellikleri çalışma öncesi belirlenerek çalışmada kullanılması hedeflenen betonarme donatıları temin edilmiştir. Şekil 3.1'de çalışma kapsamında kullanılan geleneksel betonarme donatılarının çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilim-gerinim ilişkileri gösterilmektedir.



Şekil 3. 1: 16 mm çapındaki geleneksel betonarme donatıların mekanik özellikleri.

3.1.2. Paslandırılmış betonarme donatılarının mekanik özellikleri

Çalışma kapsamında paslanmış betonarme donatıların (gerinim pullarının yapıştırıldığı) mekanik özelliklerinin belirlenmesi için beton içerisinde paslandırılan ve yükleme deneyleri sonrasında betondan çıkartılarak çekme deneyleri uygulanan betonarme donatılarından elde edilmiştir. Betonarme donatılarının ilk kütlelerinin kaydedilmesinden sonra hızlandırılmış korozyon yöntemine geçilmiştir. Her bir betonarme grubundaki donatılar için hedeflenen korozyon oranlarının elde edilebilmesi için kontrollü paslandırma süreci Faraday Kanununa

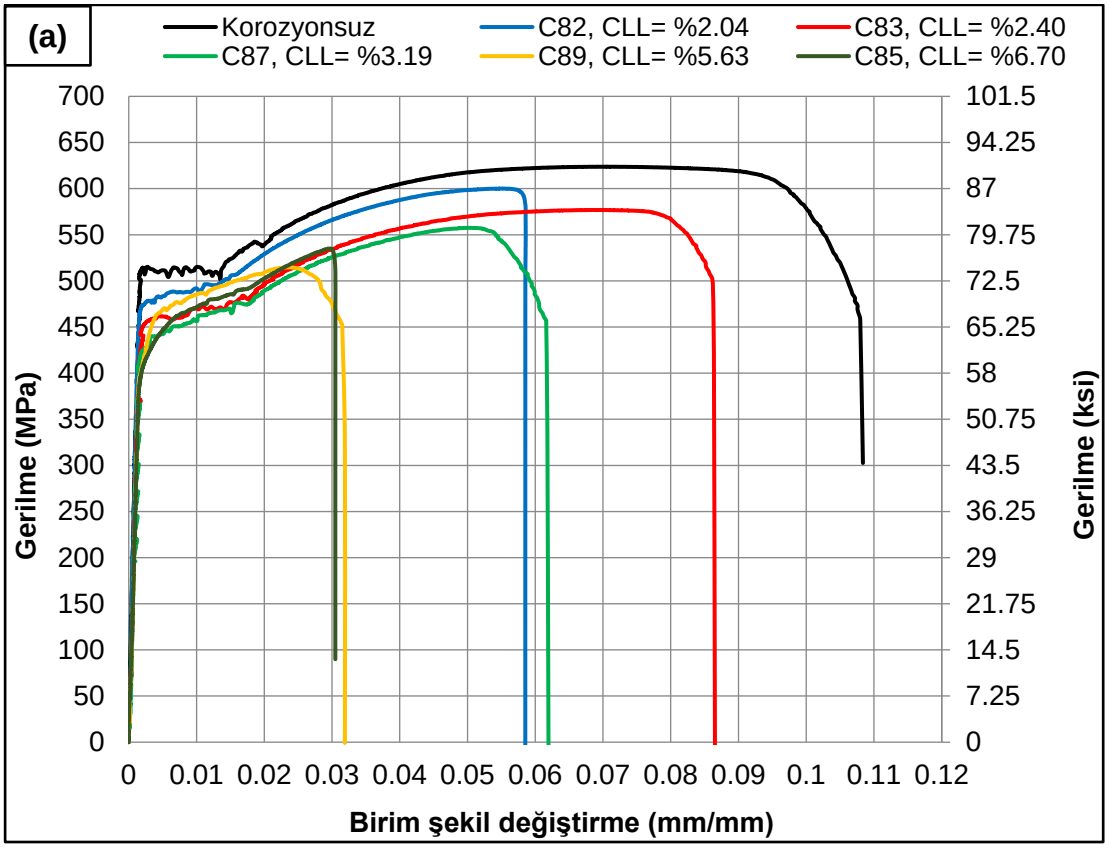
göre gerçekleştirilmiştir. Faraday Kanunu kullanılarak farklı numuneler için hedeflenen pas oranlarını farklı zaman dilimlerinde elde etmek mümkündür. Denklem 3.1'de Faraday Kanunu'na göre hesaplanan kütle kaybı verilmektedir.

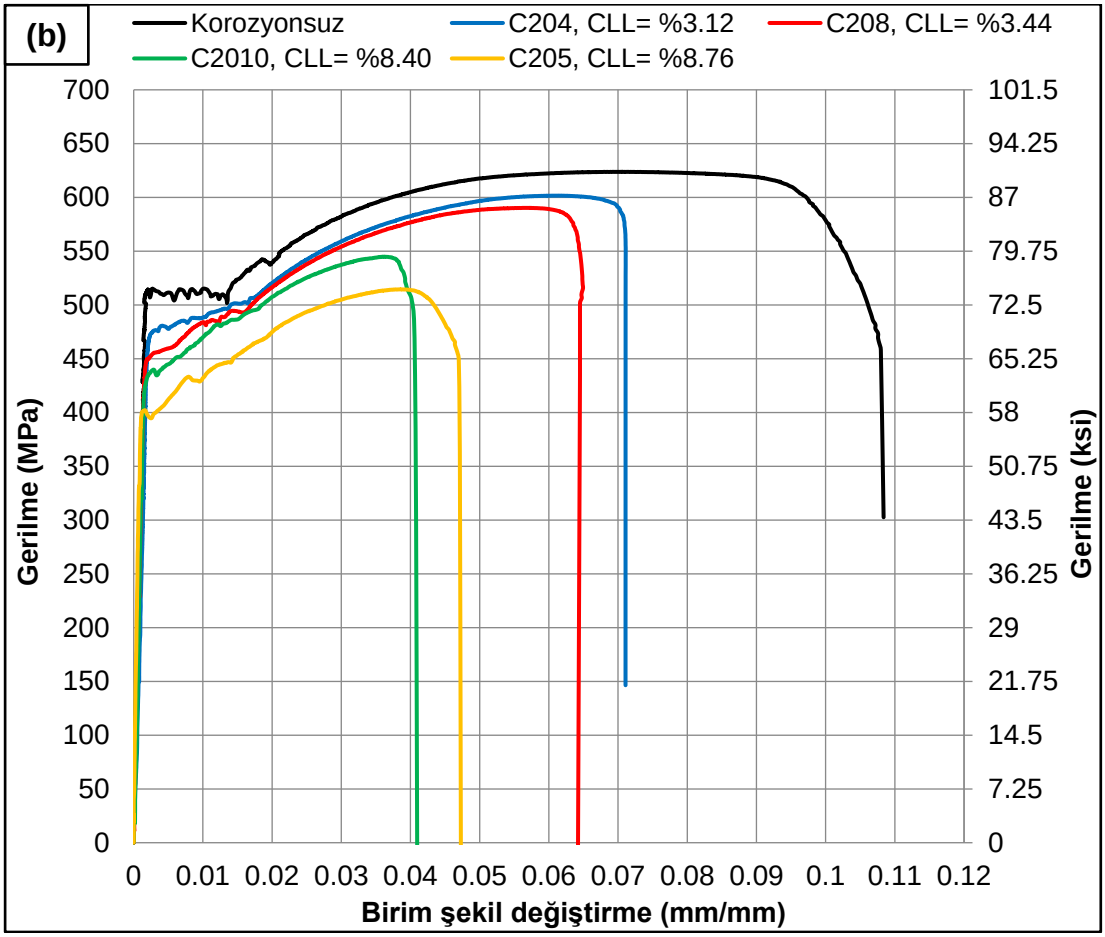
$$\text{m} = \frac{t(s) \times I(A) \times 55.847}{2 \times 96{,}487} \tag{3.1}$$

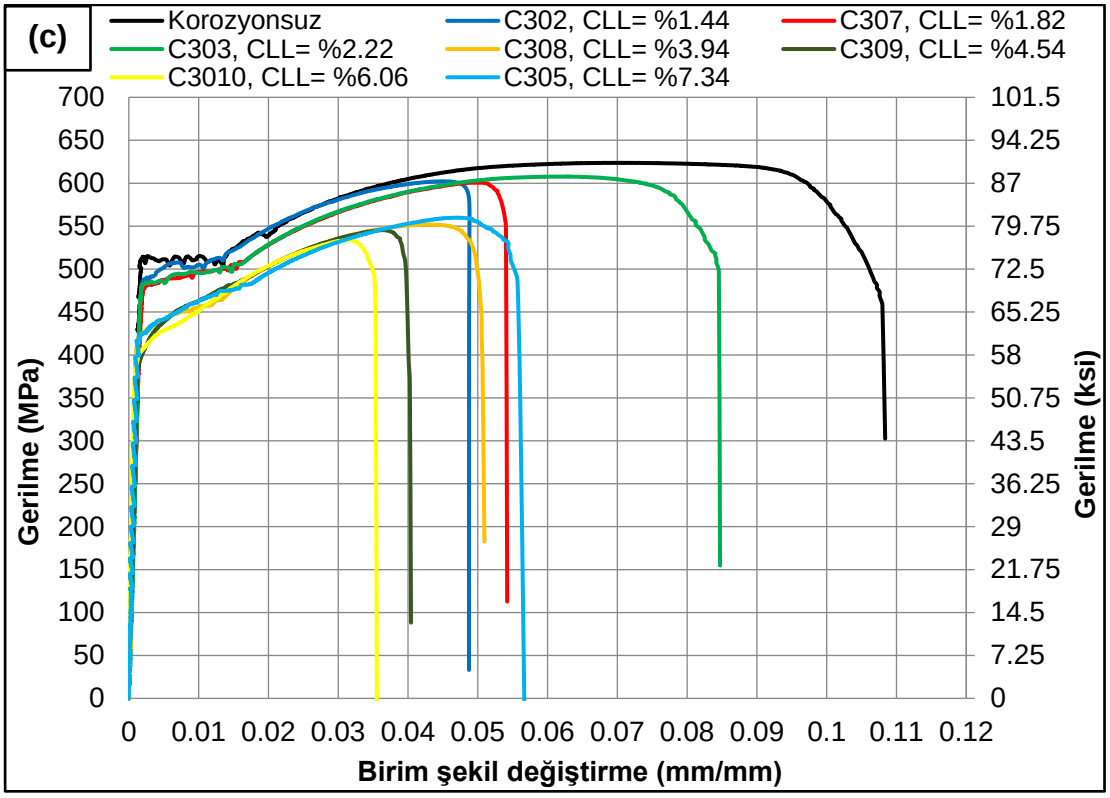
Denklem 3.1'de t uygulanan korozyon süresini (sn), I (amp) ise sistemden geçen akımı göstermektedir. Sistemden geçen her bir saniyedeki akımın kaydedilmesi ile birlikte hedeflenen kütle kaybı ve buna bağlı olarak tasarlanan paslandırma oranları elde edilmektedir. Faraday Kanunu'na göre sistemden geçen akım her saniye için kaydedilip, hedeflenen pas oranına ulaşılması için gerekli süre hesaplanmakta; bu süreyi dikkate alarak da sistemin belirlenen zamanında kapatılması şeklinde bir yol izlenmektedir. Denklem 3.1'de hedeflenen korozyon oranlarına ulaşılmasının ardından ve yükleme deneylerinden sonra beton içerisinden kırılarak çıkartılan donatılar için ASTM G1-03 (2003) standardında belirtilen hem mekanik hem de kimyasal temizleme yöntemleri uygulanarak donatı yüzeyindeki pas ürünleri kaldırılmış ve donatıların tekrardan kütleleri ölçülerek gerçek korozyon oranları hesaplanmıştır. Mekanik temizleme işlemleri için tel fırçalar kullanılırken; kimyasal temizleme işlemleri için betonarme donatıları su ağırlığının %5 oranında hidroklorik asit barındıran temizleme tankına batırılarak temizleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.2 donatılardaki gerçek korozyon oranlarının hesaplanması için kullanılmış olup; denklemde *CL* korozyon oranını, W_i donatının ilk kütlesini (gr), W_f (gr) ise donatının son kütlesini temsil etmektedir.

$$CL = \frac{W_{i-}W_f}{W_i} x100 \tag{3.2}$$

Farklı oranlarda korozyon oranlarının elde edilmesinden sonra farklı korozyon oranlarındaki donatılar için çekme deneyleri yapılarak korozyona maruz kalmış betonarme donatıların mekanik özellikleri elde edilmiştir. Şekil 3.2'de çekme deneyleri yapılan ve farklı korozyon oranlarındaki betonarme donatılarının gerilim-gerinim grafiği gösterilmektedir.


(a)
Korozyonsuz
C82, CLL= %2.04
C83, CLL= %2.40
C87, CLL= %3.19
C89, CLL= %5.63
C85, CLL= %6.70
Gerilme (MPa)
Gerilme (ksi)
Birim şekil değiştirme (mm/mm)

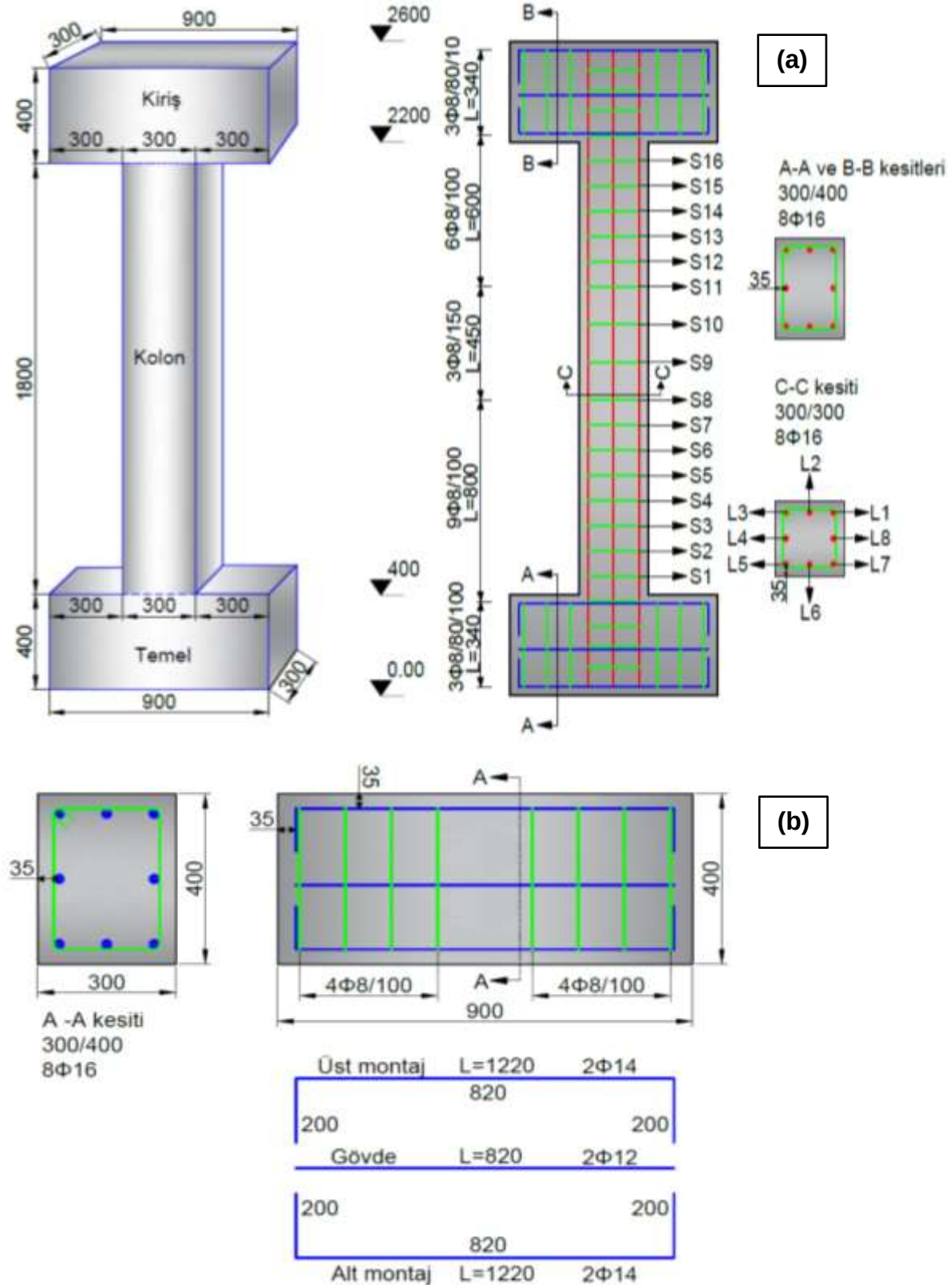

(b)
Korozyonsuz
C204, CLL= %3.12
C208, CLL= %3.44
C2010, CLL= %8.40
C205, CLL= %8.76
Gerilme (MPa)
Gerilme (ksi)
Birim şekil değiştirme (mm/mm)



Şekil 3. 2: Paslandırılmış ve 16 mm çapındaki donatıların mekanik özellikleri: (a): C8 betonarme kolonundan çıkartılan donatılar; (b) C20 betonarme kolonundan çıkartılan donatılar; (c) C30 betonarme kolonundan çıkartılan donatılar.

3.2 Betonarme Kolonlarının Kesit Özellikleri

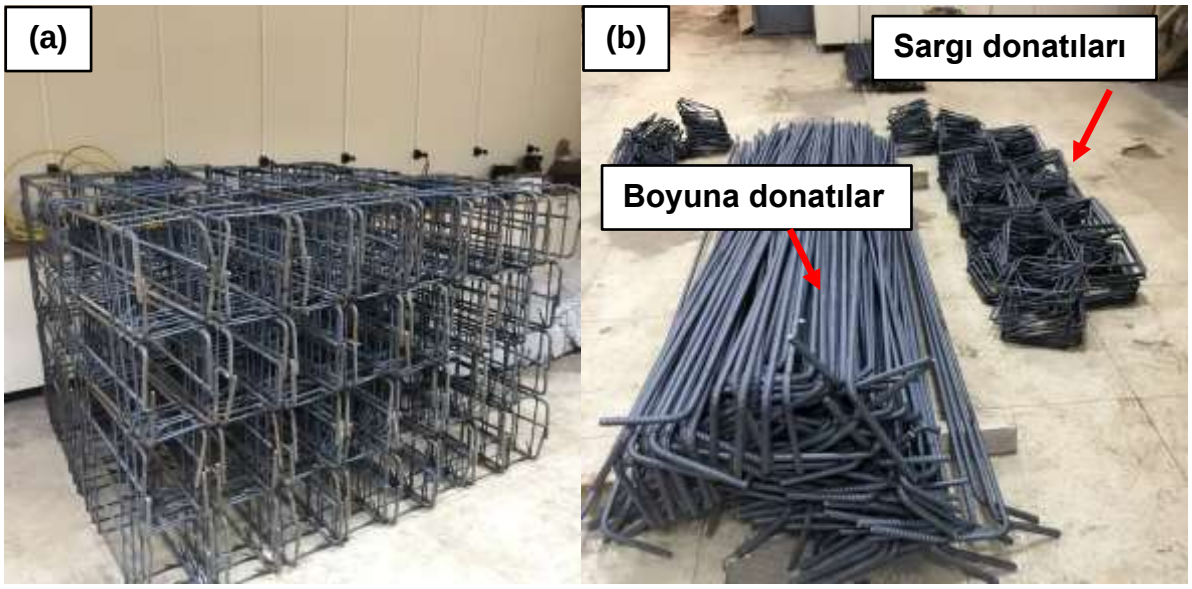
Proje kapsamında sunulan ve yükleme deneyleri yapılan betonarme kolonlarının kesit özellikleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.3'te verilen betonarme kolonlarının temelden kirişe olan net yüksekliği 180 cm olup temel ankraj boyundan üst kirişe doğru uzatılan toplam donatı boyu 225 cm'dir. Betonarme kolonlarının kolon yükseklikleri ve genişlikleri tüm deneyi yapılan betonarme kolanları için özdeş olup 30 cm × 30 cm olarak tasarlanmıştır. Her bir betonarme kolonu için 4'er adet 16 mm çapında nervürlü boyuna donatılar kullanılmıştır. Şekil 3.3(a)'da gösterildiği üzere etriyeler temelden kiriş seviyesine kadar numaralandırılmış olup; yükleme deneylerinden sonra her bir etriye için (S1'den S16'ya kadar) gerçek korozyon oranları çalışma kapsamında sunulmuştur (bakınız bölüm 4.1, elde edilen gerçek korozyon oranları ve dağılımları). Aynı şekilde Şekil 3.3(a)'da betonarme kolon boyuna donatıları için sunulan numaralandırma isimleri gösterilmiş olup yükleme deneylerinden sonra her bir boyuna donatı için (L1'den L8'e kadar) gerçek korozyon oranları çalışma kapsamında sunulmuştur (bakınız bölüm 4.1, elde edilen gerçek korozyon oranları ve dağılımları).



Şekil 3. 3: Betonarme kolonlarının kesit özellikleri: (a) kolon kesit özellikleri; (b) kiriş ve temel kesit özellikleri.

3.3 Betonarme Donatı Montaj İşleri: Donatı kesme, tartım, montaj ve bakır kabloların bağlanması

Proje kapsamında 30 adet betonarme kolonu için 30 adet betonarme temel ve kirişleri ayrı olarak üretilmiştir. Tüm betonarme kolonları için toplamda 240 adet 16 mm çapında boyuna kolon donatısı ve 540 adet 8 mm çapında etriyeler belirtilen ölçülerde kesilmiş ve tartım öncesi hazır hale getirilmiştir. Hazır hale getirilen temel, kiriş ve kolon donatıları tartım öncesi sıralanmak üzere yeni bir odaya kodlanmak üzere taşınmış ve istiflenmiştir. Şekil 3.5'te üç farklı beton sınıfı için tartım öncesi sıralanan betonarme donatıları gösterilmektedir.

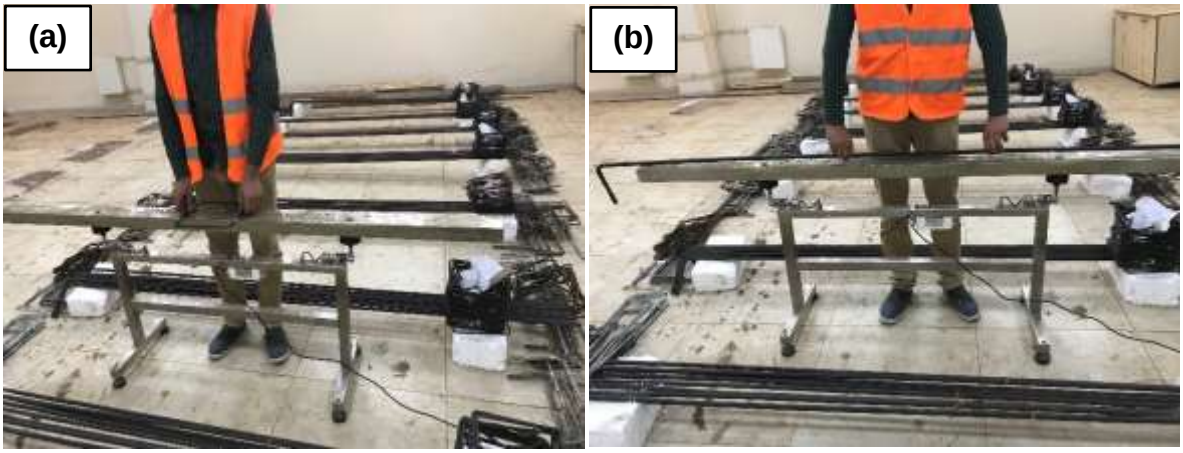


Şekil 3. 4: Tartım öncesi hazır hale getirilen betonarme donatıları: (a) kiriş kafesleri; (b) boyuna ve sargı donatıları.



Şekil 3. 5: Üç farklı beton sınıfı için tartım öncesi sıralanan betonarme donatıları

Betonarme donatılarının kesim işlemlerinin tamamlanması ve sıralanması ardından tartım işlerine geçilmiştir. Bu aşamada donatıların ilk kütlelerini etkileyecek donatı parçacıkları, toz, toprak vb. atıklar tel fırça ile temizlenerek tüm boyuna donatılarından ve etriyelerden arındırılmıştır. Her bir donatının mekanik temizleme işlemleri ardından tüm boyuna ve sargı donatıları hassas ve iki noktadan yük hücreli tartım kullanılarak tartılmıştır. Şekil 3.6'da proje kapsamında kullanılan iki noktadan yük hücreli hassas terazi ve tartım işleri gösterilmektedir.



Şekil 3. 6: Betonarme donatılarının tartılması: (a) etriye; (b) boyuna donatı.

Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'de üç betonarme sınıfı için toplamda 30 adet betonarme kolon donatılarının paslandırma öncesi ilk kütleleri verilmiştir. Mevcut literatürde korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarında gerçek korozyon oranlarını belirlenmesinde tüm donatıların betonarme kolonlarından çıkartılıp korozyon oranlarının belirlenmesine yönelik değerlerin bulunmaması sebebi ile; tüm betonarme kolonları için gravimetrik değerler detaylı olarak bu çalışmada verilmiştir. Böylelikle daha sonra geliştirilebilecek çalışmalara ışık tutulması hedeflenmiştir

Tablo 3. 1: C8 betonarme kolonları için paslandırma öncesi gravimetrik değerleri (gr).

Kod	$N/A_c \times f_{ck}$= %20					$N/A_c \times f_{ck}$= %40				
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
L1	PASLANDIRILMAMIŞ KOLON	4069.0	4012.0	4112.0	4106.0	PASLANDIRILMAMIŞ KOLON	4098.0	4170.0	4059.5	4158.0
L2		4077.0	4102.5	4084.0	4168.0		4098.0	4082.0	4085.0	4096.5
L3		4080.0	4128.5	4077.0	4091.0		4104.0	4091.0	4077.5	4119.0
L4		4090.0	4087.5	4102.5	4106.5		4079.0	4099.0	4062.5	4064.5
L5		4099.5	4106.0	4084.5	4086.5		4102.5	4088.5	4163.5	4084.5
L6		4150.0	4101.5	4079.5	4073.0		4094.5	4101.0	4099.5	4168.0
L7		4111.1	4089.5	4084.0	4082.5		4099.5	4082.5	4101.0	4116.5
L8		4190.5	4100.5	4059.5	4123.0		4096.0	4085.5	4174.0	4090.0
S1		479.0	485.0	486.0	477.5		463.0	481.5	466.5	483.0
S2		499.0	482.0	481.5	485.5		506.0	497.5	498.5	479.5
S3		483.5	501.0	501.5	485.0		505.0	463.0	464.0	464.0
S4		507.0	482.0	495.0	496.5		495.0	482.0	502.0	480.0
S5		501.5	479.0	462.5	483.5		480.0	475.0	508.0	482.5
S6		486.0	487.5	482.0	486.0		498.5	503.0	479.5	481.0
S7		459.5	486.5	495.0	494.5		480.5	465.5	485.5	497.0
S8		486.0	479.0	478.5	466.0		484.5	507.0	479.0	464.0
S9		486.0	504.0	463.5	485.5		488.0	463.0	481.0	464.5
S10		486.0	493.0	484.5	475.5		482.5	486.0	478.0	506.5
S11		496.0	495.0	485.0	477.5		461.0	481.5	464.5	467.5
S12		508.0	485.0	475.5	478.0		480.5	499.5	506.5	494.0
S13		486.5	460.0	476.5	484.0		482.0	466.0	463.5	490.0
S14		489.0	486.0	465.0	454.5		479.0	477.0	483.5	488.0
S15		462.5	507.0	463.0	476.0		489.0	497.5	463.5	462.0
S16		486.0	462.5	489.0	485.0		488.0	497.5	463.0	500.0
S17		486.5	484.5	483.0	483.5		494.5	482.0	479.5	499.0
S18		463.0	484.5	500.5	495.0		486.5	463.5	483.5	464.5

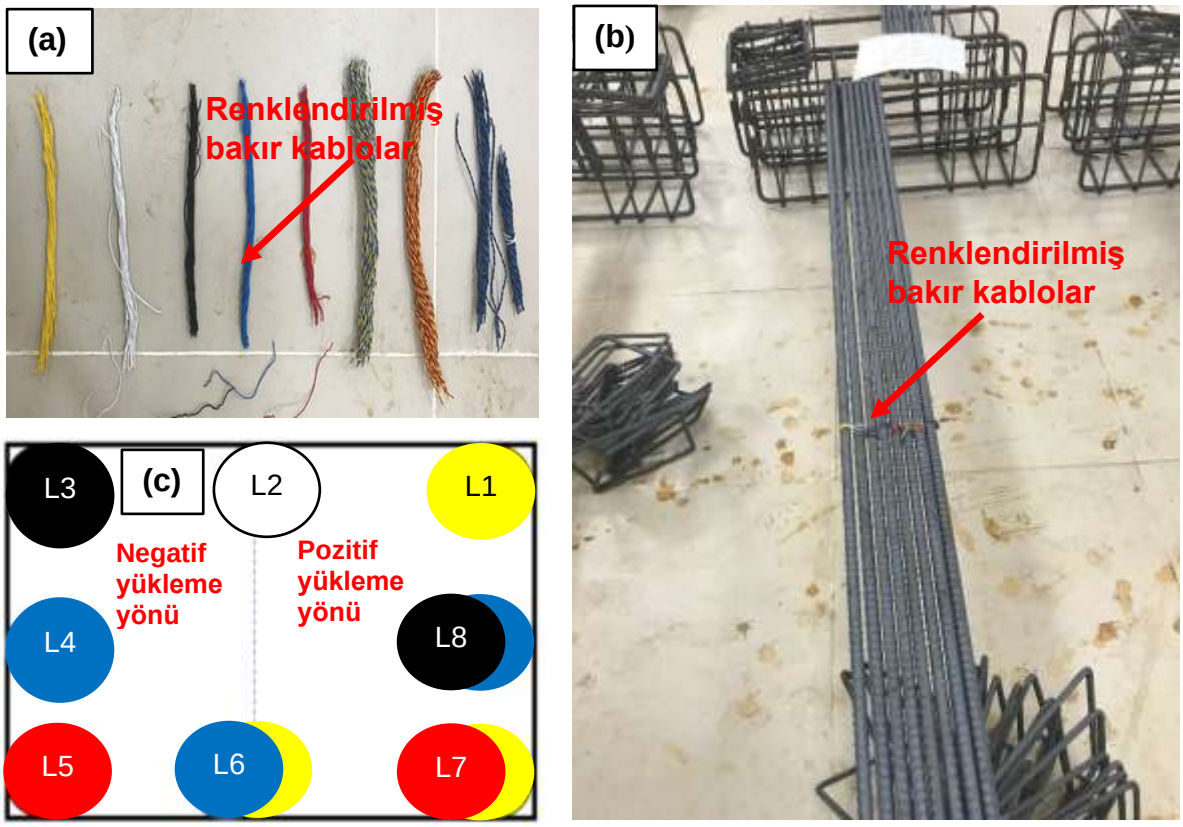
Tablo 3. 2: C20 betonarme kolonları için paslandırma öncesi gravimetrik değerleri (gr).

Kod	$N/A_c \times f_{ck}$= %20					$N/A_c \times f_{ck}$= %40				
	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
L1	PASLANDIRILMAMIŞ BETONARME KOLONU	3995.0	4103.0	4082.5	4068.0	PASLANDIRILMAMIŞ BETONARME KOLONU	4047.5	4107.5	4071.0	4052.0
L2		4052.0	4034.5	4025.0	4041.5		4033.5	4045.5	4042.0	4052.0
L3		4067.0	4041.0	4056.5	4055.0		4046.5	4033.0	4042.5	4027.0
L4		4028.5	4051.0	4024.5	4023.0		4036.0	4085.5	4074.5	4036.0
L5		4145.5	4107.0	4088.5	4051.5		4116.0	4057.0	4068.5	4008.5
L6		4073.5	4052.0	4066.5	4052.0		4072.0	4135.0	4026.5	4022.5
L7		4044.5	4034.0	4055.5	4034.0		4031.0	4038.5	4043.5	4077.0
L8		4060.0	4076.5	4109.5	4063.5		4094.5	4058.0	4121.5	4017.0
S1		430.0	441.5	443.5	449.0		466.5	450.0	443.0	446.0
S2		451.5	427.0	457.5	421.0		443.0	442.0	462.0	463.0
S3		450.5	441.0	422.0	442.0		447.5	443.0	449.0	450.0
S4		466.0	448.5	444.0	436.5		442.0	448.0	443.5	447.5
S5		448.0	447.5	443.5	452.0		449.5	440.0	450.5	444.0
S6		445.0	447.5	446.5	456.0		453.5	438.5	442.5	447.0
S7		454.5	432.5	441.0	448.0		435.5	455.5	440.0	449.0
S8		446.0	450.5	426.5	470.5		449.5	461.5	432.0	433.5
S9		444.5	462.0	467.0	456.0		449.5	440.5	486.5	449.5
S10		468.5	455.0	423.0	461.0		445.5	482.5	453.5	455.0
S11		477.5	465.5	460.0	448.5		444.5	444.0	472.0	468.0
S12		450.5	448.5	443.0	428.5		451.0	478.0	460.5	453.5
S13		440.5	452.0	436.0	451.0		443.5	444.0	431.0	439.0
S14		452.5	425.0	439.0	419.0		438.5	445.0	450.5	449.5
S15		440.5	461.0	467.0	443.5		453.0	430.0	448.0	432.0
S16		441.0	440.0	463.0	432.5		433.5	457.5	437.5	446.0
S17		466.5	447.5	464.5	451.0		430.0	429.0	449.5	457.0
S18		454.0	446.0	437.0	441.0		447.0	434.5	446.5	448.5

Tablo 3. 3: C30 betonarme kolonları için paslandırma öncesi gravimetrik değerleri (gr).

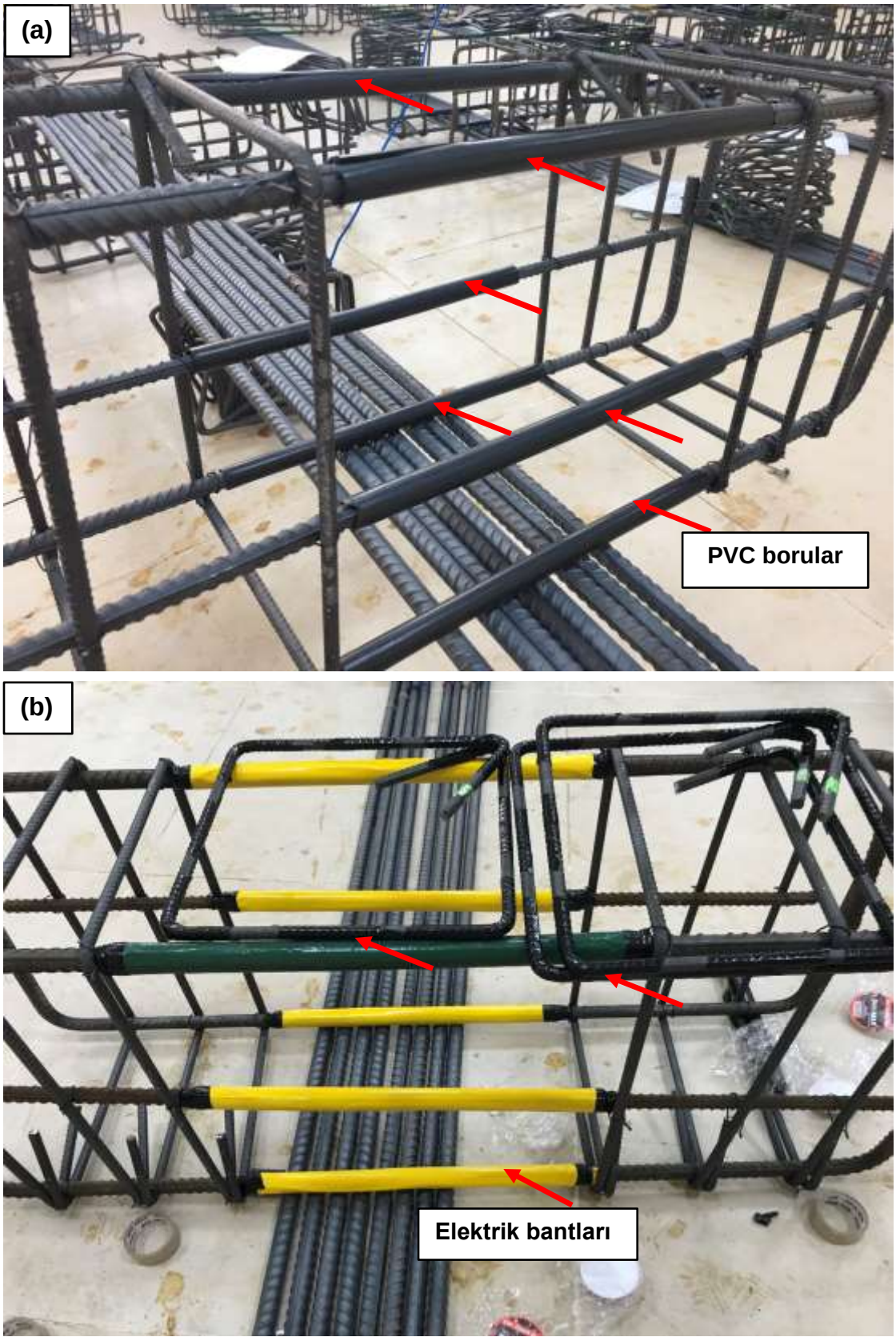
Kod	$N/A_c \times f_{ck}$= %20					$N/A_c \times f_{ck}$= %40				
	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30
L1	PASLANDIRILMAMIŞ BETONARME KOLONU	4047.5	4022.0	4084.0	4142.0	PASLANDIRILMAMIŞ BETONARME KOLONU	4073.5	4005.5	3988.5	3990.5
L2		4060.0	4018.0	4027.5	4118.0		3989.0	4118.5	4013.5	4030.0
L3		4068.0	4072.0	4038.5	3997.0		4020.0	3956.5	4030.5	4087.0
L4		3984.0	4016.5	3988.0	4041.0		3996.5	4081.0	4097.5	4053.0
L5		4059.5	4057.5	4018.0	4009.0		4056.0	4003.0	4064.5	4008.5
L6		4117.5	4096.0	4112.0	3977.5		4214.0	4067.0	4080.5	4066.0
L7		4104.0	3959.5	4160.5	4108.5		4049.0	4111.0	4089.5	4086.0
L8		4036.0	4026.0	4043.0	4036.5		4049.5	4017.5	4082.5	4126.5
S1		446.5	433.5	461.5	442.0		438.0	466.0	436.0	452.5
S2		443.5	448.5	449.5	429.0		452.0	428.0	445.5	449.5
S3		471.0	457.0	460.0	445.0		463.5	420.5	441.5	426.0
S4		453.5	461.0	451.0	449.0		450.5	448.0	460.0	434.0
S5		422.5	464.0	442.5	462.5		458.5	426.0	443.0	458.0
S6		448.0	444.5	444.5	437.5		455.0	442.0	445.0	437.5
S7		477.0	471.0	441.5	438.5		443.0	433.5	469.5	458.0
S8		491.0	460.0	441.5	460.0		455.5	420.5	444.0	446.0
S9		456.0	446.0	442.5	445.5		447.5	440.0	465.0	457.5
S10		419.5	448.0	446.5	443.5		426.0	444.5	433.5	444.0
S11		434.5	445.5	432.0	424.5		446.5	467.0	463.0	449.5
S12		451.5	460.0	431.0	442.5		448.0	446.5	457.5	458.0
S13		451.0	431.5	451.0	467.0		511.0	445.5	434.0	444.0
S14		464.0	445.5	437.0	440.5		462.5	444.5	444.5	446.0
S15		444.0	442.5	426.0	449.0		447.5	441.5	430.0	458.5
S16		443.0	467.0	442.0	439.0		461.5	447.0	463.5	473.0
S17		456.0	445.5	463.5	441.0		451.0	437.5	430.5	431.5
S18		452.0	428.5	449.0	488.5		439.0	448.0	432.0	430.5

Kolon boyuna ve sargı donatılarının sayılarının fazla olması ve çalışmanın temelini oluşturan donatıların ilk ve son kütlelerinin tartılma aşamalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için her bir kolon boyuna donatıları ve etriyeleri tartım sonrası kodlandırılmıştır. Kodlama aşamasında olası hataları minimize etmek için önceden belirlenen ve renklendirilen paslanmaz bakır kablolar boyuna donatılarına sarılmıştır. Bu aşamada proje kapsamında yer alan bursiyerler ile tatbik yapılarak sıfır hatada kodlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7'de her bir donatı için kullanılan renk kodlamaları için hazırlanan renklendirilmiş bakır kablolar ve bakır kabloların boyuna donatılara sarım işleri gösterilmektedir. Şekil 3.7'de gösterilen L1 ve L7 olarak kodlanan donatılar daha sonradan geliştirilen birincil korozyon çatlak genişliği ve sismik performans tahmin modeli için kullanılan betonarme donatılarıdır.



Şekil 3. 7: Betonarme kolon donatılarının kodlandırılması: (a) renkli paslanmaz bakır kabloların hazırlanması; (b) bakır kabloların boyuna donatılara sarılması; (c) renkli bakırlar ve yükleme düzleme için bakış yönü.

Şekil 3.7(c) yardımı ile tüm betonarme kolonları aynı bakış açısında monte edilmiş ve yükleme deneylerinden sonra beton içerisinden çıkartılan donatıların karışmaması için böyle bir yol izlenmiştir. Her ne kadar tüm donatılardan elektrik akımının geçirilmesi sağlansa da boyuna donatılardaki korozyon oranın tespit edilmesi (boyuna donatılarda farklı korozyon oranların oluşma ihtimaline karşın) ve sonuçların daha iyi bir şekilde değerlendirilebilmesi için bu aşama çalışma kapsamında önem arz etmiştir. Çalışma kapsamında betonarme temel ve kirişlerin mümkün olduğunca paslanmaya maruz kalmamaları için betonarme kolon donatılarının temel ve kiriş kafeslerine temas ettiği bölgeler ve boyuna donatılarına en yakın etriyeler polivinil klorür (PVC) plastik borular borular ve elektrik banttı ile kaplanmıştır. Plastik boruların alt yüzeyleri yine elektrik akımının kesintiye uğratılabilmesi için parafin ile kaplanmıştır. Beton dökümü sırasında plastik boruların içine sızabilecek suyun önlenmesi amacı ile plastik boruların üstü ikinci kez elektrik banttı ile sarılarak yalıtım işleri tamamlanmıştır. Bu işlem toplam da 30 adet betonarme kolonu için oluşturulan 30 adet temel ve 30 adet betonarme kirişi için uygulanmıştır. Şekil 3.8'de betonarme temel ve kirişlerine boyuna donatılardan aktarılacak olan elektrik akımı için yalıtım işleri gösterilmektedir.


(a)
PVC borular
(b)
Elektrik bantları



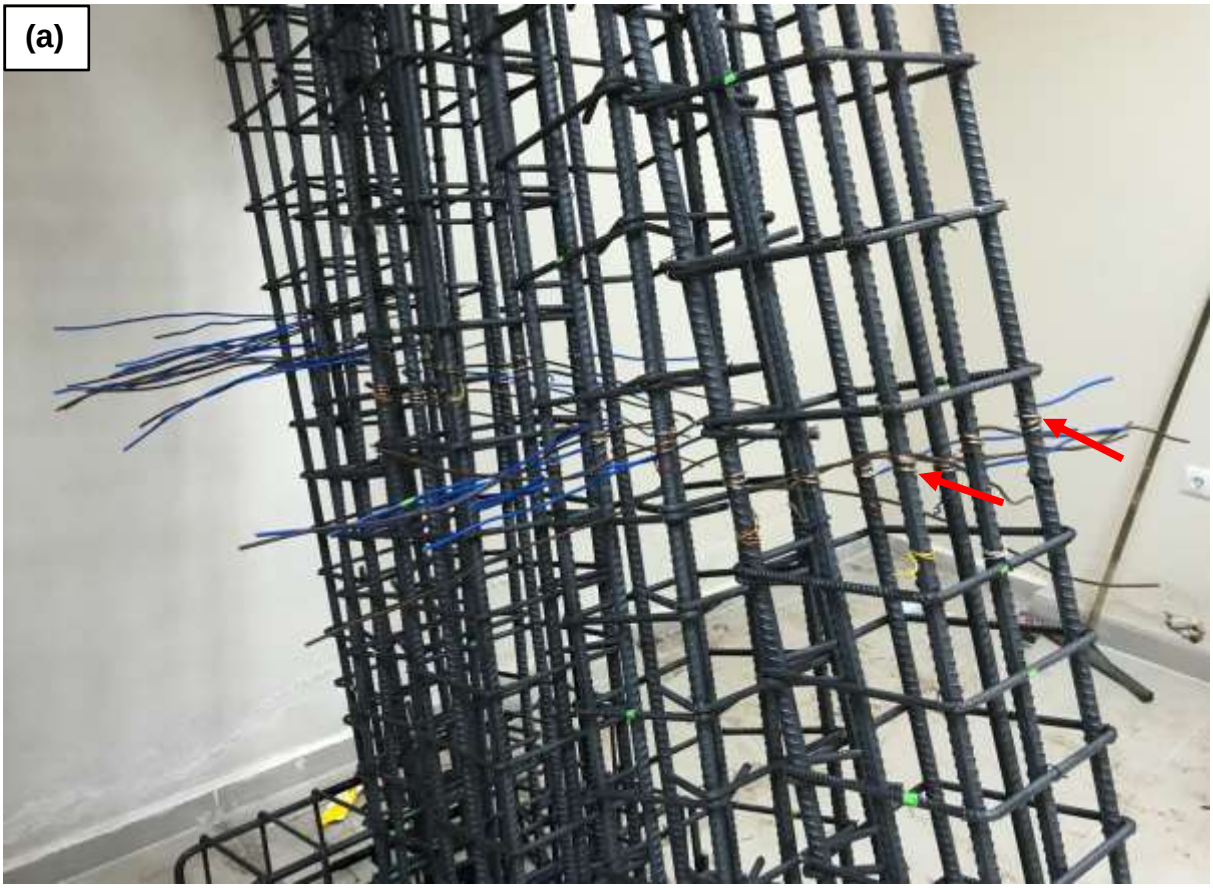
Şekil 3. 8: Betonarme temel ve kirişlerin yalıtım işleri: (a) plastik boruların temel ve kiriş boyuna donatılarına yerleştirilmesi; (b) plastik borularının elektrik banttı ile sarımı; (c) montajı tamamlanan kafesler.

Temel ve kiriş yalıtım işlemlerinin ardından donatı bağlama ve montaj işlemlerine geçilmiştir. Bu aşamada betonarme kolon donatıları ve etriyeleri belirlenen sıralarda (bakış açısına göre) ve kod isimlerine göre yerleştirilmiştir. Şekil 3.9'da gösterildiği üzere kodlanan ve ilk kütleleri kaydedilen boyuna ve sargı donatıları tek tip ve düzende yerleştirilmiştir. Böylelikle paslandırma aşaması sonrasında ve yükleme deneylerinden sonra her bir boyuna donatılardaki ve etriyelerdeki gerçek korozyon oranları elde edilmiştir.



Şekil 3. 9: Donatı montaj işlemleri: (a) bakış açısına göre boyuna donatılarının bağlanması; (b) sargı donatılarının bağlama öncesi kod numaralarına göre sıralandırılması.

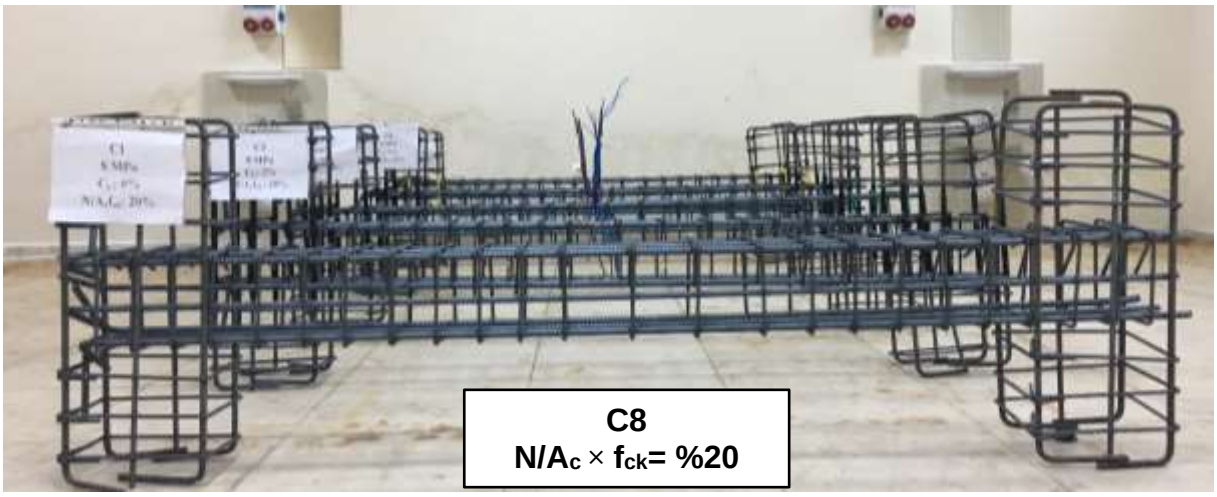
Montaj işlemlerinin tamamlanması ardından kolon boyuna donatı gönyelerinin temel ve kiriş betonarme donatılarına temas eden bölgesel kısımları tekrardan elektrik banttı ile sarılarak olası akım geçişinin engellenmesi sağlanmıştır. Donatı bağlama ve yalıtım işlerinin ardından betonarme kolonlarında paslandırma aşamasında pozitif iletkenliği sağlayacak bakır kabloların imalatına geçilmiştir. Şekil 3.10'da pozitif yüklüme ile iletkenliği sağlayacak bakır kablolar tüm betonarme kolonlarındaki 8 adet boyuna donatıları için ve ayrı olarak bağlanmıştır. Kolon boyunca uzatılan diğer bir kablo ise tüm enine donatılarına temas edilerek birbirlerine bağlanmıştır. Bakır kabloların beton yüzeyinden çıkan kısımları plastik aksamından sıyrılmayarak su içerisinde kalacak olan betonarme kolonlarındaki donatılara elektrik akımının aktarılması sağlanmıştır. Tüm donatılarda mümkün olduğunca eşit düzeylerde pas oranlarının elde edilebilmesi ve beton içinden geçen akımın daha iyi iletilebilmesi için boyuna ve sargı donatılarının köşe bölgelerinde bağ teli yerine bakır kablolar kullanılmıştır.





Şekil 3. 10: Pozitif yüklemeyi sağlayacak olan bakır kabloların bağlanması: (a) boyuna donatılara bağlama; (b) kolon boyunca sargı donatılarına bağlanması.

Şekil 3.10(b)'de gösterildiği üzere kolon boyunca etriyelere bağlanan bakır kabloların iki sargı donatısı arasında kalan kısımları için bakır kabloların plastik koruyucuları soyulmamıştır. İş gücü ve zaman bakımından oldukça emek isteyen bu aşamada; mümkün olduğunca iletilen akımın donatıdan donatıya geçmesi hedeflenmiş ve en kısa yolu izleyebilecek akımın betondan çıkışı engellenmeye çalışılmıştır. Donatı bağlama, temel ve kiriş montaj işlemlerinin ardından son bir renk kodlamaları kontrol edilerek betonarme kolonları beton dökümü için hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.11'de üç farklı beton basınç dayanımda ve aynı beton basınç dayanımı için iki farklı eksenel yük için montajı tamamlanan betonarme numuneleri gösterilmektedir. Donatı bağlama işlerinin tamamlanmasının ardından kalıp ve beton döküm işlerine geçilmiştir.



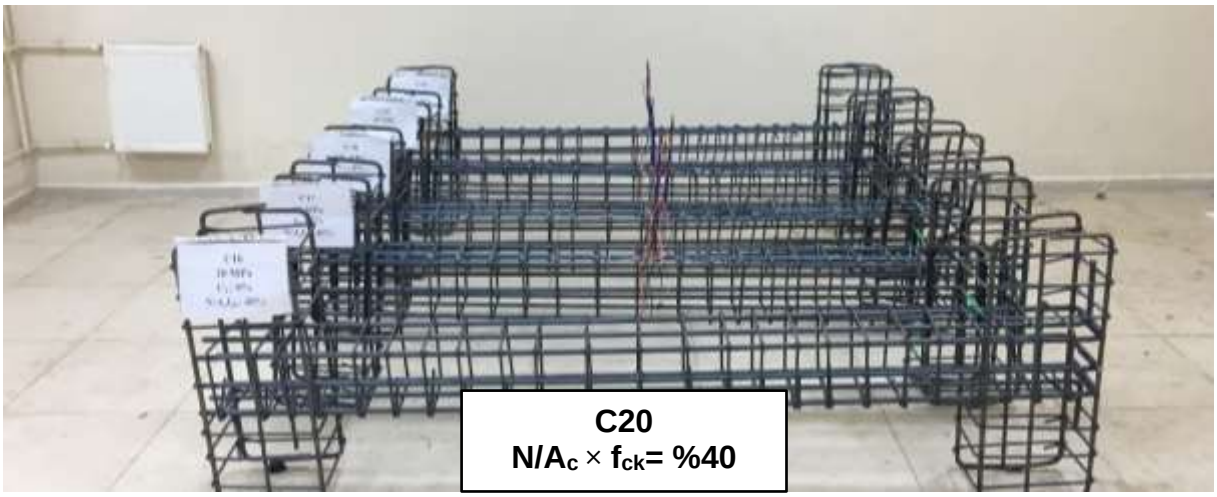
C8
$N/A_c \times f_{ck}$= %20



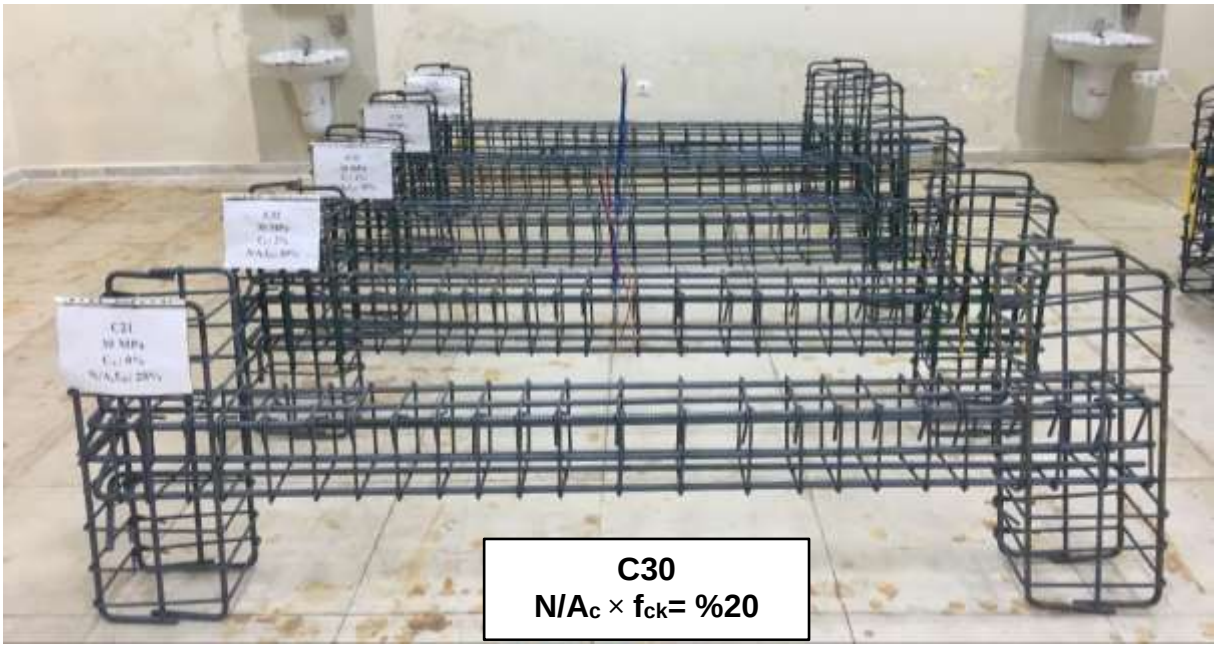
C8
$N/A_c \times f_{ck}$= %40



C20
$N/A_c \times f_{ck}$= %20



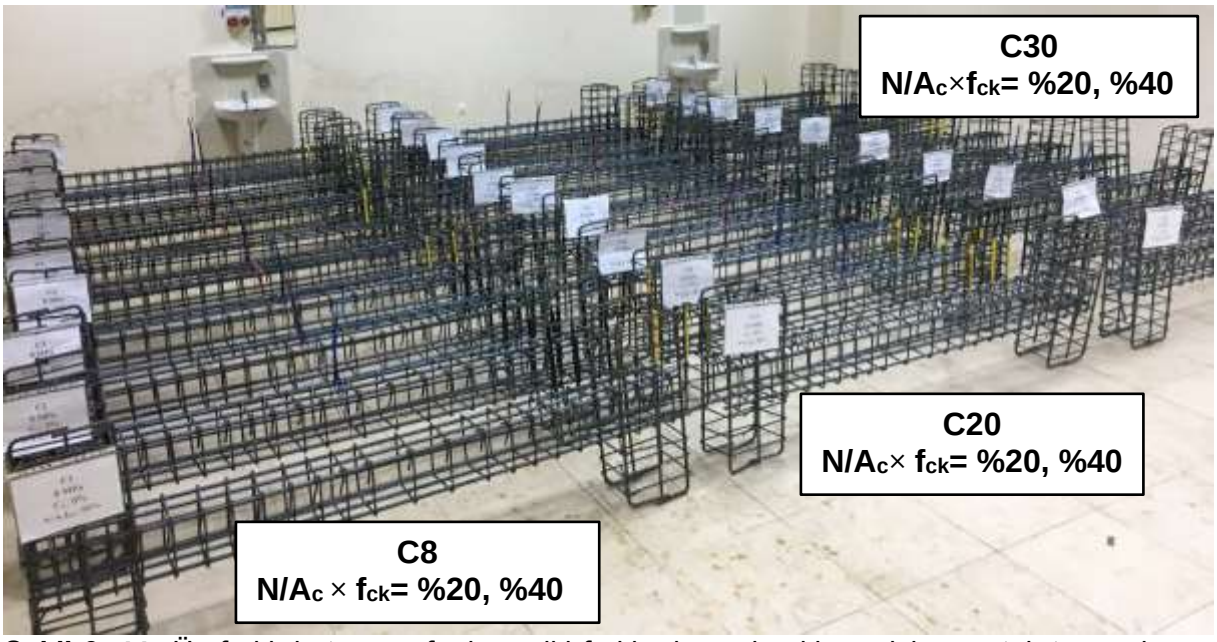
C20
$N/A_c \times f_{ck}$= %40



C30
$N/A_c \times f_{ck}$= %20



C30
$N/A_c \times f_{ck}$= %40



Şekil 3. 11: Üç farklı beton sınıfında ve iki farklı eksenel yükleme için montajı tamamlanan betonarme kolon donatıları.

3.4 Kalıp İşleri

Çalışma kapsamında tek tip kalıp imalatı yapılarak kalıp işleri tamamlanmıştır. Kalıp işlerinde ply-wood kalıplar kullanılmış olup Şekil 3.12'de proje kapsamında imalatı yapılan kalıp işleri gösterilmektedir.



Şekil 3. 12: Betonarme kolonları için kalıp işleri.

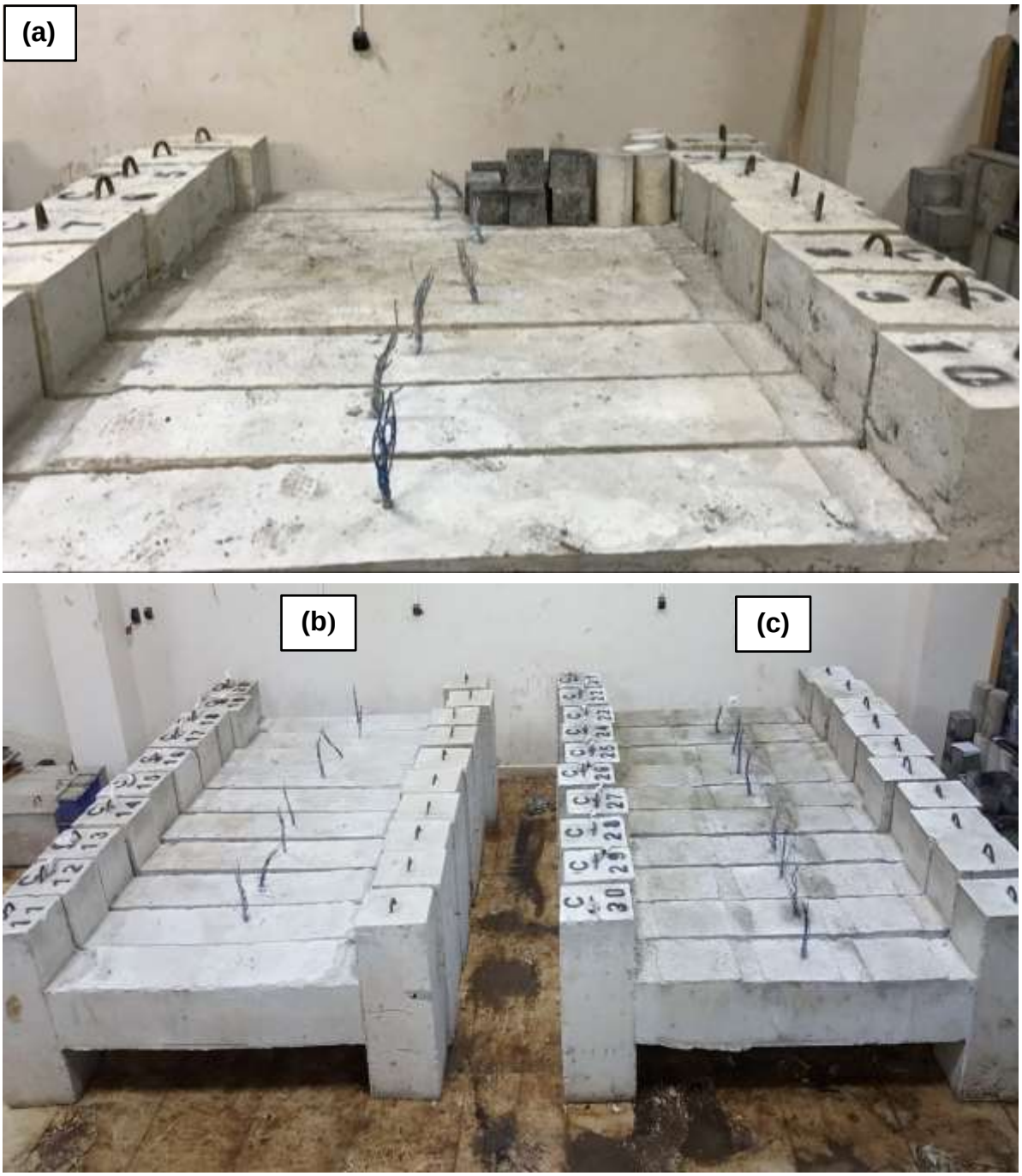
3.5. Beton Döküm İşleri ve Beton Özellikleri

Yapılan çalışmada üç farklı beton sınıfı için (C8, C20 ve C30) öncelikle betonun tedarik edileceği beton santralinden örnek beton numuneleri üretilerek olası hataların deneyleri yapılacak olan numunelerde yaşanması önlenmiştir. Beton döküm işlemleri her bir beton sınıfı için aynı mikserden ve tek seferde dökülerek gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında imalat edilen paslandırma havuzuna kolonların 5'erli gruplar halinde alınmış ve paslandırma sürecinin yüksek pas oranları için bir betonarme kolonunda 3 ay sürmesi göz önüne alınmıştır. Böylelikle paslandırma havuzu dışında bekleyen kolonların beton basınç dayanımlarında zamana bağlı artışlar meydana gelebilmektedir. Bu durumu göz önüne almak için ve olası beton basınç dayanımlarındaki artışları analiz sonuçlarına yansıtabilmek için beton dökümü sırasında her bir betonarme kolonu için 6'şar adet silindir beton numunesi alınmıştır. Alınan numunelerden 3'ü ilgili betonarme kolonla birebir aynı şartlarda muhafaza edilirken diğer 3'üne de standart kür şartları uygulanmış ve 6 adet silindir numunenin hepsi betonarme kolonlarının deneye tabi tutulduğu aynı gün basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca paslandırma aşaması beton dökümünden 3 ay sonra gerçekleştirilerek, havuz dışında beklemede olan aynı beton sınıflarına ait numunelerin beton basınç dayanımlarındaki ani artışların önlenmesi hedeflenmiştir. Şekil 3.13 her bir betonarme sınıfı için projede yer alan bursiyerlerin gerçekleştirdiği beton döküm işleri ve Şekil 3.14'de ise beton dökümü işlemleri tamamlanan ve kalıptan çıkartılan betonarme kolonları gösterilmektedir.





Şekil 3. 13: Beton döküm işleri: (a) C8; (b) C20; (c) C30.



Şekil 3. 14: Paslandırma süreci için kalıptan çıkartılan betonarme kolonları: (a) C8; (b) C20; (c) C30.

Paslandırma sürecinin uzun sürmesi sebebi ve buna bağlı olarak paslandırma havuzu dışında bekleyen betonarme kolonlarının beton basınç dayanımlarındaki olası basınç dayanımlarındaki artışların en düşük seviyelere çekilmesi için her üç beton sınıfında yer alan betonarme kolonları 3 ay boyunca kürlenmiştir. Yükleme deneylerinde deney günü elde edilen silindir beton numunelerinin basınç dayanımları Tablo 3.4'te verilmiştir. Kürleme işlemi tamamlanan betonarme kolonları Şekil 3.15'te gösterildiği üzere paslandırma havuzuna alınarak korozyon sürecine geçilmiştir.

Tablo 3. 4: Beton numulerinin silindir beton basınç dayanım sonuçları.

Grup	Deney günü silindir beton basınç dayanımı (MPa)
C8	9.47
C20	27.79
C30	37.46

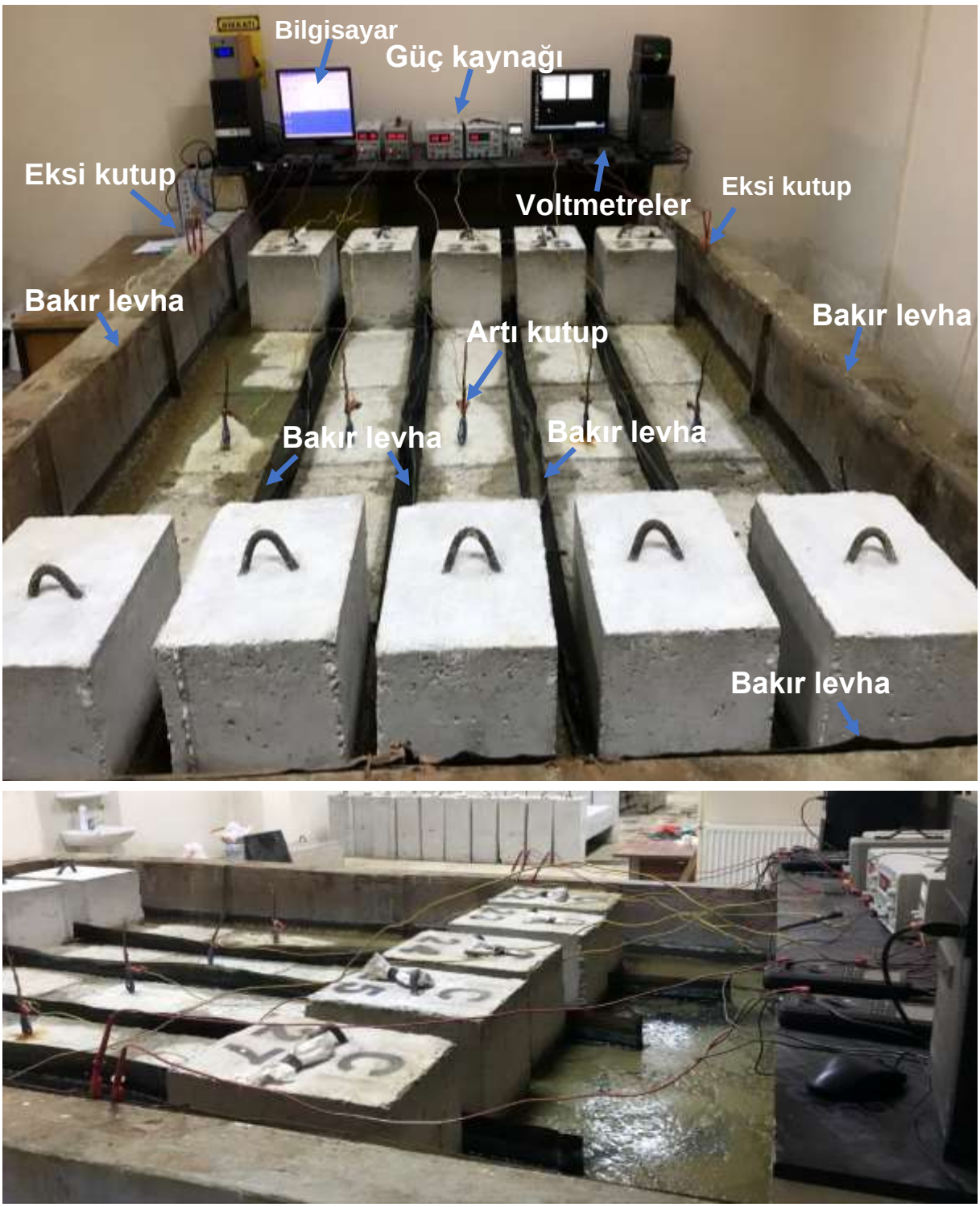


Şekil 3. 15: Betonarme kolonlarının paslandırma havuzuna taşınması.

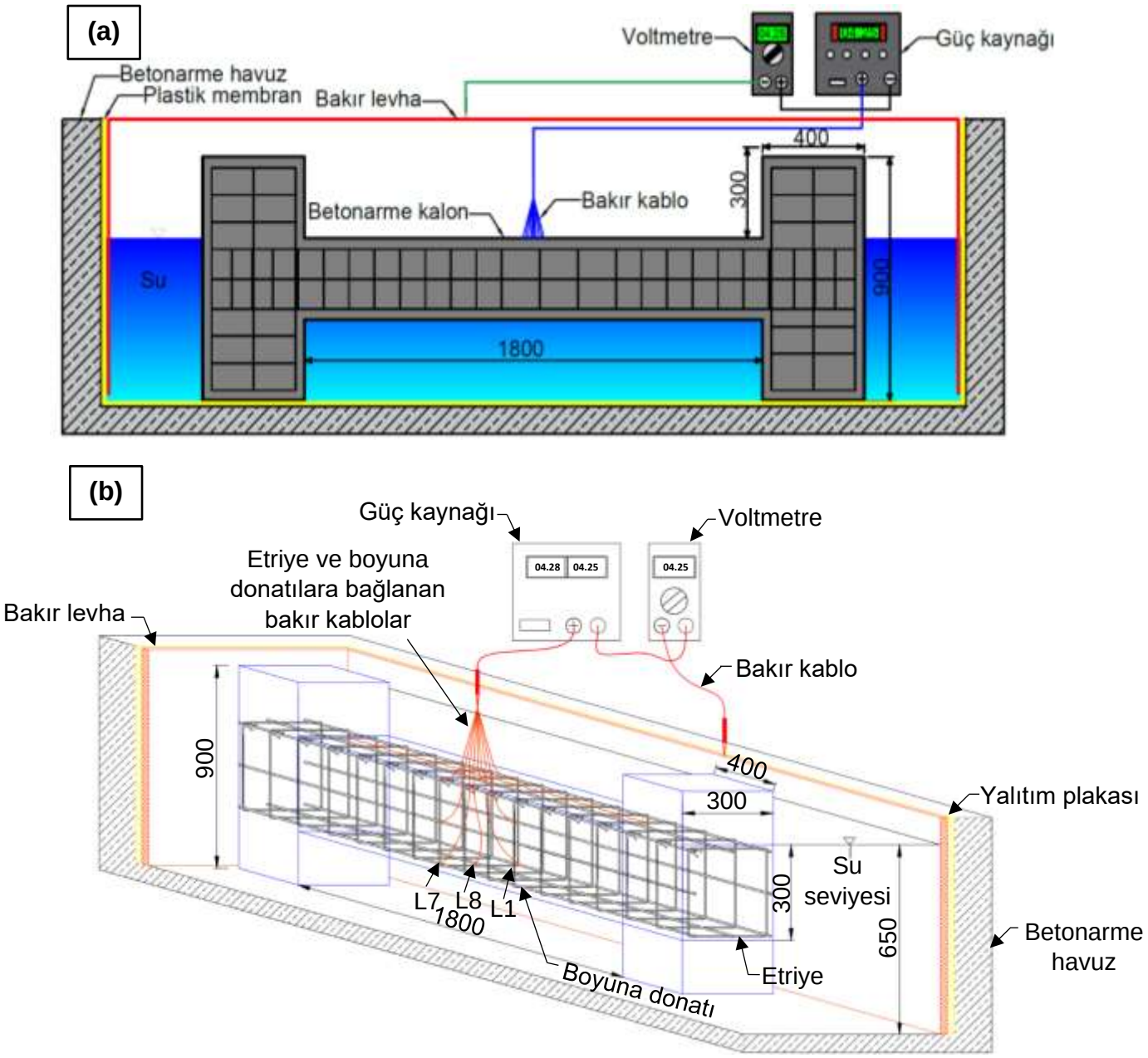
3.6. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi İçin Deney Düzeneği

Çalışma kapsamında kullanılan tam ölçekli paslandırma havuzu Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Şekil 3.16'da gösterilen tam ölçekli paslandırma havuzunun betonarme olması ve olası elektrik akım kaçaklarını önlemek amacı ile paslandırma havuzunun tüm alt ve yan yüzeyleri plastik membran ile kaplanmıştır. Donatı bağlama ve beton döküm işlerinden önce her bir betonarme kolonundaki tüm boyuna ve sargı donatılarının ilk kütleleri kayıt altına alınmıştır. Daha önceden de belirtildiği üzere; donatıların ilk ve paslandırmadan sonraki son kütlelerinin ölçülebilmesi için iki noktadan yük hücreli özel bir terazi kullanılmıştır. Güç kaynağından gelen pozitif yüklemenin beton içerisindeki donatılara aktarılabilmesi için donatı montaj işlemlerinden sonra ve beton döküm işlemlerinden önce, her bir 16 mm çapındaki boyuna donatıları kolon orta bölgesinde donatı çevresi kadar saran; etriyelere ise kolon boyunca ve donatı çevresi kadar saran 4 mm çapındaki bakır kablolar betonarme donatılarına bağlanmıştır (bakınız şekil 3.17). Her bir betonarme kolonlarına bağlanan ayarlanabilir 60 volt kapasitelerindeki güç kaynakları betonarme donatılarından uzatılan bakır kablolara pozitif yükleme olarak bağlanmıştır. Güç kaynağındaki devreyi tamamlayacak eksi terminal yüklemesi ise betonarme havuzunu ve her bir betonarme kolonunu çevreleyen bakır levhalar yardımı ile sağlanmıştır. Kontrollü paslanmanın sağlanabilmesi için sistemden geçen akım her 60 saniyede bir bilgisayara kayıt aktaran voltmetreler yardımı ile kaydedilmiştir. Sistemden

geçen akımın bilinmesi ile birlikte kontrollü paslandırma (teorik paslandırma) Faraday Kanunu'na göre hesaplanmıştır.



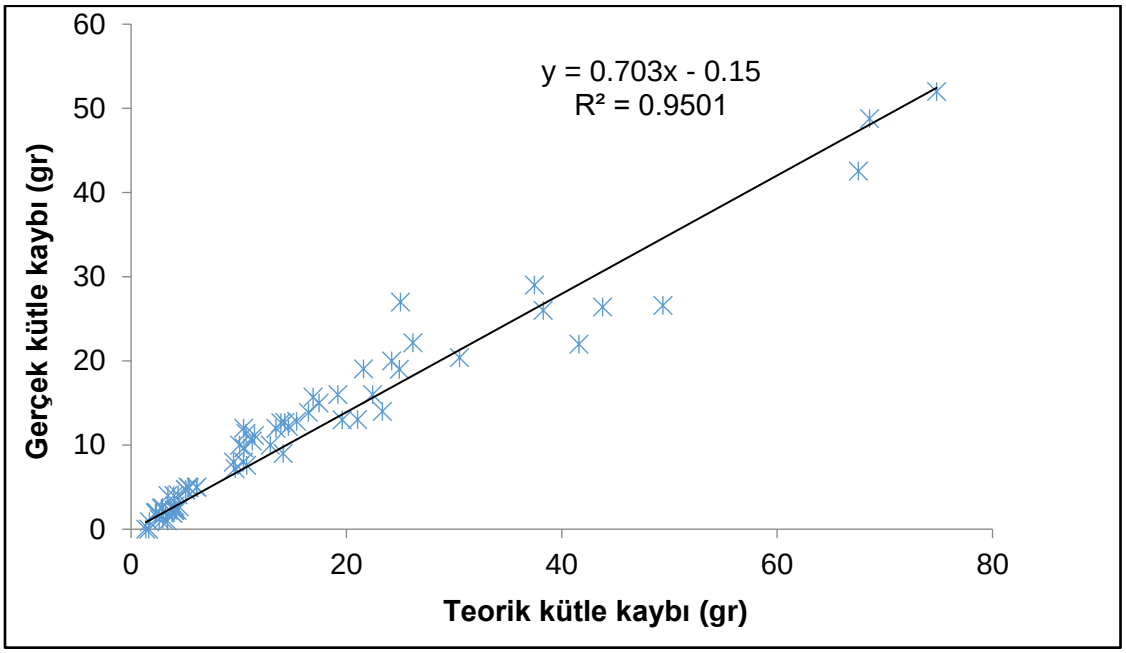
Şekil 3. 16: Çalışma kapsamında kullanılan paslandırma havuzu.



Şekil 3. 17: Paslandırma düzeneği için şematik çizim: (a) Yan görünüş; (b) perspektif detay.

Denklem 3.2'de verilen Faraday Kanunu'na göre; sistemden geçen her bir saniyedeki akımın kaydedilmesi ile birlikte hedeflenen kütle kaybı ve buna bağlı olarak tasarlanan paslandırma oranları elde edilebilmektir. Her saniyede sistemden geçen akım, betonun heterojen yapısından dolayı aynı beton sınıfına sahip numuneler için eşit olmayabilir. Bu yüzden Faraday Kanunu'na göre sistemden geçen akım her 60 saniye için kaydedilip, hedeflenen pas oranına ulaşılması için gerekli süre hesaplanmakta ve bu süreyi de dikkate alarak da sistemin belirlenen zamanında kapatılması şeklinde bir yol izlenmektedir. Kütle kayıbı hesaplamasında kullanılan Faraday Kanunu, çelik donatıların doğrudan elektrik akımına tabi tutularak geliştirildiği bir modeldir. Geliştirilen modelde (Denklem 3.2) çelik donatılar beton içerisinde olmadığından ve elektrik akımının verilmeye başlandığı andan itibaren her saniye

için paslanma meydana gelmekte ve kütle kaybı yaşanmaktadır. Ancak çelik donatıların beton içerisinde olması durumunda paslanmanın başlayabilmesi için belli bir miktar enerji potansiyeline ve süreye ihtiyaç vardır. Bundan dolayı Faraday Kanunu'na göre hesaplanan (teorik olarak) pas oranları gerçek pas oranlarından her zaman fazladır. Proje yürütücüsünün daha önce gerçekleştirmiş olduğu deneysel bir paslandırma çalışmasında (Yalciner vd. 2012b), ulaşılan gerçek pas oranları Faraday Kanunu'na göre hesaplanan pas oranları ile karşılaştırılmıştır. Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan çalışmada hızlandırılmış paslandırma yöntemi ile hedeflenen pas oranlarına daha yakın sonuçları elde etmeye yarayan deneysel bir model geliştirilmiştir. Şekil 3.18'de sunulan grafikte, Faraday Kanunu'na göre beklenen/hedeflenen pas oranları ve elde edilen gerçek pas oranları için geliştirilen denklem gösterilmektedir.



Şekil 3. 18: Faraday Kanunu'na göre gerçek pas oranlarının karşılaştırılması (Yalciner vd. 2012b).

Proje yürütücüsünün gerçekleştirmiş olduğu diğer bir tam ölçekli paslanmış betonarme kirişlerinde taşıma gücü momentinin hesaplanması için yapılan deneysel çalışmada (Bicer vd., 2017), Şekil 3.18'de verilen ilişkinin büyük ölçekli ve yüksek korozyon oranlarında gerçek korozyon oranlarının tahmin edilmesinde betonarme numunelerinin büyük olması (yüzey alanın artmasına bağlı olarak) sebebi ile geliştirilen modelin düşük korozyon oranlarında sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Yalciner vd. (2012b) tarafından gerçek korozyon oranının Faraday Kanununa göre tahmin edilmesi için geliştirilen modelin büyük yüzey alanına sahip betonarme numunelerinde düşük korozyon oranlarında da yakın sonuçlar verdiği Bicer vd. (2018) tarafından yapılan çalışma ile ortaya koyulmuştur. Bicer vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada ayrıca düşük korozyon oranların elde edilmesinde Faraday Kanunu'na göre ulaşılan kütle kaybının ancak %5 seviyelerine ulaştıktan sonra paslanmanın başladığı tespit edilmiştir.

Yukarıda belirtilen nedenler ve mevcut çalışmalardaki deneysel verilerde göz önüne alınarak; %2 korozyon oranı için Faraday kütle kaybı %6.5, %4 korozyon oranı için Faraday kütle kaybı %8, %6 korozyon oranı için Faraday kütle kaybı %12; %10 korozyon oranı için Faraday kütle kaybı %17 olarak göz önüne alınmış ve hedeflenen kütle kaybının belirlenen Faraday kütle kaybına ulaşılması ile paslandırma süreci ilgili betonarme kolonları için sonlandırılmıştır. Gerçek pas oranları, deneye tabi tutulan betonarme kolonlarının yüklemeden sonra kırılarak içerisindeki boyuna donatıların ve etriyelerin çıkartılıp kütlelerinin tekrardan tartılarak hesaplanmasıyla elde edilmiştir.

3.7. Deney Düzeneği ve Ölçümler

Gerçekleştirilen bu proje Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde ilk kez betonarme kolonlarına eksenel ve yanal yükün aynı anda uygulanması sebebi ile tüm yükleme ve ölçüm düzeneği proje ekibi tarafından sıfırdan kurulmuştur. Düzeneğin sıfırdan kurulması ve her aşamasında bursiyerlerin tecrübe kazanmaları bursiyelerin gelecek eğitimlerinde oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir. Şekil 3.19'da yükleme düzeneğinin proje ekibi tarafından kurulum aşamasından örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3. 19: Yükleme ve ölçüm düzeneğinin kurulması-deneme numunesi: (a) kolon çelik boğçalama işlemleri; (b) eğrilik ölçerlerin yerleştirilmesi.

Ölçüm ve yükleme düzeneğinin kurulması ile birlikte bursiyerlerin tecrübe kazanması için bir adet aynı kesit özelliklerine sahip betonarme kolonu üzerinde ön bir deneme çalışması yapılmıştır. Yapılan ön değerlendirme deneyinde 6 adet çekme donatısına yapıştırılan gerinim pulundan alınan değerler sonucunda gerinim pulu sayısı 7'e çıkartılarak deneysel olarak ölçülecek aderans boyunun daha verimli bir şekilde elde edilmesine karar verilmiştir. Şekil

3.20'de mevcut çalışma için kullanılan deney düzeneği gösterilmektedir. Şekil 3.20'de çeşitli idealleştirme ve basitleştirme işlemleri yapılarak, yapısal bir çerçeveden alınan deneysel numuneler eksenel yük ve yanal yüke maruz olacak şekilde (çift eğrilikli) deneylere tabi tutulmuştur. Böylece, eğilme hâkimli bir davranışa sahip olan deneysel kolonlarda çatlamanın, kesitin akma dayanımına ulaşmadan önce gerçekleşeceği tasarım şartı olarak kabul edilmektedir. Deneysel çalışmada yüklerin ve buna bağlı olarak numune sınır koşullarının mümkün olduğunca gerçeğe yakın olarak benzeştirilebilmesi için eksenel yükün, yanal yükün bir fonksiyonu olacak şekilde, yer değiştirme kontrollü hidrolik silindirler kullanılmıştır. Sabit eksenel yük için iki adet 100 ton kapasiteli hidrolik silindir kullanılırken, yanal yüklemede ise tersinir artımlı olacak şekilde 60 ton kapasiteli bir adet hidrolik silindir kullanılmıştır.

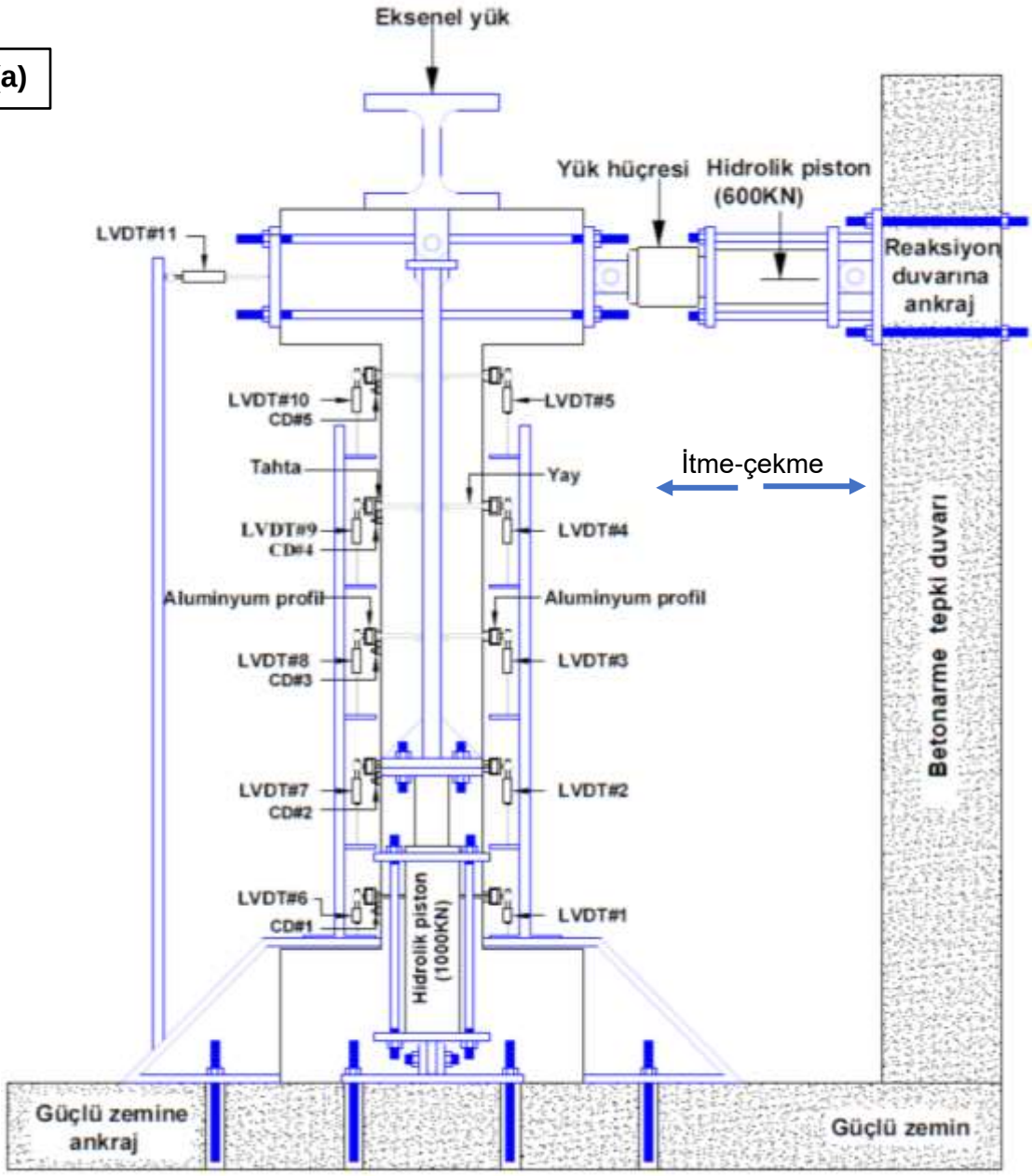
Eksenel yük sağlayan silindirler güçlü zemine monte edilirken, yanal yük sağlayan silindir ise reaksiyon duvarına monte edilmiştir. Deney numunesinin düzlem-dışı hareket etmemesi için gerekli önlemler ayrıca alınmıştır. Yükleme düzeneğinde eksenel yük için simetriklik sağlanmış ve yükleme sadece düşey yönde etkili olması sağlanmıştır. Aynı şartlar yanal yükleme için de geçerli olup, eğilmenin sadece yükleme yönünde olması sağlanmıştır. Silindirler deneysel çalışmada yer değiştirme kontrollü olarak kullanılmıştır. Yanal yükleme, numune göçünceye kadar monotonik olarak artırılmıştır.

Her deneyde eksenel yükleme için iki adet manometre ve yanal yükleme için de bir adet 60 ton kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Hem eğrilik ve hem de aderans-sıyrılma ilişkisinin tespiti için itme ve çekme doğrultusundaki ve belirlenen boyuna donatısına yedi adet birim şekil değiştirme ölçerleri yapıştırılmıştır. Deney numunesinin tamamını temsil edecek şekilde, farklı seviyelerde moment-eğrilik ilişkisinin ölçülmesi için 100 mm kapasitede karşılıklı birer adet olmak üzere toplam on adet yer değiştirme ölçerler kullanılmıştır. Numunelerin yanal deplasmanlarının ölçülmesi için numune kiriş ortasına (numunenin tepesi hizasında) bir adet 200 mm kapasiteli potansiyometre, ayrı tasarlanan güçlü bir aparata monte edilmiştir. Ayrıca deney sırasında numune boyunca pas payı hizasında oluşacak düşey çekme çatlaklarının da (ikincil çatlaklar) ölçülebilmesi amacıyla numune üzerinde uygun olan noktalara üç adet çatlak ölçerler monte edilmiştir. Numune üzerine monte edilen tüm ölçüm cihazlarına ait detay çizimleri Şekil 3.20(a)'da gösterilmiştir.

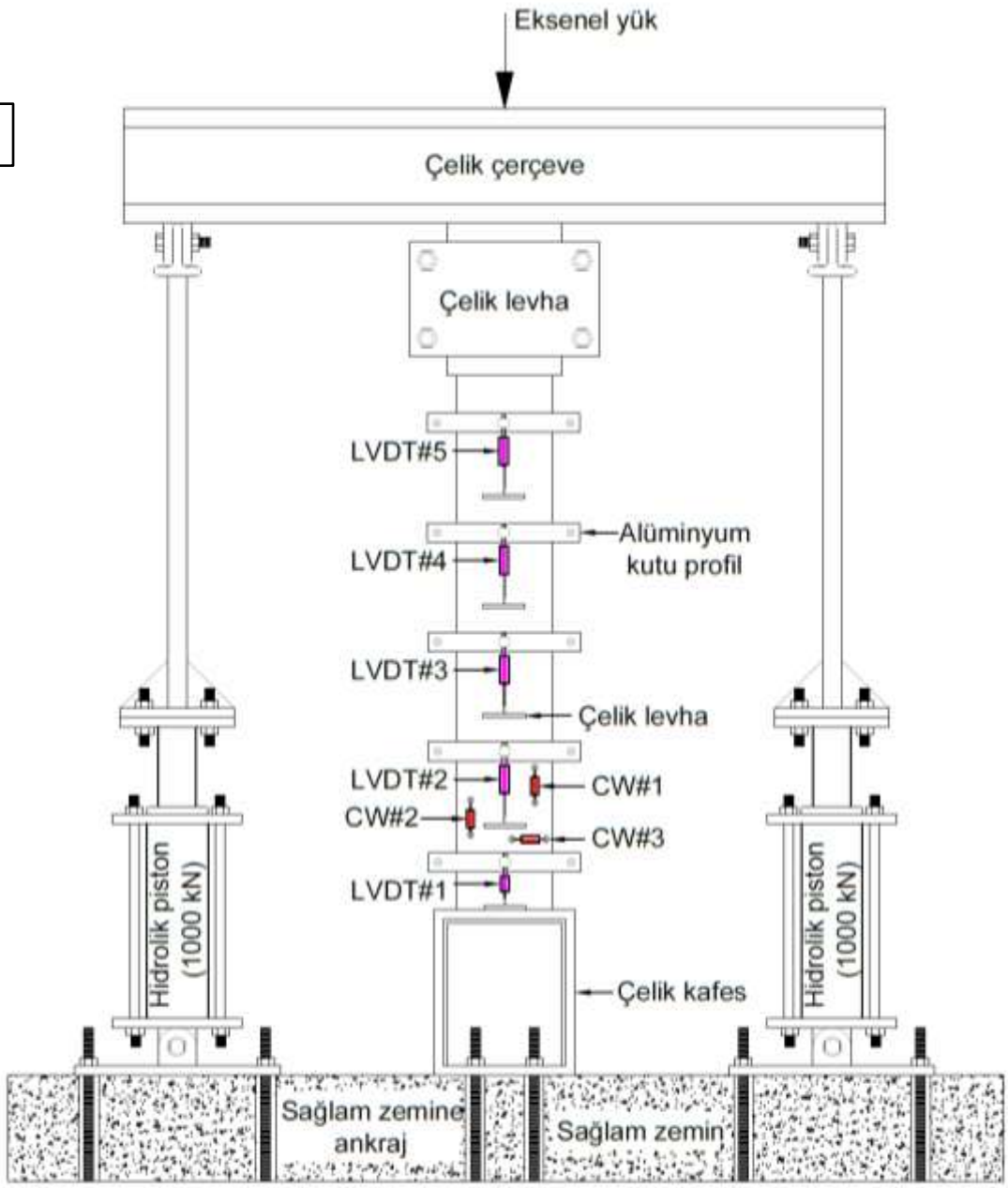
Birçok deneysel çalışmalarda ölçüm sistemleri için gerekli aparatlar beton içerisine açılan delikler yardımı ile sağlanmaktadır. Beton içerisine yerleştirilen aparatların eğilmesi veya bu aparatlara yakın noktalarda betonun hazar almasından dolayı deneysel verilerin etkilenmesinin söz konusu olduğu düşünülmektedir. Mevcut çalışmada bu durum özellikle göz önüne alınmıştır. Şekilde 3.20'de gösterildiği gibi potansiyometreler doğrudan deney numunesine (beton yüzeyine) monte edilmemiştir. Ölçüm cihazları alüminyum bir kutu profil üzerine vidalanmıştır. Alüminyum kutular ise kolon yüzeyine yapıştırılmış olan 45 × 45 mm tahta

takozlara ataçlanmıştır. Alüminyum kutular deney sırasında kesit bütünlüğünün korunabilmesi amacıyla karşılıklı olarak, yaylı bir sistem ile birbirine iliştirilmiştir. Bu yay sistemi, kesit sistemini bir arada tutacak kadar güçlü ve lokal deformasyonlar altında deforme olabilecek kadar esnektir. Potansiyometrelerin deney sırasında düşeyde sarkmasını önlemek için potansiyometreler ile alüminyum kutular arasında, ilave bir birleştirme aparatı kullanılmıştır. Deneysel sonuçların çok daha hassas bir şekilde elde edilebilmesi için yukarıda bahsedilen deney düzeneği çalışma kapsamında göz önüne alınmıştır. Betonarme kolonları için eksenel yük değeri karakteristik beton basınç dayanımları göz önüne alınarak taşıma kapasitelerinin %20'si ($N/A_c \times f_{ck}$= %20) ve %40'ı ($N/A_c \times f_{ck}$= %40) kadar eksenel yük uygulanmıştır. Böylelikle C8 grubundaki betonarme kolonlarından C1'den C5'e kadar olan betonarme kolonları için uygulanan eksenel yük değeri 172 kN; C6'dan C10'a kadar olan betonarme kolonları için ise 344 kN eksenel yük uygulanmıştır. C20 grubundaki betonarme kolonlarından C11'den C15'e kadar olan betonarme kolonları için uygulanan eksenel yük değeri 500 kN; C16'dan C20'ye kadar olan betonarme kolonları için ise 1000 kN eksenel yük uygulanmıştır. C30 grubundaki betonarme kolonlarından C21'den C25'e kadar olan betonarme kolonları için uygulanan eksenel yük değeri 672 kN; C26'dan C30'a kadar olan betonarme kolonları için ise 1344 kN eksenel yük uygulanmıştır. Eksenel yükün uygulanması ile birlikte yanal yük göçme durumuna kadar uygulanmıştır. Eksenel yükün uygulanması ile birlikte yanal yük göçme durumuna kadar uygulanmıştır.

(a)


Eksenel yük
Yük hüçresi
Hidrolik piston (600KN)
LVDT#11
Reaksiyon duvarına ankraj
LVDT#10
CD#5
LVDT#5
Tahta
Yay
İtme-çekme
LVDT#9
CD#4
LVDT#4
Aluminyum profil
Aluminyum profil
LVDT#8
CD#3
LVDT#3
LVDT#7
CD#2
LVDT#2
LVDT#6
CD#1
LVDT#1
Hidrolik piston (1000KN)
Betonarme tepki duvarı
Güçlü zemine ankraj
Güçlü zemin

(b)

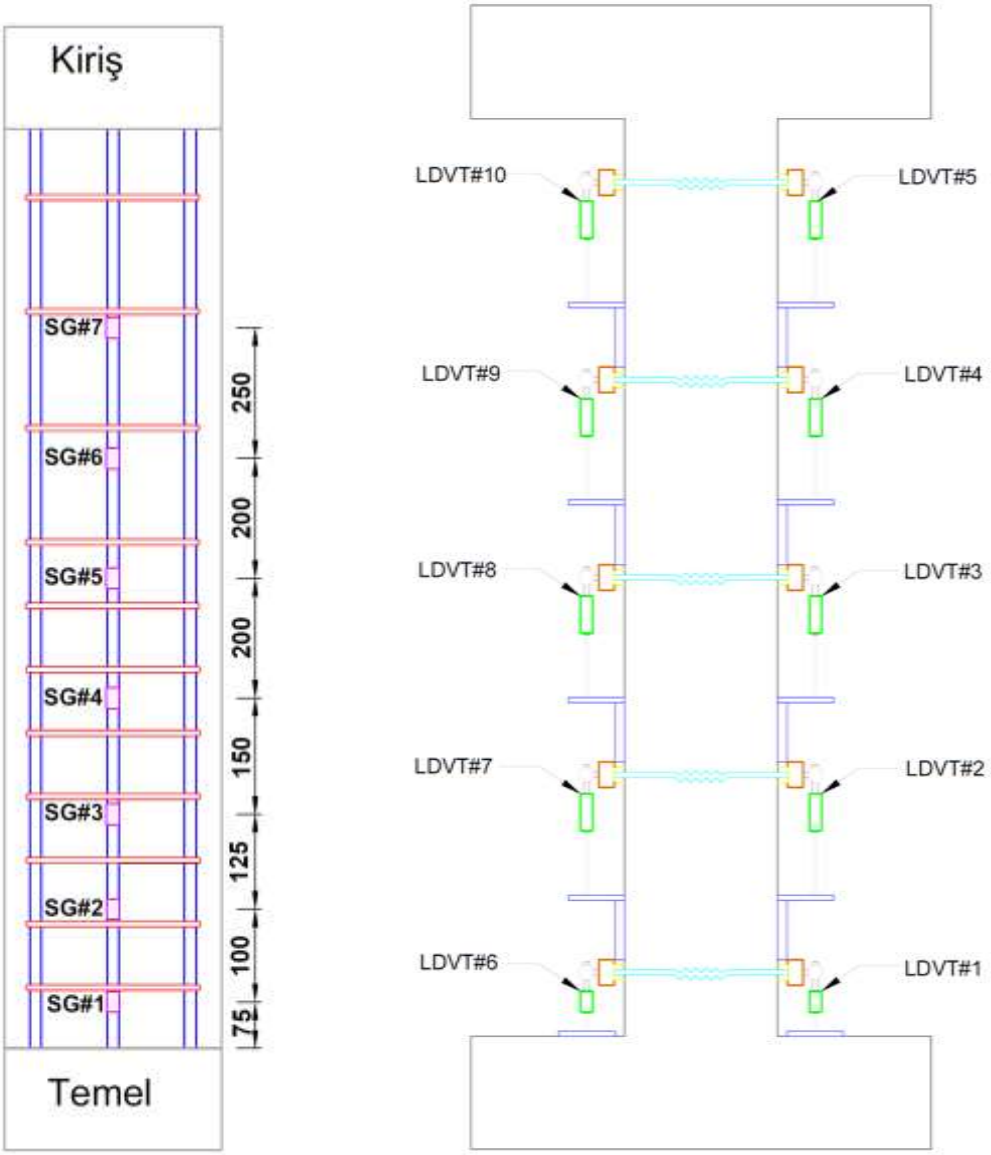

Eksenel yük
Çelik çerçeve
Çelik levha
LVDT#5
LVDT#4
Alüminyum kutu profil
LVDT#3
Çelik levha
LVDT#2
CW#1
CW#2
CW#3
LVDT#1
Çelik kafes
Hidrolik piston (1000 kN)
Hidrolik piston (1000 kN)
Sağlam zemine ankraj
Sağlam zemin

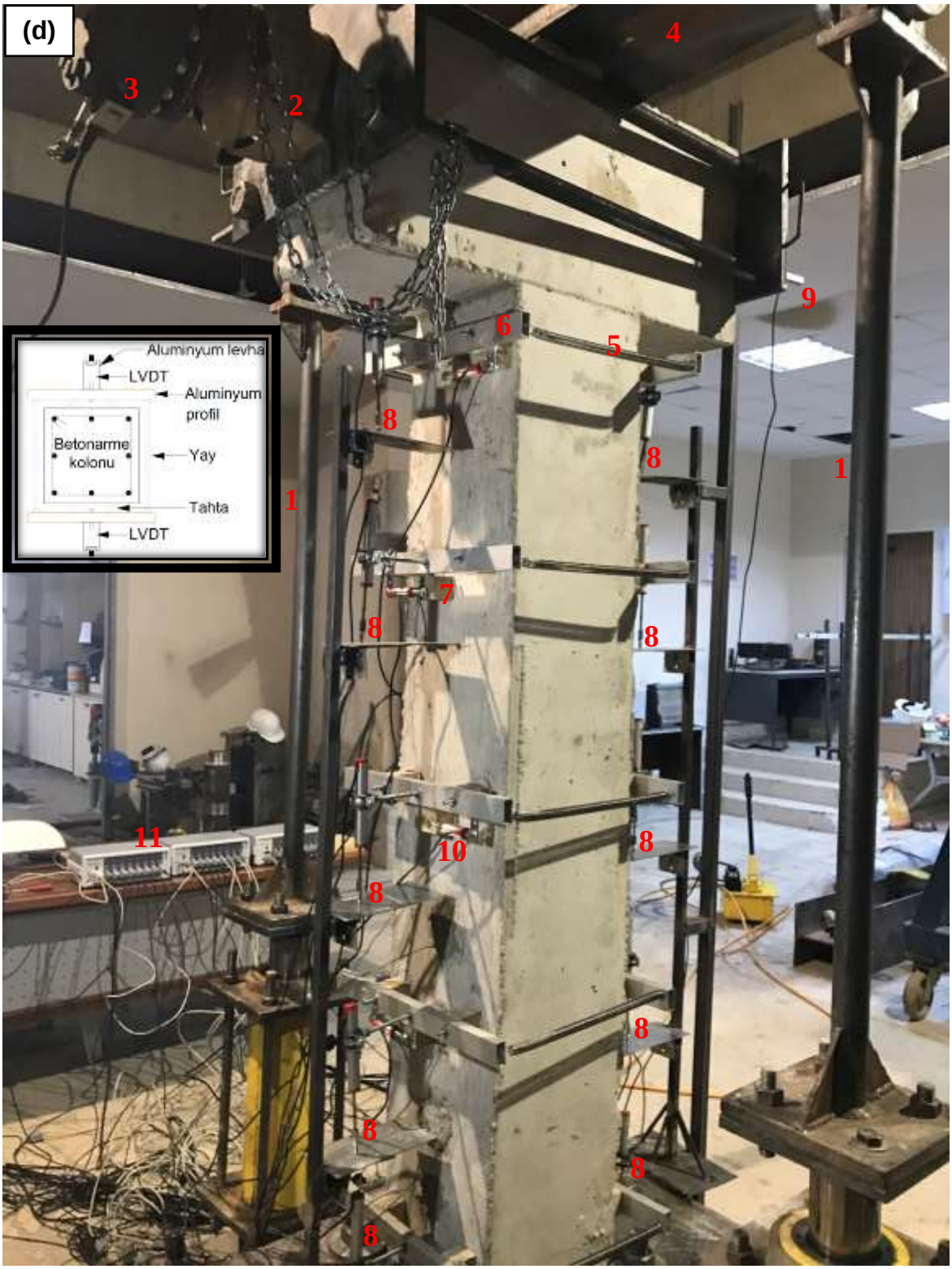
Ön görünüş

İtme ve çekme yönü

Eğrilik ölçerler

(c)





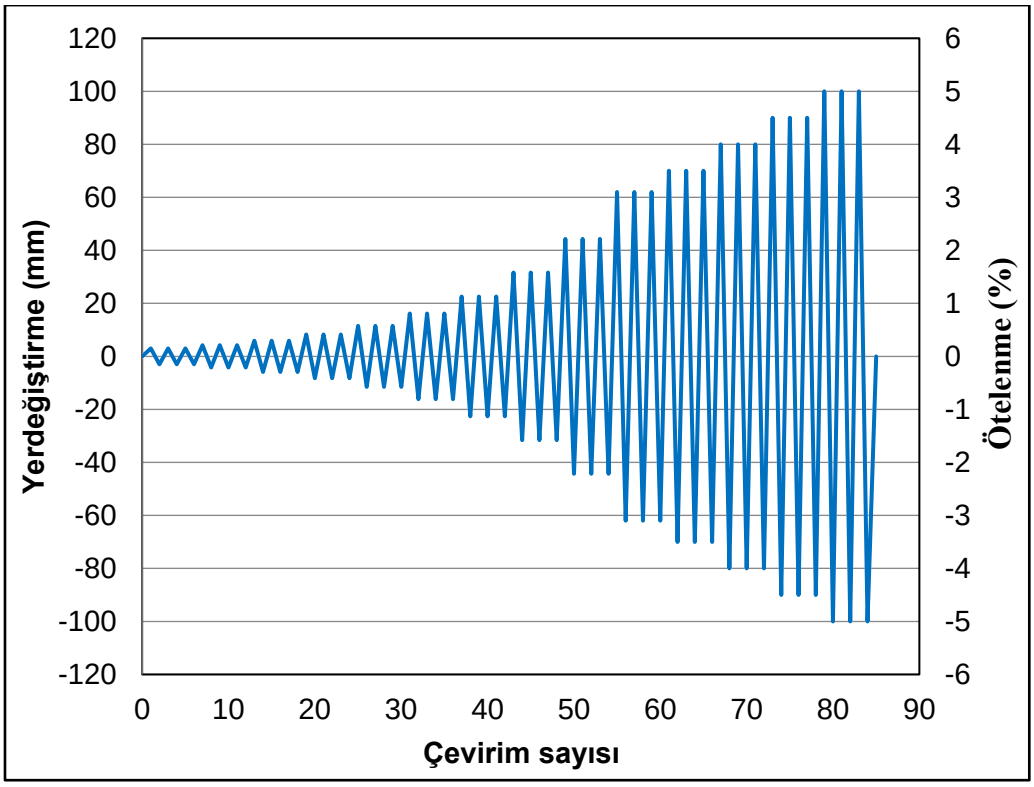
1: Eksenel yükleme için gerekli piston kolları, 2: Yanal yükleme, 3: Yük hücresi, 4: Çelik çerçeve, 5: Çelik yaylar, 6: Alüminyum profil, 7: Tahta, 8: Dönme ölçümleri için LVDT'ler, 9: Yanal yer değiştirme için LVDT, 10: Çatlak ölçerler için LVDT'ler 11: Data logger.



Şekil 3. 20: Deney düzeneği: (a), Yan görünüş (b) ön görünüş, (c) gerinim pulu ve eğrilik ölçerin düzen ve konumu, (d) deneysel düzenek, (e) ölçüm düzeneği için detay resim.

Tüm betonarme kolonları için aynı deney düzeneği kullanılarak deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tersinir, tekrarlı, artırımlı ve yer değiştirme kontrollü yükleme programı FEMA 461 (2007) protokolüne göre gerçekleştirilmiştir. FEMA 461 (2007), protokolü hasar seviyeleri başlangıç noktasının tahmin edilmesi ve tersinir yükleme programının monotonik yükleme sonuçlarına göre değerlendirilmesini önemle önermektedir. Yapılan çalışmada da

FEMA 461 (2007) göz önüne alınarak, C21-C25 betonarme kolonlarına monotonik yükleme deneyleri gerçekleştirilerek yükleme programı oluşturulmuştur. FEMA 461 (2007) ve ACI 374 (2006) yönetmeliği göz önüne alınarak her bir her bir genlik için 3 çevirim gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21'de tersinir yükleme deneyleri için kullanılan deney yükleme programı gösterilmektedir.



Şekil 3. 21: Yükleme deneyleri için kullanılan yükleme programı.

BÖLÜM IV

4. DENEY SONUÇLARI

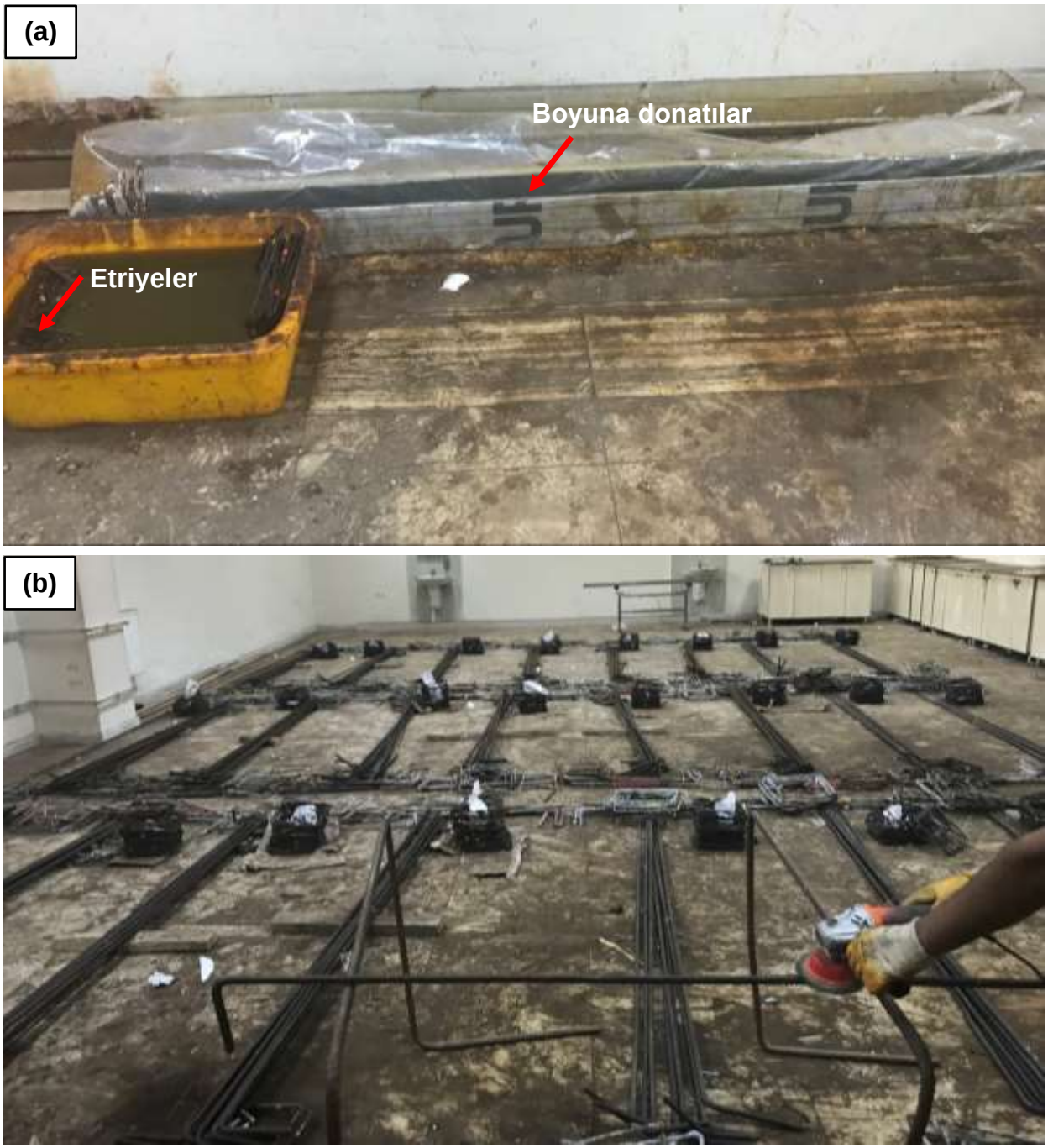
4.1. Elde Edilen Gerçek Korozyon Oranları ve Dağılımları

Yükleme deneylerinden sonra tüm betonarme kolonları kırılarak; betonarme boyuna ve sargı donatıları daha önceden belirlenen sıralamaya göre beton içerisinden çıkartılmıştır. Şekil 4.1'de yükleme deneyleri sonrası betonarme kolonlarının kırım işlemleri gösterilmektedir. Ek. 1'de ise seçilen diğer betonarme kolon grupları için kırılan ve donatıları çıkartılan betonarme kolonları sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 4. 1: Yükleme deneyleri sonrası betonarme kolonlarının kırılması.

Şekil 3.11'de verilen renk kodları kontrol edildikten sonra ikinci tartım işleri için tüm boyuna ve sargı donatıları temizlik işlemleri için hazır hale getirilmiştir. ASTM G1-03 (2003) standardında belirtilen hem mekanik hem de kimyasal temizleme yöntemleri uygulanarak donatı yüzeyindeki pas ürünleri kaldırılmış ve donatıların tekrardan kütleleri ölçülerek gerçek korozyon oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.2'de kimyasal ve mekanik temizleme işlemleri sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 4. 2: Betonarme donatılarından korozyon ürünlerinin arındırılması: (a) etriye ve boyuna donatılar için kimyasal temizleme işleri; (b) mekanik temizleme işleri.

Mekanik temizleme işlemleri için tel fırçalar kullanılırken; kimyasal temizleme kapsamında alüminyum bir havuz yapılmıştır. Yapılan havuzun içerisindeki su kütlesinin %5'i oranında hidroklorik asit kullanılarak donatılar 30 dakika süre ile havuz içerisinde bırakılmıştır.

Elde edilen korozyon oranlarının daha doğru bir şekilde yapısal sonuçlara yansıtılabilmesi için;

- Betonarme kolonlarındaki ortalama korozyon oranı (boyuna ve etriyelerin toplam kütleleri),

- Boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranı (yalnızca boyuna donatılarının kütleleri),
- Etriyelerdeki ortalama korozyon oranı (yalnızca etriyelerin kütleleri),
- Her bir boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranları, şeklinde korozyon oranları hesaplanmıştır.

Her bir betonarme sınıfı için ve yukarıda bahsedilen parametrelerin göz önüne alınması ile elde edilen gerçek korozyon oranları Tablo 4.1-4.6'da sırasıyla verilmiştir. Tüm betonarme kolon donatılarında elde edilen korozyon dağılım değerleri ise Şekil 4.3-4.8'de verilmiştir.

Tablo 4. 1: C8 betonarme kolonlarındaki korozyon oranı (boyuna ve sargı donatılarının toplam kütleleri).

#	$N/A_c \times f_{ck}$ (%)	İlk kütle (g)		Faraday kütle kaybı (g)	Gerçek kütle kaybı (g)		Faraday korozyon oranı (%)	Gerçek korozyon oranı (%)		Uygulanan akım-saat (*A.h*)
		L_{1-8}	S_{1-18}	$L_{1-8}+S_{1-18}$	L_{1-8}	S_{1-18}	$L_{1-8}+S_{1-18}$	L_{1-8}	S_{1-18}	
$C8_1$	20	x	x	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C8_2$	20	32867.1	8751.0	2819.8	704.6	363.5	6.78	2.14	4.15	2706.5
		Toplam= 41618.1			Ortalama= 1068.1			Ortalama= 2.57		
$C8_3$	20	32728.0	8743.5	3396.9	735.5	418.5	8.19	2.25	4.79	3260.5
		Toplam= 41471.5			Ortalama= 1154.0			Ortalama= 2.78		
$C8_4$	20	32683.0	8667.5	5029.0	1580.5	834.0	12.16	4.84	9.62	4827.0
		Toplam= 41350.5			Ortalama: 2414.5			Ortalama= 5.84		
$C8_5$	20	32836.5	8669.0	7064.8	1786.0	889.5	17.02	5.44	10.26	6781.1
		Toplam= 41505.5			Ortalama= 2675.5			Ortalama= 6.45		
$C8_6$	40	x	x	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C8_7$	40	32771.5	8743.5	2720.9	937.0	589.5	6.51	2.86	6.74	2592.7
		Toplam= 41515.0			Ortalama= 1526.5			Ortalama= 3.68		
$C8_8$	40	32799.5	8688.0	3344.7	1380.0	622.5	8.04	4.21	7.17	3200.8
		Toplam: 41487.5			Ortalama= 2002.5			Ortalama= 4.83		
$C8_9$	40	32822.5	8649.5	4989.7	1422.5	783.5	12.03	4.33	9.06	4789.3
		Toplam= 41472.0			Ortalama: 2206.0			Ortalama= 5.32		
$C8_{10}$	40	32897.0	8667.0	7070.8	1586.5	913.5	17.01	4.82	10.54	6786.8
		Toplam= 41564.0			Ortalama= 2500.0			Ortalama= 6.01		

L1-8: 8 adet boyuna donatının toplam kütlesi
S1-18: 18 adet sargı donatısının toplam kütlesi

Tablo 4. 2: C8 betonarme kolonlarındaki boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranı (yalnızca boyuna ve sargı donatılarının kütleleri).

#	$N/A_c \times f_{ck}$ (%)	Boyuna donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Boyuna donatılarının toplam son kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam son kütlesi (g)	Uygulanan akım-saat (A.h)
		L_{1-8}	L_{1-8}	S_{1-18}	S_{1-18}	
$C8_1$	20	x	x	x	x	0.0
$C8_2$	20	32867.1	32162.5	8751.0	8387.5	2706.5
		CL_L (%) = 2.14		CL_S (%) = 4.15		
$C8_3$	20	32728.0	31992.5	8743.5	8325.0	3260.5
		CL_L (%) = 2.25		CL_S (%) = 4.79		
$C8_4$	20	32683.0	31102.5	8667.5	7833.5	4827.0
		CL_L (%) = 4.84		CL_S (%) = 9.62		
$C8_5$	20	32836.5	31050.5	8669.0	7779.5	6781.1
		CL_L (%) = 5.44		CL_S (%) = 10.26		
$C8_6$	40	x	x	x	x	0.0
$C8_7$	40	32771.5	31834.5	8743.5	8154.0	2592.7
		CL_L (%) = 2.86		CL_S (%) = 6.74		
$C8_8$	40	32799.5		8688.0	8065.5	3200.8
		CL_L (%) = 4.21		CL_S (%) = 7.17		
$C8_9$	40	32822.5	31400.0	8649.5	7866.0	4789.3
		CL_L (%) = 4.33		CL_S (%) = 9.06		
$C8_{10}$	40	32897.0	31310.5	8667.0	7753.5	6786.8
		CL_L (%) = 4.82		CL_S (%) = 10.54		

CL: Gerçek korozyon oranı.
CL_L: Boyuna donatılardaki gerçek korozyon oranı.
CL_S: Sargı donatılarındaki gerçek korozyon oranı.

Tablo 4. 3: C20 betonarme kolonlarındaki korozyon oranı (boyuna ve sargı donatılarının toplam kütleleri).

#	$N/A_c \times f_{ck}$ (%)	İlk kütle (*g*)		Faraday kütle kaybı (g)	Gerçek kütle kaybı (g)		Faraday korozyon oranı (%)	Gerçek korozyon oranı (%)		Uygulanan akım-saat (A.h)
		L_{1-8}	S_{1-18}	$L_{1-8}+S_{1-18}$	L_{1-8}	S_{1-18}	$L_{1-8}+S_{1-18}$	L_{1-8}	S_{1-18}	
$C20_1$	20	x	x	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C20_2$	20	32466.0	8127.5	2639.0	707.0	340.0	6.50	2.18	4.18	2533.0
		Toplam= 40593.5			Ortalama= 1047.0			Ortalama= 2.58		
$C20_3$	20	32499.0	8038.5	3252.1	433.5	296.0	8.02	1.33	3.68	3121.5
		Toplam= 40537.5			Ortalama= 729.5			Ortalama= 1.80		
$C20_4$	20	32508.5	8024.0	4870.1	877.0	460.0	12.02	2.70	5.73	4674.5
		Toplam= 40532.5			Ortalama= 1337.0			Ortalama= 3.30		
$C20_5$	20	32388.5	8007.0	7008.1	2279.0	922.5	17.35	7.04	11.52	6726.6
		Toplam= 40395.5			Ortalama= 3201.5			Ortalama= 7.93		
$C20_6$	40	x	x		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C20_7$	40	32477.0	8023.0	2632.6	571.0	374.5	6.50	1.76	4.67	2526.9
		Toplam= 40500.0			Ortalama= 945.5			Ortalama= 2.33		
$C20_8$	40	32560.0	8063.5	3248.9	797.5	433.5	8.00	2.45	5.38	3118.4
		Toplam= 40623.5			Ortalama= 1231.0			Ortalama= 3.03		
$C20_9$	40	32490.0	8098.0	4882.2	1267.5	680.0	12.03	3.90	8.40	4686.1
		Toplam= 40588.0			Ortalama= 1947.5			Ortalama= 4.80		
$C20_{10}$	40	32292.0	8078.0	6809.9	1908.0	880.0	16.87	5.91	10.89	6536.4
		Toplam= 40370.0			Ortalama= 2788.0			Ortalama= 6.91		

L1-8: 8 adet boyuna donatının toplam kütlesi.
S1-18: 18 adet sargı donatısının toplam kütlesi.

Tablo 4. 4: C20 betonarme kolonlarındaki boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranı (yalnızca boyuna ve sargı donatılarının kütleleri).

#	$N/A_c \times f_{ck}$ (%)	Boyuna donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Boyuna donatılarının toplam son kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam son kütlesi (g)	Uygulanan akım-saat (A.h)
		L_{1-8}	L_{1-8}	S_{1-18}	S_{1-8}	
$C20_1$	20	x	x	x	x	0.0
$C20_2$	20	32466.0	31759.0	8127.5	7787.5	2533.0
		CL_L (%) = 2.18		CL_S (%) = 4.18		
$C20_3$	20	32499.0	32065.5	8038.5	7742.5	3121.5
		CL_L (%) = 1.33		CL_S (%) = 3.68		
$C20_4$	20	32508.5	31631.5	8024.0	7564.0	4674.5
		CL_L (%) = 2.70		CL_S (%) = 5.73		
$C20_5$	20	32388.5	30109.5	8007.0	7084.5	6726.6
		CL_L (%) = 7.04		CL_S (%) = 11.52		
$C20_6$	40	x	x	x	x	0.0
$C20_7$	40	32477.0	31906.0	8023.0	7648.5	2526.9
		CL_L (%) = 1.76		CL_S (%) = 4.67		
$C20_8$	40	32560.0	31762.5	8063.5	7630.0	3118.4
		CL_L (%) = 2.45		CL_S (%) = 5.38		
$C20_9$	40	32490.0	31222.5	8098.0	7418.0	4686.1
		CL_L (%) = 3.90		CL_S (%) = 8.40		
$C20_{10}$	40	32292.0	30384.0	8078.0	7198.0	6536.4
		CL_L (%) = 5.91		CL_S (%) = 10.89		

CL: Gerçek korozyon oranı.
CL_L: Boyuna donatılardaki gerçek korozyon oranı.
CL_S: Sargı donatılarındaki gerçek korozyon oranı.

Tablo 4. 5: C30 betonarme kolonlarındaki korozyon oranı (boyuna ve sargı donatılarının toplam kütleleri).

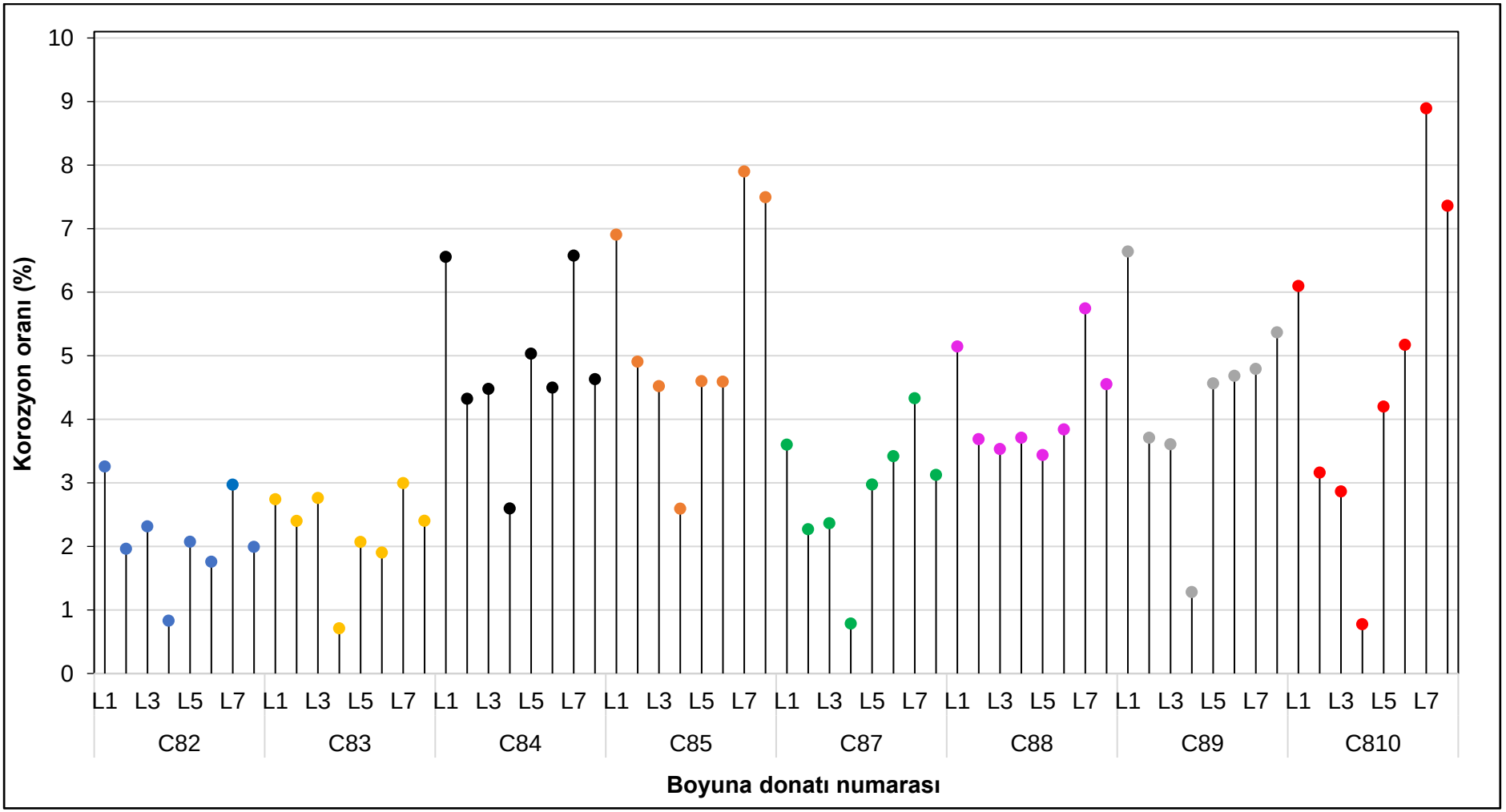
#	$N/A_c \times f_{ck}$ (%)	İlk kütle (g)		Faraday kütle kaybı (g)	Gerçek kütle kaybı (g)		Faraday korozyon oranı (%)	Gerçek korozyon oranı (%)		Uygulanan akım-saat (A.h)
		L_{1-8}	S_{1-18}	$L_{1-8}+S_{1-18}$	L_{1-8}	S_{1-18}	$L_{1-8}+S_{1-18}$	L_{1-8}	S_{1-18}	
$C30_1$	20	x	x	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C30_2$	20	32488.5	8124.5	2639.1	474.5	321.0	6.50	1.46	3.95	2533.1
		Toplam= 40613.0			Ortalama= 795.5			Ortalama= 1.97		
$C30_3$	20	32267.5	8099.5	3234.5	768.5	432.5	8.01	2.38	5.34	3104.6
		Toplam= 40367.0			Ortalama= 1201.0			Ortalama= 2.98		
$C30_4$	20	32471.5	8012.5	4859.0	1350.0	683.0	12.00	4.16	8.52	4663.9
		Toplam= 40484.0			Ortalama: 2033.0			Ortalama= 5.02		
$C30_5$	20	32429.5	8044.5	6881.8	2064.0	945.5	17.00	6.36	11.75	6604.4
		Toplam= 40474.0			Ortalama= 3009.5			Ortalama= 7.44		
$C30_6$	40	x	x	x	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$C30_7$	40	32447.5	8156.5	2638.3	592.5	330.0	6.50	1.83	4.05	2532.3
		Toplam= 40604.0			Ortalama= 922.5			Ortalama= 2.27		
$C30_8$	40	32360.0	7946.5	3224.7	1028.5	553.5	8.00	3.18	6.97	3095.2
		Toplam= 40306.5			Ortalama= 1582.0			Ortalama= 3.92		
$C30_9$	40	32447.0	8038.0	4861.8	1226.0	585.0	12.01	3.78	7.28	4666.5
		Toplam= 40485.0			Ortalama= 1811.0			Ortalama= 4.47		
$C30_{10}$	40	32447.5	8054.0	6888.9	1952.0	995.5	17.01	6.02	12.36	6613.0
		Toplam= 40501.5			Ortalama= 2947.5			Ortalama= 7.28		

L1-8: 8 adet boyuna donatının toplam kütlesi.
S1-18: 18 adet sargı donatısının toplam kütlesi.

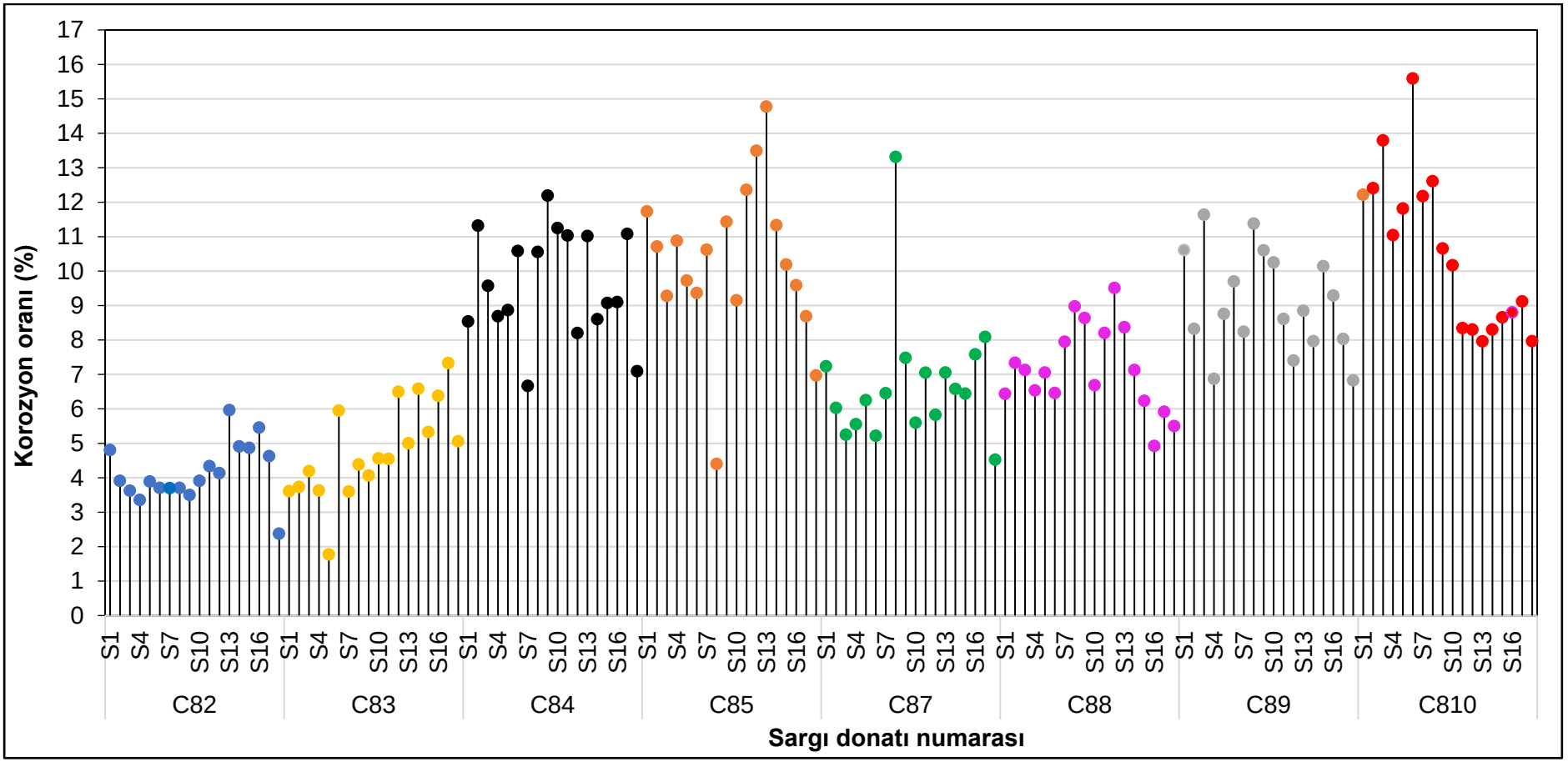
Tablo 4. 6: C30 betonarme kolonlarındaki boyuna ve etriyelerdeki korozyon oranı (yalnızca boyuna ve sargı donatılarının kütleleri).

#	$N/A_c \times f_{ck}$ (%)	Boyuna donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Boyuna donatılarının toplam son kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam son kütlesi (g)	Uygulanan akım-saat (A.h)
		L_{1-8}	L_{1-8}	S_{1-18}	S_{1-18}	
$C30_1$	20	x	x	x	x	0.0
$C30_2$	20	32488.5	32014.0	8124.5	7803.5	2533.1
		CL_L (%) = 1.46		CL_S (%) = 3.95		
$C30_3$	20	32267.5	31499.0	8099.5	7667.0	3104.6
		CL_L (%) = 2.38		CL_S (%) = 5.34		
$C30_4$	20	32471.5	31121.5	8012.5	7329.5	4663.9
		CL_L (%) = 4.16		CL_S (%) = 8.52		
$C30_5$	20	32429.5	30365.5	8044.5	7099.0	6604.4
		CL_L (%) = 6.36		CL_S (%) = 11.75		
$C30_6$	40	x	x	x	x	0.0
$C30_7$	40	32447.5	31855.0	8156.5	7826.5	2532.3
		CL_L (%) = 1.83		CL_S (%) = 4.05		
$C30_8$	40	32360.0	31331.5	7946.5	7393.0	3095.2
		CL_L (%) = 3.18		CL_S (%) = 6.97		
$C30_9$	40	32447.0	31221.0	8038.0	7453.0	4666.5
		CL_L (%) = 3.78		CL_S (%) = 7.28		
$C30_{10}$	40	32447.5	30495.5	8054.0	7058.5	6613.0
		CL_L (%) = 6.02		CL_S (%) = 12.36		

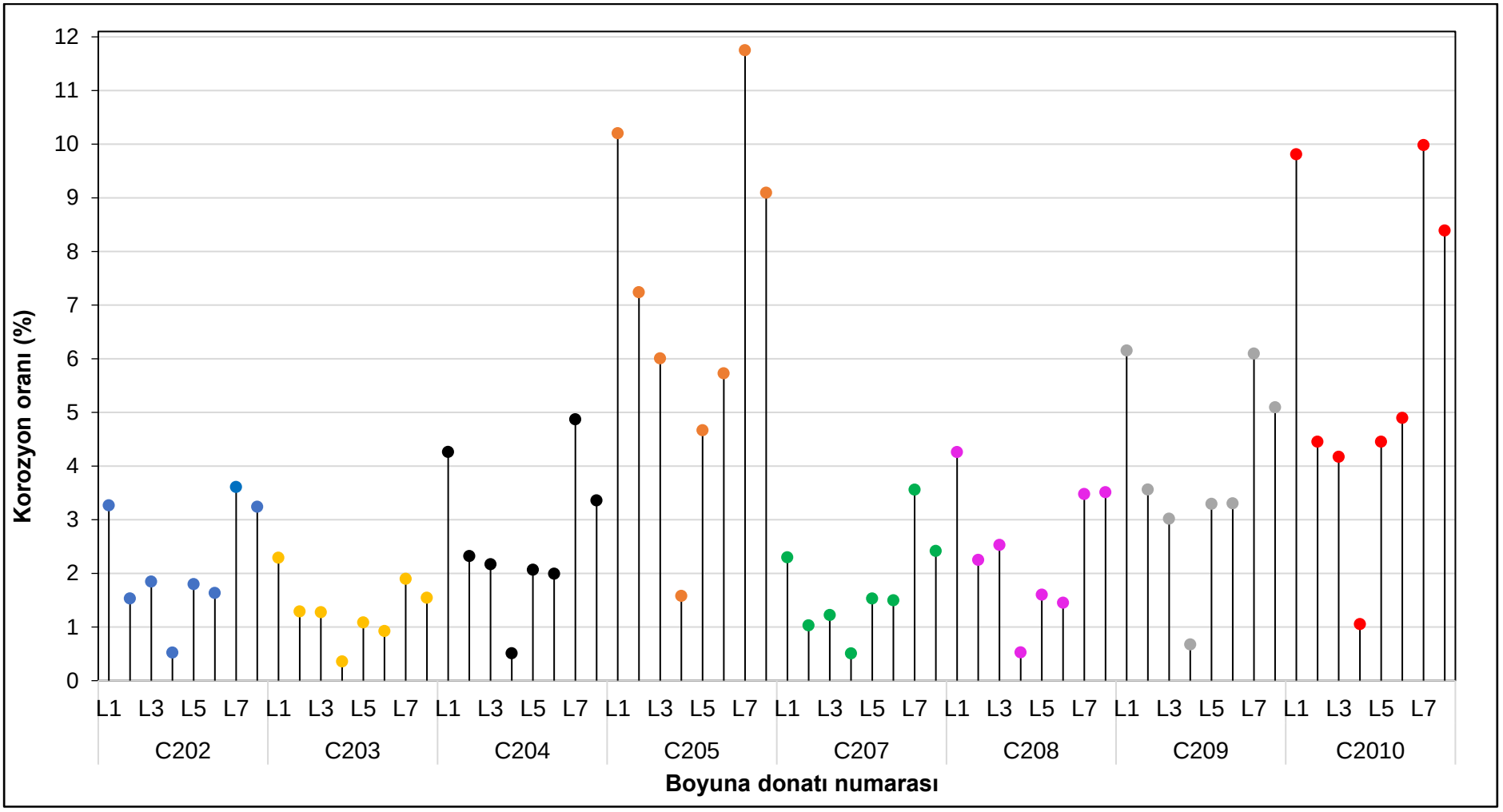
CL: Gerçek korozyon oranı.
CL_L: Boyuna donatılardaki gerçek korozyon oranı.
CL_S: Sargı donatılarındaki gerçek korozyon oranı.



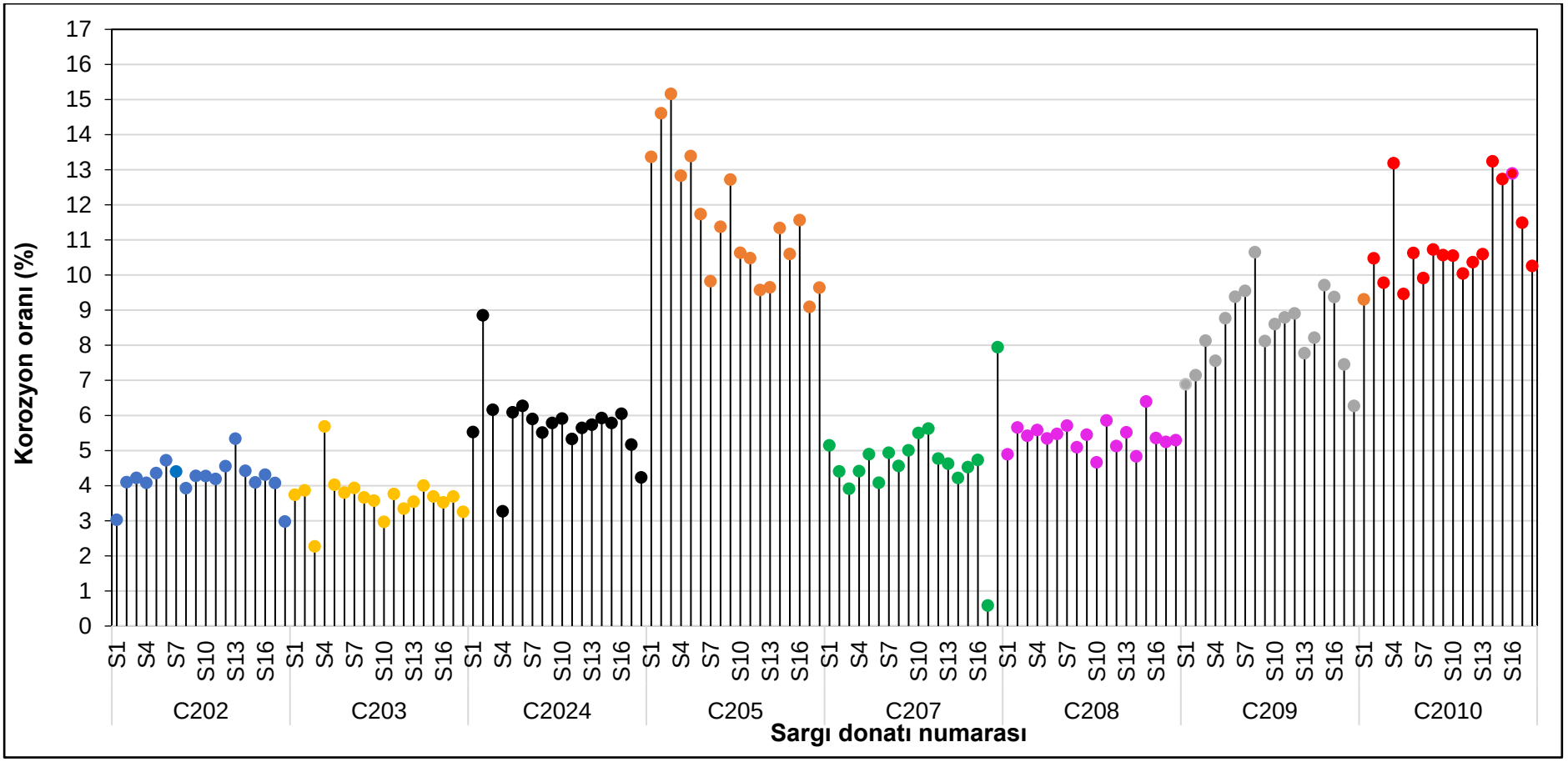
Şekil 4. 3: C8 betonarme kolonları: Boyuna donatılardaki korozyon dağılımları.



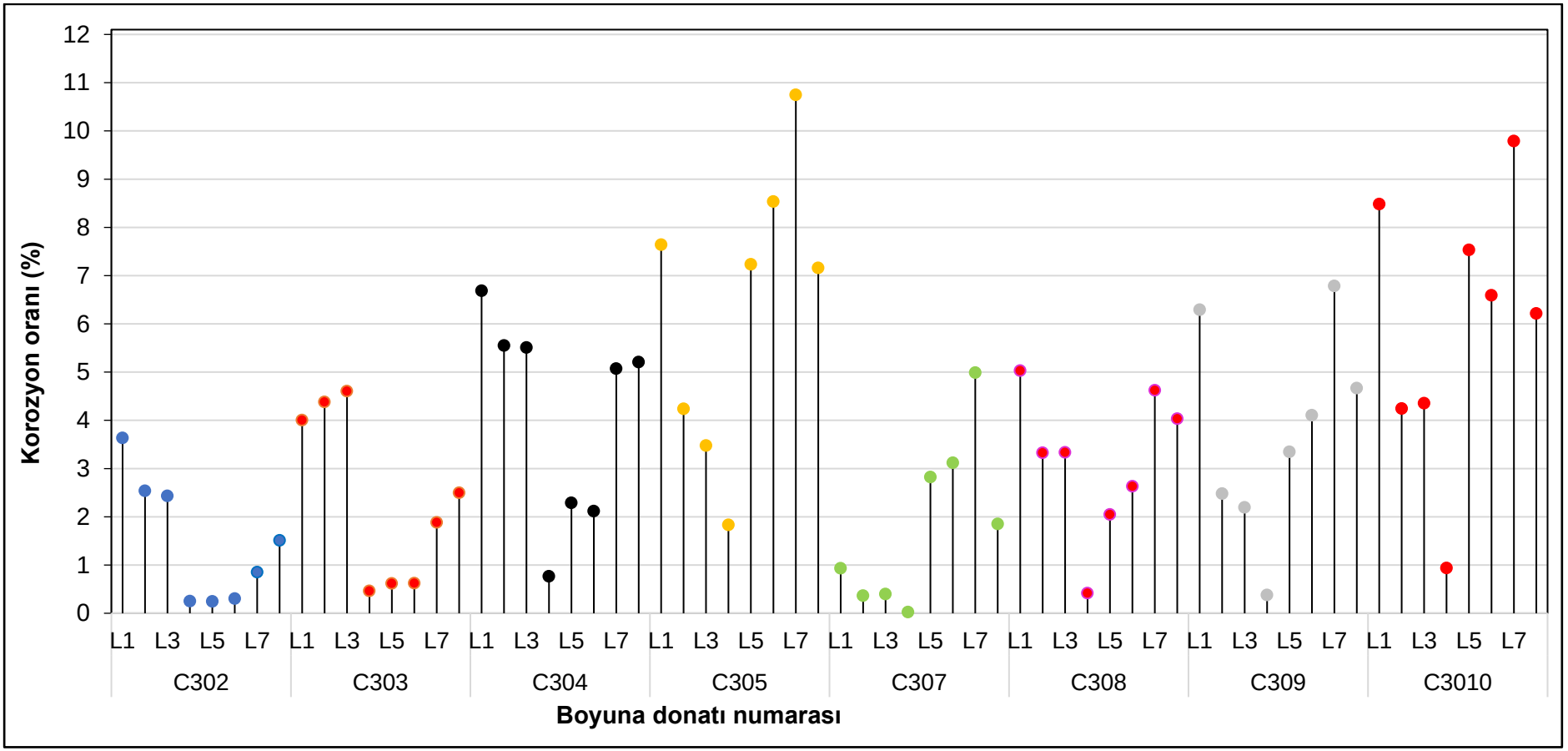
Şekil 4. 4: C8 betonarme kolonları: Sargı donatılarındaki korozyon dağılımları.



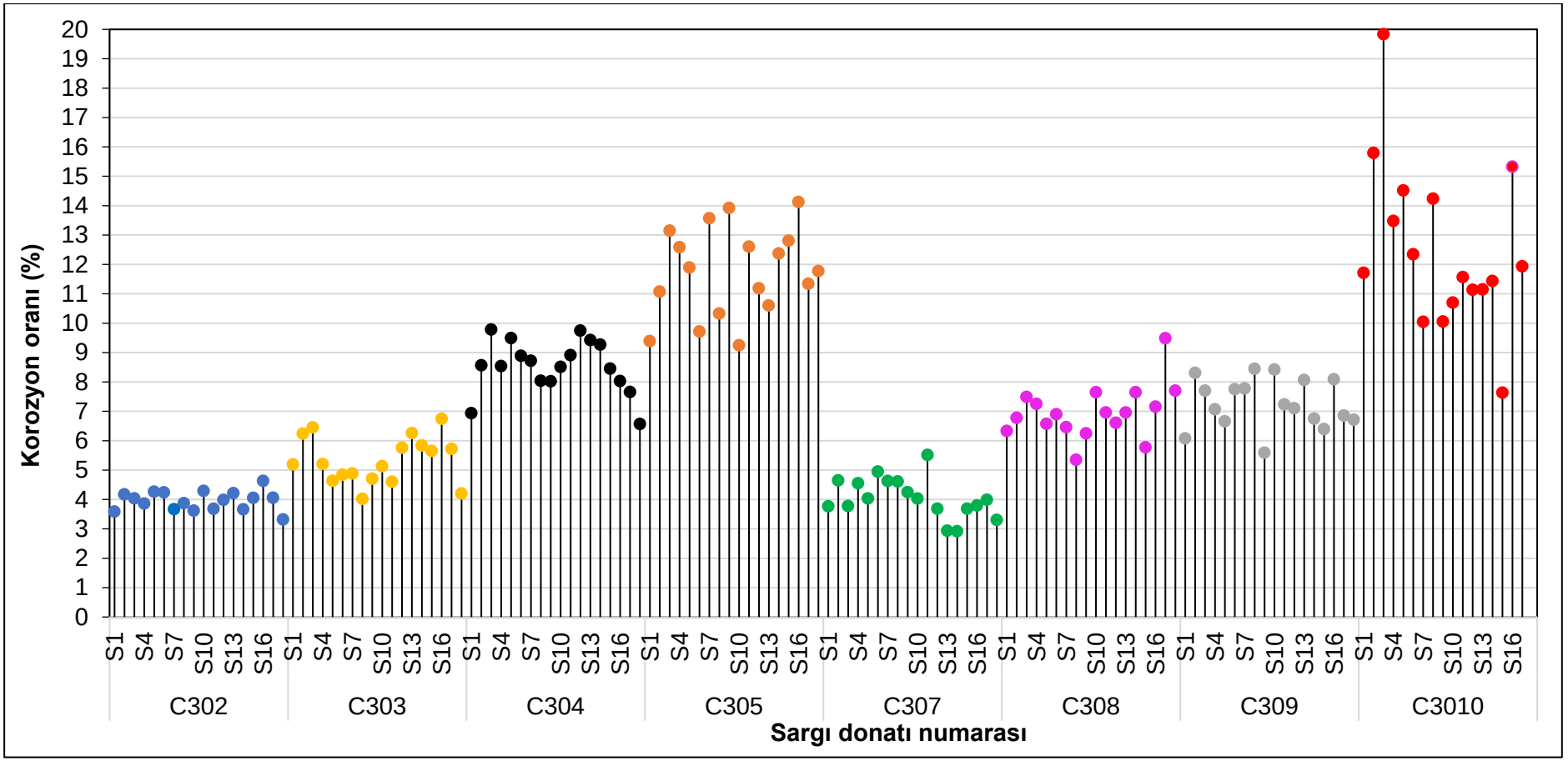
Şekil 4. 5: C20 betonarme kolonları: Boyuna donatılardaki korozyon dağılımları.



Şekil 4. 6: C20 betonarme kolonları. Sargı donatılarındaki korozyon dağılımları.



Şekil 4. 7: C30 betonarme kolonları. Boyuna donatılardaki korozyon dağılımları.



Şekil 4. 8: C30 betonarme kolonları: Sargı donatılarındaki korozyon dağılımları.

Tablo 4.1, 4.3 ve 4.5'te gösterildiği üzere; Faraday Kanuna (teorik) göre hesaplanan korozyon oranları ile gerçek korozyon oranları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Faraday tarafından geliştirilen ve kütle kaybını tahmin etmeye yardımcı olan modelde çelik çubukların direk akıma tabi tutulmasına dayalı bir model olduğundan beton etkisi teorik-gerçek korozyon oranları üzerinde etkili olmaktadır. Betonarme donatılarının beton içerisinde olması durumunda korozyonun başlaması anına kadar betonun sağlamış olduğu dirençten dolayı, her saniyede kütle kaybı oluşmamaktadır. Mevcut literatürde de bu konu üzerine bilindik farklı çalışmalar yapılmış ve Faraday Kanuna göre beton içerisindeki donatılarda korozyondan dolayı kütle kaybını tahmin etmek için farklı modeller geliştirilmiş olup; ileriki çalışmalara ışık tutması amacı ile geliştirilen modeller aşağıda özetlenmiştir.

Bu modellerden biri olan ve Auyeung vd. (2000) tarafından geliştirilen modelde, beton basınç dayanımı 28 MPa olup yapılan deneysel çalışmadaki korozyon oranları %0 ve %5.91 arasında değerler almıştır. Auyeung vd. (2000) tarafından yapılan deneysel deneysel çalışmada 19 mm çapındaki betonarme donatılarını 178 × 178 × 355 mm boyutlarındaki beton prizmasına yerleştirilmiştir. Auyeung vd. (2000) geliştirilen ampirik denklem Denklem 4.1 gösterilmektedir.

$$Gerçek\ kütle\ kaybı = 0.4651 \times F - 0.5624 \tag{4.1}$$

Yalciner vd. (2012b) tarafından geliştirilen modelde beton sınıfı için bir alt limit ve bir üst limit göz önüne alınmış ve yapılan çalışmada iki farklı beton sınıfı için 23 MPa ve 51 MPa kullanılmıştır. Ayrıca her bir beton sınıfı için üç farklı (15, 30 ve 45 mm) paspayları dikkate alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmadaki korozyon oranları %0 ve %18.75 arasında değerler almıştır. Yalciner vd. (2012b) geliştirilen ampirik denklem Denklem 4.2 gösterilmektedir.

$$Gerçek\ kütle\ kaybı = 0.703 \times F - 0.15 \tag{4.2}$$

El Maaddawy vd. (2006) tarafından geliştirilen modelde tek bir beton sınıfı (35 MPa) kullanılıp, 102 mm çapındaki ve 204 mm yüksekliğindeki beton silindirler içerisine yerleştirilmiş 11.3, 16 ve 19.5 mm çaplarında donatılar kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmadaki korozyon oranları %0 ve %39.3 arasında değerler almıştır. El Maaddawy vd. (2006) geliştirilen ampirik denklem Denklem 4.3 gösterilmektedir.

$$Gerçek\ kütle\ kaybı = 0.44 \times F \tag{4.3}$$

Paul vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada iki farklı çimento türü için birbirine yakın iki farklı beton basınç dayanımı (28 ve 26 MPa) göz önüne alınmıştır. Üç farklı kesit özellikleri için birbirinden farklı paspayları göz önüne alınmıştır. Paul vd. (2016) geliştirilen ampirik denklem Denklem 4.4 gösterilmektedir.

$$Gerçek\ kütle\ kaybı = 1.0939 \times F - 8.2744 \quad (4.4)$$

Yukarıda bahsedilen çalışmalardaki numunelerin küçük boyutlarda olması sebebi ile geliştirilen modeller daha büyük ölçekli hızlandırılmış korozyon yöntemlerinde yakın değerler elde etmeyi güçleştirmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere proje yürütücüsünün gerçekleştirmiş olduğu diğer bir (Bicer vd., 2018) tam ölçekli paslanmış betonarme kirişlerinde taşıma gücü momentinin hesaplanması için yapılan deneysel çalışmada da bu durum vurgulanmış ve yeni bir model geliştirilmiştir. Bicer vd. (2018) tarafından geliştirilen modelde 2500 mm uzunluğunda, 250 mm genişliğinde ve 400 mm yüksekliğinde tam ölçekli betonarme kirişlerinden tüm boyuna ve sargı donatıları çıkartılarak gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada tek tik beton basınç dayanımın kullanılması geliştirilen modelin mevcut çalışma ile kıyaslanmasına olanak sağlamıştır. Bicer vd. (2018) tarafından geliştirilen ampirik Denklem 4.5'te gösterilmektedir. Yapılan deneysel çalışmadaki korozyon oranları %0 ve %10.6 arasında değerler almıştır.

$$Gerçek\ kütle\ kaybı = 0.0003\mathrm{F}^2 - 1.843 \times F + 4580.2 \quad (4.5)$$

4.2. Paslandırma Sonrası Birincil Korozyon Çatlak Haritaları

Korozyondan dolayı betonarme kiriş elemanlarında meydana gelen birincil çatlak genişliklerini tahmin etmeye yönelik mevcut literatürde birçok farklı çalışmalar mevcuttur (örneğin; Vidal vd., 2004; Li, 2005; Li ve Melchers, 2006; Choe vd., 2008). Korozyon oranına bağlı olarak tahmin edilecek olan çatlak genişliği zamana bağlı yapı servis ömrünün ve yapı kullanılabilirlik sınır durumunun değerlendirilmesinde önemli bir yere sahiptir. Mevcut literatürde korozyondan dolayı çatlak genişliğini tahmin etmeye yönelik geliştirilen modeller yapının kullanılabilirlik sınır durumunu değerlendirmeye yönelik olup; elde edilen çatlak genişliğine bağlı yapının deprem performansı üzerine bir değerlendirme imkânı sağlamamaktadır. Yapılan çalışmalar betonarme kirişleri üzerine yoğunlaşmış olup eksenel yük etkisinde korozyon oranına bağlı olarak çatlak genişliği ve yapısal performans ilişkisi için eksiklik halen devam etmektedir. Ayrıca geliştirilen birçok çatlak genişlik modeli ise oldukça ileri düzeyde korozyon kimyasını içermekte olup saha çalışmaları için elverişli değildir. Geliştirilen çatlak genişlik modellerinde elde edilen çatlak genişliklerinin farklı hızlandırılmış korozyon yöntemleri ve korozyon sürecinde betonarme elemanlarının sabit servis yükler etkisi altında paslandırılması veya yük etkisinin göz önüne alınmayarak elde edilmesine bağlı olarak değişkenlikler göstermektedir. Malumbela vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada da bu durum belirtilerek; mevcut literatürde servis yüklerinin kullanılarak veya kullanılmadan yapılan çalışmalarda da çatlak genişlikleri konusunda çelişkilerin olduğu özellikle belirtilmiştir. Mevcut TÜBİTAK çalışmasındaki betonarme numune sayısı ve boyutları göz önüne alındığında; paslandırma süreci proje önerisi kapsamında servis yükleri ihmal edilerek gerçekleştirilmiştir.

Eksenel yük etkisi veya eksenel yükün ihmal edilerek paslandırılan betonarme elemanlarında aynı korozyon oranında donatı çapının değişmediği kabulü yapılarak; mevcut çalışma için elde edilen birincil çatlak genişlikleri servis yüklerinin kullanılarak geliştirilen çatlak genişlik modellerinden elde edilecek değerler ile karşılaştırılabilir. Ancak bugüne kadar geliştirilen ve aşağıda özetlenen çatlak genişlik modelleri betonarme kirişleri üzerine yapılmış olup; bu çalışmadan elden edilen değerlerinin karşılaştırılabilmesi için eksenel yük etkisinde paslandırılmış kolon çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Proje yürütücüsünün konu üzerinde uzan yıllar çalışıyor olması ve korozyon üzerine çalışacak olan araştırmacılara kolaylık sağlaması amacı ile mevcut literatürdeki çatlak modelleri özet olarak aşağıda sunulmuştur.

Vidal vd. (2004) çatlak modeli:

Vidal vd. (2004) tarafından geliştirilen çatlak modeli 14 ve 17 yıllık bir deneysel çalışmaya dayanmaktadır. Vidal vd. (2004) tarafından servis yükleri etkisinde paslandırılan ve betonarme elemanlarında çatlak genişliğini tahmin etmek için geliştirilen ampirik model Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$w = K(\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \tag{4.6}$$

Denklem 4.6'da *w* çatlak genişliğini (mm), K= 0.0575, ΔA_s donatı kesit alan kaybını (mm^2), ve ΔA_{s0} (mm^2) çatlak başlangıcı için kesit alan kaybını ifade etmektedir Çatlak başlangıcı için kesit alan kaybı Denklem 4.7 yardımı ile hesaplanabilir.

$$\Delta A_{s0} = A_s \left[1 - \left[1 - \frac{\alpha}{d_0}\left(7.53 + 9.32\frac{c}{d_0}\right)10^{-3}\right]^2\right] \tag{4.7}$$

Denklem 4.7'de *As* paslanmamış donatının kesit alanı (mm^2), d_0 donatı ilk çapı (mm), α korozyon penetrasyon yoğunluk katsayısı olup, homojen korozyon oranı için 2, bölgesel korozyon için 4 ve 8 arasında değerler almaktadır (Rodriguez vd., 1996), c (mm) ise beton paspayıdır. ΔA_s Denklem 4.8 ve 4.9 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta A_s = \frac{\Delta_m}{m} A_s \tag{4.8}$$

$$\Delta m = m - m' \tag{4.9}$$

Denklem 4.9'da Δ_m donatı boyuna düşen ortalama birim kütle kaybı olup (gr/mm), m ve m′ donatı boyuna düşen birim birinci ve son kütleleri temsil etmektedir.

Zhang vd. (2010) çatlak modeli:

Zhang vd. (2010) servis yükleri etkisi altında iki adet betonarme kirişini paslandırarak çatlak genişliğini tahmin etmeye yönelik ampirik bir geliştirmişlerdir. Geliştirilen model çatlak genişliğini ortalama donatı çapındaki azalmanın bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır. Denklem 4.10'da Zhang vd. (2010) tarafından geliştirilen çatlak modeli gösterilmektedir. Zhang

vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada çatlak genişliğinin ortalama donatı çapındaki azalmaya bağlı olarak hesaplanmasının deneysel veriler ile karşılaştırıldığında daha yakın sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

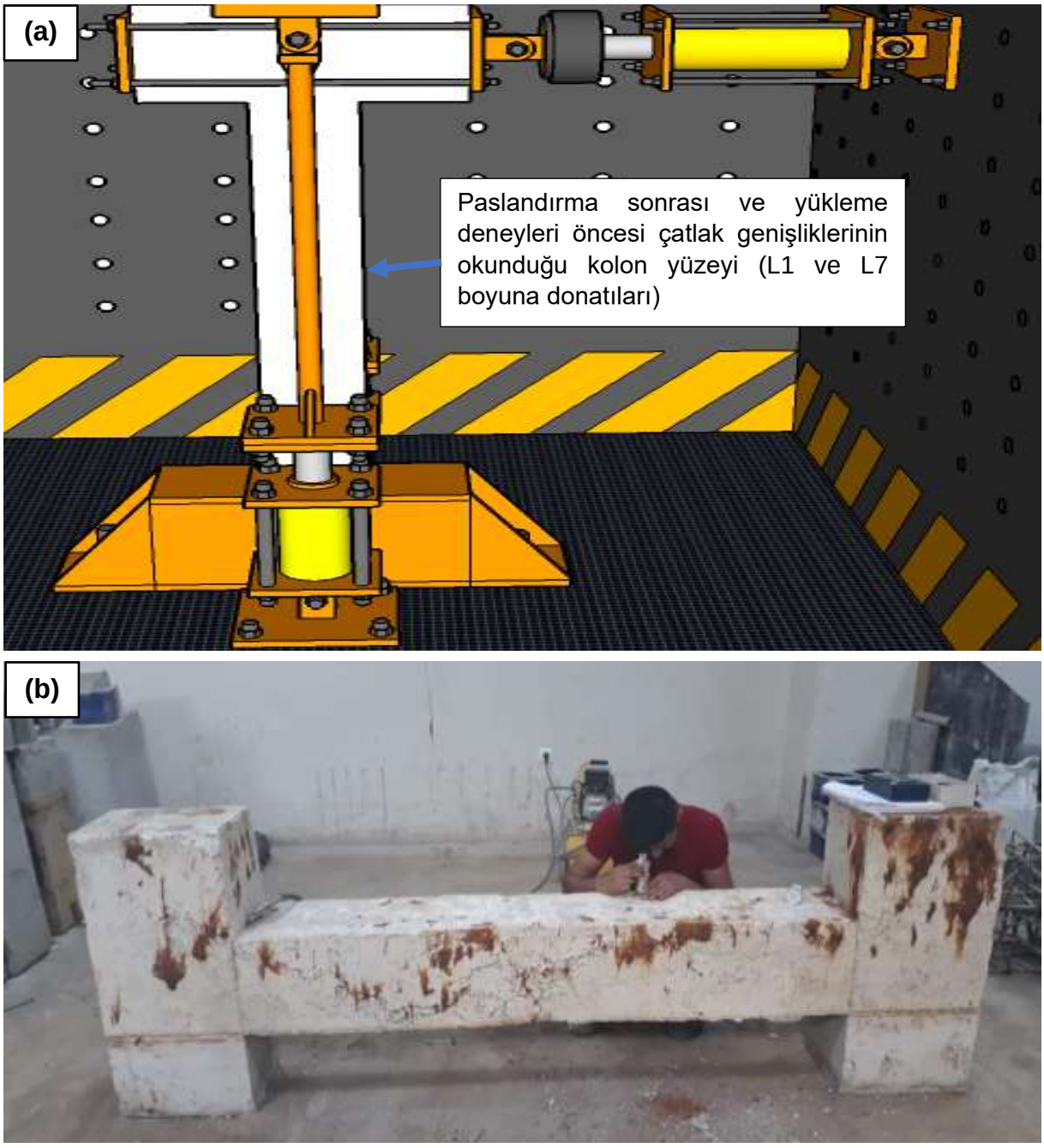
$$w = 0.1916\Delta A_s + 0.164 \tag{4.10}$$

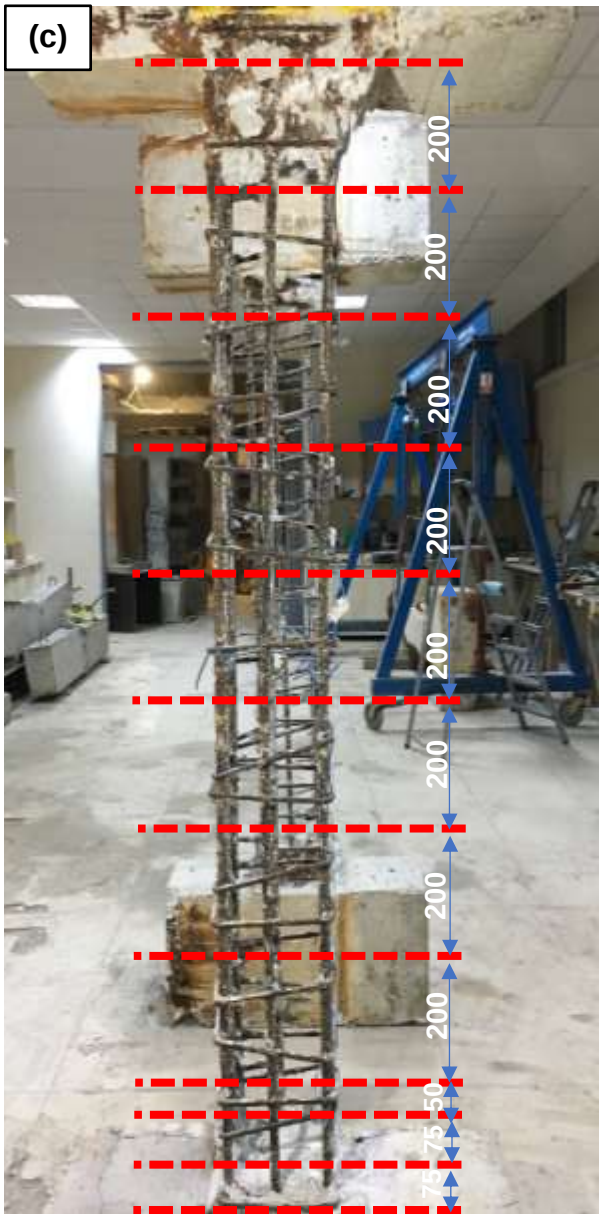
Khan vd. (2014) çatlak modeli:

Khan vd. (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmada Rodriguez vd. (1996), Vidal vd. (2004) ve Zhang vd. (2010) tarafından geliştirilen çatlak genişlik modelleri karşılaştırılmış ve yapılan çalışma sonucunda Zhang vd. (2010) tarafından geliştirilen modelin beton paspayı ve donatı çapı oranının dikkate alınması durumunda deneysel verilere daha yakın çatlak genişliklerinin tahmin edilebileceği belirtilmiştir.

$$w = 0.1916\Delta A_s \frac{d_0}{c} + 0.164 \tag{4.11}$$

Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası paslandırma havuzundan çıkartılan tüm betonarme kolonları için çatlak genişlik ölçümleri yapılarak haritalandırılmıştır. Korozyon ürünün donatı çevresince artması ve buna bağlı olarak donatı hacminin ilk hacminin yaklaşık olarak 4-5 katı üstüne çıkması ile korozyon ürünün beton yüzeyine uyguladığı radyal basınç etkisi ile beton kabuk yüzeyinde çatlamalar meydana gelmektedir. Aynı korozyon oranına sahip betonarme elemanlarında özellikle beton basınç dayanıma bağlı olarak birincil çatlaklar değişiklik göstermektedir. Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan çalışmada aynı korozyon oranlarına sahip küp numunelerindeki birincil çatlak genişliklerinin beton basınç dayanımının artmasına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı farklı beton basınç dayanımına sahip betonarme kolonlarının çekme bölgesine (itme yönü kabulü; pozitif yükleme yönü) karşılık gelen kolon yüzeyinde çatlak genişlik ölçümleri yapılarak haritalandırılmıştır. Yükleme öncesi birincil korozyon çatlak genişliklerin okunması için manuel bir mikroskop kullanılmıştır.


(a)
Paslandırma sonrası ve yükleme deneyleri öncesi çatlak genişliklerinin okunduğu kolon yüzeyi (L1 ve L7 boyuna donatıları)
(b)

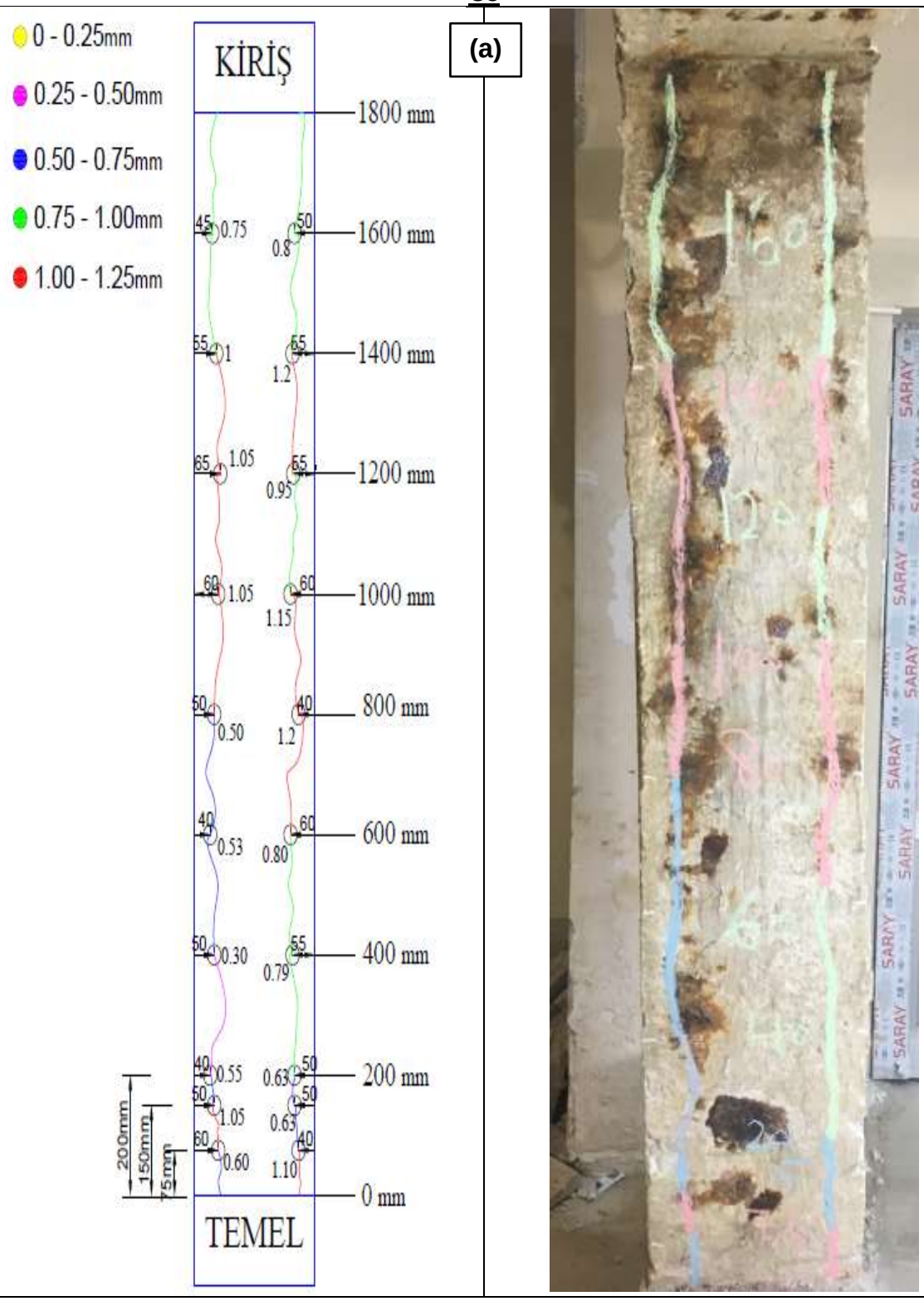


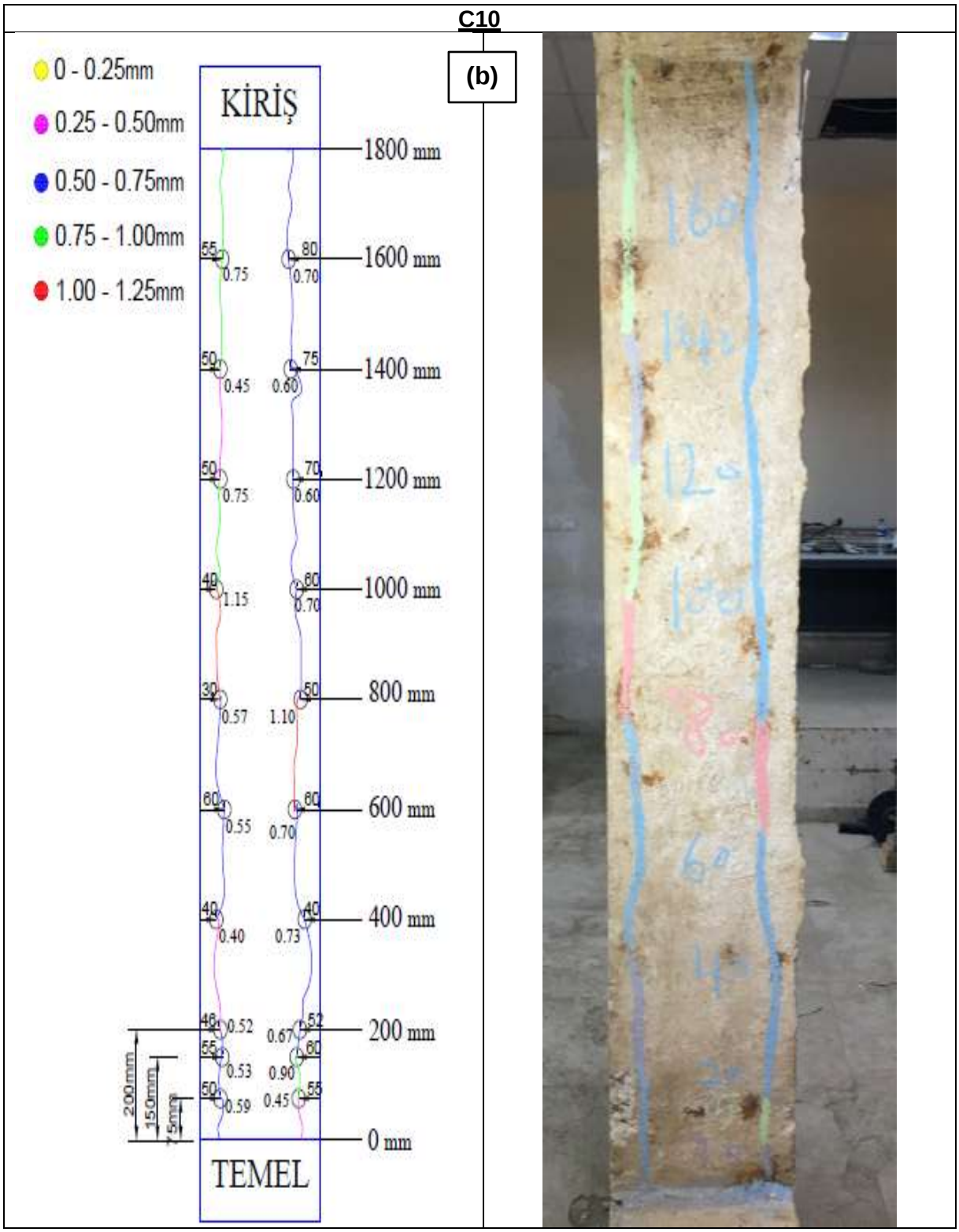
Şekil 4. 9: Birincil korozyon çatlak genişlikleri: (a) çatlağın okunduğu kolon yüzeyi (çekme bölgesi); (b) mikroskop ile ölçüm; (c) çatlağın okunduğu donatı aralığı.

Her bir betonarme kolonu için birincil çatlak genişlikleri kolon boyunca temelden 20 cm aralıklar ile 11 bölge için ölçülerek haritalandırılmıştır. Park ve Paulay (1975) modeline göre teorik olarak hesaplanan kolonların plastik mafsal bölgesi (150 mm) ve bir alt seviyesi (75 mm) içinde ayrıca çatlak genişliği okumaları yapılmıştır. Yükleme deneylerin den sonra betonarme donatıları beton içerisinden çıkartılarak gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Çatlak genişliğinin okunduğu bölgelerdeki korozyon oranlarının belirlenmesi için; çatlağın okunduğu bölgedeki donatılar (L1 ve L7 numaraları donatılar) belirlenen ölçülerde kesilerek özdeş uzunluktaki paslanmamış donatı kütleleri ile karşılaştırılmıştır. Böylelikle, çatlak genişliğinin okunduğu bölgedeki korozyon oranları elde edilmiştir. Şekil 4.10-4.12'de her bir beton sınıfına ait farklı korozyon oranlarında betonarme kolonları için okunan ve kaydedilen birincil (yükleme

öncesi) çatlak genişlikleri gösterilmektedir. Ek. 2'te ise seçilen diğer betonarme kolonları için kolon boyunca çizilen çatlak haritalarına yer verilmiştir.

C5

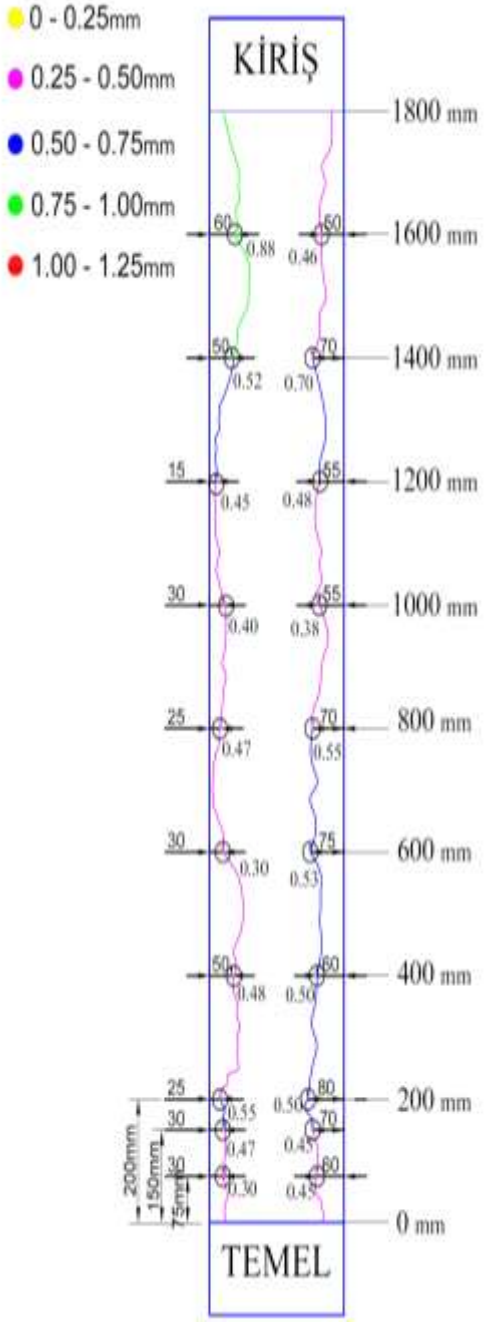




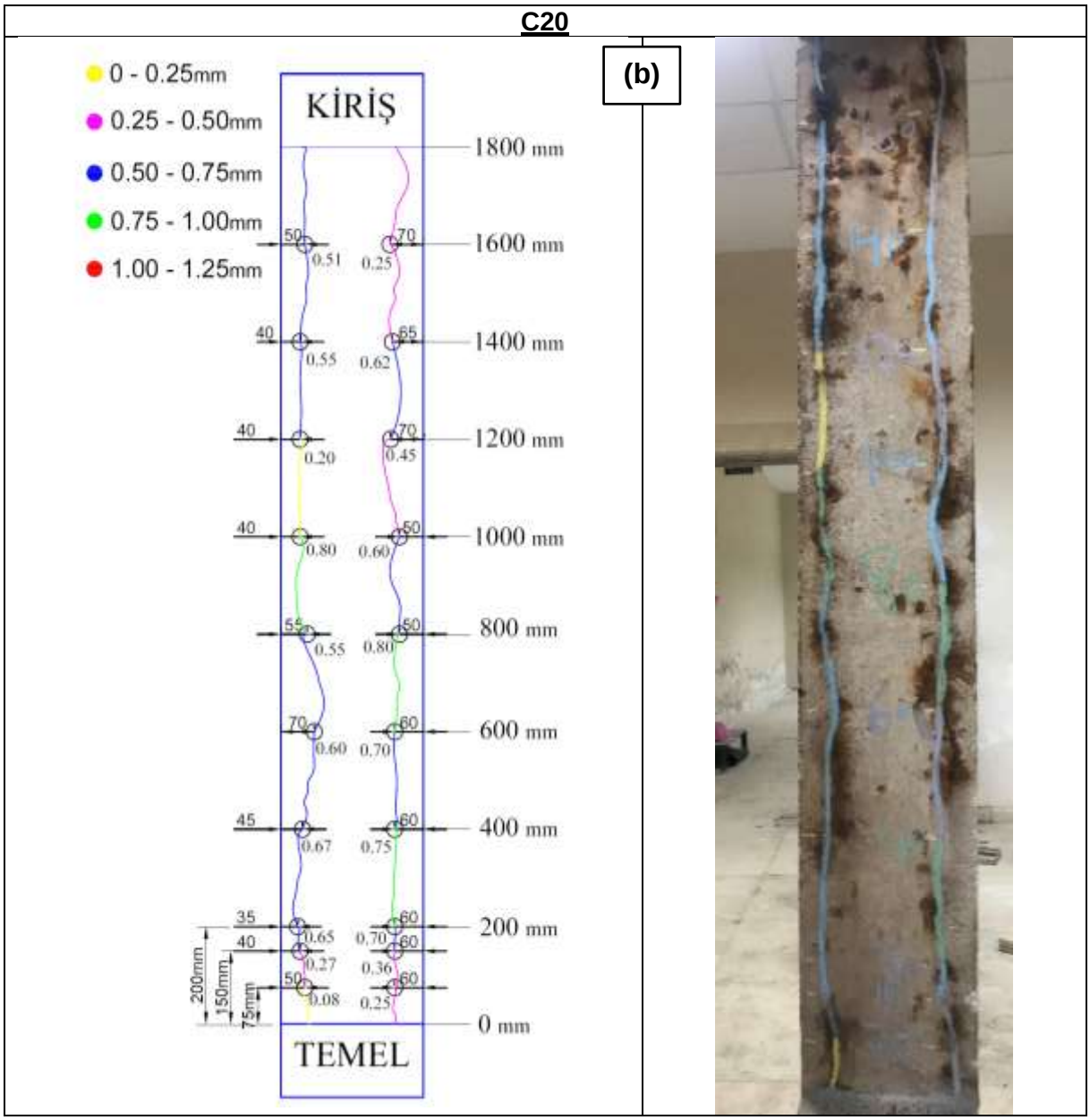
Şekil 4. 10: Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası C8 betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında birincil çatlak genişlikleri: (a) C5 kolonu; (b) C10 kolonu.

C19

(a)

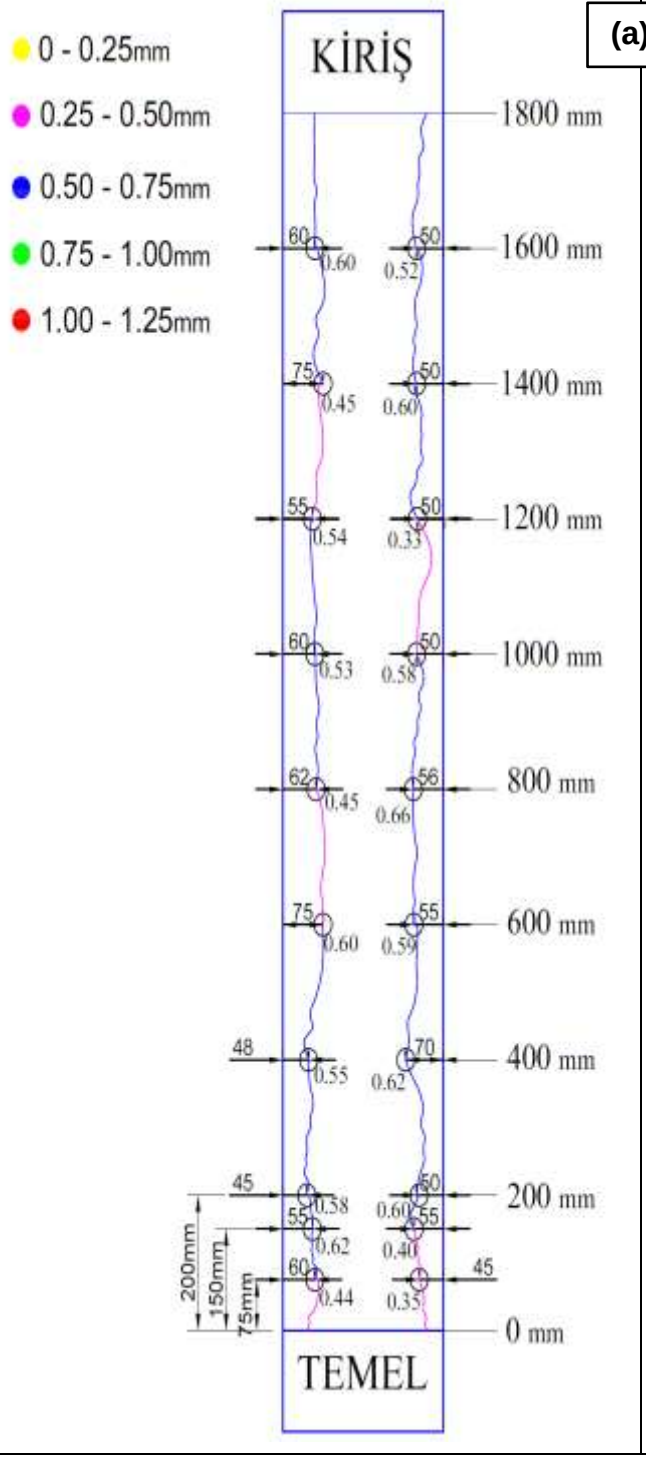

0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm





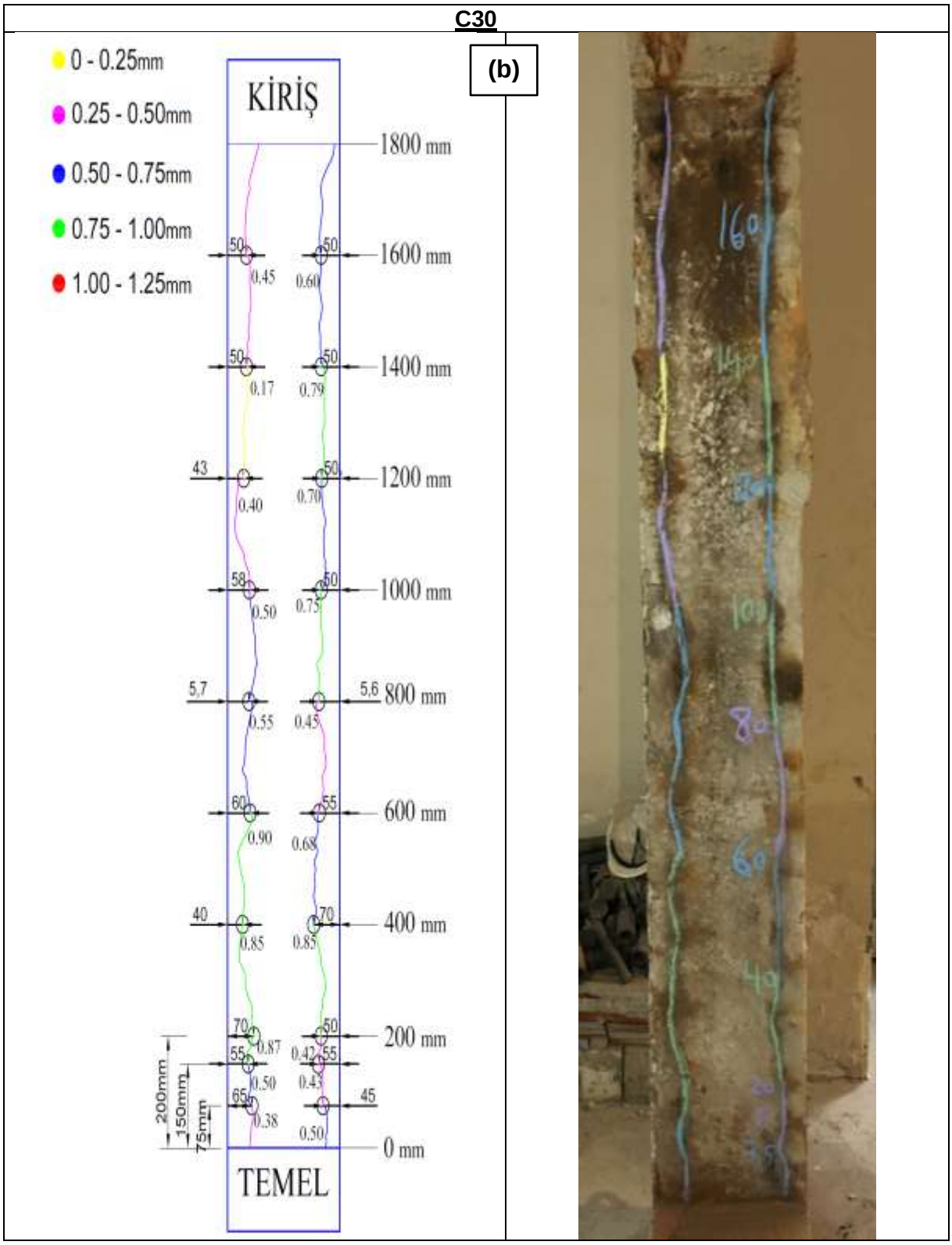
Şekil 4. 11: Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası C20 betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında birincil çatlak genişlikleri: (a) C19 kolonu; (b) C20 kolunu.

C29


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
TEMEL
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
200mm
150mm
75mm

(a)

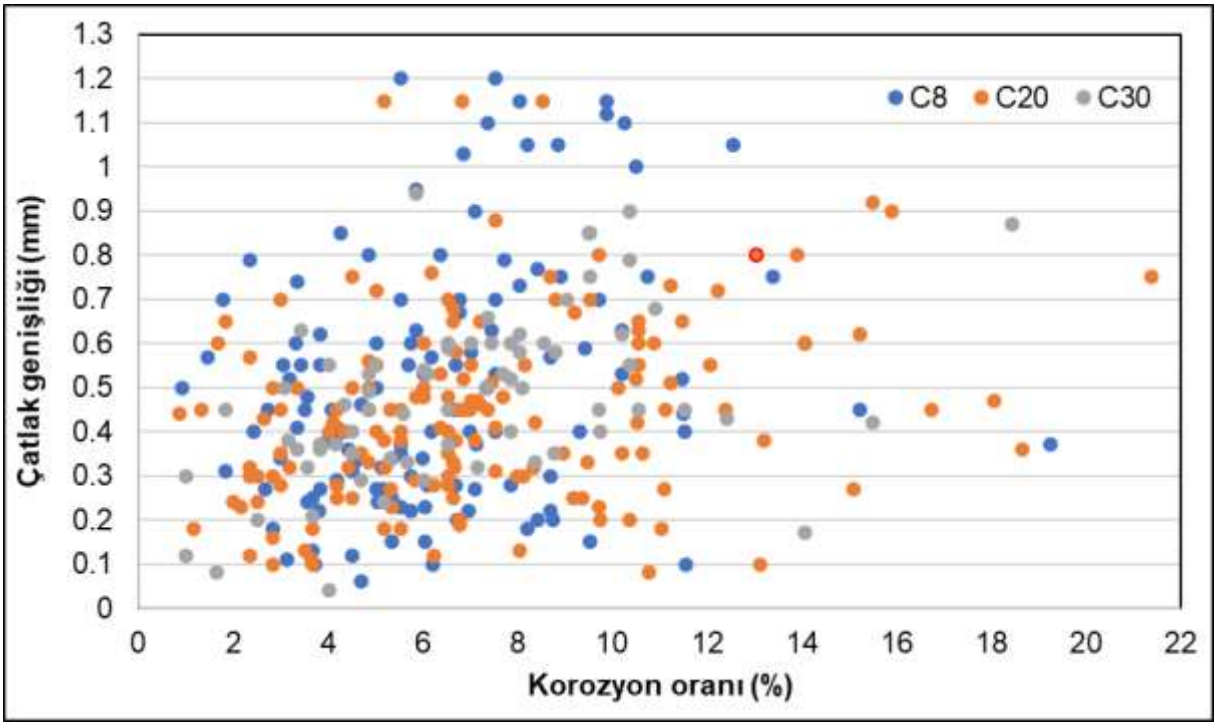




Şekil 4. 12: Hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrası C30 betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında birincil çatlak genişlikleri: (a) C29 kolunu; (b) C30 kolonu.

4.2.1 Korozyon oranları ve birincil korozyon çatlak genişlikleri arasındaki ilişki

Her bir betonarme kolonundaki 11 bölge için kesilmiş L1 ve L7 boyuna donatılarındaki gravimetrik çalışma sonucunda hesaplanan kesit alanındaki kayıplar (ΔA_s) ve karşılık gelen birincil korozyon çatlak dağılım değerleri Şekil 4.13'de verilmiştir. Tablo 4.7'de ise kesilmiş betonarme donatıları için ortalama korozyon oranları ve çatlak genişlikleri (W_{cr}) verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.7'de kesilmiş betonarme donatılarındaki korozyon oranlarının kesilmemiş boyuna donatılar ve karşılık gelen betonarme kolonundaki ortalama korozyon oranları karşılaştırılmak üzere verilmiştir.

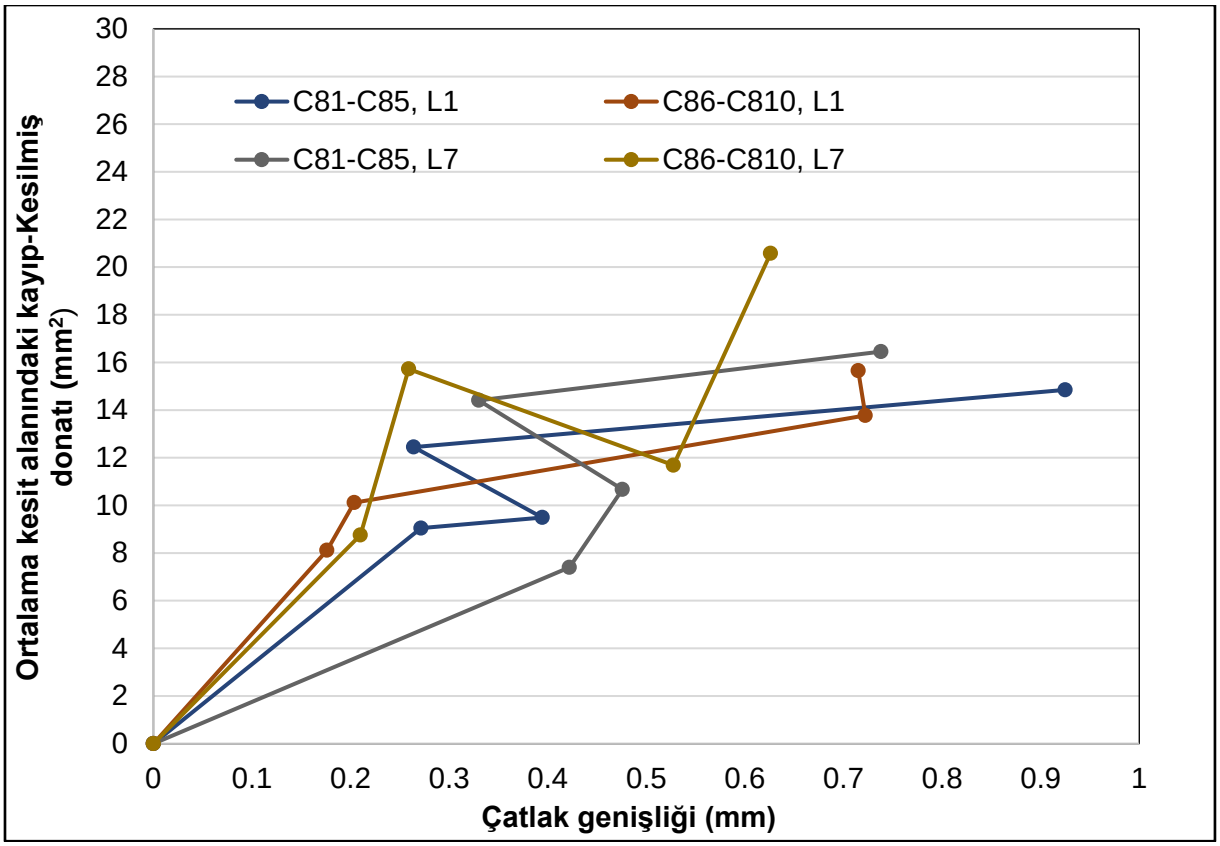


Şekil 4. 13: Kesilen donatılardan elde edilen korozyon oranları ve karşılık gelen birincil korozyon çatlak genişlik dağılımları.

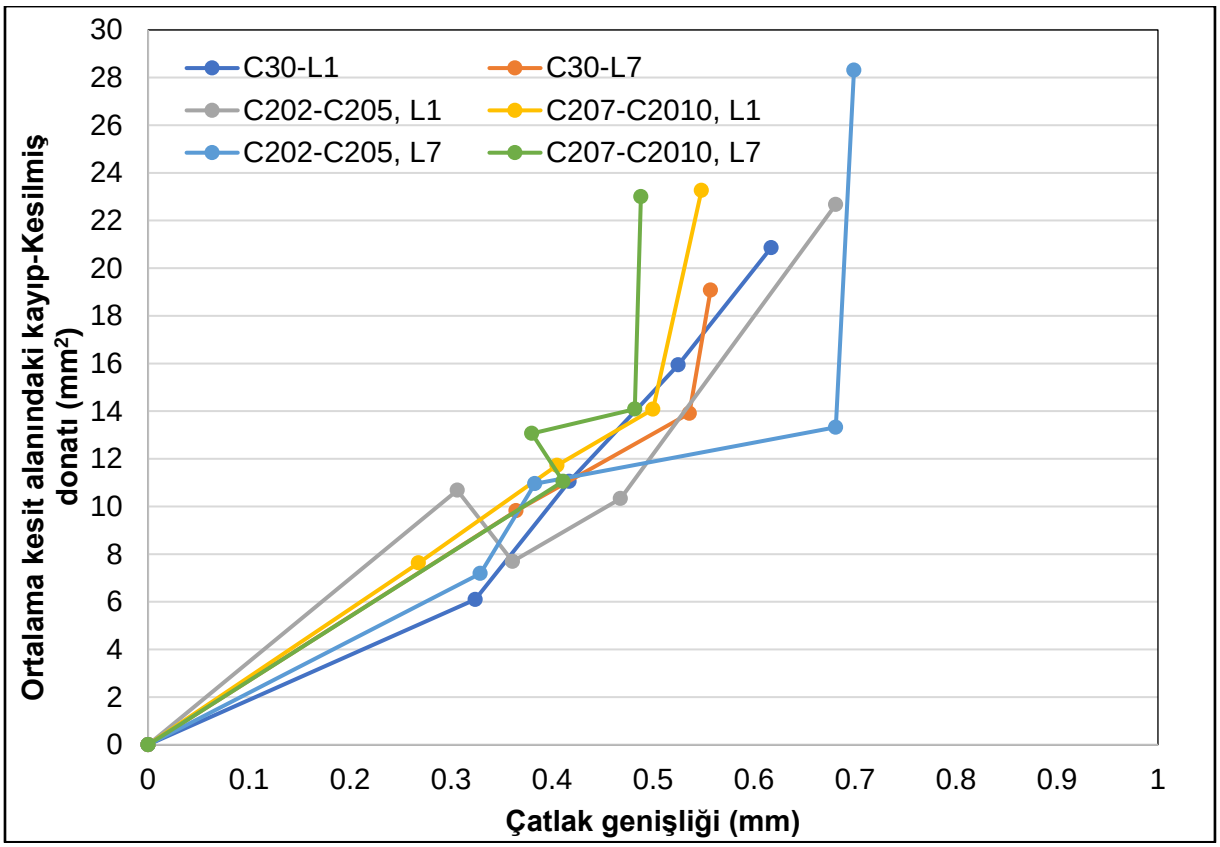
Tablo 4. 7: Ortalama çatlak genişliği: Kesilmiş, kesilmemiş tek bir donatıdaki kesit kaybı ve karşılık gelen kolondaki ortalama donatı kesit kaybı.

Kolon donatısı	**Kesilmiş donatı**			**Kesilmemiş donatı için kesit kaybı**			**Kesilmemiş donatı-Betonarme kolonundaki ortalama donatı kesit kaybı**
	W_{cr} (mm)		**ΔA_s (mm^2)**	**ΔA_s (mm^2)**			**ΔA_{sL} (mm^2)**
	L1	**L7**	**L1**	**L7**	**L1**	**L7**	**L1…Li + L8**
$C8_1$	0.00						
$C8_2$	0.39	0.48	9.49	10.67	6.55	5.97	4.31
$C8_3$	0.27	0.42	9.05	7.40	5.51	6.02	4.52
$C8_4$	0.26	0.33	12.45	14.41	13.18	13.22	9.72
$C8_5$	0.93	0.74	14.85	16.45	13.88	15.88	10.94
$C8_6$	0.00						
$C8_7$	0.18	0.21	8.11	8.76	7.24	8.71	5.75
$C8_8$	0.20	0.26	10.12	15.73	10.34	11.55	8.46
$C8_9$	0.72	0.53	13.77	11.68	13.35	9.63	8.71
$C8_{10}$	0.72	0.63	15.65	20.58	12.26	17.88	9.68
$C20_1$	0.00						
$C20_2$	0.31	0.38	10.68	10.95	6.57	7.26	4.38
$C20_3$	0.36	0.33	7.69	7.19	4.61	3.11	2.68
$C20_4$	0.47	0.68	10.33	13.32	8.57	9.79	5.42
$C20_5$	0.68	0.70	22.67	28.31	20.51	23.63	14.14
$C20_6$	0.00						
$C20_7$	0.27	0.41	7.63	11.05	4.62	7.16	3.53
$C20_8$	0.41	0.38	11.72	13.07	8.57	6.99	4.93
$C20_9$	0.50	0.48	14.08	14.08	12.37	12.26	7.84
$C20_{10}$	0.55	0.49	23.26	23.00	19.72	20.07	11.87
$C30_6$	0.00						
$C30_7$	0.32	0.00	6.09	0.00	1.88	3.72	3.65
$C30_8$	0.42	0.36	11.05	9.82	10.11	9.29	6.39
$C30_9$	0.53	0.54	15.94	13.91	12.65	13.64	7.60
$C30_{10}$	0.62	0.56	20.86	19.08	17.06	19.68	12.10

Her bir kesilmiş betonarme donatısından (L1 ve L7) hesaplanan ortalama kesit kayıpları ve karşılık gelen ortalama çatlak genişlikleri arasındaki ilişkiler ise sırasıyla Şekil 4.14 ve 4.15 verilmiştir.



Şekil 4. 14: C8 betonarme kolonları için ΔA_s'ye karşılık gelen birincil çatlak genişlik değerleri.



Şekil 4. 15: C20 ve C30 betonarme betonarme kolonları için ΔA_s'ye karşılık gelen birincil çatlak genişlik değerleri.

Şekil 4.14 ve 4.15'te ortalama korozyon oranları ve karşılık gelen birincil çatlak genişlikleri arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur. Bu ilişki C8 betonarme kolonlarında betonun çekme dayanıma bağlı olarak diğer beton sınıflarına göre biraz daha düşük seviyelerde yer almaktadır. Doğrusal regresyon analizi sonucunda C8 betonarme ve C20-C30 betonarme donatılarının ortalama kesit alanındaki kaybı çatlak genişliğine bağlı olarak tahmin etmek için geliştirilen ampirik modeller aşağıda verildiği şeklindedir.

C8 için;

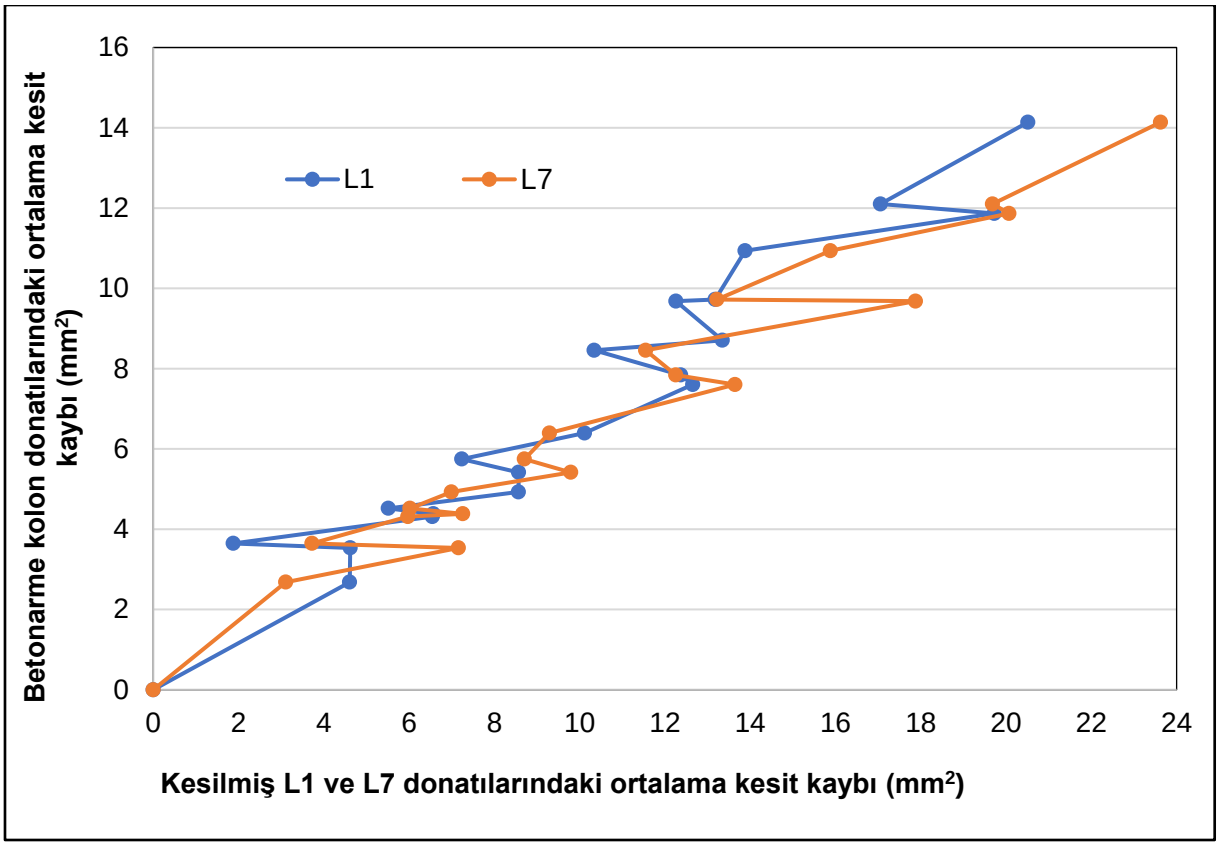
$$\Delta A_{si} = \frac{W_{cr}}{-0.0079 + 0.19 \times W_{cr} - 0.17 \times W_{cr}^2} \tag{4.12}$$

C20 ve C30 için;

$$\Delta A_{sj} = \frac{W_{cr}}{-0.046 \times W_{cr} + 0.058} \tag{4.13}$$

Denklem 4.12 ve 4.13'te değerlendirilmesi yapılacak betonarme binası için mühendisin kolon boyuna paralel yönde ve farklı noktalar için çatlak genişliklerini okuması ve elde ettiği değerlerin ortalamasını alması gerekmektedir. Elde edeceği ortalama çatlak genişliği sonucunda söz konusu çatlağa karşılık gelen ortalama korozyon oranı %97 seviyelerinde tahmin edilebilmektedir. Ancak Tablo 4.7'de gösterildiği üzere; kesilmiş betonarme donatıları olan L1 ve L7'deki gerçek korozyon oranları betonarme kolonlarındaki ortalama korozyon oranlarından fazladır. Bunun sebebi çok basit bir ifade ile kesilen donatının birim uzunluğuna düşen korozyon oranından dolayıdır. Betonarme kolonlarındaki ortalama korozyon oranın tersinir yükleme etkisindeki yapısal davranışa yansıtılabilmesi için; çatlak genişliğine bağlı olarak elde edilen korozyon oranının ortalama korozyon oranları ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Şekil 4.16'da gösterildiği üzere, hassas ve dikkatli deneysel çalışma sonucunda; kesilmiş donatılardan elde edilen ortalama korozyon oranı ile betonarme kolonundaki ortalama korozyon oranları arasında %96 oranında ilişki bulunmuştur. Çatlak genişliğine bağlı olarak betonarme kolon donatılarındaki ortalama korozyon oranını tahmin etmek için geliştirilen ampirik model Denklem 4.14 sunulduğu gibidir.

$$\Delta A_s\ kolon = 0.55 \times \Delta A_{si,j} + 0.04 \tag{4.14}$$



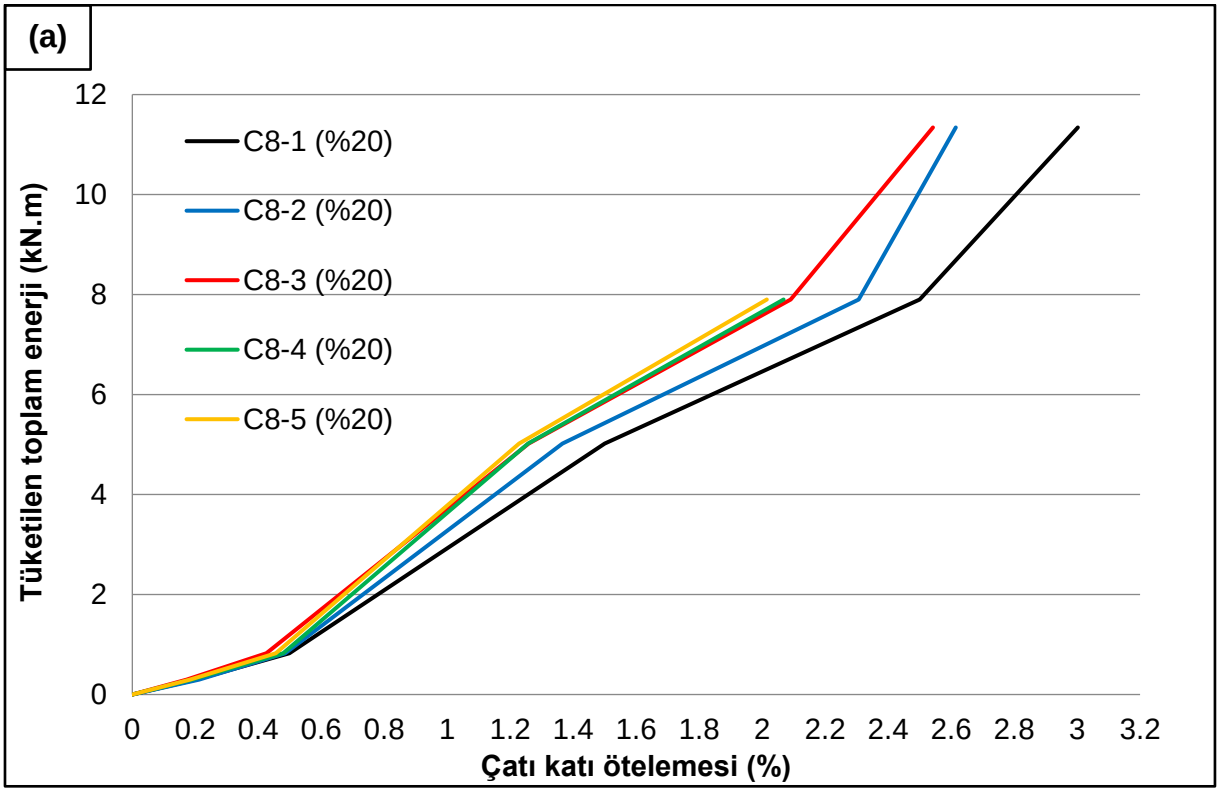
Şekil 4. 16: Betonarme kolon donatılarındaki ortalama kesit kaybına karşılık gelen kesilmiş donatılardaki ortalama kesit kaybı.

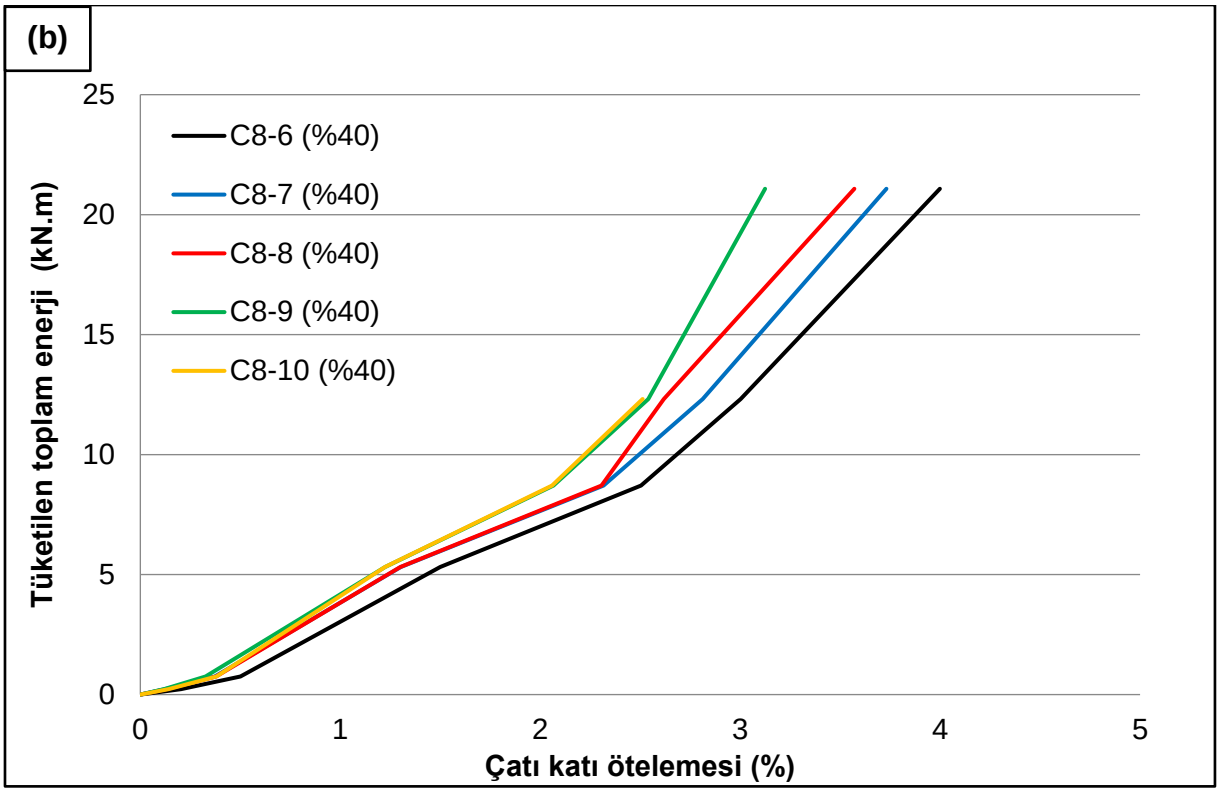
Çalışma kapsamında elde edilen ortalama korozyon oranları korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının sismik performanslarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bunun için Vision 2000 (1995) göre tanımlanan çatı katı öteleme sınır ve hasar seviyeleri göz önüne alınmıştır.

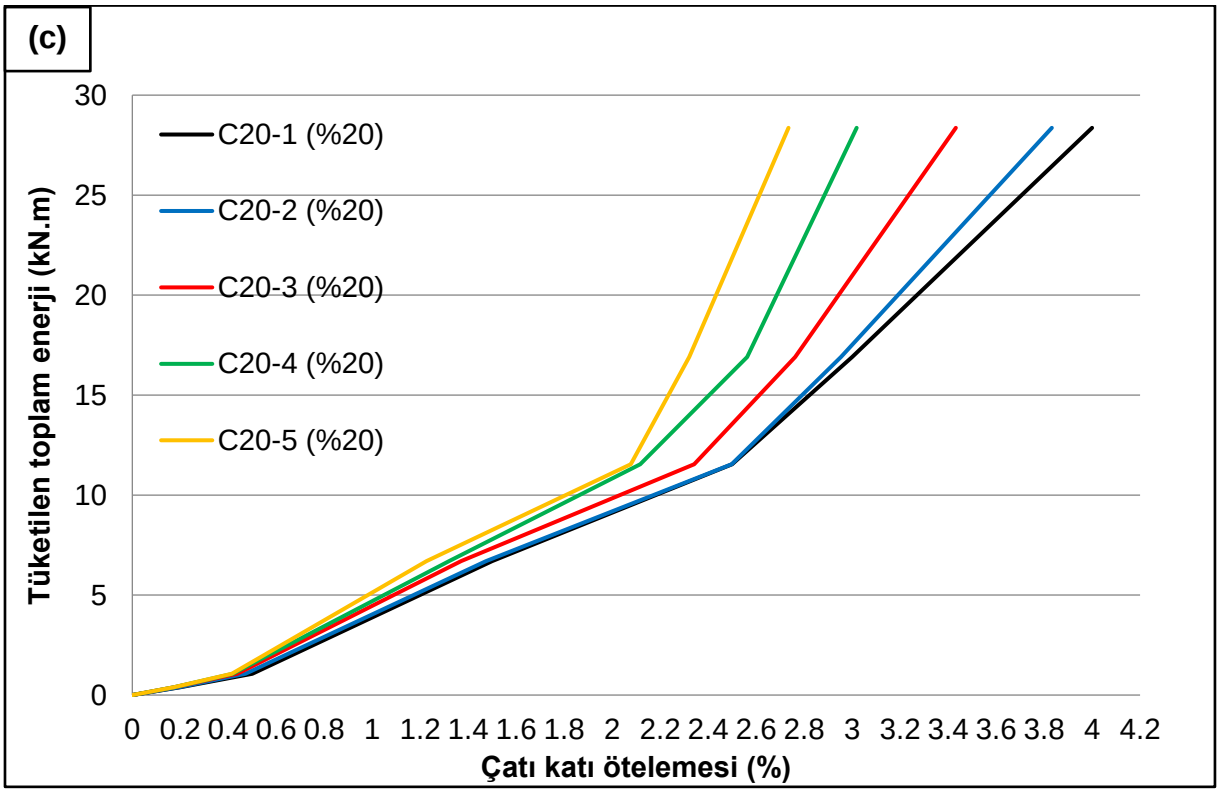
Tablo 4. 8: Vision 2000 performans seviyeleri ve karşılık gelen hasar durumları (Vision 2000, 1995).

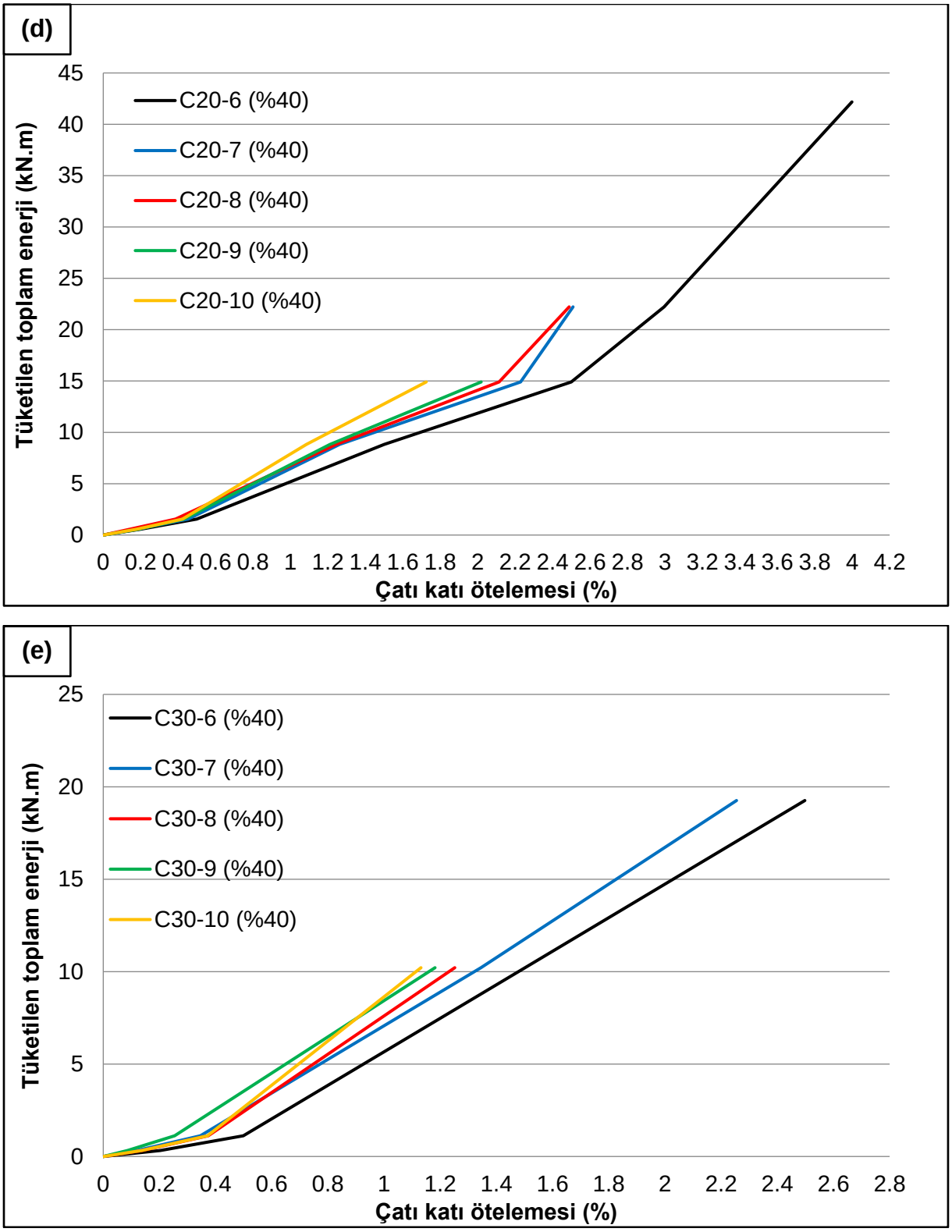
Performans Düzeyleri	Hasar Durumları	Ötelenme (%)
Hemen Kullanım (IO)	Hasar yok.	<0.2
Sınırlı Hasar (O)	Yapıda çoğu işlem ve fonksiyon hemen devam edebilir. Yapı oturma için güvenlidir. Temel işlemler korunur, temel olmayan işlemler bozulabilir. Zorunlu olmayan bazı hizmetleri geri getirmek için onarım gerekir. Hasar hafiftir.	<0.5
Can Güvenliği (LS)	Hasar orta seviyededir, ancak yapı sabit kalır. Seçilen bina sistemleri, özellikler veya içerikler hasardan korunabilir. Onarım mümkündür.	<1.5
Göçme Öncesi (CP)	Hasar ciddi seviyededir, ancak yapısal göçme önlenmiştir. Yapısal olmayan elemanlar göçebilir.	<2.5
Göçme (C)	-	>2.5

Betonarme kolonlarının sismik performans seviyelerinin karşılaştırılabilmesi için enerji baslı yöntem kullanılmıştır. İlk aşamada, referans betonarme kolonlarının ($C8_1$, $C8_6$, $C20_1$, $C20_6$, $C30_1$, $C30_6$) beş adet çatı katı ötelemesi (%0.2, %0.5, %1.5, %1.5, %2.5) seviyelerindeki tükettikleri toplam enerji kapasiteleri histerik döngülerden hesaplanmıştır. Referans kolonun göz önüne alınan çatı katı ötelemesinde tükettiği enerji hesaplanarak; paslanmış betonarme kolonun tüketilen aynı enerji kapasitesi için çatı katı ötelemesi histerik döngüden pozitif veya negatif yükleme olduğuna bakılmaksızın işaretlenmiştir. Her bir betonarme kolonun eşit enerji tüketimine karşı gelen çatı katı ötelemeleri Şekil 4.17'de gösterildiği gibidir.




(b)
Tüketilen toplam enerji (kN.m)
25
20
15
10
5
0
C8-6 (%40)
C8-7 (%40)
C8-8 (%40)
C8-9 (%40)
C8-10 (%40)
0
1
2
3
4
5
Çatı katı ötelemesi (%)


(c)
Tüketilen toplam enerji (kN.m)
30
25
20
15
10
5
0
C20-1 (%20)
C20-2 (%20)
C20-3 (%20)
C20-4 (%20)
C20-5 (%20)
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4 2.6 2.8 3 3.2 3.4 3.6 3.8 4 4.2
Çatı katı ötelemesi (%)



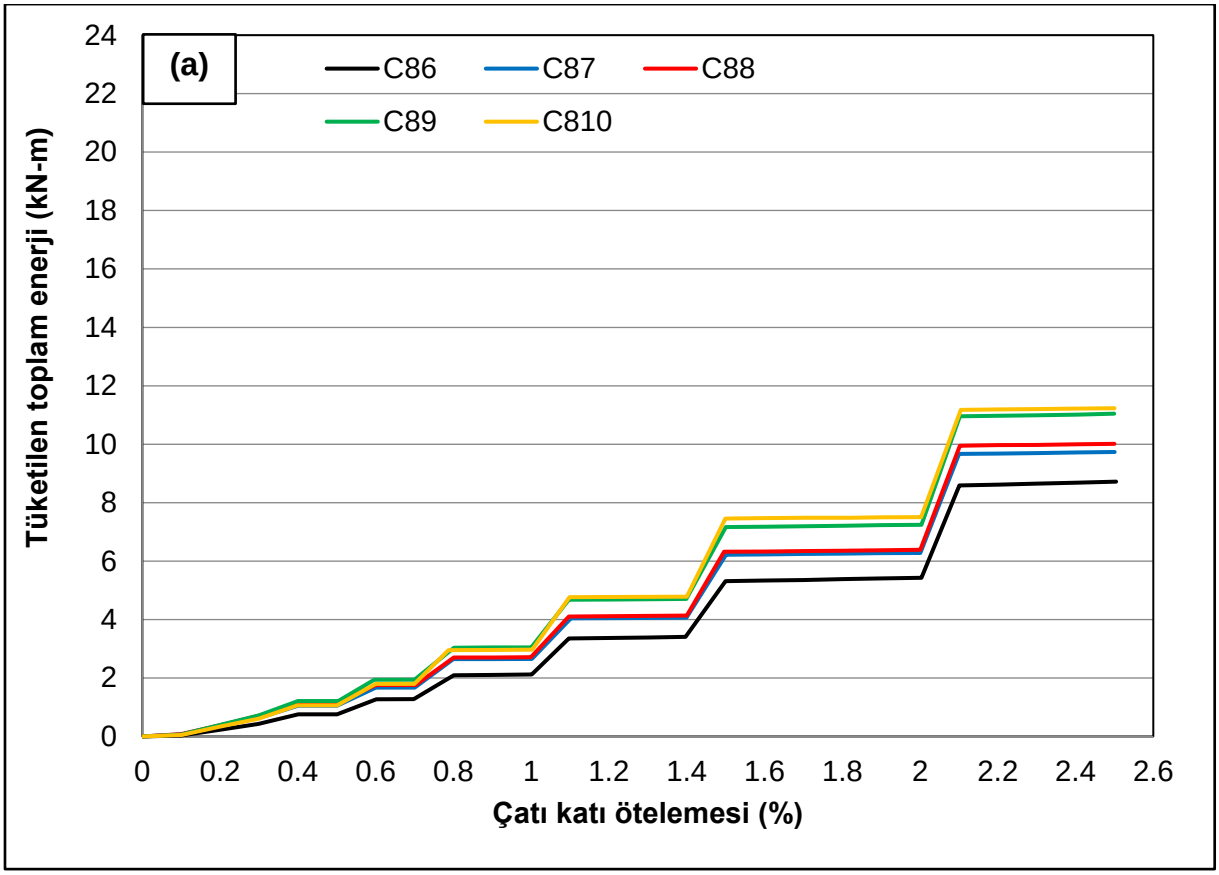
Şekil 4. 17: Eşit enerji tüketimine karşı gelen çatı katı ötelenmeleri: (a) C8-%20; (b) C8-%40; (c) C20-%20; (d) C20-%40; (e) C30-%40.

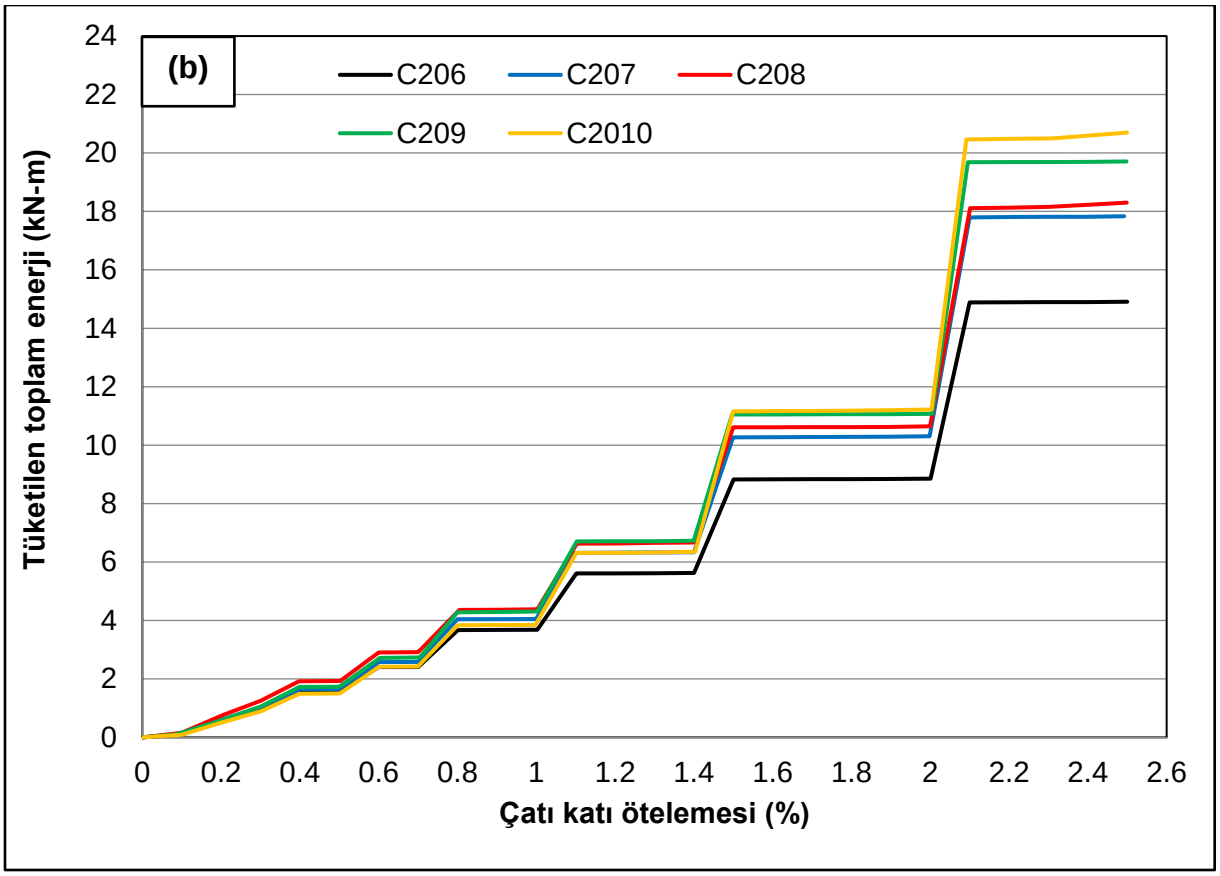
Şekil 4.17'de gösterildiği üzere aynı enerji tüketiminde paslanmış betonarme kolonlarının çatı katı ötelenmesi azalmaktadır. Diğer bir ifade ile, paslanmış betonarme kolonları paslanmamış betonarme referans kolonlarının yapmış olduğu yerdeğiştirmeye ulaşabilmeleri için daha fazla enerji tüketmeleri gerekmektedir. Şekil 4.17 (e)'de $C30_1$ betonarme kolonun

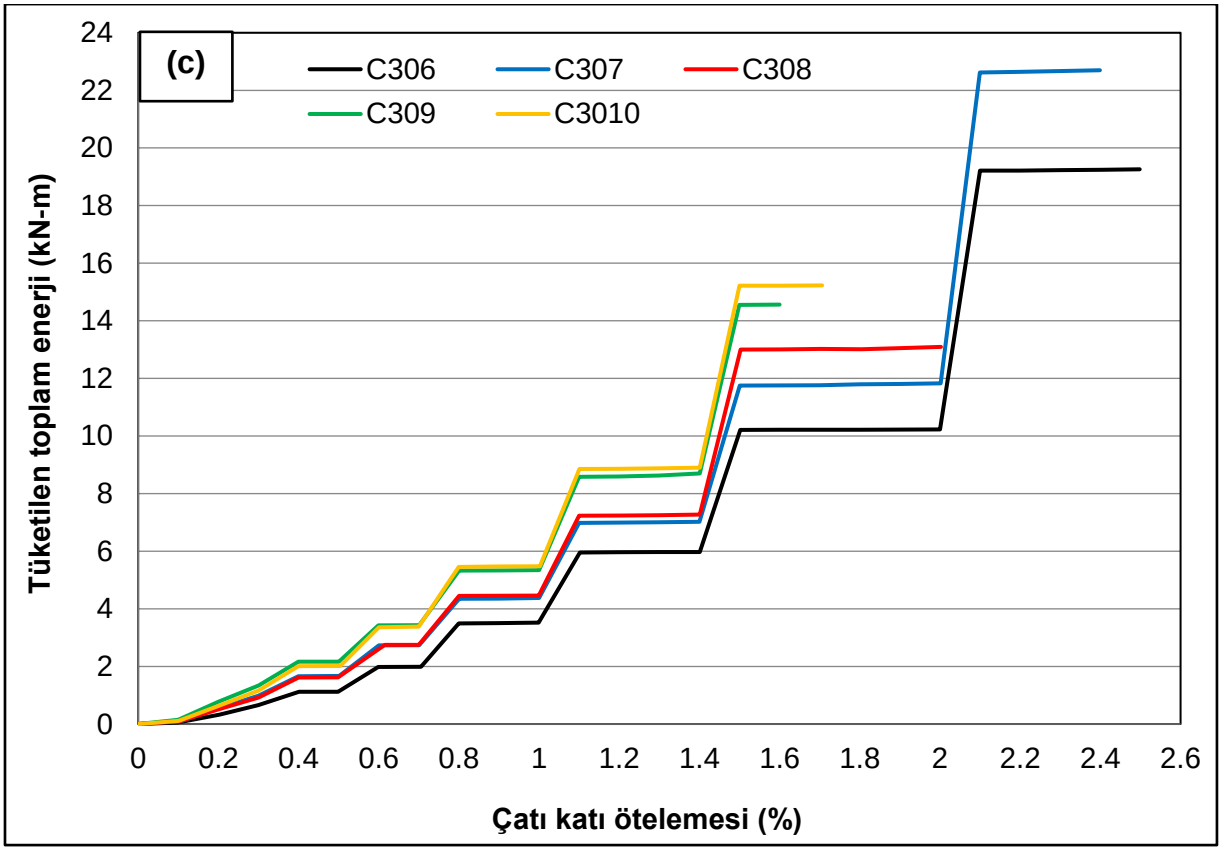
%1.5 çatı katı ötelemesinde tükettiği toplam enerji 10.21 kN.m'dir. Tüketilen eşit enerjide; korozyon oranının artması ile birlikte, $C30_2$, $C30_3$, $C30_4$ ve $C30_5$ çatı katı ötelemeleri sırasıyla %1.35, %1.25, %1.18 ve 1.13% olarak azalmıştır. Böylelikle; paslanmış betonarme kolonları $C30_1$ betonarme kolunun sahip olduğu çatı katı ötelemesine ulaşabilmesi için prematüre olarak enerjilerini daha düşük çatı katı öteleme seviyelerinde tüketmiştir.

Mevcut çalışmada en yüksek pas oranına sahip olan $C20_5$-L7 betonarme donatısındaki kesit alanındaki kayıp 23.63 mm^2'dir. Böylelikle $C20_5$-L7 betonarme donatısının çapı 16 mm'den 15.03 mm'ye düşmüştür. Betonarme kolonlarındaki donatılardaki toplam kesit alanındaki azalmanın ihmal edilmesi durumunda ve $C20_5$-L7 betonarme donatısının çap azalmasındaki düşük seviye göz önüne alındığında; korozyondan dolayı oluşan birincil çatlakların yapısal performans üzerine etkisinin daha etkin ve belirgin olduğunu rahatlıkla söylenebilir.

Birincil korozyon çatlak genişliklerine bağlı olarak korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının sismik performansların hasarsız bir yöntem ile tahmin edilmesi için; deneye tabi tutulan betonarme kolonlarının 0.1 aralıklar ile; %0 çatı katı ötelemesinden %2.5 çatı katı ötelemesine kadar tükettikleri toplam enerjiler hesaplanmıştır. Betonarme kolonlarının her bir çatı katı ötelemesine karşı hesaplanan tükettikleri toplam enerjiler Şekil 4.18'de gösterildiği gibidir.

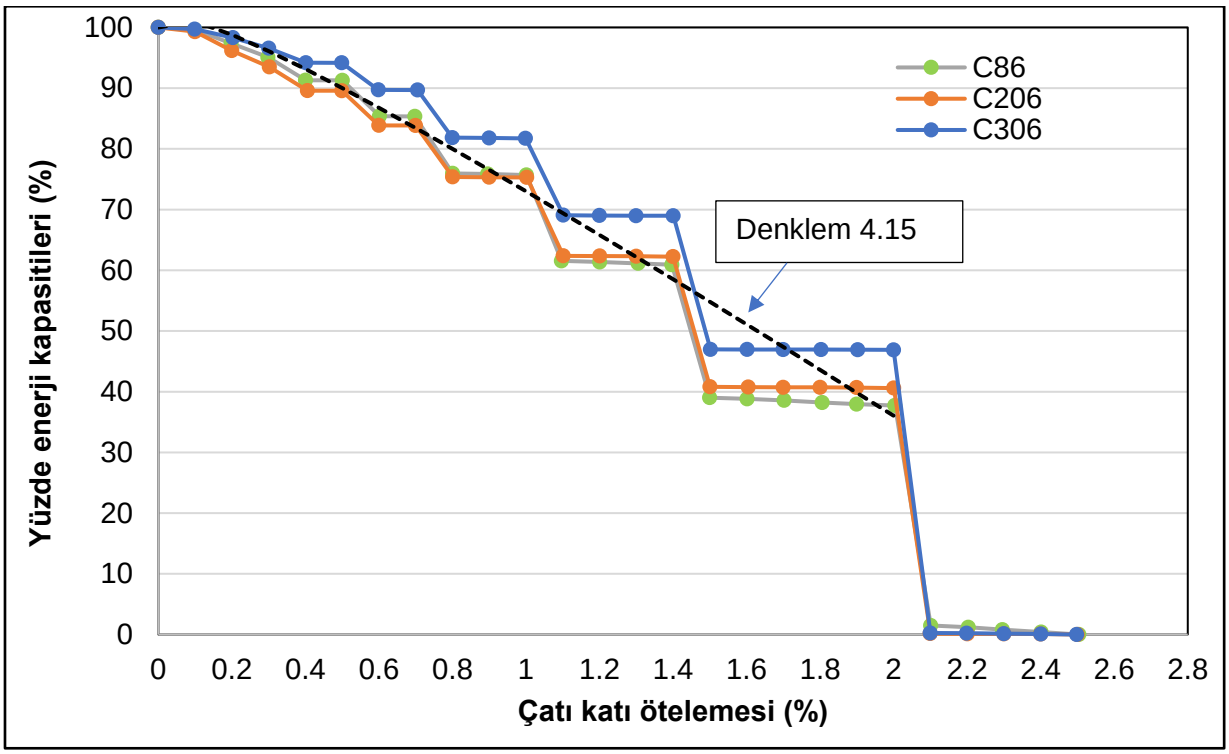






Şekil 4. 18: Çatı katı ötelemesine karşı tüketilen toplam enerji: (a) C8, (b) C20 ve C30.

Şekil 4.19'da passız betonarme kolonlarının 0.40 eksenel yük etkisi altında %2.5 çatı katı ötelemesine göre yüzde enerji kapasiteleri gösterilmektedir.

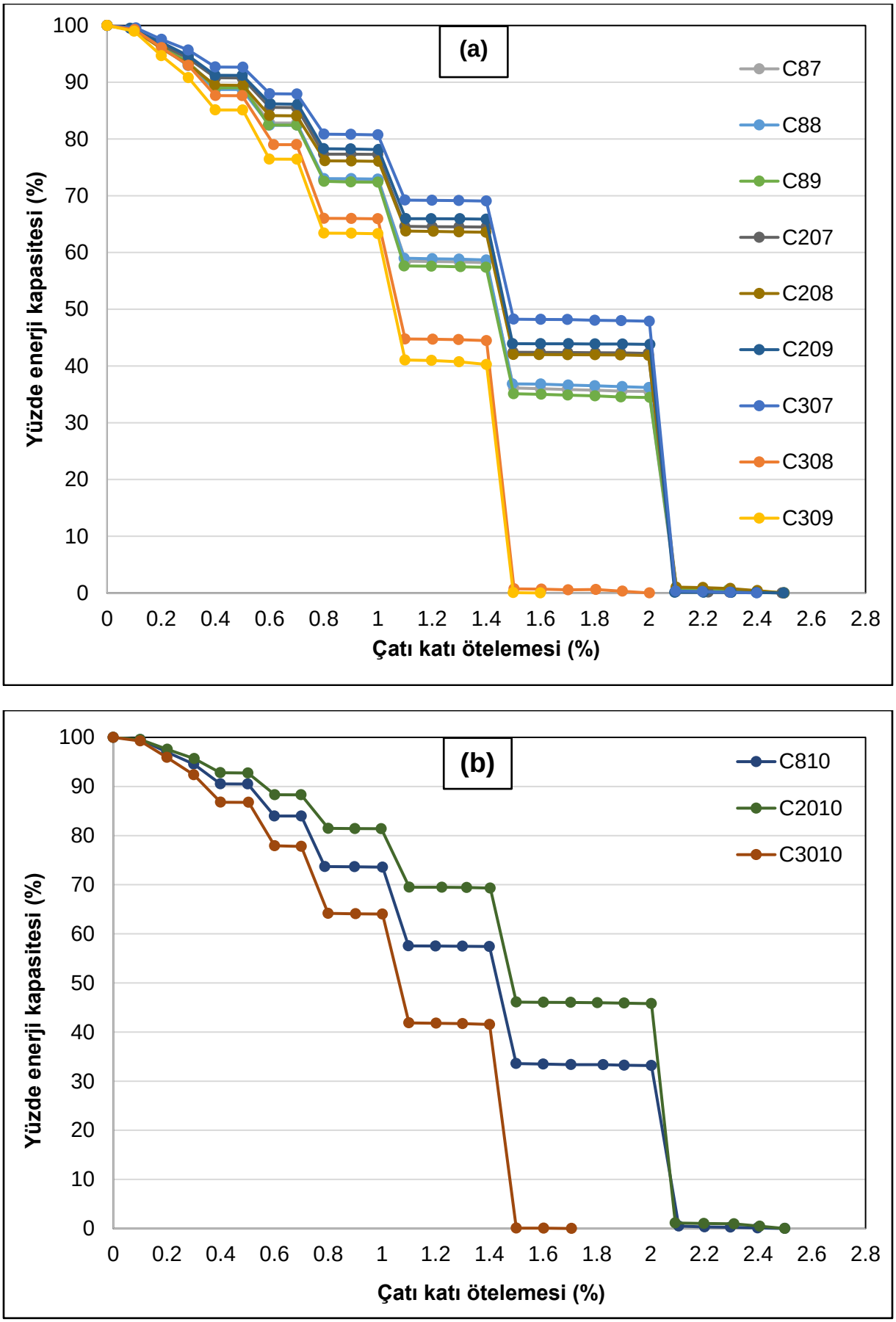


Şekil 4. 19: Passız betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasiteleri: (a) C8, (b) C20 ve C30.

Şekil 4.19'da gösterildiği üzere, paslanmamış betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasiteleri çatı katı ötelemesinin artması ile azalmaktadır. Paslanmamış betonarme kolonlarının her bir çatı katı ötelemesine karşılık gereken yüzde enerji kapasiteleri birbirine eşit değerler almaktadır. Şekil 4.19'da gösterildiği üzere; %2 çatı katı ötelemesi önemli bir yere sahip olup; %2 çatı katı ötelemesinden sonra her bir betonarme sınıfında yer alan betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasiteleri 0'a yakın değerler almaktadır. Paslanmamış betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasitelerini plastik deformasyonun bir fonksiyonu olacak şekilde tahmin etmek için bir ampirik model geliştirilmiş olup Denklem 4.15'te sunulmuştur.

$$\text{Eğer } \delta \leq 2\% \; ; E_{paslanmamış\ kolon}\ (\%) = 100 - 44 \times \delta + 17 \times \delta^{0.5} \qquad (4.15)$$

Korozyona maruz kalmış her bir betonarme kolonun yüzde enerji kapasiteleri ise Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4. 20: Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının yüzde enerji kapasiteleri: (a) $C8_{7\text{-}9}$, $C20_{7\text{-}9}$, $C30_{6\text{-}9}$, (b) $C8_{10}$, $C20_{10}$, $C30_{10}$.

Şekil 4.20(b)'de görüldüğü üzere; korozyonun farklı beton basınç dayanımları üzerine etkisi açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. C20 betonuna göre daha düşük mukavemete sahip C8 betonarme kolonları daha düşük çatı katı ötelemelerinde enerjilerini tüketmektedir. C30 betonarme kolonları Yalciner vd. (2012b) daha önce yapmış oldukları çalışmada belirtildiği gibi, yüksek beton basınç dayanıma sahip betonarme elemanları korozyon ürünün neden olduğu radial basınç etkisi ile birlikte daha gevrek bir davranış sergilemektedir. Şekil 4.20(b)'de C8 ve C20 betonarme kolonları %2 çatı katı ötelemesinden sonra enerji kapasitelerini yitirirken; bu durum C30 betonarme kolonunda %1.4 çatı katı ötelemesinde gerçekleşmektedir. Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının enerji tüketme kapasitelerinin tahmin edilebilmesine olanak sağlanacak modeller Denklem 4.16 ve 4.17 sunulduğu gibidir.

Eğer $\delta \leq 2\%$ ve $9 \leq f_c < 27$;

$$E_{korozyon}\,(\%) = 105 - 35 \times \delta + 0.045 \times f_c - 0.39 \times \Delta A_{sL} \tag{4.16}$$

Eğer $\delta \leq 1.4\%$ ve $f_c > 27$;

$$E_{korozyon}\,(\%) = 115 - 40 \times \delta - 3.28 \times \Delta A_{sL} + 0.17 \times \Delta A_{sL}{}^2 \tag{4.17}$$

Denklem 4.14 yardımı ile ve tahribatsız olarak betonarme kolonundaki ortalama korozyon oranı birinci korozyon çatlak genişliğine bağlı olarak tahmin edilebilir. Ardından yapısal çözümleme sonucunda ve göz önüne alınan yük etkisi altında herhangi bir çatı katı ötelenmesine (δ) bağlı olarak betonarme kolonun sahip olduğu enerji yüzde kapasitesi Denklem 4.15, 4.16 ve 4.17 yardımı ile tahmin edilebilir. Elde edilecek enerji kapasitesi korozyona bağlı olarak paslanmış betonarme kolonlarının sismik performanslarının tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Paslanmış betonarme kolonlarının referans kolonuna göre normalize edilmiş enerji yüzde kapasiteleri hedeflenen çatı katı ötelemesine (δ_t) göre değerlendirilmesi yapılacak olan kolon için sismik performans seviyesini (PS) Denklem 4.18 yardımı ile hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

$$PS, Tablo\ 4.8 = \delta_t \times \frac{hedeflenen\ çatı\ katı\ ötelemesi\ için\ E_{paslanmamış\ kolon}\,(\%)}{hedeflenen\ çatı\ katı\ ötelemesi\ için\ E_{korozyon}\,(\%)} \tag{4.18}$$

4.3. Beton İçerisinde Paslandırılmış Betonarme Donatılarının Mekanik Özellikleri

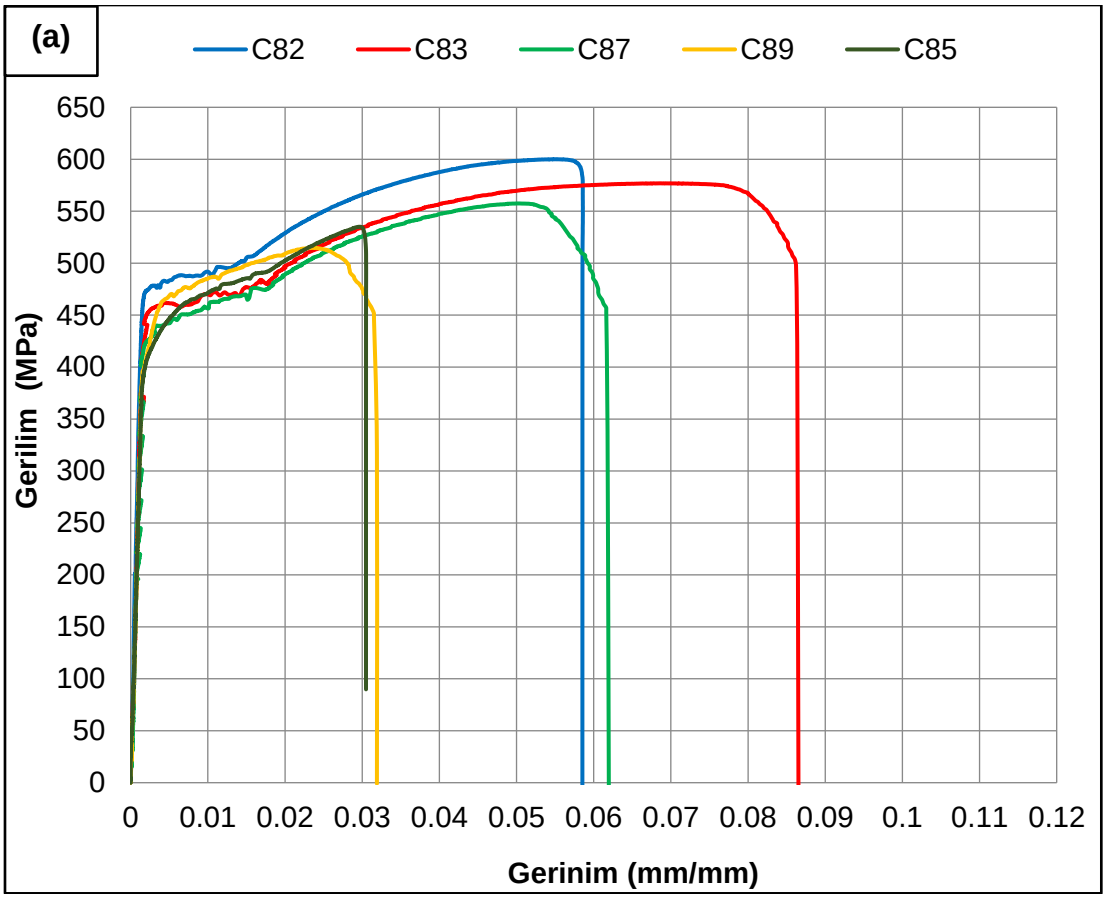
Beton içerisinde paslandırılmış betonarme donatılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için açıklanan Bölüm 3.1.1 bu bölümde geliştirilen modellerin daha rahat anlaşılabilmesi için tekrardan sunulmuştur. Yükleme deneylerinden sonra beton içerisinden çıkartılan ve ardından tartma işlemlerinin tamamlanması ile birlikte; beton içerisinde paslandırılan betonarme donatıları betonarme kolonlarının kiriş bölgelerinden kolon temel yüzeyine doğru uzanan gerinim pullarının yapıştırıldığı (L8 boyuna donatısı) betonarme donatıları çekme deneyleri için belirlenen uzunluklarda kesilmiştir. Çekme deneyleri için kesilen boyuna donatılardaki

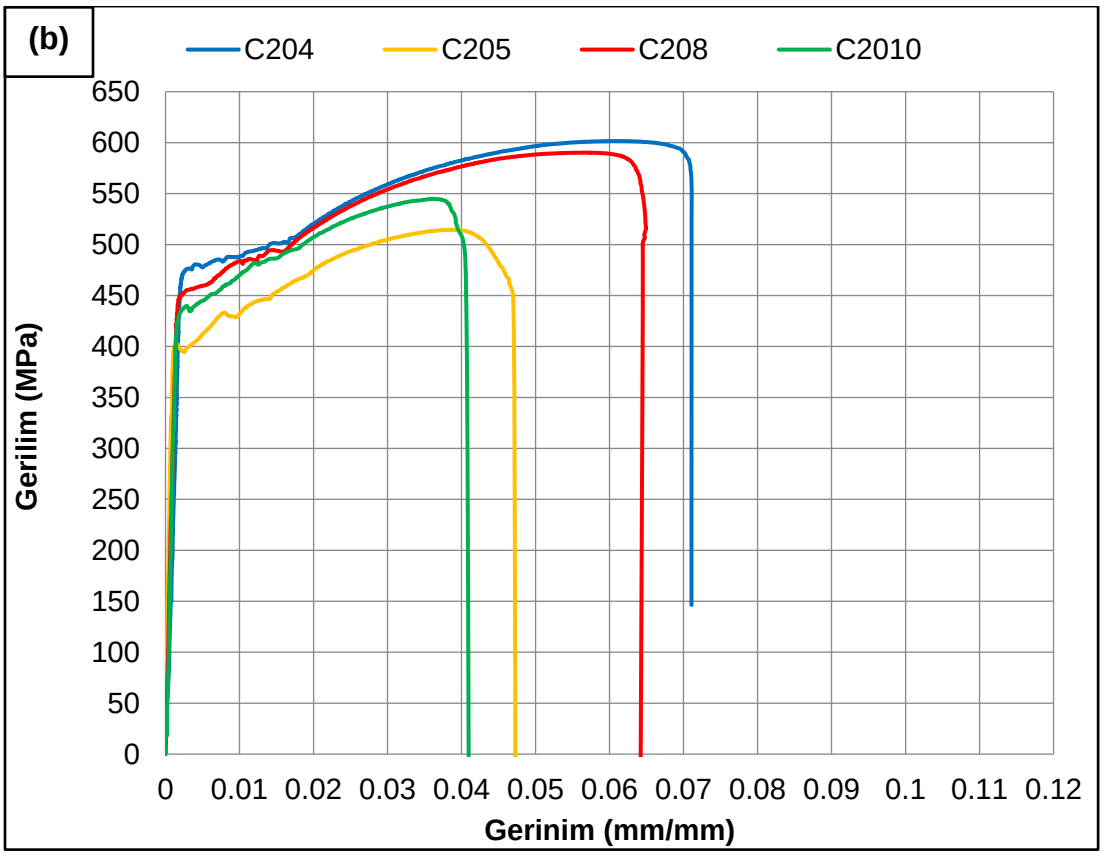
korozyon oranlarının kesilmemiş betonarme donatısındaki korozyon oranına mümkün olduğunca yakın olmasına dikkat edilmiştir. Tablo 4.9'da gösterildiği üzere; kesilen kupon donatılar ile kesilmemiş boyuna donatılarındaki korozyon oranlarının mümkün olduğunca özdeş korozyon oranlarına sahip olmasına dikkat edilerek donatılar kesilmiştir.

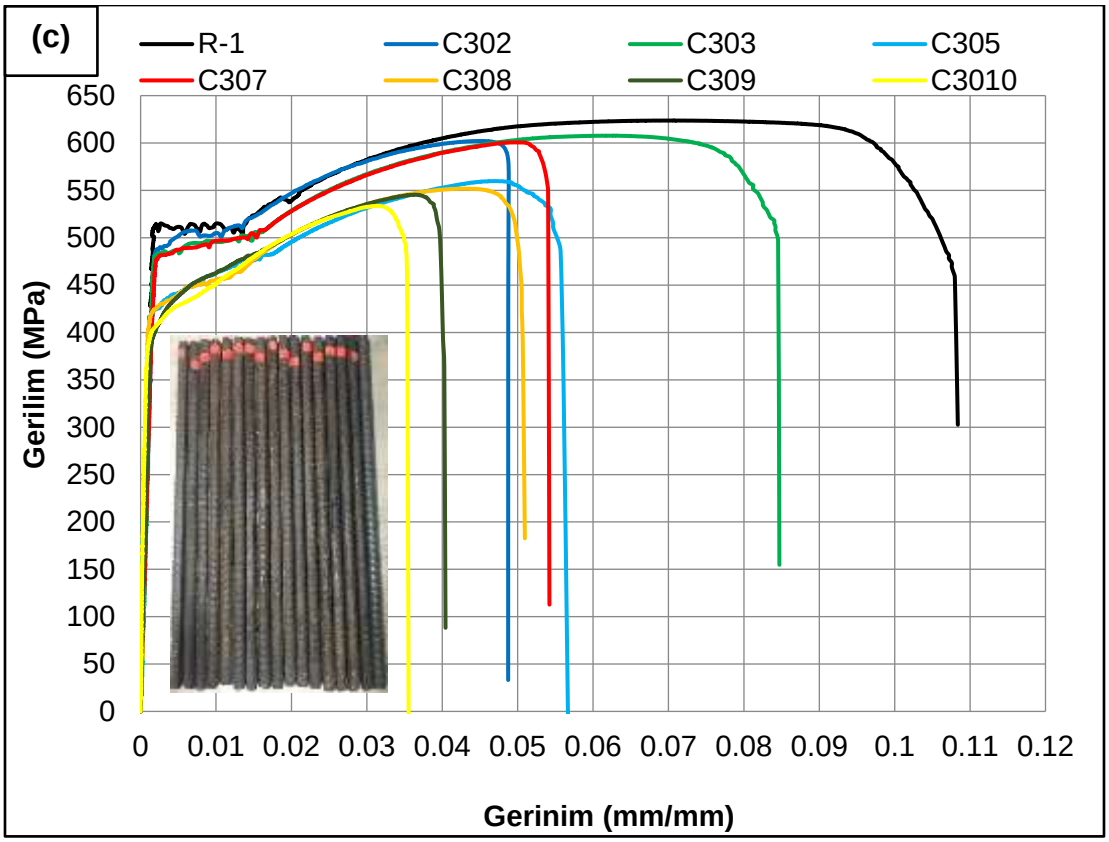
Kesilen paslanmış donatılar ile özdeş uzunluğa sahip kontrol donatıları (paslanmamış aynı uzunluktaki donatılar) korozyon oranlarının tespit edilmesi için kullanılmıştır. Tablo 4.9'da beton içerisinden çıkartılan ve ardından kesilerek korozyon oranları elde edilen betonarme donatılarının gerçek korozyon oranları verilmiştir. Beton içerisinden çıkartılıp ve ardından kesilip tartılarak korozyon oranları elde edilen betonarme donatıları için çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21'de farklı korozyon oranları için elde edilen şekil değiştirme grafiği gösterilmektedir.

Tablo 4. 9: Mekanik donatı özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan betonarme donatılarının gravimetrik değerleri-Beton içerisinde paslandırılan betonarme donatıları.

Numune	**Donatı Çapı (mm)**	W_i **(gr)**	W_f **(gr)**	CL **(%)**	**Kesilmemiş donatının korozyon oranı**	d_b **(mm)**
$C30_2$	16	746.77	736	1.44	1.51	15.879
$C30_7$	16	746.77	733.19	1.82	1.85	15.851
$C8_2$	16	746.77	731.5	2.04	1.99	15.840
$C30_3$	16	746.77	730.2	2.22	2.50	15.799
$C8_3$	16	746.77	728.88	2.40	2.40	15.807
$C8_7$	16	746.77	722.92	3.19	3.13	15.748
$C20_4$	16	746.77	723.45	3.12	3.36	15.729
$C20_8$	16	746.77	721.1	3.44	3.51	15.717
$C30_8$	16	746.77	717.35	3.94	4.03	15.674
$C30_9$	16	746.77	712.9	4.54	4.67	15.622
$C8_9$	16	746.77	704.7	5.63	5.37	15.565
$C30_{10}$	16	746.77	701.55	6.06	6.22	15.495
$C8_5$	16	746.77	696.7	6.70	7.49	15.389
$C30_5$	16	746.77	691.97	7.34	7.16	15.417
$C20_{10}$	16	746.77	684.05	8.40	8.39	15.314
$C20_5$	16	746.77	681.33	8.76	9.09	15.255


(a)
C82
C83
C87
C89
C85
650
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Gerilim (MPa)
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
0.11
0.12
Gerinim (mm/mm)


(b)
C204
C205
C208
C2010
650
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Gerilim (MPa)
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
0.11
0.12
Gerinim (mm/mm)

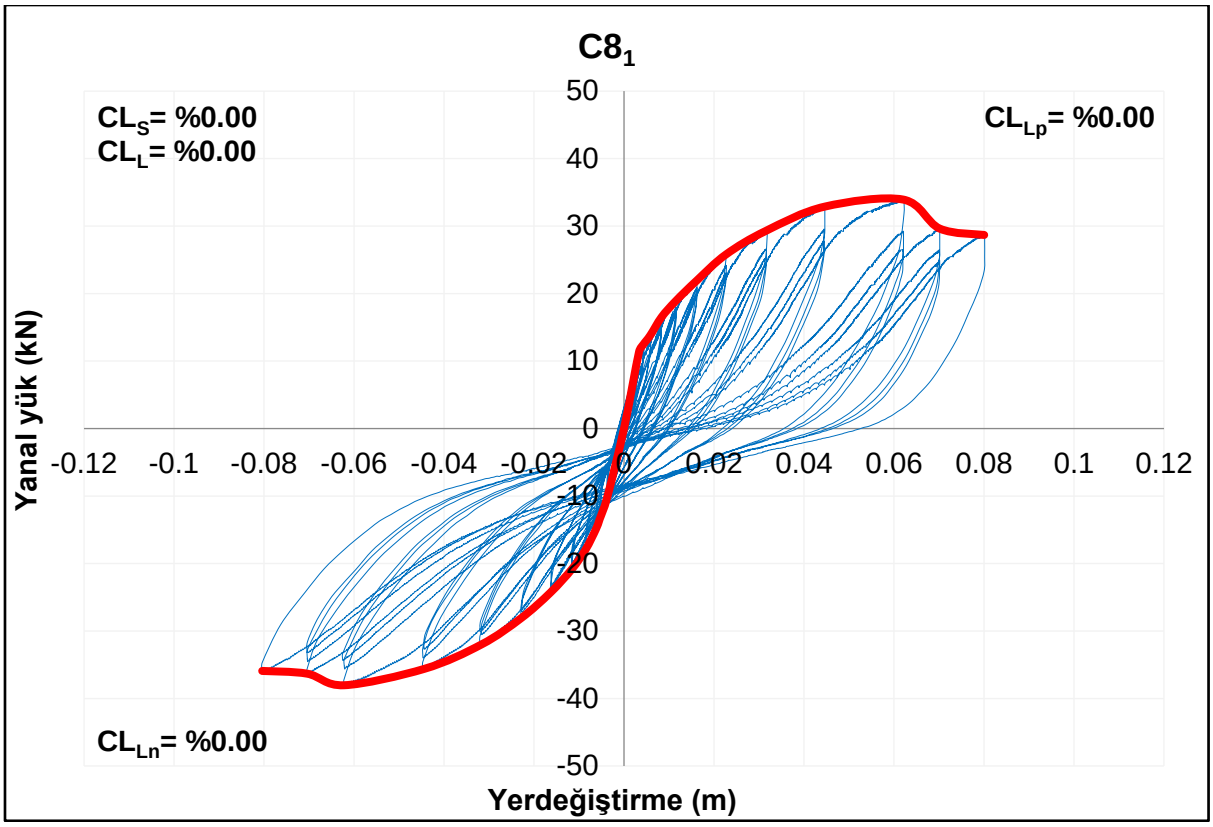


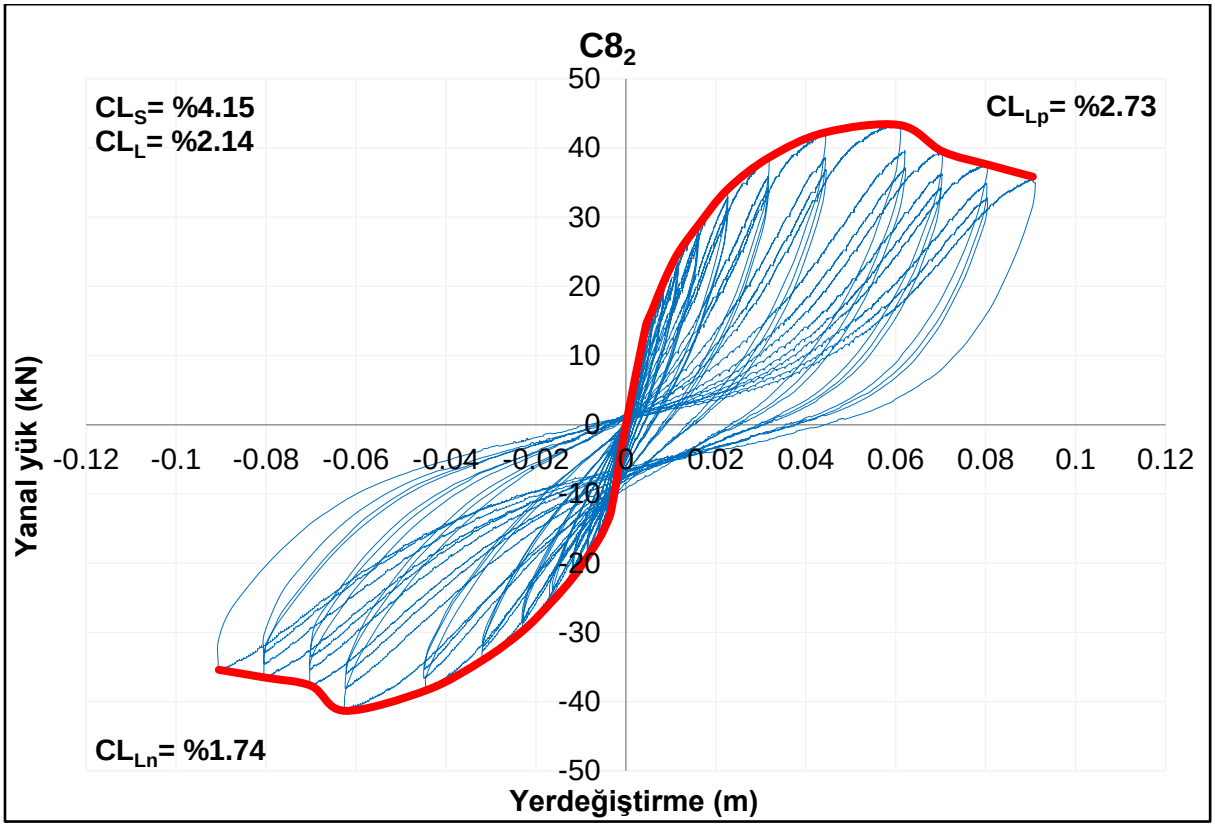
Şekil 4. 21: Betonarme donatılarının mekanik özelikleri: (a) C8 betonarme kolonlarından çıkartılan donatılar (B.K.Ç.D); (b) C20 B.K.Ç.D; (c) C30 B.K.Ç.D.

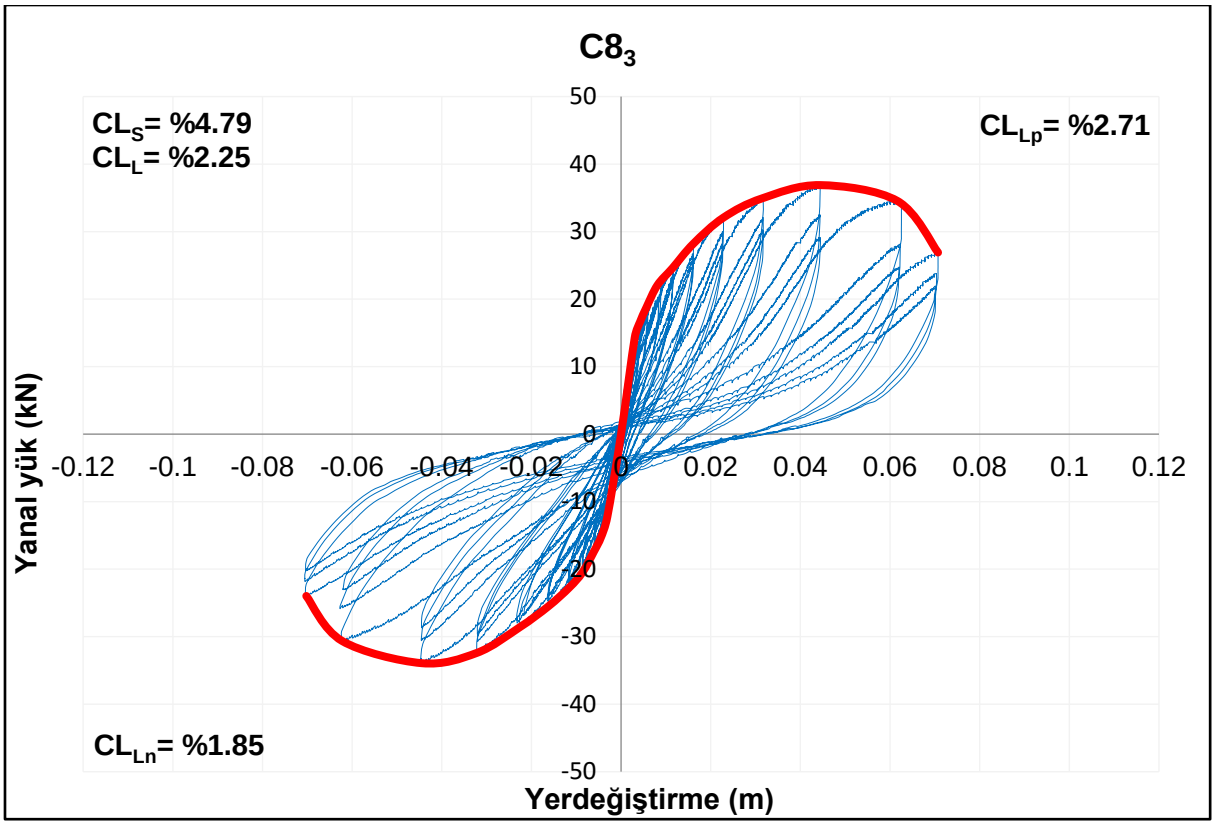
Şekil 4.21'de proje kapsamında aderans-sıyrılma hesaplamaları için beton içerisinde paslandırılan ve betondan kırılarak çıkartılan donatıların mekanik özellikleri hesaplamalarda göz önüne alınmıştır.

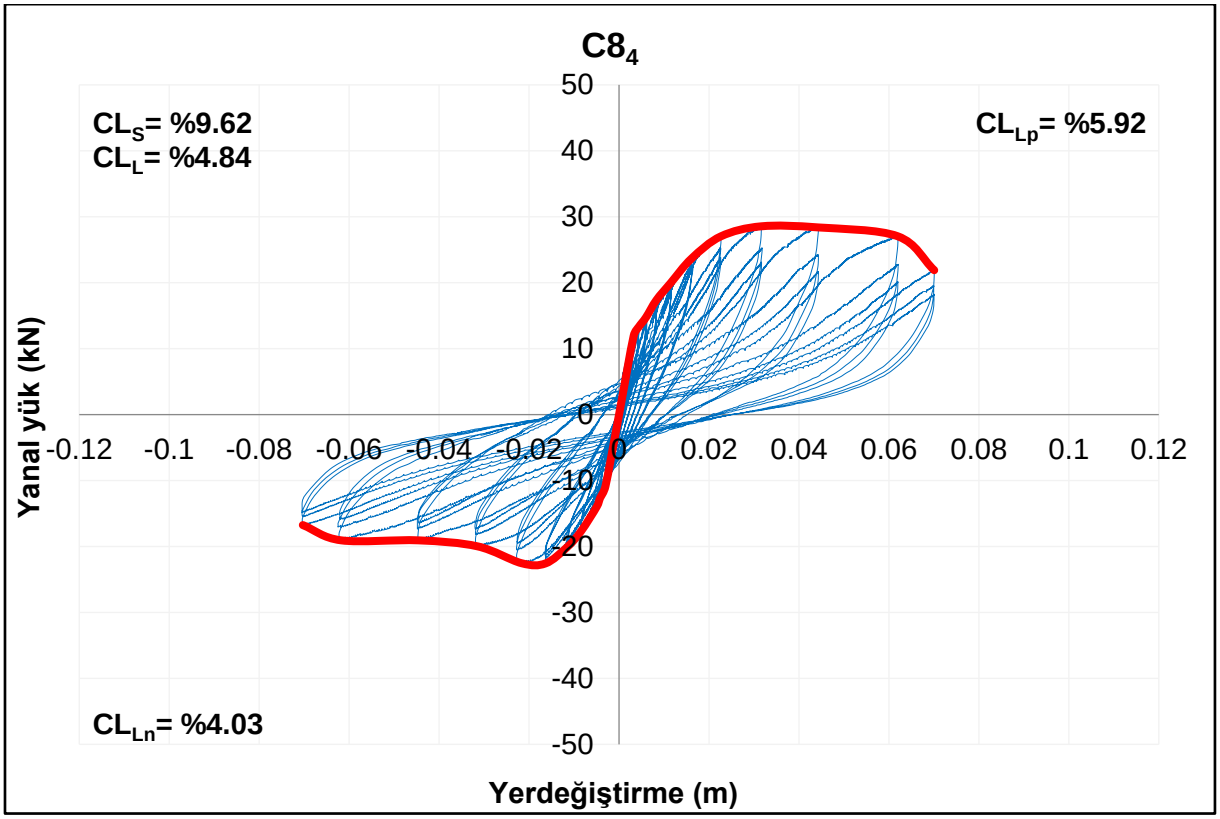
4.4. Yük-Deplasman Sonuçları

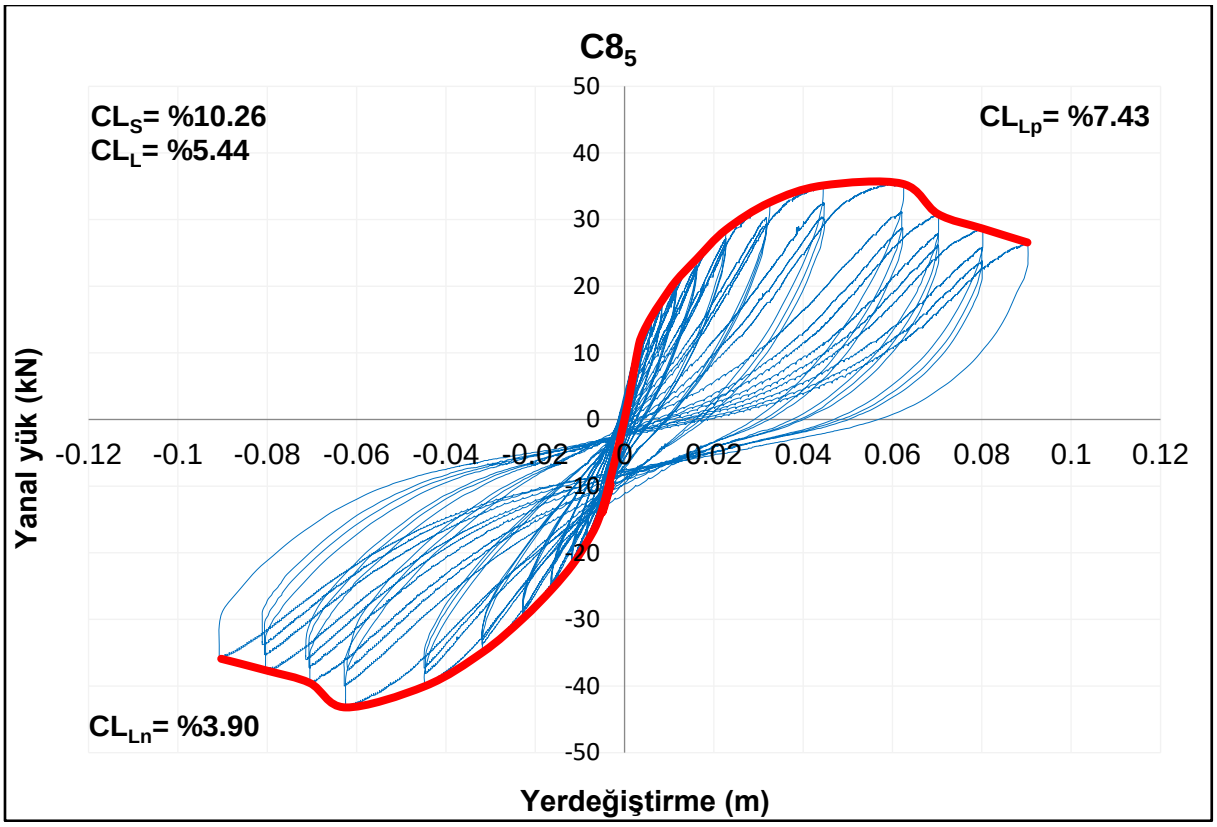
Tersinir artımlı yükleme programından elde edilen betonarme kolonlarının histerik döngü grafikleri her üç betonarme grubundan yer alan betonarme kolonları için Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te sırasıyla verilmiştir.

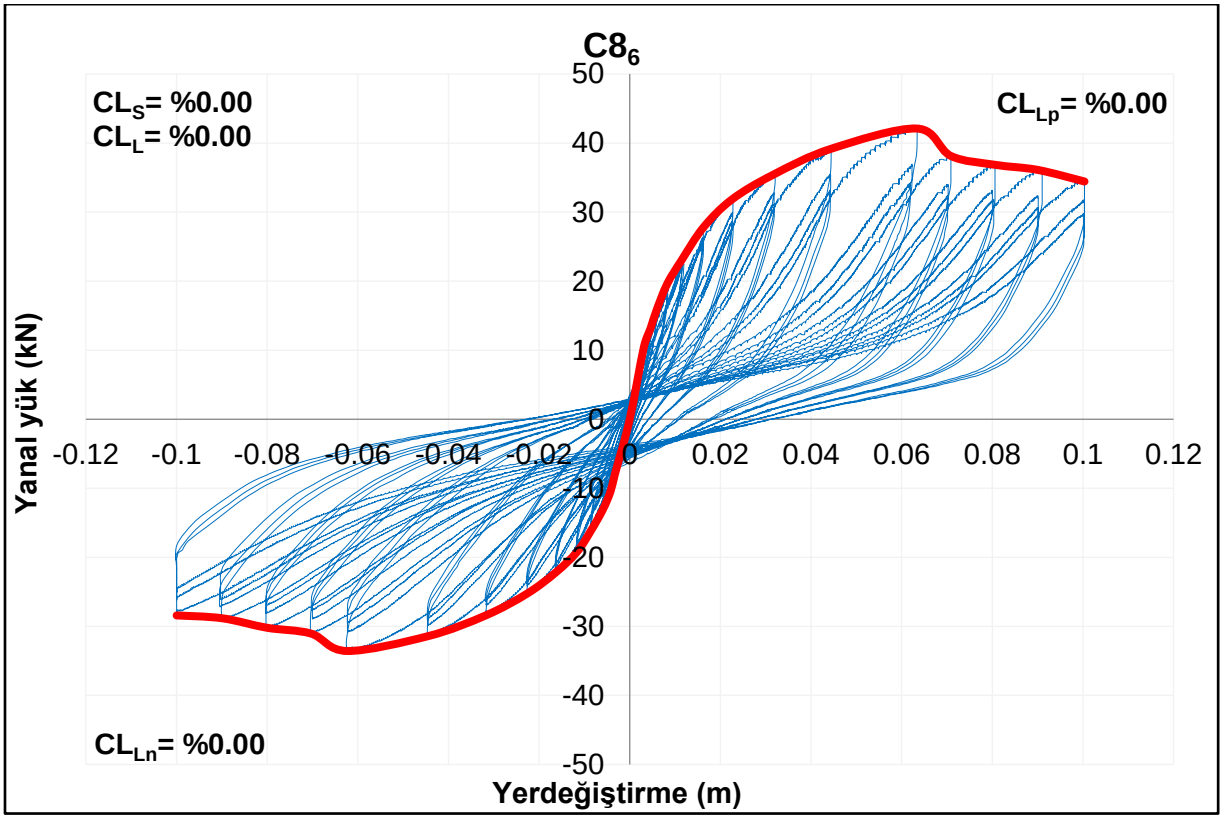

C8$_1$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$= %0.00
CL$_{Ln}$= %0.00
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

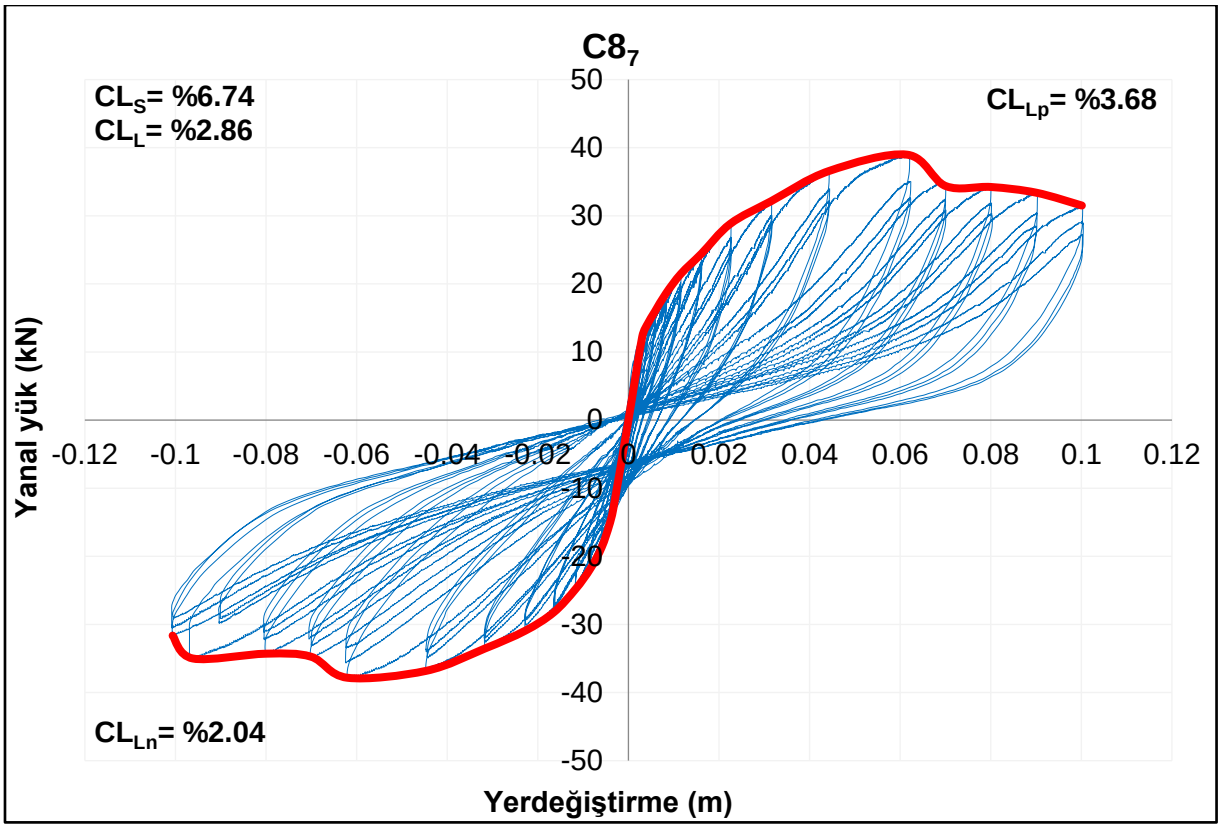

C8$_2$
CL$_S$= %4.15
CL$_L$= %2.14
CL$_{Lp}$= %2.73
CL$_{Ln}$= %1.74
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

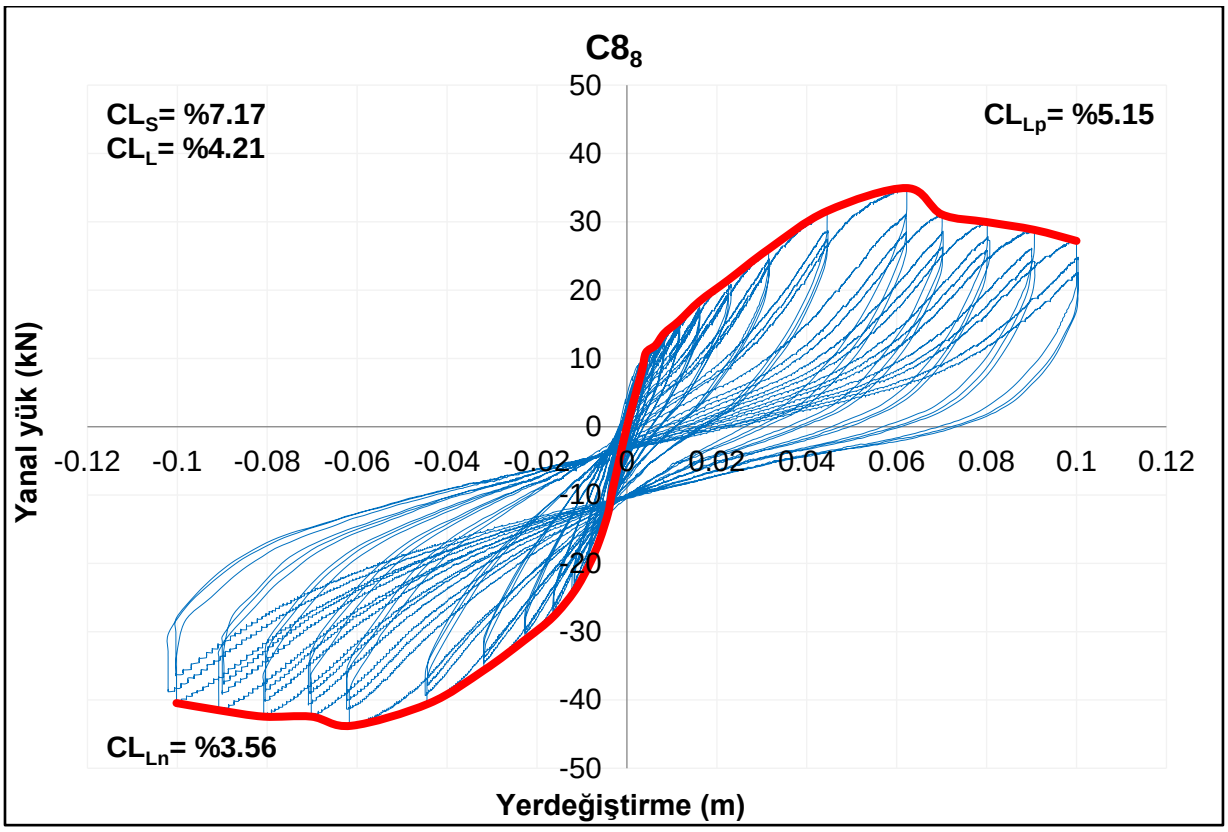

C8$_3$
CL$_S$= %4.79
CL$_L$= %2.25
CL$_{Lp}$= %2.71
CL$_{Ln}$= %1.85
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

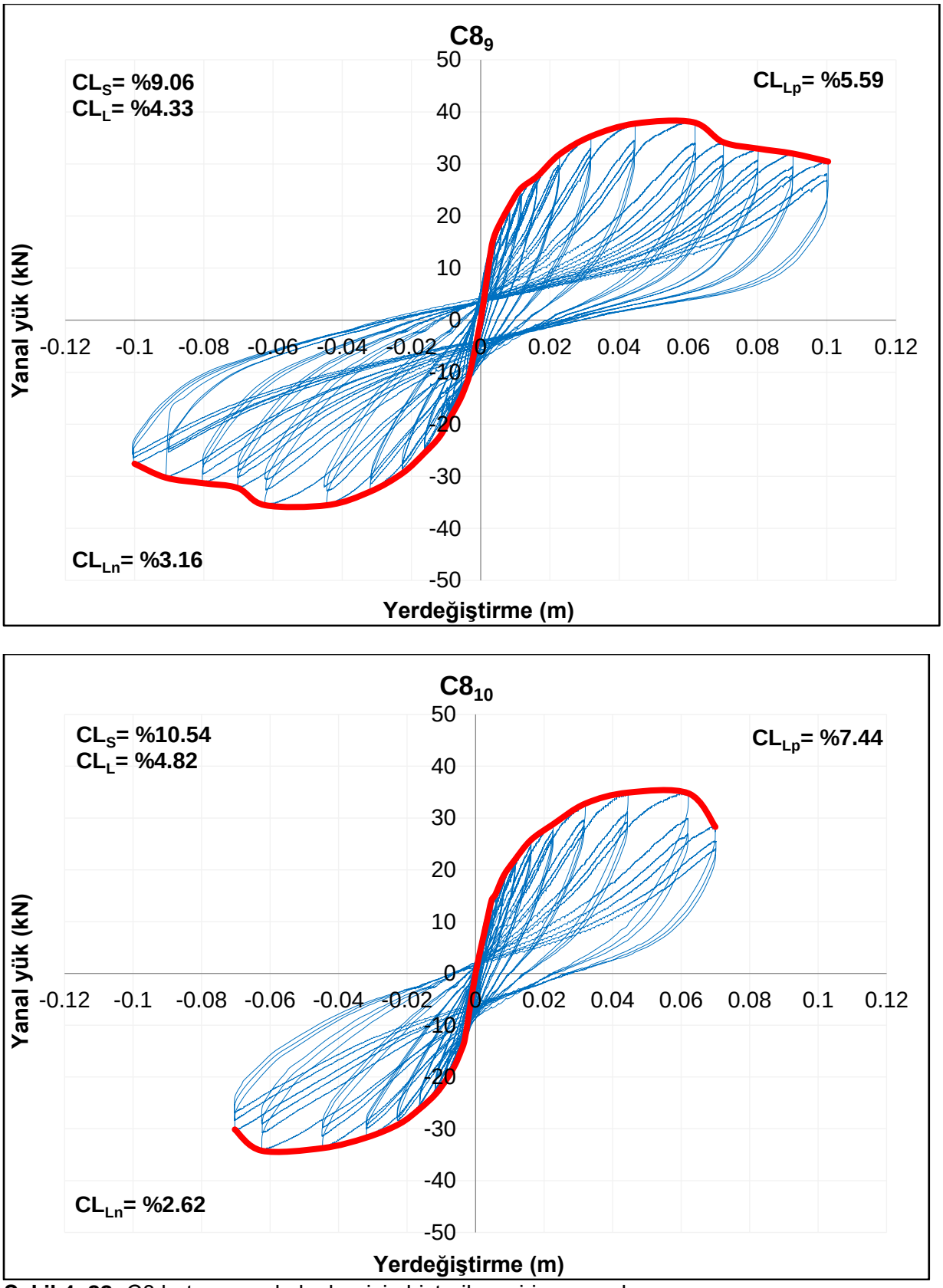

C8$_4$
CL$_S$= %9.62
CL$_L$= %4.84
CL$_{Lp}$= %5.92
CL$_{Ln}$= %4.03
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12


C8$_5$
CL$_S$= %10.26
CL$_L$= %5.44
CL$_{Lp}$= %7.43
CL$_{Ln}$= %3.90
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

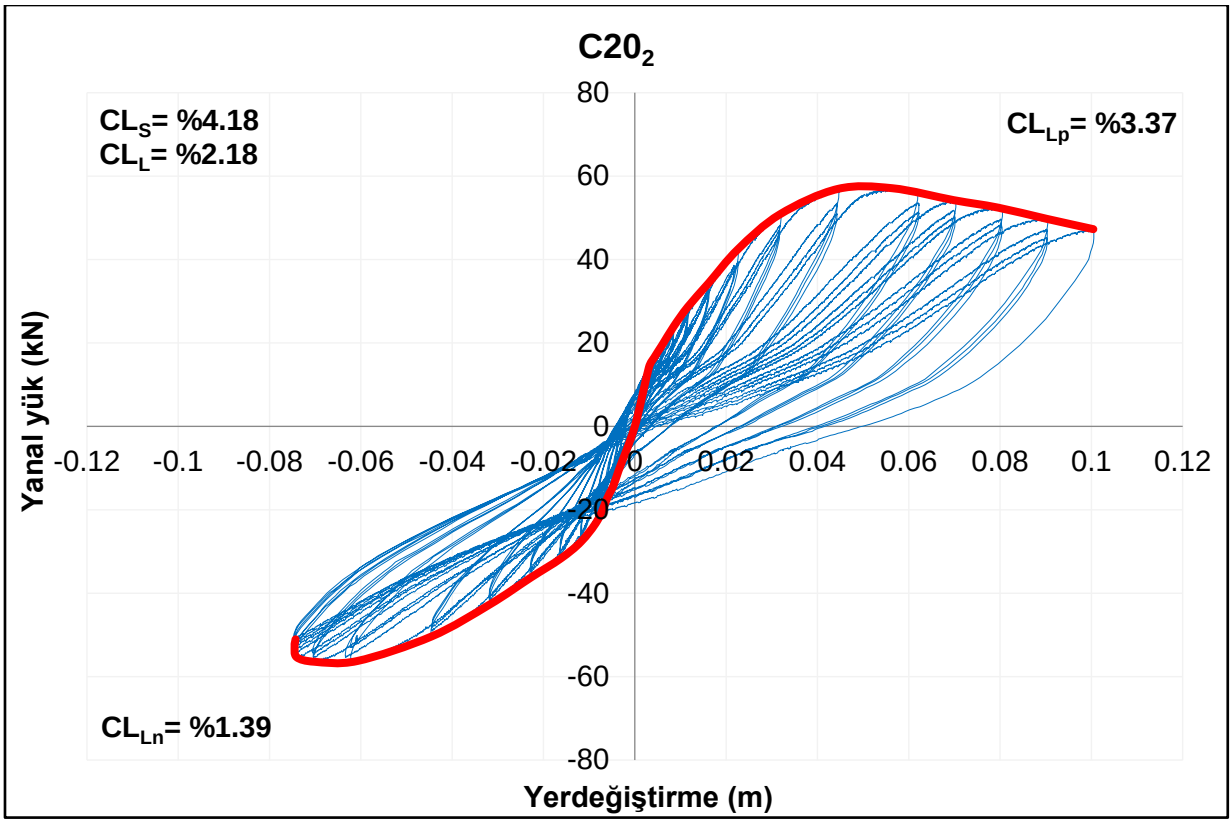

C8$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$= %0.00
CL$_{Ln}$= %0.00
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

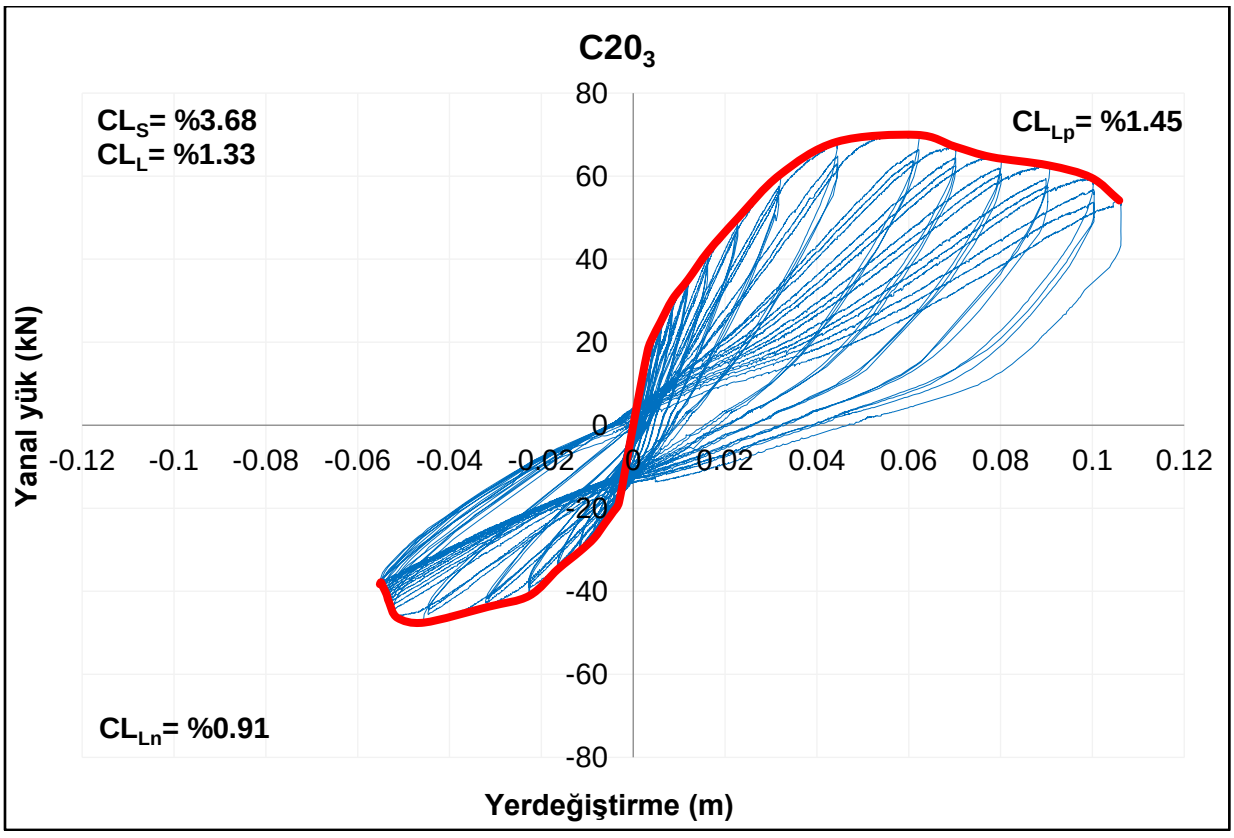

C8₇
CL_S= %6.74
CL_L= %2.86
CL_Lp= %3.68
CL_Ln= %2.04
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

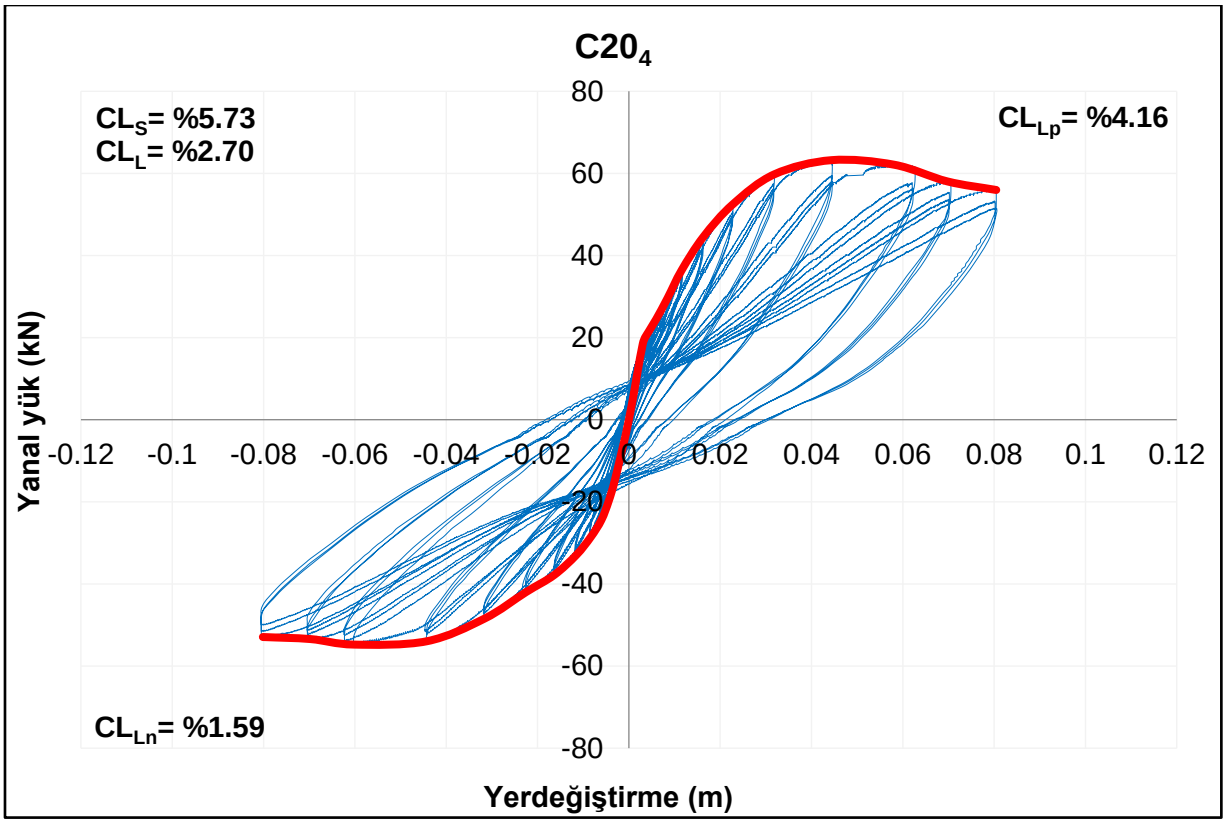

C8₈
CL_S= %7.17
CL_L= %4.21
CL_Lp= %5.15
CL_Ln= %3.56
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

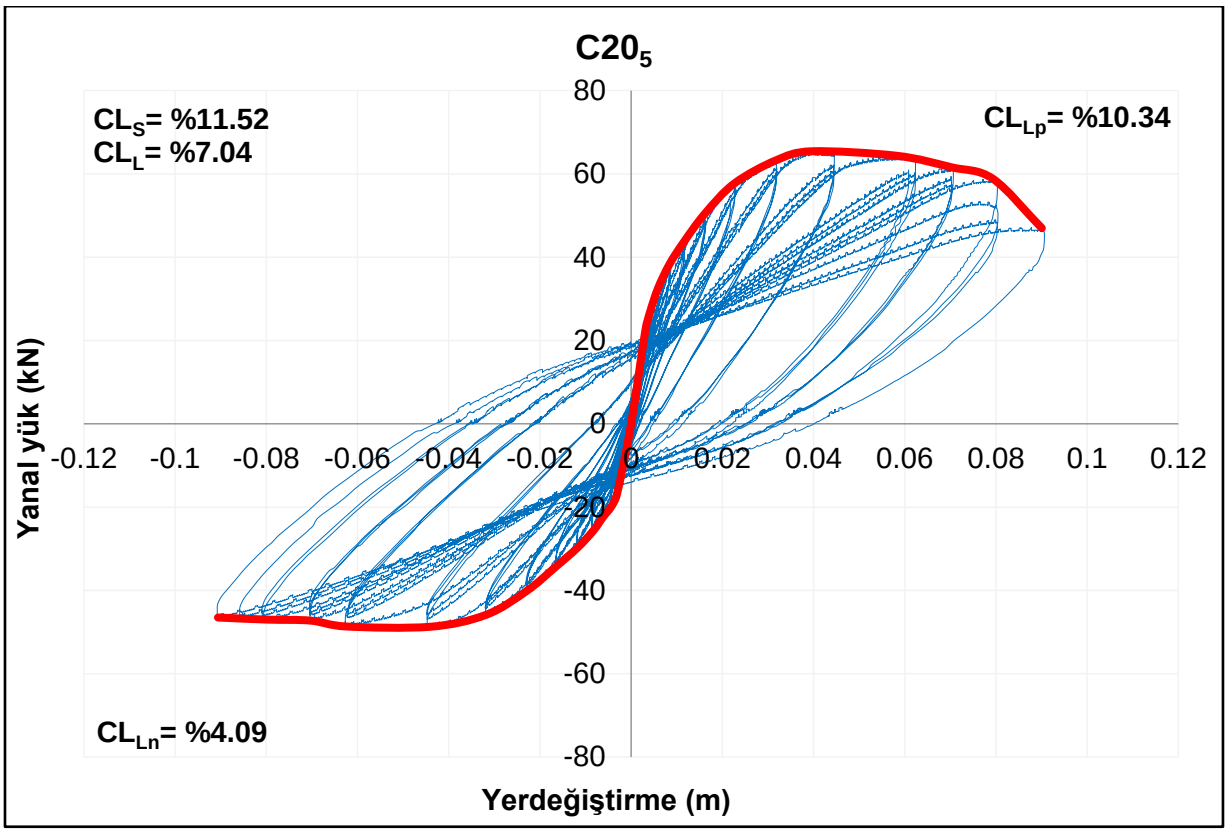


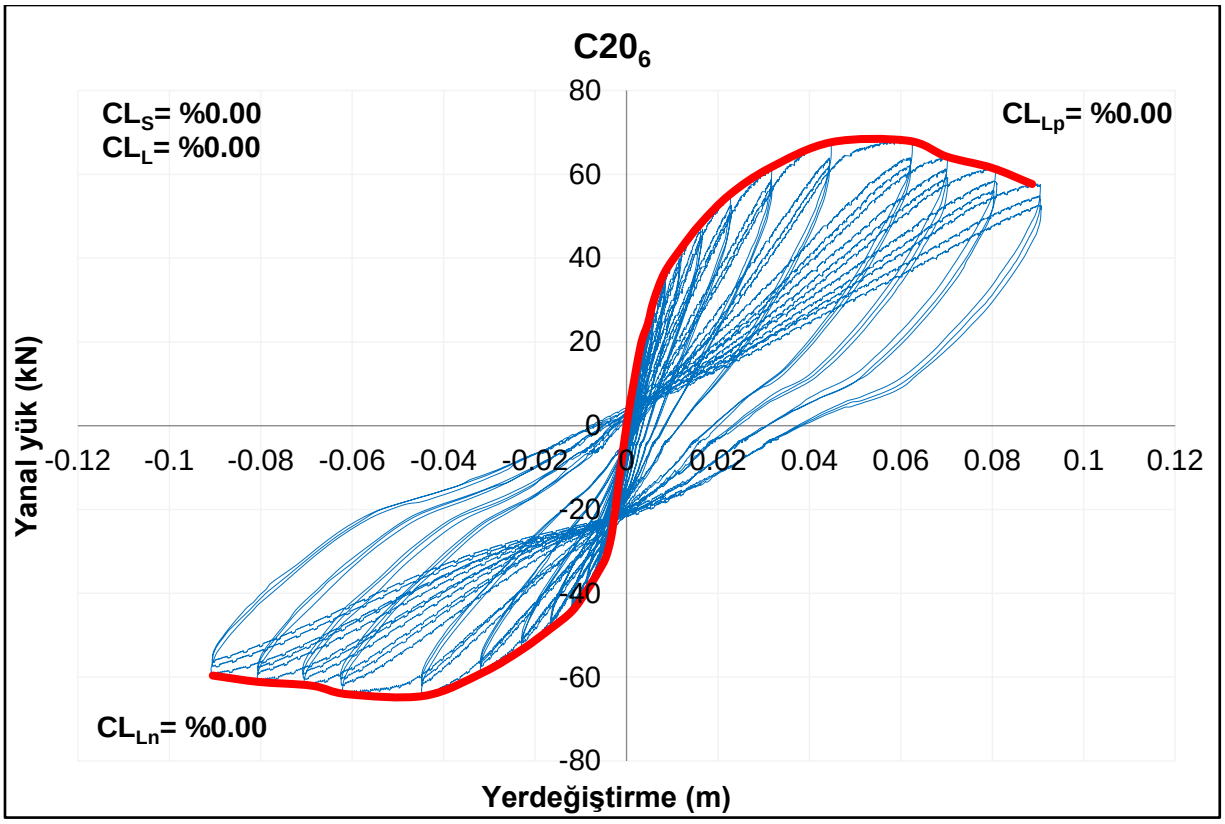
Şekil 4. 22: C8 betonarme kolonları için histerik çevirim sonuçları.

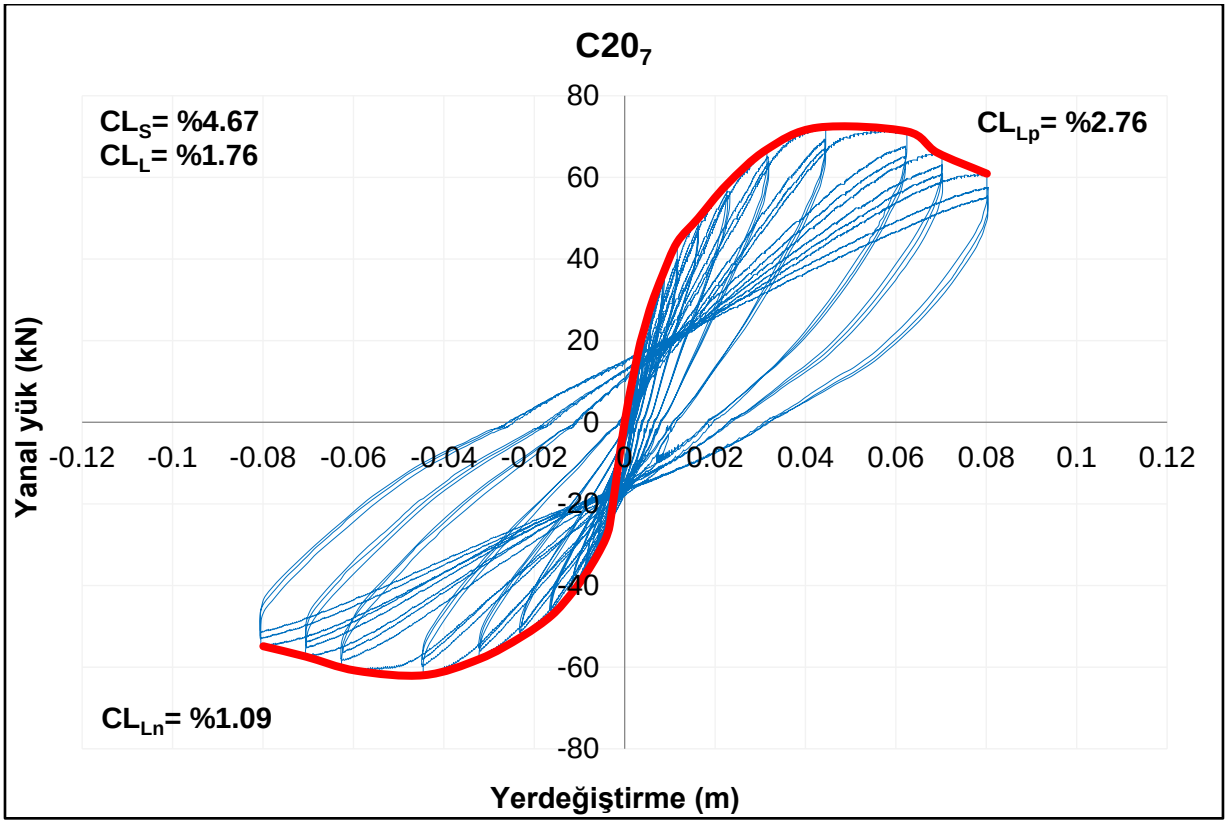

C20₂
CL_S= %4.18
CL_L= %2.18
CL_Lp= %3.37
CL_Ln= %1.39
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

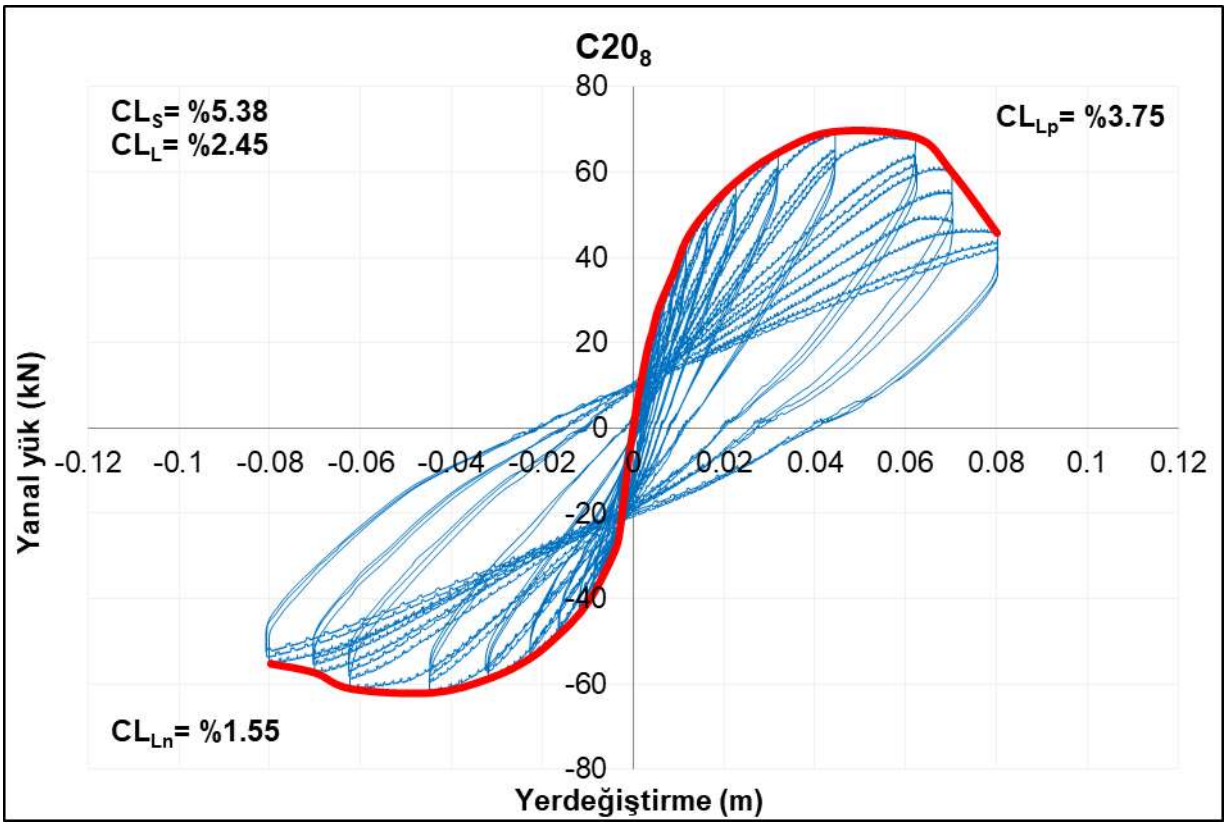

C20₃
CL_S= %3.68
CL_L= %1.33
CL_Lp= %1.45
CL_Ln= %0.91
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

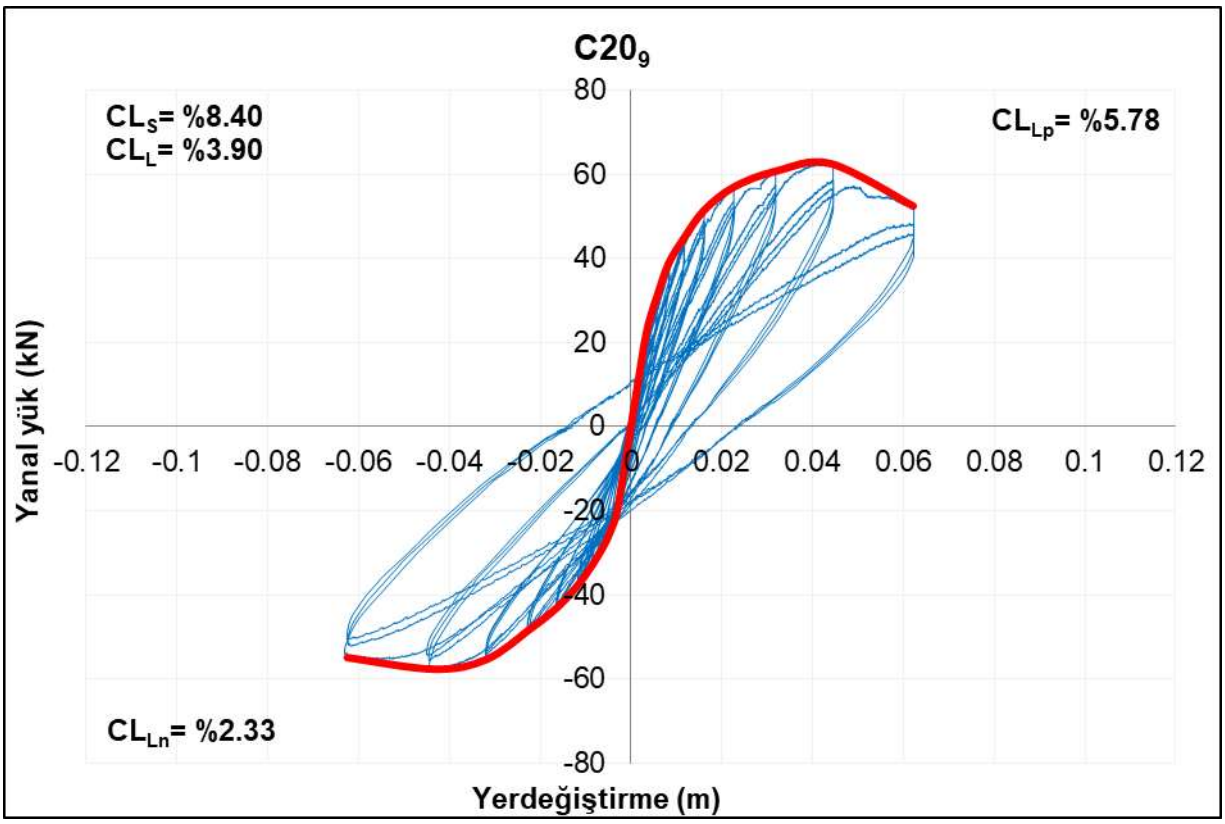

C20$_4$
CL$_S$= %5.73
CL$_L$= %2.70
CL$_{Lp}$= %4.16
CL$_{Ln}$= %1.59
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

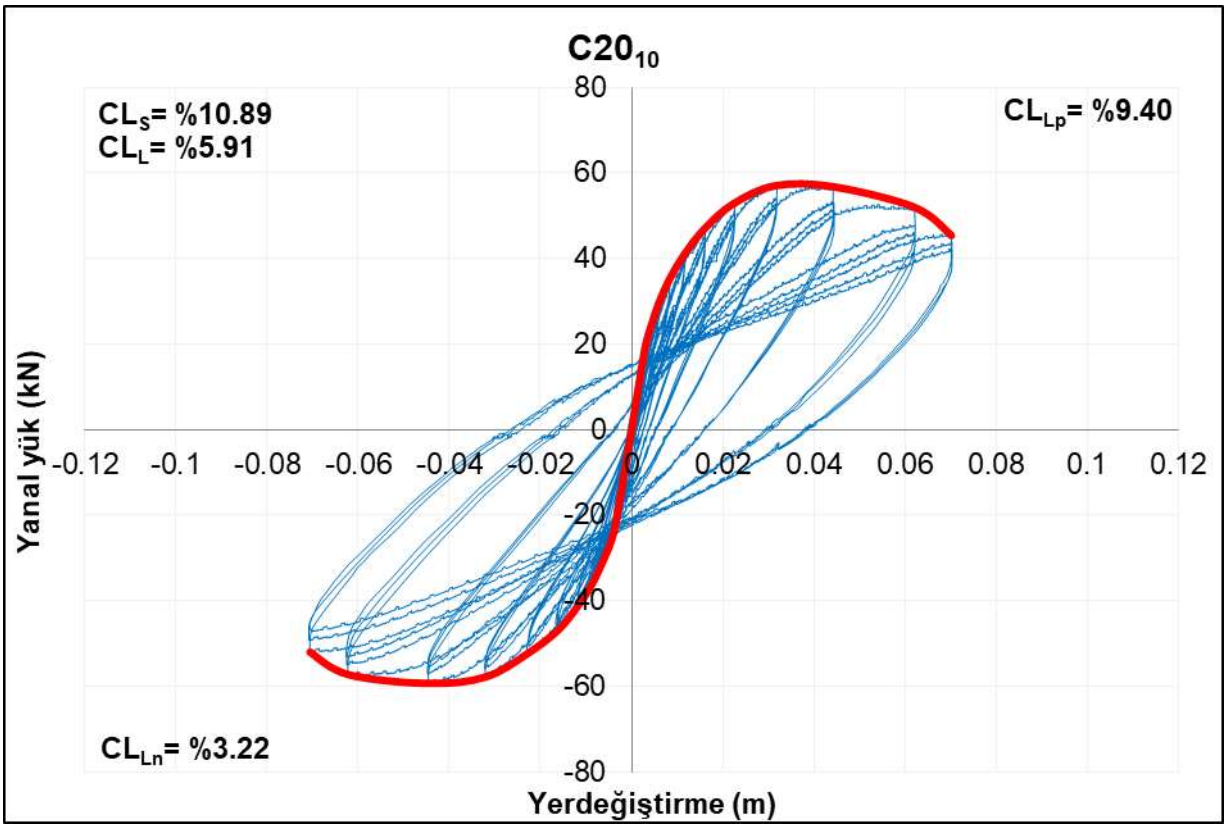

C20$_5$
CL$_S$= %11.52
CL$_L$= %7.04
CL$_{Lp}$= %10.34
CL$_{Ln}$= %4.09
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12


C20$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$= %0.00
CL$_{Ln}$= %0.00
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

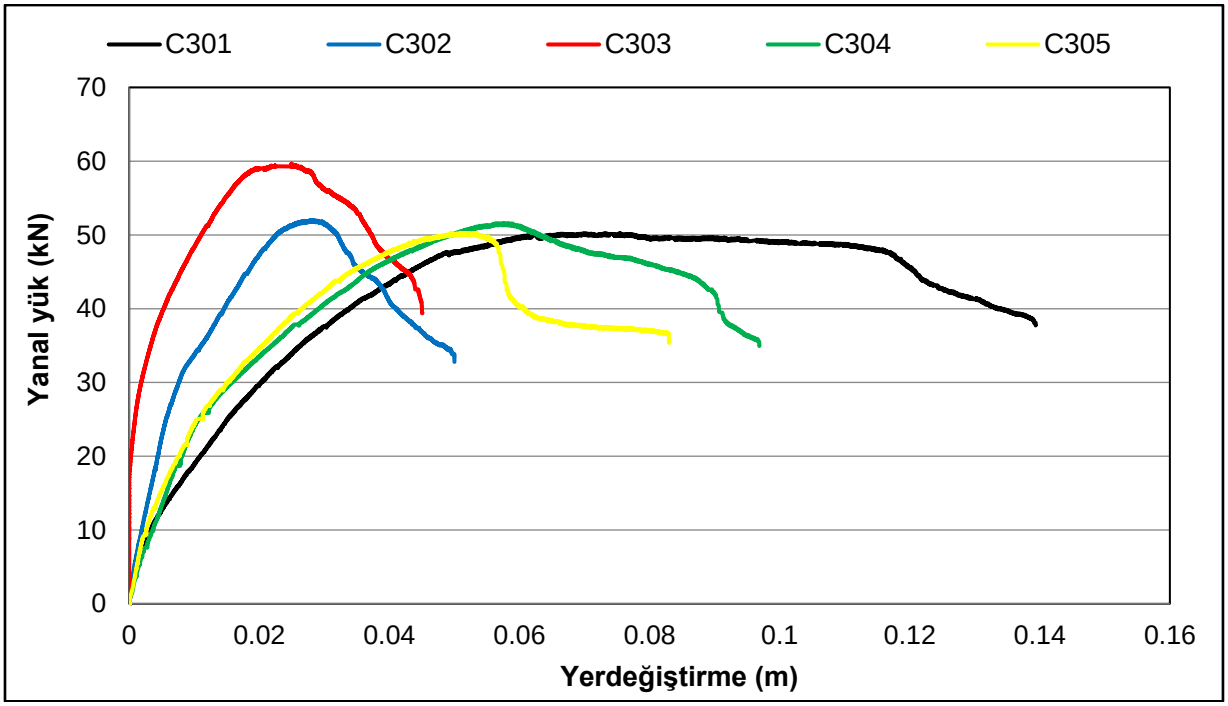

C20$_7$
CL$_S$= %4.67
CL$_L$= %1.76
CL$_{Lp}$= %2.76
CL$_{Ln}$= %1.09
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

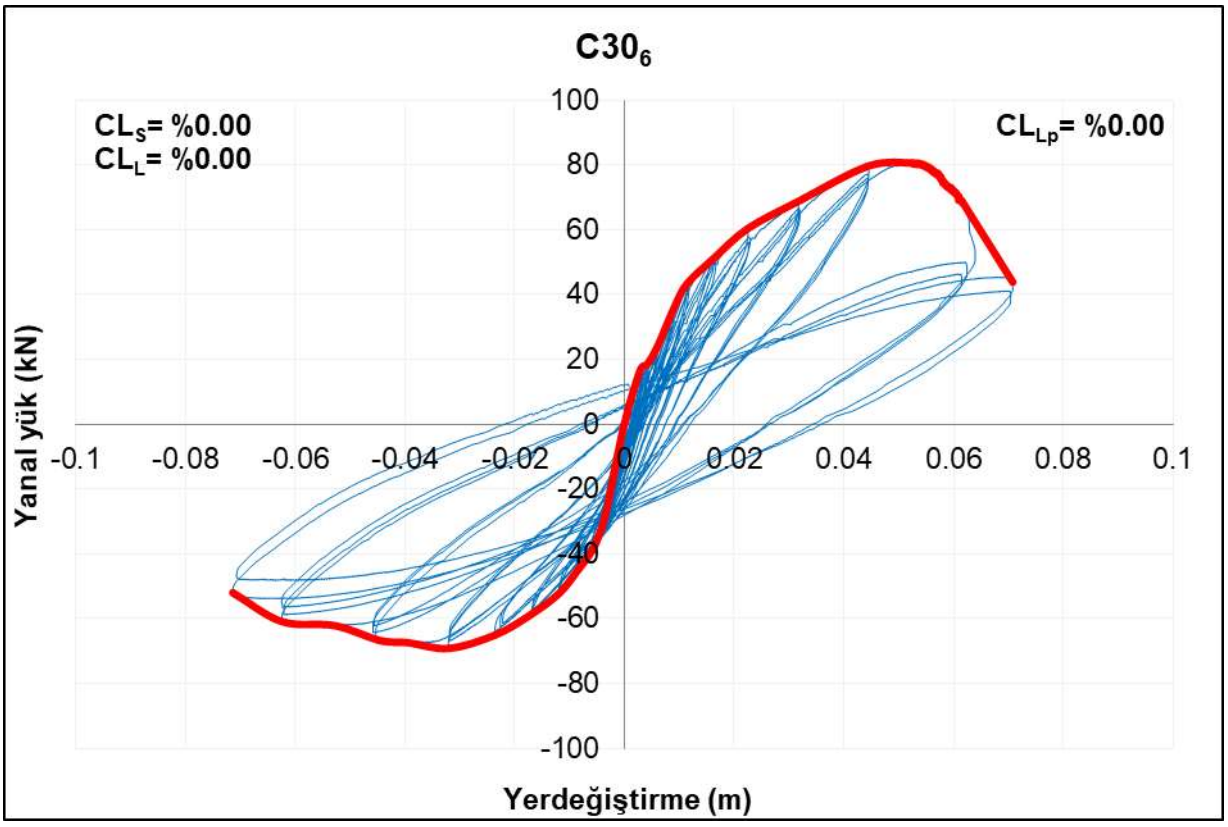

C20₈
CL_S= %5.38
CL_L= %2.45
CL_Lp= %3.75
CL_Ln= %1.55
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

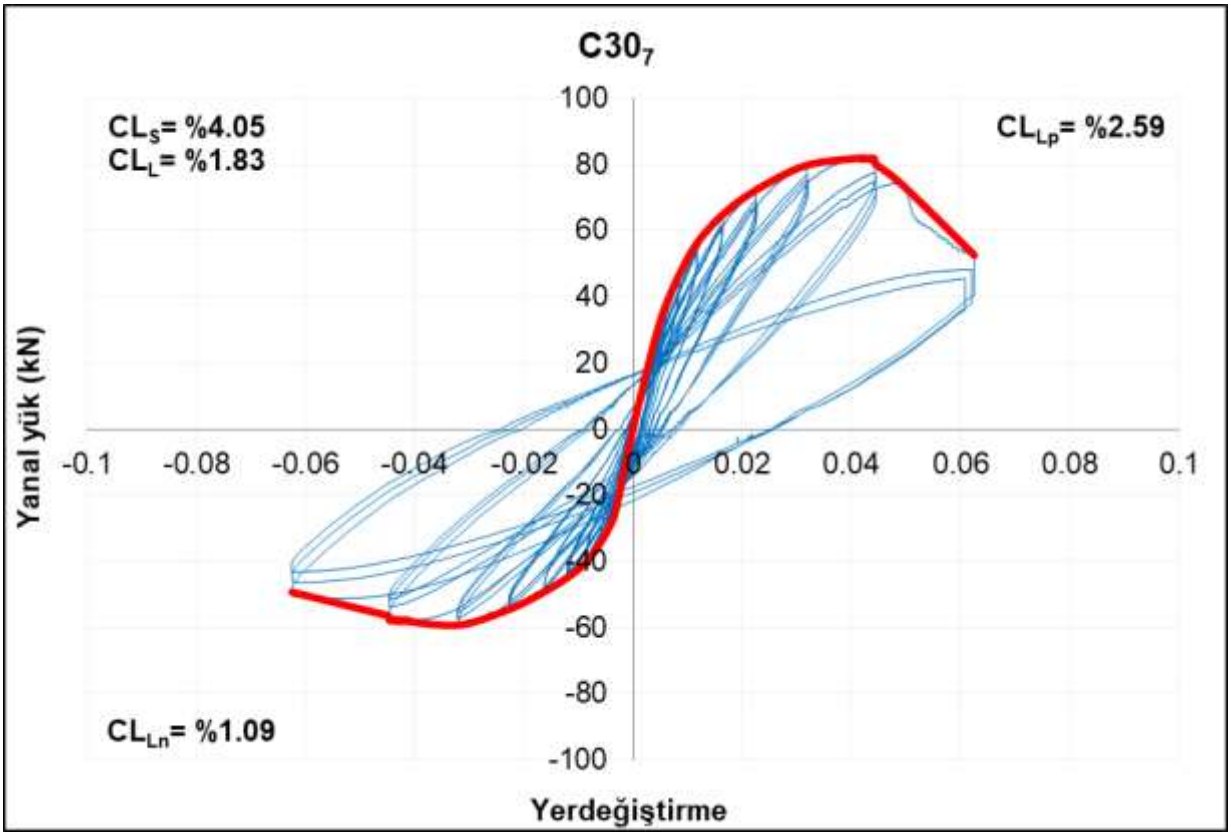

C20₉
CL_S= %8.40
CL_L= %3.90
CL_Lp= %5.78
CL_Ln= %2.33
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-0.12
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

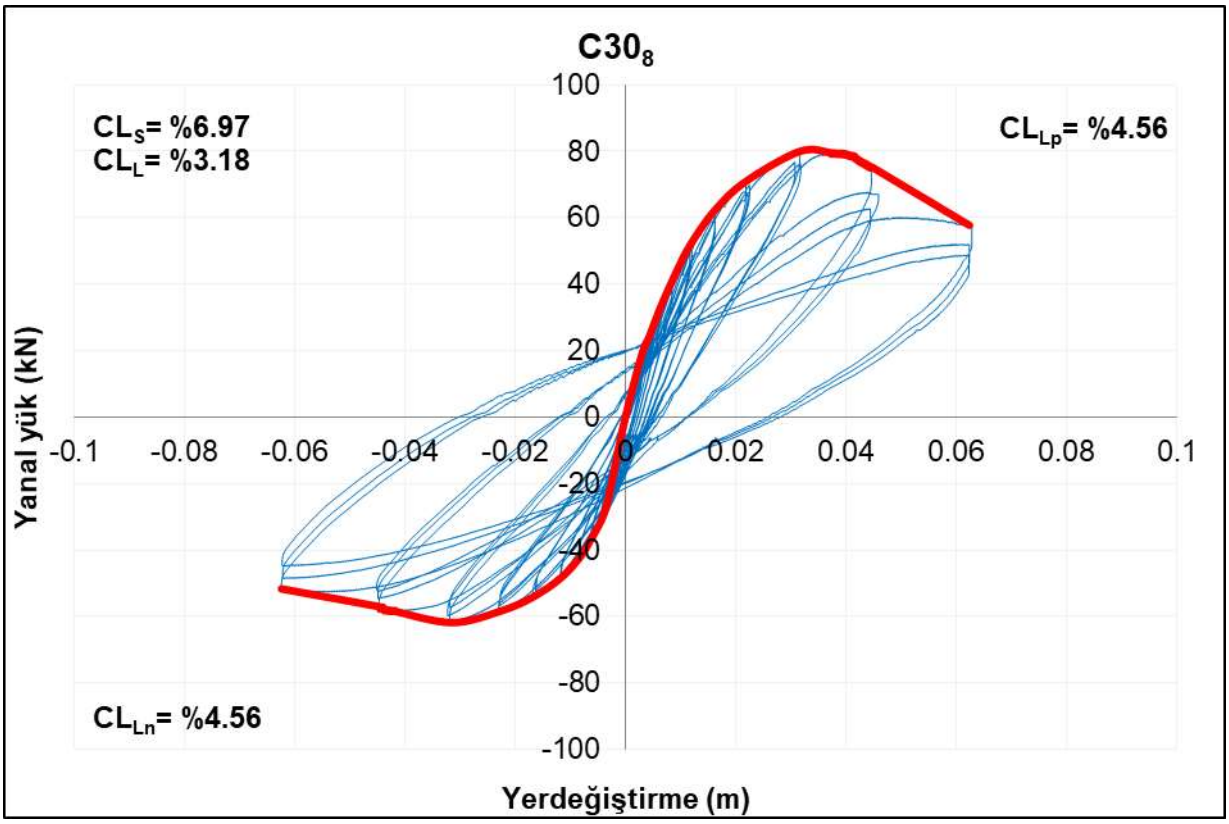


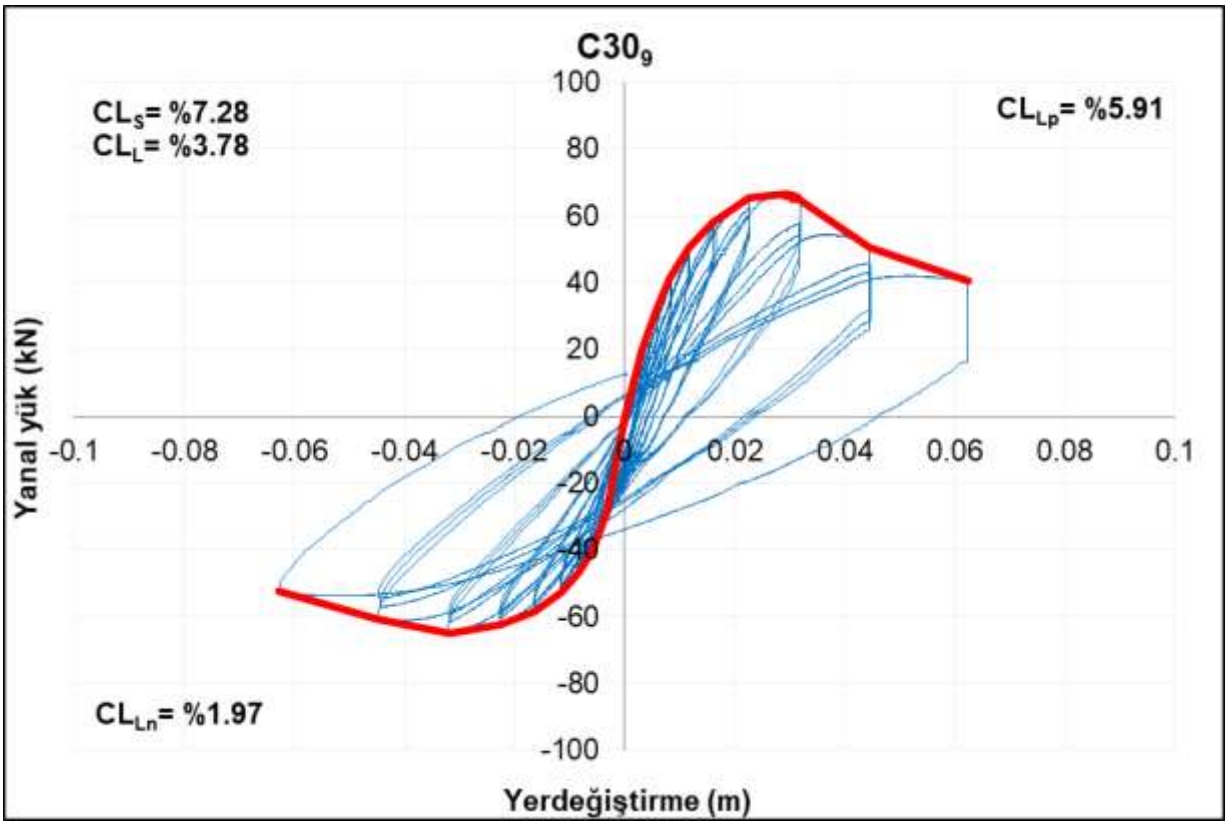
Şekil 4. 23: C20 betonarme kolonları için histerik çevirim sonuçları.

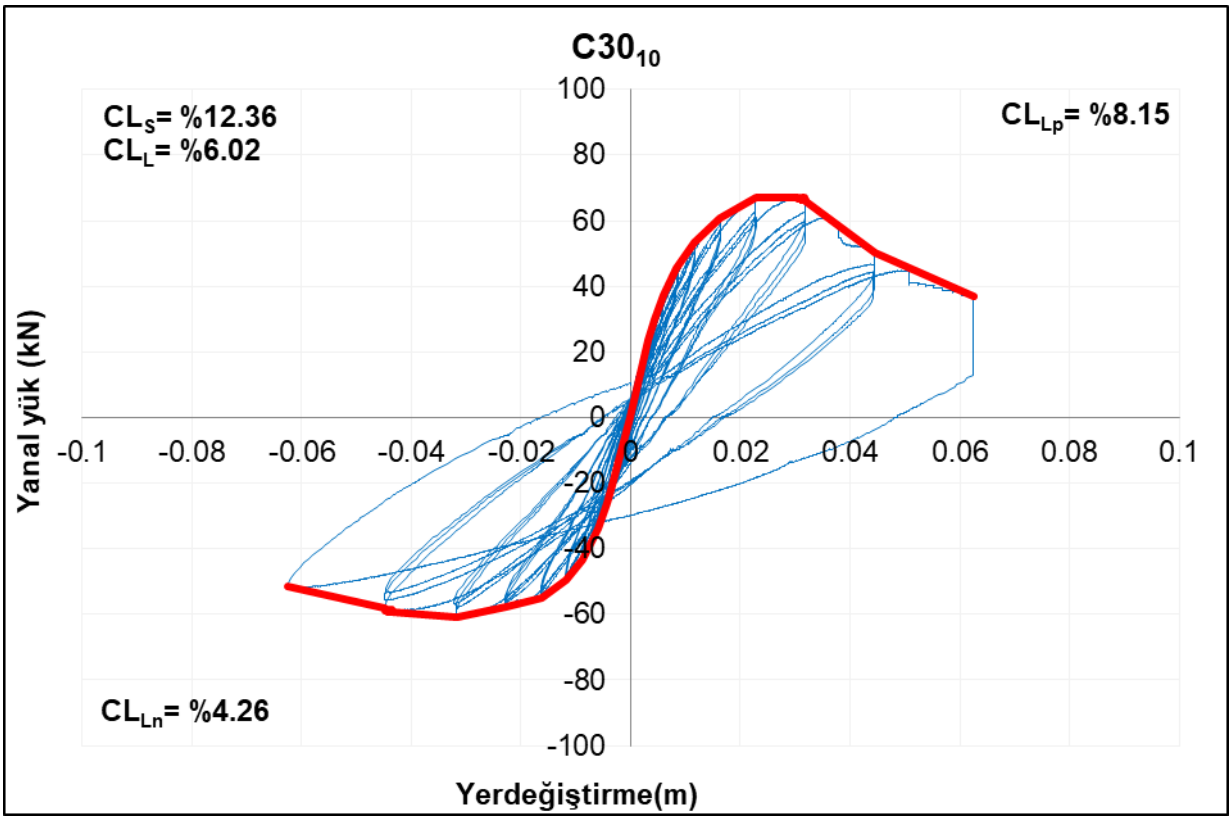



C30$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$= %0.00
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1


C30$_7$
CL$_S$= %4.05
CL$_L$= %1.83
CL$_{Lp}$= %2.59
CL$_{Ln}$= %1.09
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1


C30₈
CL_S= %6.97
CL_L= %3.18
CL_Lp= %4.56
CL_Ln= %4.56
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1


C30₉
CL_S= %7.28
CL_L= %3.78
CL_Lp= %5.91
CL_Ln= %1.97
Yanal yük (kN)
Yerdeğiştirme (m)
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-0.1
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1



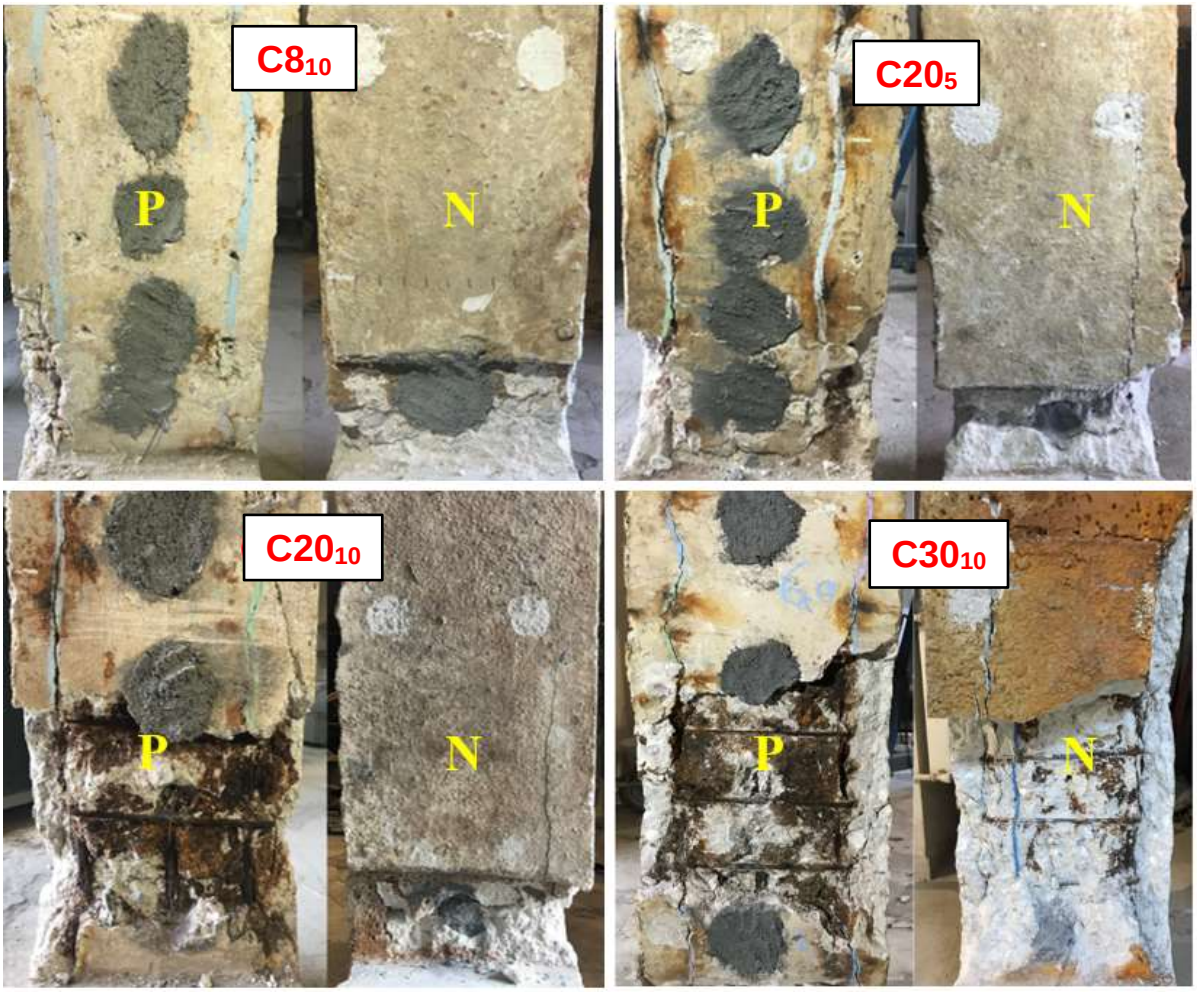
Şekil 4. 24: C30 betonarme kolonları için histerik çevirim sonuçları.

Şekil 4.22-4.24 histerik döngü grafikler yardımı ile betonarme donatısındaki korozyonun farklı beton basınç dayanımlarının ve eksenel yük değerinin yapısal sonuçlar üzerine etkileri incelenmiştir. Söz konusu grafiklerde dört temel davranış korozyon etkisi ile ön plana çıkmaktadır. Birinci olarak; korozyon oranın artması ile birlikte çevirim sayısı azalmıştır. Aynı beton basınç dayanımı ve korozyon oranlarında yükleme çevirim sayısı ise uygulanan eksenel yük değerine bağlıdır. Eksenel yükün artması ile birlikte korozyondan dolayı meydana gelen rijitlik azalması daha belirgin bir hal almaktadır. Azalan rijitlik dayanımı ve çevirim sayısı ile birlikte paslanmış betonarme kolonlarının toplam enerji yutma kapasiteleri de azalmıştır.

Şekil 4.22-4.24'te ikinci olarak göze çarpan temel yapısal davranış betonarme donatılarındaki korozyonun akma ve nihai yük dayanımları üzerine etkisidir. Betonarme donatılarının korozyondan dolayı değişen mekanik özellikleri ve korozyon ürünün hacimsel genişlemesi sonucunda beton yüzeyine uyguladığı radyal basınç etkisi ile birlikte ve beton paspayında hasarların meydana gelmesi sonucunda paslanmış betonarme kolonlarının akma dayımları azalmıştır. Ancak düşük seviyelerdeki korozyon oranlarında korozyon ürününün sağlamış olduğu sargılama etkisi ile birlikte akma ve nihai yük dayanımlarında kısmı artışlar gözlenebilmektedir. Betonarme boyuna donatılarında prematüre akmanın meydana gelmesi ile birlikte paslanmış betonarme kolonlarının sünekliği de belirli korozyon oranlarında artmıştır. Ancak mevcut çalışmada artan süneklik oranları mevcut çalışmaya konu olan korozyon

oranları ile sınırlıdır. Daha yüksek korozyon oranlarının meydana gelmesi ve özellikle etriye ve boyu donatılarındaki nervürlerin daha ileri boyutlarda hasar alması ve ayrıca yine ilk kütleleri boyuna donatılara göre oldukça az olan etriyeler de çukur korozyon oluşumları ile birlikte paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarının azalacağı mevcut literatürde göz önüne alınarak belirtilmelidir. Tersinir tekrarlı yük etkisi altında betonarme kolonlarında meydana gelen dayanım azalımı her iki yükleme yönü için özdeş olmayabilir. Bu durum özellikle korozyon etkisi ile birlikte daha da net bir hal almaktadır. Pozitif yükleme yönü için artan süneklik oranları; diğer bir betonarme kolonunda negatif yönde meydana gelebilmektedir. Mevcut literatürde paslanmış betonarme kolonlarının süneklik üzerine elde edilen çelişkili sonuçlar geliştirilen süneklik model kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

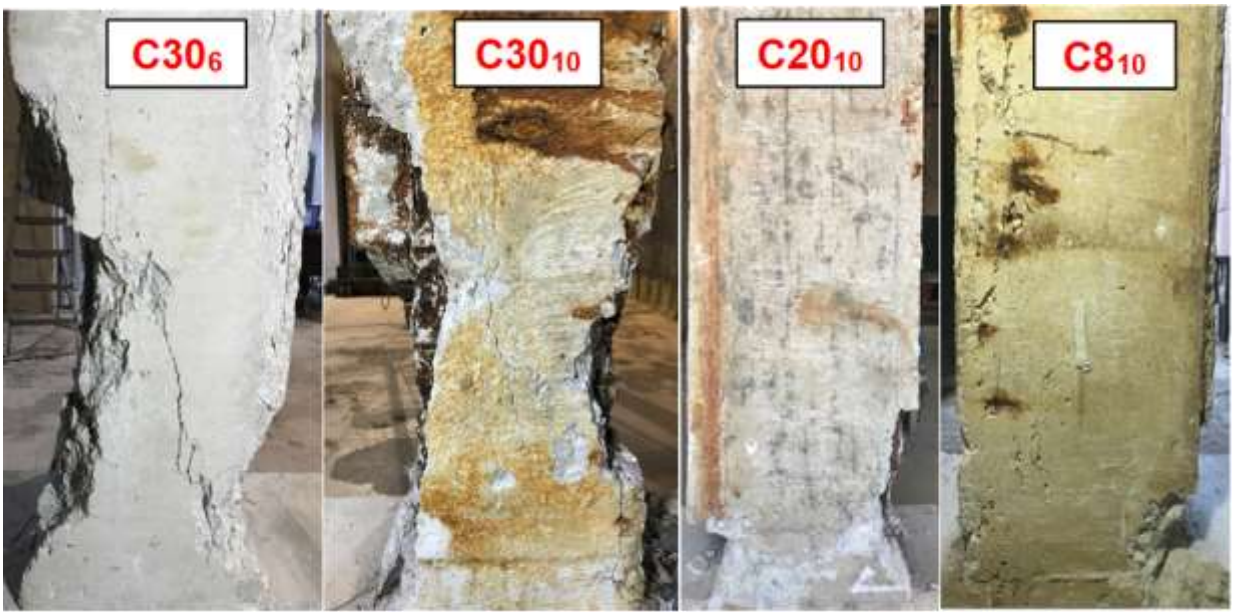
Şekil 4.22-4.24'te üçüncü olarak göze çarpan diğer bir temel yapısal davranış ise korozyonun pozitif (P) ve negatif (N) yükleme doğrultularında çatlama üzerine etkileridir. Şekil 4.25'te seçilen paslanmış betonarme kolonlarında yükleme deneyleri sonrası çatlak oluşumları gösterilmektedir (seçilen betonarme kolonları için bakınız Ek. 3).



Şekil 4. 25: Üç farklı beton sınıfı için meydana gelen çatlak desenleri.

Pozitif yüklemenin yapıldığı paslanmış betonarme kolonlarındaki pas oranlarının diğer yüzeye doğru daha fazla olmasından dolayı Şekil 4.22-4.24'te yer alan histerik döngü grafikleri iki doğrultu için farklılık göstermektedir. Her iki yükleme doğrultusu için elde edilen taşıma kapasiteleri çok büyük oranlarda farklılık göstermese de bu durum paslandırma sürecinde özellikle tasarlanarak; mevcut yapıların dışa bakan yüzeylerindeki korozyon oranlarının iç kısımlara göre daha fazla olmasını gerektirmiş ve mevcut yapıların durumunu gerçeğe daha yakın bir şekilde yansıtılması deneysel program kapsamında hedeflenmiştir. Her iki doğrultu için taşıma kapasiteleri bakımından büyük farklılıkların olmaması durumu çatlak durumu için ancak söz konusu değildir. Şekil 4.25'te gösterildiği üzere; pozitif yükleme doğrultusunda (havuzun alt kısmında kalan ve daha çok paslandırılan kolon yüzeyi) birincil korozyon çatlakların etkisi ile birlikte bu yüzeyde meydana gelen ikincil çatlaklar diğer yüzeye göre çok daha geniş olup plastik mafsal bölgesi doğrultusunda daha kalıcı hasarlara neden olmuştur. C30 betonarme kolonlarının eğilme kapasitesinin diğer beton sınıfında yer alan deney numunelerine kıyasla daha fazla olması sebebi ile C30 betonarme kolonlarındaki beton paspayınlarında meydana gelen hasar Şekil 4.26'da daha net bir şekilde gözlenmektedir.

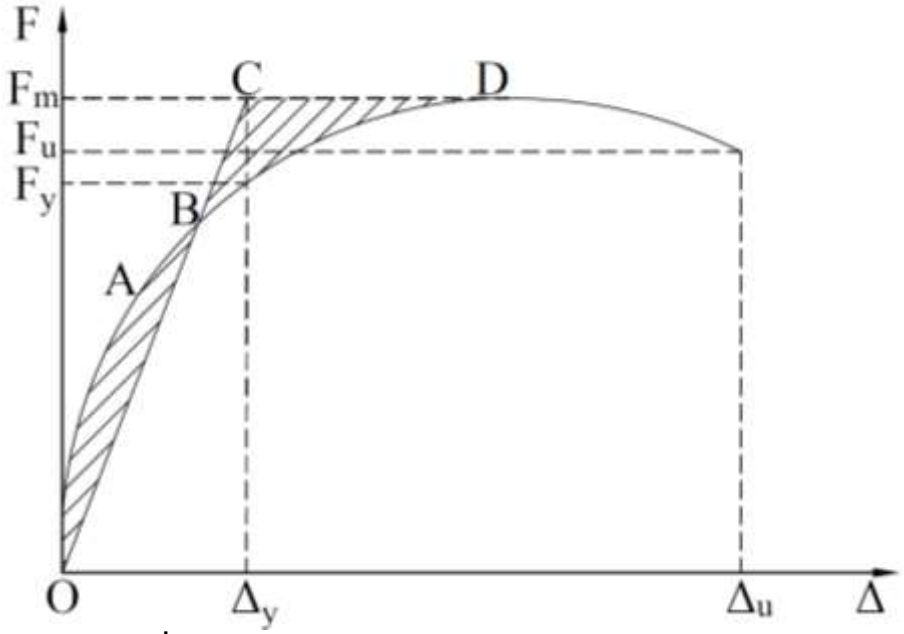
Şekil 4.22-4.24'de dördüncü olarak korozyonun yapısal davranış üzerine etkisi plastik mafsal boyu ve bölgesi içindir. Şekil 4.26'da gösterildiği üzere korozyon durumunda plastik deformasyon yalnızca uygulanan eksenel yük değeri değil aynı zamanda beton basınç dayanımına da bağlı meydana gelmiştir.



Şekil 4. 26: Korozyonun plastik mafsal boyu ve bölgesi üzerine etkisi.

Elde edilen histerik döngü grafiklerinin geliştirilecek modellerde kullanılabilmesi için idealleştirilmeleri gerekmektedir. Histerik döngü grafiklerinin idealleştirilmesi için mevcut literatürde farklı modeller ve yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri de mevcut literatürde sıklıkla kullanılan ve Şekil 4.27'de gösterilen eşdeğer enerji yöntemidir (Zhou,

2009). Şekil 4.27 yardımı ile hesaplanan kuvvet-deplasman değerler için; OAB taralı kısmın alanı BCD taralı kısmın alanına eşittir. Aynı zamanda OCD'nin altında kalan alan OBD eğrisinin altında kalan alana eşittir. Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının artan ve azalan rijitlik değerleri nedeni ile Şekil 4.27 kapsamında idealleştirilmiş döngü değerleri kesitin akma dayanımı için birtakım sıkıntıları beraberinde getirdiği bu çalışma kapsamında tespit edilmiştir. Bundan dolayı; mevcut çalışma kapsamında elde edilen histerik döngüler Sezen ve Moehle (2004) tarafından açıklanan yöntem kapsamında idealleştirilmiştir. Hesaplanan kuvvet-deplasman ve süneklik oranları ise Tablo 4.10'da özet olarak sunulmuştur.



Şekil 4. 27: İdealleştirilmiş yük-deplasman eğrisi.

Tablo 4. 10: Yük-deplasman ve enerji yutma kapasite sonuçları.

#	Pozitif yükleme yönü					Negatif yükleme yönü					İki doğrultu göçme kriteri			μ_E	E (kN.m)	η
	F_y (kN)	F_u (kN)	Δy (m)	Δu (m)	μ_D	F_y (kN)	F_u (kN)	Δ_y (m)	Δ_u (m)	μ_D	F_y (kN)	F_u (kN)	μ_D			
$C8_1$	27.494	28.684	0.028	0.080	2.818	30.471	35.914	0.029	0.080	2.799	28.983	32.299	2.808	3.666	11.939	0.20
$C8_2$	34.929	36.872	0.026	0.088	3.354	33.538	35.128	0.027	0.093	3.454	34.234	36.000	3.404	4.147	13.911	0.20
$C8_3$	29.412	31.355	0.019	0.063	3.306	26.763	28.840	0.020	0.063	3.219	28.088	30.098	3.262	5.633	12.667	0.20
$C8_4$	23.909	24.267	0.017	0.063	3.635	17.832	19.405	0.019	0.034	1.785	20.871	21.836	2.710	5.552	11.251	0.20
$C8_5$	28.777	30.098	0.025	0.073	2.861	35.194	36.729	0.035	0.084	2.365	31.986	33.414	2.613	3.364	10.883	0.20
$C8_6$	33.115	35.986	0.026	0.098	3.791	26.791	28.583	0.022	0.098	4.394	29.953	32.285	4.093	7.600	23.313	0.40
$C8_7$	30.222	33.128	0.023	0.091	4.052	29.691	32.156	0.020	0.100	5.037	29.957	32.642	4.544	9.731	24.520	0.40
$C8_8$	21.000	27.951	0.023	0.101	4.467	35.151	37.215	0.025	0.100	4.034	28.076	32.583	4.251	6.720	24.333	0.40
$C8_9$	30.403	32.442	0.022	0.091	4.168	28.891	30.212	0.023	0.090	3.975	29.647	31.327	4.072	5.355	22.160	0.40
$C8_{10}$	28.600	29.669	0.021	0.062	2.918	27.418	30.130	0.019	0.070	3.693	28.009	29.900	3.306	4.955	13.809	0.40
$C20_1$	51.713	53.682	0.030	0.106	3.545	45.137	47.569	0.023	0.061	2.674	48.425	50.626	3.109	6.091	29.526	0.20
$C20_2$	49.095	48.534	0.030	0.095	3.212	47.548	51.046	0.040	0.074	1.865	48.322	49.790	2.539	5.538	28.703	0.20
$C20_3$	59.636	59.452	0.032	0.100	3.172	38.095	40.416	0.021	0.054	2.546	48.866	49.934	2.859	7.006	29.978	0.20
$C20_4$	49.948	53.736	0.023	0.080	3.464	43.908	46.561	0.026	0.081	3.095	46.928	50.149	3.280	7.503	32.029	0.20
$C20_5$	53.846	55.622	0.019	0.082	4.220	39.012	41.417	0.024	0.091	3.842	46.429	48.520	4.031	9.438	36.302	0.20
$C20_6$	54.913	57.823	0.023	0.088	3.885	50.003	59.621	0.019	0.090	4.698	52.458	58.722	4.291	9.846	45.793	0.40
$C20_7$	59.716	61.367	0.024	0.079	3.243	48.106	54.879	0.018	0.088	4.829	53.911	58.123	4.036	8.190	39.450	0.40
$C20_8$	55.981	59.024	0.022	0.069	3.197	47.130	55.215	0.017	0.080	4.750	51.556	57.120	3.973	7.815	35.492	0.40
$C20_9$	51.483	52.458	0.016	0.062	3.851	46.338	50.709	0.020	0.071	3.528	48.911	51.584	3.690	5.428	19.744	0.40
$C20_{10}$	44.110	48.448	0.017	0.062	3.618	47.274	52.054	0.019	0.071	3.624	45.692	50.251	3.621	5.252	18.521	0.40
$C30_1$	42.101	42.706	0.038	0.125	3.321	M	M	M	M	M	M	M	M	M	5.240	0.20
$C30_2$	44.051	44.189	0.017	0.037	2.136	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1.465	0.20
$C30_3$	46.136	59.654	0.009	0.025	2.878	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1.219	0.20
$C30_4$	42.605	49.062	0.033	0.066	1.979	M	M	M	M	M	M	M	M	M	2.507	0.20
$C30_5$	42.034	50.306	0.030	0.049	1.672	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1.750	0.20
$C30_6$	64.830	68.542	0.028	0.066	2.405	55.350	58.824	0.014	0.067	4.866	60.090	63.683	3.636	8.433	22.092	0.40
$C30_7$	65.654	69.656	0.018	0.051	2.792	45.993	50.334	0.013	0.060	4.488	55.824	59.995	3.640	8.518	22.459	0.40
$C30_8$	67.405	67.970	0.020	0.045	2.286	48.662	51.685	0.012	0.059	4.808	58.034	59.828	3.547	7.452	19.202	0.40
$C30_9$	55.338	56.680	0.015	0.034	2.315	51.893	57.166	0.012	0.044	3.771	53.616	56.923	3.043	5.748	14.512	0.40
$C30_{10}$	55.775	57.023	0.015	0.038	2.613	50.257	53.650	0.014	0.043	3.160	53.016	55.337	2.887	5.599	12.143	0.40

η= N/Ac.fc, μ_D= Δu/Δy, E= Toplam enerji kapasitesi, M= Monotonik yükleme.

Şekil 4.22-4.24 ve Tablo 4.10'da özet olarak sunulan deney sonuçları kapsamında, 0.40 eksenel yük ve pozitif yükleme doğrultusunda paslanmış betonarme kolonlarının akma dayanımları C20 ve C30 grubunda yer alan betonarme kolonları için düşük seviyelerde artarken C8 betonarme kolonları için anı düşüş göstermektedir. Paslanmış betonarme kolonlarının düşük korozyon oranları için akma dayanımlarının artışlarına farklı çalışmalarda da gözlenmiştir (örneğin: Yang vd., 2016). Düşük oranlarda akma dayanımlarında artışlar korozyon ürünün donatı yüzeyinde sağlamış olduğu pürüzsüzlük ve beton gözenek boşluklarının doldurulmasından kaynaklanmaktadır. Korozyon oranın artması ile birlikte betonarme kolonlarının akma dayanımları azalmaktadır. $C8_{10,\ 4.82\%,10.54\%,0.40}$, $C20_{10,\ 5.91\%,10.89\%,\ 0.40}$ ve $C30_{10,\ 6.02\%,12.36\%,0.40}$ paslandırılmış betonarme kolonlarının akma dayanımları sırasıyla %13.65, %19.67 ve %13.98 seviyelerinde azalmıştır. Deney sonuçlarının özet olarak sunulduğu Tablo 4.10 eşliğinde; eksenel yük değerinin ve göz önüne alınan göçme kriterinin (pozitif, negatif yükleme veya iki doğrultudaki göçme kriteri) paslanmış betonarme kolonlarının davranışları üzerine yapılacak yorumlar için etkin baskın rol oynamaktadır. 0.20 eksenel yük oranı göz önüne alındığında; tek doğrultulu yükleme göçme kriterinden elde edilen sonuçlar doğrusal olmayan ilişkiler ortaya çıkarmaktadır. Bu durum yalnızca akma dayanımı için geçerli olmayıp nihai yük taşıma kapasiteleri açısından da geçerlidir. 0.40 eksenel yükün uygulandığı pozitif yükleme doğrultusu ve düşük korozyon oranlarında C20 ve C30 betonarme kolonlarının nihai yük taşıma kapasiteleri düşük seviyelerde artarken; C8 betonarme kolonları ani azalım davranışı göstermektedir. $C8_{10,\ 4.82\%,\ 10.54\%,\ 0.40}$, $C20_{10,\ 5.91\%,\ 10.89\%,\ 0.40}$ ve $C30_{10,\ 6.02\%,\ 12.36\%,\ 0.40}$ paslanmış betonarme kolonlarının referans kolanlarına göre nihai yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %17.56, %16.21 ve %16.81% seviyelerinde azalmıştır.

Mevcut literatürde paslandırılmış betonarme kolonlarının sismik davranışlarının incelenmesi üzerine farklı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalardan biri Ma vd. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmadır. Yapılan çalışmada 10 adet ve paslandırılmış daire kesitli betonarme kolonları tersinir yükleme etkisi altında deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada deneye tabi tutulan betonarme kolonlarının çapı 260 mm boyu ise 1000 mm'dir. Yapılan çalışmada betonarme kolonlarının 28 günlük küp beton basınç dayanımları 32.4 MPa olarak verilmiştir. Eksenel yük oranı 0.15 ile 0.9 arasında uygulanmıştır. Uygulanan eksenel yük değeri korozyon oranın artması ile birlikte artırılmıştır. Diğer bir ifade ile aynı korozyon oranı için farklı eksenel yük oranları için deneyler gerçekleştirilmemiştir. Ortalama gerçek korozyon oranları yer değiştirme deneylerinden sonra elde edilmiş ve yapılan çalışmada korozyon oranları %0'dan %15.1 arasında değişkenlik göstermiştir. Ma vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada paslanmış betonarme kolonlarının akma, nihai yük dayanımlarının ve süneklik oranlarının tahmin edilebilmesi için üç ampirik model geliştirilmiştir. Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen ampirik denklemler aşağıda verildiği gibidir.

$$F_{yc} = F_{y0}(1 - 0.885\rho) \quad (4.19)$$

$$F_{uc} = F_{u0}(1 - 0.878\rho) \quad (4.20)$$

$$\mu_c = \mu_0(1 - 1.795\rho) \quad (4.21)$$

Denklem 4.19 ve 4.20'de F_{y0} ve F_{u0} sırasıyla paslanmamış betonarme kolonlarının akma ve nihai dayanımlarıdır. Ma vd. (2012) tarafından sunulan denklemlerde korozyon oranının yüzdesiz olarak verildiği konusunda dikkat edilmesi gerektiğinin belirtilmesi faydalı olacaktır ($\rho = \frac{C_L}{100}$). Tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında paslandırılmış kare kesitli betonarme kolonları Meda vd. (2014) tarafından incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada biri paslanmış ve diğeri kontrol numunesi olmak üzere iki adet betonarme kolonunun yükleme deneyleri yapılmıştır. Betonarme kolonlarının genişlik ve yüksekliği 300 × 300 mm olup, kolon boyu 1500 mm'dir. Yapılan çalışmada betonarme kolonlarının 28 günlük küp beton basınç dayanımları 20 MPa olarak verilmiştir ve deneyi gerçekleştirilen betonarme kolonları için 0.22 oranında tek bir eksenel yük değeri kullanılmıştır. Meda vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada etriyeler paslandırılmamış ve boyuna betonarme donatıları kolon boyunun üçte bir oranında paslandırılmıştır. Böylelikle, sargılama etkisinin aderans dayanımına ve buna bağlı olarak aderans dayanımındaki kaybın toplam yanal yer değiştirmeye katkısı etriyelerin korunması ile birlikte ihmal edilmiştir. Yapılan çalışmada kolon boyuna donatılarındaki korozyon oranı %20'dir. Elde edilen korozyon oranları gerçek korozyon oranları olmayıp Faraday Kanununa göre elde edilen teorik korozyon oranlıdır. Meda vd. (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmada paslanmış betonarme kolonların davranışlarını tahmin etmeye yönelik bir model geliştirilmemiştir. Paslanmış betonarme kolonları üzerine gerçekleştirilen diğer bir çalışma Guo vd. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmadır. Tersinir artımlı yük etkisi altında üç adet betonarme kolonu için yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada deneye tabi tutulan betonarme kolonlarının genişliği 250 mm, yüksekliği 600 mm ve kolon boyu ise 2500 mm'dir. Yapılan çalışmada betonarme kolonlarının 28 günlük beton basınç dayanımları 42.9 MPa olarak verilmiştir. Betonarme kolonları tek bir eksenel yük oranı için deneye tabi tutulmuş olup eksenel yük değeri 0.1'dir. Yapılan çalışmadaki korozyon oranları sırasıyla %5, %10 ve %15 olarak tasarlanmıştır. Ma vd. (2012) ve Meda vd. (2014) tarafından yapılan çalışmalarından farklı olarak; Guo vd. (2015) boyuna ve sargı donatılarındaki gerçek korozyon oranlarını hesaplamıştır. Boyuna donatılarındaki ortalama gerçek korozyon oranları %11.20 ve %30.19 arasında değişkenlik gösterirken; etriyelerdeki gerçek ortalama korozyon oranları %5.07 ile %15.24 arasında değişkenlik göstermiştir. Guo vd. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmada paslanmış betonarme kolonların davranışlarını tahmin etmeye yönelik bir model geliştirilmemiştir. 2016 yılında Yang vd. (2016) tarafından korozyon oranları 5%, 10%, 15% ve 20% olan 210 × 210 mm kesit boyutları ve 1500 mm kolon boyuna sahip betonarme kolonları

tersinir artımlı yük etkisi altında deneye tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada betonarme kolonlarının 28 günlük beton basınç dayanımları 46.4 MPa olarak verilmiştir. Betonarme kolonları tek bir eksenel yük oranı için deneye tabi tutulmuş olup eksenel yük değeri 0.18'dir. Yapılan deneysel çalışmada paslanmış betonarme kolonlarının sünekliliğini ve enerji kapasitelerini tahmin etmeye yönelik iki ampirik model geliştirilmiştir. Yang vd. (2016) tarafından paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarını ve enerji yutma kapasitelerini tahmin etmek için geliştirilen ampirik modeller sırasıyla aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\mu_c = \mu_0(1 - 0.019C_L) \tag{4.22}$$

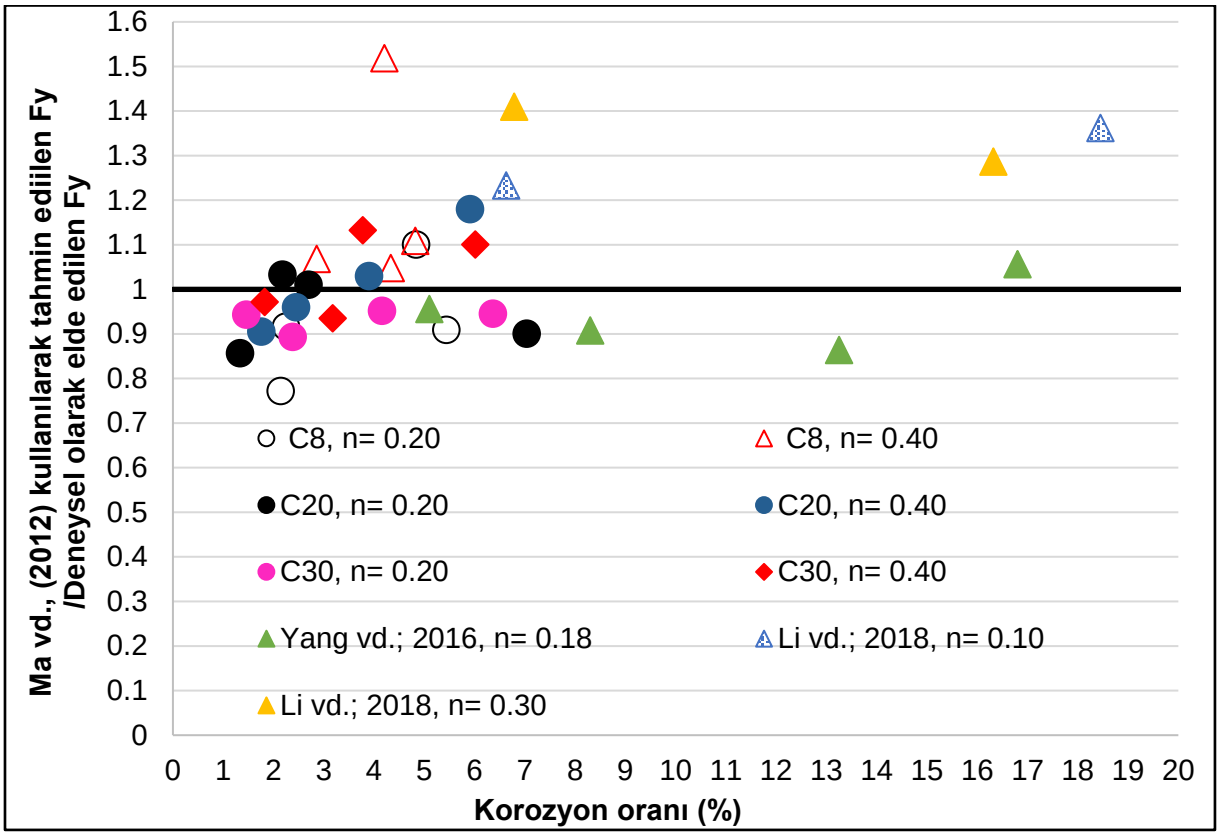
$$E_c = E_0(1 - 0.027C_L) \tag{4.23}$$

Yang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada paslanmış betonarme kolonlarının sünekliği korozyon oranına bağlı olarak azalırken; bu durum korozyonun sağlamış olduğu sargı etkisi ile birlikte diğer çalışmalarda farklılık göstermiş ve belirli korozyon oranlarına kadar paslanmış betonarme kolonlarının sünekliğinin arttığı gözlenmiştir (örneğin; Ma vd., 2012; Guo vd., 2015; ve Li vd., 2018). 2018 yılında Li vd. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmada aynı kolon için eşit oranlarda paslandırılmamış boyuna donatıların etkisi paslandırılmış betonarme kolonlarının sismik davranışları için incelenmiştir. Tersinir artımlı yük etkisi altında dört dikdörtgen kesitli betonarme kolonu için yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada betonarme kolonlarının 28 günlük küp beton basınç dayanımları 50.2 MPa olarak verilmiştir. Betonarme kolonları iki farklı eksenel yük oranları için deneye tabi tutulmuş olup eksenel yük değerleri 0.1 ve 0.3 olarak göz önüne alınmıştır. Li vd. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmada paslanmış betonarme kolonların davranışlarını tahmin etmeye yönelik bir model geliştirilmemiştir.

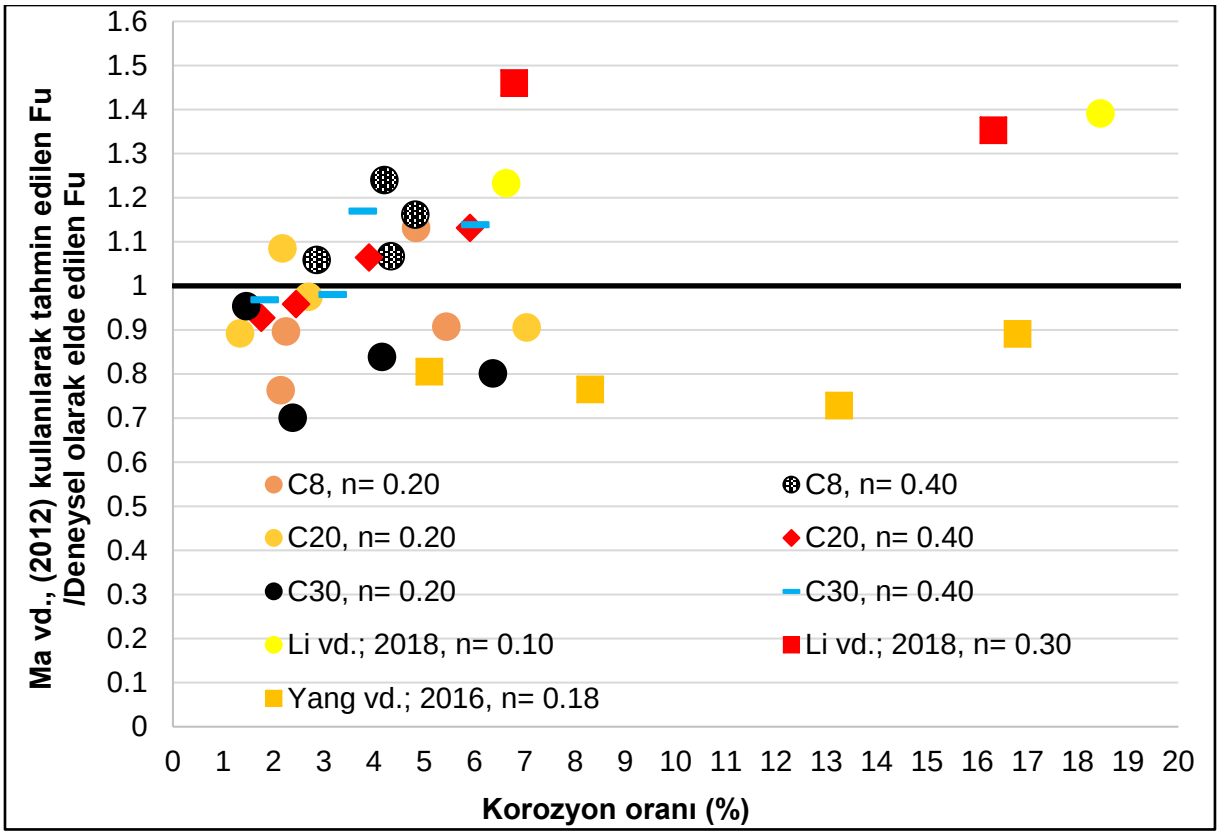
Gerçekleştirilen bu TÜBİTAK proje ile birlikte geliştirilen yeni modeller; yukarıda özet olarak sunulan çalışmalardan farklı olarak üç farklı beton basınç dayanımını iki farklı eksenel yük ve farklı korozyon oranlarını göz önüne almaktadır. Diğer bir ifade ile; iki farklı eksenel yük oranı üç farklı beton basınç dayanımı için kullanılırken, aynı korozyon oranları içinde farklı beton basınç dayanımları ve eksenel yükler göz önüne alınmıştır. Mevcut literatürde paslanmış betonarme kolonlarının yapısal davranışlarını tahmin etmeye yönelik geliştirilen tüm modeller göz önüne alınarak bu çalışma kapsamında değerlendirilmiş ve geliştirilmişlerdir.

İlk aşamada; Ma vd. (2012) tarafından paslanmış betonarme kolonlarının akma-nihai yük dayanımlarının tahmin edilmesi için geliştirilen ampirik modeller bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen modellerin değerlendirilmesi için Yang vd. (2016), Li vd. (2018) ve mevcut çalışmadan elde edilen deneysel veriler (korozyon oranları, paslanmamış betonarme kolonlarının akma-nihai yük değerleri) Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen ampirik modele girilerek bahsedilen deneysel çalışmalardaki deneysel veriler

tahmin edilmiştir. Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolanları için tahmin edilen akma ve nihai yük değerleri söz konusu çalışmalardaki deneysel verilere bölünerek tahmin edilen değerlerin deneysel verilere oranları elde edilmiş ve Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 28: Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen akma yük değerlerinin deneysel değerlere oranı.



Şekil 4. 29: Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen nihai yük değerlerinin deneysel değerlere oranı.

Şekil 4.28 ve 4.29'da Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model Yang vd. (2016) tarafından paslanmış betonarme kolonları için elde edilen akma ve nihai yük değerlerini çok iyi bir şekilde tahmin etmektedir. Tahmin değerinin deneysel değerlere oranının en düşük olduğu değer nihai yük değeri için olup bu değer %13.25 oranında paslandırılmış betonarme kolonu için 0.73'tür. Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen model Yang vd. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışma verilerini çok iyi bir şekilde tahmin edebilirken; aynı durum Li vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma için söylemek oldukça zor olup hesaplanan oranlar 1'in üzerinde değerler almaktadır. Li vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada eksenel yükün 0.3'e çıkartıldığı ve %6.79 korozyon oranına sahip paslanmış betonarme kolonu için hesaplanan oran akma yükü için 1.41, nihai yük için ise 1.29'dur. Farklı eksenel yük ve korozyon oranları içinde hesaplanan akma ve nihai yük oranları 1.23 ile 1.46 arasında değişkenlik göstermektedir. Li vd. (2018) tarafından yapılan ve deneysel sonuçları kullanılarak farklı geliştirilmiş modellere (süneklik, enerji yutma kapasitesi modelleri) girilen deneysel veriler için elde edilen oranlar ya 1'in oldukça altında ya da üstünde değerler almaktadır. Bu durum Li vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada oldukça farklı ve simetrik olmayan korozyon oranlarından dolayı kaynaklanmaktadır. Li vd. (2018) yaptıkları çalışmada çalışmanın amacına yönelik olarak aynı betonarme kolonlarında oldukça farklı korozyon oranlarının elde edilmesini hedefledikleri bir deneysel program yürütmüşlerdir. Yapılan çalışmada aynı betonarme kolonundaki bir

betonarme donatısındaki korozyon oranı %8.21 iken diğer bir donatıda bu oran %47.45'tir. Li vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma mevcut yapılarda gözlenmesi muhtemel olan bir duruma ışık tutmaktadır. Ancak korozyonun hali hazırdaki karmaşık yapısı ve tüm donatılardaki gerçek korozyon oranlarının elde edilmesi ile mevcut bir yapının yapısal davranışının tam olarak bilinmesi çok farklı çalışmaların yapılmasını da zorunlu kılmaktadır. Her bir betonarme donatısındaki korozyon oranın hesaplanması; çekme-basınç donatılarının her bir yük etkisi altında farklı korozyon oranlarının göz önüne alınması, betonarme donatılarının konumları (yan yana iki donatıda korozyon varken simetrik donatılarda bulunmaması ve buna bağlı çatlak genişliğinin değişmesi vb.) oldukça zor bir çalışmayı gerektirmekte ve mevcut yapıların pratik ve kolay bir şekilde değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Sonuç olarak Yang vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki betonarme donatılarındaki korozyon dağılım oranlarının Ma vd. (2012) tarafından yapılan çalışmadaki donatılardaki korozyon dağılım oranlarından farklı olduğu göz önüne alındığında; Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen modelin Yang vd. (2016) için güvenli olduğu rahatlıkla belirtilebilir.

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen deneysel verilerde aynı şekilde Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen modele girilerek söz konusu modelin güvenirliği bir kez daha değerlendirilmiştir. Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterildiği üzere; Ma vd. (2012) tarafından paslanmış betonarme kolonlarının akma ve nihai yük değerlerinin tahmini için geliştirilen model C30 betonarme grubunda yer alan ve hatta yükleme programının monotonik olarak gerçekleştirildiği paslanmış betonarme kolonları ($C30_{1\text{-}5}$) içinde tahmin oranları başarılıdır. Ancak başarılı bir şekilde elde edilen oranlar mevcut çalışmadaki korozyon oranlarının Ma vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki korozyon oranlarından düşük olması ile sağlanmıştır.

Mevcut çalışmadan elde edilen ve Tablo 4.10'da verilen idealleştirilmiş yük kapasite değerleri, Guo vd. (2015) ve Li vd. (2018) tarafından elde edilen deneysel verilerde kullanılarak paslanmış betonarme kolonlarının akma ve nihai yük dayanımları tahmin etmek için iki yeni ampirik model bu çalışma ile geliştirilmiş ve Denklem 4.24ve 4.25'de sırasıyla verilmiştir.

$$F_{yc} = F_{y0}\left(\frac{1}{1+0.039\times CL_L}\right) \tag{4.24}$$

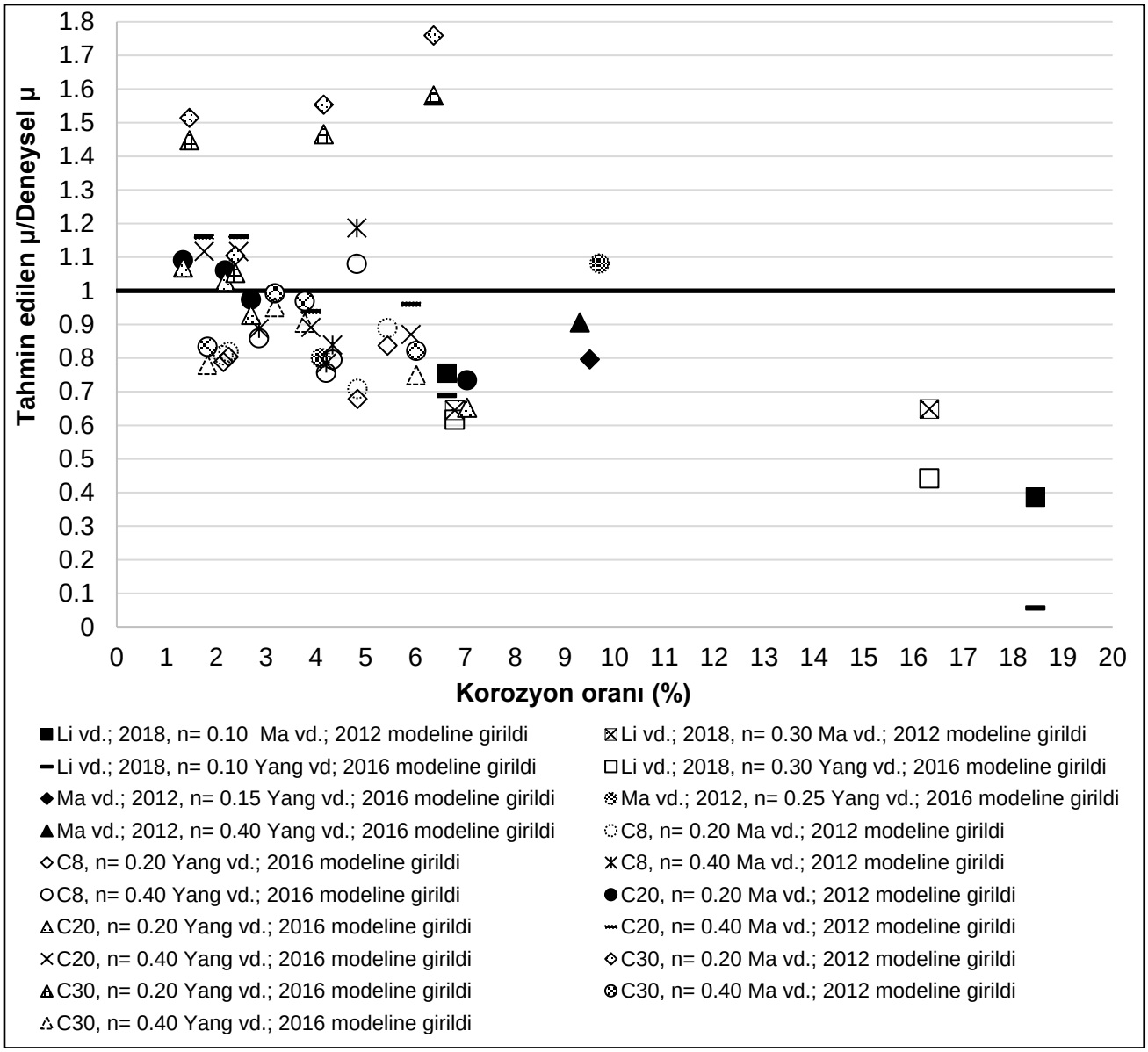
$$F_{uc} = F_{u0}\left(\frac{1}{1+0.033\times CL_L}\right) \tag{4.25}$$

4.5. Yer Değiştirme ve Enerji Bazlı Süneklik Oran Sonuçları

Her bir betonarme kolonunun süneklik oranları hesaplanarak Tablo 4.10'da özetlenmiştir. Betonarme kolonlarının süneklik oranları deplasman değerlerinin akma deplasman değerlerine bölünmesi ile elde edilmiştir ($\mu_D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$). Tablo 4.10'da tek doğrultu veya iki doğrultuda yükleme

göçme kriterlerinden elde edilen sonuçların paslanmış betonarme kolonlarının yer değiştirme süneklik oranları üzerine yapılacak değerlendirmeleri önemli ve çok etkin bir şekilde etkilemektedir. Farklı korozyon ve beton sınıflarında; elde edilen süneklik oranları pozitif ve negatif yükleme doğrultuları için belirli korozyon oranlarına kadar artmakta ve ardından azalmaktadır. Paslanmış betonarme kolonlarında artan süneklik oranlarına farklı çalışmalarda da rastlamak mümkündür (örneğin: Li vd., 2018). Mevcut çalışma için; süneklik oranlarının en belirgin şekilde artığı betonarme kolonları eksenel yükün 0.20 olduğu C8 paslanmış betonarme kolonlarıdır. 0.20 eksenel yük oran etkisinin az olduğu betonarme kolonlarında korozyon ürünün sağlamış olduğu sargı etkisi tek doğrultulu göçme kriteri için daha belirgin bir hal almaktadır. Artan yer değiştirme süneklik oranları ilk aşamada korozyon ürünün sağlamış olduğu sargı etkisi ile açıklanabilir. Artan sargılama etkisi ile birlikte aderans dayanımındaki artış ve buna bağlı olarak donatı sıyrılma değerleri düşük korozyon seviyelerinde azalmaktadır. Yalciner vd. (2012b) tarafından donatı çekme deneyleri ve korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerinin eğilme deneylerinden (Yalciner vd. 2018) elde edilen deney sonuçları bu durumu bir kez daha ortaya koymaktadır. 2012 yılında Yalciner vd. (2012b) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada; beton basınç dayanımın artması ile birlikte daha düşük korozyon oranlarında aderans kaybının düşük beton basınç dayanıma sahip betonarme elemanlarına göre daha erken meydana geldiği tespit edilmiştir. Artan süneklik oranlarının ikinci nedeni daha önce de açıklandığı üzere; korozyondan dolayı betonarme donatılarının prematüre olarak daha erken akması ve buna bağlı olarak akma yükünün azalmasıdır. İki doğrultudaki göçme kriteri göz önüne alındığında; $C8_{10,\ 4.82\%,\ 10.54\%,\ 0.40}$, $C20_{10,\ 5.91\%,\ 10.89\%,\ 0.40}$ ve $C30_{10,\ 6.02\%,\ 12.36\%,\ 0.40}$ paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranları %19.23, %15.62 ve %20.61% oranlarında azalmıştır.

Ma vd. (2012) ve Yang vd. (2016) tarafından paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarının tahmin edilmesi için önerilen iki ampirik model kullanılarak mevcut TÜBİTAK çalışmasından ve Li vd. (2018) tarafından deneysel olarak elde edilen süneklik oranlarının tahmini için kullanılmışlardır. İki modelin kullanılması ile tahmin edilen süneklik oranları deneysel verilere bölünerek tahmin edilen değerlerin deneysel verilere oranları Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 30: Ma vd. (2012) ve Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen süneklik oran değerlerinin deneysel değerlere oranı.

Şekil 4.30'da Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen model her ne kadar Li vd. (2018) tarafından elde deneysel verileri iyi bir şekilde tahmin edemese de geliştirilen model Ma vd. (2012) tarafından elde edilen deplasman süneklik oranlarını çok iyi bir şekilde tahmin etmiştir. Yang vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen modelde her ne kadar bahsedilmemiş olsa da geliştirilen modelde Ma vd. (2012) tarafından elde edilen deneysel verilerin geliştirilen modelde kullanıldığı olasılığı düşünülmektedir. Ma vd. (2012) ve Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen süneklik modelleri Li vd. (2018) yapmış olduğu çalışmadaki deneysel verileri büyük bir hata oranı ile tahmin edebilmektedir. Şekil 4.30'da iki modelin kullanılması ile tahmin edilen değerlerin deneysel verilere oranı 0.39 ve 0.75 arasında değişkenlik göstermektedir. Büyük farklılıkların elde edilmesinin en büyük nedeni geliştirilen modellerde sünekliğin her bir korozyon değeri için azalmasıdır. Li vd. (2018) yapmış olduğu çalışmada paslanmış betonarme

kolonlarının süneklik oranı korozyon oranına bağlı olarak her bir paslanmış betonarme kolonu için artmaktadır. Yang (2016) tarafından yapılan çalışmanın aksine; Ma vd. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmada %4.1 korozyon oranına kadar paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranı %15 oranında artmıştır. Paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranının arttığı diğer bir çalışma olan Guo vd.'lerinde (2015) %5.07 korozyon oranı için paslanmış betonarme kolonunun süneklik oranıda %4 artmıştır. Hernekadar; Ma vd. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmada paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranları belirli bir korozyon oranına kadar artsa da geliştirilen model azalım eğilimi göstermektedir. Ma vd. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışma tekrardan incelendiğinde; paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarındaki ani azalışların yalnızca korozyon oranından kaynaklanmadığı görülmektedir. Ani olarak düşen süneklik oranları artan eksenel yük değerinden kaynaklanmaktadır. Eksenel yükün artırıldığı ve ilgili korozyon oranı için kontrol kolonlarının deneyleri gerçekleştirilmediğinden dolayı geliştirilen modelde her bir korozyon oranı için paslanmış betonarme kolonlarının sünekliği azalmaktadır.

Mevcut literatürde paslanmış betonarme kolonlarının süneklik değerleri için elde edilen çelişkili (sünekliğin sürekli artması veya azalması) sonuçların en belirgin nedeni göz önüne alınan göçme kriteridir. Tersinir yükleme programlarında geleneksel betonarme kolonları için dahi pozitif ve negatif yöndeki kapasiteler enerji tüketimine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bundan dolayı, bir yönde artan süneklik değeri korozyon etkisi ile birlikte diğer yön için azalım eğilimi gösterebilir. Bundan dolayı, tersinir yüklemenin deney numuneleri üzerindeki yapısal davranış etkisi göz önüne alınarak iki doğrultudan elde edilecek ortalama göçme kriteri kabulünün daha doğru sonuçlar vereceği açık bir şekilde belirtilmelidir.

Sonuç olarak proje ekibi mevcut çalışma ve literatürdeki diğer deneysel verileri de (örneğin: Ma vd., 2012; Guo vd., 2015; Li vd., 2018) göz önüne alarak paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarının belirli bir korozyon oranına kadar arttığını açıkça ortaya koymaktadır. Ancak korozyonun karmaşık yapısından dolayı net bir artış ve ardından azalış için korozyon seviyelerini belirlemek oldukça güçtür.

Ma vd. (2012) ve Yang vd. (2016) tarafından korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarının tahmin edilmesi için geliştirilen modeller mevcut TÜBİTAK çalışması içinde oldukça birbirine yakın performanslar göstermiştir. Tahmin edilen süneklik oranlarının deneysel verilere en küçük oranları; C8, C20 ve C30 betonarme kolonları için sırasıyla 0.68, 0.73 ve 0.75' tir. Şekil 4.30'da Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen modele kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni Ma vd. (2012) tarafından geliştirilen modelin ortalama korozyon oranlarını göz önüne almasıdır. Ma vd. (2012) geliştirdikleri modelde boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranını göz önüne alırken; Yang vd. (2016) maksimum korozyon oranlarını göz önüne almaktadır. Bilindiği

üzere; betonarme elemanlarında plastik şekil değiştirmelerin ölçütü sargılama etkisi (etriyelerin etkisi) ile gerçekleşmektedir. Tablo 4.1-4.6'da sunulan ortalama korozyon oranları ile etriyelerde meydana gelen ortalama korozyon oranları arasında oldukça güçlü bir ilişki vardır. Etriyelerdeki ortalama korozyon oranlarının boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranlarına oranlarının varyasyonu 0.18'dir. Bundan dolayı etriyelerde meydana gelen korozyonun yapısal davranış üzerine etkisini yansıtabilmek için; maksimum korozyon oranı yerine ortalama korozyon oranlarının göz önüne alınması daha iyi sonuçlar vermektedir. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı; mevcut çalışma için paslanmaya maruz kalmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarını tahmin etmek için geliştirilen modelde ortalama korozyon oranı göz önüne alınmıştır.

Li vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada betonarme kolonlarının süneklik oranı her bir korozyon oranı için artmaktadır. Söz konusu çalışmada betonarme kolonlarının enerji tüketme kapasiteleri azalırken; süneklik oranlarının artması beklenmedik bir durumdur. Korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarının süneklik oranlarının korozyon oranına bağlı olarak artması ve azalması konusundaki çelişkilerin en belirgin nedeni mevcut çalışmalarda göz önüne alınan tek doğrultulu göçme kriteri ve histerik döngülerde kullanılan idealleştirme yöntemidir. Mevcut çalışmalarda eşdeğer enerji yöntemi (Zhou, 2009) olarak kullanılan ve Şekil 4.27'de gösterilen betonarme kolonlarının akma yükünün ve karşılık gelen yer-değiştirmenin hesaplanması için kullanılan yöntem paslanmış betonarme elamanları için yanlış bir sonuca neden olmaktadır. Korozyon dolayı daha erken akan betonarme elemanının süneklik oranı yer-değiştirme süneklik yönteminin ($\mu_D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$) kullanılması ile birlikte; korozyonun betonarme elemanlarının sünekliğini artırması şeklinde yanlış bir sonuca neden olmaktadır. Korozyon dolayı azalan akma yer-değiştirmesi (Δ_y) paslanmış betonarme elemanlarının süneklik oranlarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca eşdeğer enerji yöntemi (Şekil 4.27) kesitin akmaması durumunda dahi bir akma noktası belirleyerek ve korozyondan dolayı daha erken akan kesit ile birlikte betonarme elemanının süneklik oranının artmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarının süneklik oranlarının enerji yöntemine ($\mu_E = \frac{\Sigma E}{E_y}$) bağlı olarak hesaplanması gerektiği saptanmıştır.

Tablo 4.10'da süneklik indekslerinin enerji yöntemine göre hesaplandığı betonarme kolonlarının süneklik oranları daha doğru sonuçlar vermektedir. Açık bir şekilde enerji tüketme kapasitelerini azalan betonarme elemanlarının süneklik değerlerinin artması durumu beklenmedik bir durum olup, enerji baslı yöntemin kullanılmasını açık bir şekilde işaret edilmektedir. Tablo 4.10'da verilen deneysel veriler kullanılarak paslanmış betonarme kolonlarının süneklik oranlarını tahmin etmek için geliştirilen model Denklem 4.26'da verilmiştir.

Geliştirilen model deney sonuçlarının yalnızca sünekliğin azaldığı eğilimlerini göz önüne almaktadır.

$$\mu_c = \mu_0(0.91^{CL_L}) \tag{4.26}$$

4.6. Enerji Yutma Kapasite Sonuçları

Betonarme ve diğer yapı sistemleri için önemli diğer bir deprem göstergesi enerji yutma-tüketme kapasitesidir. Deneyi gerçekleştirilen tüm betonarme kolonları için toplam enerji yutma kapasiteleri Denklem 4.27 yardımı ile hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 4.10'da özetlenmiştir.

$$E = \Sigma_{i=1}^{n} E_i \tag{4.27}$$

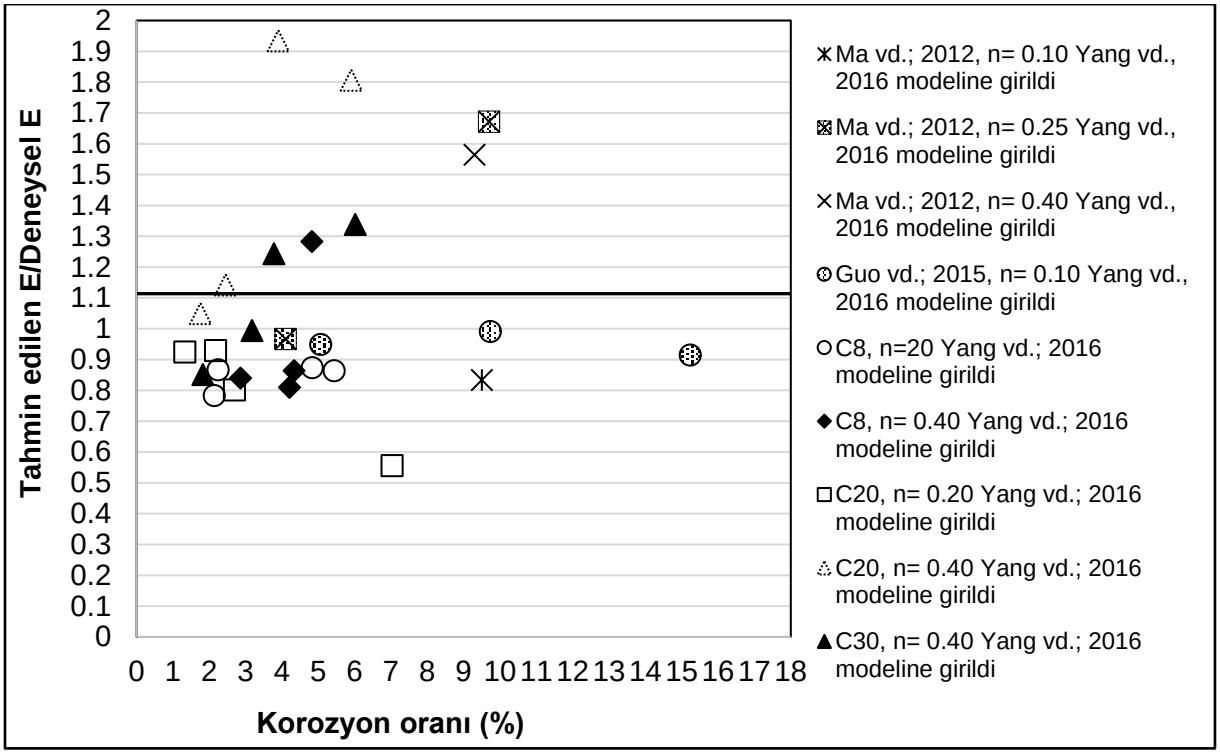
Denklem 4.27'de E her bir pozitif (E_i^+) ve negatif (E_i^-) döngü çevirimlerinde tüketilen toplam enerji tüketme kapasitesini simgelemektedir. Denklem 4.27'de betonarme kolonları için tüketilen toplam enerji kapasiteleri maksimum yükün %85'ine düştüğü (nihai yük) değerine kadar olan çevirimler için göz önüne alınmıştır.

Mevcut literatürde paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri bakımından çelişkili sonuçlar yer almaktadır. Ma vd. (2012) %14 korozyon oranına kadar paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasitelerinin arttığını ve ardından azaldığını; Meda vd. (2014) %20 korozyon oranına kadar arttığını belirtirken, Guo vd. (2015), Liu vd. (2017), Yang vd. (2016), Yuan vd. (2017) tarafından yapılan çalışmalarda paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasitelerinin paslanmamış betonarme kolonlarına oranla azaldığı belirtilmiştir. Tespit edilen bu çelişki; daha önce paslanmış betonarme kolonlarında yer değiştirme süneklik oranları içinde belirtilen çelişkili sonuçları destekler niteliktir. Bilindiği üzere betonarme kolonları için plastik mafsal bölgesinde büyük miktarda elastik olmayan enerji tüketebilme yeteneği artan süneklik oranlı ile ilişkilidir. Tablo 4.10'da özetlenen değerler ışığında paslanmış betonarme kolonlarının akma dayanımlarının azalması ve korozyonun sağlamış olduğu sargılama etkisi nedeni ile paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri az miktarda da olsa artış göstermiştir. Korozyon oranın artması ve buna bağlı olarak aderans dayanımının özellikle donatıyı sargılayan beton paspayında meydana gelen hasarlar nedeni ile azalması, donatı ve betonun mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesi sonucunda paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri azalım eğilimi göstermiştir. Bu bağlamda gerçekleştirilen bu çalışma sayesinde paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri için elde edilen hem artış hem de azalım değerleri mevcut literatürde bugüne yapılan çalışmaları çok iyi bir şekilde kapsamaktadır. Daha önce bahsedilen deneysel çalışmalarda tek bir beton sınıfının ve eksenel yükün kullanılması ve gerçek korozyon oranlarının elde edilmemesi sonucunda; diğer bir ifade ile gerçekleştirilen çalışmaların

deneysel programlarındaki bağımlı değişkenlerinin sınırlı olması sebebi ile çelişkili sonuçlar korozyonun karmaşık etkisi nedeni ile artmıştır.

Tablo 4.10'da C8 betonarme kolonlarının enerji kapasiteleri ilk iki korozyon seviyesi için artmakta ve ardından artan korozyon oranı ile birlikte azalmaktadır. C20 ve C30 betonarme kolonlarında ise paslanmış betonarme kolonlarının süneklikleri her bir korozyon oranı için azalmaktadır. Bu durum daha önceden de bahsedildiği üzere korozyonun farklı beton basınç dayanımları üzerine etkisinden dolayıdır (Yalciner vd. 2012b). Bilindiği üzere betonarme kolonları için plastik mafsal bölgesinde büyük miktarda elastik olmayan enerji tüketebilme yeteneği artan süneklik oranı ile ilişkilidir. Bundan dolayı yer değiştirme süneklik oranları için geliştirilen modellerin enerji yutma kapasiteleri ile ilişkili olması gerekmektedir. Tablo 4.10'da iki doğrultu göçme kriterine göre sürekli azalım gösteren paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri tersinir yükleme deneyleri için süneklik açısından iki doğrultunun göz önüne alınması gerektiğini açık bir şekilde işaret etmektedir.

Yang vd. (2016) tarafından paslanmış betonarme kolonlarının enerji yutma kapasitelerini tahmin etmek için geliştirilen ampirik model mevcut çalışma, Ma vd. (2012) ve Guo vd. (2015) tarafından elde edilen deneysel verilerinin tahmin edilmesi için kullanılarak geliştirilen modelin güvenirliği değerlendirilmiştir. Tahmin edilen enerji yutma kapasiteleri bahsedilen çalışmalardaki deneysel verilere bölünmesi ile elde edilen oranlar Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 31: Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen model kullanılarak paslanmış betonarme kolonları için tahmin edilen enerji tüketme değerlerinin deneysel değerlere oranı.

Şekil 4.31'de 0.18'lik tek bir eksenel yükün kullanılması ile geliştirilen Yang vd. (2016) enerji modeli düşük korozyon oranları ve 0.25 eksenel yük değerine kadar Ma vd. (2012) tarafından elde edilen deneysel verileri iyi bir şekilde tahmin edebilmektedir. Daha ileri korozyon oranları ve artırılan eksenel yük değeri ile birlikte tahmin edilen enerji tüketme değerlerinin deneysel değerlere oranı Ma vd. (2012) için 1.56 ve 1.67 oranında değerler almıştır. Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen modelin eksenel yükün fazla olduğu ancak korozyon oranlarının düşük olduğu veya tam ters durum için güvenilir bir model olduğu söylenebilir. Bu durum Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen modelin kullanılması ile Gu vd. (2015) tarafından elde edilen deneysel verilerinin iyi bir şekilde tahmin edilmesi ile desteklenmektedir. Şekil 4.31'de Gu vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan eksenel yük değeri 0.10; Yang vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise 0.18'dir. Yalnızca birbirine yakın eksenel yük değerli değil; aynı zamanda eksenel yük değerlerinin düşük olması sebebi ile korozyonun yapı davranışı üzerine etkisi net bir şekilde ortaya çıkmamaktadır.

Mevcut çalışmadan elde edilen deney sonuçları Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen modele girildiğinde ise; $46.8_{küp}$ MPa (C30) kullanıldığı betonarme kolonlarının enerji yutma kapasiteleri Yang vd. (2016) ($46.4_{küp}$ MPa) tarafından makul seviyelerde tahmin edilmiştir. Şekil 4.32'de C30 betonarme kolonları için tahmin edilen oranlar 0.85 ile 1.34 arasında değerler almıştır. Her ne kadar; Yang vd. (2016) tarafından geliştirilen çalışmadaki maksimum korozyon oranları mevcut çalışmadaki korozyon oranlarını kapsamış olsa da; beton sınıfının azalması ile birlikte hesaplanan değerler 1'den uzaklaşmıştır. C20 betonarme kolonları için en düşük tahmin edilen enerji değerlerinin deneysel verilere oranı 1.93'tür. Bu durum korozyonun farklı beton basınç dayanımları üzerine olan etkisini bir kez daha belirtmektedir. Paslanmış ve düşük beton sınıfına ait betonarme kolonlarının enerji yutma kapasitelerini hesaplamak oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Çagatay (2005) tarafından yapılan çalışmada; 1998 Adana Ceyhan ve 1999 İzmit depremlerinde yıkılan birçok betonarme binasındaki beton basnıç dayanımlarının 10 MPa'dan düşük olduğu belirtilmiştir. Aynı şekilde; Shimizu vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada 1926 ve 1980 yıllarında Japonya'da inşa edilen birçok betonarme binasında kullanılan beton sınıfının 13 ve 10 MPa'ın altında olduğu belirtilmiştir. Korozyonun düşük beton sınıfında sağlamış olduğu daha yüksek sargılama etkisi nedeni ile; mevcut çalışma kapsamında korozyona maruz kalmış betonarme kolonları için beton basınç etkisini de göz önüne alarak iki ampirik model geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller Denklem 4.28 ve 4.29'da sırasıyla verilmiştir.

$$E_c = E_0(1 + 0.34 \times CL_L - 0.19 \times CL_L^{1.5} \tag{4.28}$$

$$E_c = E_0 \frac{1}{1 + 0.024 \times C_L + 0.035 CL_L^2} \tag{4.29}$$

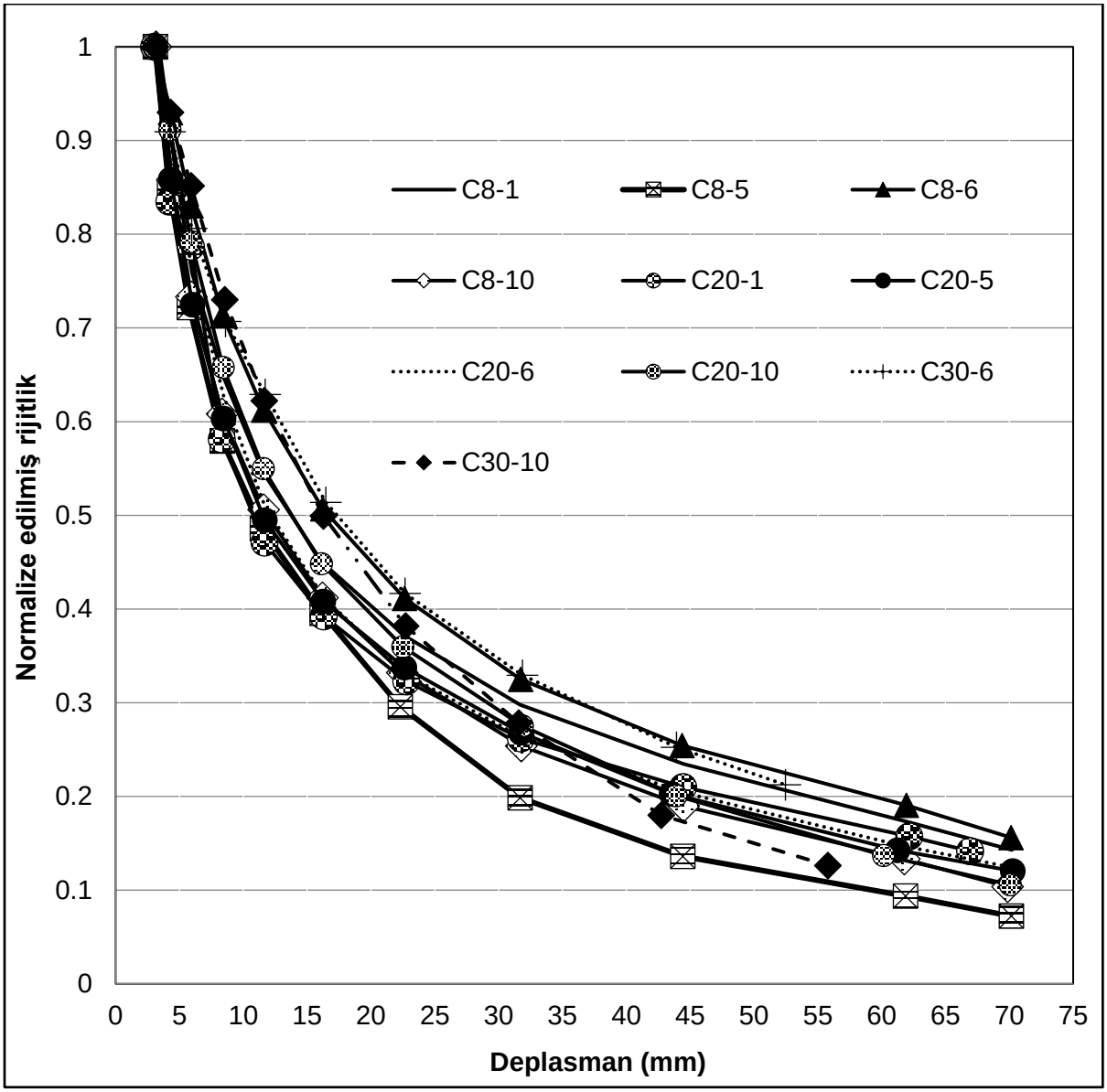
4.7. Betonarme Kolonları İçin Elde Edilen Rijitlik Değerleri

Her bir betonarme kolonu için edilen rijitliker Sun vd. (2008) tarafından tanımlanan modele göre Denklem 4.30 ve 4.31 yardımı ile hesaplanmıştır:

$$K_\Delta = \frac{K_\Delta^+ + K_\Delta^-}{2} \tag{4.30}$$

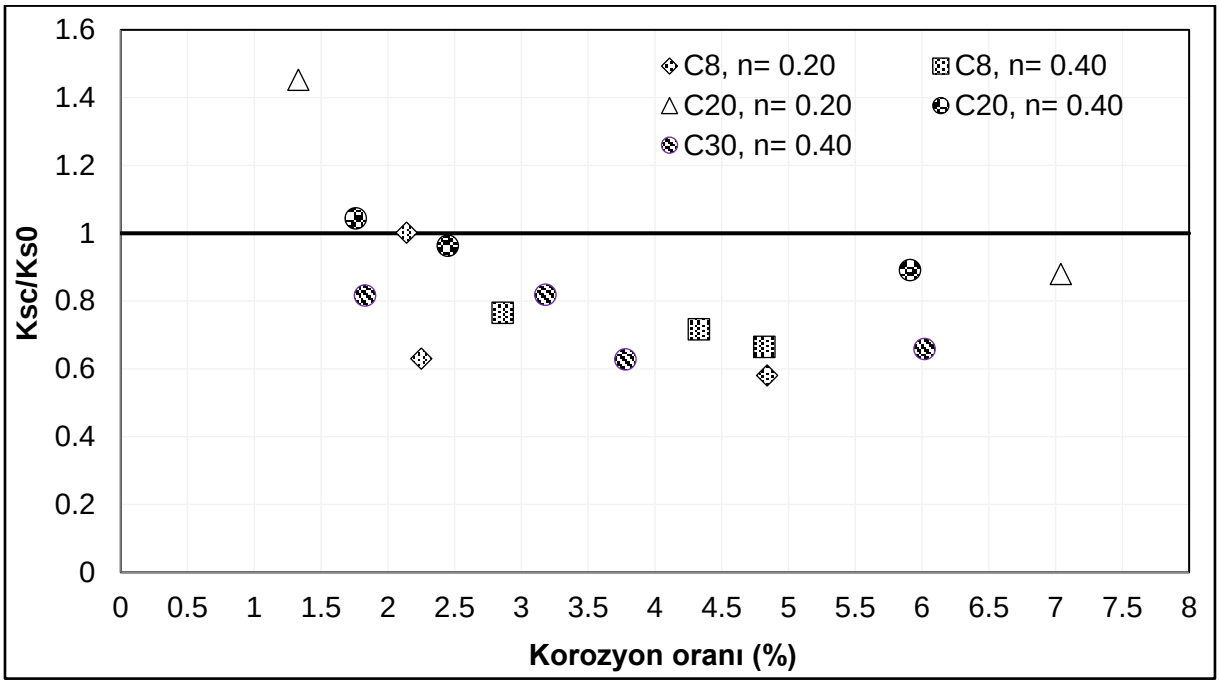
$$K_\Delta^+ = \sum_{j=1}^{3} \frac{F_{j,max}^+}{\sum_{j=1}^{3} \Delta_j^+} K_\Delta^- = \sum_{j=1}^{3} \frac{F_{j,max}^-}{\sum_{j=1}^{3} \Delta_j^-} \tag{4.31}$$

Denklem 4.31'de $F_{j,max}$ ve Δ_j sırasıyla her bir çevire karşılık gelen maksimum yük ve deplasman değerleridir. Her bir yerdeğiştirme için hesaplanan rijitlik değerleri ilk üç çevirimden elde edilen rijitlik değerlerine bölünerek normalize edilmiş ve Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 32: Normalize edilmiş rijitlikliklerdeki azalımlar.

Şekil 4.32'de, paslanmış betonarme kolonları üzerine yapılan farklı deneysel çalışmalar ve varılan sonuçlar mevcut çalışma ile birlikte çok iyi bir şekilde örtüşmektedir (Ma vd. 2014; Meda vd., 2014; Liu vd., 2017; Carlo vd. 2017). Şekil 4.32'de gösterildiği üzere betonarme donatısında meydana gelen korozyon betonarme kolonlarının birincil rijitlikleri üzerine etkisi yok denecek kadar zayıftır. İki farklı ve farklı beton basınç dayanımları için elde edilen ortalama normalize edilmiş ikincil rijitlikler (K_s) Ma vd. (2012) tarafından tanımlanan yönteme göre hesaplanmıştır. Paslanmış betonarme kolonlarının ***ortalama normalize edilmiş*** ikincil rijitliklerinin (K_{sc}) ortalama normalize edilmiş paslanmamış betonarme kolonlarına oranı Şekil 4.33'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 33: Ortalama ikincil rijitlikler.

Şekil 4.33'de gösterildiği üzere; en düşük korozyon oranı için artan rijitlikler; korozyon oranın artması ile birlikte betonarme kolonlarının ortalama normalize edilmiş ikincil rijitlkeri azalmaktadır. Bu azalımdaki en belirgin nedenlerden biri beton boyuna ve sargı donatılarının beton yüzeyine uygulandığı basınç etkisi ile birlikte çatlakların artmasıdır. Eksenel yük oranının 0.40 olduğu; en çok paslandırılan betonarme kolonları olan $C8_{10}$ ve $C30_{10}$ kolonlarındaki ortalama normalize edilmiş ikincil rijitlik azalımları sırasıyla %36 ve %34 değerlerin de olup; $C20_{10}$ betonarme kolonlarındaki azalım değerlerinden fazladır. Bu durum C8 betonarme kolonlarının için düşük taşıma kapasite dayanımları ile açıklanabilirken, C30 betonarme kolonları için ise korozyon oranının yüksek beton basınç dayanımı üzerine olan ve Yalciner vd. (2012b) tarafından ortaya konulan çalışma ile açıklanabilir. Şekil 4.33'de eksenel yük oranın 0.20 olduğu $C20_5$ betonarme kolonundaki ikincil rijitlik azalımı %12 iken; bu değer $C8_5$ betonarme kolonu için %42'dir. Elde edilen deneysel sonuçlar açık bir şekilde Yalciner vd. (2012b) tarafından ortaya konulan ve korozyon oranının yüksek beton basınç dayanımlarında

betonunu gevrekliğini artırdığı durumu desteklemektedir. Şekil 4.33'de Ma vd. (2012) tarafından ve beton basınç dayanımın 32.4 MPa olduğu deneysel çalışmadan geliştirilen ampirik model; C20-n= 0.40 ($f_{c\text{-küp}}$= 34.7 MPa) betonarme kolonlarını yüksek bir performans ile tahmin edebilirken; bu durum C8 ve C30 betonarme kolonları için beklenin üzerinde tahminler olarak tespit edilmiştir. Korozyona maruz kalmış C8 ve C30 betonarme kolonlarının ortalama normalize edilmiş ikincil rijitliklerinin (K_{sc}) paslanmamış betonarme kolonlarının ortalama normalize edilmiş ikincil rijitliklerine (K_{s0}) oranlarını tahmin edilebilmesi için geliştirilen model Denklem 4.32'de gösterildiği üzeredir.

$$\frac{K_{sc}}{K_{s0}} = (1 + CL_L)^{-0.24} \tag{4.32}$$

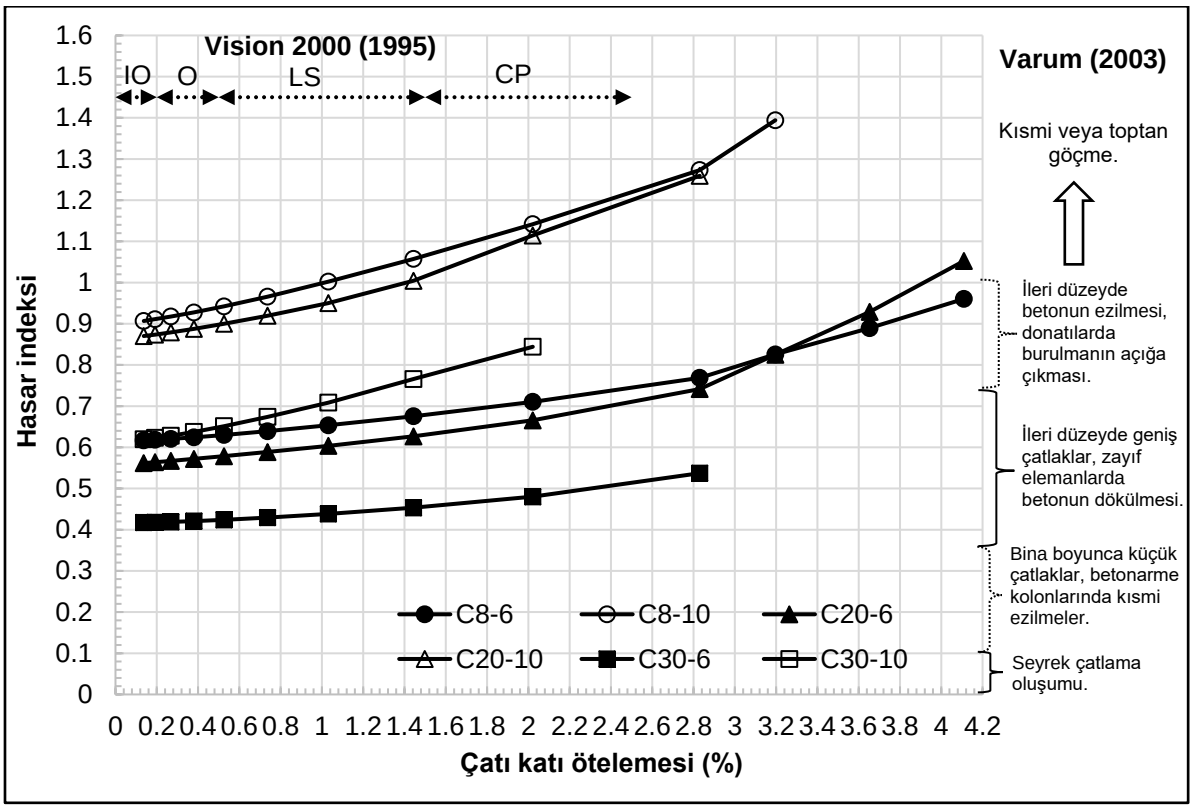
4.8. Betonarme Kolonlarının Hasar İndeksleri

Çalışma kapsamında deneye tabi tutulan betonarme kolonlarının sismik davranışlarının hasar indeksleri bakımında değerlendirmeye alınması oldukça önemlidir. Bundan dolayı her bir betonarme grubunda yer alan kolonlardan en çok korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının hasar seviyeleri hesaplanmıştır. Betonarme kolonlarının hasar seviyeleri Park ve Ang (1985) modeline göre Denklem 4.33'de yardımı ile hesaplanmıştır.

$$D_i = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \tag{4.33}$$

Denklem 4.33'de δ_m ve δ_u sırası ile sismik ve monotonik yükler etkisi altında maksimum ve nihai deformasyonu, Q_y donatı akmasına karşılık gelen akma dayanımını, dE artırımsal emilen edilen histerik enerjiyi, ve β ise Park vd. (1987) tarafından çevirimsel yüklemenin yapı hasarına etkisini ifade eden parametre olup 0.05 olarak alınmıştır. Denklem 4.33'de sunulan δ_m, Q_y, ve dE deneysel verilerden elde edilmiştir. Deneysel olarak monotonik yüklemesi yapılan kolonlardan $C30_1$'den $C30_5$'e ve çevirimsel yüklemesi yapılan $C30_6$'dan $C30_{10}$'a kadar olan kolonlar arasındaki ilişki; monotonik yüklemesi yapılmayan C8 ve C20 betonarme kolonlarındaki nihai deformasyonun (δ_m) tahmini için kullanılmıştır. Tablo 4.10'da gösterildiği üzere; $C30_{1\text{-}5}$ betonarme kolonları (monotonik yüklemeye maruz kalmış) $C30_{6\text{-}10}$ (çevrimsel yüklemeye maruz kalmış) betonarme kolonlarının nihai yükleri bakımından güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Monotonik yükleme sonucunda elde edilen nihai yüklerin çevirimsel yüklenen betonarme kolonlarına oranı paslanmamış betonarme kolonları için ($C30_1/C30_6$) 0.62; en düşük korozyon oranına sahip betonarme kolonları ($C30_2/C30_7$) için ise 0.63'tür. Elde edilen bu oranlar; diğer betonarme kolonları için ise ($C30_{3\ldots5}$/ $C30_{8\ldots10}$); sırasıyla 0.88, 0.87, ve 0.88'dir. Elde edilen bu değerler, monotonik yüklemesi yapılmayan diğer betonarme kolonlarının yüklemesi yapılmayan C8 ve C20 betonarme kolonlarının nihai deformasyonun (δ_m) tahmini için kullanılmıştır. Şekil 4.34'de Vision 2000'e (1995) göre ötelenme oranlarına

karşılık gelen betonarme kolonlarının performans seviyeleri ve Varum 2003'e görede hasar indeksleri gösterilmiştir.



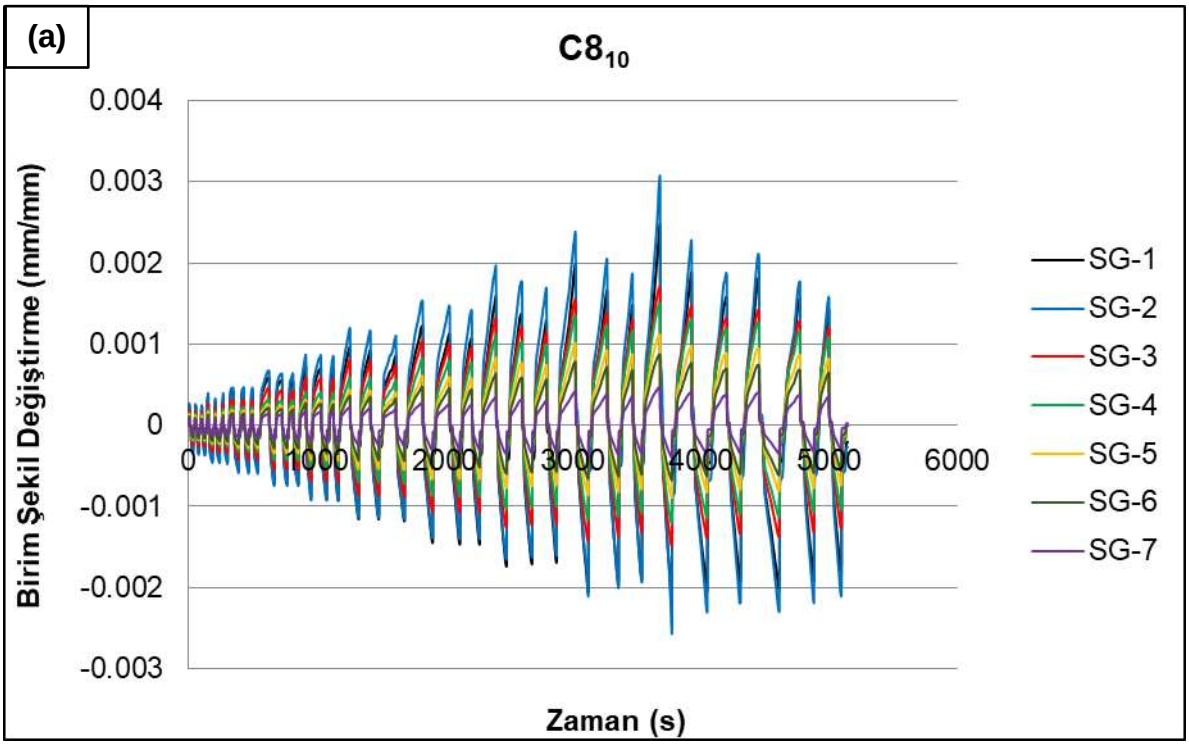
Şekil 4. 34: Hasar indeksi.
IO: Hemen kullanılabilir, O: Sınırlı hasar, LS: Can güvenliği, CP: Göçme öncesi.

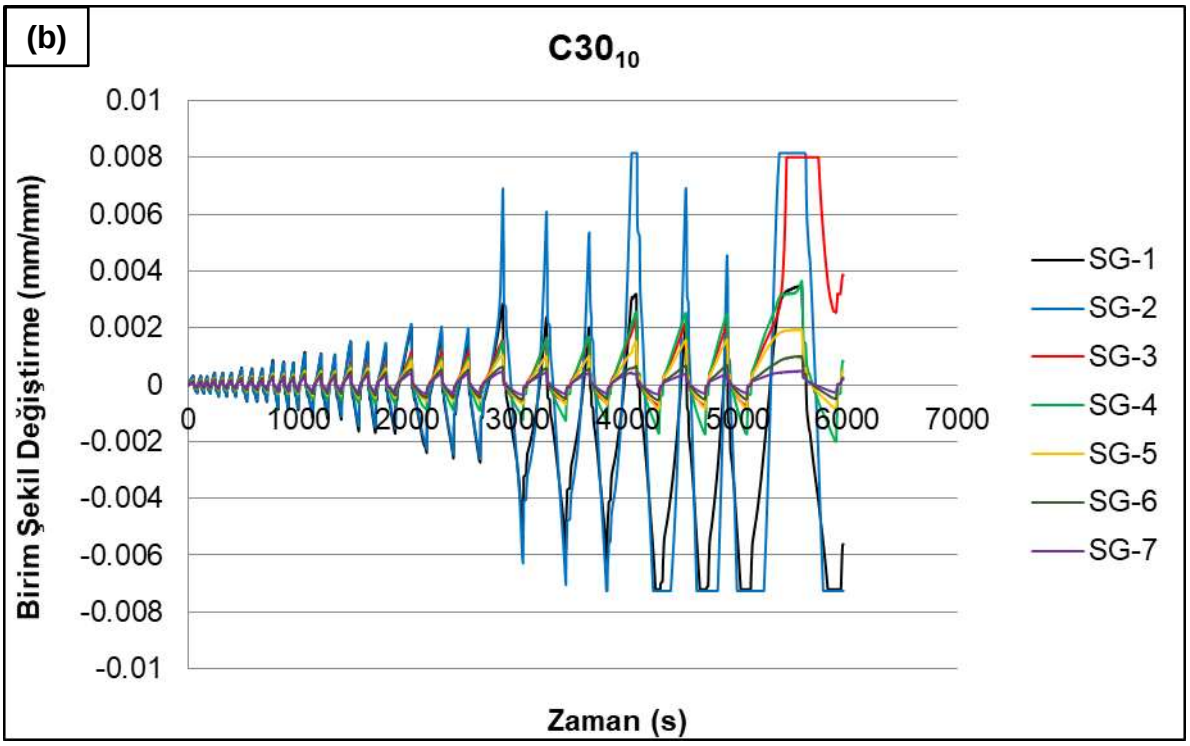
Şekil 4.34'de gösterildiği üzere korozyon oranının artması ve beton basınç dayanım azalması ile birlikte betonarme kolonlarının hasar indeksleri artmaktadır. $C30_{10}$ betonarme kolonun hasar indeksi %0.2 ötelenme oranı için (hemen kullanılabilirlik performans seviyesi) 0.62 iken; $C8_{10}$ ve $C20_{10}$ betonarme kolonlarının hasar indeksleri sırası ile 0.91 ve 0.87 olarak hesaplanmıştır. Vision 2000'e (1995) göre; öteleme oranının %1.5'den az olması durumunda (can güvenliği performans seviyesi) geleneksel yapılar için onarım mümkündür. Fakat; Şekil 4.34'de görüldüğü üzere; $C8_{10}$ ve $C20_{10}$ betonarme kolonları için öteleme oranının %1.5 olması durumunda hesaplanan hasar indeksi 1'den büyüktür. Bundan dolayı; betonarme kolonlarının performans seviyeleri korozyondan dolayı etkin bir şekilde etkilenmiştir. Bu durum; korozyona maruz kalmış betonarme elamanları için hasar indekslerinin yeniden tanımlanması gerektiğini açıkça işaret etmektedir. Belirlen ötelenme oranına karşılık gelen tanımlanmış hasar indeksleri; korozyondan dolayı aynı ötelenme oranı için yeni bir hasar indeksinin tanımlaması zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

4.9. Aderans-Sıyrılma Sonuçları

Yükleme deneyleri tamamlanan betonarme kolonları için yukarıda belirtilen modellerinde geliştirilmesi ile birlikte aderans-sıyrılma modeline geçilmiştir. İlk aşamada her bir betonarme

kolon donatılarındaki gerçek aderans boyunun hesaplanması için kolon içerisinden çıkartılan betonarme donatıları için (farklı korozyon oranları için) çekme deneyleri yapılarak donatı mekanik özelikleri tanımlanmıştır. Yükleme deneylerinden sonra beton içerisinden çıkartılan ve ardından tartma işlemlerinin tamamlanması ile birlikte; betonarme kolonlarının kiriş bölgelerinden kolon temel yüzeyine doğru uzanan ve gerinim pullarının yapıştırıldığı (L8 boyuna donatısı) betonarme donatıları çekme deneyleri için belirlenen uzunluklarda kesilmiştir. Çekme deneyleri için kesilen boyuna donatılardaki korozyon oranlarının kesilmemiş betonarme donatısındaki korozyon oranına mümkün olduğunca yakın olmasına dikkat edilmiştir. Tablo 4.9'da gösterildiği üzere; kesilen kupon donatılar ile kesilmemiş boyuna donatılarındaki korozyon oranlarının mümkün olduğunca özdeş korozyon oranlarına sahip olmasına dikkat edilerek donatılar kesilmiştir. Kesilen paslanmış donatılar ile özdeş uzunluğa sahip kontrol donatıları (paslanmamış aynı uzunluktaki donatılar) korozyon oranlarının tespit edilmesi için kullanılmıştır. Aderans-sıyrılma modelinin geliştirilmesi için kullanılacak olan "paslanmış betonarme donatılarının" mekanik özelliklerinin belirlenmesinden sonra, her bir betonarme kolon donatısına yapıştırılan gerinim pullar yardımı ile kolon donatı boyunca zaman-gerinim grafikleri her bir betonarme kolonu için elde edilmiş ve seçilen betonarme kolon donatılarındaki zaman-gerinim grafikleri Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Seçilen diğer betonarme kolon donatılarındaki zaman-gerinim grafikleri ise Ek.4'de verilmiştir.





Şekil 4. 35: Zaman-gerinim grafikleri: (a) $C8_{10}$; (b) $C30_{10}$.

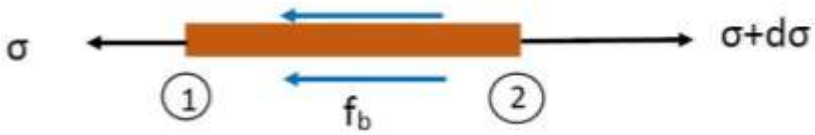
Her bir betonarme kolonu için zaman-gerinim grafiği elde edildikten sonra, aderans boyunun hesaplanması için donatı boyunca yapıştırılan gerinim pullarından kritik gerim pulu aderans boyunun hesaplanması için tespit edilmiştir. Mevcut literatürde aderans boyu ve donatı gömme boyu kavramlarındaki karışıklık nedeni ile; proje kapsamında aderans boyu tanımının üzerinden tekrardan geçilmiştir. Aderans boyu gerilim değerinin sıfır olduğu noktadan (çoğunlukla serbest uç) donatının akma gerilimine ulaştığı mesafedir. Bölüm 2'de Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen model gerçek aderans boyunun doğru bir şekilde tanımlanması için tekrardan bu bölümde de ele alınmıştır. Bölüm 2 ve Şekil 2.1(c)'de gösterilen A noktası serbest uç olup gerilim değerinin sıfır noktadır. Elastik aderans boyu ise A noktası ile donatının akma gerilimine ulaştığı B noktası arasındaki mesafedir. Şekil 4.35'de verilen zaman-gerinim garifiklerinden geriniminin sıfır olduğu (A noktası) ve donatının akma gerimine (B noktası) ulaştığı donatı boyu belirlenerek gerçek aderans boyu elastik ve plastik bölgeler deneyi gerçekleştirilen her bir betonarme kolonu için elde edilmiştir. Elde edilen gerçek aderans boyu donatı sıyrılmasının doğru bir şekilde hesaplanması için göz önüne alınması gereken en önemli parametrelerden bir tanesidir. Bölüm 2 ve Şekil 2.1(b)'de gösterildiği üzere, donatı sıyrılması birim şekil değiştirmenin gerçek aderans boyuna bağlı olarak elde edilen dağılımın altındaki alandır. Deneysel olarak elde edilmesi gereken gerçek aderans gerilmesi (idealleştirilmemiş veya teorik olarak hesaplanmayan) ise elde edilen gerilmenin eğimidir. Bu noktada özellikle yükleme programına bağlı olarak (monotonik veya tersinir) hesaplanacak olan aderans gerilmesine dikkat edilmesi gerekmekte olup; gerçek aderans gerilmesinin doğru bir şekilde hesaplanması için gereken bilgiler aşağıda özetlenerek açıklanmıştır. Daha önce

de belirtildiği üzere aderans gerilmesi donatı boyunca elde edilen gerilmenin eğimidir ve genel bir ifade olarak Denklem 4.34 ile gösterilebilir.

$$f_b = \frac{\left(\frac{d_b}{4}\right) \mathrm{d}\sigma}{\mathrm{dx}} \tag{4.34}$$

Denklem 4.34 deneysel olarak ise Denklem 4.35 şekli ile gösterilmelidir ve Denklem 4.35'de *Δx* aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere ardışık iki nokta arasındaki mesafedir.

$$f_b = \frac{\left(\frac{d_b}{4}\right) \Delta\sigma}{\Delta\mathrm{x}} \tag{4.35}$$



Şekil 4. 36: Donatı boyunca gerilme dağılımı.

Elastik durumdaki aderans gerilmesi;

Şekil 4.36'da donatı iki nokta arasında elastik durumda ise; donatıdaki gerilme:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{4.36}$$

ve böylece gerilmenin eğimi Denklem 4.37 şekli ile yazılabilir:

$$\frac{d\sigma}{dx} = E\frac{d\varepsilon}{dx} \tag{4.37}$$

Denge denklerimi yazılarak;

$$Ad\sigma = f_b\, pdx\,; P = \pi d_b\,;\, A = \left(\frac{\pi {d_b}^2}{4}\right) \tag{4.38}$$

Δx ile ayrılmış ayrık noktalar için Denklem 4.39 yazılarak **elastik durumdaki aderans** hesaplaması yapılabilir:

$$f_b = \frac{\left(\frac{\mathrm{E}d_b}{4}\right) d\epsilon}{dx} = \frac{\left(\frac{Ed_b}{4}\right) \Delta\epsilon}{\Delta x} \tag{4.39}$$

Elastik ötesi durumdaki aderans gerilmesi;

I. Eğer donatı elastik-tam plastik (E^*=0),

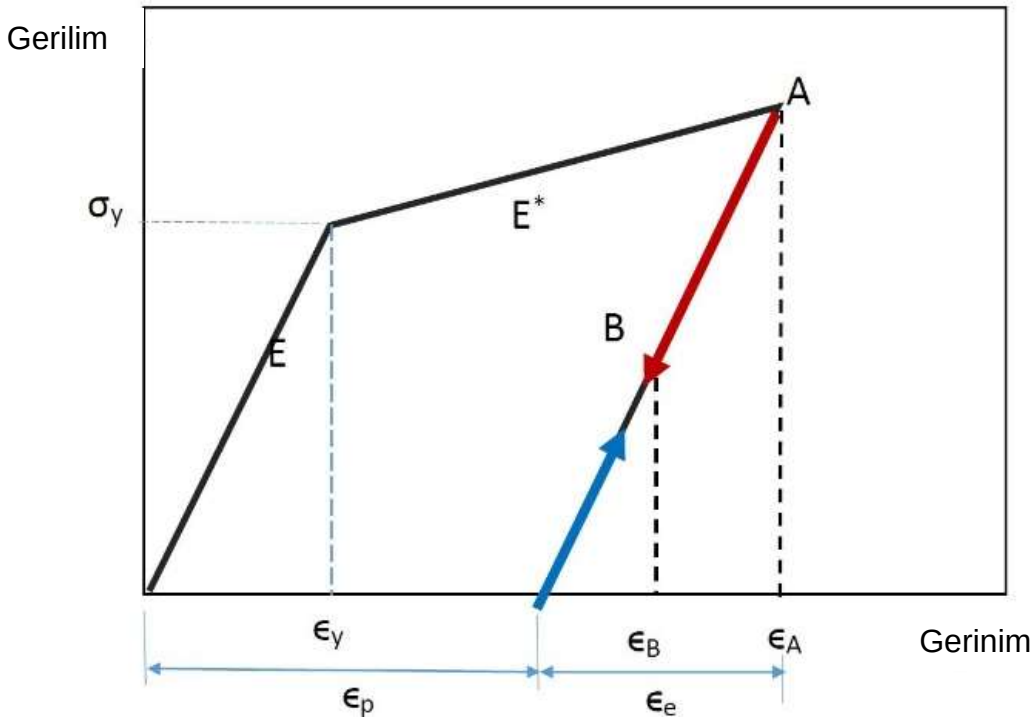
Şekil 4.36 nokta 1'de birim şekil değiştirmenin akma birim şekil değiştirmeden az olduğu (elastik) ve nokta 2'de akma birim şekil değiştirmeden büyük olduğu (plastik) varsayılırsa; böyle bir durumda $\sigma_1 = E\varepsilon_1$,ve $\sigma_2 = \sigma_y$ ve iki nokta arasındaki gerilme eğimi $\frac{\Delta\sigma}{\Delta x} = \frac{\sigma_y - \sigma_1}{\Delta x}$ şeklinde olacaktır. Bu gerilme eğimi Denklem 4.34'e girilerek aderans gerilmesi elde edilir.

Eğer nokta 1 ve nokta 2'deki her iki birim şekil değiştirime akma birim şekil değiştirmesinden büyük ise; böyle bir durumda $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_y$ ve $\frac{\Delta\sigma}{\Delta x} = 0$ eşit olacak ve aderans gerilmesi sıfır olacaktır.

II. Şekil 4.37'de gösterildiği üzere eğer donatı pekleşme ile elastik-plastik ise; herhangi bir noktadaki gerilme akma birim şekil değiştirmesinden ölçülen büyük bir birim şekil değiştirmesi ile aşağıdaki Denklem ile ifade edilmelidir:

$$\sigma = E\sigma_y + E^* (\varepsilon - \varepsilon_y) \quad (4.40)$$

Eğer birim şekil değiştirme akma birim şekil değiştirmesinden küçük ise; ardından $\sigma = E\varepsilon$ eşit olacaktır ve gerilme eğimi yukarıdaki denklemler yardımı ile hesaplanmalıdır.



Şekil 4. 37: Aderans gerilmesi hesabı için durum şartları.

Tersinir yükleme diğer bir ifade ile yükün boşaltılması durumunda ise aşağıda sunulan özet bilgilerin dikkatlice ele alınması gerekmektedir. Şekil 4.37'de yüklemenin boşaltılması kırmızı ok yardımı ile gösterilmektedir. Yüklemeye başlamadan önceki nokta A; A noktasındaki birim şekil değiştirme ise ε_A ve A noktasındaki gerilme aşağıdaki ifade ile gösterilmelidir:

$$\sigma_A = E\varepsilon_y + E^* (\varepsilon_A - \varepsilon_y) \quad (4.41)$$

B noktasında belirli bir oran boşaltmadan sonra ölçülen birim şekil değiştirme εB ve gerilme ise aşağıdaki şekli ile ifade edilmelidir:

$$\sigma_B = \sigma_A - E (\varepsilon_A - \varepsilon_B) \quad (4.42)$$

Bu noktada boşaltmanın elastik ve eğimin *E* olduğuna dikkat edilmelidir. Böylelikle herhangi bir boşalma noktası için Denklem 4.42 kullanılarak ölçülen birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme hesaplanabilir.

Tam yükün boşaltılmasından sonra; sırası ile:

$$\sigma_B = \sigma_A - E\,(\varepsilon_A - \varepsilon_B) = 0 \tag{4.43}$$

veya;

$$E\epsilon_B = E\varepsilon_A - \sigma_A \tag{4.44}$$

veya;

$$\varepsilon_B = \varepsilon_A - \frac{\sigma_A}{E} \tag{4.45}$$

Denklem 4.45 ise denklem 4.46 şekli ile gösterilebilir:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_t - \varepsilon_e \tag{4.46}$$

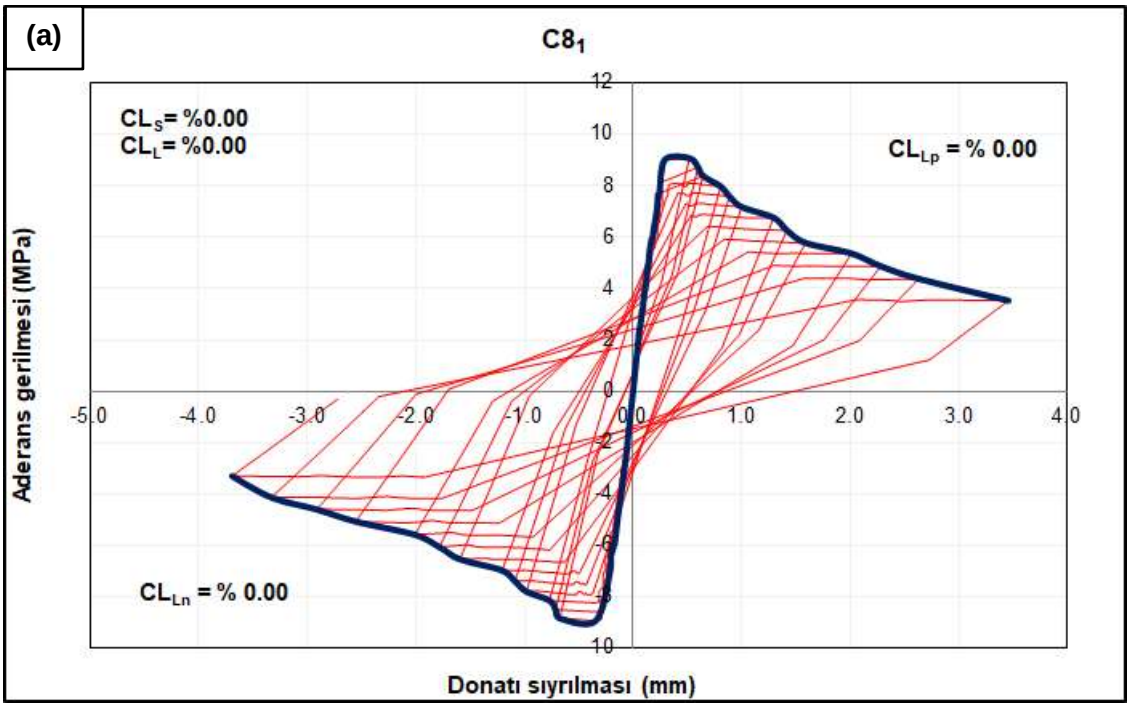
Denklem 4.46 yükleme sırasında oluşan plastik birim şekil değiştirme miktarının; yükleme devam ederken A noktasına kadar elde edilen toplam birim şekil değiştirme miktarından, A noktasından sonra elastik boşaltma ($\varepsilon_A = \frac{\sigma_A}{E}$) işlemi ile elde edilen elastik birim şekil değiştirme miktarından çıkarılarak kullanılabileceği ifade etmektedir.

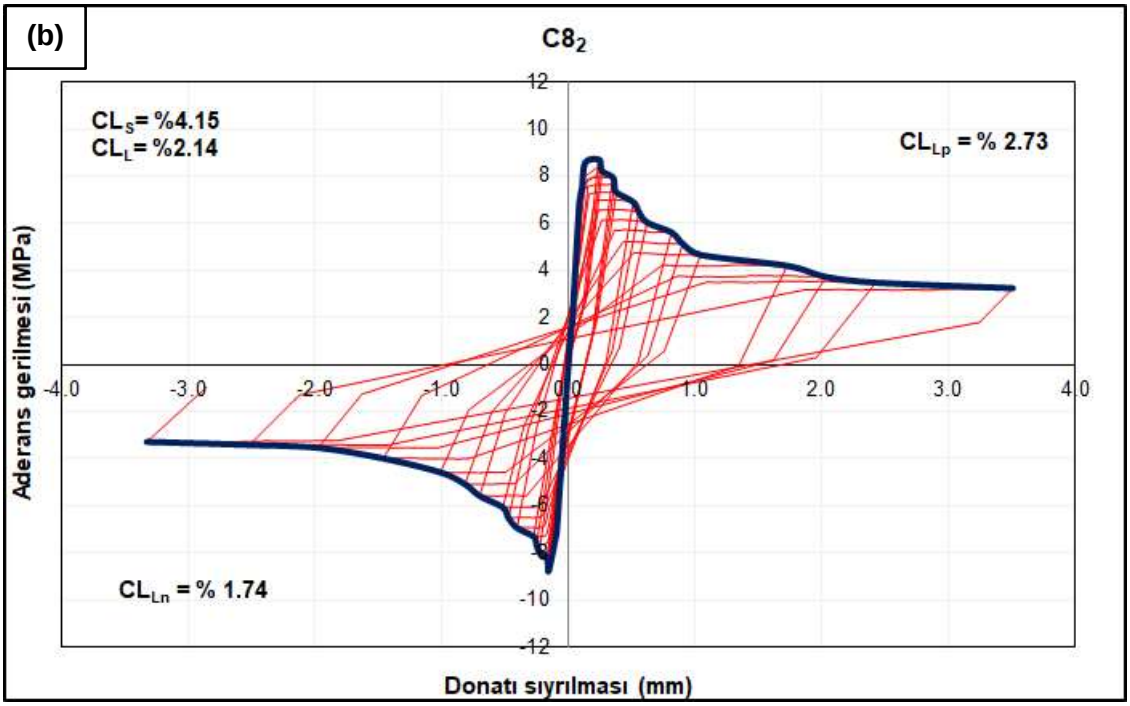
Buna göre, herhangi bir yükleme seviyesindeki iki nokta arasındaki aderans gerilmesini bulmak için, yukarıda verilen ilgili formüllerden birisi kullanılarak (yükleme veya boşaltma olup olmadığı göz önünde bulundurularak) belirli yükleme için iki noktadaki gerilmeler hesaplanır ve ardından gerilme eğimi bulunur ve aderans gerilmesini bulmak için Denklem 4.33'de kullanılır. Tam boşaltmaya kadar herhangi bir gerilme bulunmamakla beraber, bu noktada plastik bir şekil değiştirmenin bulunacağı unutulmamalıdır.

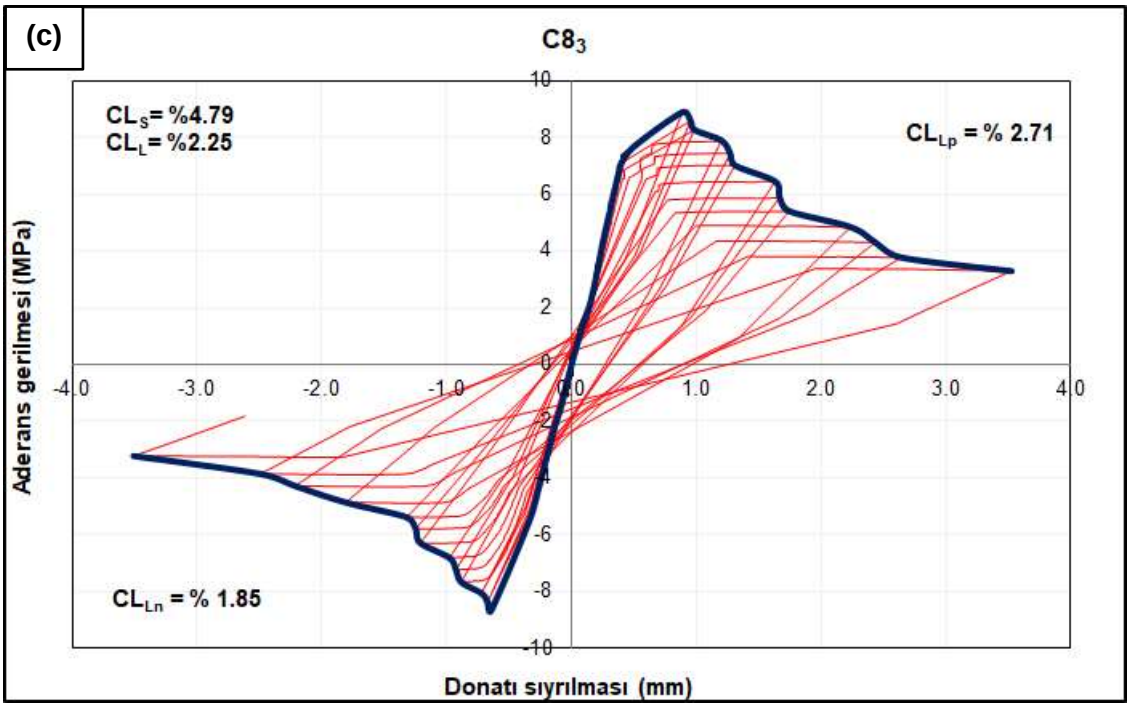
Şekil 4.37'de gösterildiği üzere, tersinir bir yükleme söz konusu değil ise tekrar yükleme mavi çizgiyi takip edecektir. Boşaltılmış durumdan mavi boyunca B noktasına gidilir ise aşağıdaki Denklemin kullanılması gerekmektedir:

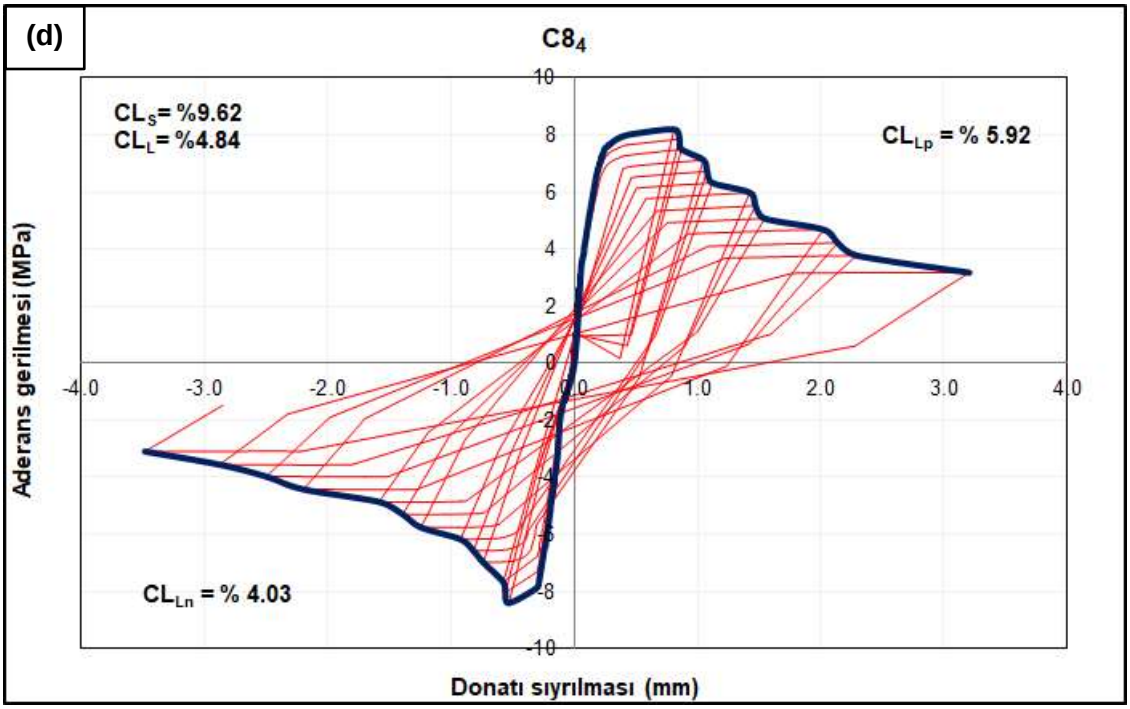
$$\sigma_B = E\left(\varepsilon_B - \varepsilon_p\right) \tag{4.47}$$

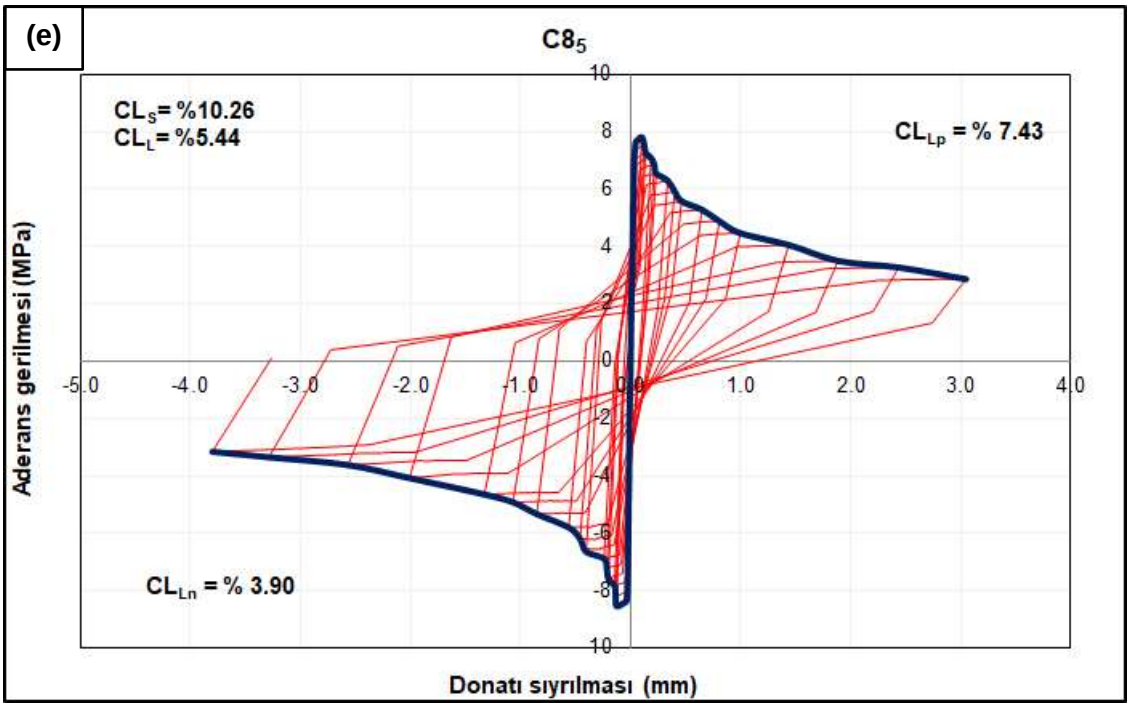
Çalışma kapsamında ve yukarıda sunulan bilgiler ışığında deneye tabi tutulan tüm betonarme kolonlarının aderans-sıyrılma grafikleri elde edilerek aşağıda sunulduğu gibidir.

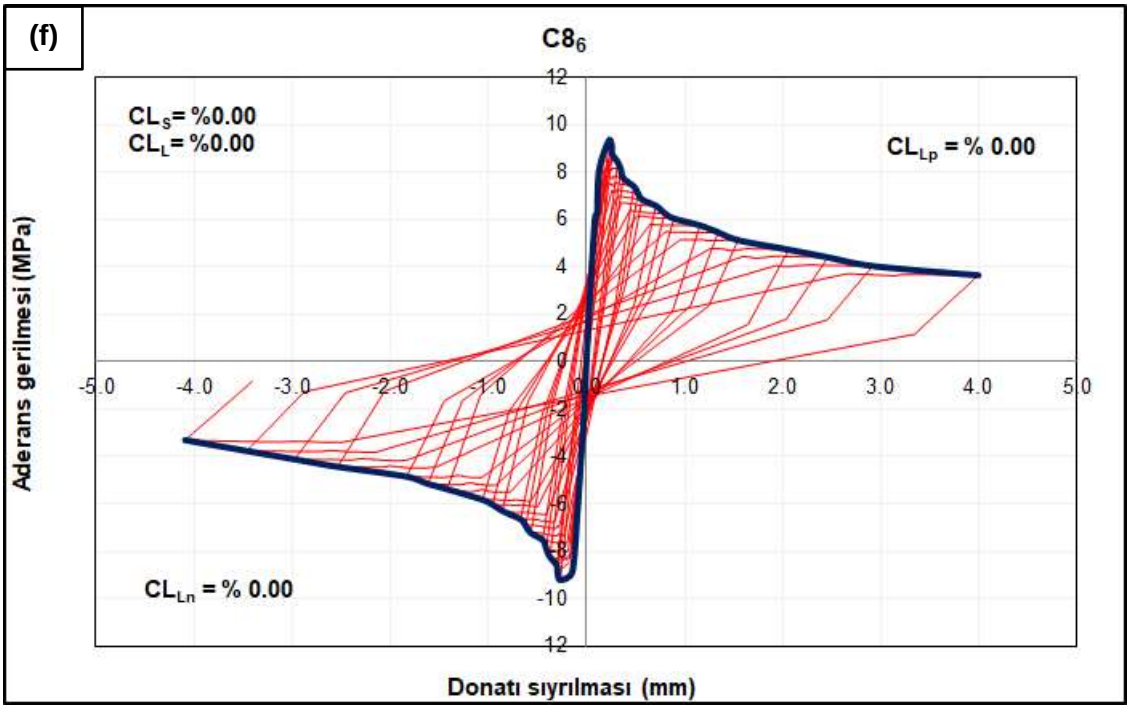

(a)
C8$_1$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$ = % 0.00
CL$_{Ln}$ = % 0.00
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

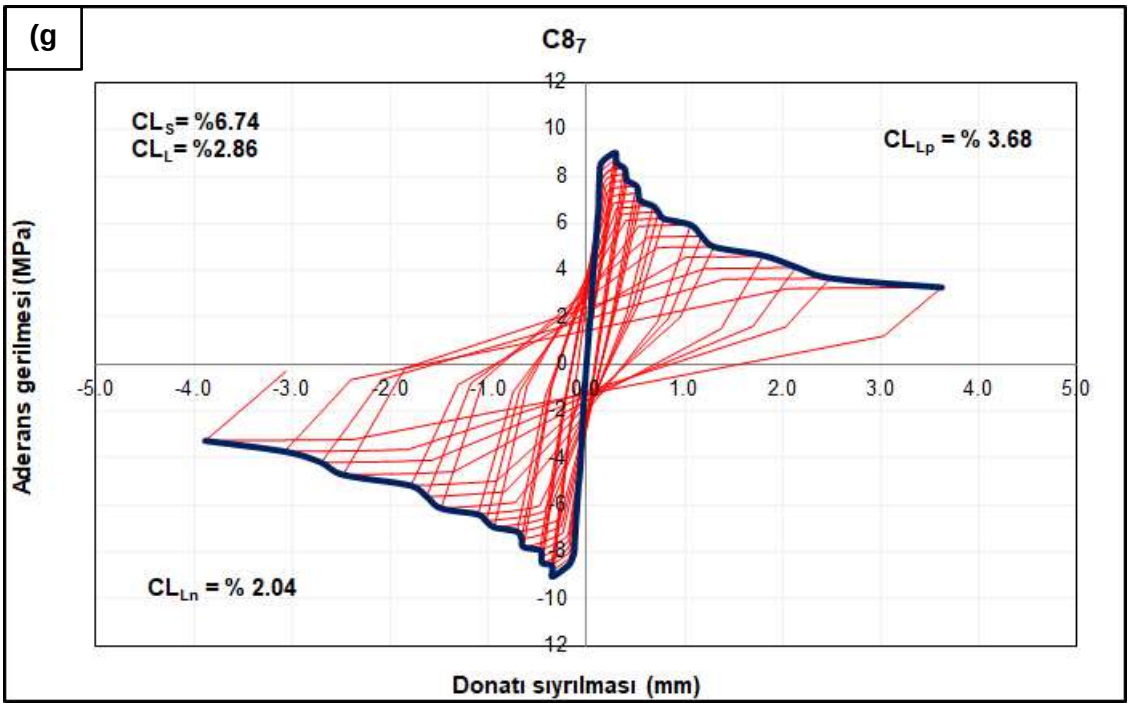

(b)
C8$_2$
CL$_S$= %4.15
CL$_L$= %2.14
CL$_{Lp}$ = % 2.73
CL$_{Ln}$ = % 1.74
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

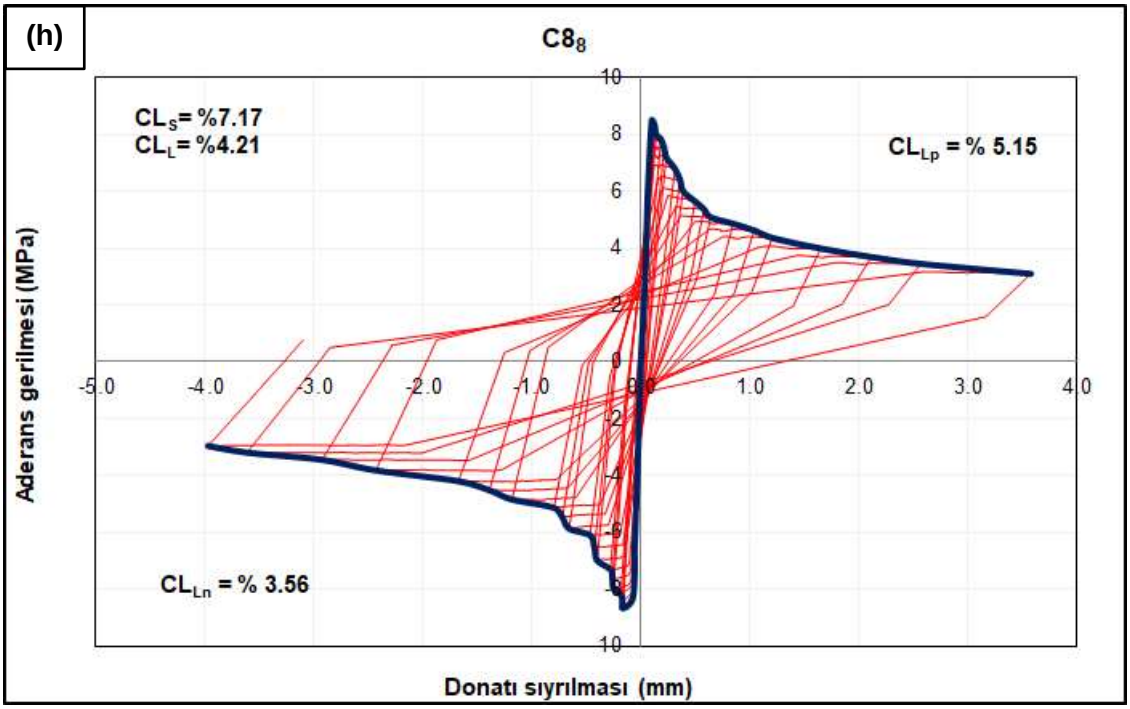

(c)
C8$_3$
CL$_S$= %4.79
CL$_L$= %2.25
CL$_{Lp}$ = % 2.71
CL$_{Ln}$ = % 1.85
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

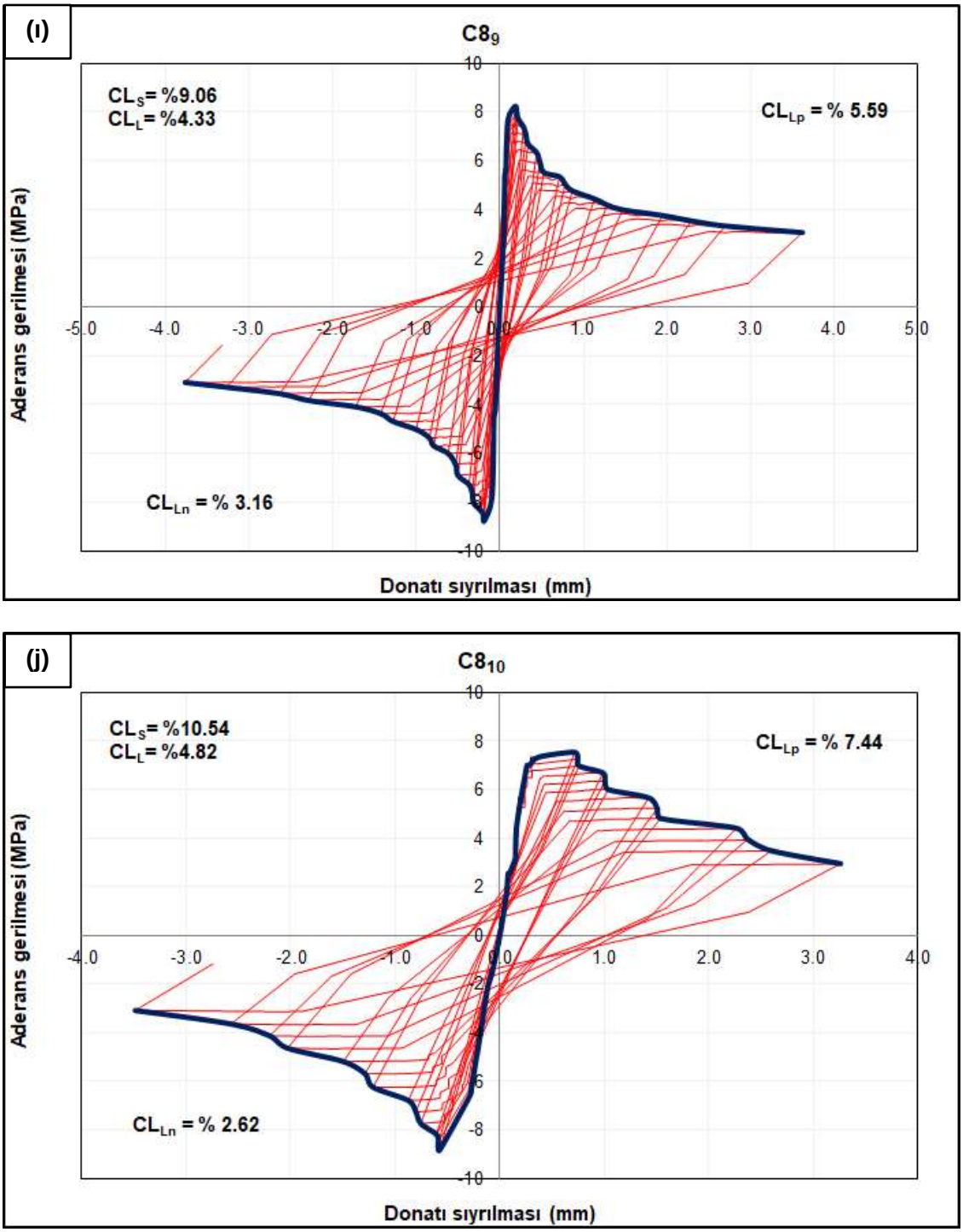

(d)
C8$_4$
CL$_S$= %9.62
CL$_L$= %4.84
CL$_{Lp}$ = % 5.92
CL$_{Ln}$ = % 4.03
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)


(e)
C8$_5$
CL$_S$= %10.26
CL$_L$= %5.44
CL$_{Lp}$ = % 7.43
CL$_{Ln}$ = % 3.90
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

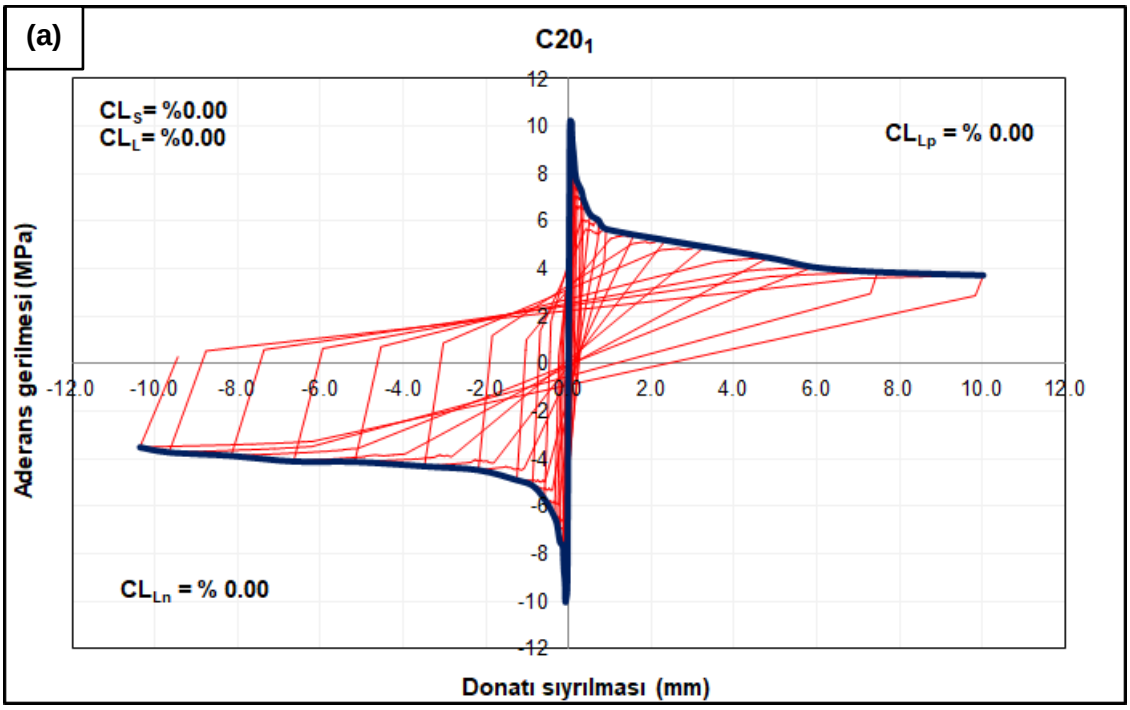

(f)
C8$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$ = % 0.00
CL$_{Ln}$ = % 0.00
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

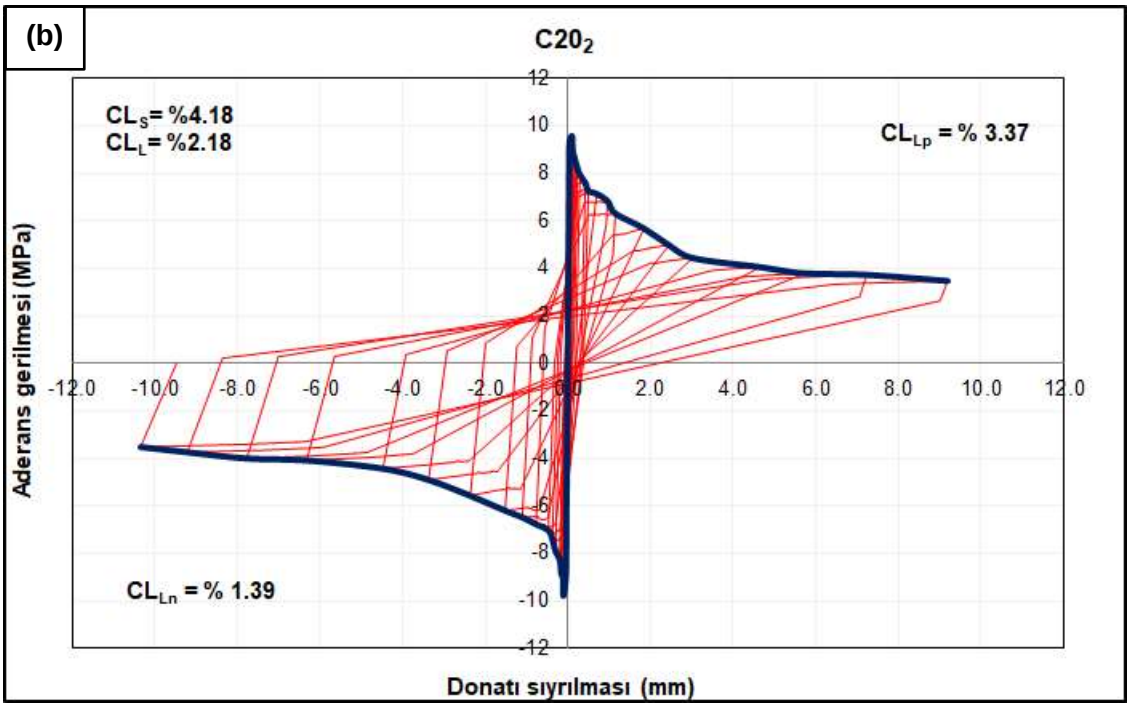

(g
C8$_7$
CL$_S$= %6.74
CL$_L$= %2.86
CL$_{Lp}$ = % 3.68
CL$_{Ln}$ = % 2.04
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

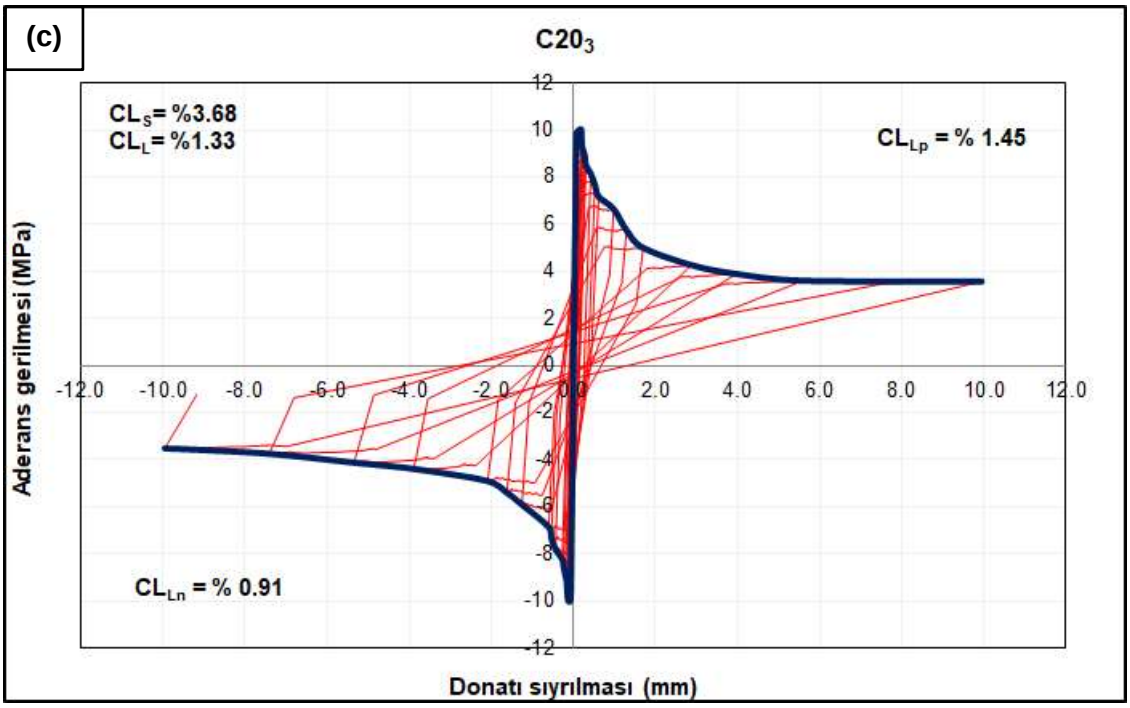

(h)
C8$_8$
CL$_S$= %7.17
CL$_L$= %4.21
CL$_{Lp}$ = % 5.15
CL$_{Ln}$ = % 3.56
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

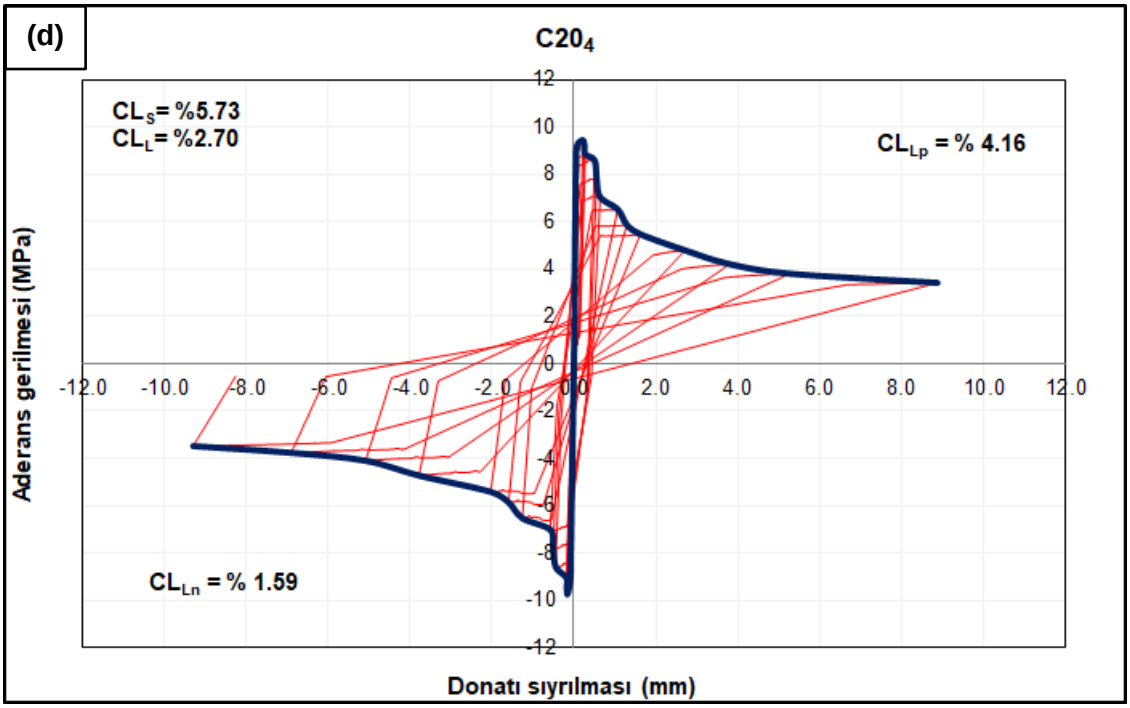


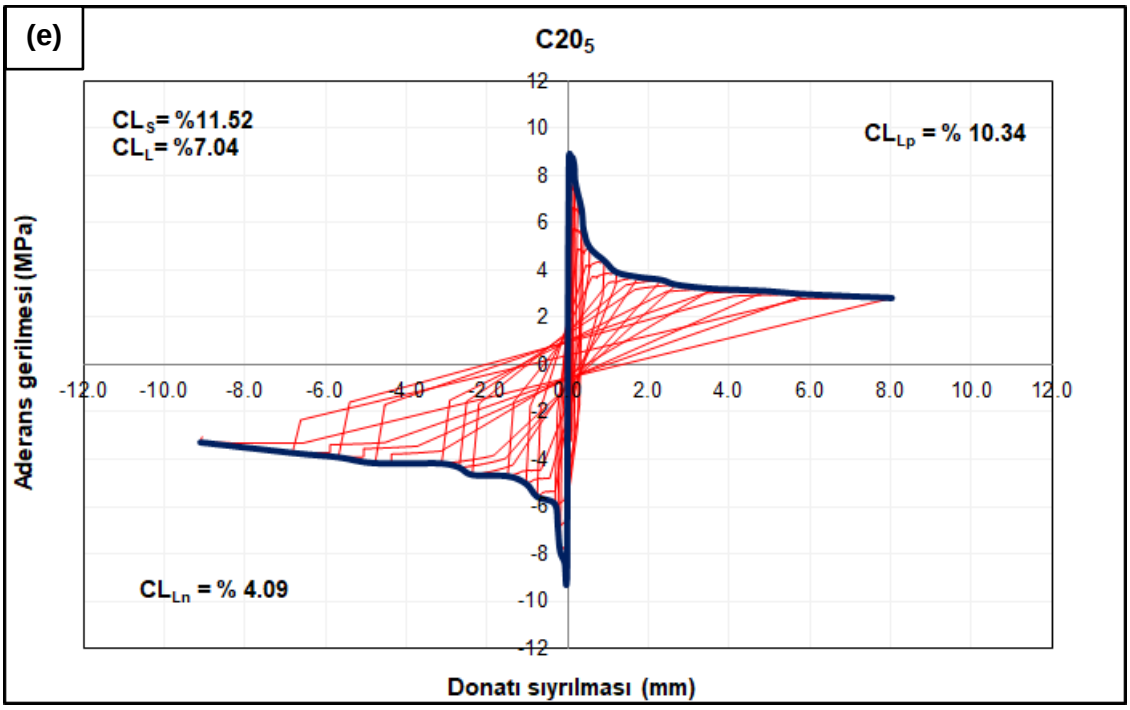
Şekil 4. 38: C8 betonarme kolonlarına ait aderans-sıyrılma grafikleri: (a) $C8_1$; (b) $C8_2$; (c) $C8_3$; (d) $C8_4$; (e) $C8_5$; (f) $C8_6$; (g) $C8_7$; (h) $C8_8$; (i) $C8_9$; (j) $C8_{10}$.

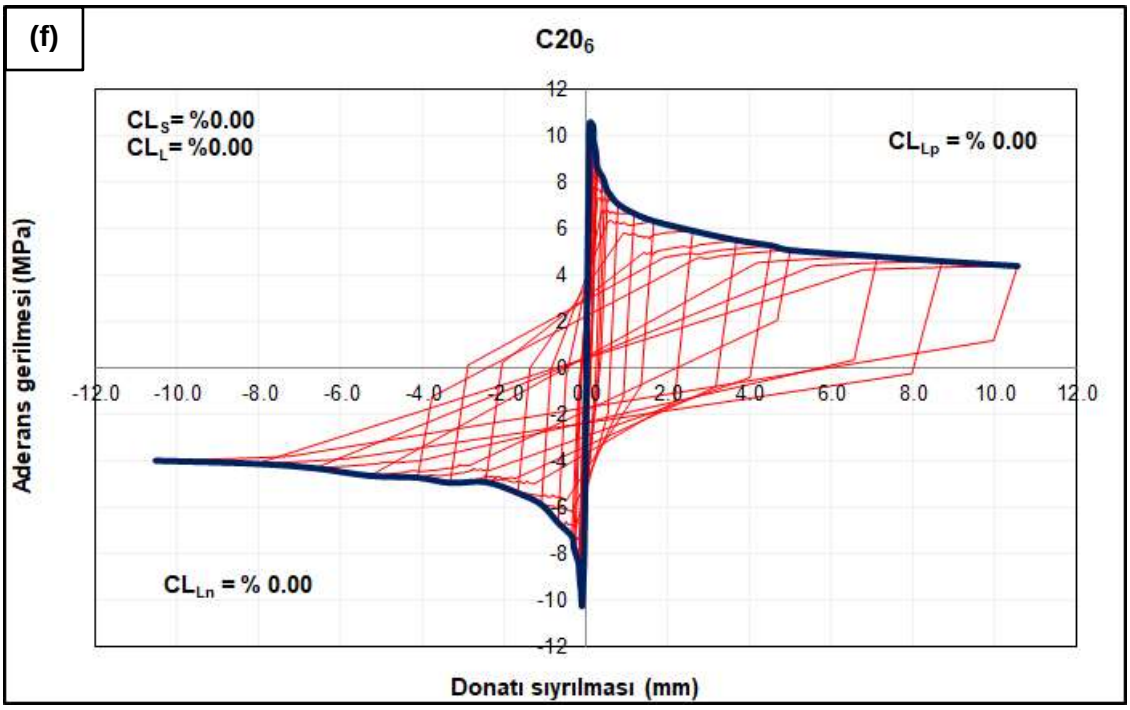

(a)
C20₁
CLS= %0.00
CLL= %0.00
CLLp = % 0.00
CLLn = % 0.00
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

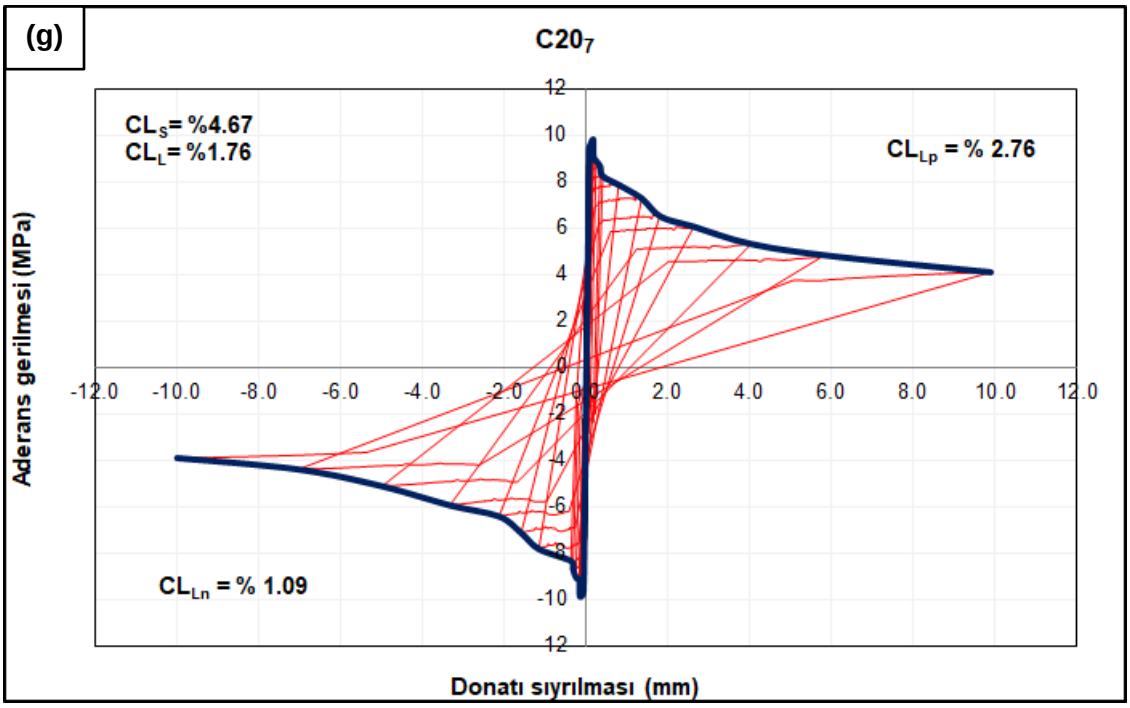

(b)
C20₂
CLS= %4.18
CLL= %2.18
CLLp = % 3.37
CLLn = % 1.39
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

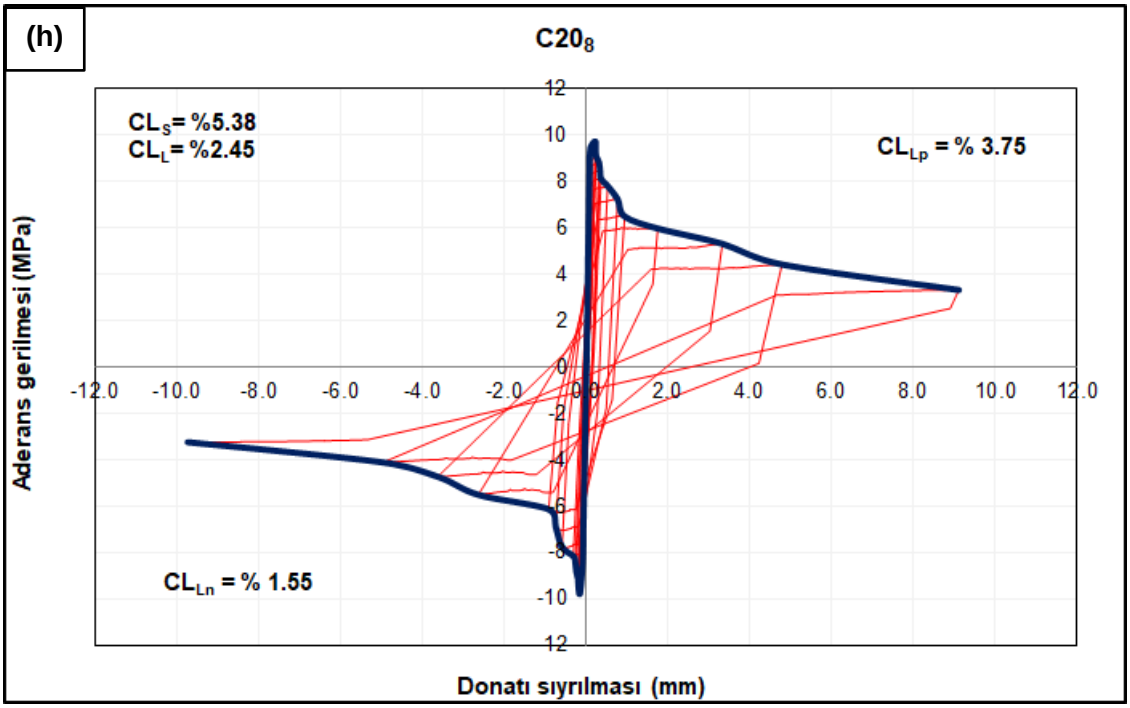

(c)
C20$_3$
CL$_S$= %3.68
CL$_L$= %1.33
CL$_{Lp}$ = % 1.45
CL$_{Ln}$ = % 0.91
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

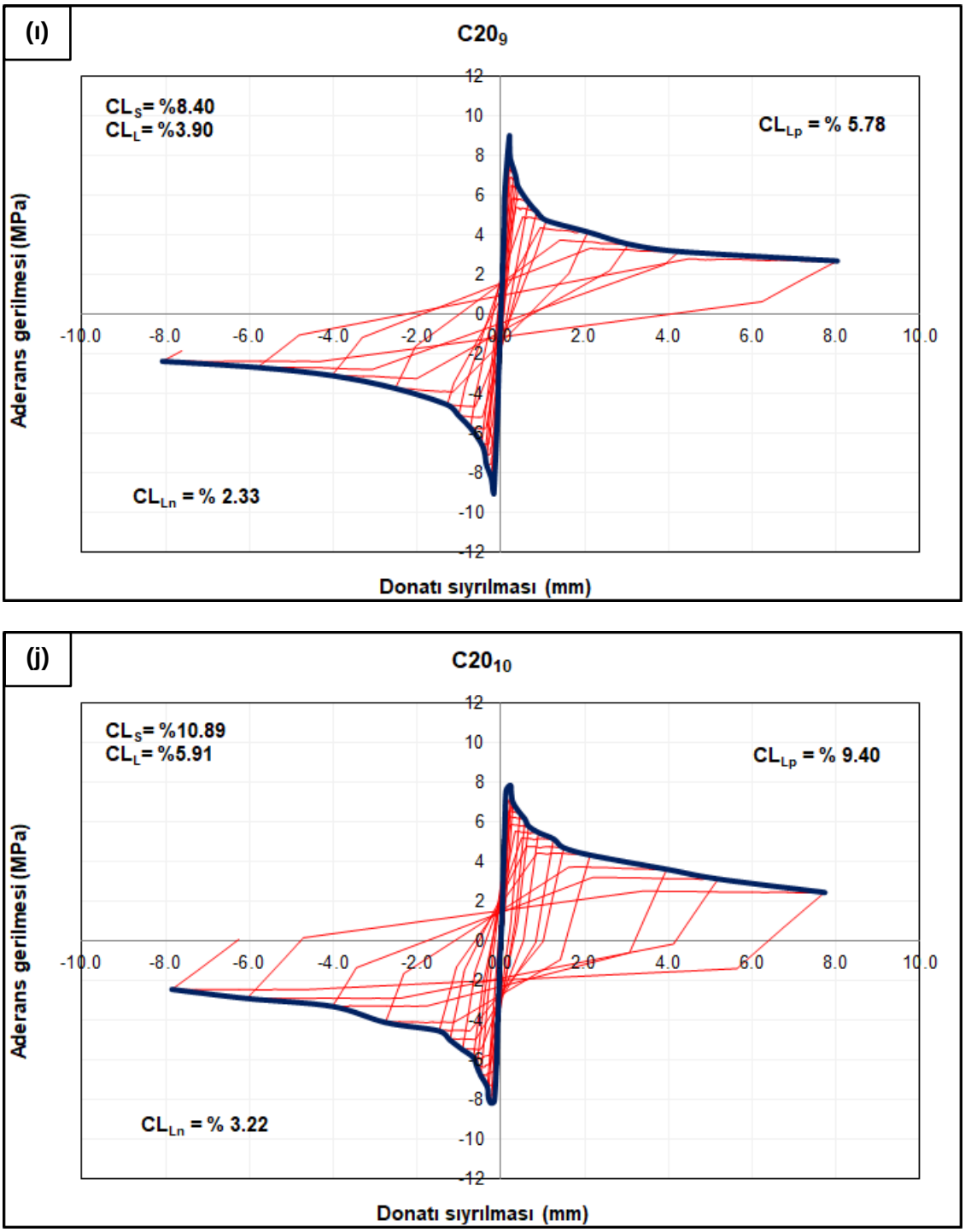

(d)
C20$_4$
CL$_S$= %5.73
CL$_L$= %2.70
CL$_{Lp}$ = % 4.16
CL$_{Ln}$ = % 1.59
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)


(e)
C20$_5$
CL$_S$= %11.52
CL$_L$= %7.04
CL$_{Lp}$ = % 10.34
CL$_{Ln}$ = % 4.09
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

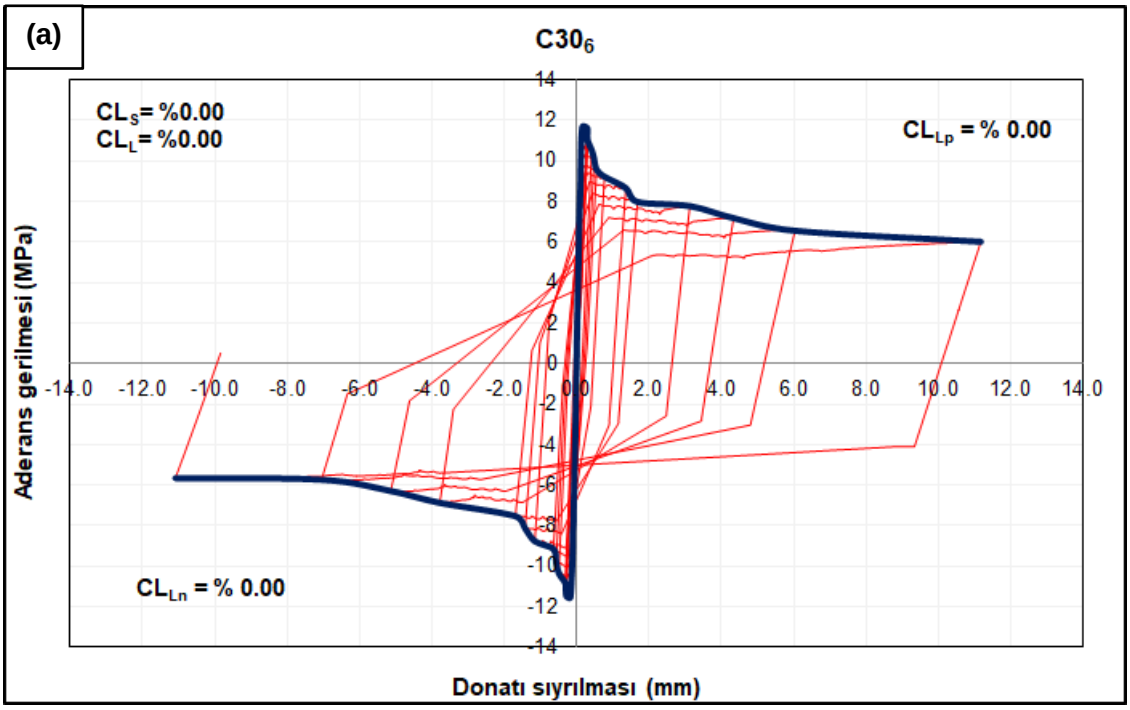

(f)
C20$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$ = % 0.00
CL$_{Ln}$ = % 0.00
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

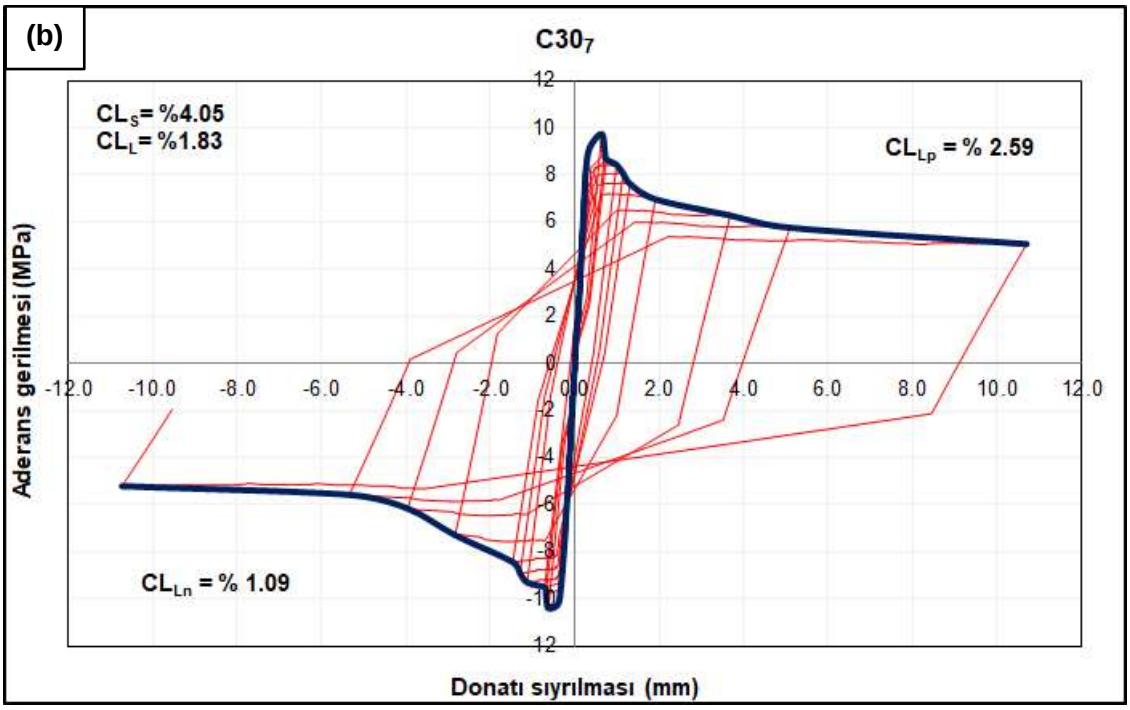

(g)
C20₇
CL_S = %4.67
CL_L = %1.76
CL_Lp = % 2.76
CL_Ln = % 1.09
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

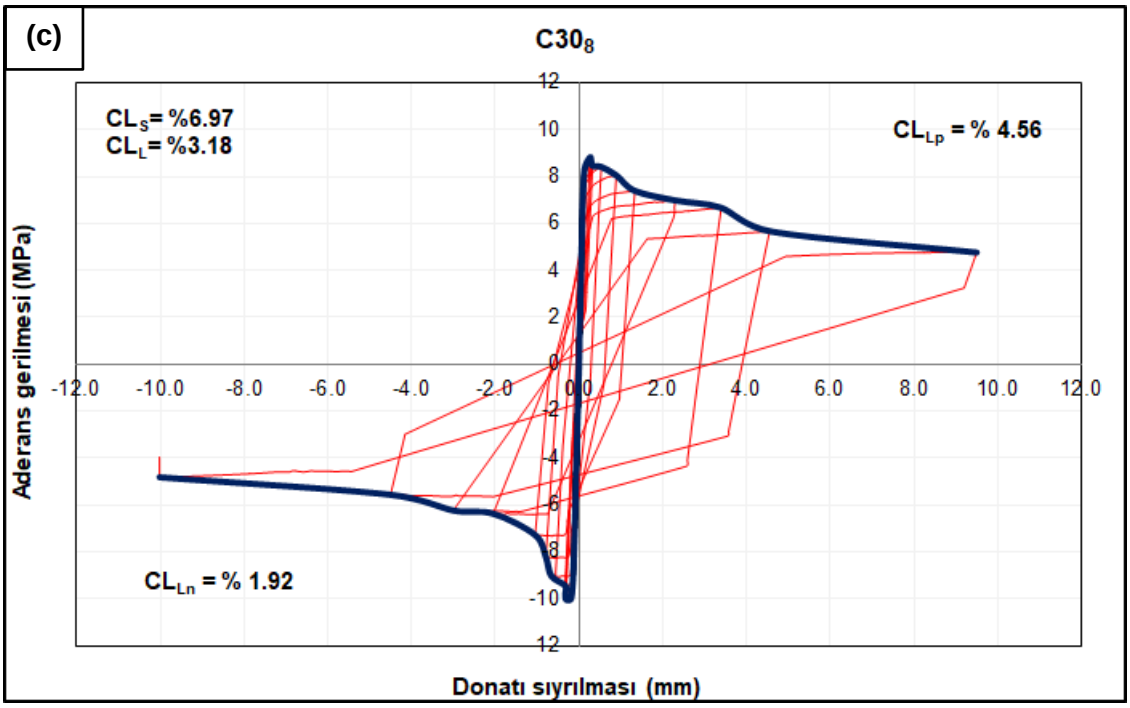

(h)
C20₈
CL_S = %5.38
CL_L = %2.45
CL_Lp = % 3.75
CL_Ln = % 1.55
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)

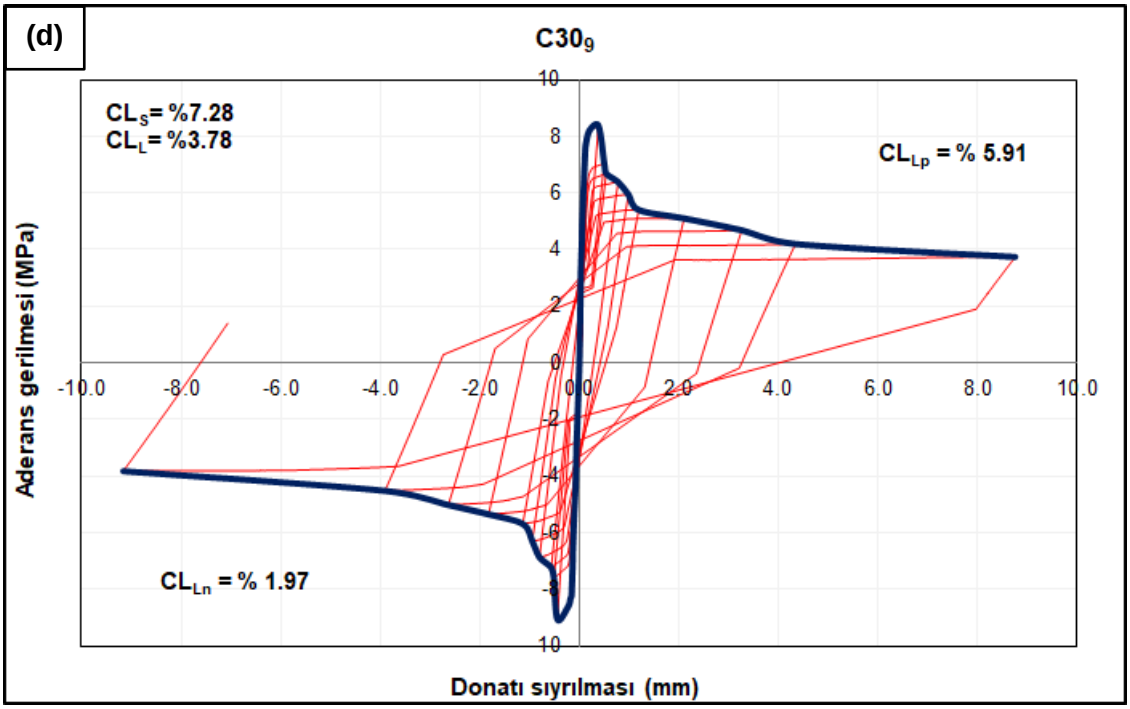


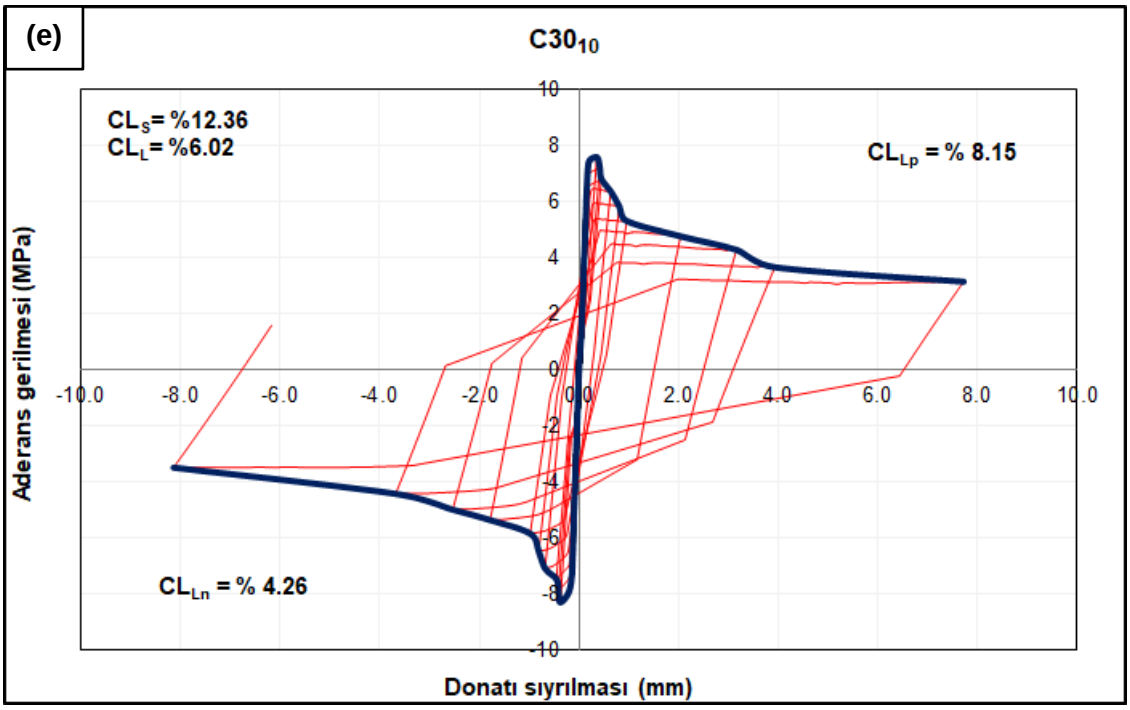
Şekil 4. 39: C20 betonarme kolonlarına ait aderans-sıyrılma grafikleri*:* (a) $C20_1$; (b) $C20_2$; (c) $C20_3$; (d) $C20_4$; (e) $C20_5$; (f) $C20_6$; (e) $C20_7$; (f) $C20_8$; (e) $C20_9$; (f) $C20_{10}$.


(a)
C30$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$ = % 0.00
CL$_{Ln}$ = % 0.00
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)


(b)
C30$_7$
CL$_S$= %4.05
CL$_L$= %1.83
CL$_{Lp}$ = % 2.59
CL$_{Ln}$ = % 1.09
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)


(c)
C30₈
CL_S = %6.97
CL_L = %3.18
CL_Lp = % 4.56
CL_Ln = % 1.92
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)


(d)
C30₉
CL_S = %7.28
CL_L = %3.78
CL_Lp = % 5.91
CL_Ln = % 1.97
Aderans gerilmesi (MPa)
Donatı sıyrılması (mm)



Şekil 4. 40: C30 betonarme kolonlarına ait aderans-sıyrılma grafikleri: (a) C30$_6$; (b) C30$_7$; (c) C30$_8$; (d) C30$_9$; (e) C30$_{10}$.

Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'da sunulan deneysel veriler kapsamında ve özetlenen deneysel aderans gerilme değerleri (Tablo 4.11) kapsamında geliştirilen aderans modeli Denklem 4.48'de sunulduğu gibidir. Tablo 4.11'de sunulan deneysel veriler elastik ve plastik (maksimum yükün %85'ine karşılık gelen değer) bölgeler için nihai değerlerdir.

Tablo 4. 11: Aderans-sıyrılma değerleri.

Numune No	Elastik Bölge				Plastik Bölge			
	Aderans gerilmesi (MPa)		Korozyon oranı (%)		Aderans gerilmesi (MPa)		Korozyon oranı (%)	
	Pozitif	Negatif	CL_{Lp}	CL_{Ln}	Pozitif	Negatif	CL_{Lp}	CL_{Ln}
$C8_1$	9.07	8.83	0.00	0.00	3.53	3.30	0.00	0.00
$C8_2$	8.71	8.76	2.73	1.74	3.24	3.28	2.73	1.74
$C8_3$	8.89	8.69	2.71	1.85	3.30	3.22	2.71	1.85
$C8_4$	8.19	8.40	5.92	4.03	3.17	3.10	5.92	4.03
$C8_5$	7.82	8.53	7.43	3.90	2.86	3.15	7.43	3.90
$C8_6$	9.34	9.21	0.00	0.00	3.65	3.30	0.00	0.00
$C8_7$	9.02	9.05	3.68	2.04	3.27	3.26	3.68	2.04
$C8_8$	8.49	8.67	5.15	3.56	3.09	2.96	5.15	3.56
$C8_9$	8.23	8.77	5.59	3.16	3.06	3.09	5.59	3.16
$C8_{10}$	7.54	8.83	7.44	2.62	2.96	3.09	7.44	2.62
$C20_1$	10.16	10.04	0.00	0.00	3.72	3.52	0.00	0.00
$C20_2$	9.58	9.77	3.37	1.39	3.48	3.52	3.37	1.39
$C20_3$	10.03	10.00	1.45	0.91	3.57	3.51	1.45	0.91
$C20_4$	9.45	9.74	4.16	1.59	3.42	3.48	4.16	1.59
$C20_5$	8.76	9.31	10.34	4.09	2.82	3.28	10.34	4.09
$C20_6$	10.42	10.25	0.00	0.00	4.38	4.01	0.00	0.00
$C20_7$	9.83	9.87	2.76	1.09	4.10	3.91	2.76	1.09
$C20_8$	9.71	9.77	3.75	1.55	3.30	3.25	3.75	1.55
$C20_9$	8.94	9.07	5.78	2.33	2.67	2.39	5.78	2.33
$C20_{10}$	7.84	8.21	9.40	3.22	2.43	2.47	9.40	3.22
$C30_6$	11.62	11.48	0.00	0.00	6.01	5.65	0.00	0.00
$C30_7$	9.73	10.40	2.59	1.09	5.06	5.21	2.59	1.09
$C30_8$	8.81	10.02	4.56	1.92	4.82	4.76	4.56	1.92
$C30_9$	8.38	9.06	5.91	1.97	3.74	3.83	5.91	1.97
$C30_{10}$	7.58	8.29	8.15	4.26	3.14	3.49	8.15	4.26

Aderans-sıyrılma grafikleri ve Tablo 4.11'de özet olarak sunulan deneysel verilerin doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi ve korozyonun aderans-sıyrılma üzerine etkisinin net bir şekilde ortaya koyulabilmesi için deneysel verilerin seçilen bir referans noktasına göre karşılaştırılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında korozyona maruz kalmış betonarme kolonları için enerji bazlı bir değerlendirmenin diğer yöntemlere göre (örneğin: deplasman bazlı süneklik yerine enerji bazlı sünekliklerin hesaplanması) daha doğru sonuçlar verdiği önceki bölümlerde tartışılmıştı. Aderans-sıyrılma verileri içinde elde edilen aderans-sıyrılma grafiklerinin altında kalan alanlar hesaplanarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunun için; her bir passız betonarme kolonun elastik bölgede ve elastik bölgenin altında kalan alan hesaplanarak donatı birim uzunluğuna düşen kuvvet (MPa/mm) hesaplanmıştır. Passız betonarme kolonun elastik bölgede sahip olduğu donatı birim uzunluğuna düşen toplam kuvvet referans alınarak; aynı birim uzunluktaki kuvvete karşılık (MPa/mm; aderans-sıyrılma grafiğinin altında kalan alan

hesaplanarak) gelen paslı kolonların aderans-sıyrılma değerleri aderans-sıyrılma grafikler üzerinden işaretlenmiştir ve Tablo 4.12'de sunulmuştur.

Tablo 4. 12: Donatı birim uzunluğuna karşılık gelen aderans-sıyrılma değerleri.

Betonarme Kolonu	Aderans gerilmesi (MPa)	Sıyrılma (mm)	Donatı birim uzunluğuna düşen kuvvet (N/mm)	$u_b / \sqrt{f'_c}$
$C8_1$	9.02	0.293	16.0888	2.93
$C8_2$	7.00	0.358		
$C8_3$	7.38	0.410		
$C8_4$	6.61	0.813		
$C8_5$	5.29	0.648		
$C8_6$	9.34	0.228	7.3705	3.04
$C8_7$	8.60	0.154		
$C8_8$	7.19	0.232		
$C8_9$	6.68	0.338		
$C8_{10}$	5.86	0.894		
$C20_1$	10.16	0.074	3.3549	1.93
$C20_2$	7.28	0.112		
$C20_3$	7.80	0.172		
$C20_4$	5.66	0.451		
$C20_5$	5.05	0.223		
$C20_6$	10.42	0.161	5.2843	1.98
$C20_7$	9.18	0.163		
$C20_8$	6.26	0.184		
$C20_9$	5.11	0.330		
$C20_{10}$	5.78	0.430		
$C30_6$	11.62	0.290	9.0668	1.90
$C30_7$	7.69	0.247		
$C30_8$	7.38	0.295		
$C30_9$	5.05	0.379		
$C30_{10}$	4.08	0.502		

Tablo 4.12'de gösterildiği üzere; korozyona maruz kalmış betonarme kolonu passız betonarme kolonu kadar donatı birim uzunluğuna düşen toplam kuvvet değerine ulaştığında aderans değeri elastik bölgeden elastik ötesi bölgeye geçerek ciddi düşüşler meydana gelmekte ve aynı işi yapabilmesi için donatı sıyrılması artmaktadır. Tablo 4.12'de diğer bir önemli deneysel bulgu ise; korozyona maruz kalmamış betonarme kolonlarının karakteristik beton basınç dayanımına göre aderans değerledir. Birçok farklı çalışmada elastik aderans gerilme değerleri; örneğin, ACI 408 (1979) yönetmeliğinde 0.87 $\sqrt{f'_c}$, Sozen ve Moehle (1990) 35 adet monotonik olarak yüklenen betonarme kirişleri için elastik aderans gerilmesini 0.83 $\sqrt{f'_c}$, Lehman ve Moehle (2000) kiriş-kolon birleşim bölgesi üzerine yapılan çalışmada 1 $\sqrt{f'_c}$, Melek vd. (2003) tarafından bindirme boyu üzerine çalışan kolonlar için 0.95 $\sqrt{f'_c}$ iken olarak önerilmiştir. Bu çalışmalardan farklı olarak Lowes and Altoontash (2003) yaptıkları çalışmada

elastik aderans gerilmesini 1.8 $\sqrt{f_c'}$ olarak ifade etmiştir. Tablo 4.12'de elde edilen deneysel verilere göre C20 ve C30 betonarme kolonları için elde edilen elastik aderans gerilmesi 1.90 $\sqrt{f_c'}$ ile 1.98 $\sqrt{f_c'}$ arasında olduğu C8 betonarme kolonları için ise 2.93 $\sqrt{f_c'}$ ile 3.04 $\sqrt{f_c'}$ arasında olduğu bulunmuştur. Bu durum Lowes and Altoontash (2003) tarafından sunulan elastik aderans gerilmesinin C20 ve üzerindeki beton sınıfları için diğer mevcut literatürdeki modellere göre daha iyi sonuçlar vereceğini göstermektedir. Diğer modellerdeki eksiklik aderans boyunun teorik olarak hesaplanması ve teorik aderans boyuna bağlı olarak tahmin edilen elastik aderans gerilmesinden dolayı olduğu söylenebilir. Çalışma kapsamında C8, C20 ve C30 betonarme kolonlarının elastik aderans gerilmesini karakteristik beton basınç dayanıma bağlı olarak tahmin etmek için geliştirilen ampirik model Denklem 4.48'de sunulduğu gibidir. Denklem 4.48'de sunulan modelin regresyon değeri ise %99 olarak elde edilmiştir.

$$u_b = \frac{12 \times f_c'}{3 + f_c'} \tag{4.48}$$

Denklem 4.48'e alternatif olarak ayrıca düşük beton sınıfı ve geleneksel betonarme yapılarda yönetmelikler çerçevesinde kullanılması gereken minimum karakteristik beton basınç dayanımları için sırası ile Denklem 4.49 (C8 için) ve 4.50 (C20 ve C30 için) kullanılabilir.

$$u_b = 2.98 \times \sqrt{f_c'} \tag{4.49}$$

$$u_b = 1.92 \times \sqrt{f_c'} \tag{4.50}$$

Tablo 4.12'de sunulan deneysel ışığında Denklem 4.48 korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının aderans gerilmesini (u_{bc}) üç farklı beton basınç dayanımında (C8, C20 ve C30 için), iki farklı eksenel yük oranı ve farklı korozyon oranları için elde edilen denklem 4.51'de sunulduğu gibidir. Denklem 4.51'da sunulan modelin regresyon değeri ise %88 olarak elde edilmiştir.

$$\frac{u_{bc}}{u_b} = 1 - \left(\frac{12 \times f_c'}{3 + f_c'} \times 0.025 CL_L\right) + 0.014 CL_L^2 + 0.091 \times CL_L \tag{4.51}$$

Denklem 4.51'de geliştirilen aderans modelinde kullanılan korozyon oranı için yükleme yönü göz önüne alınmıştır. Bilindiği üzere aderans gerilmesi çekme donatısında meydana gelen gerilmenin eğimidir. Bundan dolayı itme veya çekme yönü için hesaplanan aderans gerilmeleri; itme veya çekme yönündeki donatılardaki korozyon oranlarını göz önüne almaktadır.

Betonarme elemanlarının süneklik ve donatı aderans-sıyrılma ilişkisi etriyeler tarafından sağlanan sargı etkisine bağlıdır. Bundan dolayı, korozyon üzerine geliştirilen modellerde göz önüne alınan korozyon oranı hayatı bir öneme sahiptir. Yalnızca süneklik ve donatı aderans-sıyrılma ilişkisi değil; daha önce gerçekleştirilen çalışmalar (Suffern et al., 2010; Bicer et al.,

2018, Yalciner et al. 2020) etriyelerde meydana gelen korozyon oranının korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerinin taşıma gücü kapasitelerinin tahmin edilmesinde dahi göz önüne alınması gerektiğini vurgulamıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında betonarme donatılarında meydana gelen korozyon oranlarının (örneğin; betonarme kolonundaki boyuna donatıdaki ortalama korozyon oranı, yükleme yönüne bağlı ortalama korozyon oranları, maksimum korozyon oranı ve etriyeler de meydana gelen korozyon oranı) yapısal davranış üzerine etkisi bir önceki bölümde detaylı olarak önceki çalışmaları da göz önüne alarak tartışılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere; Tablo 4.1-4.6'da sunulan ortalama korozyon oranları ile etriyelerde meydana gelen ortalama korozyon oranları arasında oldukça güçlü bir ilişki vardır. Etriyelerdeki ortalama korozyon oranlarının boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranlarına oranlarının varyasyonu 0.18 olarak hesaplanmıştır. Bundan dolayı etriyelerde meydana gelen korozyonun yapısal davranış üzerine etkisini yansıtabilmek için; maksimum korozyon oranı yerine ortalama korozyon oranlarının göz önüne alınması daha iyi sonuçlar vereceği bu çalışma kapsamında daha önce vurgulanmıştı. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı; mevcut çalışma için paslanmaya maruz kalmış betonarme kolonlarının aderans gerilmesini tahmin etmek için geliştirilen modelde ortalama korozyon oranı göz önüne alınmıştır (CL_{Lp}: Pozitif yükleme doğrultusundaki betonarme donatılarındaki korozyon oranı; CL_{Ln}: Pozitif yükleme doğrultusundaki betonarme donatılarındaki korozyon oranı). Boyuna donatılarında meydana gelen ortalama korozyon oranının geliştirilen aderans modelinde göz önüne alınmasının diğer bir nedeni ise; tahribatsız yöntemler ile korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının aderans gerilmesinin tahmin edile bilinmesine bu çalışma ile olanak sağlanmasıdır. Denklem 4.14 yardımı ile birincil korozyon çatlak genişliğine bağlı olarak betonarme kolon donatılarındaki ortalama korozyon oranı tahmin edilebilmektedir. Böylelikle; bu çalışma kapsamında geliştirilen ampirik modeller sayesinde yalnızca tahribatlı değil; aynı zamanda tahribatsız yöntemler ile de korozyona maruz kalmış betonarme kolon donatılarındaki aderans gerilmesi tahmin edilebilmektedir.

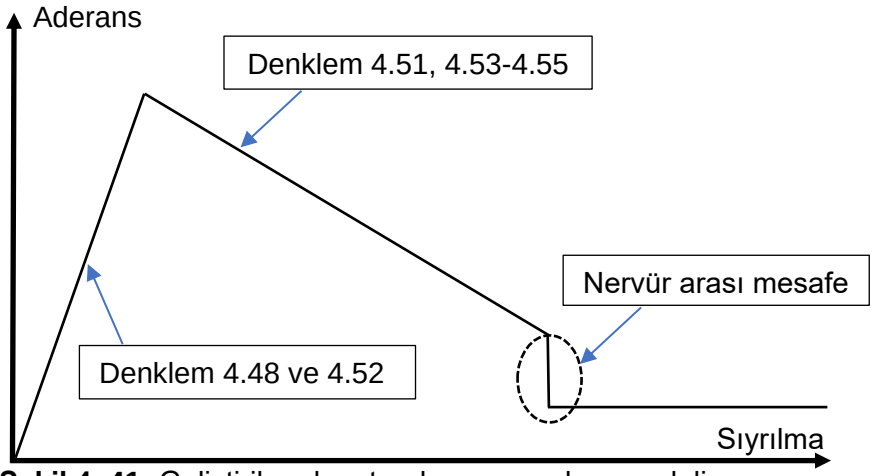
Denklem 4.48 ve 4.51'de korozyonsuz ve korozyona maruz kalmış betonarme kolon donatılarındaki aderans gerilmelerinin beton basınç dayanımı ve korozyon oranına bağlı olarak tahmin edilmesi için gerekli ampirik modeller sunulmuştu. Denklem 4.48 ve 4.51 kullanılarak çalışma kapsamında referans betonarme donatılarındaki ve korozyona maruz kalmış betonarme donatılarındaki aderans-sıyrılma modelleri deneysel veriler kapsamında geliştirilerek aşağıda sunulduğu gibidir. Şekil 4.41'de Denklem 4.52-4.55 kapsamında geliştirilen aderans modelinin şematik gösterimini temsil etmektedir.

$$sıyrılma = 0.026 \times u_b \quad \text{CLL} = \%0;\ \text{C8, C20 ve C30 için};\ \text{R2} = 0.98 \tag{4.52}$$

$$sıyrılma = \frac{17.79}{u_{bc}} - 2.14 \quad \text{CLL} > \%0 \quad \text{C8 için};\ \text{R2} = 0.97 \tag{4.53}$$

$$sıyrılma = \frac{0.073\ u_{bc}}{-4.77 + u_{bc}} \quad \text{CLL} > \%0 \quad \text{C20 için};\ \text{R2} = 0.98 \tag{4.54}$$

$$sıyrılma = \frac{0.177\ u_{bc}}{-2.64 + u_{bc}} \quad \text{CLL} > \%0 \quad \text{C30 için};\ \text{R2} = 0.96 \tag{4.55}$$



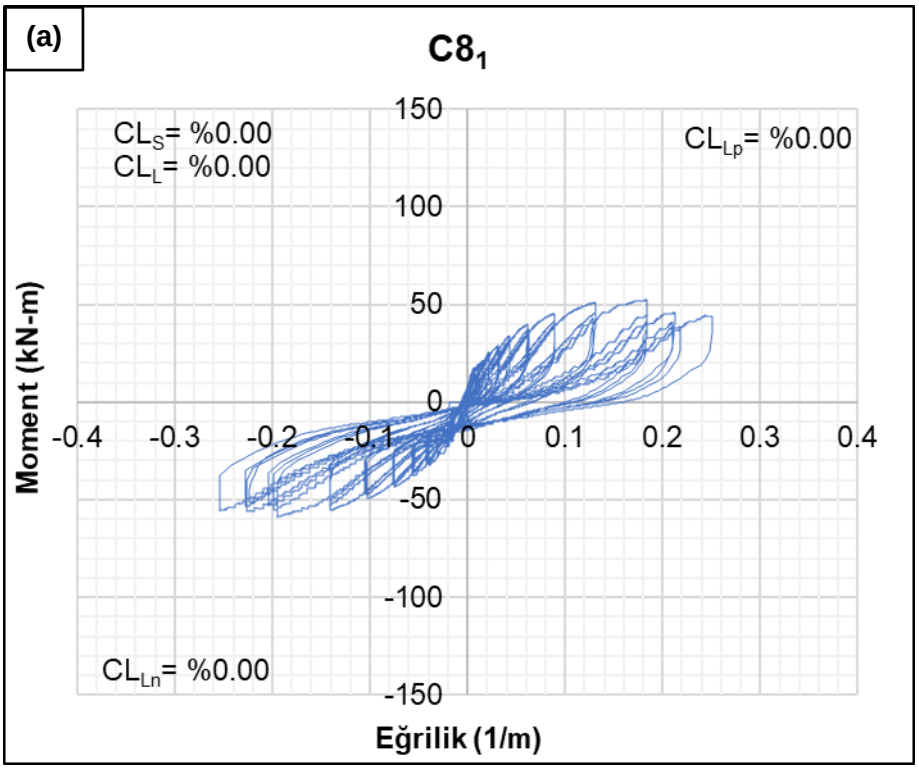
Şekil 4. 41: Geliştirilen donatı aderans-sıyrılma modeli.

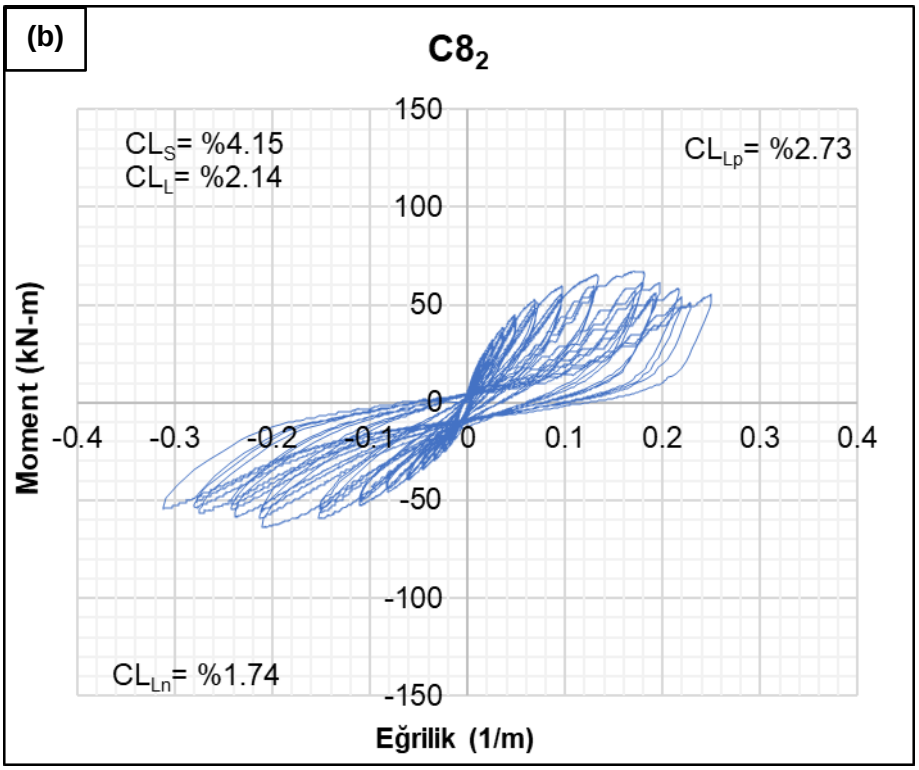
Betonarme elemanlarında korozyonun meydana gelmesi ve buna bağlı olarak aderans gerilmesinin azalması yapısal davranışı olumsuz yönde etkilemektedir. Aderans gerilmesinde meydana gelen azalma ve buna bağlı olarak donatı sıyrılması kesitte ek dönmelere neden olmaktadır. Donatı sıyrılmasından dolayı kesit de meydana gelen ek dönme değerleri daha önce Bölüm 2'de sunulan Şekil 2.3 yardımı ile açıklanabilir. Bölüm 2 ve Şekil 2.3'de gösterildiği üzere betonarme kesitinde donatı sıyrılmasından dolayı meydana gelen dönme Denklem 4.56 yardımı ile hesaplanabilir. Hesaplanan dönme değerinin ilgili kolon boyu ile çarpılması ile donatı sıyrılmasından dolayı meydana gelen yerdeğiştirmeler hesaplanabilir.

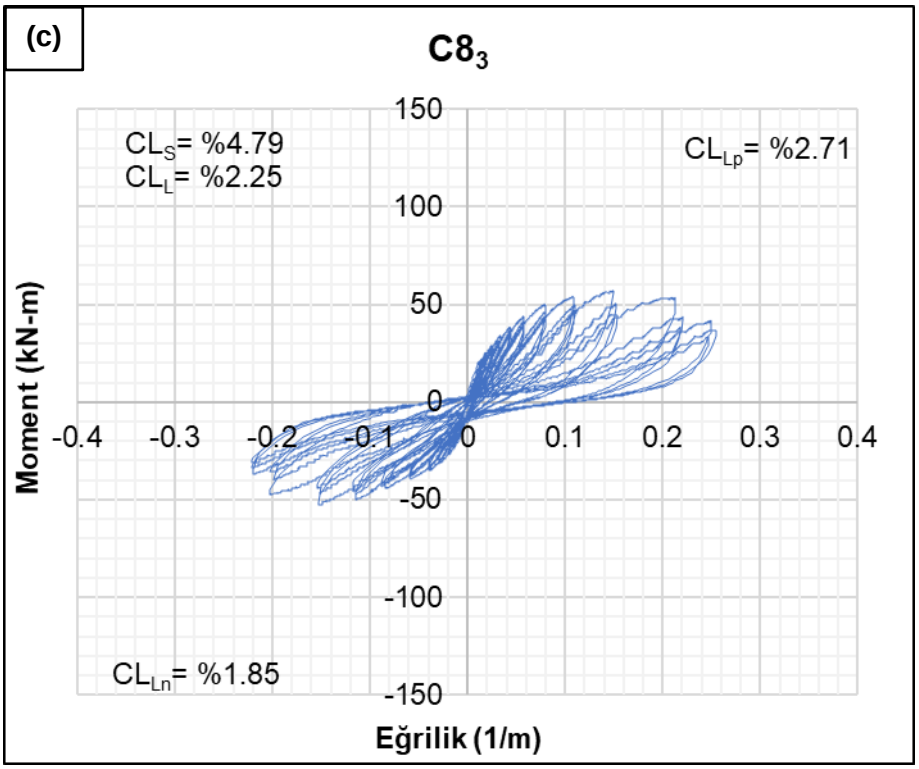
$$\theta_s = \frac{donatı\ sıyrılması}{d - c} \tag{4.56}$$

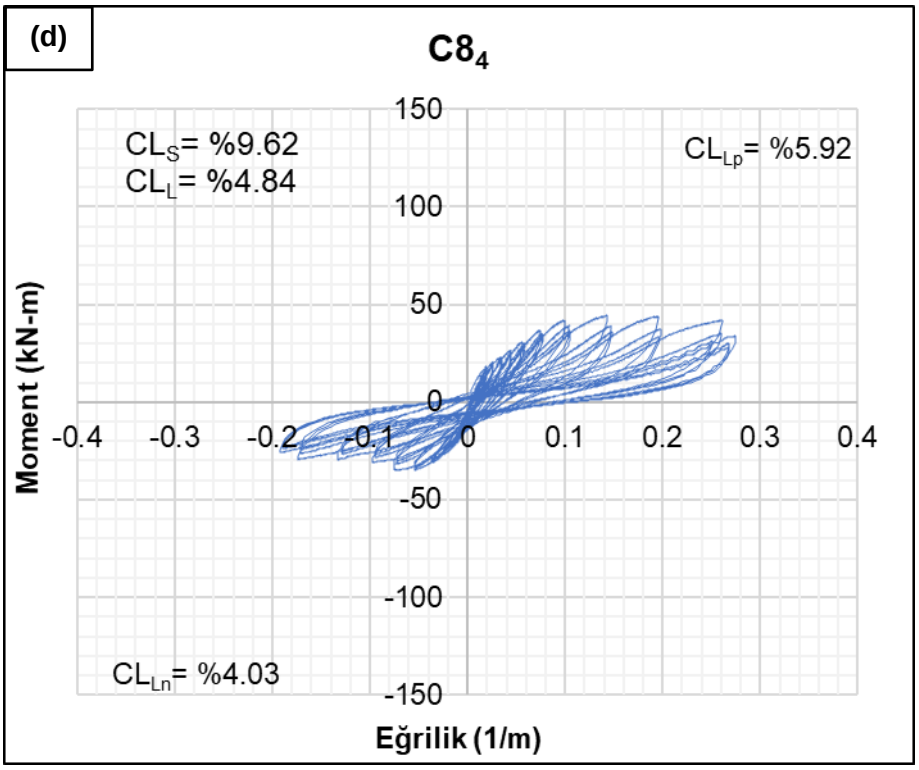
Denklem 4.56'da "c" tarafsız eksenin hesaplanması için deneye tabi tutulan tüm betonarme kolonlarının moment-eğrilik değerleri hesaplanarak tarafsız eksen değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'de üç beton sınıfına ait ve deneye tabi tutulan betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri gösterilerek Tablo 4.12'de deneysel sonuçlar özetlenmiştir. Her bir eğrilik ve ardından hesaplanacak tarafsız eksen derinliğine bağlı olarak donatı sıyrılmasından dolayı meydana gelen dönmeler elde edilerek donatı sıyrılmasının istenilen herhangi bir yerdeğiştirme değerine katkısı dönmenin kolon boyu ile çarpını ($\theta_s \times L = \Delta_S$) ile elde edilebilir. Proje ekibi elde ettimiş olduğu tüm deneysel verilerin daha rahat bir şekilde kullanılabilmesi

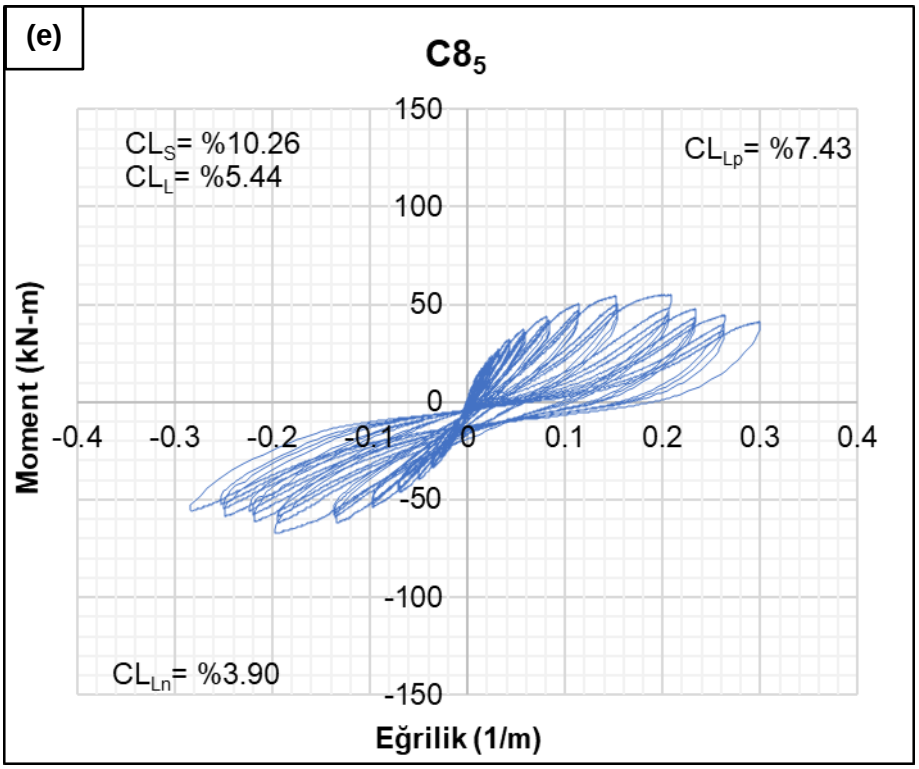
için deneysel verilerin sunumu için bir yazılım yapma hedefine bu çalışma sayesinde ayrıca planlamaktadır.

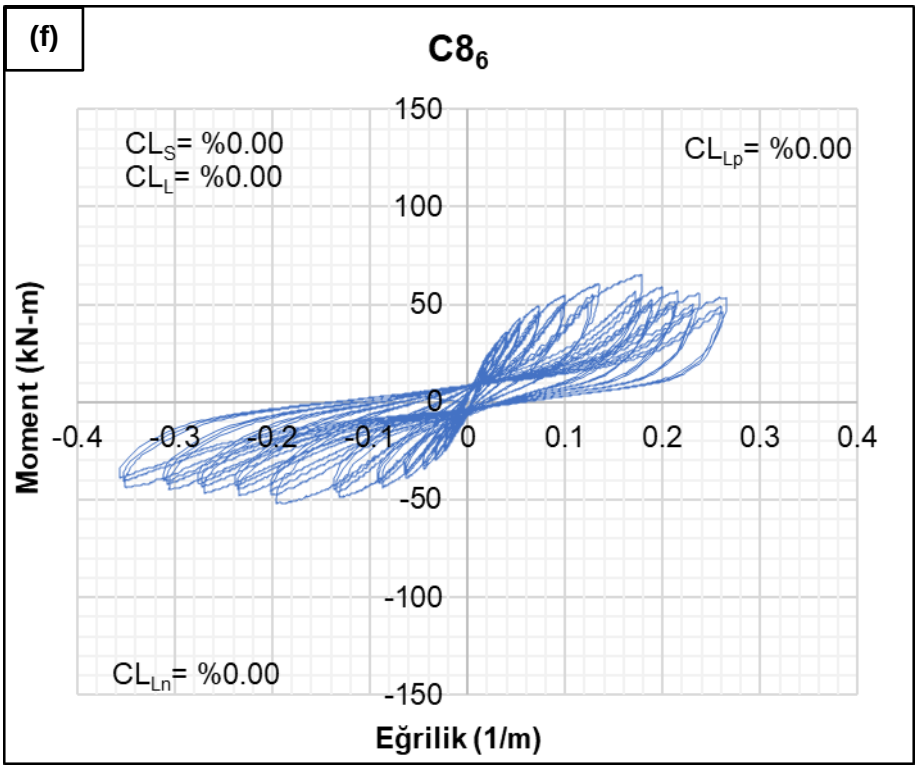


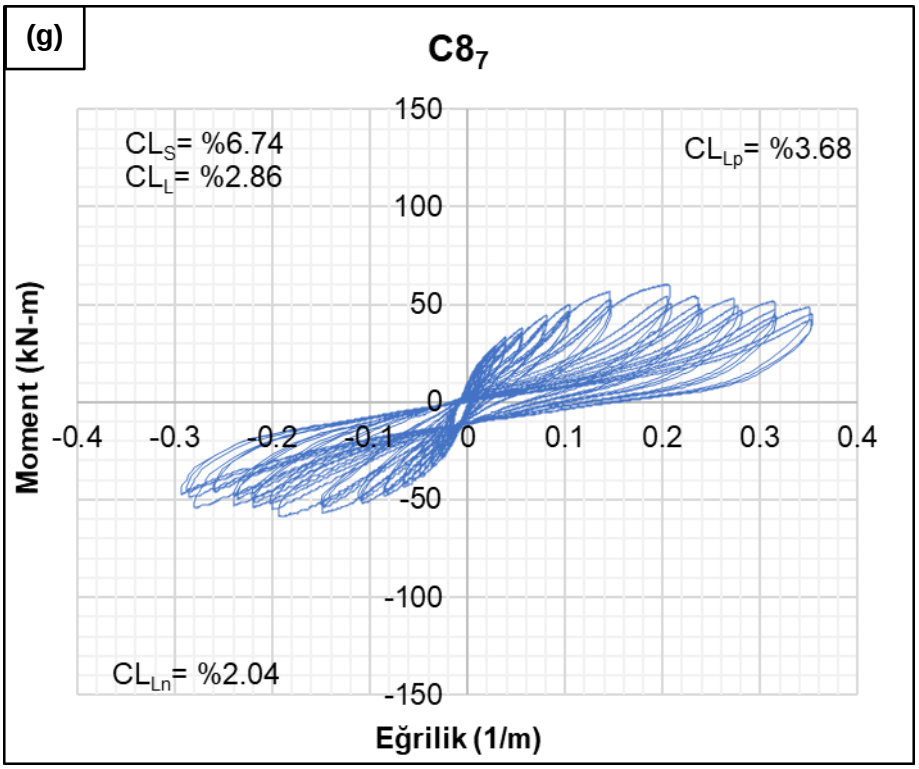


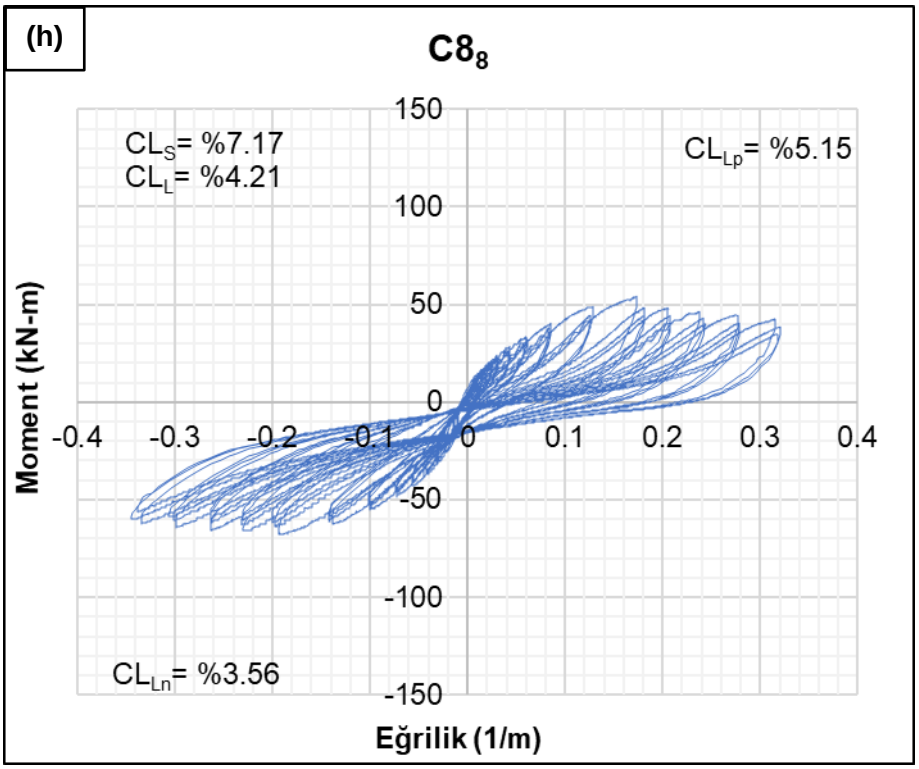

(c)
C8$_3$
CL$_S$= %4.79
CL$_L$= %2.25
CL$_{Lp}$= %2.71
CL$_{Ln}$= %1.85
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

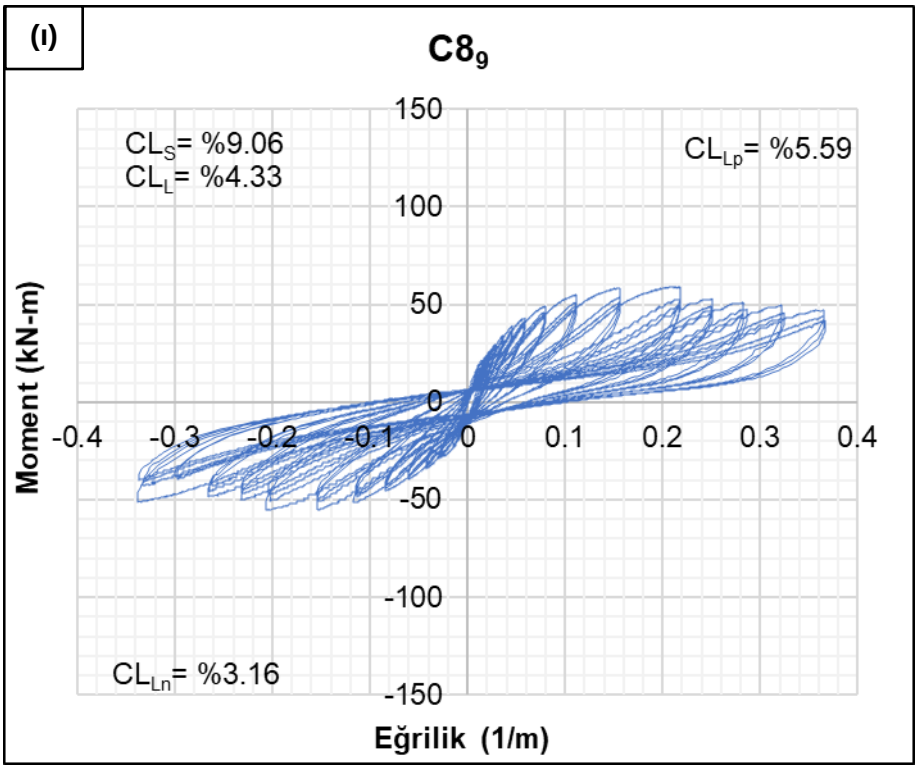

(d)
C8$_4$
CL$_S$= %9.62
CL$_L$= %4.84
CL$_{Lp}$= %5.92
CL$_{Ln}$= %4.03
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

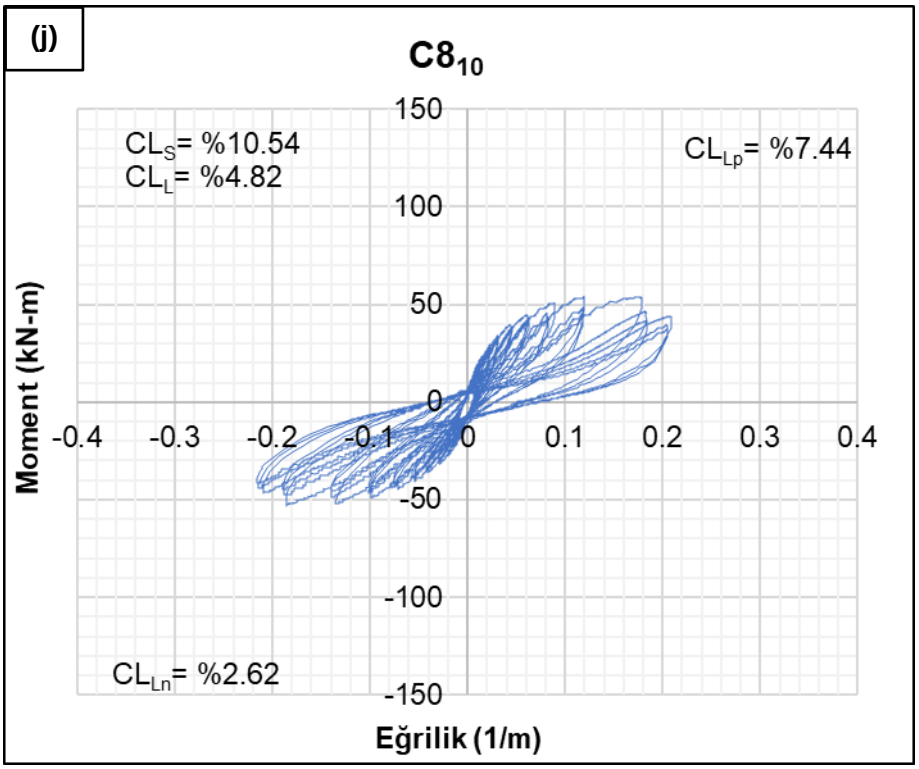

(e)
C8$_5$
CL$_S$= %10.26
CL$_L$= %5.44
CL$_{Lp}$= %7.43
CL$_{Ln}$= %3.90
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4


(f)
C8$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$= %0.00
CL$_{Ln}$= %0.00
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

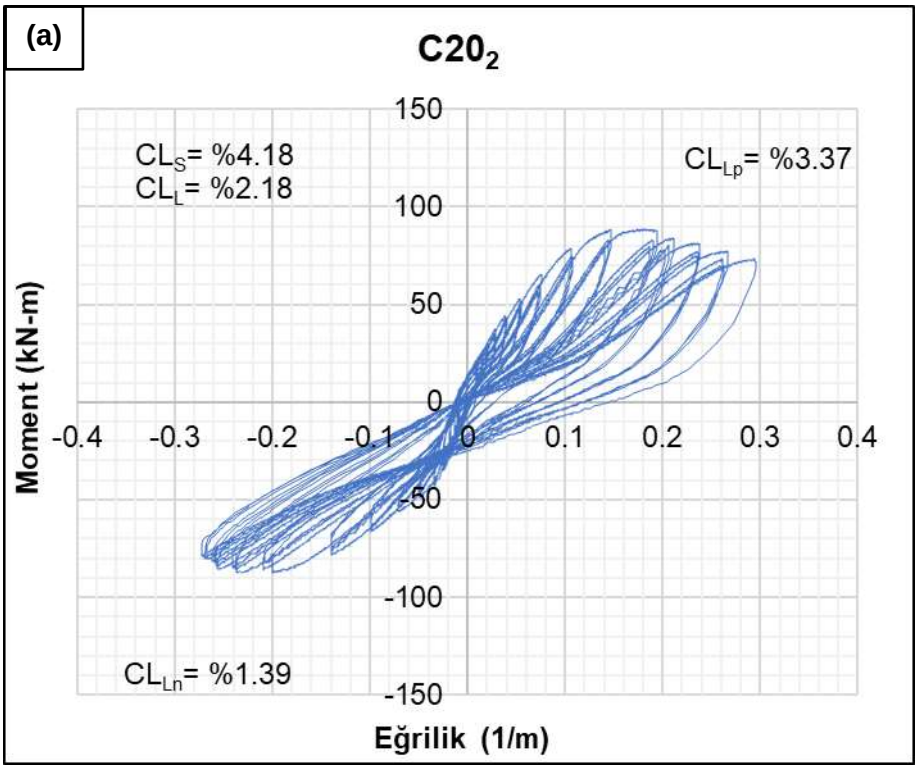

(g)
C8$_7$
CL$_S$= %6.74
CL$_L$= %2.86
CL$_{Lp}$= %3.68
CL$_{Ln}$= %2.04
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

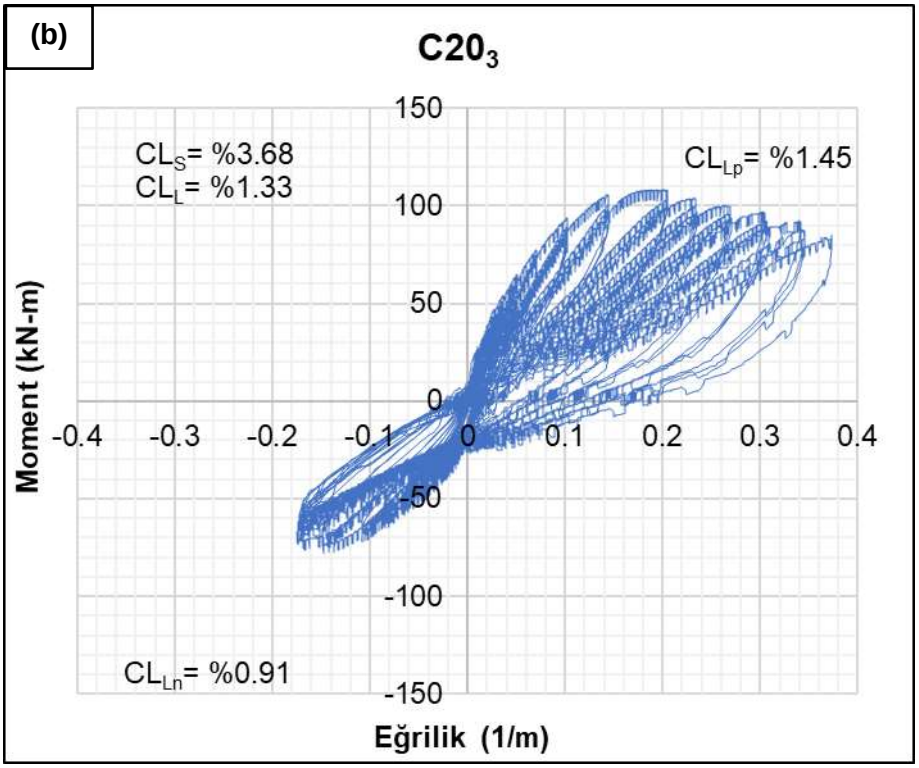

(h)
C8$_8$
CL$_S$= %7.17
CL$_L$= %4.21
CL$_{Lp}$= %5.15
CL$_{Ln}$= %3.56
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

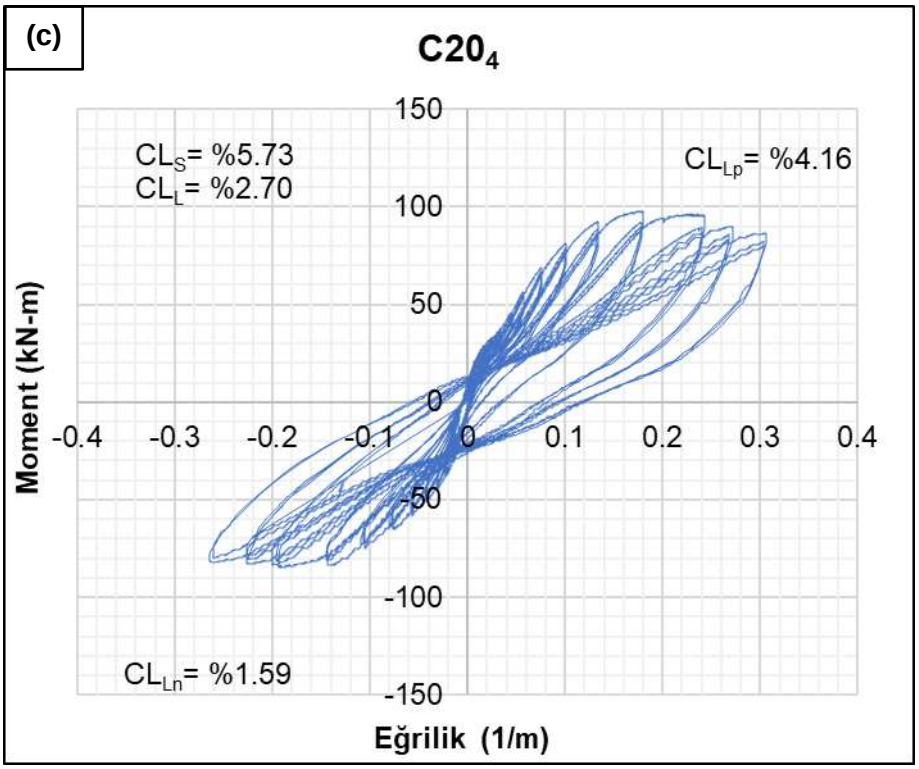


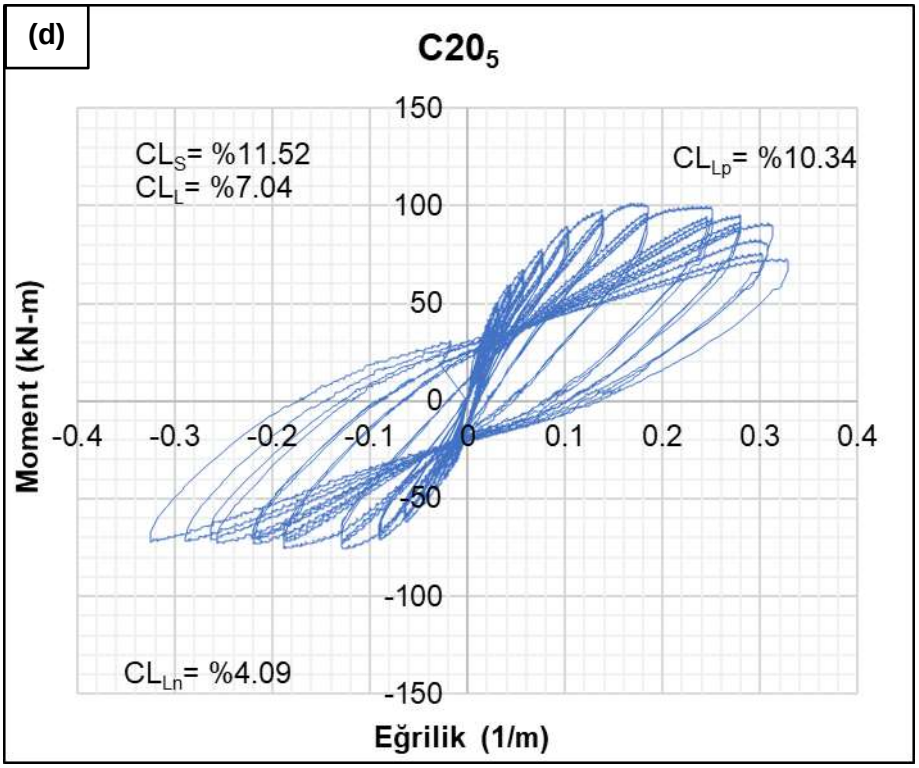


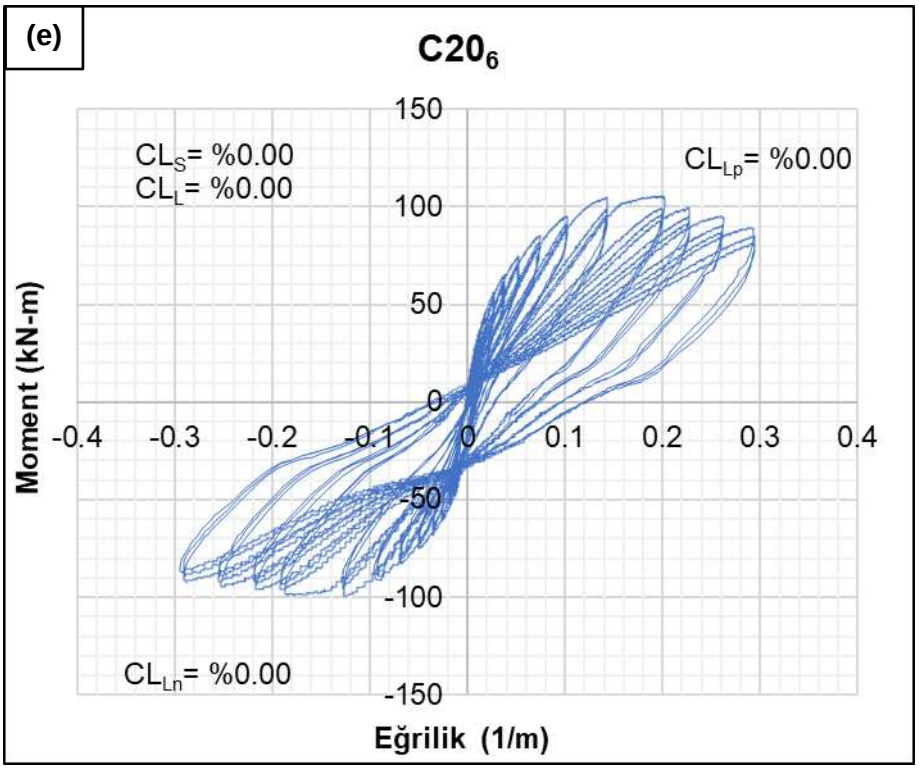
Şekil 4. 42: C8 betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri: (a) $C8_1$; (b) $C8_2$; (c) $C8_3$; (d) $C8_4$; (e) $C8_5$; (f) $C8_6$; (g) $C8_7$; (h) $C8_8$; (i) $C8_9$; (j) $C8_{10}$.

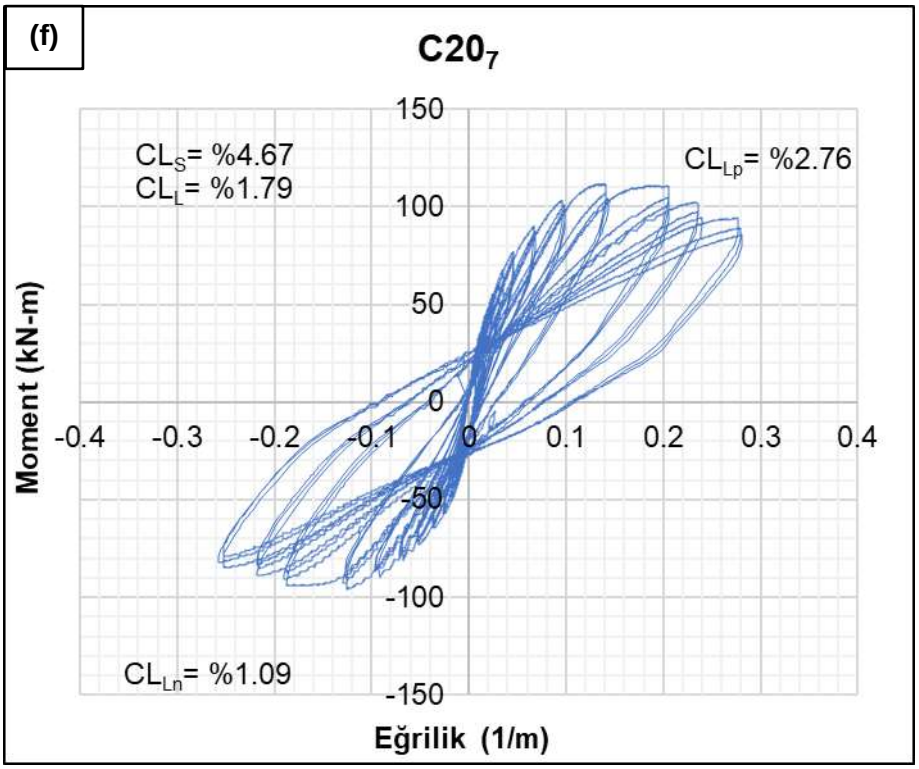

(a)
C20$_2$
CL$_S$= %4.18
CL$_L$= %2.18
CL$_{Lp}$= %3.37
CL$_{Ln}$= %1.39
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4


(b)
C20$_3$
CL$_S$= %3.68
CL$_L$= %1.33
CL$_{Lp}$= %1.45
CL$_{Ln}$= %0.91
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

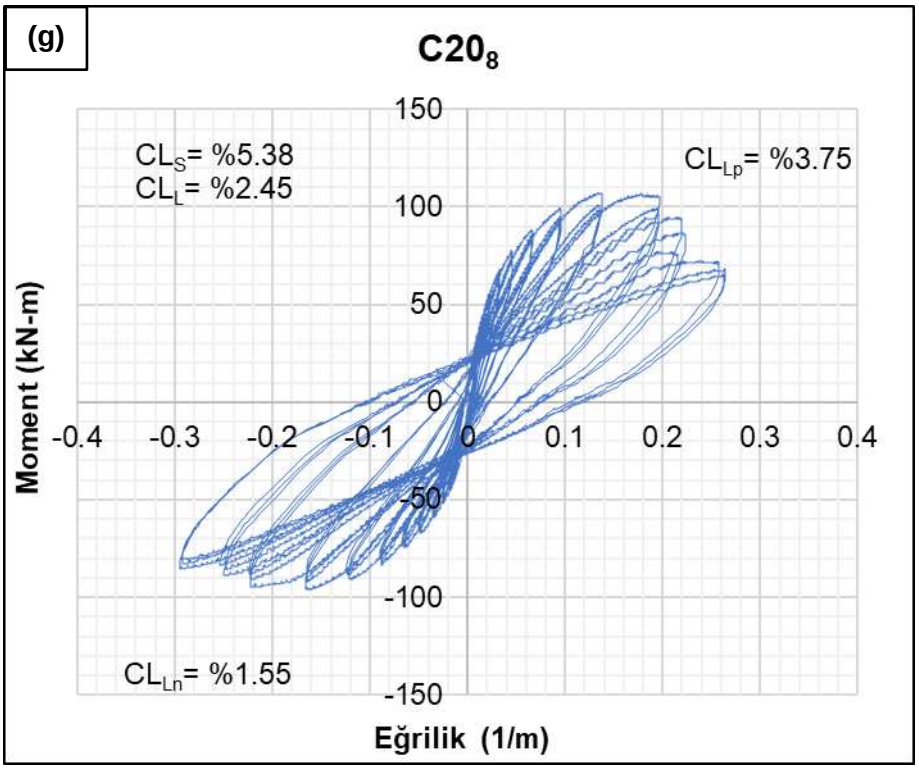

(c)
C20$_4$
CL$_S$= %5.73
CL$_L$= %2.70
CL$_{Lp}$= %4.16
CL$_{Ln}$= %1.59
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4


(d)
C20$_5$
CL$_S$= %11.52
CL$_L$= %7.04
CL$_{Lp}$= %10.34
CL$_{Ln}$= %4.09
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

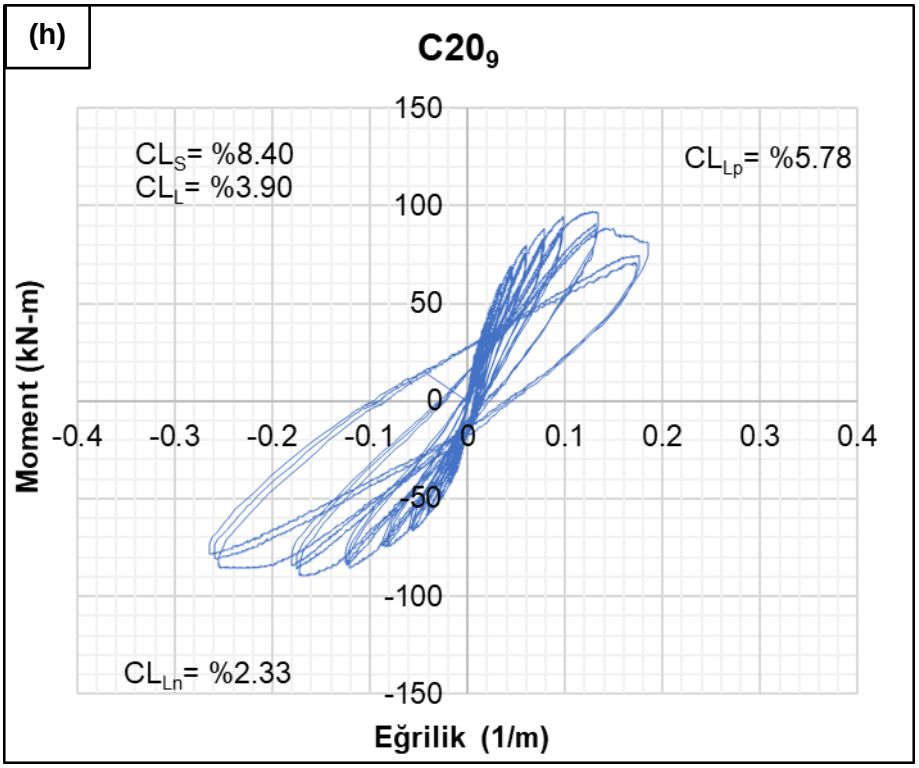

(e)
C20$_6$
CL$_S$= %0.00
CL$_L$= %0.00
CL$_{Lp}$= %0.00
CL$_{Ln}$= %0.00
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

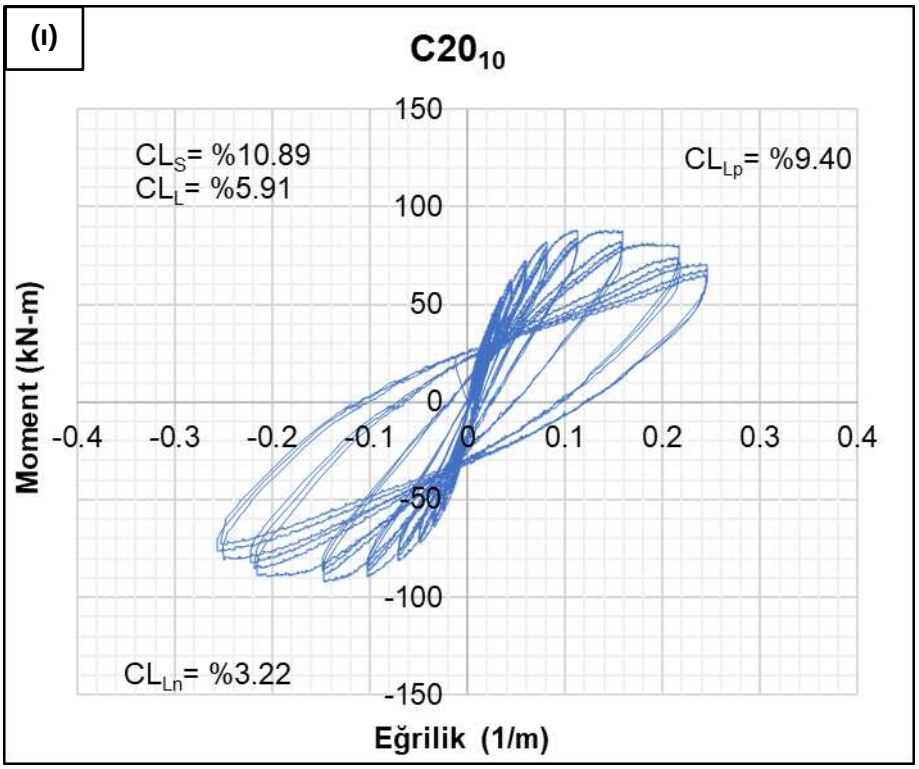

(f)
C20$_7$
CL$_S$= %4.67
CL$_L$= %1.79
CL$_{Lp}$= %2.76
CL$_{Ln}$= %1.09
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

(g)

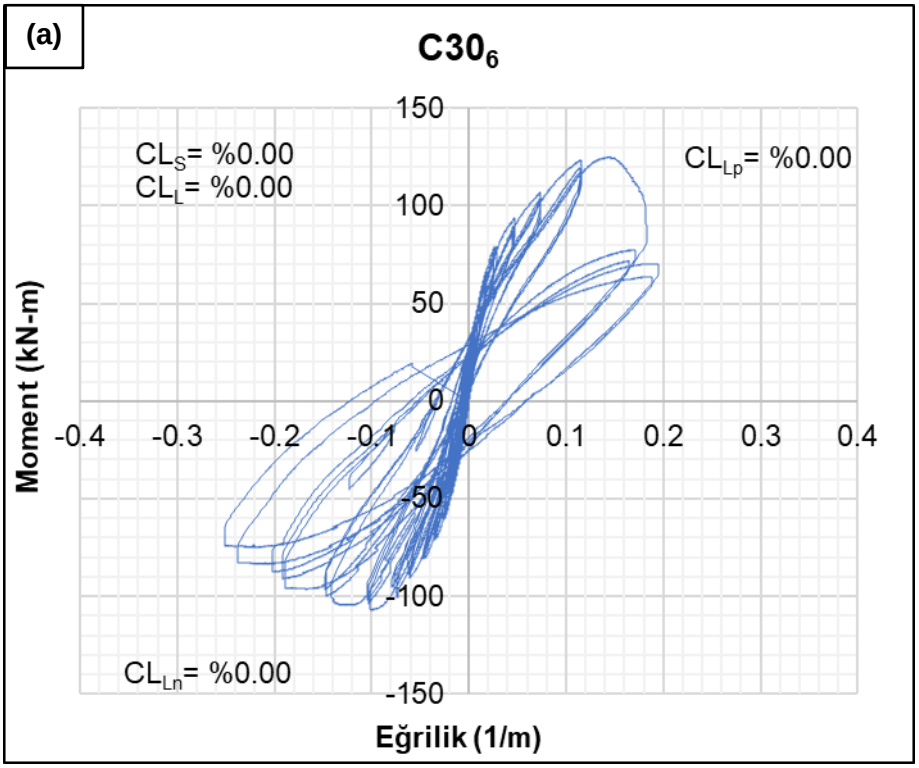

C20$_8$
CL$_S$= %5.38
CL$_L$= %2.45
CL$_{Lp}$= %3.75
CL$_{Ln}$= %1.55
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

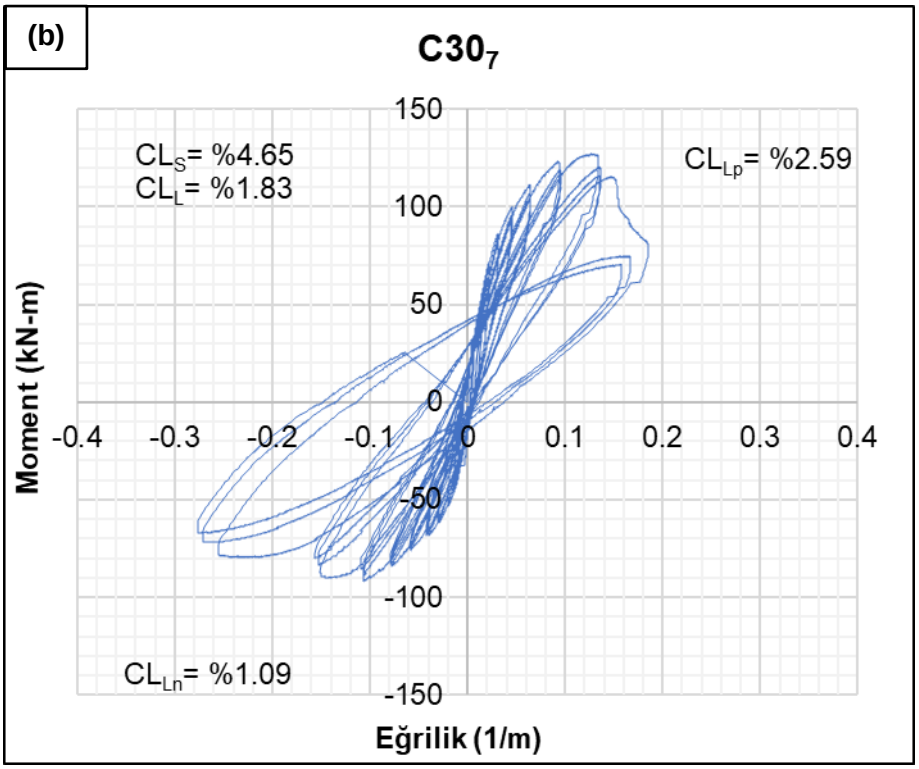
(h)

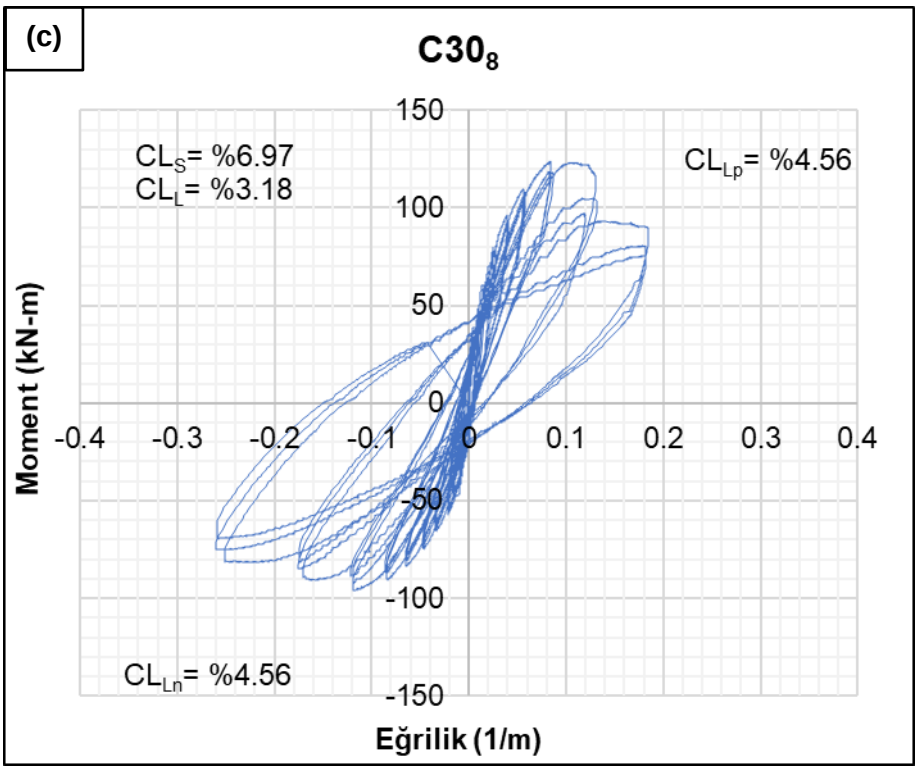

C20$_9$
CL$_S$= %8.40
CL$_L$= %3.90
CL$_{Lp}$= %5.78
CL$_{Ln}$= %2.33
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4

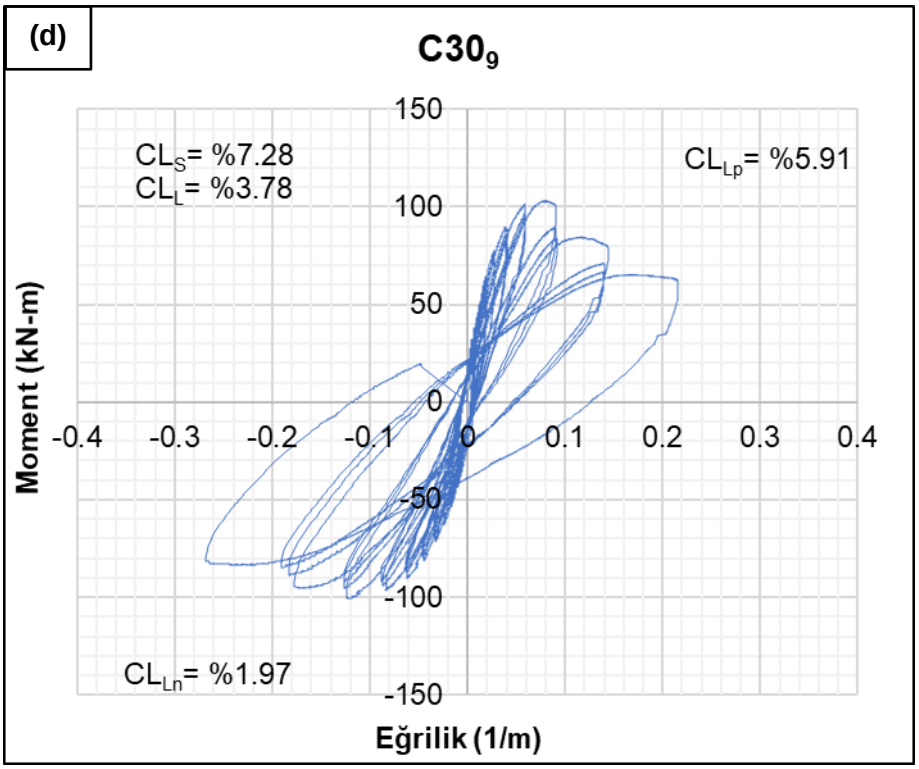


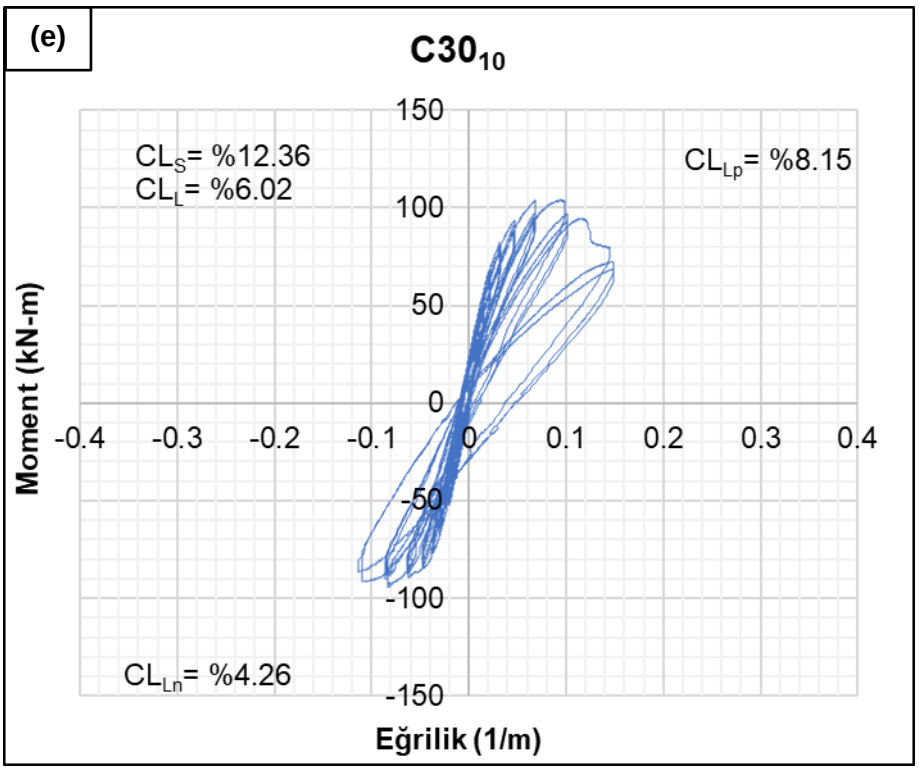
Şekil 4. 43: C20 betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri: (a) $C20_2$; (b) $C20_3$; (c) $C20_4$; (d) $C20_5$; (e) $C20_6$; (f) $C20_7$; (g) $C20_8$; (h) $C20_9$; (ı) $C20_{10}$.




(b)
C30$_7$
CL$_S$= %4.65
CL$_L$= %1.83
CL$_{Lp}$= %2.59
CL$_{Ln}$= %1.09
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4


(c)
C30$_8$
CL$_S$= %6.97
CL$_L$= %3.18
CL$_{Lp}$= %4.56
CL$_{Ln}$= %4.56
Moment (kN-m)
Eğrilik (1/m)
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0.4
-0.3
-0.2
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4





Şekil 4. 44: C30 betonarme kolonlarına ait moment-eğrilik grafikleri: (a) $C30_6$; (b) $C30_7$; (c) $C30_8$; (d) $C30_9$; (e) $C30_{10}$.

Tablo 4. 13: Moment-eğrilik sonuçları.

Numune	Pozitif yükleme yönü					Negatif yükleme yönü					İki doğrultu göçme kriteri			μ_E	E_u (kN.m/m)	η
	M_y, kN.m	M_u, kN.m	$\emptyset_y$, 1/m	$\emptyset_u$, 1/m	$\mu_\emptyset$	M_y, kN.m	M_u, kN.m	$\emptyset_y$, 1/m	$\emptyset_u$, 1/m	$\mu_\emptyset$	M_y, kN.m	M_u, kN.m	$\mu_\emptyset$			
$C8_1$	42.43	40.97	0.08	0.21	2.70	49.20	50.04	0.10	0.23	2.26	45.81	45.50	2.45	5.33	53.92	0.20
$C8_2$	55.14	54.15	0.08	0.22	2.64	35.60	54.21	0.10	0.31	3.18	45.37	54.18	2.93	4.94	89.88	0.20
$C8_3$	46.28	43.73	0.07	0.22	3.17	42.27	40.08	0.08	0.20	2.60	44.28	41.91	2.87	5.12	44.31	0.20
$C8_4$	34.77	37.53	0.08	0.23	2.85	28.98	29.66	0.03	0.08	2.71	31.87	33.59	2.81	4.20	27.25	0.20
$C8_5$	33.51	46.60	0.09	0.23	2.47	45.29	56.76	0.10	0.24	2.32	39.40	51.68	2.39	2.92	52.41	0.20
$C8_6$	54.05	50.14	0.10	0.23	2.38	42.74	44.04	0.08	0.35	4.14	48.39	47.09	3.20	8.38	105.17	0.40
$C8_7$	48.47	47.17	0.10	0.31	3.12	46.18	49.62	0.09	0.25	2.91	47.33	48.39	3.03	5.29	102.29	0.40
$C8_8$	44.77	43.16	0.11	0.24	2.24	52.17	57.54	0.10	0.33	3.23	48.47	50.35	2.72	4.63	94.28	0.40
$C8_9$	48.26	50.04	0.08	0.27	3.52	43.68	46.65	0.09	0.25	2.91	45.97	48.34	3.20	5.87	87.83	0.40
$C8_{10}$	40.65	45.92	0.06	0.18	2.95	44.15	46.23	0.07	0.21	3.01	42.40	46.08	2.98	3.99	47.33	0.40
$C20_1$	76.10	77.14	0.10	0.27	2.68	73.70	80.58	0.12	0.27	2.15	74.90	78.86	2.39	10.34	177.55	0.20
$C20_2$	84.28	84.65	0.10	0.29	2.87	66.27	72.24	0.10	0.22	2.13	75.28	78.44	2.51	8.67	157.51	0.20
$C20_3$	92.46	92.15	0.10	0.31	3.06	58.85	63.90	0.08	0.17	2.11	75.65	78.03	2.64	7.01	137.47	0.20
$C20_4$	77.40	82.56	0.10	0.30	2.97	68.02	79.95	0.09	0.26	2.97	72.71	81.26	2.97	3.81	118.68	0.20
$C20_5$	83.45	89.39	0.09	0.31	3.47	60.36	71.30	0.07	0.32	4.86	71.90	80.35	4.05	3.87	134.04	0.20
$C20_6$	85.11	87.36	0.07	0.27	3.70	77.50	89.23	0.06	0.29	5.01	52.46	58.72	4.27	12.62	197.82	0.40
$C20_7$	92.20	94.39	0.08	0.28	3.60	74.74	85.06	0.06	0.25	4.48	53.92	58.13	3.97	8.18	170.86	0.40
$C20_8$	86.73	94.86	0.06	0.21	3.40	73.07	83.19	0.07	0.29	4.18	51.56	57.12	3.81	9.62	159.80	0.40
$C20_9$	79.80	81.83	0.06	0.18	3.01	71.82	80.58	0.07	0.26	3.55	48.91	51.59	3.30	5.33	73.25	0.40
$C20_{10}$	68.38	80.48	0.06	0.22	3.56	72.92	80.68	0.05	0.25	4.72	45.69	50.25	4.10	7.13	99.54	0.40
$C30_6$	102.99	77.40	0.07	0.13	1.94	88.92	91.00	0.06	0.20	3.36	95.96	84.20	2.61	5.30	77.34	0.40
$C30_7$	106.22	107.84	0.06	0.12	2.17	74.79	77.97	0.06	0.20	3.47	90.51	92.91	2.82	4.56	83.47	0.40
$C30_8$	106.28	104.92	0.05	0.13	2.47	79.90	81.41	0.06	0.16	2.77	93.09	93.17	2.63	3.87	65.14	0.40
$C30_9$	88.55	87.67	0.04	0.08	2.23	84.33	85.64	0.05	0.16	3.12	86.44	86.65	2.75	3.36	55.34	0.40
$C30_{10}$	84.59	88.29	0.05	0.10	2.02	82.25	80.06	0.04	0.10	2.82	83.42	84.18	2.36	2.97	43.29	0.40

Eu: Nihai momente karşılık gelen (maksimum momentin %85'i) enerji kapasiteleri.

BÖLÜM V

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Korozyona maruz kalmış betonarme binalarının pratik ve basit yöntemler ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle korozyon konularında belirli bir geçmişi olmayan mühendislere bu yöntemlerin pratik olarak sunulması ayrıca gerekmektedir. Hali hazırda hem ülkemizdeki yönetmeliklerde hem de diğer bilindik yönetmeliklerde korozyona maruz kalmış betonarme binalarının sismik performans seviyelerinin değerlendirilmesi için kapsamlı bir alt yapı bugüne kadar oluşturulmamıştır. Gerçekleştirilen bu TÜBİTAK çalışmasının ana amacı korozyon donatısındaki aderans-sıyrılma ilişkisinin ampirik bir model ile ortaya koyulması olmasına rağmen; araştırma ekibi deneysel çalışma programının sunmuş olduğu imkanlar neticesinde yukarıda bahsedilen eksikliği gidermek için ekstra çalışmalar gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında sadece aderans-sıyrılma modeli değil; korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının akma ve nihai dayanımlarını, süneklik oranlarını, enerji yutma kapasitelerini tahmin etmeye yönelik ampirik modeller geliştirilmiştir. Tahribatsız değerlendirme yöntemlerinde kullanılmak üzere; birincil korozyon çatlak genişliğine bağlı olarak betonarme donatısındaki korozyon oranının tahmin edilebilmesi ve ardından değerlendirmesi yapılacak olan yapı için sismik performans seviyesinin belirlenmesine yönelik ilk kez yeni bir model bu çalışma kapsamında önerilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında; mevcut literatürdeki birçok deneysel veriler detaylı bir şekilde tekrardan ele alınarak mevcut modeller ve deneysel veriler arasındaki çelişkiler ayrıca bu çalışma kapsamında gözden geçirilmiştir. Korozyona maruz kalmış tüm betonarme kolonlarındaki donatıların çıkartılarak gerçek korozyon oranlarının bulunduğu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır:

- Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının süneklik oranları üzerine çelişkili sonuçların elde edilmesi: Mevcut çalışmalarda bu çelişkili sonuca neden olan birinci etken histerik döngülerin nasıl idealleştirilmesi gerektiği konusundaki yanlış uygulamalardır. Mühendisin deneysel olarak elde ettiği yük-deplasman veya moment-eğrilik ilişkisi için kullanacağı idealleştirme yöntemini doğru ve bilinçli bir şekilde amacına uygun şekilde seçmesi gerekmektedir. Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının süneklikleri için elde edilen çelişkinin diğer ve temel nedeni süneklik oranlarının deplasman bazlı ($\mu_D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$) olarak hesaplanmasıdır. Korozyondan dolayı betonarme donatılarının çapları azalmaktadır ve beton paspayının da korozyon çatlaklarından dolayı hasar alması sebebi ile; kesitin akma dayanımı

ve bu dayanımına karşılık gelen deplasman değeri azalmakta ve korozyonun sünekliği artıyor şeklinde yanlış bir sonuca varılmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarının süneklik oranlarının enerji yöntemine ($\mu_E = \frac{\Sigma E}{E_y}$) bağlı olarak hesaplanması gerektiği önemle vurgulanmaktadır. Eğer mühendis deplasman bazlı süneklik oranını hesaplama yolunu tercih ediyorsa; böyle bir durumda ise referans kolonunun akma dayanımına karşılık gelen yerdeğiştirmedeki tükettiği enerjiyi hesaplaması gerekmektedir. Hesaplamış olduğu tüketilen enerjiyi göz önüne alarak; söz konusu tüketilen enerji için korozyona maruz kalmış betonarme kolonunun tüketilen aynı enerji için yerdeğiştirme değerini göz önüne alması gerekmektedir.

- Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının değerlendirilmesinde deprem indeksleri açısından en doğru yaklaşımın enerji bazlı hesaplamaların olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle; yine enerji yöntemini içinde barındıran hasar indeks hesabı korozyona maruz kalmış betonarme elemanları için daha doğru sonuçlara ulaşılmasına olanak sağladığı sonucuna varılmıştır. Hasar indeks sonuçlarının anlatıldığı bölümde de bahsedildiği üzere; belirlen ötelenme oranına karşılık gelen tanımlanmış hasar indeksleri; korozyondan dolayı aynı ötelenme oranı için yeni bir hasar indeksinin tanımlaması zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

- Mevcut literatürde paslanmış betonarme kolonlarının süneklik değerleri için elde edilen çelişkili (sünekliğin sürekli artması veya azalması) sonuçların diğer bir nedeni ise göz önüne alınan göçme kriteridir. Tek doğrultulu göçme kriteri ve histerik döngülerin iskeletlerinin çizilerek yanlış idealleştirme yöntemlerinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Tersinir yükleme programlarında geleneksel betonarme kolonları için dahi pozitif ve negatif yöndeki kapasiteler enerji tüketimine ve malzeme yorulmasına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bundan dolayı, tersinir yüklemenin deney numuneleri üzerindeki yapısal davranış etkisi göz önüne alınarak iki doğrultudan elde edilecek ortalama göçme kriteri kabulünün daha doğru sonuçlar vereceği açık bir şekilde yapılan çalışma ile ortaya koyulmuştur.

- Korozyona maruz kalmış betonarme kolonları için geliştirilen modellerin ve modellerdeki düşük oranlardaki tahmin performanslarının başlıca nedeni ise çalışmalar kapsamında göz önüne alınan korozyon oranıdır (örneğin: maksimum korozyon oranı). Gerçekleştirilecek korozyon çalışmaları ve geliştirilecek modeller için; araştırmacının hangi donatı tipinde (örneğin: çekme donatısı, basınç donatısı; çekme ve basınç donatısını birlikte veya etriyeler) ve hangi korozyon oranını göz önüne alması gerektiğini doğru ve amacına uygun bir şekilde belirlemesi gerekmektedir. Proje rapor kısmında tartışıldığı gibi; etriyeler betonarme elemanlarının süneklik oranlarında etkin bir rol oynamaktadır. Bundan dolayı; göz önüne alınacak korozyon oranı sadece çekme donatısından elde edilecek korozyon oranı olmamalıdır. Örneğin; eğer süneklik değerlendirilmesi yapılıyor ise, göz önüne alınacak

korozyon oranı etriyelerdeki korozyon oranı ile ilişkilendirilmiş bir korozyon oranı olmalıdır. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma sonucunda; etriyelerdeki ortalama korozyon oranlarının boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranlarına oranlarının varyasyonu 0.18'dir. Bundan dolayı etriyelerde meydana gelen korozyonun yapısal davranış üzerine etkisini yansıtabilmek için; maksimum korozyon oranı yerine ortalama korozyon oranlarının göz önüne alınması daha iyi sonuçlar verdiği değerlendirmesi yapılan önceki modellerle ortaya koyulmuştur. Korozyonun sargı donatılarının mekanik özelliklerine etkisinin daha fazla olduğu ileriki çalışmalar için unutulmamalıdır. Etriyelerin ilk kütleleri boyuna donatılara göre çok daha az olduğundan; aynı korozyon oranında korozyon etkisi etriyelerde daha fazladır.

- Korozyona maruz kalmış betonarme kolonları için değerlendirmeleri yapılan deprem indekslerindeki çelişkili sonuçların diğer bir nedeni ise; söz konusu çalışmalarda gerçek korozyon oranlarının elde edilmemesi ve Faraday Kanununa göre (teorik kütle kaybı) değerlendirmelerin yapılmasıdır. Faraday kütle kaybına göre hesaplanan korozyon oranının betonun gösterdiği dirençten dolayı her zaman gerçek korozyon oranından fazla olduğu göz ardı edilmemelidir. Bundan dolayı; gerçekleştirilecek korozyon çalışmaları için gerçek korozyon oranlarının elde edilememesi durumunda araştırmacıların teorik korozyon oranlarını mevcut literatürdeki modelleri göz önüne alarak gerçek korozyon oranlarını tahmin etme yoluna gitmelidir. Bu noktada; kullanılacak model seçimi betonarme elemanlarının yüzey alanlarına bağlı olarak önem arz etmektedir. Gerçek korozyon oranlarının elde edilememesi durumunda ise; ikinci yöntem olarak araştırmacının plastik mafsal bölgesinden alacağı kupon donatıları üzerinden gerçek korozyon oranlarını elde etmesi önem arz etmektedir.

- Ülkemizdeki birçok yazılım programlarında da hali hazırda korozyona maruz kalmış betonarme elamanlarının değerlendirilmesinde korozyon oranına bağlı olarak yalnızca donatı çapları azaltılmaktadır. Bu durumun getireceği riskler çok uç bir örnek ile açıklanabilir. Denge üstü donatı oranına sahip olan bir betonarme elemanının korozyona maruz kalması durumunda ve donatı çapının azaltılması korozyonun gevrek bir davranıştan sünek bir davranışa sebebiyet verebileceği göz ardı edilmemelidir. Diğer bir örnek ise iki farklı donatı çapına sahip ancak aynı korozyon oranlarına sahip betonarme elemanları için gösterilebilir. Aynı korozyon oranında donatı çapı oldukça fazla olan bir betonarme elemanında düşük korozyon oranlarının etkisi teorik olarak fazla olmayacaktır. Ancak aynı korozyon oranında beton hacminin artmasına bağlı olarak betonda meydana gelen çatlamalar ve bundan dolayı yük etkisi altında donatıların daha az gerilme alarak gevrek davranışa sebebiyet vereceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bundan dolayı korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarının kesit dönme sınır durumlarının deneysel verilerde göz önüne alınarak belirlenmesi ve mevcut yönetmeliklerde kullanılmak üzere sunulmasının çok önemli olduğu düşünülmektedir.

- Düşük korozyon oranlarında korozyonun sağlamış olduğu sargı etkisi ile birlikte betonarme kolonlarının deprem indeksleri bakımından artışlar gözlenebilir. Ancak bu artışların hangi korozyon seviyelerinde olduğuna karar verilmesi birçok nedenden (korozyon türü, donatıların konumu, paspayının etkisi, beton basınç dayanımı) dolayı oldukça zordur.

- Aderans gerilmesini azaltan en belirgin parametre korozyondan dolayı meydana gelen birincil korozyon çatlaklarının yük etkisi altında daha da genişlemesi ve donatıdaki gerilmelerin azalmasıdır. Aderans gerilmesinin hesaplanmasında özellikle sıklıkla kullanılan teorik aderans boyuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Korozyon etkisi ile birlikte aderans boyu değişmektedir. Korozyonun beton çekme dayanımına bağlı olarak birincil korozyon çatlak genişliği üzerine etkisi açık bir şekilde bu çalışma ile tekrardan ortaya koyulmuştur. Bundan dolayı korozyona maruz kalmış betonarme elemanları için bu etkinin göz önüne alınması gerekmektedir. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma ile birlikte bu etkide göz önüne alınarak farklı beton basınç dayanımları için aderans-sıyrılma ilişkisini tahmin etmeye yönelik ampirik modeller geliştirilmiştir.

- Gerçekleştirilen çalışma kapsamında korozyonun neden olduğu en belirgin diğer bir parametre ise betonarme kolonlarının plastik mafsal boylarındaki değişkenliktir. Doğrusal olmayan analizlerde korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının plastik mafsal boyunu korozyon oranına bağlı olarak tahmin etmek için bir ampirik modelin geliştirilmesi çalışması bu proje kapsamında devam ettirilmektedir.

- Aynı şekilde deneysel verilerden elde edilen moment-eğrilik ilişkileri kapsamında; doğrusal performans analizlerinde kullanılmak üzere kesit dönme sınır şartlarının belirlenmesi için çalışmalar devam ettirilerek ülke mühendislerinin ve yönetmeliğimizde kullanılmak üzere hazır hale getirilmesi planlanmaktadır.

- Gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında her bir betonarme kolon donatısındaki gerçek korozyon oranları proje raporu kapsamında detaylıca sunulmuştur. Sunulan veriler kullanılarak; her bir donatıdaki korozyon oranı ve mekanik özellikleri ayrı ayrı göz önüne alınarak; betonarme kolonlarının moment-eğrilik ve taşıma gücü kapasiteleri denge denkleri kullanılarak analitik çalışmalar yürütülebilir. Böylelikle her bir donatının taşıma gücü kapasitesine katkısı sahip olduğu korozyon oranı da göz önüne alınarak hesaplanabilir. Bu noktada kapsamlı bir analitik modelin oluşturulmasına olanak sağlayacak bu verilerin daha da güçlendirilmesi için; korozyona maruz kalmış beton malzemesin gerilme-şekil değiştirme modellemesine olanak sağlayacak deneysel çalışma yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇALAR

Akçay, B., Önen, Y.H., Öztekin, E. 2001. “İstanbul binalarında karot yardımıyla beton nitelik denetimi (Sayfa 1-3)”, XVI. Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongre ve Sergisi.

Akyüz, S., Uyan, M. 1992. “13 Mart 1992 Erzincan Depreminde Orta Hasar Gören Binalardaki Betonların Kaliteleri Üzerine”, 2’nci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı (Sayfa 525-532), 10-23 Mart TMMOB İMO İstanbul Şubesi, İstanbul.

Alsiwat, J.M., Saatcioglu, M. 1992. “Reinforcement anchorage slip under monotonic loading”, Journal of Structural Engineering, 118(9), 2421-2438.

American Concrete Institute. Committee 318. 2002. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02). American Concrete Institute.

Applied Technology Council. 2007. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Non-structural Components. FEMA 461 2007. Redwood City, CA: Federal Emergency Management Agency, U.S. Department of Homeland Security.

Auyeung, Y., Balaguru, P., Chung, L. 2000. “Bond behavior of corroded reinforcement bars”, Materials Journal, 97(2), 214-220.

Bal, İ.E., Gülay, F.G., Görgülü, O. 2007. “Adana bölgesindeki B/A yapı stoğu karakteristiklerinin hasar kayıp tahmin modelleri açısından incelenmesi (Sayfa 411-422)”, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı.

Bal, İ.E., Yıldız, M. 2005. “İstanbul Genelinde ve İlçeler Bazında Mevcut Binaların Beton Dayanımlarının Değerlendirilmesi (Sayı 80)”, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Bülteni.

Bicer, K., Yalciner, H., Balkıs, A.P., Kumbasaroglu, A. 2018. “Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers”, Construction and Building Materials, 185, 574-588.

Cabrera, J.G. 1996. “Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion”, Cement and Concrete Composites, 18(1), 47-59.

Choe, D.E., Gardoni, P., Rosowsky, D., Haukaas, T. 2008. “Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion”, Reliability Engineering and System Safety, 93(3), 383-393.

Chung, L., Cho, S.H., Kim, J.H.J., Yi, S.T. 2004. “Correction factor suggestion for ACI development length provisions based on flexural testing of RC slabs with various levels of corroded reinforcing bars”, Engineering Structures, 26(8), 1013-1026.

Chung, L., Kim, J.H.J., Yi, S.T. 2008. “Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars”, Cement and Concrete Composites, 30(7), 603-611.

Çağatay, İ.H. 2005. “Experimental evaluation of buildings damaged in recent earthquakes in Turkey”, Engineering Failure Analysis, 12(3), 440-452.

Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z. 2017. “Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns”, Engineering Structures, 153, 264-278.

El Maaddawy, T., Chahrour, A., Soudki, K. 2006. “Effect of fiber-reinforced polymer wraps on corrosion activity and concrete cracking in chloride-contaminated concrete cylinders”, Journal of Composites for Construction, 10(2), 139-147.

Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., Zhu, C. 2004. “Corrosion influence on bond in reinforced concrete”, Cement and Concrete Research, 34(11), 2159-2167.

Ghods, P., Isgor, O.B., Pour-Ghaz, M. 2007. “A practical method for calculating the corrosion rate of uniformly depassivated reinforcing bars in concrete”, Materials and Corrosion, 58(4), 265-272.

Gulikers, J. 2005. “Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement”, Materials and Corrosion, 56(6), 393-403.

Guo, A., Li, H., Ba, X., Guan, X., Li, H. 2015. “Experimental investigation on the cyclic performance of reinforced concrete piers with chloride-induced corrosion in marine environment”, Engineering Structures, 105, 1-11.

Jirsa, J., Lutz L., Gergely, P. (ACI Committee 408). 1979. “Suggested development splice and standard hook previsions for deformed bars in tension”, Concrete International Design Construction, 1(7) 44-46, USA.

Khan, I., François, R., Castel, A. 2014. “Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams”, Cement and Concrete Research, 56, 84-96.

Lee, H.S., Noguchi, T., Tomosawa, F. 2002. “Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion”, Cement and Concrete Research, 32(8), 1313-1318.

Lehman, D.E., Moehle, J.P. 2000. “Seismic performance of well confined concrete bridge columns”, PEER Report 1998/01. University of California, Berkeley.

Li, C.Q. 2005. “Time dependent reliability analysis of the serviceability of corrosion affected concrete structures”, International Journal of Materials and Structural Reliability, 3(2), 105-116.

Li, C.Q., Melchers, R.E. 2006. “Time-dependent serviceability of corrosion-affected concrete structures”, Magazine of Concrete Research, 58(9), 567-574.

Li, D., Wei, R., Xing, F., Sui, L., Zhou, Y., Wang, W. 2018. “Influence of Non-uniform corrosion of steel bars on the seismic behavior of reinforced concrete columns”, Construction and Building Materials, 167, 20-32.

Liu, X., Jiang, H., He, L. 2017. “Experimental investigation on seismic performance of corroded reinforced concrete moment-resisting frames”, Engineering Structures, 153, 639-652.

Lowes, L.N., Altoontash, A. 2003. “Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading”, Journal of Structural Engineering, 129(12), 1686-1697.

Ma, Y., Che, Y., Gong, J. 2012. “Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading”, Construction and Building Materials, 29, 548-556.

Malumbela, G., Alexander, M., Moyo, P. 2009. “Steel corrosion on RC structures under sustained service loads—A critical review”, Engineering Structures, 31(11), 2518-2525.

Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P. 2014. “Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns”, Engineering Structures, 76, 112-123.

Morinaga, S. 1988. Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on rate of corrosion of reinforcing steel. Special Report of Institute of Technology, Shimizu Corporation, 23.

Otani, S., Sozen, M.A. 1972. “Behaviour of multi-story reinforced concrete frames during earthquakes”, Structural Research Series 392. Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana, Ill.

Özturan, T. 2000. “İstanbul’da Yapı Malzemesi Sorunları”, İkinci İstanbul ve Deprem Sempozyumu, İTÜ Maçka G Amfisi, İstanbul.

Park, R., Paulay, T. 1975. Reinforced concrete structures, John Wiley and Sons.

Park, Y.J., Ang, A.H.S. 1985. “Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete”, Journal of Structural Engineering, 111(4), 722-739.

Park, Y.J., Ang, A.H., Wen, Y.K. 1987. “Damage-limiting aseismic design of buildings”, Earthquake Spectra, 3(1), 1-26.

Paul, S.C., Babafemi, A.J., Conradie, K., van Zijl, G.P. 2017. “Applied voltage on corrosion mass loss and cracking behavior of steel-reinforced SHCC and mortar specimens”, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(5), 1-9.

Pochanart, S., Harmon, T. 1989. “Bond-slip model for generalized excitations including fatigue”, Materials Journal, 86(5), 465-474.

Rodriguez, J., Ortega, L.M., Casal, J., Diez, J.M. 1996. pp. 117-126. Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures. In: Sjostrom C, editor. 7th Int. Conf. On Durability of Building Materials and Components. Stockholm: E and FN Spon London.

Sozen, M.A., Moehle, J.P. 1990. “Development and Lap-splice Lengths for Deformed Reinforcing Bars in Concrete: A Report to the Portland Cement Association, Skokie, IL, and the Concrete Reinforcing Steel Institute, Schaumburg, IL. Portland Cement Association.

Sezen, H., Moehle, J.P. 2004. “Strength and deformation capacity of reinforced concrete columns with limited ductility”, In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-15). Canada: Vancouver.

Sezen, H., Moehle, J.P. 2006. “Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement”, ACI Structural Journal, 103(6), 824-849.

Sezen, H., Setzler, E.J. 2008. “Reinforcement slip in reinforced concrete columns”, ACI Structural Journal, 105(3), 280-289.

Shimizu, Y., Hirosawa, M., Zhou, J. 2000. Statistical analysis of concrete strength in existing reinforced concrete buildings in Japan, In Proceedings of the 12WCEE.

Stanish, K., Hooton, R.D. Pantazopoulou, S.J. 1999. “Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete”, ACI Structural Journal, 96(6), 915-921.

Structural Engineers Association of California (SEAOC). 1995. Vision 2000: Performance-based seismic engineering of buildings, Sacramento, CA: SEAOC.

Suffern, C., El-Sayed, A., Soudki, K. 2010. “Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams”, Canadian Journal of Civil Engineering, 37(8), 1045-1056.

Sun, Z., Si, B., Wang, D., Guo, X. 2008. “Experimental research and finite element analysis of bridge piers failed in flexure-shear modes”, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 7(4), 403-414.

Varum, H. 2003. Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Vidal, T., Castel, A., François, R. 2004. “Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete”, Cement and Concrete Research, 34(1), 165-174.

Yalciner, H., Sensoy, S., Eren, O. 2012a. “Effect of corrosion damage on the performance level of a 25-year-old reinforced concrete building”, Shock and Vibration, 19(5), 891-902.

Yalciner, H., Eren, O., Sensoy, S. 2012b. “An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level”, Cement and Concrete Research, 42(5), 643-655.

Yalciner, H., Sensoy, S., Eren, O. 2012c. “Time-dependent seismic performance assessment of a single-degree-of-freedom frame subject to corrosion”, Engineering Failure Analysis, 19, 109-122.

Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Ertuc, İ., Turan, A.İ. 2018. “Confinement effect of geo-grid and conventional shear reinforcement bars subjected to corrosion”, Structures, 13, 139-152.

Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Karimi, A. 2020. “Prediction of seismic performance levels of corroded reinforced concrete columns as a function of crack width”, Advances in Civil Engineering Materials, 8(3), 376-397.

Yang, S.Y., Song, X.B., Jia, H.X., Chen, X., Liu, X.L. 2016. “Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar”, Construction and Building Materials, 121, 319-327.

Yuan, W., Guo, A., Li, H. 2017. “Experimental investigation on the cyclic behaviors of corroded coastal bridge piers with transfer of plastic hinge due to non-uniform corrosion”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 102, 112-123.

Zhang, R., Castel, A., François, R. 2010. “Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process”, Cement and Concrete Research, 40(3), 415-425.

Zhou, Y.W., Wu, Y.F., Teng, J.G., Leung, A.Y.T. 2009. “Ductility analysis of compression-yielding FRP-reinforced composite beams”, Cement and Concrete Composites, 31(9), 682-691.

EKLER

EK.1: Betonarme Kolonlarının Yükleme Deneylerinden Sonra Kırılarak Donatıların Çıkartılması



C8 betonarme kolonları

C2



C5



C9



C10



C20 betonarme kolonları

C12



C13



C15



C20



C30 betonarme kolonları

C23



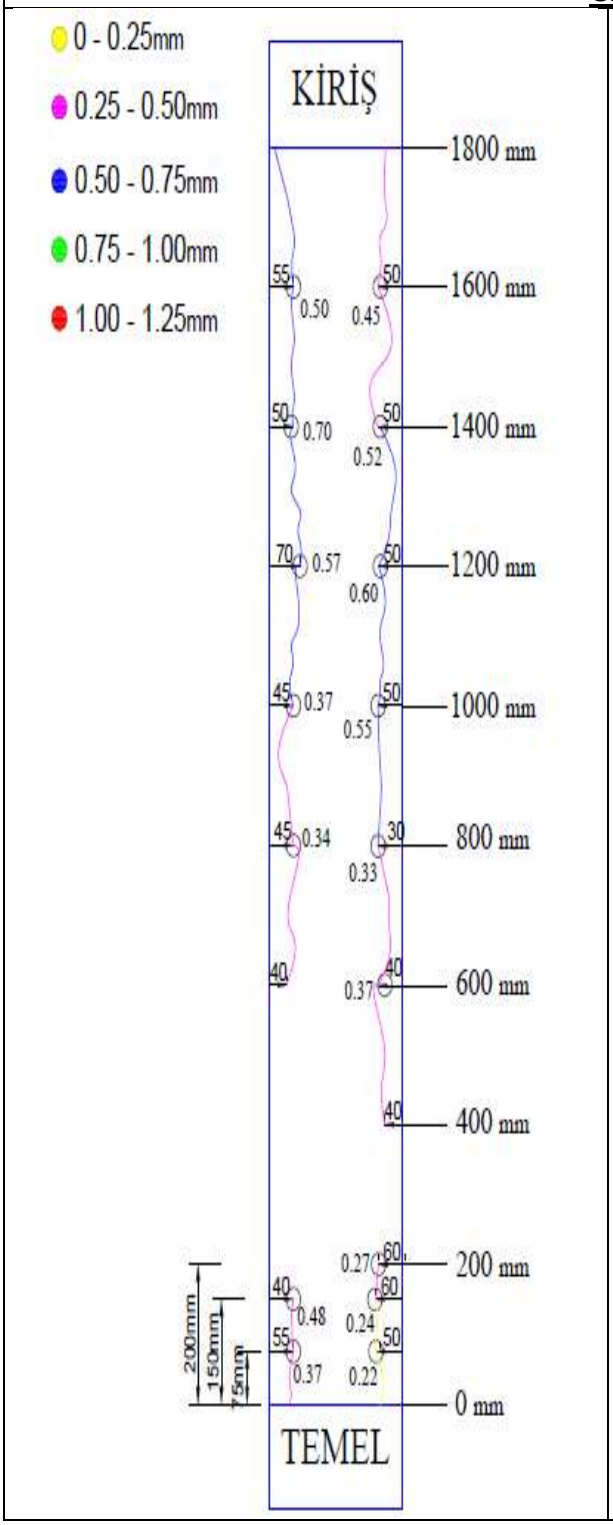
C28



EK.2: Betonarme Kolonları İçin Birincil Çatlak Haritaları

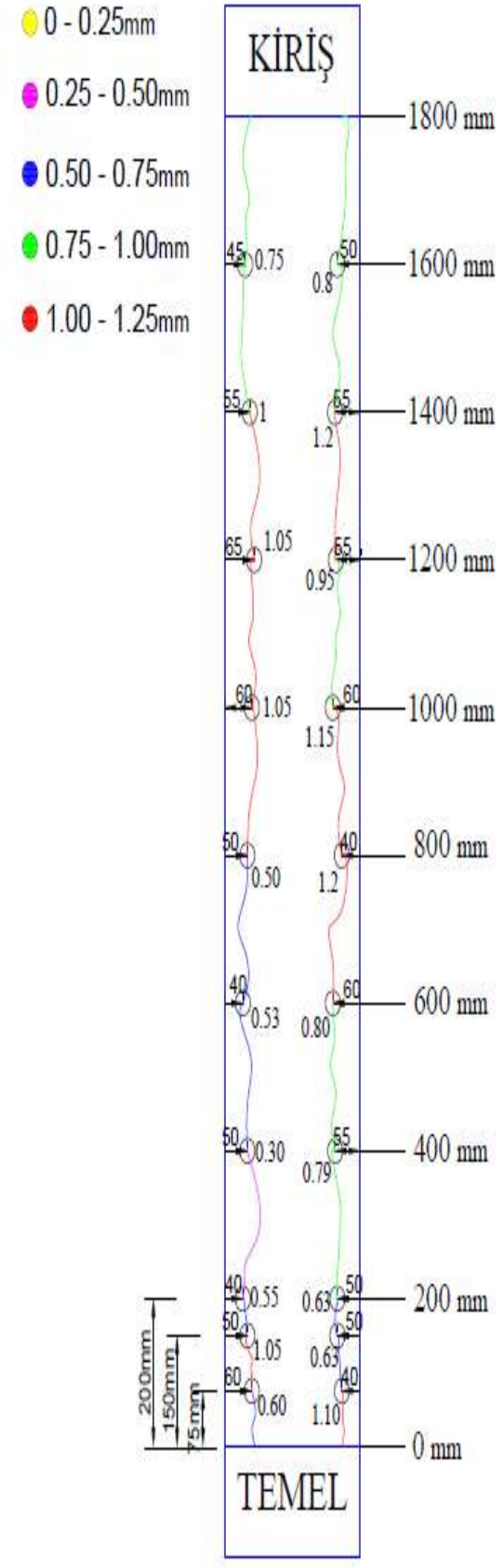
C8 betonarme kolonları

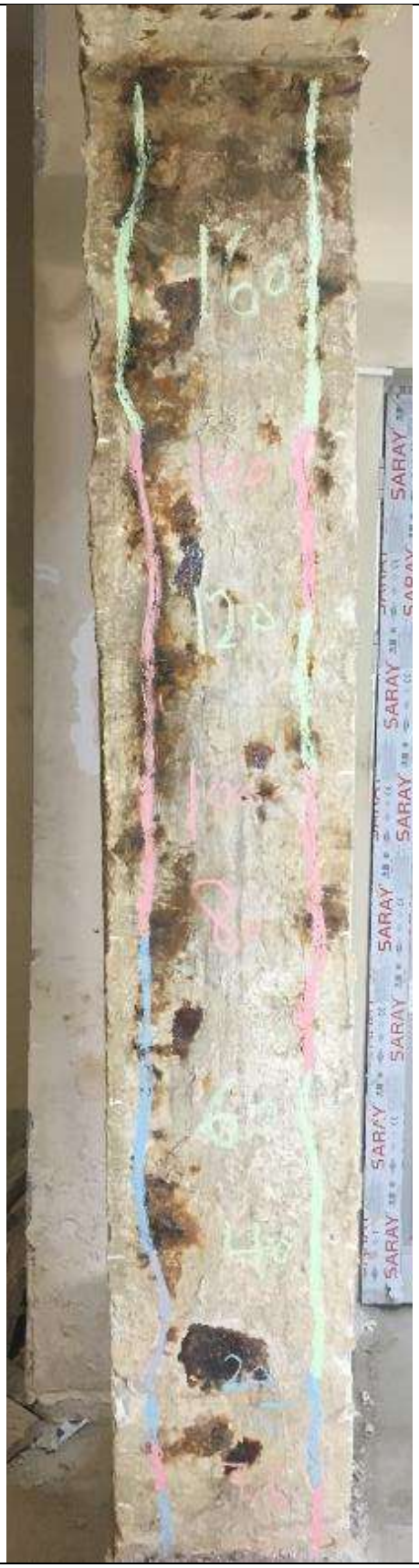
C2



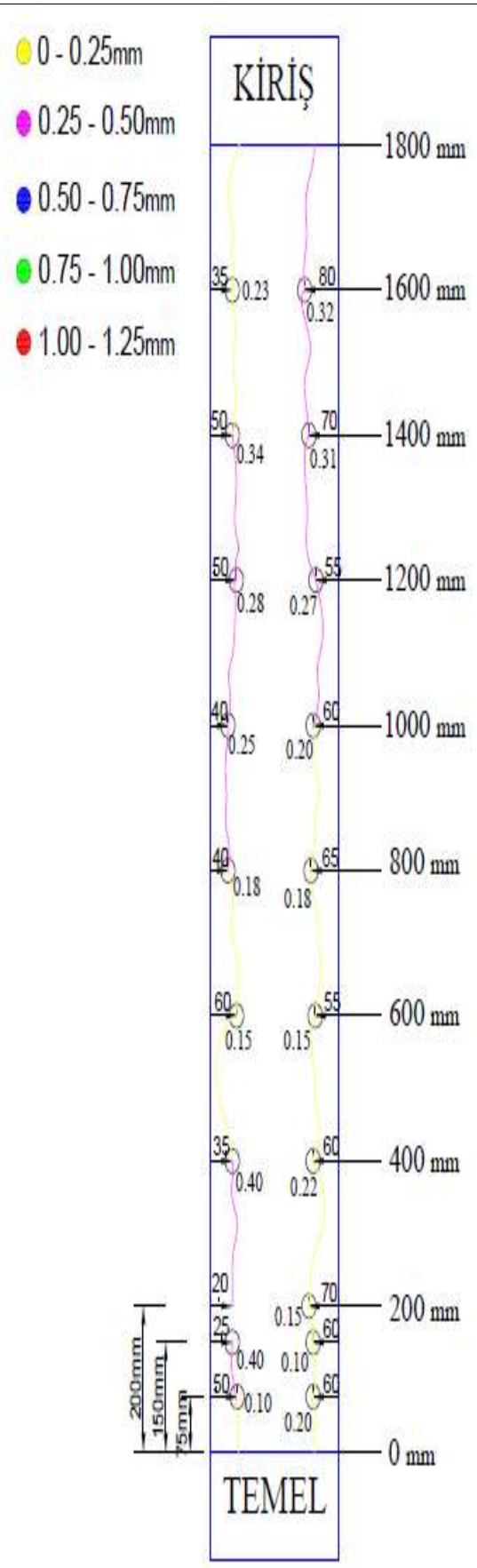


C5


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm

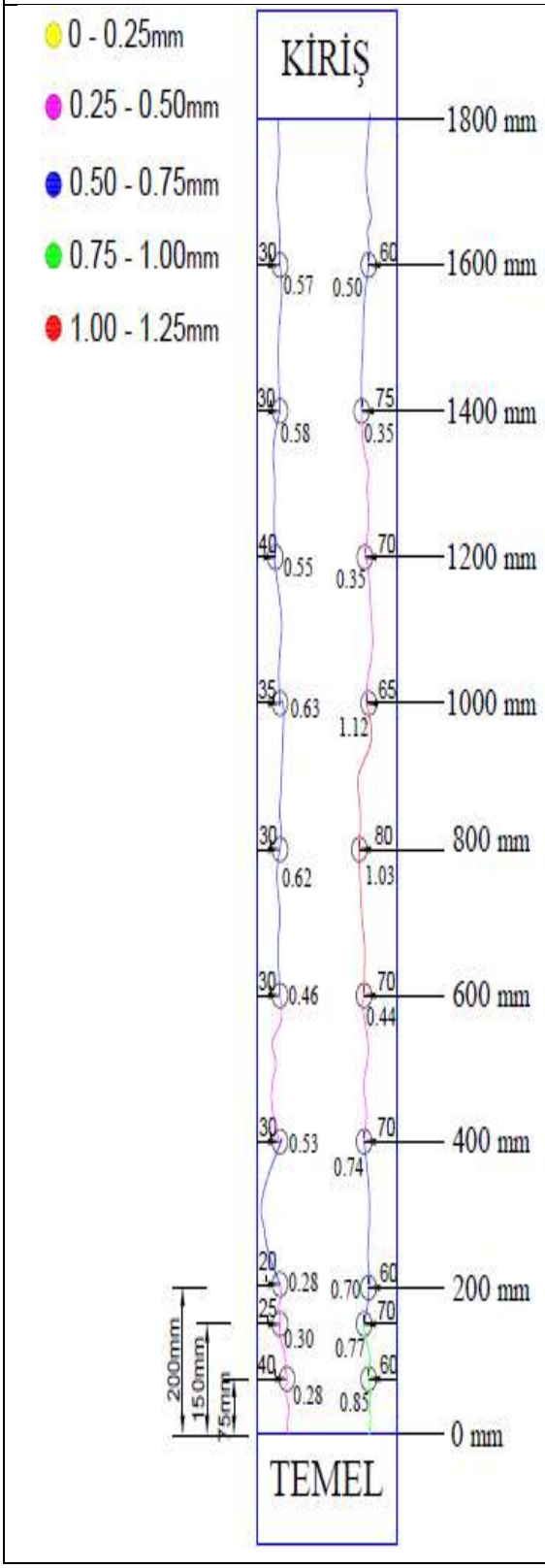


C8


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm

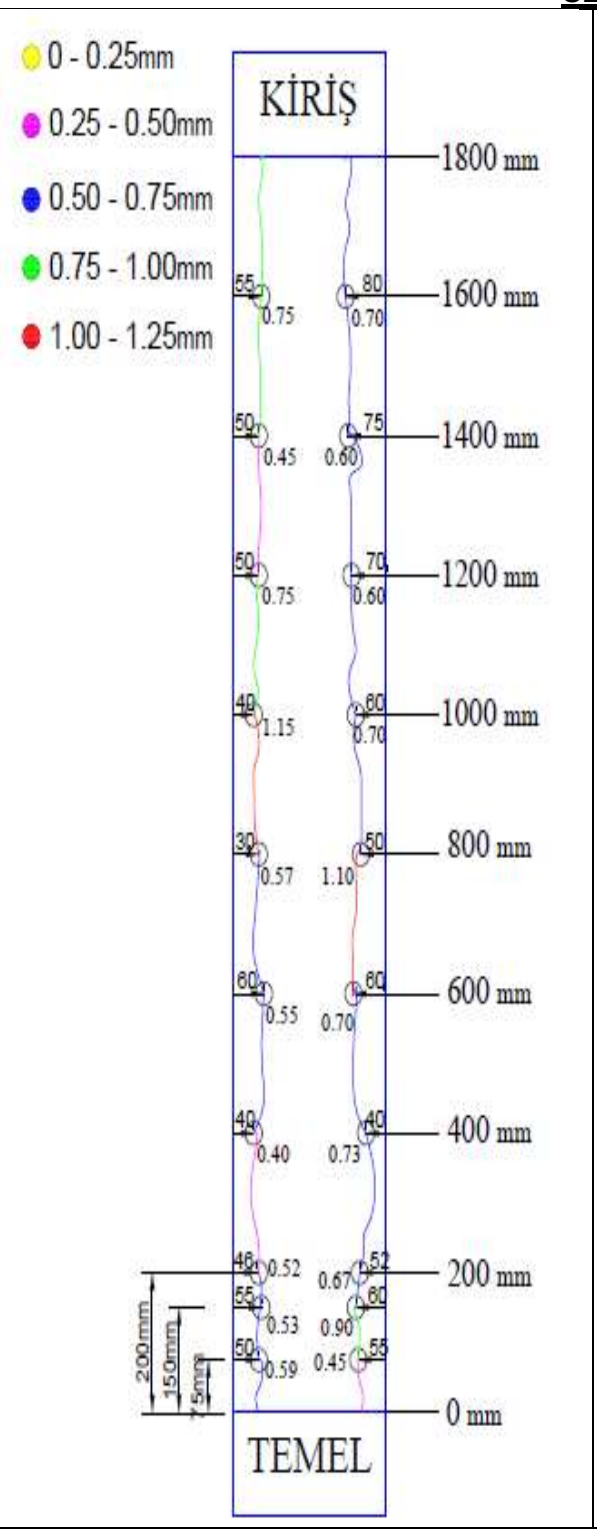


C9


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
30 0.57 60 0.50
30 0.58 75 0.35
40 0.55 70 0.35
35 0.63 65 1.12
30 0.62 80 1.03
30 0.46 70 0.44
30 0.53 70 0.74
20 0.28 60 0.70
25 0.30 70 0.77
40 0.28 60 0.85
200mm
150mm
75mm



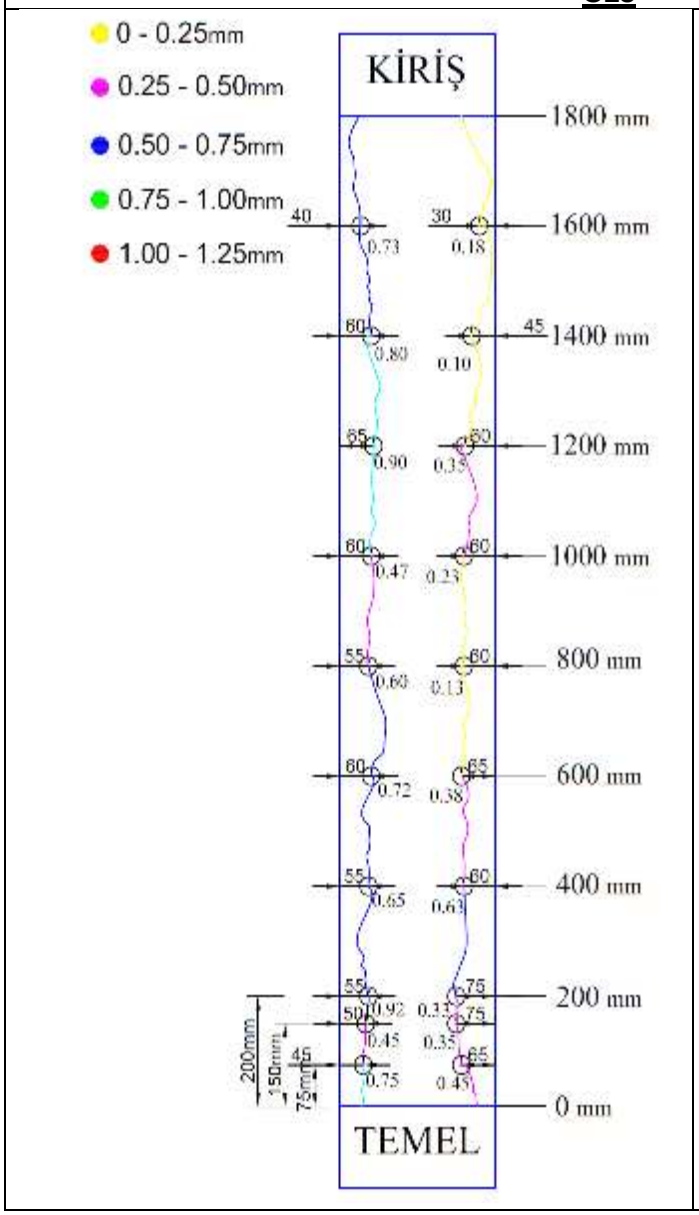
C10


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm



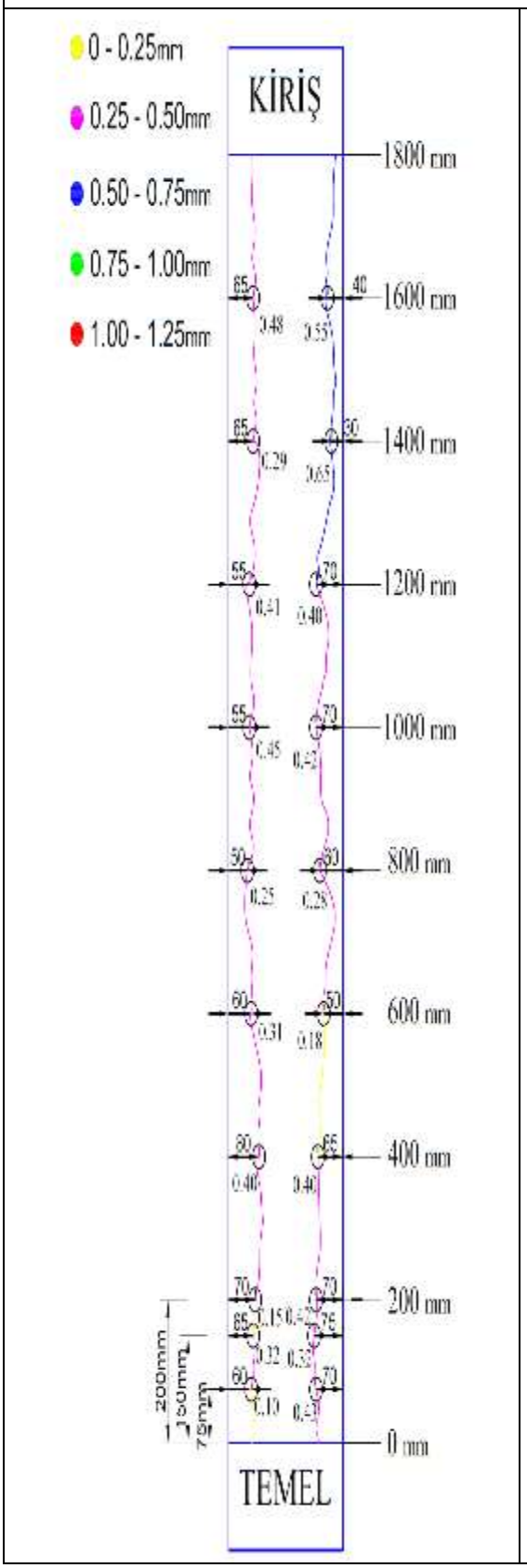
C20 betonarme kolonları

C15



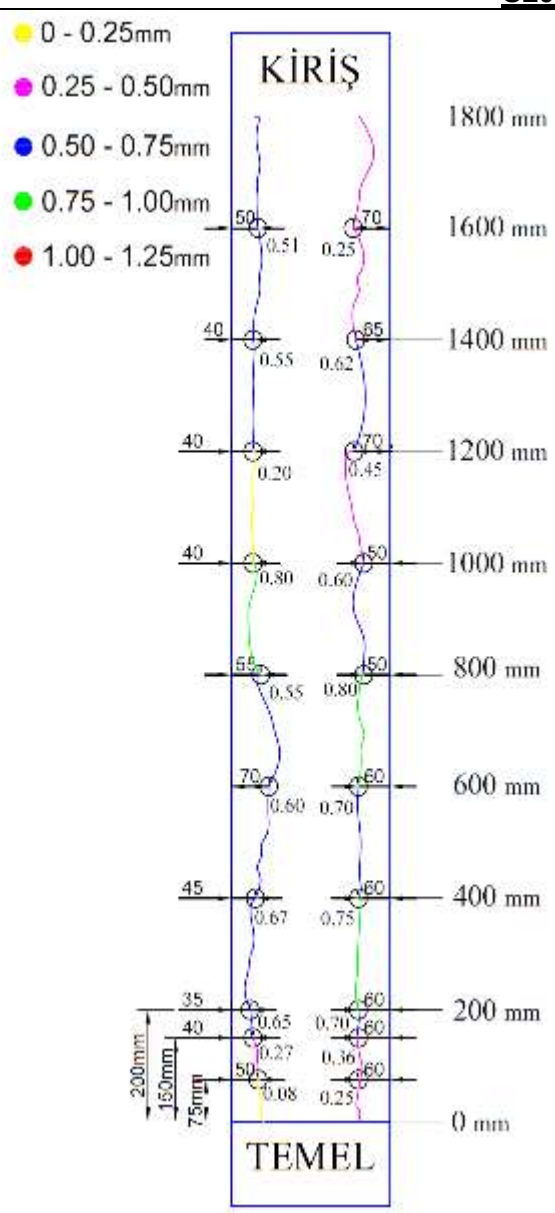


C18


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm

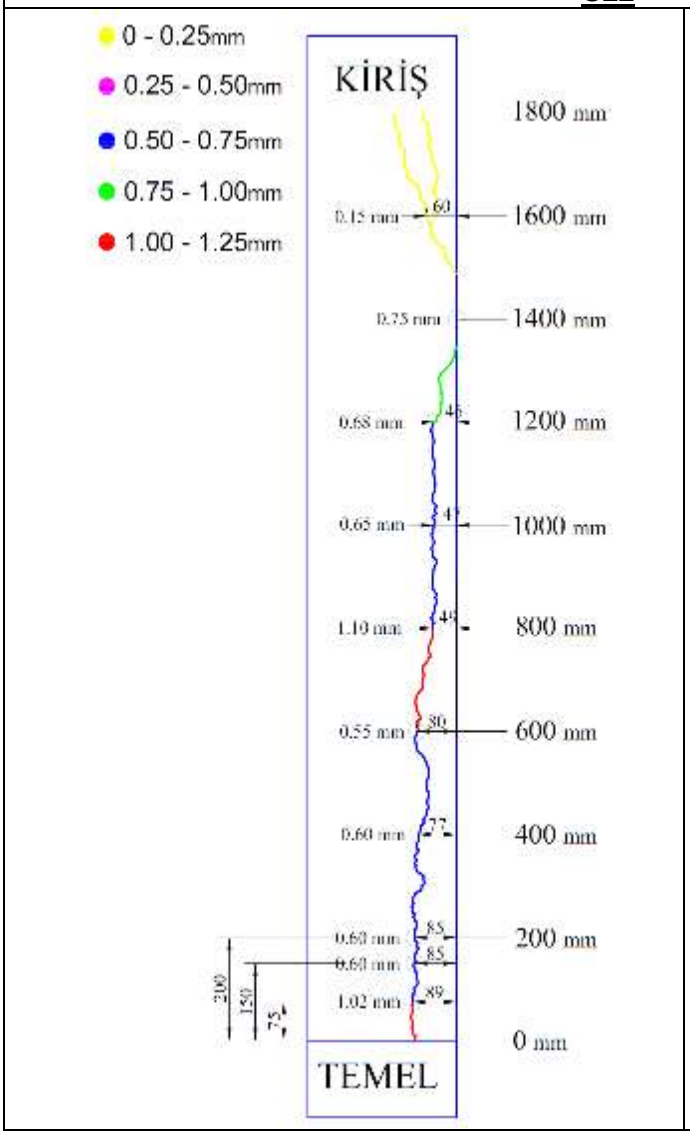


C20

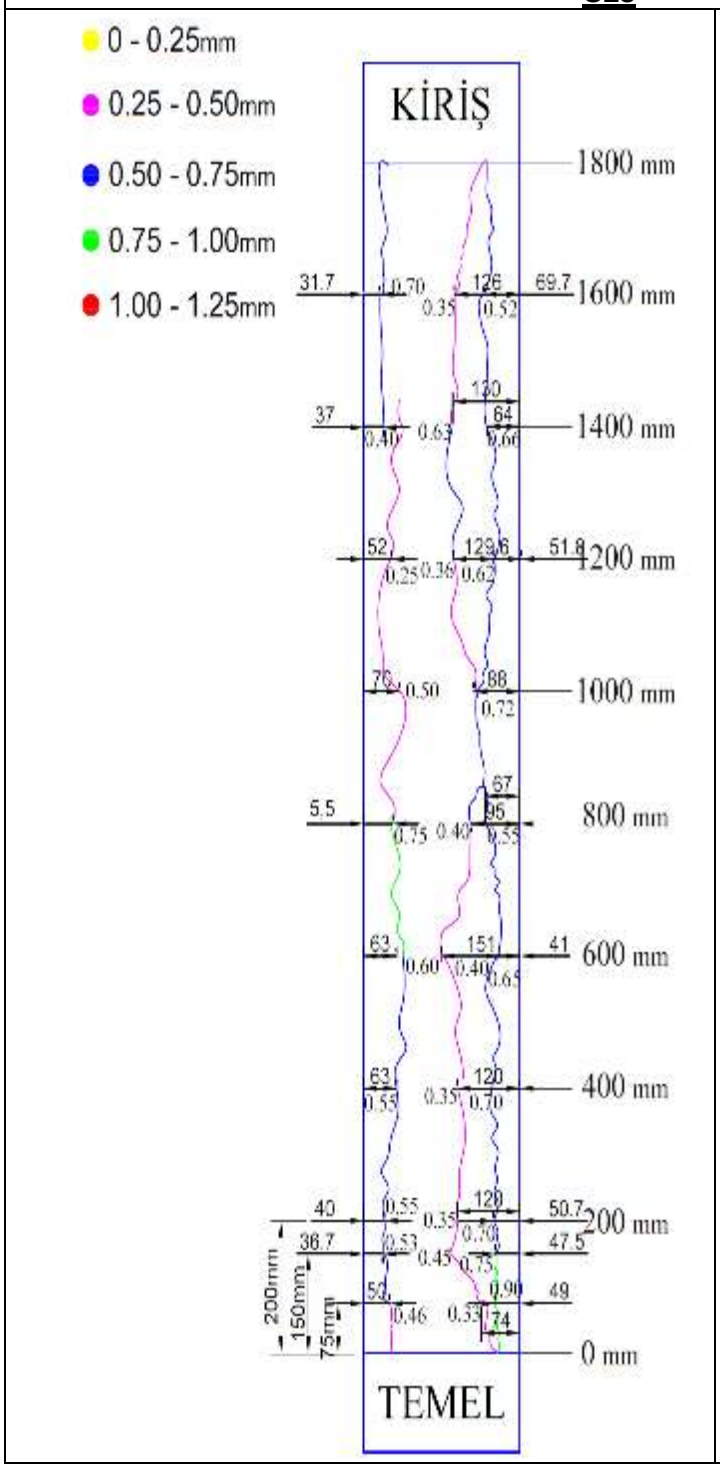

0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm



C30 betonarme kolonları

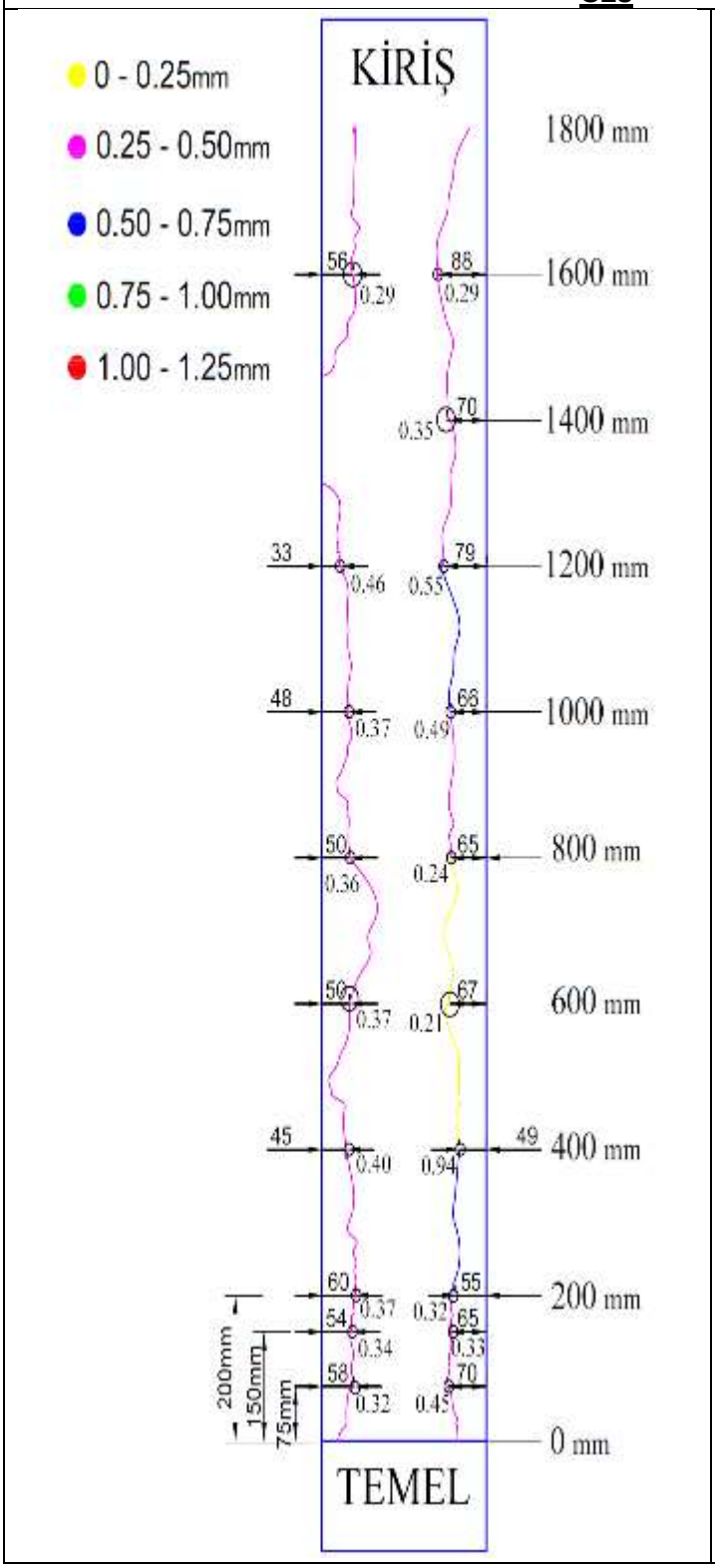
C22	
	

C25


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm

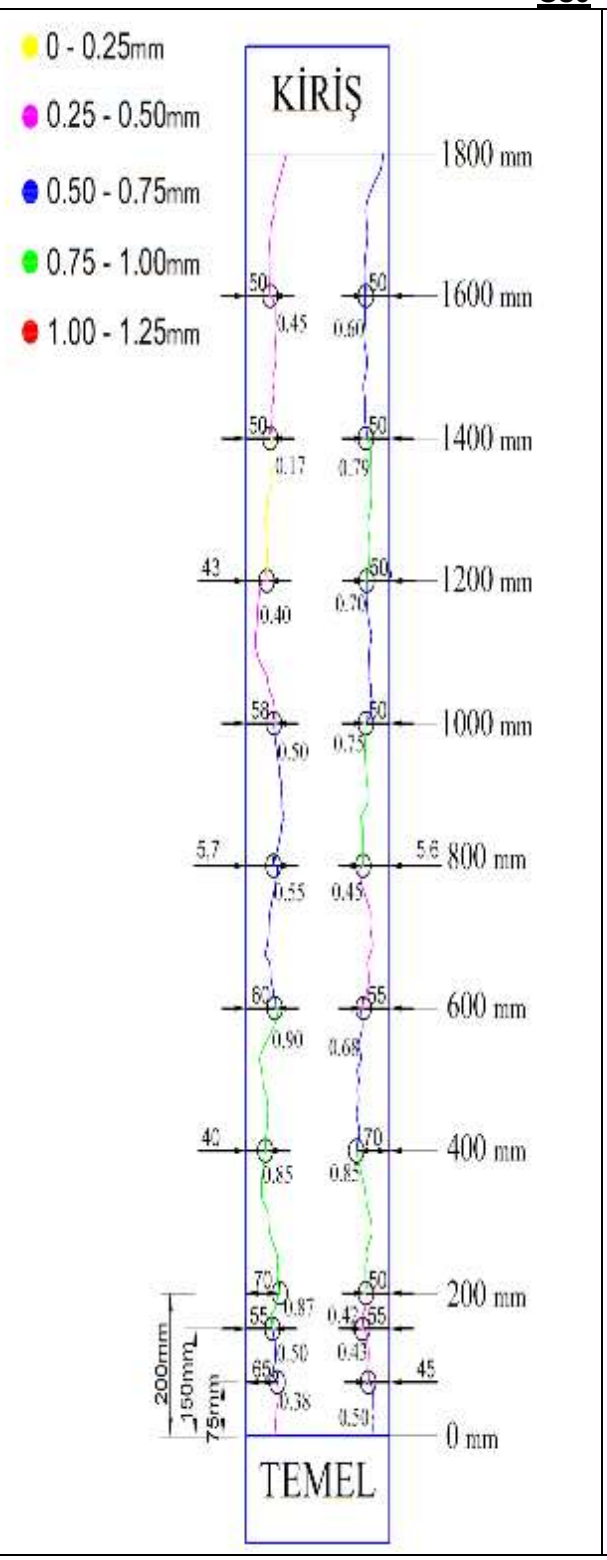


C28


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm



C30


0 - 0.25mm
0.25 - 0.50mm
0.50 - 0.75mm
0.75 - 1.00mm
1.00 - 1.25mm
KİRİŞ
1800 mm
1600 mm
1400 mm
1200 mm
1000 mm
800 mm
600 mm
400 mm
200 mm
0 mm
TEMEL
200mm
150mm
75mm

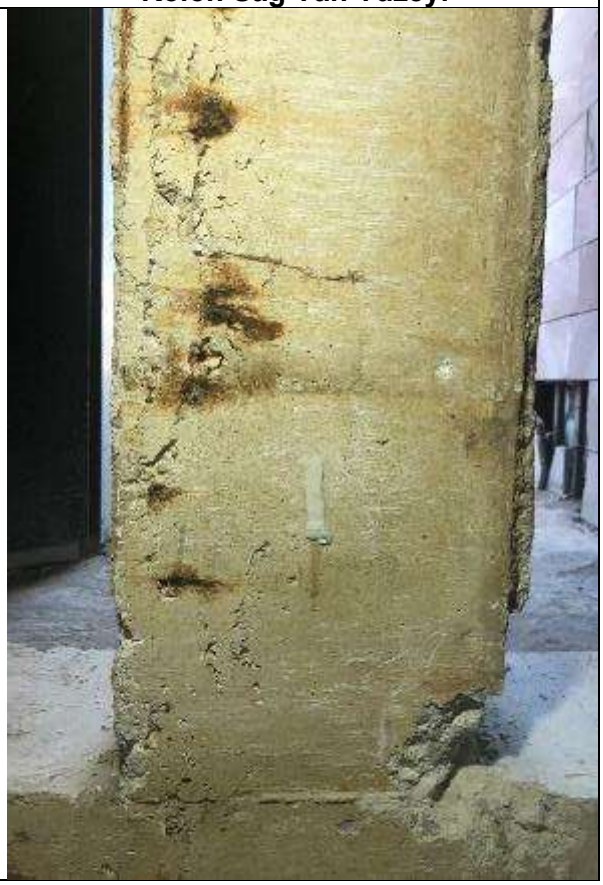


EK.3: Betonarme Kolonları İçin Yükleme Sonrası Plastik Mafsal Boyunca Çatlak Desenleri

<table>
<tr><th colspan="2">C1 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %20, CL_L= %0, CL_S= %0)</th></tr>
<tr><th>İtme Yönü</th><th>Çekme Yönü</th></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><th>Kolon Sol Yan Yüzeyi</th><th>Kolon Sağ Yan Yüzeyi</th></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
</table>

C5 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %20, CL_L= %5.44, CL_S= %10.26)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

C6 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %40, CL_L= %0, CL_S= %0)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

C10 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %40, CL_L= %4.82, CL_S= %10.54)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

C11 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %20, CL_L= %0, CL_S= %0)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

C15 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %20, CL_L= %7.04, CL_S= %11.52)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

C16 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %40, CL_L= %0, CL_S= %0)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

C20 (20 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %40, CL_L= %5.91, CL_S= %10.89)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

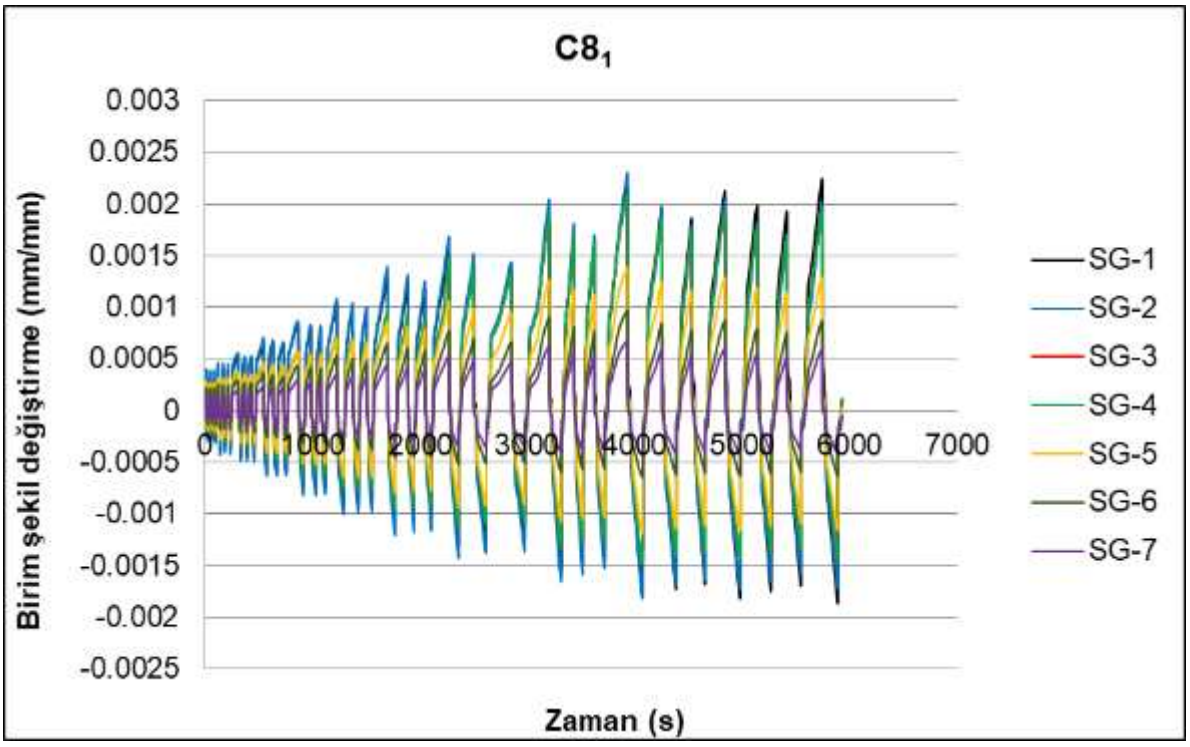
C21 (30 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %20, CL_L= %0, CL_S= %0)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

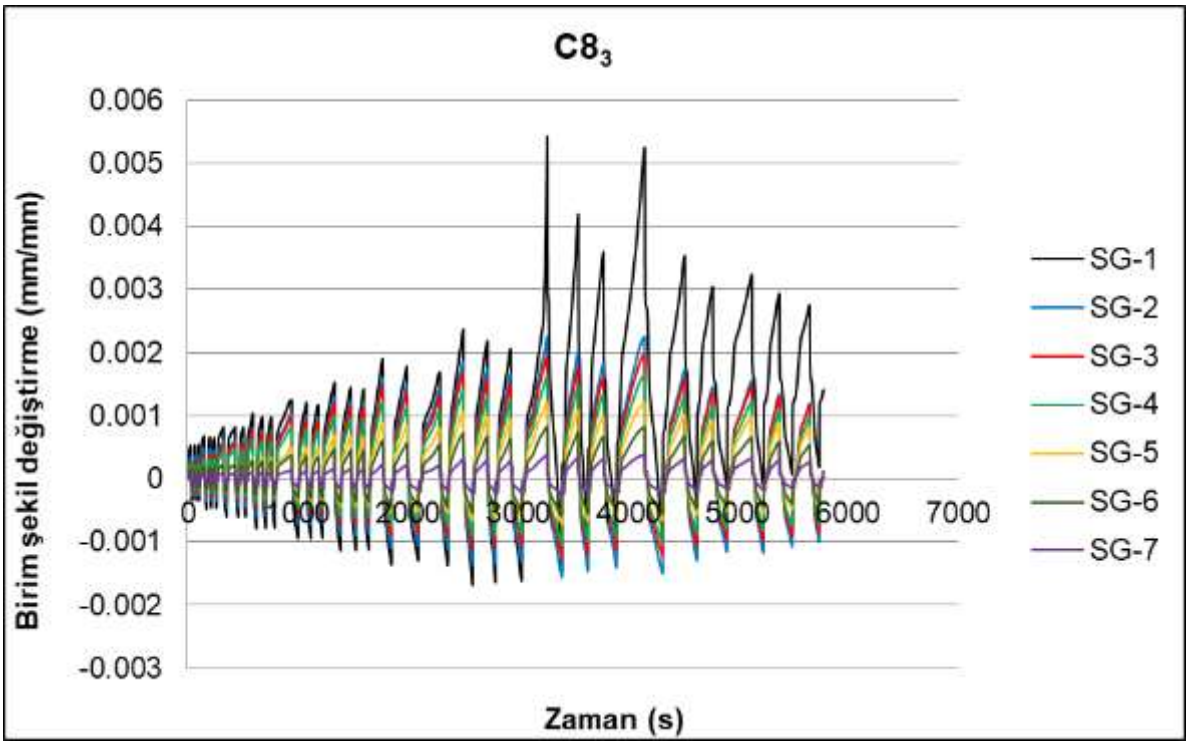
C25 (30 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %20, CL_L= %6.36, CL_S= %11.75)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

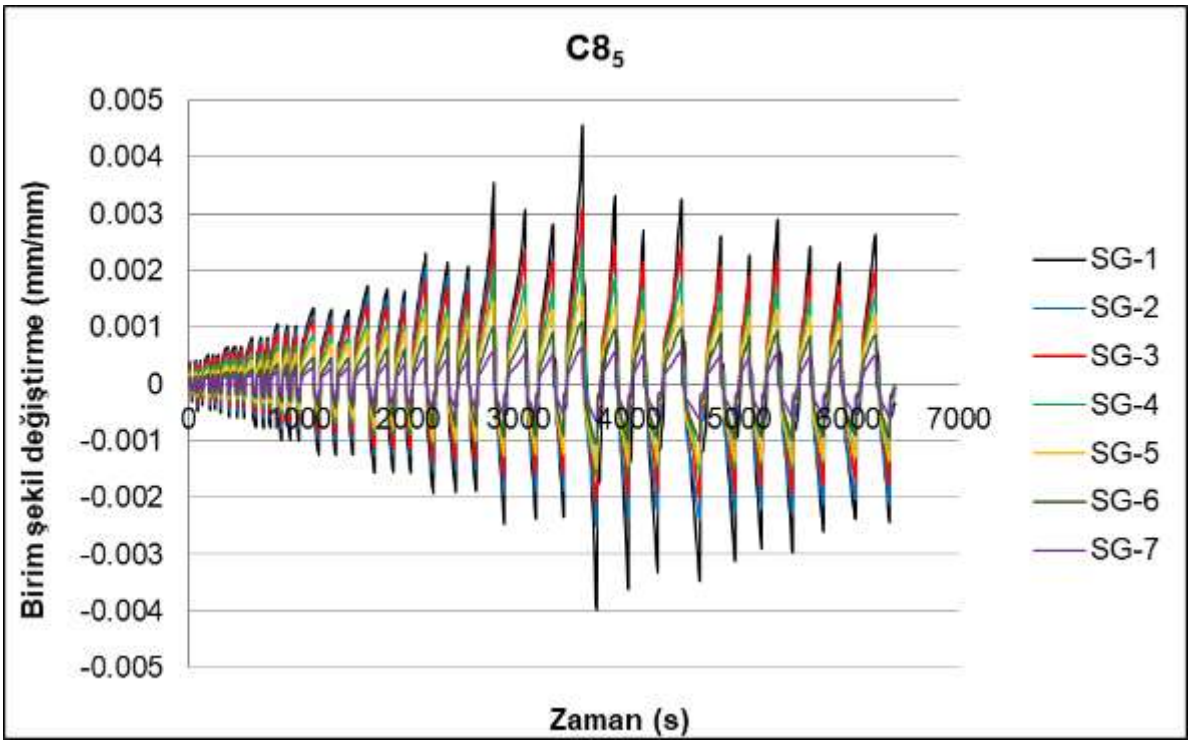
C26 (30 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %40, CL= %0)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

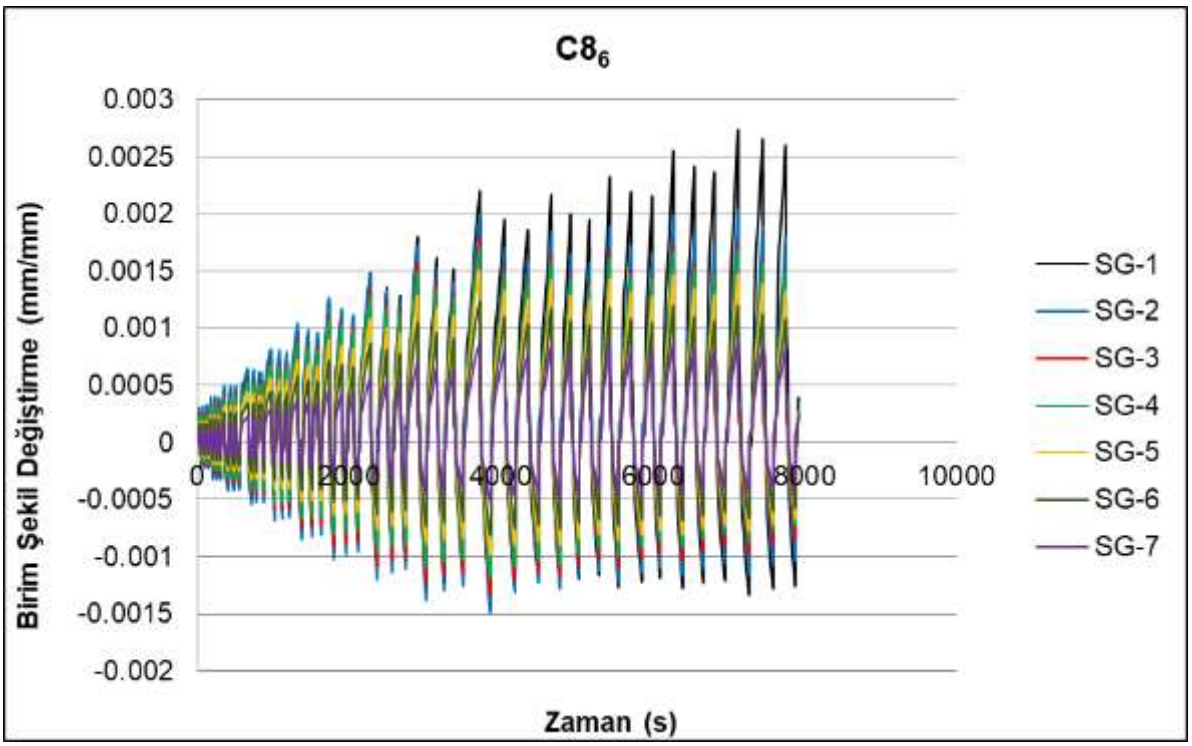
C30 (30 MPa, $N/A_c.f_{ck}$= %40, CL_L= %6.02, CL_S= %12.36)	
İtme Yönü	**Çekme Yönü**
	
Kolon Sol Yan Yüzeyi	**Kolon Sağ Yan Yüzeyi**
	

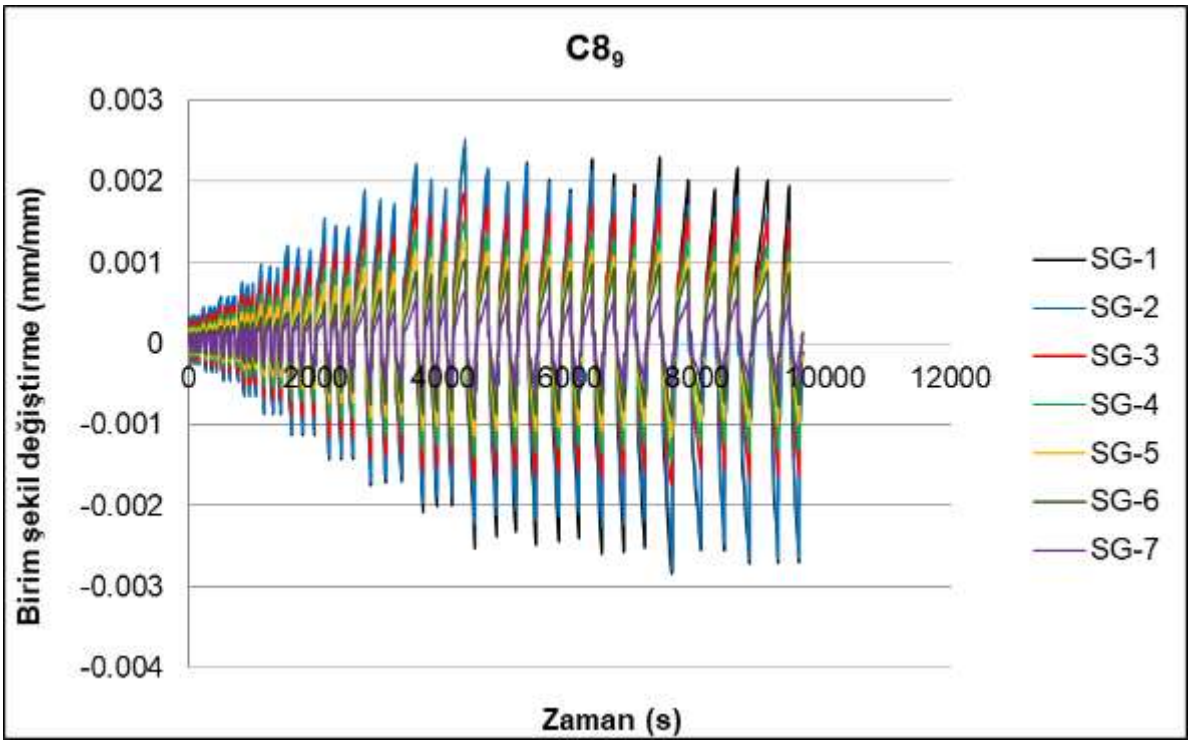
EK.4: Betonarme Kolon Donatılarındaki Zaman-Gerinim Grafikleri

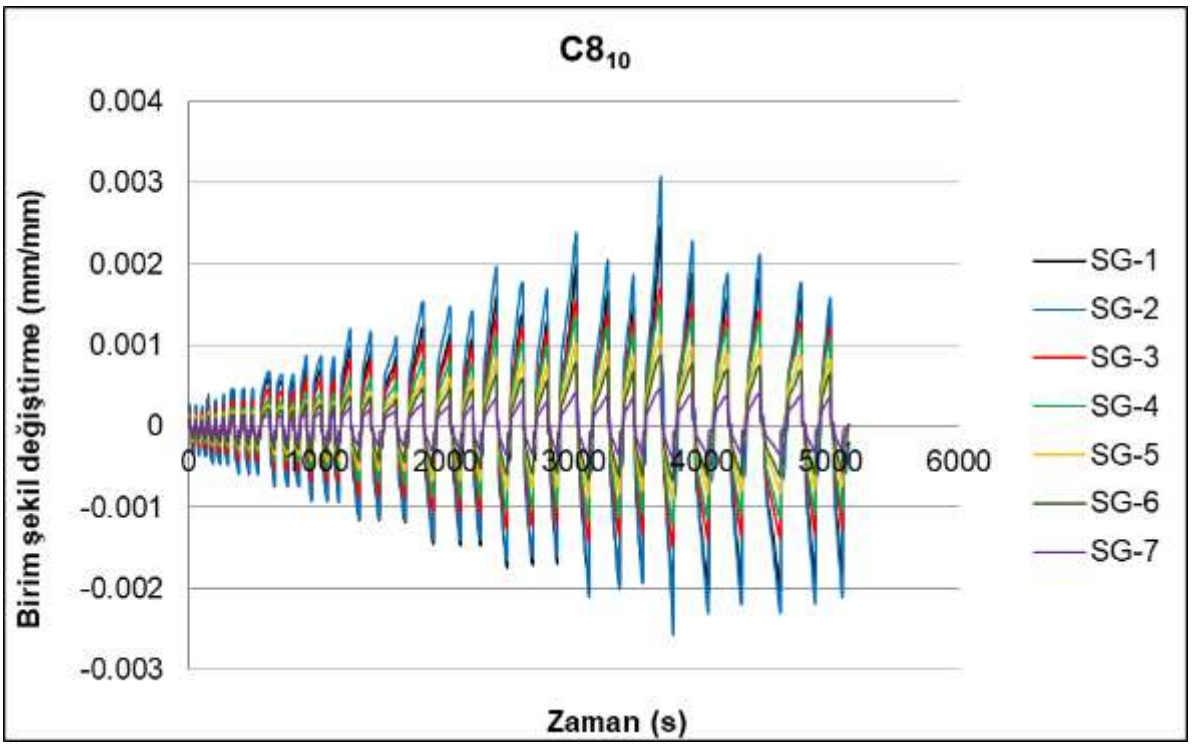


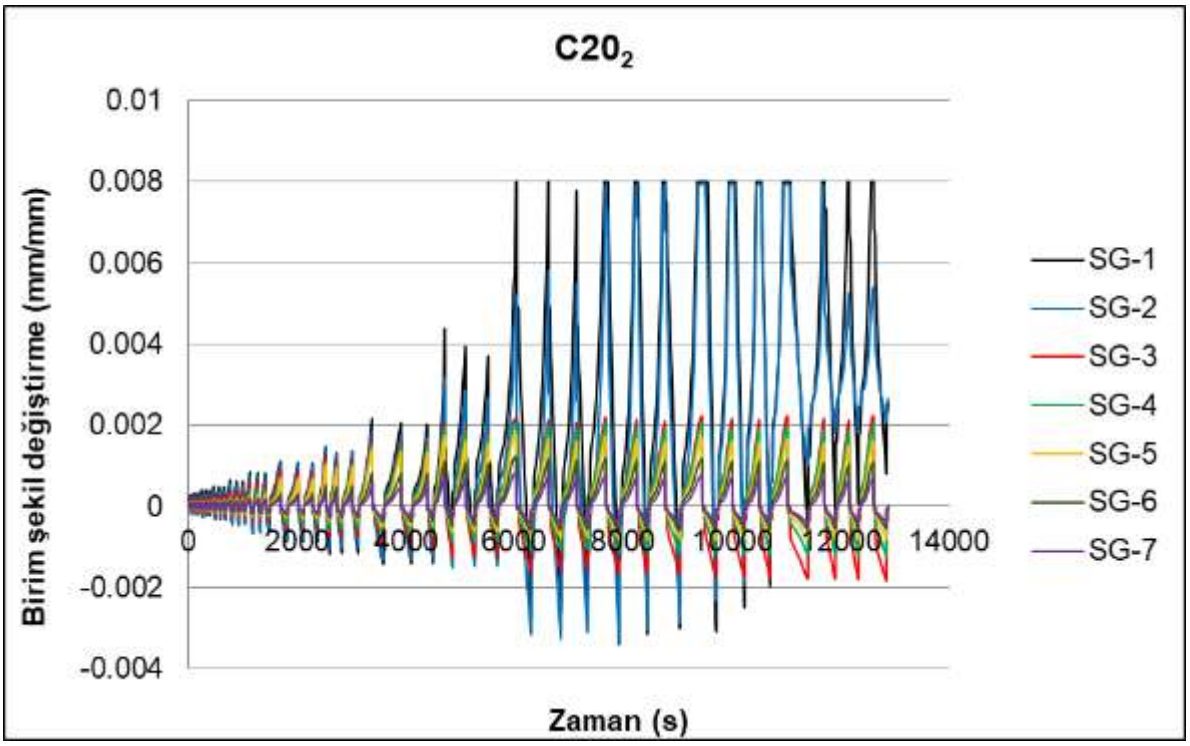


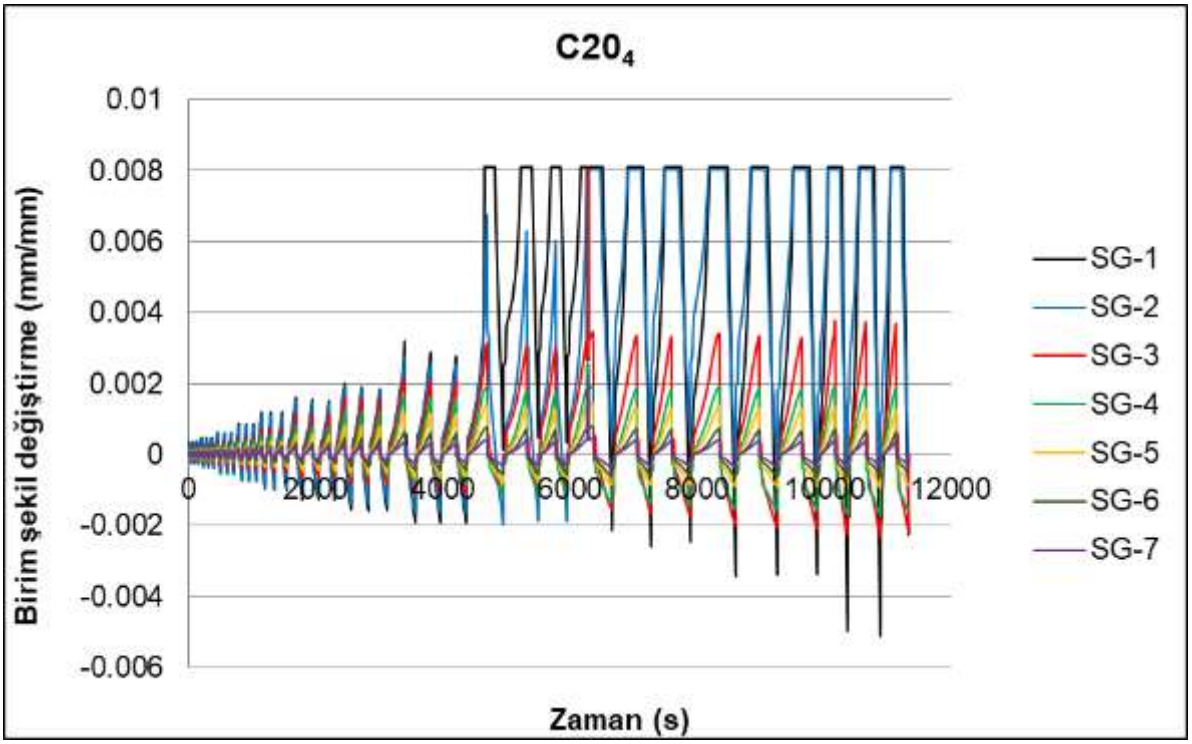

C8$_5$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
-0.001
-0.002
-0.003
-0.004
-0.005
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

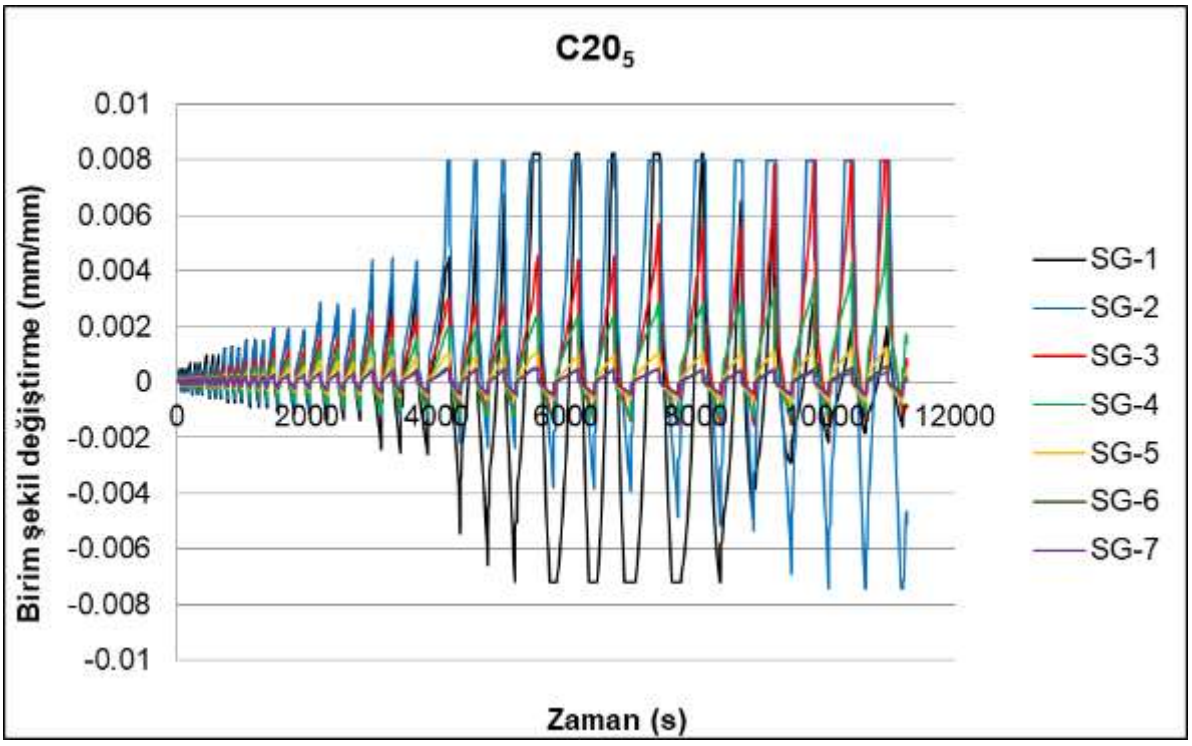

C8$_6$
Birim Şekil Değiştirme (mm/mm)
0.003
0.0025
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
-0.0005
-0.001
-0.0015
-0.002
0
2000
4000
6000
8000
10000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

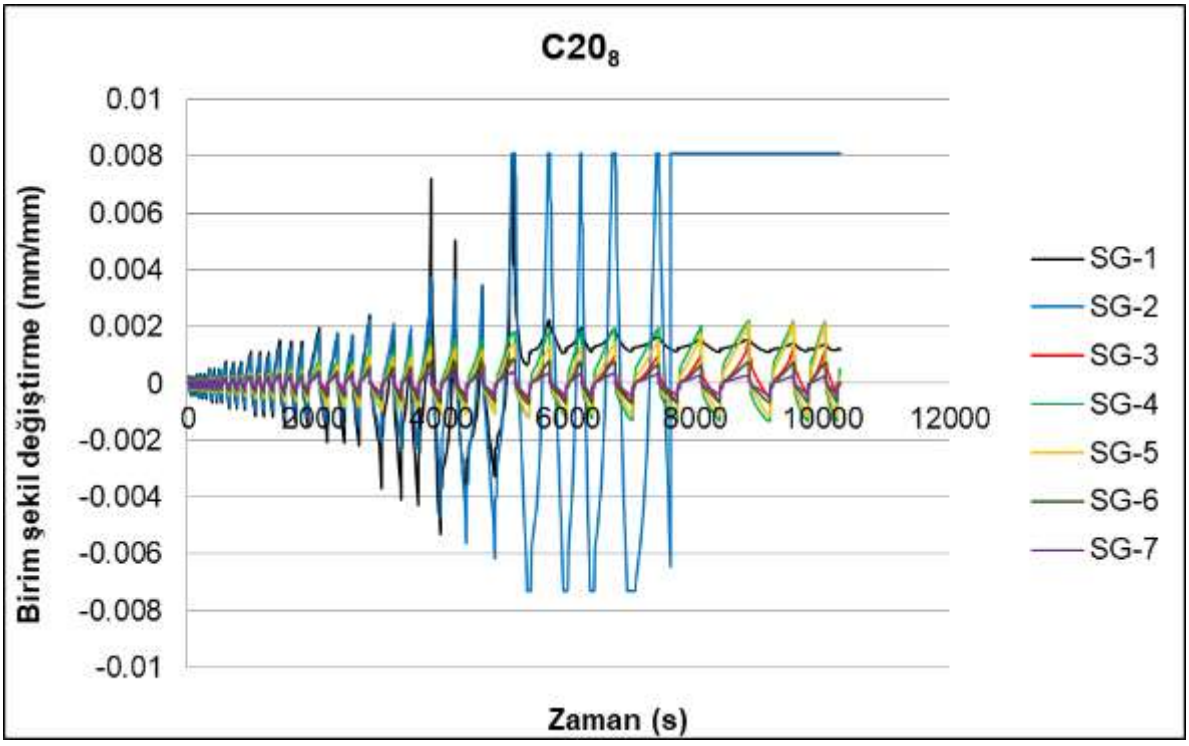

C8₉
0.003
0.002
0.001
0
-0.001
-0.002
-0.003
-0.004
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

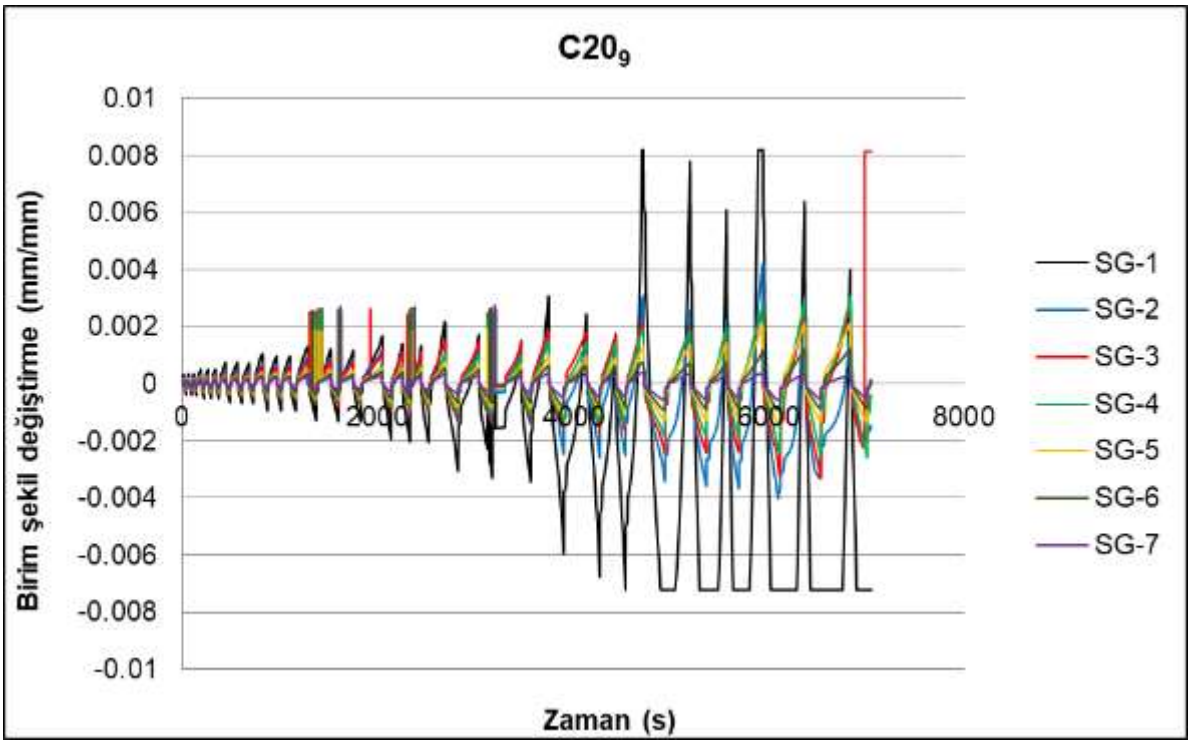

C8₁₀
0.004
0.003
0.002
0.001
0
-0.001
-0.002
-0.003
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

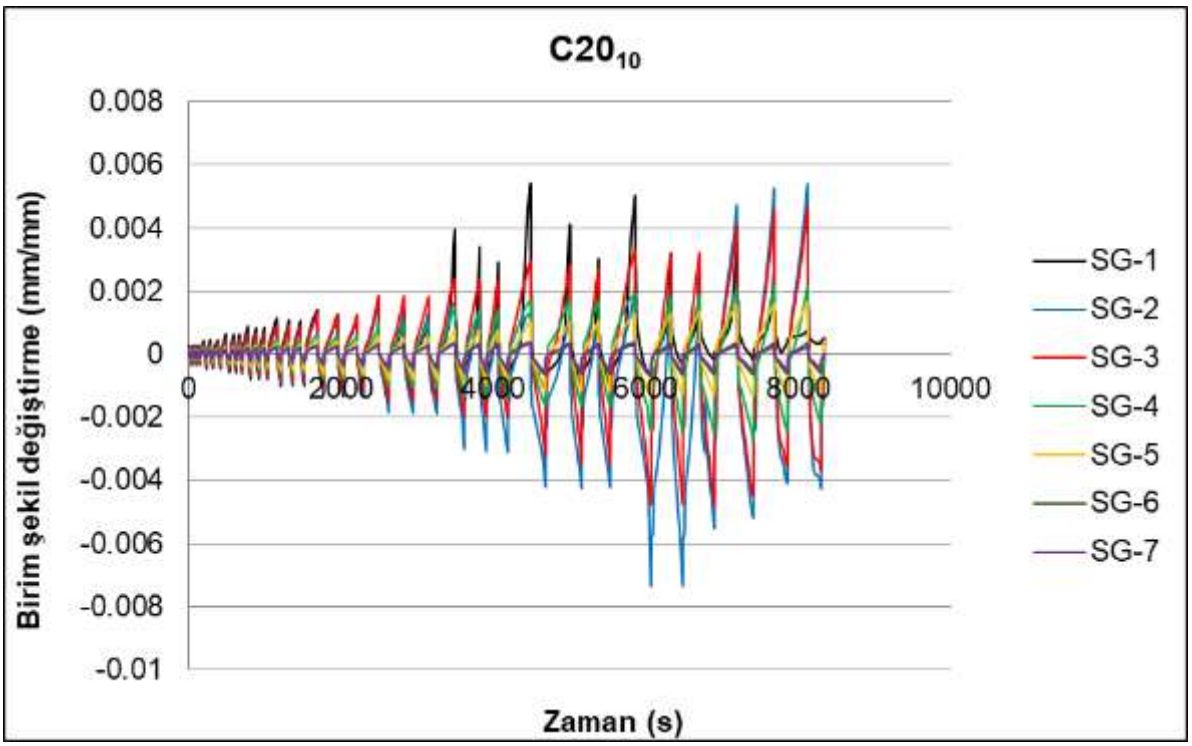

C20₂
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
14000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

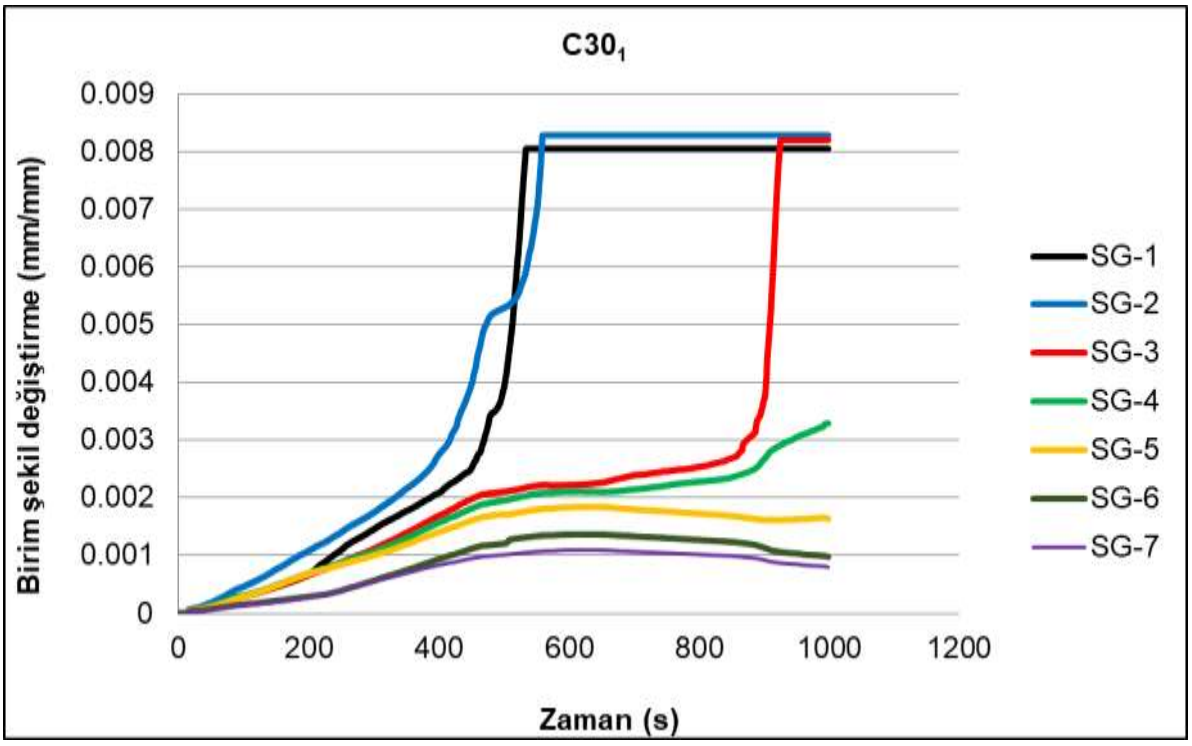

C20₄
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

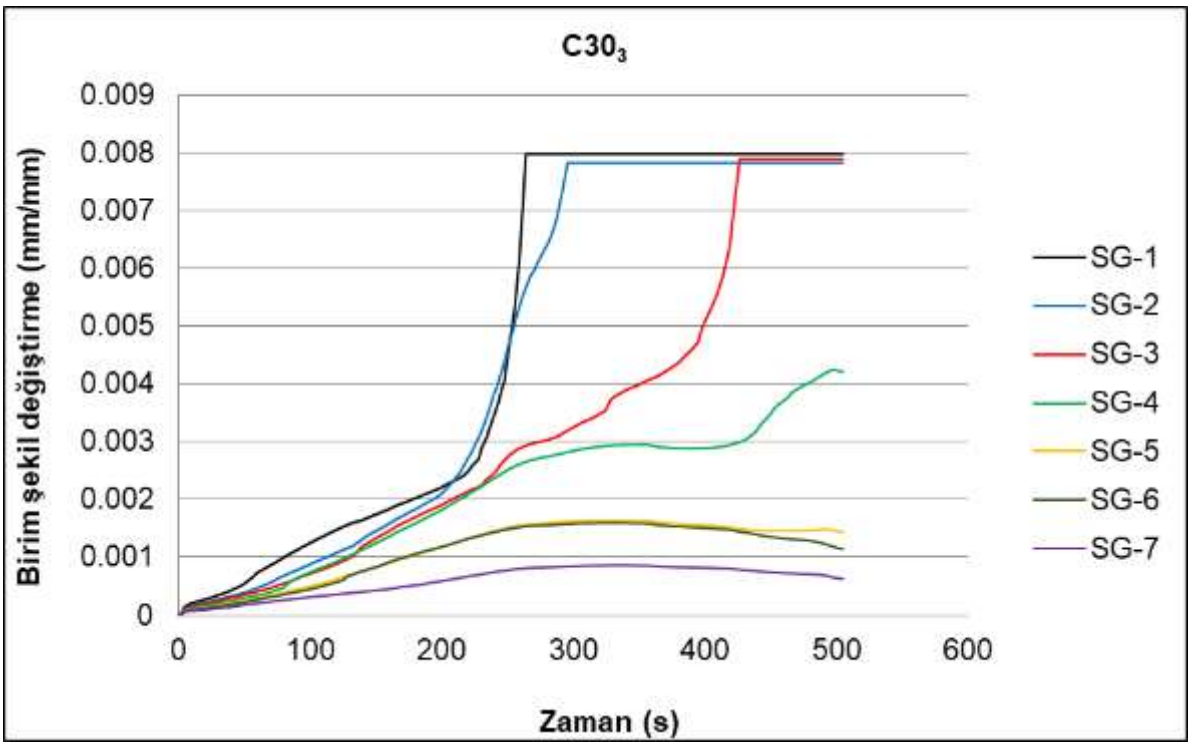

C20$_5$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

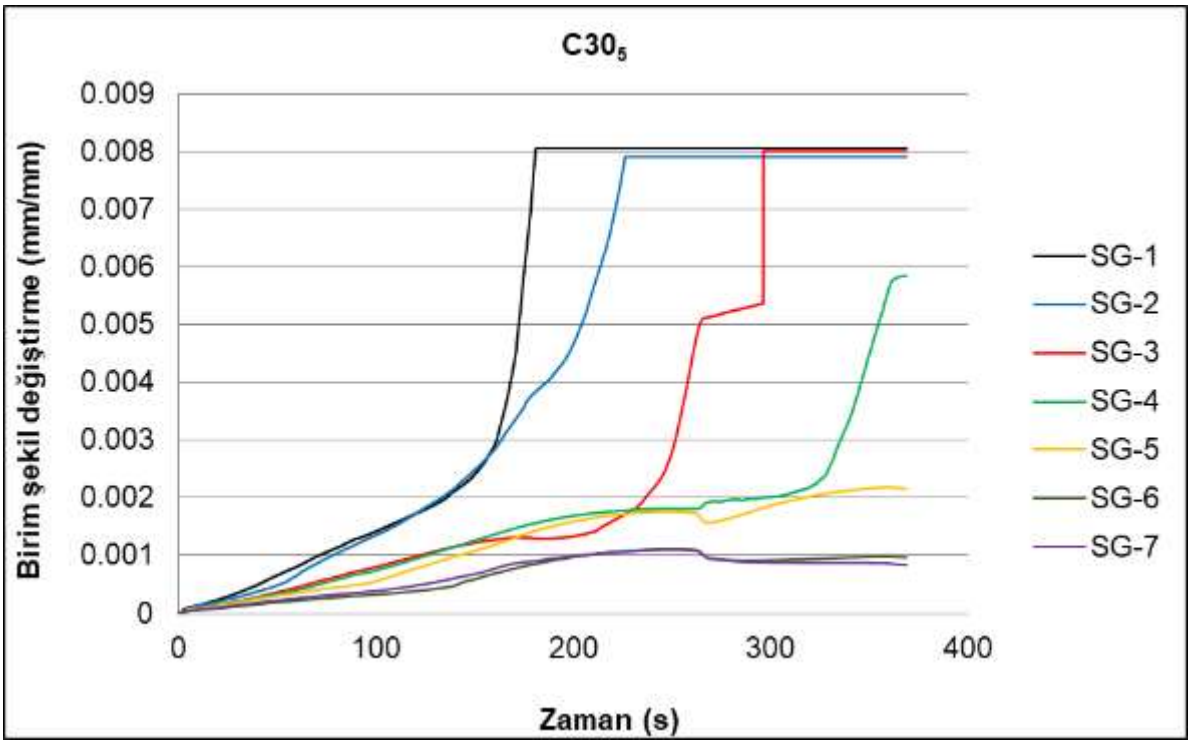

C20$_8$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

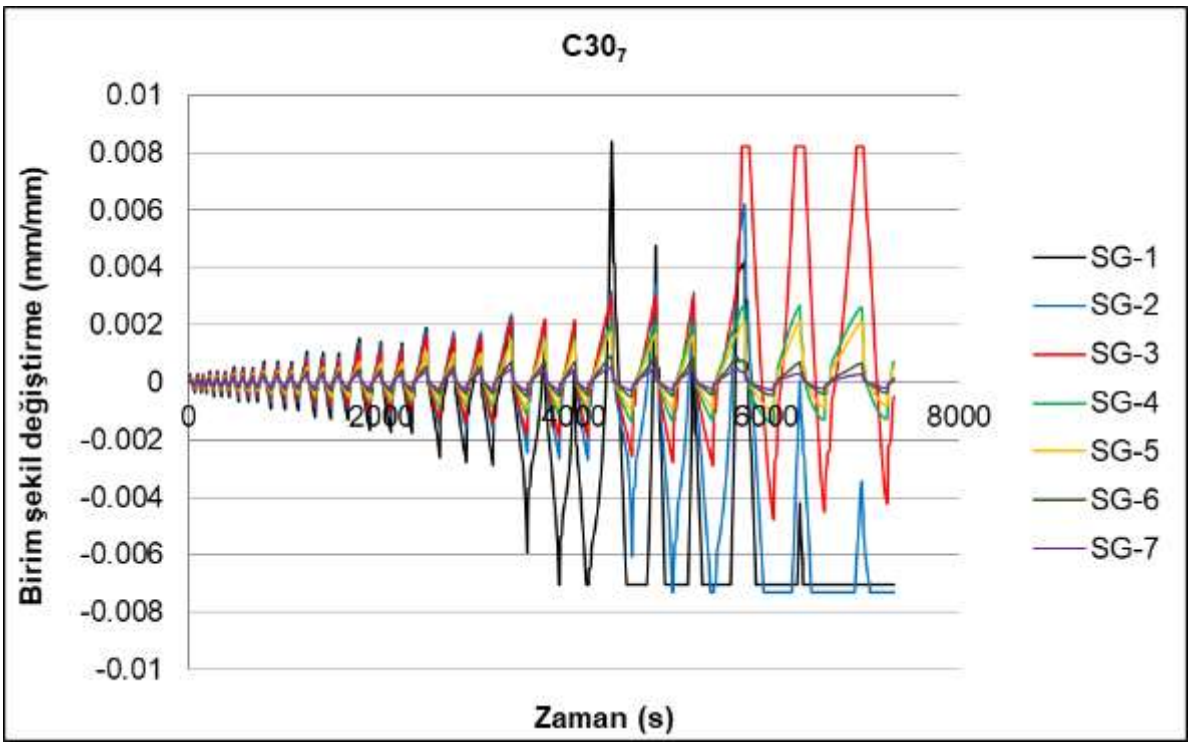

C20$_9$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
2000
4000
6000
8000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

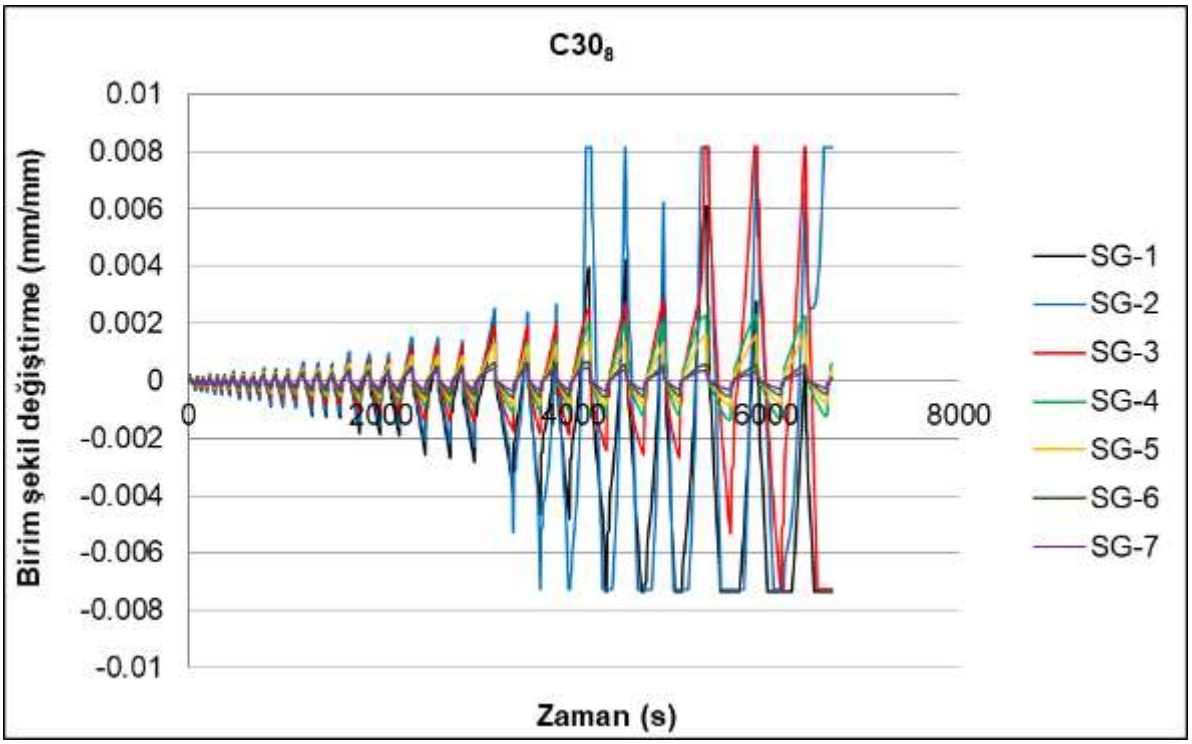

C20$_{10}$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
2000
4000
6000
8000
10000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

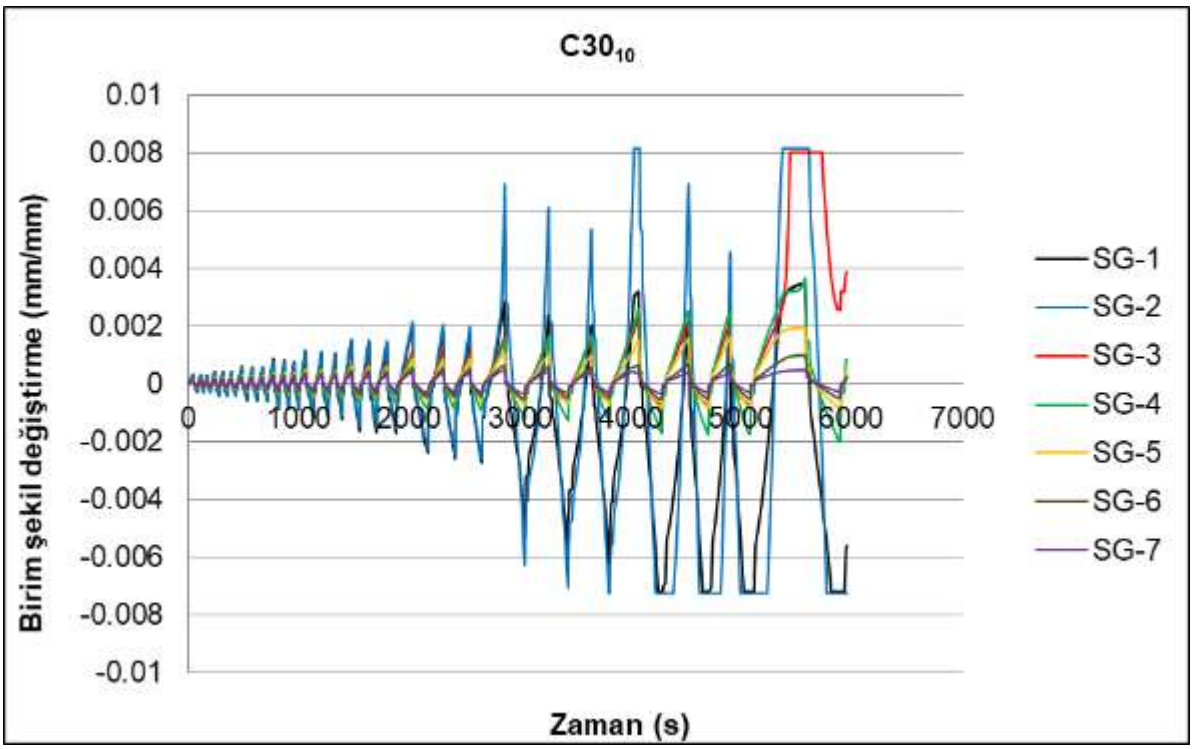

C30₁
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0
200
400
600
800
1000
1200
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7


C30₃
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0
100
200
300
400
500
600
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7


C30$_5$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0
100
200
300
400
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7


C30$_7$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
2000
4000
6000
8000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7


C30$_8$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
2000
4000
6000
8000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7


C30$_{10}$
Birim şekil değiştirme (mm/mm)
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.01
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
Zaman (s)
SG-1
SG-2
SG-3
SG-4
SG-5
SG-6
SG-7

EK.5: Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolanları İçin Geliştirilen Ampirik Modellerin Özet Sunumu

1. BETONARME DONATILARINDAKİ ORTALAMA KESİT ALANINDAKİ KAYBI ÇATLAK GENİŞLİĞİNE BAĞLI OLARAK TAHMİN ETMEK İÇİN GELİŞTİRİLEN AMPİRİK MODELLER.

C8 için;

$$\Delta A_{si} = \frac{W_{cr}}{-0.0079 + 0.19 \times W_{cr} - 0.17 \times W_{cr}^2} \quad (4.12)$$

C20 ve C30 için;

$$\Delta A_{sj} = \frac{W_{cr}}{-0.046 \times W_{cr} + 0.058} \quad (4.13)$$

$$\Delta A_s\ kolon = 0.55 \times \Delta A_{si,j} + 0.04 \quad (4.14)$$

2. BETONARME KOLONLARIN KOROZYON ORANINA BAĞLI OLARAK AKMA VE NİHAİ YÜK KAPASİTELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ.

$$F_{yc} = F_{y0}\left(\frac{1}{1 + 0.039 \times CL_L}\right) \quad (4.24)$$

$$F_{uc} = F_{u0}\left(\frac{1}{1 + 0.033 \times CL_L}\right) \quad (4.25)$$

3. BETONARME KOLONLARIN KOROZYON ORANINA BAĞLI OLARAK SÜNEKLİLİK ORANLARININ TAHMİN EDİLMESİ.

$$\mu_c = \mu_0(0.91^{CL_L}) \quad (4.26)$$

4. BETONARME KOLONLARIN KOROZYON ORANINA BAĞLI OLARAK ENERJİ YUTMA KAPSİTELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ.

C8 için;

$$E_c = E_0\left(1 + 0.34 \times CL_L - 0.19 \times CL_L^{1.5}\right) \quad (4.28)$$

C20 ve C30 için;

$$E_c = E_0 \frac{1}{1 + 0.024 \times CL_L + 0.035 CL_L^2} \quad (4.29)$$

5. KOROZYONA MARUZ KALMIŞ C8 VE C30 BETONARME KOLONLARININ ORTALAMA NORMALİZE EDİLMİŞ İKİNCİL RİJİTLİKLERİNİN (K_{sc}) PASLANMAMIŞ BETONARME KOLONLARININ ORTALAMA NORMALİZE EDİLMİŞ İKİNCİL RİJİTLİKLERİNE (K_{sc}) ORANLARINI TAHMİN EDİLEBİLMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MODEL.

$$\frac{K_{sc}}{K_{s0}} = (1 + CL_L)^{-0.24} \quad (4.32)$$

6. KOROZYON ORANINA BAĞLI OLARAK BETONARME KOLONLARINDA ADERANS KUVVETİ VE DONATI SIYRILMA DEĞERLERİNİN TAHMİN EDİLMESİ.

Elastik aderans gerilmesini karakteristik beton basınç dayanıma bağlı olarak tahmin etmek için geliştirilen ampirik model:

C8, C20 ve C30 için;

$$u_b = \frac{12 \times f_c'}{3 + f_c'} \tag{4.48}$$

Korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarının aderans gerilmesini (u_{bc}) üç farklı beton basınç dayanımında, iki farklı eksenel yük oranı ve farklı korozyon oranları için geliştirilen model:

C8, C20 ve C30 için;

$$\frac{u_{bc}}{u_b} = 1 - \left(\frac{12 \times f_c'}{3 + f_c'} \times 0.025 CL_L\right) + 0.014 CL_L^2 + 0.091 \times CL_L \tag{4.51}$$

Aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi:

Eğer CL_L= %0; C8, C20 ve C30 için;

$$sıyrılma = 0.026 \times u_b \tag{4.52}$$

Eğer CL_L> %0 C8 için;

$$sıyrılma = \frac{17.79}{u_{bc}} - 2.14 \tag{4.53}$$

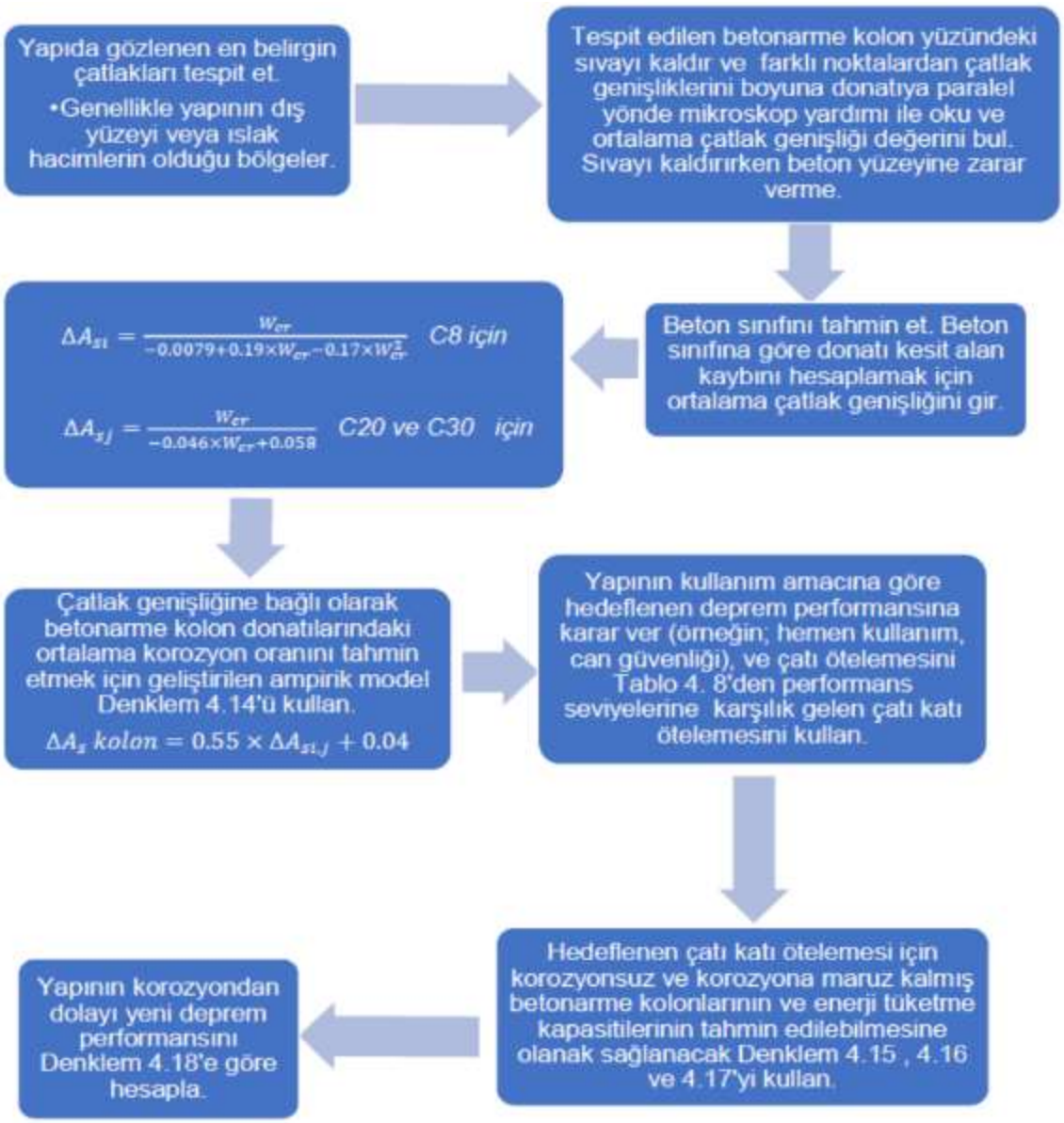
Eğer CL_L> %0 C20 için;

$$sıyrılma = \frac{0.073\, u_{bc}}{-4.77 + u_{bc}} \tag{4.54}$$

Eğer CL_L> %0 C30 için;

$$sıyrılma = \frac{0.177\, u_{bc}}{-2.64 + u_{bc}} \tag{4.55}$$

7. BİRİNCİL KOROZYON ÇATLAK GENİŞLİK ORANINA BAĞLI OLARAK YAPI PERFROMANS SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ.



EK.6: Proje Kapsamında Tamamlanan ve Devam Tezler

- Yüksek Lisans - **Alper Çelik**: Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolonlarda Plastik Mafsal Boyunun Tahmin Edilmesi, 2017/2021, devam ediyor.

- Yüksek Lisans - **Mehmet Fırat Mermit**: Korozyona Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonlarda Aderans-Kayma İlişkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, 2017/2019.

- Yüksek Lisans - **Ramen Kohistani**: Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolonların Monotonik Yükleme Etkisi Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi, 2017/2019.

- Yüksek Lisans-**Aqludin Karami**: Korozyona Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonlarının Sismik Performans Seviyelerinin Birincil Çatlak Genişliğine Bağlı Olarak Tahmin Edilmesi, 2017/2019.

EK.7: Proje Kapsamında Üretilen Bilimsel Yayınlar ve Yayılımlar

- Hakan Yalciner, Atila Kumbasaroglu, Alper Celik. ”Bond strength of corroded RC columns”. ***ACI Structural Journal***. Değerlendirmede.

- Hakan Yalciner, Atila Kumbasaroglu (2020). “Experimental evaluation and modelling of corroded reinforced concrete columns”. ***ACI Structural Journal***,117(4), 61-76.

- Hakan Yalciner, Atila Kumbasaroglu, Aqludin Karimi (2019). “Prediction of Seismic Performance Levels of Corroded Reinforced Concrete Columns as a Function of Crack Width”. ***ASTM-Advances in Civil Engineering Materials***, 8(3), 376-397.

- Hakan Yalciner, Atila Kumbasaroglu, Mehmet Fırat Mermit, Rameen Kohistani, Aqludin Karimi (2019). “Paslanmaya Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonların Monotonik Yükleme Etkisi Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi: Korozyon Çalışmaları İçin Öneriler”. ***Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 12(2), 695-713.

- Mehmet Fırat Mermit, Rameen Kohistani, Aqludin Karimi, Hakan Yalciner, Atila Kubasaroglu (2018). “Korozyona maruz kalmış betonarme kolonların monotonik yükleme etkisindeki davranışı”. ***International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018)***, 22-23 Kasım 2018, Ankara, Turkiye.

- Doç. Dr. Hakan YALÇINER tarafından proje kapsamında Amerika Nevada üniversitesinde akademik personel ve öğrenciler ile paylaşım semineri (15.10.2018).

EK.8: Proje Kapsamındaki Yayılımlar

- Ulusal medyada haber: Betonu 50 yıl yaşlandırıp deprem araştırmalarına katkı sunuyorlar.

- Ulusal medyada haber: Doç. Dr. Yalçıner Amerika Beton Enstitüsü Korozyon komitesine oy kullanan komite üyesi olarak seçilmesi ve korozyon modellerinin komite çalışmasına katılma.